



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAYSSA ALVES DA SILVA SOUSA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE SOLOS TROPICAIS FINOS PARA USO NA
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Recife

2021

MAYSSA ALVES DA SILVA SOUSA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE SOLOS TROPICAIS FINOS PARA USO NA
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho – UFPE

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Laura Maria Goretti da Motta - UFRJ

Recife

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

S725c Sousa, Mayssa Alves da Silva.
 Contribuição ao estudo de solos tropicais finos para uso na pavimentação
 rodoviária. / Mayssa Alves da Silva Sousa. – 2021.
 369 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.
 Coorientadora: Profa. Dra. Laura Maria Goretti da Motta.
 Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.
 Inclui referências e apêndices.

 1. Engenharia civil. 2. Pavimento rodoviário. 3. Solos tropicais. 4. Solos finos.
 5. MCT. 6. Módulo resiliente. 7. Deformação permanente. I. Coutinho, Roberto
 Quental (orientador). II. Motta, Laura Maria Goretti da (coorientadora).
 III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2022-51

MAYSSA ALVES DA SILVA SOUSA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE SOLOS TROPICAIS FINOS PARA USO NA
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 22/12/2021

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho – UFPE

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Laura Maria Goretti da Motta - UFRJ

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Liedi Legi Bariani Bernucci (examinadora externa)
Universidade de São Paulo

participação por videoconferência
Prof. Dr. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães (examinador externo)
Instituto Militar de Engenharia

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (examinadora externa)
Universidade Federal do Ceará

participação por videoconferência
Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a minha mãe (Francisca) e meu esposo (José Carlos) visto que, mesmo sem entender completamente no que eu estava trabalhando, sempre me apoiaram.

Dedico este trabalho também aos meus orientadores, Prof. Roberto e Prof^a Laura – esse trabalho não é só meu, esses dois seres humanos que me acolheram de uma forma que jamais esperava! Cada orientação, conselho e palavras de incentivo foi crucial.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo e todos, agradeço a Deus, meu criador, onisciente, onipotente e onipresente! Não há palavras no mundo que expressam minha gratidão a ti meu Pai. Sei que nada disso seria possível se o Senhor não tivesse permitido e me guiado – em cada detalhe eu vi o seu cuidado e sou eternamente grata por isso.

Agradeço à minha família pela compreensão, principalmente nos momentos de ausência. Espero que daqui para frente possamos aproveitar um pouco mais do tempo que temos juntos!

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco – UFPE por ter aberto as portas do seu renomado curso de Pós-Graduação para mim. Agradeço aos professores que fazem parte do corpo docente da área de Geotecnia pela transmissão dos seus conhecimentos: foi muito bom aprender com os senhores.

Agradeço ao meu orientador Professor Roberto: sem palavras que sejam suficientes para expressar minha gratidão ao senhor. Me aceitou mesmo antes de me conhecer pessoalmente e sempre me tratou com muito respeito e equidade. Dono de uma visão ampla e de uma gama de conhecimento que me faz o admirar muito. Reconheço que aprendi e cresci pessoalmente e profissionalmente através dos seus ensinamentos. E sem cada orientação e conselho dado, este trabalho não sairia do rascunho. Muito obrigada Professor Roberto.

Agradeço a minha orientadora, Profa Laura, que eu já admirava muito antes de ela saber que eu existia e nem imaginava um dia ter o privilégio de ter sua orientação. O Professor Roberto acertou em cheio e me deu não só o apoio que eu precisava para a tese, mas uma amiga, companheira de todas as horas, sempre disponível para tirar minhas dúvidas, revisar os capítulos da tese e em momentos difíceis me dirigir palavras de apoio, que só Deus sabe o quanto foram importantes para mim. Obrigada por tudo Professora Laura.

Agradeço à FACEPE pela bolsa de estudos e por apoiar este projeto.

Agradeço à renomada banca examinadora (Prof.^a Liedi Bernucci, Prof. Antonio Guimarães, Prof.^a Verônica Castelo Branco e Prof. Maurício Andrade) por se disponibilizarem em avaliar e contribuir com este trabalho.

Agradeço aos professores Antonio Guimarães, Prof.^a Lilian Rezende e Prof. Jorge Ceratti pelas valiosas recomendações concedidas durante o exame de qualificação.

Agradeço ao responsáveis e técnicos do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI/ UFPE) por abrirem as portas para que eu pudesse desenvolver a campanha de ensaios básicos. Agradeço ao técnico Francisco por me ajudar com os ensaios de LL e LP e ao técnico

Gutenberg, meu companheiro inseparável no LSI, ajudamo-nos, um ao outro, em cada ensaio, que foi literalmente a força que eu precisava para executar principalmente os ensaios mais pesados.

Obrigada ao Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ – nas pessoas de Mariluce, Washington, Roberto, Allan e Prof^a Laura. Serei eternamente grata por toda ajuda que me deram para realização dos ensaios triaxiais: sem vocês também não teria chegado até aqui.

Agradeço ao professor Antônio Acácio por ter liberado o Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE para que eu pudesse realizar os ensaios de DRX e agradeço em especial ao Victor Estollano por me orientar em como fazer e analisar os difratogramas.

A campanha de ensaios químicos foi realizada no Laboratório de Química Ambiental dos Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Agradeço ao Prof. Marcelo do Departamento de Geologia pela ajuda com a interpretação dos minerais e argilominerais presentes nas imagens microscópicas. O meu muito obrigada aos técnicos e responsáveis pelo Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da UFPE por disponibilizar sem custo algum o Stereo Microscópio para extração das imagens dos solos desta pesquisa.

Agradeço à minha amiga Juciela, oh Ju!! Outra benção que professor Roberto me deu. Talvez ele tenha pensado que me daria só uma colega de turma, mas você se tornou uma amiga-irmã, a quem aprendi a amar. Sinto muitas saudades suas.

Agradeço aos demais amigos que adquiri nesse doutorado (Monalyssa, Tahyara, Felipe, Bruno, Wilson, Artur, Isabela, Camila), amigos que me incentivaram e alguns deles até me ajudaram no árduo processo de destorroar os solos, valeu!

Agradeço ao GEGEP, pelos amigos que também tive a sorte de me apoiarem através deste grupo: Danisete, Higo, Fabiano, Amanda, Iran, Ivana, Layza, Betânia, Sérgio, Fran, Manoely, Claudinha... o meu muito obrigada.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Segundo dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT), a matriz de transportes de cargas brasileira mostra a preferência do país pelo modo rodoviário, caracterizando-o como o de maior representatividade no âmbito nacional. A malha rodoviária é a mais extensa dentre as demais existentes no Brasil e devido a essa grande demanda pelas rodovias, é comum a construção de novas estradas ou a restauração de vias antigas, e, em ambos os casos, utilizam-se grandes volumes de materiais para compor as camadas do pavimento. Este fato se torna um gargalo para os projetos, uma vez que os sistemas de classificação e seleção tradicionais de solos para a pavimentação (USCS e TRB) indicam basicamente apenas materiais granulares para tal uso. Os projetos rodoviários executados no estado de Pernambuco ainda seguem esses procedimentos, que não se adequam à realidade dos solos brasileiros, visto que se baseiam em normas desenvolvidas para solos de clima temperado. Assim, uma grande parte dos solos disponíveis na região são descartados ou subutilizados. No entanto, ao longo de décadas, várias pesquisas têm indicado o uso de solos finos que não se encaixam dentro dos critérios de seleção tradicionais, mas que apresentam bom desempenho mecânico. Nesta pesquisa buscou-se contribuir na avaliação de solos tropicais finos regionais para uso na pavimentação rodoviária. Para isso, realizou-se uma extensa campanha experimental de análise do comportamento geotécnico de treze solos finos representativos da Região Metropolitana do Recife (RMRecife) e montou-se um Banco de Dados de Solos Finos brasileiro (BDSF) composto por sessenta e sete materiais de diversas regiões do país com vários parâmetros geotécnicos. As análises foram conduzidas sob aspectos físicos, químicos e mineralógicos, assim como à luz da mecânica dos pavimentos, com aplicação de metodologias específicas, como a MCT (M - miniatura; C - compactação; T – tropical) e os ensaios de Módulo Resiliente (MR) e Deformação Permanente (DP), utilizados como base para o dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Adicionalmente, foram utilizadas técnicas de estatísticas básicas, de correlação, de regressão e multivariadas (Análise de *Clusters*) utilizando-se ferramentas da Ciência de Dados para obter correlações de forma mais completa. Os resultados mostraram que os solos tropicais finos (tanto da RMRecife quanto do BDSF) são materiais que apresentam excelente comportamento mecânico (altos valores de MR e DP baixas), atendendo aos padrões requeridos para um Sistema Arterial Primário. Como exemplo, os solos da RMRecife são materiais mistos compostos por altas porcentagens de argila e areia, marcados pela presença de argilominerais não expansivos, como a caulinita e a ilita, com grãos de limonita em suas frações mais grosseiras, além de outras características que os designam como solos lateríticos, bem desenvolvidos pedologicamente. Neste contexto, esta pesquisa contribuiu com proposição de diversas estruturas de pavimento rodoviário validadas pelo MeDiNa considerando diferentes tipos de materiais e níveis de tráfego, provando a viabilidade técnica de uso dos solos tropicais finos, com vantagem econômica por redução de custos com transporte e aquisição de materiais granulares. Fez aplicação, divulgação e implementação do MeDiNa no Estado de Pernambuco e montou um banco de dados pautado em critérios da mecânica dos pavimentos. Gerou equações de previsão do MR em função das tensões atuantes na estrutura de um pavimento submetido à tráfego pesado para os solos LA' da RMRecife e modelos de regressão linear múltipla para previsão do MR considerando variáveis geotécnicas específicas.

Palavras-chave: pavimento rodoviário; solos tropicais; solos finos; MCT; módulo resiliente; deformação permanente.

ABSTRACT

According to data from the National Transport Confederation (CNT), the matrix for the transport of cargo in Brazil shows the country's preference for the road mode, characterizing it as the most representative nationwide. The road network is the most extensive among others in Brazil and due to this great demand for highways, it is common to build new roads or restore old roads and, in both cases, large volumes of materials are used to compose the pavement layers. This fact becomes a bottleneck for projects, since the current traditional soil classification and selection systems for paving (USCS and TRB) basically indicate only granular materials for such use. The road projects carried out in the state of Pernambuco still follow these procedures, which do not fit the reality of Brazilian soils, as they are based on standards developed for temperate soils. Thus, a large part of the soils available in the region are discarded or underutilized. However, over the decades, several researches have indicated the use of fine-grained soils that do not fit within the traditional selection criteria, but that present good mechanical performance. In this research sought to contribute to the evaluation of regional fine-grained tropical soils for use in road paving. For this, an extensive experimental campaign was carried out to analyze the geotechnical behavior of thirteen representative fine-grained soils of the Metropolitan Region of Recife (RMRecife) and a Brazilian Fine Soils Database (BDSF) was set up composed by sixty and seven materials from different regions of Brazil with various geotechnical parameters. The analyzes were conducted under physical, chemical and mineralogical aspects, as well as in the light of pavement mechanics, with the application of specific methodologies, such as MCT (M - miniature; C - compaction; T - tropical) and the Resilient Modulus (MR) and Permanent Deformation (DP) tests, used as a basis for the design of asphalt pavements by the new Brazilian Design Method (MeDiNa). Additionally, basics statistics, correlation, regression and multivariate techniques (Cluster Analysis) were used using Data Science tools to get correlations more completely. The results showed that fine-grained tropical soils (both from RMRecife and BDSF) are materials that present excellent mechanical behavior (high values of MR and low DP), meeting the standards required for a Primary Arterial System. As examples, the soils of RMRecife are mixed materials composed of high percentages of clay and sand, marked by the presence of non-expanding clay minerals, such as kaolinite and illite, with limonite grains in their coarsest fractions, among others characteristics that designate them as lateritic soils, well developed pedologically. In this context, this research contributed to the proposition of several road pavement structures validated by MeDiNa considering different types of materials and traffic levels - proving the technical feasibility of using fine-grained tropical soils, with advantage economic, by reducing costs with transport and acquisition of granular materials. Made application, dissemination and implementation of MeDiNa in the State of Pernambuco and built a database based on criteria of pavement mechanics. Genareted MR prediction equations as a function of the stresses acting on the structure of a pavement subjected to heavy traffic for RMRecife's LA' soils and multiple linear regression models for MR prediction considering specific variables geotechnics.

Keywords: road pavement; tropical soils; fine-grained soils; MCT; resilient modulus; permanent deformation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AED	Análise Exploratória de Dados
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
Al	Alumínio
APAC	Agência Pernambucana de Água e Clima
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Afundamento de Trilha de Rodas
BDSF	Banco de Dados de Solos Finos
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CO	Carbono Orgânico
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de Prova (CPs - no plural)
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Cs	Classificação do <i>shakedown</i>
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DP	Deformação Permanente
DRX	Difração de Raios-X
Ec	Energia de compactação
EI	Energia Intermediária
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>et al.</i>	e outros autores
Exp.	Expansão
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
Fe	Ferro
FWD	Falling Weight Deflectometer
GEGEP	Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas e Planícies
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG	Índice de Grupo
IME	Instituto Militar de Engenharia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de Plasticidade
ISSMFE	International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
LA'	Solo arenoso de comportamento laterítico
LG'	Solo argiloso de comportamento laterítico
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LSI/UFPE	Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mn	Magnésio
MO	Matéria Orgânica
MR	Módulo Resiliente
NBR	Norma Brasileira
P200	Porcentagem de material passante na peneira de nº 200
Pareia	Porcentagem de Areia
Pargila	Porcentagem de Argila
PMI	Perda de Massa por Imersão
PMI _{wót}	Perda de Massa por Imersão dos corpos de prova próx. à umidade ótima
Pped	Porcentagem de Pedregulho
Psilte	Porcentagem de Silte
RMRecife	Região Metropolitana de Recife
S	Grau de Saturação
s.d.	sem data
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SWCC	Soil–Water Characteristic Curve
Ti	Titânio
TRB	Transportation Research Board
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USCS	Unified Soil Classification System
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
c'	Inclinação da Curva deformabilidade da Classificação MCT
C.O.	Carbono Orgânico
Ca	Cálcio
d'	Inclinação da Curva de Compactação da Classificação MCT
e'	Índice de comportamento laterítico do solo segundo a Classificação MCT
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
h	Teor de umidade
H+Al	Hidrogênio mais Alumínio (Acidez Potencial)
H ₂ O	Água
h _{nat}	Umidade Natural
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
K _i	Relação sílica/alumina
K _r	Relação sílica/sesquióxidos
M.O.	Matéria Orgânica
Mg	Magnésio
N	Número de aplicações de carga
N	Nitrogênio
Na	Sódio
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
R ²	Coeficiente de correlação
S	Grau de saturação
Si ₂ O ₃	Óxido de Silício
W _{ót}	Teor de umidade ótimo (umidade ótima)
W _c	Umidade de Compactação
γ _s	Peso específico aparente seco (kN/m ³)
δ	Densidade Real dos Grãos
ΔP%	Perda ao fogo
ε _p	Deformação permanente

ε_r	Deformação resiliente
$\rho_{dm\acute{a}x}$	Massa especifica aparente seca máxima
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão Desvio
ψ	Sucção
$\psi\text{-}w_{\acute{o}t}$	Sucção na umidade ótima
D_p	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Enquadramento e justificativa da pesquisa	18
1.2	Objetivos propostos	20
1.2.1	Geral	20
1.2.2	Específicos	20
1.3	Estrutura da tese.....	21
2	SOLOS TROPICAIS APLICADOS A PAVIMENTAÇÃO	23
2.1	Apresentação do capítulo	23
2.2	Solos Tropicais	23
2.2.1	Conceitos gerais.....	23
2.2.2	O processo de formação e ocorrência	26
2.2.3	Peculiaridades dos solos lateríticos e saprolíticos	30
2.2.3.1	<i>Constituição química e mineralógica.....</i>	<i>30</i>
2.2.3.2	<i>Micro e Macroestrutura</i>	<i>31</i>
2.2.3.3	<i>Propriedades Físicas.....</i>	<i>33</i>
2.2.3.4	<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>37</i>
2.2.4	O uso dos solos tropicais finos em pavimentação	42
2.3	Classificação de solos.....	49
2.3.1	A classificação pedológica	49
2.3.2	A classificação geotécnica tradicional.....	51
2.3.2	Classificações para solos tropicais MCT e MCT-M.....	55
2.4	Pavimento Rodoviário	58
2.4.1	Conceitos gerais.....	58
2.4.2	Condição Atual das rodovias brasileiras.....	59
2.4.3	A mecânica dos pavimentos	61
2.4.3.1	<i>Módulo Resiliente (MR).....</i>	<i>62</i>
2.4.3.2	<i>Deformação Permanente (DP)</i>	<i>68</i>
2.4.3.3	<i>Dimensionamento Mecânico-empírico de pavimentos e o Método MeDiNa</i>	<i>74</i>
2.5	Síntese do capítulo	78
3	CIÊNCIA DE DADOS APLICADA ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS	80
3.1	Apresentação do capítulo	80

3.2	Conceitos básicos da Ciência de Dados e suas ferramentas para a análise de dados	80
3.3	Análise exploratória de dados – AED	83
3.3.1	Análise de Cluster	84
3.4	Síntese do capítulo	89
4	MATERIAIS E MÉTODOS	90
4.1	Apresentação do capítulo e breve descrição da metodologia	90
4.2	A Região Metropolitana de Recife (RMRecife)	94
4.2.1	Localização e clima	94
4.2.2	Aspectos geológicos e pedológicos	97
4.3	O programa de coleta de materiais	100
4.3.1	Pontos de coleta, unidades geológicas e classes pedológicas das amostras	100
4.4	Descrição dos ensaios	106
4.4.1	Caracterização básica	108
4.4.1.1	<i>Crumb Test</i>	108
4.4.1.2	<i>Umidades Natural e Higroscópica</i>	109
4.4.1.3	<i>Densidade Real dos grãos (δ)</i>	110
4.4.1.4	<i>Limite de liquidez e de Plasticidade</i>	110
4.4.1.5	<i>Granulometria por peneiramento e sedimentação</i>	111
4.4.1.6	<i>Soil–Water Characteristic Curve (SWCC) – Método do Papel Filtro</i>	116
4.4.2	Classificação MCT	119
4.4.2.1	<i>Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por imersão</i>	119
4.4.3	Ensaio químicos, mineralógicos e microscopia	121
4.4.3.1	Químico	121
4.4.3.2	<i>Difração de Raios-X</i>	121
4.4.3.3	<i>Microscopia – Imagens com Stereo Microscópio</i>	122
4.4.4	Ensaio mecânicos	123
4.4.4.1	<i>Compactação, CBR e Expansão</i>	123
4.4.4.2	<i>Módulo Resiliente - MR</i>	125
4.4.4.3	<i>Deformação Permanente - DP</i>	129
4.5	Sobre o Banco de Dados de Solos Finos - BDSF	131
4.6	Sobre a análise estatística usando a Ciência de Dados	132
4.7	Síntese do capítulo	133
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS – SOLOS DE RMRECIFE	135

5.1	Apresentação do capítulo	135
5.2	Caracterização básica dos solos estudados.....	135
5.2.1	Classificações MCT e MCT-M	135
5.2.2	Composição granulométrica	142
5.2.3	Limites de consistência.....	147
5.2.4	Classificações Tradicionais – USCS e TRB	149
5.2.5	Avaliação da dispersão – Crumb Test	151
5.2.6	Compactação.....	152
5.2.7	Curvas característica (SWCC).....	155
5.2.8	Constituição química	163
5.2.9	Mineralogia por DRX e Microscopia	167
5.3	Resultado do comportamento mecânico dos solos.....	178
5.3.1	<i>Califórnia Bearing Ratio - CBR.....</i>	<i>178</i>
5.3.2	Comportamento Resiliente	179
5.3.2.1	<i>Modelos Arenoso/Granular, Areno-argiloso e Composto</i>	<i>179</i>
5.3.2.2	<i>Modelagem complementar dos solos LA' – Modelo Teta e Universal.....</i>	<i>186</i>
5.3.2.3	<i>Resumo do comportamento resiliente por classe MCT.....</i>	<i>187</i>
5.3.2.4	<i>Comportamento Resiliente após ensaio de DP</i>	<i>190</i>
5.3.3	Deformação Permanente.....	192
5.3.3.1	<i>Análise da DP e Modelagem pelo Modelo de Guimarães (2009).....</i>	<i>192</i>
5.3.3.2	<i>Análise da ocorrência de shakedown</i>	<i>203</i>
5.3.3.3	<i>Análise complementar – Escolha dos solos considerando os critérios de LIMA (2020)</i> <i>.....</i>	<i>212</i>
5.4	Análise integrada dos resultados.....	213
5.4.1	Correlações entre propriedades físicas	214
5.4.2	Correlações entre propriedades físicas e mecânicas	216
5.4.3	Correlações entre propriedades mecânicas	221
5.4.4	Análise estatística utilizando Ciência de Dados	226
5.4.4.1	<i>Passos iniciais – importação das bibliotecas, leitura e visualização da Base de Dados</i> <i>.....</i>	<i>226</i>
5.4.4.2	<i>Tratamento e Análise Exploratória de Dados.....</i>	<i>228</i>
5.4.4.3	<i>Análise Exploratória de Dados Automatizada</i>	<i>239</i>
5.4.4.4	<i>Análise de Agrupamentos de Dados - Método Hierárquico.....</i>	<i>246</i>
5.4.4.5	<i>Análise complementar – Comparação de imagens do Stereo Microscópio.....</i>	<i>252</i>

5.5	Síntese do capítulo	258
6	DIMENSIONAMENTO PAVIMENTO – MÉTODO MEDINA	260
6.1	Apresentação do capítulo	260
6.2	Considerações sobre dimensionamento das estruturas de pavimentos com o MeDiNa	260
6.3	Apresentação e análise dos resultados das simulações	261
6.4	Análise Adicional – Tensões atuantes vs. MR nos solos LA'	266
6.5	Síntese do capítulo	269
7	BANCO DE DADOS DE SOLOS FINOS (BDSF)	270
7.1	Apresentação do capítulo	270
7.2	Estrutura do Banco de Dados	270
7.3	Análise dos resultados	272
7.3.1	Informações iniciais sobre a manipulação e tratamento dos dados do BDSF	272
7.3.2	Distribuição e correlação dos dados do BDSF	273
7.3.3	Análise de Cluster com os dados do BDSF	283
7.3.4	Análise complementar – testes de regressão linear múltipla	287
7.4	Síntese do capítulo	291
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	293
8.1	Conclusões	293
8.2	Sugestões para pesquisas futuras	301
	REFERÊNCIAS.....	303
	APÊNDICE A – RELATÓRIOS DE CAMPO - COLETA DE AMOSTRAS DEFORMADAS.....	314
	APÊNDICE B – DADOS DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS	327
	APÊNDICE C – GRÁFICOS DE COMPACTAÇÃO, MÓDULO RESILIENTE E DEFORMAÇÃO RESILIENTE	328
	APÊNDICE D – GRÁFICOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE ESPECÍFICA – E_p (%).....	341
	APÊNDICE E – BDSF.....	348
	APÊNDICE F – MATRIZES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	356
	APÊNDICE G – EXEMPLO DE RELATÓRIO DO PROGRAMA MEDINA	363

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e justificativa da pesquisa

O modo rodoviário caracteriza-se como o de maior representatividade no âmbito nacional. Segundo dados do Boletim Estatístico, de fevereiro de 2021, da Confederação Nacional dos Transportes (CNT), a matriz de transportes de cargas brasileira enfatiza a preferência do país ao modo rodoviário, uma vez que este representa 64,9%. O modo ferroviário apresenta-se com 14,9% e os modos de cabotagem, hidroviário, aéreo e dutoviário somam apenas 20,2%.

Por consequência, a malha rodoviária é a mais extensa dentre as demais existentes no Brasil, com aproximadamente 1.719.005 km (CNT, 2021), porém apenas 213.172 km (12,4%) pavimentada.

O pavimento é composto por uma estrutura de camadas, geralmente denominadas de revestimento, base, sub-base, reforço do subleito (se necessário) e subleito. E, devido a grande demanda pelas rodovias, é comum a construção de novas estradas ou até mesmo a restauração de vias antigas, e, em ambos os casos há utilização de grandes quantidades de materiais para compor as camadas do pavimento. Este fato pode ser um gargalo para os projetos, uma vez que os sistemas de seleção atuais de solos, considerando o método de dimensionamento pelo ensaio CBR, indicam basicamente apenas materiais granulares para tal uso.

Por outro lado, ao longo de décadas, várias pesquisas (Nogami e Villibor, 1995; Vertamatti, 1988; Chaves, 2000; Marangon, 2004; Delgado, 2007; Costa e Motta, 2007; Villibor e Nogami, 2009; Guimarães, 2009; Medrado, 2009; Delgado, 2012; Sousa, 2016; Silva Filho, 2018; Dalla Roza e Motta, 2018; Lima, 2020, entre outros) tem indicado a possibilidade de utilização de solos finos que não se encaixam dentro dos sistemas de classificação tradicionais, mas que apresentam bom desempenho mecânico: são os chamados solos tropicais.

Segundo Nogami e Villibor (1995), solos tropicais são solos que possuem comportamentos bem diversos daqueles previsíveis pelos procedimentos tradicionais de caracterização e/ou classificação geotécnicas (*Unified Soil Classification System* - USCS e Sistema de classificação da *Transportation Research Board* - TRB), assim, para que o solo possa ser considerado como tropical, não basta que tenha sido formado na faixa tropical ou em região de clima tropical úmido, é indispensável que possua peculiaridades de interesse geotécnico.

Os solos denominados tropicais são influenciados pelo intemperismo e pelos processos pedogenéticos (laterização), o qual influenciam na extensão do perfil e no comportamento mecânico. Estudos como estes são de responsabilidade dos países de clima tropical, pois o mesmo é raramente encontrado na Europa e América do Norte. Na Região Metropolitana do Recife, perfis de solos tropicais de comportamento laterítico são facilmente encontrados nos depósitos da Formação Barreiras (COUTINHO E SEVERO, 2009).

No entanto, os projetos rodoviários executados no estado de Pernambuco, assim como em diversas outras regiões do país, ainda seguem os procedimentos tradicionais, que são dotados de parâmetros que não se adequam totalmente à realidade dos solos brasileiros, pois baseiam-se em normas desenvolvidas para solos de países de clima temperado.

Para selecionar os solos, além de seguir os sistemas USCS e TRB (que se baseiam em valores de granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade), são fixados valores mínimos de CBR (*Califórnia Bearing Ratio*, traduzido como Índice de Suporte Califórnia), assim, uma grande parte dos solos disponíveis na região são sumariamente descartados ou subutilizados. Assim, os materiais que atendem a essas exigências estão cada vez mais escassos, acarretando no aumento dos custos de transportes, o que já vem sendo a tempo um problema na execução das obras de infraestrutura de transportes.

Outra situação que merece ser mencionada é o fato do método do CBR (que também contribui para o descarte dos solos tropicais finos) ser ainda o método de dimensionamento de pavimentos mais largamente utilizado no Brasil. Espera-se que, em breve, a disponibilização do programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) que realiza uma abordagem mecanístico-empírica para análise da estrutura de pavimentos pelo DNIT, leve a adoção deste pelos DERs e prefeituras.

É neste contexto que surgiu o problema de pesquisa, uma vez que, além das situações supracitadas, há também uma escassez de pesquisas voltadas para o estudo geotécnico dos solos tropicais finos para fins de pavimentação em Pernambuco. Neste sentido, escolheu-se a Região Metropolitana de Recife (RMRecife) como área de pesquisa, visando a execução de estudos dos solos tropicais de textura fina através de metodologias específicas, como a MCT (M - miniatura; C - compactação; T – tropical) e também incorporando ensaios pautados na mecânica dos pavimentos, como o Módulo Resiliente – MR e a Deformação Permanente - DP.

Assim, pretende-se conhecer o comportamento geotécnico dos solos da RMRecife, à luz da mecânica dos pavimentos, visando sua aplicação como camadas de pavimento rodoviário, proporcionando o aproveitamento de solos locais, a redução de custos com transporte e aquisição de materiais granulares em obras de pavimentação e, contribuindo para

a divulgação e implementação do método MeDiNa no Estado de Pernambuco. Também visa contribuir para a construção de um Banco de Dados de Solos Finos brasileiro, analisado através da aplicação de técnicas de estatísticas básica, de correlação, multivariadas (como a Análise de *Clusters*) e análise de regressão utilizando ferramentas da Ciência de Dados.

Diante do exposto, este trabalho traz impactos regionais e nacionais positivos pois almeja colaborar para o desenvolvimento de projetos mais econômicos e tecnicamente adequados à realidade do país, assim como internacionalmente uma vez que também contribui de forma significativa e positiva para o avanço dos estudos geotécnicos de solos tropicais, favorecendo o aproveitamento de solos típicos do ambiente e clima tropical.

Alguns artigos que favorecem a discussão supracitada e que estão associados a esta pesquisa recentemente publicados, a saber: Coutinho e Sousa (2021) – que analisa a aplicabilidade dos sistemas de classificação USCS, TRB e MCT aos solos tropicais finos, Sousa, Motta e Coutinho (2021) – aborda sobre o dimensionamento de pavimentos com solos tropicais finos usando o método MeDiNa e, Sousa, Coutinho e Motta (2021) – discute a respeito do comportamento mecânico e não saturado dos solos tropicais de granulação fina.

1.2 Objetivos propostos

1.2.1 Geral

Contribuir para o estudo do comportamento geotécnico de solos tropicais finos brasileiros para aplicação em camadas de pavimento rodoviário, à luz da mecânica dos pavimentos.

1.2.2 Específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- Analisar o comportamento geotécnico de solos finos ocorrentes na RMRecife (PE), com base nos ensaios de caracterização física, química, mineralógica, módulo resiliente e deformação permanente e comparando os resultados obtidos com as especificações tradicionalmente consideradas para projetos rodoviários;

- Realizar simulações de dimensionamento de pavimentos rodoviários utilizando o método MeDiNa afim de sugerir possíveis estruturas de pavimentos que poderão ser utilizadas como referência em projetos de pavimentação e contribuir para a divulgação e aplicação do MeDiNa no Estado de Pernambuco;
- Construir um Banco de Dados de Solos Finos brasileiros (BDSF), pautado em referências bibliográficas nas quais tenham sido realizados no mínimo a Classificação MCT e os ensaios de Módulo Resiliente e Deformação Permanente;
- Aplicar técnicas de análise estatística básica, de correlação, regressão e multivariada (Análise de *Cluster*) para avaliar o agrupamento e interações entre as variáveis geotécnicas dos solos da RMRecife e do BDSF utilizando-se ferramentas da Ciência de Dados.
- Fornecer resultados que reforcem a aplicação de critérios adequados para a seleção de solos tropicais finos para uso em projetos de rodovias de todo o território brasileiro, podendo ser estendida a aplicação também para camadas de pavimento ferroviário.

1.3 Estrutura da tese

O presente trabalho está dividido em oito capítulos. Neste primeiro capítulo apresenta-se a introdução da tese, onde se aborda o problema e a justificativa da pesquisa, bem como os objetivos geral e específicos propostos.

O Capítulo 2, consta da revisão de literatura realizada com o objetivo de obter o embasamento teórico necessário para o entendimento dos assuntos relacionados ao tema de pesquisa. Portanto, aborda-se os aspectos relevantes dos solos tropicais aplicados à pavimentação, por meio de três bases: 1. Conceituação dos solos tropicais, com o conhecimento do seu processo de formação, constituições física, química e mineralógica, peculiaridades de comportamento, propriedades mecânicas, dentre outros aspectos da experiência brasileira com a aplicação dos solos finos em pavimentos; 2. Classificações geotécnicas e pedológicas utilizadas em solos e, 3. Pavimento rodoviário, conceituando-o, mostrando as condições atuais das rodovias brasileiras e apresentando considerações associadas à mecânica dos pavimentos.

No Capítulo 3, aborda-se a Ciência de Dados, apresentando alguns conceitos básicos e ferramentas essenciais para Análise Exploratória de Dados (AED), incluindo a análise de Cluster, utilizando a linguagem de Programação Python 3.

No Capítulo 4, apresenta-se uma breve descrição da metodologia por meio de um fluxograma metodológico, seguida da caracterização climatológica, geológica e pedológica da área de pesquisa. Posteriormente, realiza-se a descrição dos materiais (solos) da pesquisa e dos métodos utilizados como referência para execução dos ensaios em laboratório. Em seguida, indica-se as referências bibliográficas utilizadas para a construção do BDSF, bem como as características geotécnicas que constituem o banco e os métodos utilizados para análise dos dados. Ao final, aborda-se a metodologia utilizada para as análises feitas com auxílio da Ciência de Dados.

O Capítulo 5 mostra a parte inicial da apresentação e análise dos resultados referentes aos solos da RMRecife, onde se apresenta e se analisa: 1. Aspectos associados à caracterização básica (grau de dispersão, índices de consistência, composição granulométrica, curva característica, classificações geotécnicas e constituições química e mineralógicas); 2. O comportamento mecânico (CBR, MR e DP) e, 3. Uma análise integrada dos resultados dos ensaios realizados por meio da aplicação das técnicas de Ciência de Dados, buscando obter correlações entre as diversas propriedades geotécnicas e a análise de agrupamento dos solos.

No Capítulo 6, realiza-se o dimensionamento de estruturas de pavimento com auxílio do software MeDiNa. Faz-se indicação dos parâmetros adotados nas estruturas simuladas, apresenta-se os resultados do dimensionamento propriamente dito e a análise dos mesmos, propondo estruturas modelos que possam servir de referência aos projetos de pavimentação da região. Uma análise adicional, utilizando a rotina AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) do MeDiNa faz parte desse capítulo.

No Capítulo 7, aborda-se o Banco de Dados de Solos Finos propriamente dito, detalhando a estrutura do banco de dados e a análise dos dados (correlações, modelos de comportamento, aplicação da Análise de *Clusters* e testes de regressão linear múltipla).

No Capítulo 8, faz-se as considerações finais do trabalho, apresentando as principais conclusões obtidas e indicando sugestões/recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, apresenta-se as referências bibliográficas que serviram de base para a pesquisa e os apêndices necessários, a saber: Apêndice I que contém os relatórios de coleta das amostras em campo, detalhando com imagens e descrições as características individuais de cada solo; o Apêndice II que apresenta os dados da composição granulométrica dos solos da tese; Apêndice III apresenta as curvas de compactação, gráficos de MR e deformação resiliente; o Apêndice IV contém os gráficos de deformação permanente dos solos da RMRecife; o Apêndice V – contém a planilha completa do BDSF e, o Apêndice VI que apresenta um exemplo de relatório gerado pelo software MeDiNa.

2 SOLOS TROPICAIS APLICADOS A PAVIMENTAÇÃO

2.1 Apresentação do capítulo

O presente capítulo apresenta uma síntese da revisão bibliográfica realizada para o desenvolvimento desta tese. Foram consultados diversos trabalhos disponíveis na literatura nacional e internacional, desde livros considerados básicos na linha de pesquisa, assim como, teses, dissertações e artigos publicados em periódicos de destaque.

O tópico inicial aborda aspectos importantes associados aos solos tropicais, apresentando os conceitos, o processo de formação destes tipos de solos, as peculiaridades dos solos lateríticos e saprolíticos, como: perfis típicos de ocorrência, a constituição química e mineralógica, detalhes da micro e macroestrutura, propriedades físicas e mecânicas e, os resultados das principais experiências adquiridas com o uso dos solos finos lateríticos na pavimentação.

No tópico seguinte abordam-se informações relevantes sobre as classificações importantes para a pesquisa, que são: a pedológica, as classificações geotécnicas tradicionais e a classificação MCT, a qual foi desenvolvida especificamente para solos tropicais.

Em seguida, explanam-se questões a respeito do pavimento rodoviário, trazendo alguns conceitos gerais e pontos essenciais da mecânica dos pavimentos, que incluem o comportamento resiliente e a deformação permanente dos solos. Por último, porém não menos importante, aborda-se o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

2.2 Solos Tropicais

2.2.1 Conceitos gerais

Existem diversas definições para solo, as quais variam conforme a visão de cada área. Em geral, os solos podem ser considerados materiais naturais inconsolidados, formados (inicialmente) a partir da decomposição de rochas, portanto, são compostos basicamente por minerais.

Do ponto de vista da engenharia civil, o solo é visto como um material de construção, passível de escavação manual ou através da utilização de máquinas de terraplenagem, podendo ser utilizado em diversas obras como: construção de aterros, estradas, barragens, dentre outras aplicações.

Não obstante, Lepsch (2011) afirma que o solo não é somente um conjunto de minerais, matéria orgânica, água e ar, mas sim o produto dessas interações, as quais podem ser estudadas em várias escalas de resolução: microscópica, horizontes, paisagem, regiões e global. Daí a importância de se estudar o solo, não só em relação ao desempenho mecânico que este possa apresentar, mas também, analisar suas características físicas, químicas e mineralógicas, as quais podem fornecer informações essenciais para entender as suas peculiaridades de comportamento.

Assim, no que se refere à definição específica de solos tropicais, intuitivamente se definiria simplesmente como solos que ocorrem em regiões de clima tropical, ou seja, situado entre os trópicos de Câncer e Capricórnio. Contudo, Chesworth *et al.*, (2008) afirmam que o termo "solos tropicais" não é tão geograficamente inclusivo como pode ser inferido a partir do nome. Do ponto de vista pedológico, o termo tradicionalmente não inclui todos os solos que ocorrem em ambientes tropicais, sendo excluídos os solos de desertos de baixa latitude, assim como alguns solos pedogeneticamente jovens (pouco desenvolvidos).

Dentro dessa perspectiva, neste trabalho optou-se por adotar como definição o mesmo conceito adotado pelo *Committee on Tropical Soils* da *International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* – ISSMFE (1985), em que solo tropical é “aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação no mesmo de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas”.

Nessa linha, destaca-se a visão pedológica que divide o perfil do solo em horizontes (camadas). Os horizontes mais comuns são denominados A, B e C, no entanto, existem subclassificações que variam de acordo com as diversas características que as camadas possam apresentar. O Manual Técnico de Pedologia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2015) apresenta de forma detalhada essas definições e subdivisões, explicando o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS).

De forma geral, o horizonte A é a camada mais superficial, formada basicamente por matéria orgânica. Já o horizonte B, localizado abaixo do horizonte A, é formado por solos que sofreram intensa transformação pedogenética e por isso, em geral, não apresenta características da rocha mãe. O horizonte C, por sua vez, é composto também de um solo inconsolidado, porém pouco afetado pelos processos pedogenéticos e que ainda apresenta características da rocha que lhe deu origem.

Neste contexto, unindo os conceitos da pedologia e da engenharia geotécnica, tem-se que os horizontes pedológicos B e C podem ser, eventualmente, respectivamente,

denominados de Laterítico e Saprolítico. Essa divisão pode ser nitidamente observada na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Perfil de um solo com nítida diferenciação entre os horizontes A, B (laterítico) e C (saprolítico).

Fonte: MARANGON (2004).

Dentro dessa perspectiva, é relevante citar a crítica feita por Bernucci (1995), quando relata que em alguns trabalhos de engenharia designa-se: a) solo laterítico: solo residual maduro, argila vermelha tropical, e outros; b) solo saprolítico: solo residual jovem, solo de alteração de rocha, e outros. Essas terminologias não são precisas e muitas vezes não correspondem à realidade, pois os solos lateríticos não precisam ser necessariamente residuais, assim como podem não ser vermelhos. Além disso, solos maduros e jovens trazem ideia de “idade”, porém suas características importantes não se relacionam à idade geológica propriamente dita, mas sim a uma série de variáveis que dependem dos processos envolvidos e da intensidade destes, durante a formação dos solos.

Considerando os conhecimentos descritos até aqui, tem-se que os solos tropicais compreendem duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos, e apresentam-se as definições dos mesmos segundo descreveram Nogami e Villibor (1995):

- **Solo Laterítico:** como já mencionado, pedologicamente, constitui uma variedade de solos do horizonte superficial laterítico, que são típicos de partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, no entanto, será considerado laterítico aquele que apresente as propriedades que permita classificá-lo como solo de “comportamento geotécnico laterítico” segundo a metodologia MCT (abordada em tópico posterior).
- **Solo Saprolítico:** é resultante da decomposição *in situ* da rocha, mantendo a estrutura da rocha que lhe deu origem. É também designado como solo residual jovem e geralmente apresentam comportamento não laterítico na classificação MCT.

2.2.2 O processo de formação e ocorrência

Os solos tropicais (lateríticos e saprolíticos), como vistos na Figura 2.1, são encontrados, segundo o relato de Presa (1951-1998), quase sempre, em camadas superpostas, no mesmo perfil de solo, porém, mesmo apresentando propriedades índices e de estado similares, possuem quase sempre propriedades de engenharia e comportamentos bem distintos. Assim, mesmo que pertençam ao mesmo grupo geotécnico das classificações tradicionais (USCS e TRB), o comportamento peculiar dos solos tropicais faz com que os paradigmas da mecânica dos solos tradicional percam sua validade.

Por isso, Gidigas (1976) diz que as características geotécnicas e o desempenho de campo da maioria dos solos lateríticos (tropicais) são consideravelmente influenciados pela gênese, grau de intemperismo, características morfológicas, composição química e mineral, bem como pelas condições ambientais, ou seja, pelo seu processo de formação.

Dentro dessa perspectiva, GUIMARÃES *et al.*, (2015), por exemplo, dizem que:

“Do ponto de vista pedogenético é de se esperar que os perfis de alteração no ambiente tropical sejam ricos em solos argilosos, porém com mineralogia distinta dos solos da região de clima temperado, incluindo a presença dos chamados óxi-hidróxidos de Fe e Al e argilominerais não expansivos. Tais características mineralógicas fazem com que estes solos - chamados de solos tropicais - apresentem excelente desempenho como camada de pavimento, principalmente pela cimentação parcialmente irreversível após secagem.”

Seguindo esse raciocínio, entende-se que esse processo, de intemperização e a laterização no ambiente tropical, segundo Gidigas (1976) e Santos (1998), envolvem

essencialmente alterações químicas e físico-químicas e/ou transformação de minerais formadores de rochas primários em materiais ricos principalmente em minerais argilosos de estrutura 1:1 (como o grupo das caulinitas, por exemplo) e constituintes lateríticos (Fe, Al, Ti e Mn). O processo de formação, pode ser assim, dividido nas três etapas seguintes:

- a) **Decomposição:** é caracterizada pela degradação físico-química dos minerais primários e pela liberação de elementos constituintes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , etc.) que aparecem em formas iônicas simples;
- b) **Laterização:** Envolve o processo de lixiviação de bases e sílicas combinadas e a acumulação de óxidos e hidróxidos de sesquióxido (Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2). Depende da natureza e extensão da intemperização química dos minerais primários. Sob condições de baixa atividade química e de formação do solo, o intemperismo físico-químico não continua além do estágio de formação de argila e tende a produzir minerais argilosos predominantemente representados por caulinita e ocasionalmente por óxidos hidratados ou anidro de ferro e alumínio. Porém, sob condições de intemperismo físico-químico intenso e prolongado, no entanto, mesmo minerais argilosos são destruídos e a sílica é lixiviada; o restante consistirá apenas de óxidos de alumínio, como gibbsita ou óxidos de ferro hidratado, como limonita ou goethita, derivados de ferro;
- c) **Desidratação/dessecação:** envolve desidratação parcial ou completa (às vezes envolvendo endurecimento) dos materiais ricos em sesquióxido e minerais secundários. A desidratação de óxidos de ferro coloidal hidratado envolve perda de água, concentração e cristalização dos colóides amorfos de ferro em minerais cristalinos densos, na sequência: limonita, goethita, hematita e goethita com hematita.

Quanto à ocorrência de solos tropicais, Nogami e Villibor (1995) ressaltam algumas peculiaridades que se opõem às estruturas similares de climas frios e temperados, e as principais características são:

- a) Grande espessura do horizonte superficial, em geral mais de 1 metro podendo ultrapassar dezenas de metros no caso de ser laterítico;
- b) Grande espessura de horizonte saprolítico (atinge várias dezenas de metros);

- c) Presença de solos transportados de origem fluvial ou flúvio-lacustre, ocupando posição diferente daquela prevalente na ocasião de sua decomposição, assim ocupam, com frequência, posições elevadas.

Nogami e Villibor (1991) dizem que, geologicamente, os solos lateríticos são compostos por depósitos transportados, formados principalmente por processo coluvial. Podem provir de muitos tipos de materiais como: gnaisses, xistos, arenitos, folhelhos, argilas inconsolidadas, areias, etc. As argilas e os solos argilosos são mais comuns sobrepondo basaltos, granitos, gnaisses, folhelhos e argilas não consolidadas. Muitos perfis apresentam, no horizonte superficial ou no seu limite, a linha de seixos, de espessuras variáveis, delimitando sua borda inferior (horizonte laterítico do saprolítico), como também mencionado em Villibor *et al.*, (2009).

Pedologicamente, os perfis podem ser associados no SiBCS com as classes dos latossolos e argissolos, e de acordo com o sistema internacional de classificação dos solos da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (2015) com as classes Ferralsols, Acrisols e alguns Alisols e Lixisols. A Figura 2.2 apresenta um mapa com a localização desses grupos de solo no mundo, podendo-se observar a sua predominância justamente nas regiões de clima tropical e subtropical úmido.

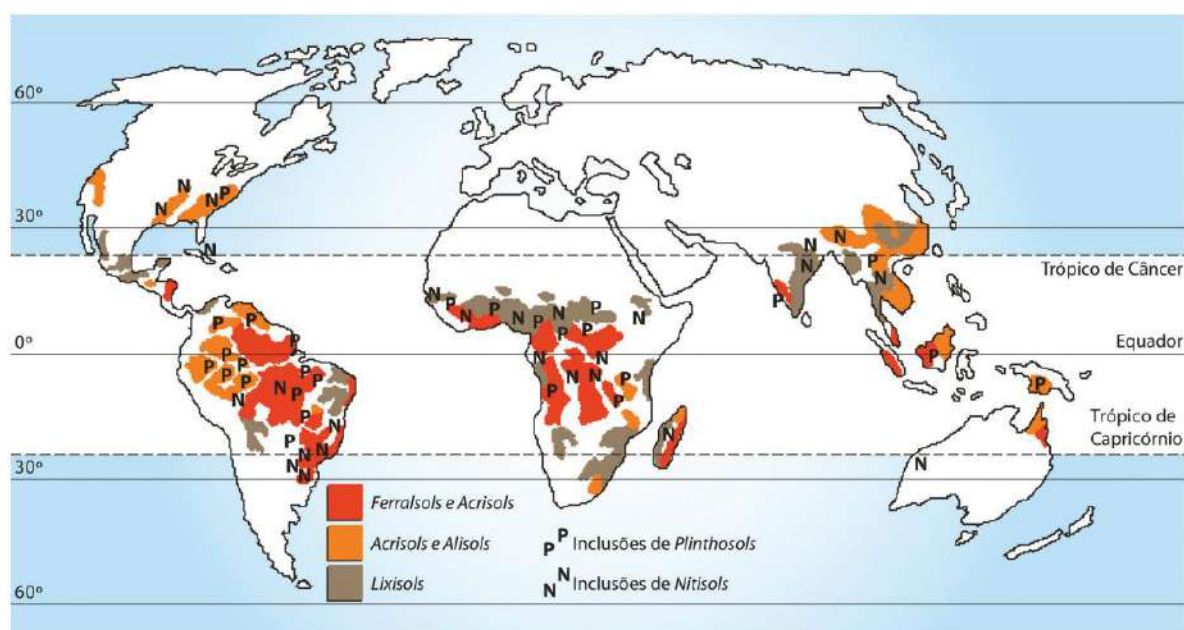


Figura 2.2 - Distribuição global das áreas onde dominam grupos de solos bem desenvolvidos.

Fonte: LEPSH (2010)

De acordo com Villibor e Nogami (2009) e Villibor (2017) a classe pedológica mais promissora de haver ocorrência de solo de caráter laterítico é a dos Latossolos, seguida dos Argissolos e sendo possível, porém menos promissoras, na classe dos Neossolos.

A Figura 2.3 apresenta o esquema de um perfil de alteração que pode ser utilizado como referência para a identificação dos solos lateríticos e saprolíticos em um talude natural. O perfil é composto por uma camada de solo mais próxima da superfície denominada horizonte superficial laterítico ou pedogenético, que geralmente é a mais antiga por sofrer maior lixiviação ao longo do tempo geológico, logo abaixo tem-se o horizonte saprolítico que ainda apresenta características da rocha que lhe deu origem, e subposta a este último está a rocha mãe.

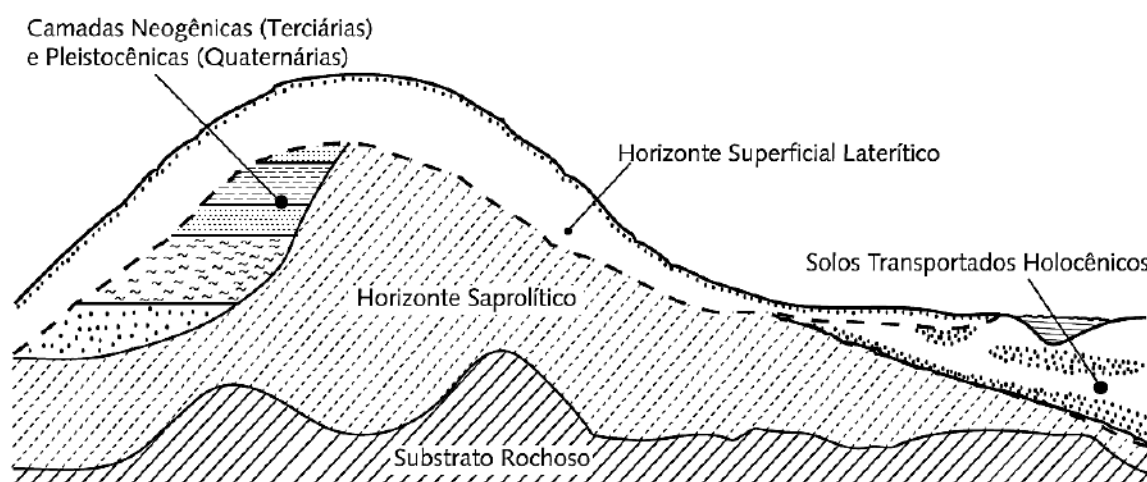


Figura 2.3 - Designação genética geral das camadas de solos, nas regiões tropicais.

Fonte: VILLIBOR e NOGAMI (2009)

Em relação à ocorrência dos solos lateríticos (que tem especial interesse geotécnico para aplicação em pavimentação) no Brasil, apresenta-se o mapa da Figura 2.4 em que se pode ter uma visão geral das áreas de ocorrência de solos de comportamento laterítico, segundo a classificação MCT. Trata-se de um mapa simplificado, que não substitui o mapa pedológico, porém, através dele pode-se inferir que na região de Pernambuco pode haver uma predominância de solos arenosos lateríticos (LA').



Figura 2.4 - Ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil.

Fonte: VILLIBOR (2017)

2.2.3 Peculiaridades dos solos lateríticos e saprolíticos

2.2.3.1 Constituição química e mineralógica

Os solos tropicais possuem como principal peculiaridade, em termos de constituição química, a presença dos óxidos e hidróxidos de Ferro e Alumínio, que de acordo com Carvalho *et al.*, (2015) influem na estrutura, nas propriedades e no comportamento hidromecânico desses solos, mesmo que não sejam predominantes na composição.

A hematita é um dos óxidos de ferro mais comumente encontrados na natureza. Com frequência, está presente nos solos profundamente intemperizados, dando-lhes a cor vermelha. Apresenta estrutura composta pela fórmula Fe_2O_3 . A goethita é o óxido de ferro mais

estável, sendo, no Brasil, mais frequente em solos lateríticos, e lhes conferem cores amarelas e bruno-amareladas, CARVALHO *et al.*, (2015).

A determinação dos óxidos no solo é comumente realizada através do método do Ataque Sulfúrico (disponível em Embrapa, 2017). Com o resultado do referido ensaio é possível calcular os chamados Índices de intemperismo: K_i e K_r através de relações entre SiO_2 e Al_2O_3 ou Fe_2O_3 .

Lespch (2011) diz que um valor de K_i menor que 2,0 de um horizonte B indica que o solo é bastante intemperizado e que parte do alumínio do solo encontra-se livre na forma de óxidos. Valores de K_i maiores que 2,0 indicam ocorrência de argilas do tipo 2:1 (p. ex., montmorillonita e vermiculita). Em Martin e Doyne (1927) citado por Gidigas (1976) indica-se que os solos lateríticos apresentam K_i entre 1,33 e 2 e solos não lateríticos $K_i > 2$.

Nogami e Villibor (1995) afirmam que as variações mineralógicas dos solos tropicais são maiores que nos solos de outras regiões e que muitos dos comportamentos peculiares dos solos tropicais podem ser explicados pela sua constituição mineralógica. Os autores fornecem informações importantes sobre os minerais que podem ser encontrados nas diversas frações dos solos lateríticos e saprolíticos, e o Quadro 2.1 apresenta os principais.

Quadro 2.1 – Principais minerais dos solos tropicais lateríticos e saprolíticos baseado em Nogami e Villibor (1995).

Fração	Solo Laterítico	Solo Saprolítico
Pedregulho	Quartzo, laterita (óxidos hidratados de ferro e alumínio)	Quartzo, fragmentos de rocha
Areia	Quartzo, magnetita, ilmenita, rutilo, turmalina e zircão	Quartzo, feldspato, mica
Silte	Quartzo, magnetita, ilmenita, torrões de argila, laterita	Quartzo, caulinita, haloisita, mica
Argila	Óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, caulinita, húmus	Smectita, illita

Fonte: Elaboração própria.

2.2.3.2 Micro e Macroestrutura

Villibor e Nogami (2009) afirmam que associados à constituição química e mineralógica, os solos lateríticos apresentam macro e microestrutura porosas características. Rodrigues *et al.*, (2013) dizem que é possível observar a microestrutura de solos lateríticos de

grãos finos utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), sendo visível a presença de flocos relativamente grandes, partículas de argila aglomeradas, com aparência de “nuvens” ou “pipoca”.

Segundo Villibor e Nogami (2009): “Aparentemente, conforme o grau de laterização, o aspecto dos flocos torna-se mais ou menos visível. Quanto menos laterizado for o solo, mas facilmente são distinguíveis as partículas individuais dos argilominerais”.

Os solos lateríticos podem apresentar ainda, segundo Nogami e Villibor (1995), contornos aparentes dos grãos nitidamente arredondados, havendo indícios de vazios internos.

Por outro lado, a microestrutura dos solos saprolíticos apresentam argilominerais individualizados, às vezes com associação dos minerais, de forma paralela, indicando sua origem recém-formada. No que se refere à macroestrutura, os solos laterítico apresentam quase sempre aparência homogênea com elevada porosidade. Já os solos saprolíticos apresentam macroestrutura herdada da rocha mãe e por isso são em sua maioria manchadas, variegadas, xistosas, listradas etc.

A Figura 2.5 mostra imagens obtidas através do microscópio de varredura (MEV). Em (a) tem-se a microestrutura de um solo profundamente intemperizado (laterítico) e em (b) a de um solo saprolítico, em ambas é possível identificar as peculiaridades supramencionadas.

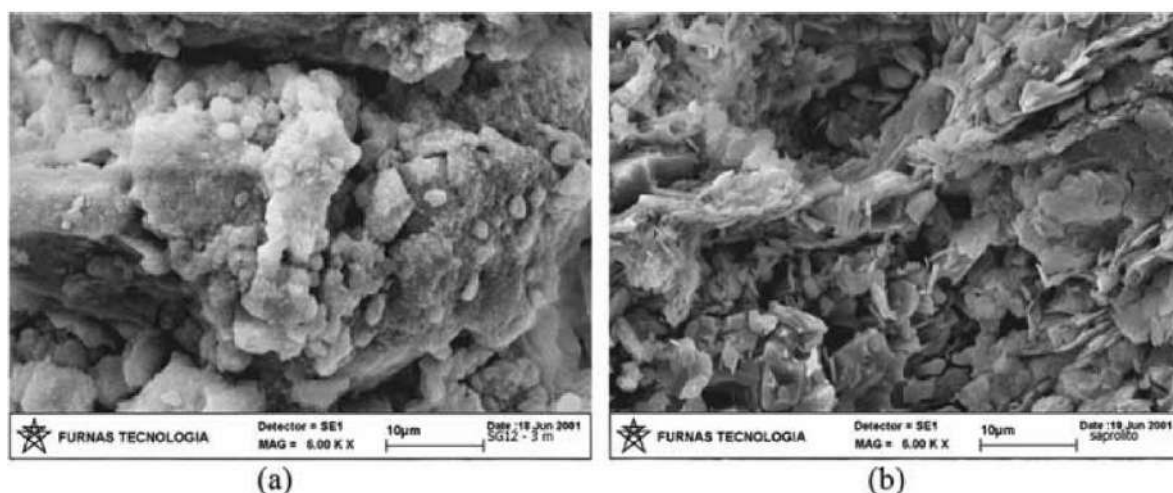


Figura 2.5 – Imagens, obtidas através de MEV, de um solo (a) laterítico e (b) saprolítico.

Fonte: GHELING *et al.*, (2015).

A Figura 2.6 mostra o perfil de um corte rodoviário em que é possível visualizar a divisão dos horizontes laterítico e saprolítico, bem como as imagens da microestrutura dos respectivos solos, podendo-se observar as peculiaridades já mencionadas.



Figura 2.6 – Perfil de um corte de rodovia com indicação das microestruturas de seus solos.

Fonte: VILLIBOR (2017).

2.2.3.3 Propriedades Físicas

Algumas das propriedades que são consideradas básicas para análise dos solos são os Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP). O Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (Brasil, 2006), por exemplo, estabelece como valores máximos para uso em camada de base rodoviária, os seguintes limites máximos: LL de 25% e LP de 6%.

Porém, como mencionado na introdução deste trabalho, ao longo de várias décadas de pesquisa e experiências em campo, tem-se observado que esses limites não se aplicam totalmente aos solos tropicais. Nogami e Villibor (1995) dizem que como exemplo dessa inaplicabilidade, têm-se os solos tropicais com LL elevados (acima de 50%) mas que não se expandem ou expandem pouco, quando compactados nas condições exigidas pelas normas rodoviárias. E o contrário também pode ser observado: solos com LL e LP baixos, mas que expandem bastante.

Outro comportamento peculiar observado se refere a Massa Específica Aparente Seca Máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), obtida no ensaio de compactação. Villibor e Nogami (2009) afirmam que os solos lateríticos geralmente possuem $\rho_{dm\acute{a}x}$ maiores do que os saprolíticos de granulometria, LL e LP similares.

Algumas pesquisas indicam que o processo de secagem e destorroamento do solo influenciam diretamente no resultado dos ensaios para determinação dos LL e LP. Ampadu (2015) diz que o procedimento de ensaio destrói a estrutura do solo, de modo que a propriedade

índice assim determinada não pode representar a condição de campo e, portanto, coloca em questão a relevância das propriedades destes índices. Afirma também que o aumento da desestruturação (entende-se como o processo de destorroamento) leva ao aumento do LL. Ainda nessa linha, Ampadu (2015) diz que a secagem em estufa leva à aglomeração de finos e menores valores de LL e LP.

Sunil e Krishnappa (2012) estudaram o efeito da secagem nas propriedades índice de solos lateríticos da costa oeste da Índia. A pesquisa mostrou que o LL de todos os solos secos em estufa foi menor do que os secos ao ar. Observou-se também que o efeito de secagem no LP foi pequeno, porém a maior redução no LL e pequena mudança no LP resultou em decréscimos do Índice de Plasticidade – IP.

Antes disso, Morin e Todor (1976), através de ensaios realizados em solos tropicais, mostraram que quanto maior o tempo e a temperatura de secagem em estufa, menores são os valores de LL quando comparados aos secos ao ar. Os valores de LP também foram pouco influenciados mesmo com os diferentes tempos de secagem e temperatura adotados.

Vargas (1982) realizou, em solos tropicais, ensaios de LL e LP nas condições natural, com prévia secagem ao ar e, com prévia secagem em estufa, mostrando que, nessa mesma ordem, houve redução nos valores de LL.

Penna de Carvalho (s.d.) realizou ensaios em solos lateríticos do Recôncavo Baiano e observou que, em geral, há um aumento do LL quando os solos são ensaiados sem secagem prévia. Analisando os resultados, entende-se que não se deve generalizar os comportamentos dos materiais com base nestes índices, uma vez que é importante observar que o amolgamento causado pelo processo de destorroamento também pode influenciar nos resultados, embora para o caso específico dos solos ensaiados por Penna de Carvalho a influência da secagem tenha superado a influência do amolgamento.

Diante de tudo isso, deve-se considerar a recomendação de Ampadu (2015) quando diz que as lateritas e os solos lateríticos sejam ensaiados na condição de umidade esperada no campo (portanto, sem pré-secagem antes do ensaio).

No que se refere à granulometria dos solos tropicais é importante destacar o comportamento apresentado nas curvas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculante, visto que diversas pesquisas mostram que alguns solos tropicais apresentam grande diferença entre os dois procedimentos.

Pinto (2006) diz que quando a diferença entre as curvas ensaiadas é grande o solo apresenta uma estrutura floculada e do contrário o solo possui naturalmente a estrutura dispersa (sem muita diferença entre os resultados dos ensaios com e sem defloculante).

Araújo *et al.*, (2017) afirmam que o grau de intemperismo do solo influencia diretamente na sua estrutura e que os agentes cimentantes que agregam as partículas do solo alteram seu comportamento proporcionando o surgimento de uma macroestrutura, que se reflete na sua composição granulométrica. Estudaram a granulometria de um latossolo e observaram que o resultado sem a utilização de defloculante mostrou um solo sem qualquer quantidade de argila, classificando-o como um silte arenoso, porém, com a utilização de defloculante, as cimentações foram desfeitas, mostrando que o solo, na verdade é composto por quase 50% de argila, apresentando uma curva granulométrica bimodal. Assim, ressaltaram que a realização de ensaios sem defloculante é importante pois representa o estado do solo em campo.

Outra característica peculiar que os solos tropicais podem apresentar é em relação ao formato da curva característica de sucção do solo (*Soil-Water Characteristic Curve – SWCC*). Boszczowski e Ligocki (2012), ao traçar as curvas de retenção, determinadas através do papel filtro para um perfil de alteração de gnaiss de Curitiba, mostraram que, quanto mais intemperizado o solo, maiores os valores de sucção apresentados e que este comportamento é esperado devido ao seu maior grau de intemperismo.

A Figura 2.7 apresenta o modelo de curva característica indicando as diferentes zonas de dessaturação resultantes das mudanças de sucção no solo. De acordo com Fredlund *et al.*, (2012) a dessaturação de um solo é comumente dividida em três zonas principais: zona de efeito de limite, zona de transição e a zona residual. Essas zonas são delineadas por dois pontos ao longo da curva: o ponto de entrada de ar no solo e condição residual. A zona de efeito limite é a região em que todos os poros do solo estão saturados por água, chamada de efeito limite pois a partir deste ponto acontece a entrada de ar.

Feuerharmel *et al.*, (2006) afirmam que os solos residuais e coluvionares das regiões tropical e subtropical frequentemente apresentam curvas características em formato bimodal, indicando que tanto os microporos quanto os macroporos presentes nestes solos controlam os fluxos de entrada e saída de água.

Por isso, Boszczowski e Ligocki (2012) dizem que os solos maduros apresentam a curva de retenção em forma de “sela” e que esse formato é peculiar dos solos residuais intemperizados que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados de partículas, fazendo com que o valor de entrada de ar nestas estruturas seja duplo ou triplo.

A Figura 2.8 apresenta um modelo de curva em formato bimodal, em que se observa estas características: dois valores de entrada de ar e a presença de um platô intermediário. O menor valor de entrada de ar corresponde à dessaturação dos macroporos e o segundo (maior) à dessaturação de microporos, Feuerharmel *et al.*, (2006).

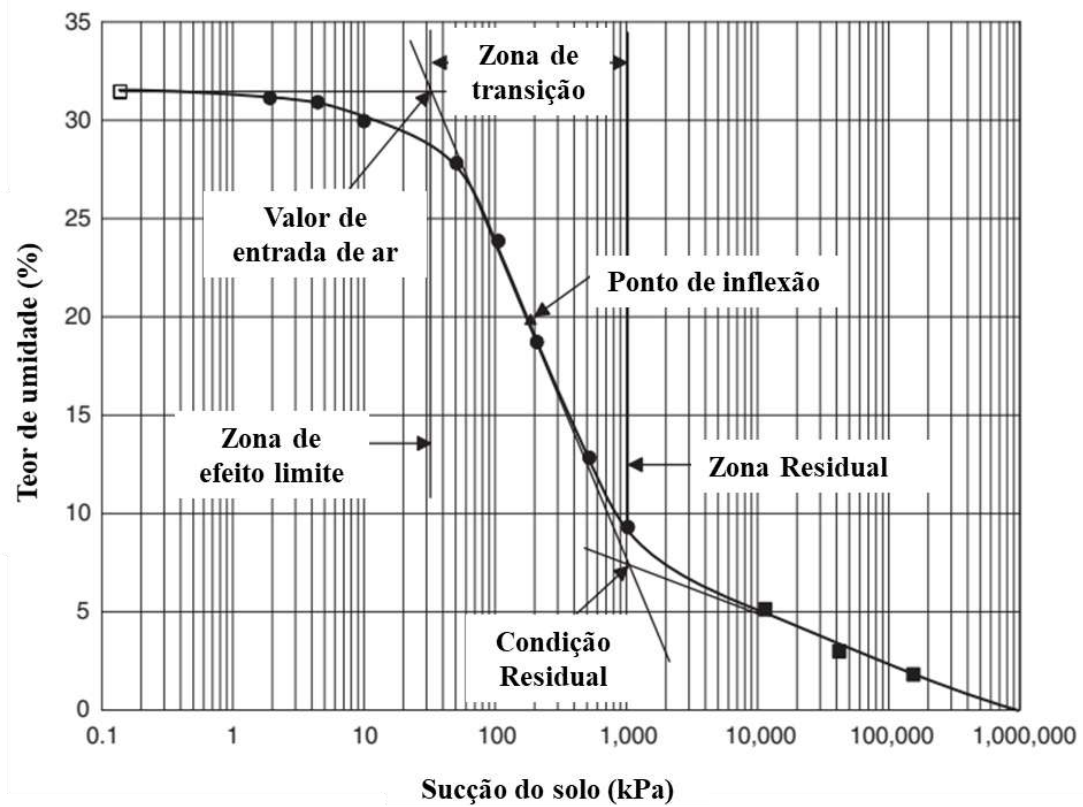


Figura 2.7 – Modelo de SWCC com indicação das zonas de dessaturação.

Fonte: Fredlund *et al.* (2012).

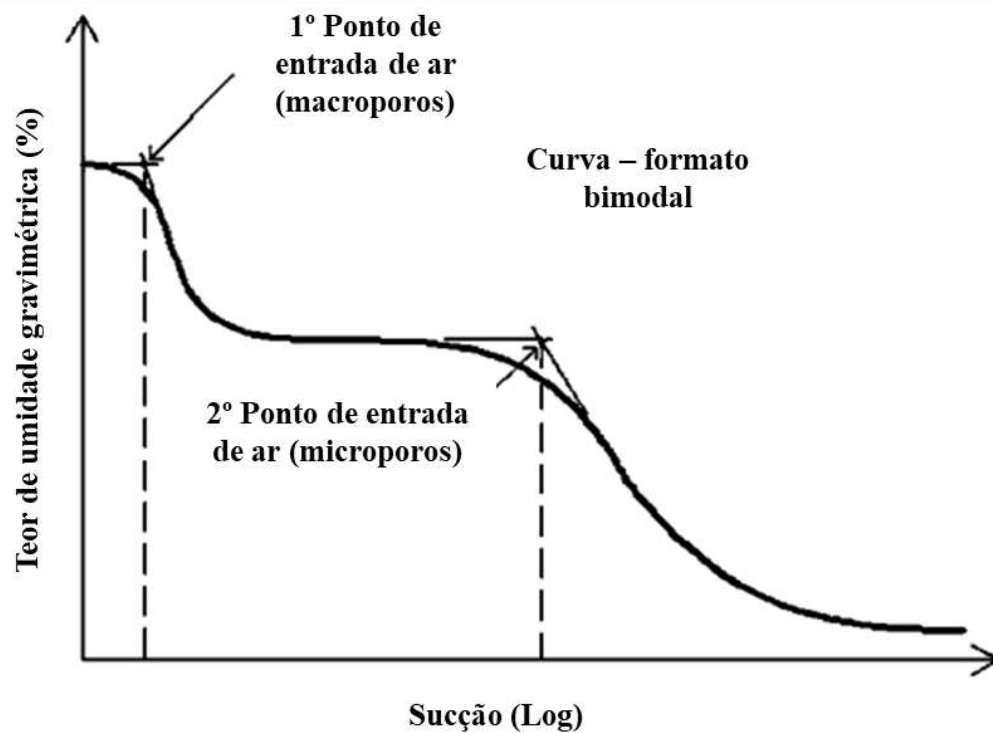


Figura 2.8 – Modelo de curva no formato bimodal.

Fonte: Adaptado de Feuerharmel *et al.*, (2006).

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) afirmam que solos argilosos apresentam valores de entrada de ar superiores aos de solos siltosos e arenosos e pontos residuais que nem sempre podem ser identificados visualmente. Além disso, forças de adsorção influenciam a curva característica em quase toda a faixa de sucção do solo e o fluxo de vapor tem um papel importante na transferência de umidade além do ponto residual, portanto, a teoria capilar não pode explicar completamente o comportamento da SWCC de solos argilosos.

Marinho e Stuermer (2000) estudaram a curva característica de solos compactos por meio da técnica do papel filtro. Na ocasião, eles ensaiaram um solo residual de Gnaiss em diferentes energias de compactação e observaram que o ponto de entrada de ar na curva característica não é muito afetado pelo teor de umidade de compactação, mas sim pela energia aplicada.

Camapum de Carvalho *et al.*, (2015a) entendem que a curva característica de retenção de água é função da estrutura do solo, mas depende, em igual grau, de sua composição química e mineralógica, que evolui com a história do solo, com a atuação do processo de intemperismo. Do mesmo modo, o comportamento hidráulico e mecânico do solo dependem de sua estrutura e de sua composição química e mineralógica, encontre-se o solo no estado natural ou compactado.

2.2.3.4 Propriedades Mecânicas

Existem basicamente quatro principais tipos de ensaios que são utilizados para avaliação mecânica dos solos na área de pavimentação: compactação, CBR, Módulo Resiliente (MR) e Deformação Permanente (DP). A seguir são apresentadas algumas peculiaridades dos solos tropicais observadas através desses ensaios.

Bernucci (1995) afirma que solos lateríticos apresentam curvas de compactação geralmente com pico bem definido no peso específico aparente seco máximo, grande inclinação do ramo seco, mesmo nos tipos mais argilosos. Esta característica tem grande influência na compactação em campo, uma vez que pequenas variações de umidade podem acarretar mudanças significativas de peso específico e, conseqüentemente, de comportamento das camadas compactadas. Corroborando com esta afirmação, Pinto (2006) apresenta formatos de curvas de compactação de diversos solos brasileiros (Figura 2.9).

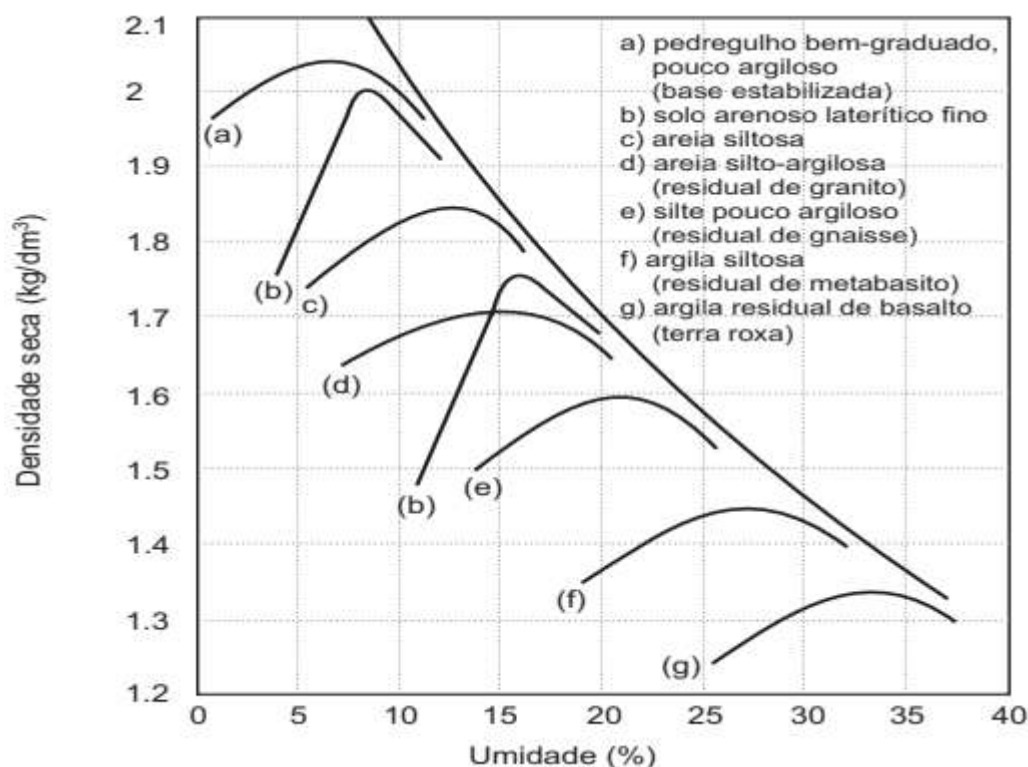


Figura 2.9 – Curvas de compactação de diversos solos brasileiros.

Fonte: Pinto (2006).

Como dados de referência, apresentam-se os gráficos da Figura 2.10 com valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo de (a) 65 solos lateríticos (LA, LG' e LA), na energia de compactação normal e (b) 52 solos compactados na Energia Intermediária (EI). Em ambos os gráficos foram indicadas as equações de regressão linear resultantes. Tais dados foram obtidos em pesquisas coordenadas pelo Prof. Nogami, apresentadas na tese de Bernucci (1995).

Na Figura 2.10 observa-se que os solos argilosos tendem a apresentar maiores valores de umidade ótima e menores valores de peso específico aparente seco máximo, quando comparado aos solos arenosos ou areno-argilosos, independente do grau de compactação. Observa-se ainda que os solos arenosos e areno-argilosos apresentam valores semelhantes indicando que a fração areia tende a comandar o comportamento destes solos quando compactados.

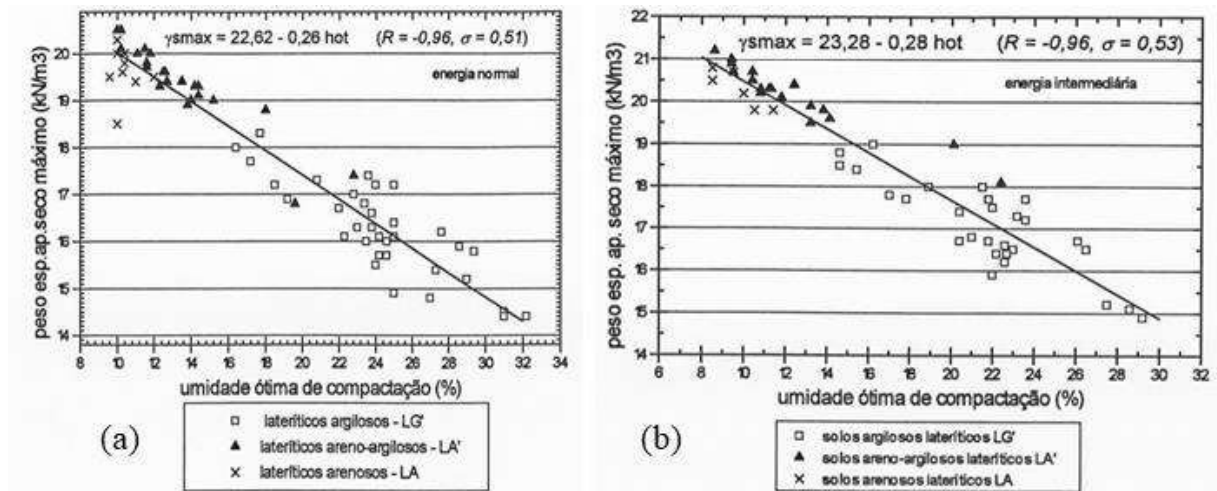


Figura 2.10 – Gráfico de umidade ótima versus peso específico aparente seco máximo de solos lateríticos compactados na energia (a) normal e (b) intermediária.

Fonte: Bernucci (1995).

Villibor e Nogami (2009) mostraram que a capacidade de suporte dos solos lateríticos, mesmo após imersão, é nitidamente superior aos dos solos não lateríticos, como pode ser observado na Figura 2.11, a qual relaciona os valores de CBR (%) com o Índice de Grupo (IG). Observaram ainda que, nas mesmas condições, os solos lateríticos apresentam expansões menores do que os não lateríticos e extremamente pequenas (menores que 0,4%).

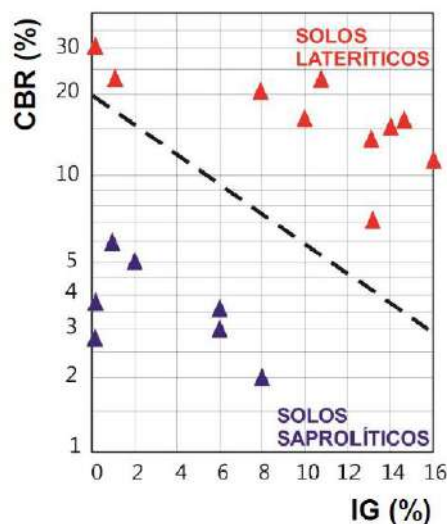


Figura 2.11 – Gráfico do CBR e Índice de Grupo de amostras de solos lateríticos e saprolíticos.

Fonte: VILLIBOR (2017).

Ainda sobre a Figura 2.11 é válido notar que a maior parte dos solos lateríticos apresentados possui IG maior que 4, fato que os enquadra na classe de comportamento “sofrível

a mal” da Classificação TRB, mostrando assim mais uma vez que os solos tropicais lateríticos podem apresentar boa capacidade de suporte apesar de não se encaixar adequadamente na classificação tradicional.

No que se refere ao Módulo de Resiliência, que “depende da natureza e constituição do solo, das condições de estado e das solicitações das tensões” (MEDINA e MOTTA, 2015), também foram obtidos bons resultados no comportamento dos solos tropicais.

Na pesquisa de Guimarães *et al.*, (2015) foi observado que existe uma excelente correlação entre a metodologia MCT e a resiliente, ou seja, solos de comportamento laterítico quase sempre apresentam elevado valor de MR, se comparados aos demais solos finos, podendo, inclusive, ser superior ao módulo apresentado por alguns solos ou materiais pedregulhosos tradicionais.

Nesse mesmo sentido, Delgado (2012) estudou um solo fino do Maranhão e observou que, apesar dos resultados da caracterização física indicarem um solo inadequado para uso na pavimentação, segundo a classificação geotécnica tradicional, na classificação MCT o solo apresentou comportamento laterítico (LG’ – solo argiloso laterítico) e o MR médio foi de 393 MPa, que é um valor bastante elevado e comparável a MR de materiais granulares como as britas.

Marangon e Motta (2006) investigaram os valores típicos para o módulo de resiliência para um conjunto de 16 amostras coletadas na macrorregião da Zona da Mata do Estado de Minas Gerais. Os resultados mostraram uma certa constância de comportamento no modelo tensão-desvio, obtendo-se para k_1 valores de 57 a 139 MPa e k_2 de -0,37 a -0,74, com R^2 (coeficiente de correlação) elevados (próximos de 1), onde k_1 e k_2 são os coeficientes experimentais do modelo. No entanto, o modelo composto foi o que apresentou os melhores resultados para a modelagem do módulo de resiliência (como também observado por Takeda *et al.*, 2006 e Costa e Motta, 2007), seguido do modelo σ_d (Tensão desvio), por se tratar de solos predominantemente argilosos.

Dalla Roza e Motta (2018) estudaram comportamento de 3 solos do Mato Grosso, sendo dois deles classificados como solo argiloso laterítico (LG’) segundo à Classificação MCT. Os valores médios de MR foram elevados, na ordem de 300 a 388 MPa e R^2 baixos para o modelo composto, inferindo que predomine a tendência a módulos constantes nos gráficos de $\log MR$ versus $\log$ tensões σ_d (Tensão desvio) e σ_3 (Tensão confinante). E quanto à deformação permanente o comportamento foi do tipo AB (altas deformações iniciais seguido de uma tendência de acomodamento das deformações).

Os estudos realizados por Takeda *et al.*, (2006) indicaram que a influência da granulometria é predominante sobre o MR se comparada à influência da gênese do solo, mas que a gênese dos solos tem influência decisiva no mecanismo de absorção de água, sendo que solos lateríticos demandam 3,3 vezes mais tempo para alcançarem a mesma condição de umidade de solos não-lateríticos. Observaram ainda que a secagem conduz ao aumento do valor do MR, enquanto o umedecimento acarreta a sua redução. Além disso, se considerados iguais tempos de exposição à água, a redução relativa do MR é aproximadamente 3,4 vezes maior para os solos não-lateríticos quando comparada a dos lateríticos.

Guimarães (2009) estudou a deformação permanente de vários solos tropicais e concluiu que a maioria dos materiais estudados, especialmente os lateríticos, apresentou comportamento do tipo A – Acomodamento plástico ou tipo AB – deformações iniciais significativas seguidas de acomodamento plástico, dependendo da condição de umidade de compactação, sendo menos frequentes as situações que resultaram em comportamento do tipo B, ou seja, de escoamento plástico.

Guimarães (2009) observou ainda que, a análise do registro das deformações resilientes, e a realização de ensaios de MR após o ensaio de deformação permanente, permitem concluir que para solos lateríticos, finos ou pedregulhosos, ocorre um enrijecimento durante o ensaio de deformação permanente de longa duração, fato que não foi observado para os demais materiais. Tal enrijecimento pode estar associado a aspectos físico-químicos dos solos lateríticos e pode representar um benefício para o comportamento estrutural de pavimentos em fase de operação.

A Figura 2.12 (a) e (b) apresenta os resultados dos ensaios de MR e DP de um solo argiloso laterítico (LG', na classificação MCT) de Ribeirão Preto (São Paulo) estudado por Guimarães (2009). Para o MR obteve-se o melhor coeficiente de correlação no modelo composto e valores de MR médios de 275 MPa (Energia Proctor Intermediário) e 258 MPa (Energia Proctor Normal), que são valores coerentes com os obtidos nos estudos de Alvarez Neto (1997), Chaves (2000), Costa e Motta (2007), Villibor e Nogami (2009), Delgado (2012), Sousa (2016) e outros. Já no ensaio de DP observou-se que nos nove ensaios realizados todos apresentaram estabilização da deformação permanente.

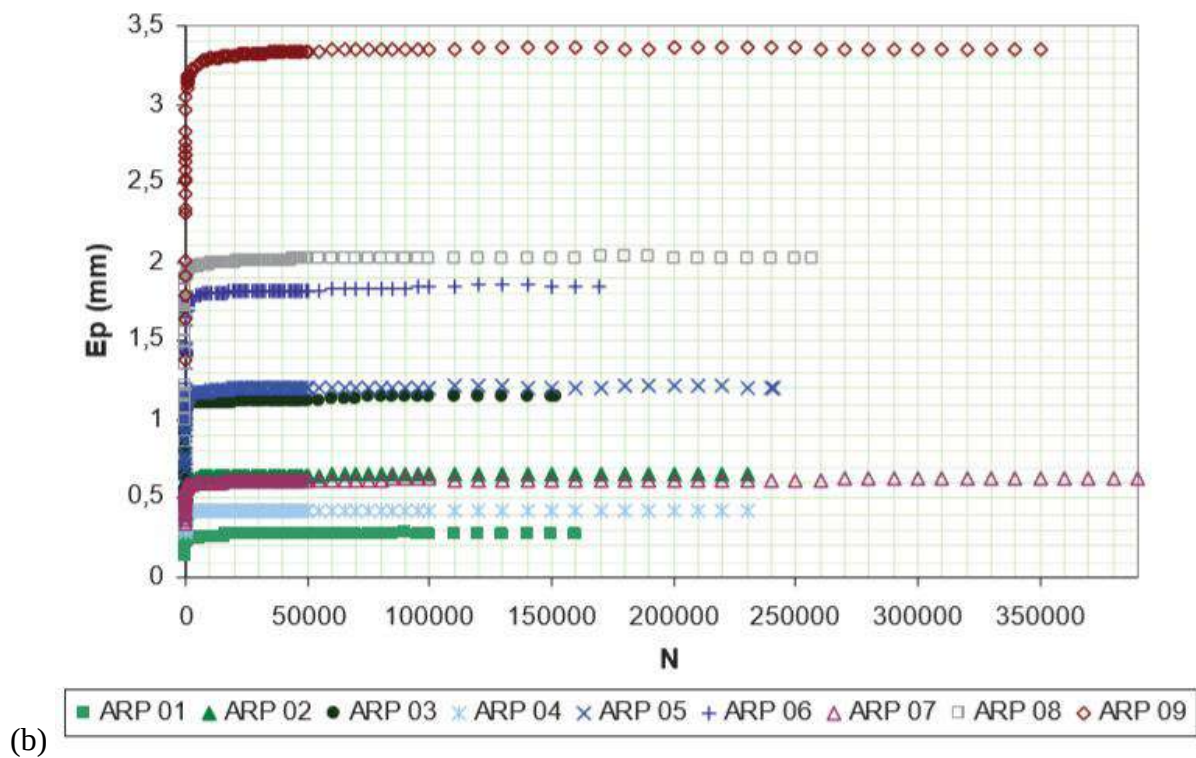
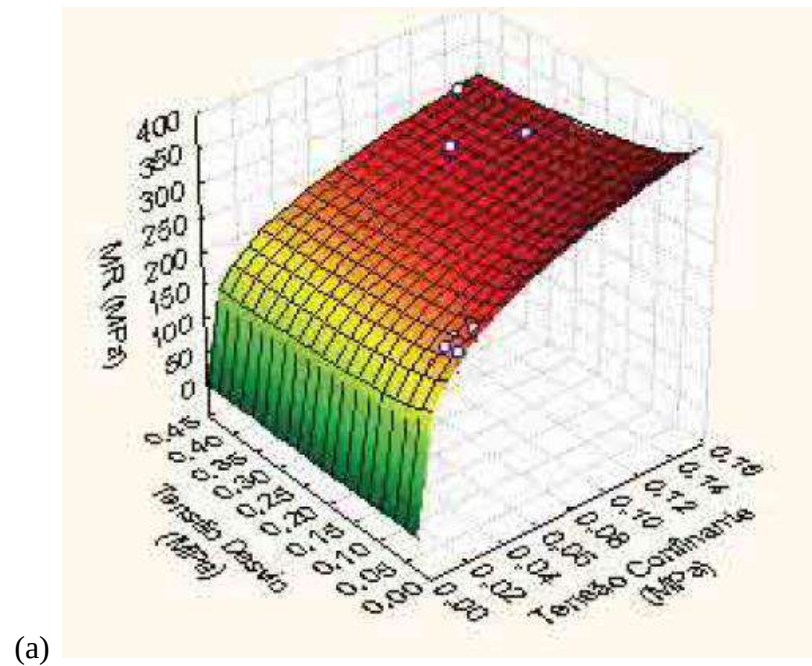


Figura 2.12 – Resultados dos ensaios de a) MR – modelo composto e b) DP, de um solo de Ribeirão Preto/SP.

Fonte: GUIMARÃES (2009).

2.2.4 O uso dos solos tropicais finos em pavimentação

Este tópico tem como finalidade apresentar algumas das experiências com a aplicação de solos tropicais finos em camadas de pavimento, com o intuito de mostrar o

comportamento deste tipo de solo em campo, sendo várias vezes identificado um comportamento adequado tanto quanto de outros tipos de materiais convencionais, como as camadas de material granular, por exemplo.

Silva Filho (2018), em sua tese de doutorado, realizou a execução e monitoramento do comportamento mecânico de um trecho experimental ferroviário contendo solo laterítico localizado em um pátio ferroviário de Açailândia – MA. As características geotécnicas do solo estão apresentadas na Tabela 2.1. Verifica-se que se trata de um solo arenoso fino laterítico (SAFL, classe MCT: LA') com valor de CBR abaixo do comumente aplicado em projetos ferroviários (>20%), no entanto, com baixo valor de expansão e Módulo Resiliente médio ($MR_{\text{médio}}$) em torno de 240 MPa (coerente com os valores observados nas pesquisas mencionadas no tópico anterior). O ensaio de compactação foi realizado em moldes cilíndricos de dimensões de 10 cm (diâmetro) por 20 cm (altura) e na energia equivalente ao Proctor Normal. O solo foi utilizado como camada de sublastro e após a execução da camada foi observado o aparecimento de trincas, conforme mostra a Figura 2.13.

Sobre isso, Silva Filho (2018) diz que nestes casos o trincamento não é somente aceitável, como também desejável, desde que as trincas não sejam muito abertas, sendo recomendado até 2 mm de espessura. Os blocos assim formados são muito mais rígidos e resistentes à deformação permanente.

Tabela 2.1 – Características geotécnicas do solo estudado por Silva Filho (2018).

Amostra	$W_{\text{ót}}$ (%)	$\rho_{\text{dmáx}}$ (g/cm ³)	Expansão (%)	LL/IP (%)	CBR (%)	MCT Tradicional	$MR_{\text{médio}}$ (MPa)
Amostra 01	14,0	1,835	0,02	21,5/6,9	12,5	LA'	254,50
Amostra 02	14,4	1,808	0,00	20,5/7,1	12,5	LA'	241,00
Amostra 03	13,3	1,862	0,00	21,5/7,0	10,1	LA'	226,50
Energia de compactação: Proctor Normal; Moldes cilíndricos de 10 cm x 20 cm.							
Composição Granulométrica (%)							
Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
		Fina	Média	Grossa			
33	7	27	26	6	1		

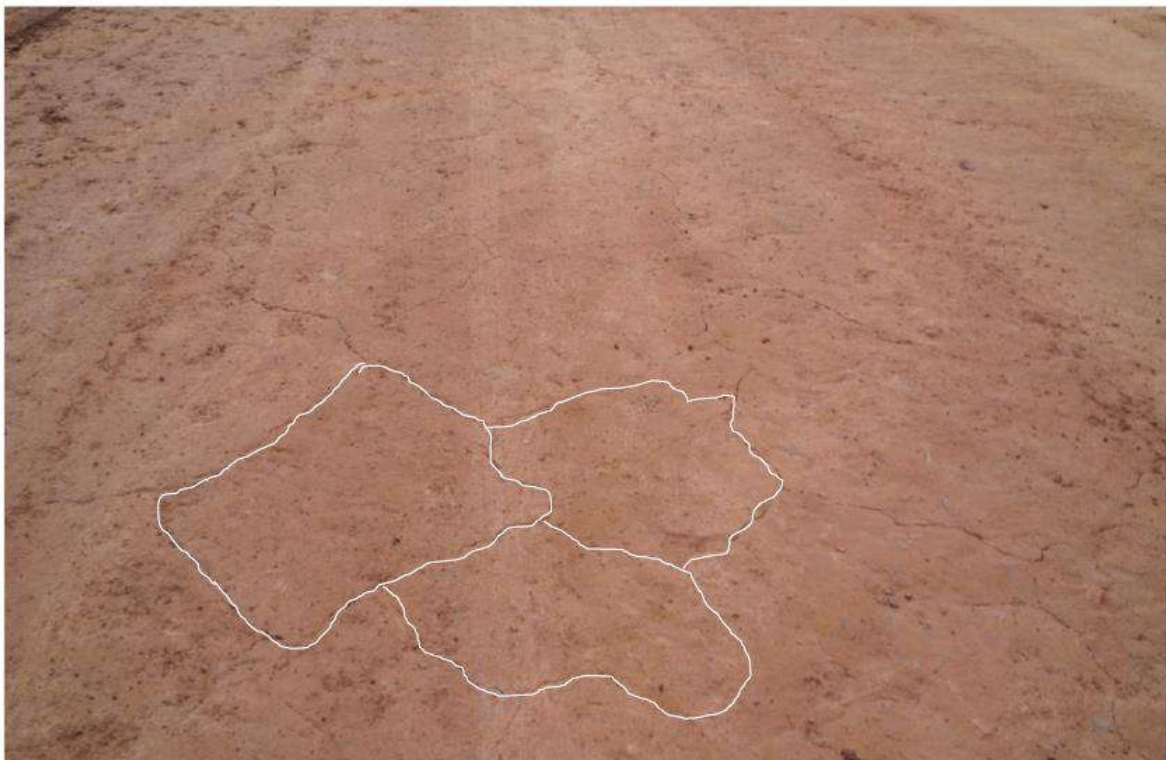


Figura 2.13 – Aspecto do trincamento observado na camada de sublastro de trecho experimental.

Fonte: SILVA FILHO (2018).

Como técnica construtiva para o tratamento destas trincas foi realizado selagem parcial das trincas após 72 horas de cura, realizando o umedecimento da superfície da camada executada, seguido de raspagem com motoniveladora, conforme mostrado na Figura 2.14.



Figura 2.14 – a) Umedecção da plataforma para selagem; b) trincas seladas e c) liberação do tráfego.

Fonte: SILVA FILHO (2018).

Silva Filho (2018) afirmou que o trecho experimental foi executado em setembro de 2015, pouco antes do período chuvoso na região se iniciar e que desde a liberação do tráfego até a data de finalização da pesquisa, decorreram 3 anos de operação regular, com o trânsito das mais diversas composições e veículos de via, sem nenhum registro de intervenções corretivas ou restrições operacionais.

Afirmou ainda que após a inspeção para verificação da integridade da camada foi possível confirmar que não ocorreu a penetração da brita do lastro no sublastro, tópico este que talvez suscite mais dúvidas quando se discute a utilização de materiais mais finos para a camada de sublastro. Esta resistência à cravação se explica devido a retração ocorrida no processo de “cura” e formação de blocos, transformando a camada de sublastro em uma “laje” de alta resistência mecânica e de cravação.

Rezende (2003), em sua tese de doutorado, realizou o acompanhamento do comportamento estrutural de dois trechos experimentais constituídos de materiais alternativos e executados em rodovias do Distrito Federal. No trecho experimental 1, a camada de base (20 cm) de alguns subtrechos foi composta por um solo fino de argila laterítica, encontrado no próprio local da obra, com as seguintes classificações geotécnicas: USCS - MH; TRB – A-7-5 e, MCT – LG’. Após a compactação da base com solo fino (energia Proctor intermediária), deixou-se a camada compactada exposta ao ar e ao sol por um período superior a 48h para provocar a perda de cerca de 30 a 40% do teor de umidade de compactação. Essa secagem levou a uma intensa contração da base, assim como foi observado no trecho experimental de Silva Filho (2018), desenvolvendo-se trincas com abertura de 3,0 a 6,0 mm e formando, como consequência, placas quadrangulares com aproximadamente 15 cm x 15 cm (Figura 2.15).



Figura 2.15 – Padrão de trincamento na base de solo fino, trecho experimental 1 observado por Rezende (2003).

Fonte: REZENDE (2003).

Após o tempo de exposição e o desenvolvimento das trincas, a base foi umedecida para realização do corte de acabamento, visando a calafetação das trincas de grande abertura com a própria argila. Quatro anos após a construção deste primeiro trecho, foram realizadas inspeções da superfície do pavimento através do método de avaliação objetiva e observou-se a ocorrência de trincas, afundamentos na trilha de roda, escorregamentos e desagregação do revestimento, classificando o trecho como péssimo. Porém, na pesquisa de Rezende (2003) também foram executados subtrechos com as misturas do solo com cal e brita e com adição de manta geotêxtil impregnada com betume entre o subleito e a camada de base, entre a camada de base e o revestimento e envelopando toda a camada de base.

Assim, em relação as condições de superfície, o melhor comportamento foi verificado no subtrecho com solo-brita (80%), seguido do solo-cal (2%). Observou-se ainda que envelopar toda a camada de base de solo fino melhora o desempenho do pavimento e que a colocação do geotêxtil entre a base e o revestimento protege mais o pavimento do que quando a manta é colocada entre o subleito e a base.

No segundo trecho experimental do trabalho de Rezende (2003) alguns subtrechos foram formados por camadas de base e sub-base de solo fino, ambas com 15 cm de espessura. Assim, como no primeiro trecho, o solo fino utilizado foi um solo local e de mesmas classificações geotécnicas mencionadas para o solo anterior.

Neste trecho foram testados a variação do tempo de exposição da camada compacta ao ar e ao sol, a fim de verificar a questão do aparecimento das trincas, e, em um subtrecho aguardou-se as 48h e em outro não. Foi observado que em ambas as situações houve o trincamento, no entanto, a quantidade, profundidade e espessura das trincas foi bem mais acentuado no subtrecho em que se aguardou as 48h (Figura 2.16).



Figura 2.16 – Padrão de trincamento na base de solo fino, trecho experimental 2 da pesquisa de Rezende (2003), (a) logo após a compactação e (b) 48h após a compactação.

Fonte: REZENDE (2003).

Quanto à avaliação da superfície, os subtrechos executados com solo-cal e com solo fino trincado foram classificados como bons e aquele executado com solo fino sem trincar foi classificado como regular. Rezende (2003) também realizou retroanálises considerando dados de viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer (FWD) e dentre os resultados obtidos tem-se que a sub-base executada com solo fino trincado apresentou maior módulo do que a sem trincar, indicando que o processo de trincamento é benéfico para o pavimento.

Nove anos após a primeira avaliação de superfície por Rezende (2003), Pessoa (2012) realizou, em sua tese, o acompanhamento desses mesmos trechos e chegou a algumas conclusões interessantes, a saber:

- No trecho 1: Os subtrechos apresentaram quase todos os tipos de defeitos superficiais, com variado grau de severidade. Todos os subtrechos haviam sofrido correção do revestimento por meio de operações “tapa-buracos”. Os subtrechos construídos com expurgo, com solo fino e com solo-cal receberam recapeamento descontínuo, principalmente nas trilhas de rodas e bordas externas da pista. Os subtrechos em solo-brita e aqueles contendo geotêxtil são os que se encontraram mais preservados, sendo, porém, necessário destacar que estes últimos se encontram em condição de subleito e de drenagem mais favoráveis que os demais (subleito em corte);
- No Trecho 2: Os subtrechos construídos com solo-cal e solo fino com retração apresentaram menos defeitos. Já o subtrecho de solo fino sem retração apresentou elevado grau de degradação, principalmente nas trilhas de roda em toda a extensão. Esse trecho recebeu pouca ou nenhuma interferência corretiva apontando para a importância do acostamento de revestimentos mais impermeáveis quando se utiliza solo fino compondo a estrutura de pavimento.

Como outro exemplo de aplicação, tem-se a Figura 2.17 que apresenta uma camada de base de uma rodovia, executada com Laterita, na Amazônia em 1998 (BR 317 no Acre). Observou-se o surgimento de trincas de retração após a compactação da camada em campo. Em (a) tem-se o padrão de trincamento imediatamente e em (b) 48 horas após a compactação.

Guimarães (2009) afirmou que a referida via ficou por cerca de 2 anos, após sua execução, recoberta apenas por imprimação e foi observado que não houve reabsorção de água, mesmo com o intenso volume de chuvas da região, o que é um fato bastante relevante quando se pensa em aplicar este tipo de material em camadas de pavimento. Além disso, ele observou que ao analisar as trincas apresentadas verificou-se uma analogia com o padrão de trincamento

observado em solos lateríticos de granulação fina, tal como mostrado em Nogami e Villibor (1995) e Villibor e Nogami (2009), indicados na Figura 2.18.



Figura 2.17 – Padrão de trincamento de uma camada de base rodoviária laterítica na Amazônia, em a) imediatamente após a compactação e b) depois de 48h (imprimada com CM-30).

Fonte: GUIMARÃES (2009).

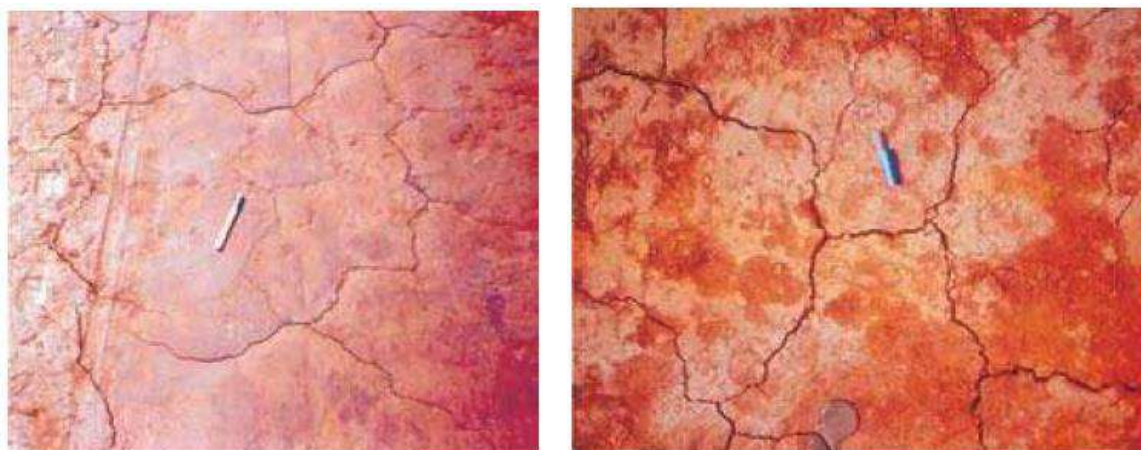


Figura 2.18 – Trincamento devido a secagem de solos finos lateríticos dos grupos (a) LA' e (b) LG'.

Fonte: VILLIBOR e NOGAMI (2009).

Villibor e Nogami (2009) recomendam que, caso os solos sejam pouco coesivos (com c' abaixo de 1,0), deve-se construir sobre a imprimação uma camada de proteção (anticravamento), que consiste em um tratamento superficial simples, invertido, e sobre essa camada será construído o revestimento.

Essa camada de anticravamento, segundo os mesmos autores, é também necessária quando o tráfego excede determinados limites. Para tráfegos maiores que 10^6 solicitações do eixo padrão, por exemplo, quando não existe essa camada de proteção pode ocorrer a penetração do agregado do revestimento na base, porém essa afirmação não pode ser considerada como

regra, já que na experiência observada em Silva Filho (2018) não houve esse tipo de penetração. Isto mostra a necessidade de foco também nesse aspecto, para avaliar a necessidade ou não da execução dessa camada extra, que representa custo para execução do pavimento.

Uma outra visão que é importante destacar é a observada por Lopes (2017). Em sua dissertação de mestrado, ao analisar o comportamento mecânico e hidráulico de solos finos aplicados em pavimento ferroviário, ela observou (através de simulações computacionais com o software IVFlow) que do ponto de vista puramente mecânico, as amostras de classes MCT LA' e LA estariam aptas para uso no sublastro, visto que apresentaram elevada capacidade de suporte (módulo resiliente) e deformação permanente relativamente baixa. Entretanto, em função da sensibilidade do material a água, ela concluiu que apenas a amostra LA' mostrou-se adequada para ferrovia que tem entrada de água pelo lastro.

Apesar do estudo desenvolvido por ela ter sido desenvolvido em ferrovias, onde não há uma camada “impermeável” como o revestimento do pavimento rodoviário, viu-se nos exemplos anteriores (Rezende, 2003; Guimarães, 2009; Villibor e Nogami, 2009; Pessoa, 2012 e Silva Filho, 2018) que ainda é necessário estudos voltados para essa parte de infiltrabilidade em ambos os modos de transporte, a fim de que se possa entender melhor o comportamento desses tipos de solos sobre essa perspectiva.

Nesse contexto, diante do exposto neste tópico, entende-se que o trincamento das camadas com solo fino é importante e proporciona um enrijecimento benéfico para o pavimento, provocando um incremento do módulo resiliente. Porém, devem ser tomados cuidados especiais com a camada de solo fino em si (selagem das trincas) e também com a qualidade do revestimento e da drenagem.

2.3 Classificação de solos

2.3.1 A classificação pedológica

A Pedologia é um ramo da ciência do solo que objetiva estudar a origem, a morfologia, o mapeamento e a classificação dos solos. Como já mencionado, o Brasil possui um sistema taxonômico de classificação dos solos, o SiBCS.

O SiBCS é, de acordo com as informações disponíveis no site da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), um sistema taxonômico de solos, hierárquico, multicategórico e aberto, com a finalidade de classificar todos os solos existentes no Brasil. A

classificação é realizada com base na análise das características ambientais, morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas do perfil do solo.

A classificação do solo é feita considerando-se as subcamadas que compõem o perfil, denominadas de horizontes. Os solos do Brasil são classificados em basicamente 13 tipos conforme indicados no Quadro 2.2, onde se indica a conotação dos seus respectivos nomes.

Quadro 2.2 – Tipos de solos brasileiros conforme o SiBCS.

Nome da Classe	Etimologia	Características básicas
Argissolos	Do latim <i>argilla</i> , conotando solos com processo de acumulação de argila.	Horizonte B textural, antigo podzólico
Cambissolos	Do latim <i>cambiare</i> , trocar; conotando solos em processo de formação (transformação).	Horizonte B incipiente
Chernossolos	Do russo <i>chern</i> , negro; conotativo de solos ricos em matéria orgânica (cor escura).	Preto, rico em bases
Espedossolos	Do grego <i>spodos</i> , cinza vegetal; solos com acumulação de materiais orgânicos;	Horizonte B espódico
Gleissolos	Do russo <i>gley</i> , massa de solo pastosa; conotativo de excesso de água.	Horizonte Glei
Latossolos	Do latim <i>lat</i> , material altamente alterado (tijolo); conotativo de elevado conteúdo de sesquióxidos.	Horizonte B latossólico
Luvissolos	Do latim <i>luere</i> , lavar; conotativo de acumulação de argila.	Saturado. Acumulação de argila. Argila de alta atividade.
Neossolos	Do grego <i>néos</i> , novo, moderno; conotativo de solos jovens, em início de formação.	Pequeno desenvolvimento
Nitossolos	Do latim <i>nitidus</i> , brilhante; conotativo de superfícies brilhantes.	Agregados com faces nítidas
Organossolos	Do grego <i>organikós</i> , compostos de carbono. Conotativo de solos orgânicos, ambientes de grande umidade.	Horizonte H ou O hístico
Planossolos	Do latim <i>planus</i> , plano, horizontal; conotativo de solos desenvolvidos com encharcamento superficial estacional.	Horizonte B plânico
Plintossolos	Do grego <i>plinthos</i> , ladrilho; conotativo de materiais argilosos, coloridos, que endurecem quando expostos.	Horizonte plântico
Vertissolos	Do latim <i>vertere</i> ; conotativo de movimento na superfície do solo (expansão/contração).	Horizonte vértico

Fonte: Elaborado com base no conteúdo disponível no site da Embrapa e em IBGE (2015) e Lespch (2011).

De especial interesse para esta pesquisa estão os solos do tipo Argissolo e Latossolo, que são solos com elevado grau de intemperismo, com presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e horizonte B espessos, podendo assim fornecer volumes consideráveis de material para uso na pavimentação. Conforme já mencionado, estes solos costumam apresentar comportamento laterítico na classificação MCT.

De acordo com a Embrapa (2020), os Argissolos são solos medianamente profundos a profundos, moderadamente drenados, com horizonte B textural, de cores vermelhas a amarelas e textura argilosa, com baixos teores de matéria orgânica. Apresentam argila de atividade baixa, podendo ser alíticos (altos teores de alumínio), distróficos (baixa saturação de bases) ou eutróficos (alta saturação de bases), sendo normalmente ácidos.

Os Argissolos desenvolvem-se a partir de diversos materiais de origem, em áreas de relevo plano a montanhoso. A maioria dos solos desta classe apresenta um acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo. A transição entre os horizontes A e B é, usualmente clara, abrupta ou gradual.

Já os Latossolos, segundo a Embrapa (2020), são solos de intemperização intensa chamados popularmente de solos velhos, sendo definidos pela presença de horizonte diagnóstico latossólico e características gerais como: argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio, argilas de baixa atividade (baixa CTC – Capacidade de Troca Catiônica), fortemente ácidos e baixa saturação de bases. São solos bem estruturados e muito porosos. Porém, devido a estes aspectos físicos, possuem baixa retenção de umidade, principalmente os de textura mais grosseira em climas mais secos.

Para aprofundamento dos conhecimentos relacionados à classificação pedológica sugere-se a consulta das referências disponíveis, dentre as quais se pode citar: o Manual Técnico de Pedologia do IBGE (2015), o Livro 19 Lições de Pedologia (Lespch, 2011) e o próprio SiBCS disponível no site da Embrapa (www.embrapa.br/solos/sibcs).

2.3.2 A classificação geotécnica tradicional

As classificações de solos consideradas tradicionais são: USCS e TRB, como já mencionado. O sistema USCS foi criado pelo Engenheiro Arthur Casagrande e é objeto da norma D2487-17 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Em resumo, a classificação divide os tipos de solos em três grandes grupos: grossos, finos e turfas. O Quadro 2.3 apresenta um resumo da classificação USCS.

Quadro 2.3 – Resumo da Classificação USCS.

GRADUAÇÃO	TIPO DE SOLO		CLASSE	CARACTERÍSTICAS
SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira de nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e pedregulho, com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e pedregulho, com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de pedregulho, areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos ou misturas de pedregulho, areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areia sem finos	SW	Areias bem graduadas ou pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areia com finos	SM	Areias siltosas – mistura de areia e silte.
			SC	Areias argilosas – mistura de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	Siltos e Argilas com $LL \leq 50$		ML	Siltos inorgânicos – areias muito finas – areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade – Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
			OL	Siltos orgânicos – argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.
	Siltos e Argilas com $LL > 50$		MH	Siltos – areias finas ou siltos micáceos – siltos elásticos.
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.
			OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade.
	Solos altamente orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Os solos grossos são os que possuem mais de 50% dos seus grãos retidos na peneira de número 200, ou seja, maiores que 0,074 mm, assim incluem os pedregulhos, solos

pedregulhosos ou arenosos com pequena quantidade de silte e/ou argila e areias. As possíveis classes são: GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP e SM.

Os solos finos são os siltosos ou argilosos que possuem mais de 50% do seu material com grãos menores que 0,074 mm. Podem ser de baixa compressibilidade (Limite de Liquidez - $LL < 50$) ou de alta compressibilidade ($LL > 50$), cujas classes podem ser: CL, CH, ML, MH, OL e OH. Já as turfas, incluem solos altamente orgânicos e compressíveis, classificado como Pt (Peat).

A identificação da classe do solo é realizada através da junção de duas letras: a primeira refere-se ao tipo de solo e a segunda à característica geral de comportamento do mesmo, como exemplos tem-se: a Classe GW, o G indica o tipo de solo: G *Gravel* (pedregulho) e o W indica que ele é um solo *Well graded* (bem graduado), já a Classe CL, o C indica tratar-se de uma Argila (*Clay*) e o L indica ser um solo de baixa compressibilidade (*Low compressibility*).

O Sistema de Classificação dos solos do *Transportation Research Board* (TRB) é atualmente apresentado no documento M 145 da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e na norma ASTM D3282-15.

A classificação baseia-se na divisão dos solos em dois grandes grupos: solos granulares (possuem 35% ou menos de material passante na peneira nº 200 - 75µm) o quais são indicados como solos de comportamento “excelente a bom” e, os solos siltosos-argilosos (tem mais de 35% passando na peneira nº 200), que são indicados como de comportamento “fraco a pobre” como camada de subleito.

Dentro de cada grupo há uma divisão em classes conforme a porcentagem de material passando nas peneiras de nº 10 (2 mm), nº 40 (425 µm) e nº 200, e com os valores dos Índices de Atterberg (Limite de Liquidez – LL e Índice de Plasticidade – IP). O Quadro 2.4 apresenta um resumo da classificação TRB.

O universo desta pesquisa está focado nos solos de granulação fina, portando, a seguir apresentar-se-á, de forma sumarizada, as características das classes de solos finos que são indicadas na classificação TRB, considerando o disposto na norma ASTM D3282-15.

A classe A-4 inclui os solos siltosos não plásticos a moderadamente plásticos, geralmente com 75% ou mais de material passante na peneira nº 200. Este grupo também inclui solos siltosos contendo 64% de areia e pedregulhos retidos na peneira nº 200.

O grupo A-5 possui basicamente as mesmas características do grupo A-4, exceto pelo fato de que geralmente possuem caráter micáceo, podendo serem altamente elásticos devido ao elevado LL.

A classe A-6 engloba solos argilosos plásticos, geralmente com 75% ou mais passantes na nº 200 e, também inclui misturas de solo argiloso fino com até 64% de areia e pedregulhos retidos nº 200. Os materiais desse grupo geralmente apresentam uma elevada variação de volume entre os estados úmido e seco.

A classe A-7 possui solos com características semelhantes às do grupo A-6, exceto pelo fato de possuírem elevados valores de LL (característicos do grupo A-5) e também podem ser elásticos e sujeitos a alta variação de volume.

O Grupo A-7 é subdividido em A-7-5 e A-7-6, o primeiro inclui os materiais com índices de plasticidade moderados em relação ao LL, podendo ser elásticos e sujeitos a alta variação de volume. E o segundo, inclui materiais com alto IP em relação ao LL e são sujeitos a alterações de volume extremamente altas.

Quadro 2.4 – Resumo da Classificação Rodoviária TRB.

CLASSIFIC AÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES ≤ 35% passando # nº 200							MATERIAIS SILTO- ARGILOSOS > 35% passando # nº 200			
Classificação em grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1a	A-1b		A-2a	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando na peneira:											
Nº 10	50 máx										
Nº 40	30 máx	30 máx	51 mín								
Nº 200	15 máx	25 máx	10 máx	35% máx	35% máx	35% máx	35% máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
LL				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
IP	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 * mín
IG	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Materiais constituintes:	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportame nto como subleito:	Excelente a bom							Sofrível a mau			

LL – Limite de Liquidez; IP – Índice de Plasticidade; NP – Não Plástico. IG - Índice de Grupo. *O IP do Grupo A-7-5 e igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

2.3.2 Classificações para solos tropicais MCT e MCT-M

A classificação MCT foi desenvolvida, na década de 1980, pelos engenheiros Job Shuji Nogami e Douglas Fadul Villibor. Desenvolvida para solos essencialmente finos, ou seja, que passam integralmente ou tem menos de 10% de material retido na peneira de nº 10 (2 mm), é parte de uma metodologia composta por vários ensaios que investigam o comportamento geotécnico dos solos, conforme pode ser visto em Villibor e Nogami (2009).

A classificação é feita considerando-se os parâmetros obtidos através de dois ensaios: 1 – Compactação Mini-MCV (Mini de Miniatura e MCV de Moisture Condition Value) e 2 – Perda de Massa Por imersão (PMI). Os ensaios utilizam 5 (cinco) corpos de prova (CPs) em miniatura (50 mm de diâmetro e altura também próxima desse valor), constituídos por 200 g cada e umidade variadas (um próximo da umidade ótima - $W_{ót}$, e os demais com, aproximadamente, +2%, -2%, +4% e -4% de umidade em relação à $W_{ót}$).

O ensaio de compactação Mini-MCV, é realizado com várias energias através da aplicação de números de golpes (n) crescentes até que se tenha uma diferença entre a última leitura de altura (A_n) e a quarta leitura anterior (A_{4n}) menor que 2 mm. Com os dados deste ensaio obtêm-se dois parâmetros relacionados à classificação, que é o c' (Inclinação da curva de deformabilidade) e d' (inclinação do ramo seco da curva de compactação, correspondente à 12 golpes).

Villibor e Nogami (2009) afirmam que, geralmente, ao longo de uma larga faixa de teores de umidade, o valor de c' é pouco variável nas argilas e solos argilosos e bastante variável em solos siltosos e arenosos e por isso foi necessária a fixação de uma curva de referência correspondente ao Mini-MCV=10 que, na prática é raramente obtida, utilizando-se assim uma curva traçada por interpolação.

O índice c' reflete o comportamento do solo quanto à granulometria, dividindo-se as classes de solo da seguinte forma: $c' > 1,5$ – argilosos, $0,7 < c' < 1,5$ – arenosos, $0,0 < c' < 0,7$ – areias.

O ensaio de PMI é realizado por meio da imersão dos CPs, advindos do ensaio de compactação Mini-MCV, durante 24 horas. Antes da imersão, deve-se extrair 10 mm do corpo de prova (CP) para fora de cada molde de compactação. As massas desprendidas durante a imersão deverão ser pesadas após secagem em estufa.

Os procedimentos detalhados dos ensaios devem ser consultados na bibliografia de referência, a Figura 2.19 apresenta um croqui dos dois ensaios necessários à classificação.



Figura 2.19 – Ensaio de Compactação Mini-MCV (à esquerda) e Perda de Massa por Imersão (à direita).

Fonte: VILLIBOR e NOGAMI (2009).

Com os dados de d' e da PMI é possível calcular o índice e' que indica o comportamento laterítico do solo, sendo que para e' entre 0-1,15 tem-se os solos Lateríticos (L), com exceção da classe LA (que engloba e' até 1,4) e e' maior que 1,15 refere-se aos solos Não Lateríticos (N).

O ábaco da classificação MCT está apresentado na Figura 2.20 e compreende as seguintes classes: LA – Areia Laterítica; LA' - Solo Arenoso Laterítico; LG' – Solo Argiloso Laterítico; NA – Areia Não Laterítica; NA' – Solo Arenoso Não Laterítico; NS' – Solo Siltoso Não Laterítico e NG' – Solo Argiloso Não Laterítico.

Aplicando a metodologia MCT associada a uma análise de módulo resiliente dos solos dos aeroportos da Amazônia, Vertamatti (1988) sugeriu uma modificação no ábaco da classificação MCT, passando a ser chamado de MCT-M (M de Modificado). A proposta surgiu da necessidade de incluir os solos parcialmente laterizados que apresentam potencial para uso em pavimentos, correntes na região do estudo. Assim o gráfico considera a inserção de uma faixa intermediária entre as classes L e N da MCT tradicional, sendo os solos dispostos nessa faixa denominados de transicionais (T). A Figura 2.21 apresenta o gráfico da classificação MCT-M.

Marson (2004) define os solos transicionais como aqueles normalmente associados às formações sedimentares e fazem parte da camada superior do perfil de solo. Tratam-se de solos transportados ainda não muito afetados pelos processos pedogenéticos.

Oliveira (1991) analisou a fração areia de mais de trinta Latossolos do Vale do Paraíba, e observou que não havia presença de películas ferruginosas envolvendo os grãos de quartzo e nem de conglomerados laterizados, que são características típicas de solos lateríticos mais evoluídos. Foi observado a ocorrência de traços de fragmentos rochosos e restos vegetais

em todas as amostras, confirmando se tratarem de solos considerados em processo parcial de laterização.

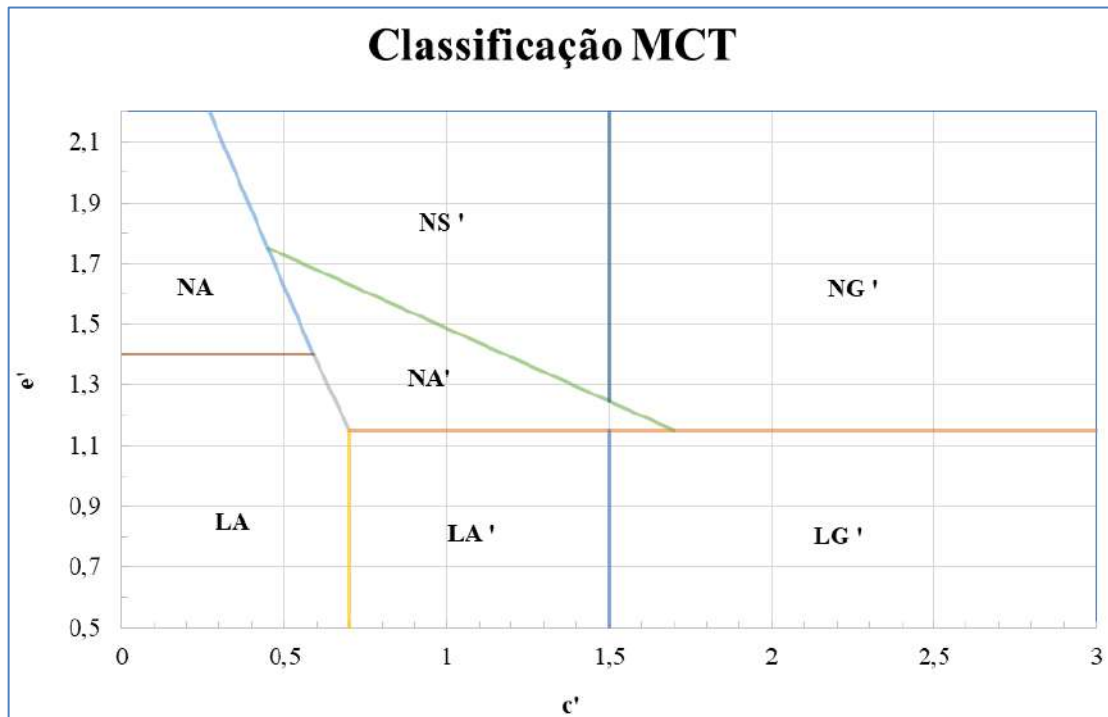


Figura 2.20 – Modelo do Gráfico da Classificação MCT.

Fonte: Adaptado de VILLIBOR e NOGAMI (2009).

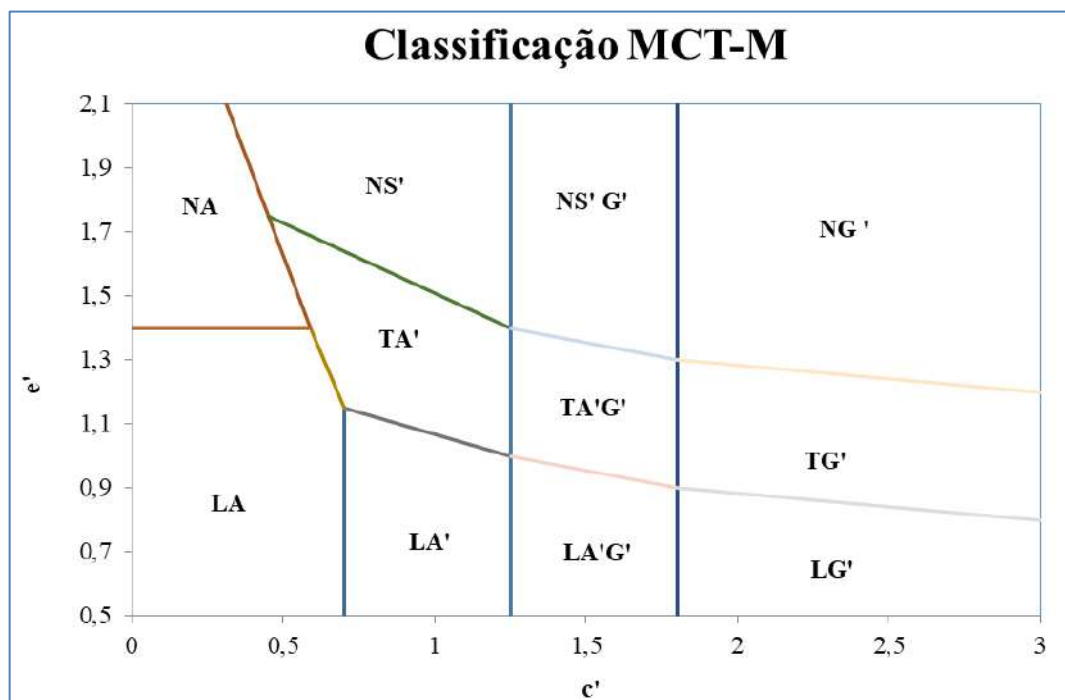


Figura 2.21 – Modelo do Gráfico da Classificação MCT-M.

Fonte: Adaptado de VERTAMATTI (1988).

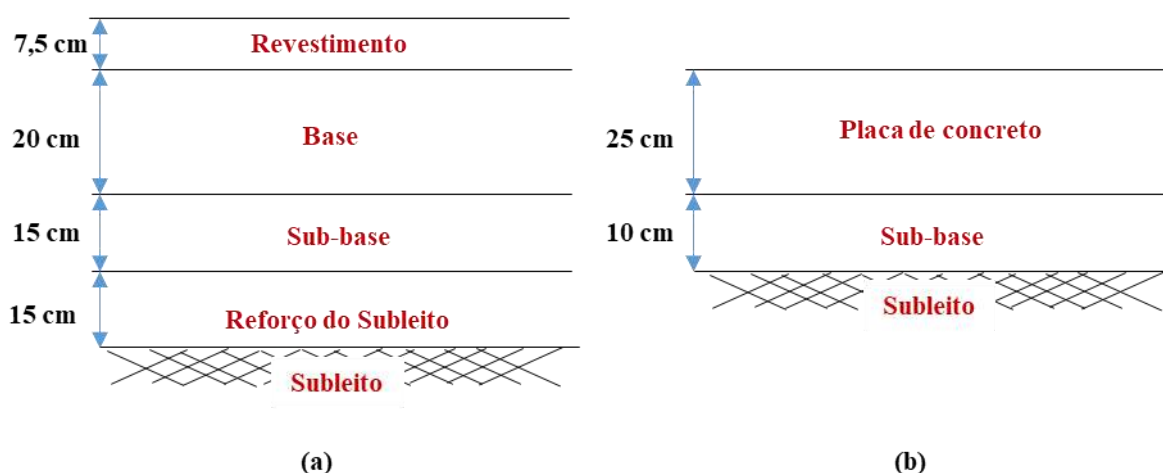
2.4 Pavimento Rodoviário

2.4.1 Conceitos gerais

Unindo os conceitos fornecidos por Bernucci *et al.*, (2006) e Balbo (2007) pode-se definir o pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas compactadas com espessuras finitas, não perene, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinado a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos, do clima e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, durabilidade, economia e segurança.

De uma forma geral, considera-se que o pavimento rodoviário pode ser classificado em duas categorias: 1- Pavimento Flexível: revestimento asfáltico sobre uma base granular ou solo estabilizado granulometricamente e, 2 - Pavimento Rígido: placas de concreto de cimento Portland sobre solo de fundação ou sub-base intermediária. Existem outras variações dos tipos de pavimento como o composto (concreto asfáltico sobre placa de concreto) e semi-rígido (revestimento betuminoso sobre base cimentada).

O esquema apresentado na Figura 2.22 ilustra as categorias de pavimentos supracitadas, indicando as camadas que costumam compor estes tipos de pavimentos (revestimento, base, sub-base e reforço do subleito), as quais são passíveis de dimensionamento por meio de método específico.



*Espessuras meramente ilustrativas.

Figura 2.22 – Esquema Estrutural dos pavimentos (a) flexível e (b) rígido.

Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015)

Em termos de definição e função das camadas constituintes dos pavimentos pode-se sumarizar da seguinte forma:

- **Subleito:** trata-se do terreno de fundação do pavimento. Geralmente, no caso de trechos em corte, o subleito será composto pelo próprio material existente no local de construção da via, compactado. No caso de aterros e em regiões de corte onde o material existente não seja competente o suficiente, será composto por material transportado e compactado.
- **Reforço do subleito:** camada construída, quando necessária, logo após o subleito, a fim de melhorar a fundação do pavimento. Em regiões de aterro esta camada também é chamada de camada final de terraplenagem.
- **Sub-base:** funciona como camada corretiva do subleito (quando este não necessita de reforço) e como complementar à base (a fim de reduzir os custos com uma base muito espessa). Pode ser construída com solo estabilizado, solo-brita, brita-graduada, solo estabilizado quimicamente, dentre outros materiais.
- **Base:** é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais repassados pelo tráfego dos veículos na superfície do pavimento. Pode ser construída com os mesmos tipos de materiais mencionados para a sub-base.
- **Revestimento:** é a camada mais superficial do pavimento, encontra-se em contato direto com as rodas dos veículos. Deve ser, tanto quanto possível, impermeável a fim de proteger as camadas inferiores e prevenir o bombeamento de finos. Destina-se a melhorar as condições de tráfego no que tange o conforto e à segurança, bem como, a resistir aos esforços atuantes em sua superfície, visando garantir a durabilidade do conjunto.

2.4.2 Condição Atual das rodovias brasileiras

Tomando como base a pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) de 2019 e o boletim estatístico da CNT em outubro de 2021, pode-se tirar várias conclusões relevantes a respeito da situação atual do contexto rodoviário no país.

Em 2019 – início desta pesquisa, a malha rodoviária brasileira era composta por um total de 1.720.700 (um milhão, setecentos e vinte mil e setecentos) quilômetros de rodovias, sendo: 12,4% (213.453 km) pavimentadas, 78,5% (1.349.938 km) não pavimentadas e 9,15% (157.309 km) planejadas. Atualmente, em 2021, observou-se proporções semelhantes.

De fato, o que se observa é uma baixa disponibilidade de vias pavimentadas (sendo estas também carentes de cuidados constantes com manutenção). Tal afirmativa pode ser

confirmada quando se compara a densidade da malha rodoviária pavimentada brasileira com a de outros países que possuem extensão territorial similar ao Brasil ou com outros país da América Latina, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 2.23.

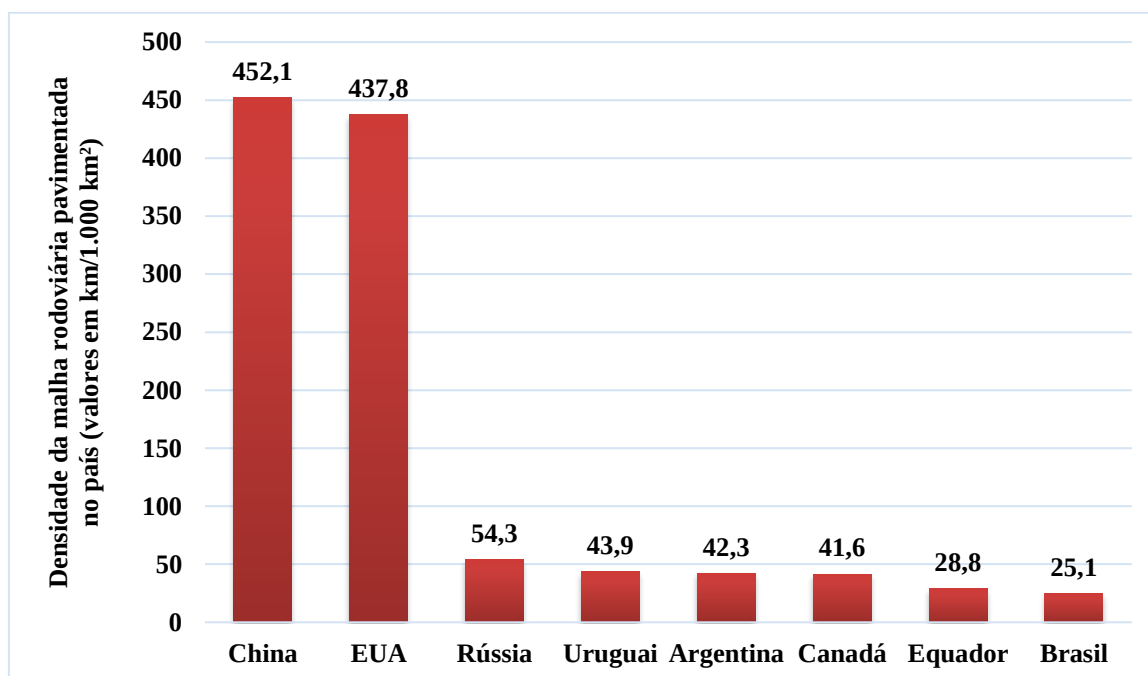


Figura 2.23 – Densidade da malha rodoviária pavimentada em diversos países (valores em km/1.000 km²)

Fonte: Adaptado de CNT (2019)

A própria CNT (2019) afirma que esses dados demonstram que, apesar da importância do modo rodoviário na matriz de transporte do país, existem, relativamente, poucos trechos pavimentados. Isso implica em uma maior quantidade de viagens realizadas em trechos não pavimentados ou um aumento da extensão a ser percorrida em vias pavimentadas para se atingir o destino desejado (devido à falta de disponibilidade de rotas mais curtas).

A pesquisa da CNT (2019) cobriu 108.863 km de rodovias. No que se refere à qualidade do pavimento, cerca de 52,4% foi classificado como regular a péssimo, considerando somente as vias pavimentadas.

No que se refere às condições da superfície do pavimento, 75,9% apresentaram algum tipo de defeito (desgaste, trinca/remendos, afundamentos/ondulações/buracos), sendo 961 km considerados como “totalmente destruído”.

Sabendo que um dos fatores que mais contribui para a degradação da infraestrutura rodoviária é o tráfego de veículos, a CNT também investigou a respeito da frota total de veículos no país, constatando que nesses últimos 10 anos (2009 a 2019) houve um crescimento de 80,8%.

No Nordeste (região principal da pesquisa realizada nesta tese) registrou-se o segundo maior aumento (comparado com as demais regiões) que foi de 128,7%.

Com base no exposto, pode-se afirmar que a frota de veículos no país tem crescido de forma desordenada (quase duplicada e mais que duplicada quando se avalia apenas a região nordeste, por exemplo), não podendo se comparar ao crescimento da malha rodoviária em si (que foi de apenas 6,7% no período de 2009-2019, de acordo com os dados da pesquisa mencionada). Assim, a realidade é que a malha rodoviária se encontra sobrecarregada, por isso os defeitos excessivos na infraestrutura dos pavimentos.

2.4.3 A mecânica dos pavimentos

Medina e Motta (2015) definem a mecânica dos pavimentos como uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos. Faz-se uso de cálculos de tensões, deformações e deslocamentos através de programas de computador, conhecidos os parâmetros de deformabilidade obtidos através dos ensaios dinâmicos ou de carga repetida. Verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento à ruptura, atentando-se também para as deformações permanentes e a ruptura plástica.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), até a década de 1970, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do CBR. No entanto, observava-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. A partir daí o estudo do pavimento com base na visão mecanística passou a ganhar mais força.

Neste contexto, com o avanço da mecânica dos pavimentos e também das experiências com os solos tropicais, atualmente, a análise do comportamento dos solos como camadas de pavimento tem sido realizada por meio do Módulo Resiliente e da Deformação Permanente, ambos realizados através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, em substituição ao ensaio de CBR (embora este ainda seja amplamente aplicado no país), mas deve diminuir com a entrada em vigor de um novo método de dimensionamento.

Recentemente, foi divulgado pelo DNIT o novo Método de Dimensionamento Nacional, o **MeDiNa**, o qual será utilizado nesta pesquisa, justificando, portanto, o enfoque dado nos tópicos seguintes.

2.4.3.1 Módulo Resiliente (MR)

A resiliência de um material pode ser entendida como a capacidade deste “retornar” às suas condições normais após cessada a aplicação de cargas sobre ele. É definida por Medina e Motta (2015) como “a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde à energia potencial de deformação”.

Como mencionado, o ensaio triaxial de cargas repetidas é utilizado para se obter o módulo resiliente (MR) dos materiais. Usualmente, o ensaio é realizado aplicando-se vários estados de tensões, ou seja, diferentes pares de tensões confinante (σ_3) e tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, σ_1 é a tensão principal maior). O MR é calculado matematicamente pela seguinte relação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Onde: σ_d – Tensão Desvio e, ε_r – Deformação resiliente vertical.

A deformação resiliente é calculada por:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2)$$

Onde: Δh – Deslocamento vertical máximo e, h_0 – Altura inicial de referência do corpo de prova.

A Norma do DNIT 134/2018 – ME descreve a metodologia do ensaio de módulo resiliente em solos, indicando detalhadamente os 18 pares de tensões a serem aplicados, além das tensões a serem aplicadas na fase de condicionamento (visando eliminar/minimizar os efeitos da deformação plástica inicial e o histórico de tensões).

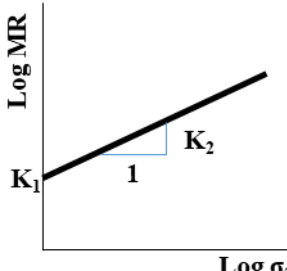
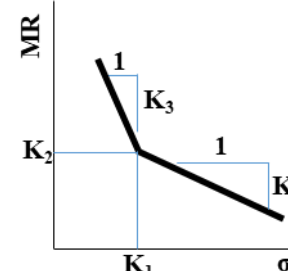
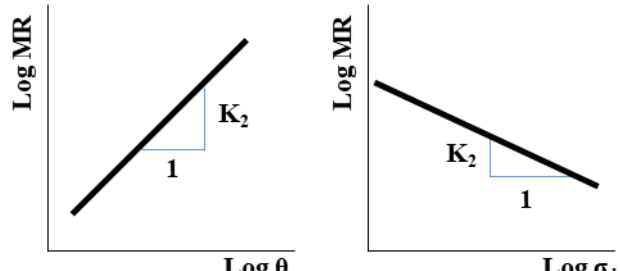
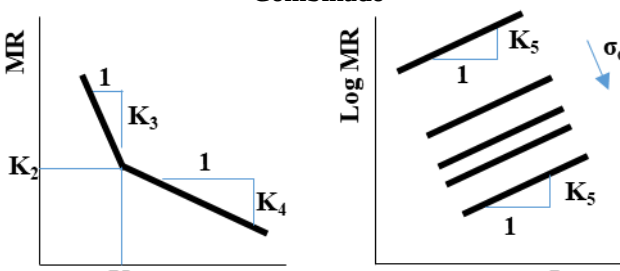
No que se refere ao comportamento dos solos quanto ao seu módulo de resiliência, entende-se que está condicionado a diversos fatores como mencionado por Medina e Motta (2015), quando dizem que o MR depende da natureza e constituição do solo, das condições de estado e das solicitações das tensões.

A natureza do solo está ligada à sua constituição mineralógica, textura das partículas, plasticidade, arranjo estrutural das partículas e elementos de cimentação natural. As condições de estado, por sua vez, têm a ver com a massa específica e a umidade do solo e a solicitação de tensões refere-se ao tráfego de veículos ao qual o pavimento é submetido.

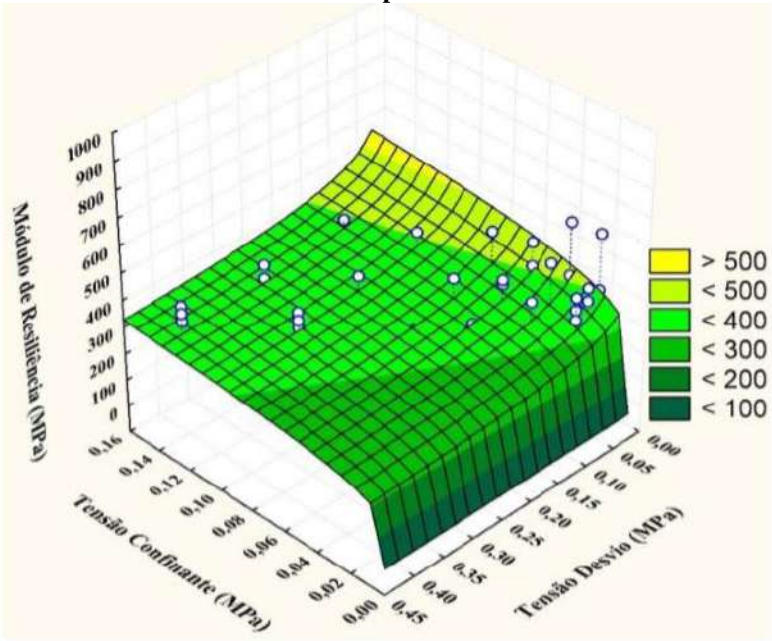
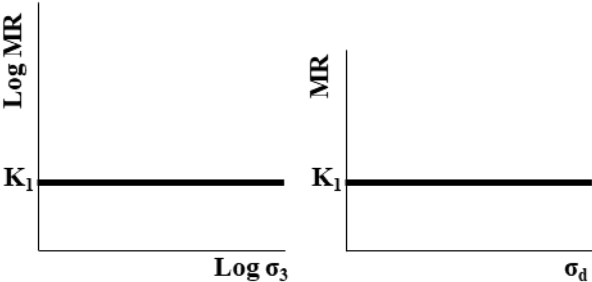
Diante disso, é possível ter-se solos com MR semelhantes devido às semelhanças entre as características supramencionadas, no entanto, não se pode dizer que os solos são iguais devido a este aspecto. Solos com comportamento e faixas de valores similares no ensaio de MR podem apresentar comportamento totalmente distintos em termos de deformação permanente, indicando, portanto, a necessidade de análises criteriosas de cada solo.

A representação do módulo resiliente dos solos tem sido feito por modelos de comportamento tensão-deformação, e, no Quadro 2.5 estão apresentados os modelos usualmente utilizados no Brasil.

Quadro 2.5 – Modelos de comportamento resiliente de solos brasileiros (continua).

MODELO	EQUAÇÃO	MODELO	EQUAÇÃO
Arenoso / Granular 	$MR = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Argiloso / Coesivo 	$MR = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d)$ Para $\sigma_d < K_1$ $MR = K_2 + K_4(\sigma_d - K_1)$ Para $\sigma_d > K_1$
Areno-Argiloso 			$MR = K_1 \theta^{K_2}$ Para $K_2 > 0$ $MR = K_1 \sigma_d^{K_2}$ Para $K_2 < 0$
MODELO	EQUAÇÃO		
Combinado 	$M_1 = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d)$ Para $\sigma_d < K_1$ $M_1 = K_2 + K_4(\sigma_d - K_1)$ Para $\sigma_d > K_1$ $MR = M_1 \sigma_3^{K_5}$		

Quadro 2.5 – Modelos de comportamento resiliente de solos brasileiros (finaliza).

MODELO	EQUAÇÃO
Composto 	$MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$
Constante 	$MR = K_1$ Módulo Constante

Fonte: Adaptado de Motta (1991), Medina e Motta (2015) e Budny (2018) – modelo composto de solo LG’, residual de basalto do estado do Rio Grande do Sul.

A AASHTO apresenta um modelo de módulo para solos de granulação fina, conhecido como Modelo Universal, dado pela seguinte equação:

$$M_r = k_1 P_a (\frac{\sigma_b}{P_a})^{k_2} (\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1)^{k_3}$$

(3)

Onde:

Pa – pressão atmosférica (101.325 kPa)

$\sigma_b = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

τ_{oct} – tensão de cisalhamento octaédrica = $\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$, sendo que para condição axissimétrica em que $\sigma_2 = \sigma_3$ e $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_d$, a tensão octaédrica reduz-se para: $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\sigma_d}$
 k_1, k_2, k_3 – coeficientes de regressão

Bernucci (1995) afirma que o solo laterítico, tipo de material objeto desta pesquisa, apresenta uma natureza mineralógica que contribui favoravelmente para o comportamento resiliente mais adequado visto que, os óxidos hidratados de ferro e alumínio são agentes cimentantes, produzindo um efeito de maior resistência e estabilidade desses solos e, portanto, maior módulo resiliente.

Svenson (1980), relacionou três tipos de fatores que influenciam no comportamento resiliente de solos argilosos, que são: 1 - Carga (Intensidade da Tensão-Desvio, Tensão confinante, Número, Intervalo e duração de aplicação de cargas), 2 – Estrutural (Método de compactação, tempo de cura e $\rho_{dmáx}$) e, 3 – Ambiental (Umidade de compactação e temperatura).

Svenson (1980) avaliou quatro argilas de camadas de reforço e/ou subleito do pavimento de três rodovias federais. Ela observou que para os solos analisados houve significativa variação do MR com a tensão desvio e pequena variação com a tensão confinante, podendo-se assim admitir que o aumento da profundidade do elemento de solo abaixo da superfície do pavimento faz diminuir progressivamente a tensão desvio correspondente a carga, sendo assim, se o solo fosse homogêneo por completo haveria um aumento no valor do MR.

Analizando o modelo da tensão desvio para os solos da pesquisa de Svenson (1980), verifica-se que o coeficiente experimental K_1 sempre diminuiu da condição mais seca para a mais úmida, enquanto K_2 não apresentou tendência de acréscimo ou decréscimo com o aumento da umidade, assim, foi possível concluir que K_2 é mais dependente do tipo de solo enquanto K_1 varia em função do teor de umidade do solo. Bernucci (1995) também confirmou este comportamento quando estudou quatro solos lateríticos do Estado de São Paulo.

A pesquisa de Bernucci (1995) englobou desde uma areia com pouca argila até uma argila arenosa e ao analisar os valores do coeficiente K_2 obtidos em diferentes energias de compactação, observou que este depende das características intrínsecas do material (independe da energia de compactação). Em relação especificamente ao MR, verificou que houve um aumento de cerca de 30% no valor do MR com o aumento da energia de compactação.

Svenson (1980) também estudou a influência do método de compactação (impacto e amassamento) na relação entre o MR e a intensidade da tensão desvio e concluiu que a influência é significativa para umidades acima da umidade ótima de compactação, mas abaixo da ótima pouca influência teve o método de compactação, espelhando, na verdade, a influência da estrutura do solo argiloso compactado.

O Modelo Composto tem sido bastante utilizado atualmente para avaliação do comportamento resiliente dos solos brasileiros devido apresentar altos valores de coeficiente de correlação (R^2), porém, conforme afirmam Medina e Motta (2015), não há modelos intrínsecos ao solo, uma vez que com qualquer conjunto de dados é possível estatisticamente obter um grande número de equações que tenham R^2 adequados para um certo material ou ensaio.

Dalla Roza (2018) estudou, em sua dissertação de mestrado, 12 solos de textura fina do estado do Mato Grosso, cujos parâmetros do modelo composto, incluindo as suas respectivas classificações MCT, estão apresentados na Tabela 2.2. Observa-se que os mesmos apresentam valores de R^2 relativamente baixos, uma vez que os solos apresentaram tendência de valores de MR constantes.

Tabela 2.2 – Parâmetros de regressão para o modelo composto de 12 solos de textura fina do Mato Grosso.

Cidade	Solo	Class.	$MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$ (MPa)			
			k1	k2	k3	R^2
Nova Mutum	Monte Serrat NM	NS'	975,26	0,44	-0,05	0,53
Lucas do Rio Verde	Buritis	NG'	248,88	0,32	-0,54	0,43
Sorriso	Parque dos Poderes	NG'	149,40	0,30	-0,58	0,52
	Mont Serrat SR	LG'	315,45	0,32	-0,43	0,50
Sinop	Supermassa	LG'	207,60	0,15	-0,40	0,47
	Villa Verde	NG'	289,00	0,18	-0,32	0,26
	Terra Rica	LG'	309,97	0,34	-0,46	0,68
	Curitiba	LG'	147,52	0,19	-0,56	0,63
	Aquarela das artes	LG'	370,71	0,30	-0,46	0,56
	Panambi	LG'	123,74	0,36	-0,66	0,63
	Belverde	LG'	283,04	0,28	-0,49	0,63
Alta Floresta	Almeida Prado	NG'	44,04	0,01	-0,52	0,37

Fonte: Adaptado de Dalla Roza (2018).

Dalla Roza (2018) também tentou apresentar uma visão da ordem de grandeza dos coeficientes do modelo composto obtidos para diversos solos brasileiros através da compilação dados dos parâmetros experimentais do modelo composto de 250 solos brasileiros, os quais são apresentados na Tabela 2.3. Destes, 178 resultados utilizados para formar a tabela foram obtidos em um banco de dados compilado por Marangon (2004), os demais foram extraídos de Santos (1998), Takeda (2006), Guimarães (2009), Damo (2016), Santos (2016), Zago (2016), Mendes

(2017) e Norback (2018). Dalla Roza agrupou os solos de acordo com os grupos da classificação MCT e calculou os valores médios, mínimos e máximos de k_1 , k_2 , k_3 e R^2 do modelo composto de cada grupo, valores utilizados para fins comparativos.

Tabela 2.3 – Parâmetros do modelo composto de diversos solos brasileiros

Quantidade	Class.	Medida	$MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$ (MPa)			
			k_1	k_2	k_3	R^2
30 solos	NG'	Méd	433	0,14	-0,41	0,93
		Mín	28	-0,15	-0,96	0,14
		Máx	1240	0,96	-0,06	1,00
133 solos	LG'	Méd	277	0,13	-0,46	0,95
		Mín	22	-0,09	-1,08	0,10
		Máx	1938	0,96	0,10	1,00
14 solos	LA	Méd	764	0,35	-0,06	0,89
		Mín	117	0,25	-0,30	0,51
		Máx	1091	0,43	0,09	0,99
19 solos	LA'	Méd	519	0,29	-0,35	0,89
		Mín	114	0,06	-0,75	0,42
		Máx	1070	0,69	0,06	1,00
8 solos	NA	Méd	1258	0,51	0,05	0,91
		Mín	446	0,36	-0,20	0,49
		Máx	2664	0,83	0,34	0,99
30 solos	NA'	Méd	542	0,23	-0,23	0,81
		Mín	45	-1,00	-0,72	0,46
		Máx	1216	0,98	0,55	1,00
16 solos	NS'	Méd	183	0,17	-0,42	0,88
		Mín	44	-0,16	-0,66	0,38
		Máx	846	0,49	0,08	0,99

Fonte: Adaptado de Dalla Roza (2018)

Observando a Tabela 2.3, verifica-se que os coeficientes de correlação dos valores mínimos foram baixos, ao contrário dos valores médio e de máximo, com correlações adequadas.

Ferreira (2002) construiu um banco de dados de ensaios triaxiais da COPPE/UFRJ considerando o período de 1978 a 2000, totalizando 583 amostras. O trabalho evidenciou a grande variedade de resultados que se pode obter para diversos solos de diferentes regiões do país. Em 2008, Ferreira fez uma modificação neste banco de dados adicionando os resultados de ensaios executados até 2007 e excluindo aqueles realizados com CPs pequenos (5cm) e os ensaios não automáticos (anterior a 1996), totalizando 463 amostras de solos de diversas granulometrias e procedências. Utilizou a técnica de Rede Neural para simular o ensaio de MR a partir dos seguintes parâmetros geotécnicos: Porcentagem de material passante nas peneiras 1", 3/8", n° 4, n° 10, n° 40 e n° 200; Índice de Plasticidade (IP) - considerado como uma variável binária, ou seja, se o material apresenta alguma plasticidade o valor é 1, se não, o valor é 0; Massa Específica Aparente Seca; Umidade Ótima; Tensões Desvio e Confinante. Proporcionou

assim, segundo Medina e Motta (2015) previsões dos modelos de comportamento de tensão-deformação de cada solo, com boa qualidade.

Um outro aspecto relevante ao estudo do comportamento resiliente do solo é a sua relação com a sucção, pois, considerando a colocação Medina e Motta (2015), apesar da medição em campo ser a umidade, é a sucção que chega mais perto da explicação física da questão da variação de umidade no comportamento tensão-deformação dos solos. A Tabela 2.4 apresenta os valores de sucção obtidos para diferentes valores de umidade e os respectivos impactos nos parâmetros experimentais do modelo de comportamento dos solos (função da tensão desvio por se tratarem de solos argilosos).

Tabela 2.4 – Exemplos de variação do MR de solos do subleito com a sucção.

Amostra	Sucção (kPa)	Teor de Umidade (%)	MR = $K_1 \sigma_d^{K_2}$ (MPa)		Referência
			K1	K2	
Subleito LG'- RS	3000	18,5	78,8	-0,71	Núñez <i>et al.</i> , (1997)
	1500	21 ($w_{ót}$)	43,7	-0,71	
	50	23,5	23,4	-0,36	
	8	20,5	36,36	0,55	
Subleito argiloso LG'- RS	60	19,5($w_{ót}$)	21,81	0,76	Gonçalves (1999)
	2090	17,5	21,43	0,83	

Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015).

Sousa, Coutinho e Motta, (2021), apresentam uma breve revisão bibliográfica que elenca os trabalhos científicos publicados nesta área nos últimos 10 anos.

A maioria dos estudos científicos publicados durante este período (2011 – 2021) são voltados para a previsão do MR para solos do subleito, sendo poucos os direcionados para solos tropicais e menos ainda utilizam a classificação MCT ou fazem algum tipo de simulação de dimensionamento de pavimento (evidenciando pontos em que esta tese irá contribuir positivamente).

Dentre os trabalhos referenciados no artigo, citam-se os mais recentes: Qian *et al.*, (2021), Zhang *et al.*, (2021b), Kern, Gehling and Núñez (2021), Freitas, Rezende and Gitirana Jr. (2020), Chu (2020), Zhang, Zhang and Xu (2020), Yao *et al.*, (2018), Han and Vanapalli (2016), Salour and Erlingsson (2015), Camapum de Carvalho *et al.*, (2015b).

2.4.3.2 Deformação Permanente (DP)

A deformação total de um solo é composta por duas parcelas: a deformação resiliente (ϵ_r) utilizada no cálculo do MR e, a permanente (ϵ_p) que pode ser definida como a

parcela de deformação que é não recuperável, ambas resultantes do tráfego dos veículos. A DP gera o defeito conhecido como Afundamento de Trilha de Rodas (ATR), um defeito estrutural que pode ocorrer devido a passagem repetida das rodas dos veículos sobre o pavimento.

Cada camada tem a sua parcela de contribuição para a deformação, que vai se acumulando ao longo do tempo. Medina e Motta (2015) relatam, por exemplo, que na pista experimental da AASHTO a maior contribuição para a DP foi oriunda da camada de sub-base (45%), seguida das camadas de revestimento asfáltico (32%), subleito (9%) e base de brita (4%), mas explicam que isto ocorreu devido ao aumento do grau de saturação ocasionado pelo degelo da primavera (situação comum naquela região), sendo o efeito deste fenômeno potencializado na sub-base por conta de sua textura arenosa fina.

Por outro lado, os mesmos autores afirmam que nas regiões tropicais (que é o caso do Brasil) pode-se atribuir parte maior da DP ao revestimento ao asfáltico (não dosado convenientemente) do que para as camadas de base e sub-base, principalmente nos pavimentos urbanos onde, devido às mudanças constantes da velocidade dos veículos, as tensões de cisalhamento na superfície são mais frequentes.

A deformação permanente total de um solo também é medida através do ensaio triaxial de cargas repetidas, que é descrito pela Norma DNIT 179/2018 – IE. Diferente do ensaio de MR, o ensaio de DP é realizado aplicando-se somente um par de tensão por CP, durante todo o ciclo, assim, para avaliar o comportamento do solo a norma padroniza que sejam testados 9 (nove) pares de tensões, ou seja, são necessários nove CPs por tipo de material.

Como exceção, a norma indica um número mínimo de 6 (seis) CPs, desde que os pares de tensões aplicados sejam devidamente espaçados, abrangendo assim um universo amplo de tensões atuantes.

Assim como para o MR, existem diferentes equações propostas para a modelagem do comportamento do solo quanto à deformação permanente, e o Quadro 2.6 apresenta um resumo dos principais modelos existentes, em ordem cronológica de apresentação incluindo algumas características básicas destes.

Svenson (1980) realizou também ensaios de DP, onde aplicou o modelo de Monismith (primeiro e mais simples modelo de DP, conforme apresentado no quadro 2.6). O ensaio foi realizado com diferentes tensões desvio, porém com tensão confinante constante ($0,21 \text{ kgf/cm}^2$) e próximos a umidade ótima. Os parâmetros K e A obtidos apresentaram alto valor de correlação com o modelo, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Medina e Motta (2015) afirmam que o modelo de Monismith continua a ser muito usado devido a sua simplicidade, mas deve-se levar em consideração que se os parâmetros deste

modelo foram obtidos a partir de ensaios com poucos ciclos de aplicação de cargas em relação ao número N previsto de projeto, e assim, pode tornar-se pouco acurado para prever o ATR. Os autores inclusive indicam a adoção de uma adaptação no modelo, mais informações no livro.

Quadro 2.6 – Modelos de deformação permanente de solos

MODELO - CARACTERÍSTICAS	EQUAÇÃO GERAL DO MODELO
Monismith - Ano de 1975, baseado nos ensaios triaxiais de carga repetida, modelo aberto.	$\varepsilon_p = AN^B$ Onde: A e B – parâmetros experimentais; N – número de aplicações de carga.
Uzan - Ano de 1982, baseado nos ensaios triaxiais de carga repetida, modelo aberto, porém limitado devido considerar a deformação elástica constante ao logo do ensaio de DP, que é uma hipótese não verdadeira.	$\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_r} = \mu N^{-\alpha}$ Onde: $\alpha=1-B$; $\mu=AB/\varepsilon_r$.
Tseng e Lytton - Ano de 1989, modelo mecanístico-empírico, fechado, baseado em banco de dados específico (não inclusos solos tropicais). Os parâmetros ρ e β e a relação $\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}$ são estimados através de equações específicas para cada camada do pavimento e consideram dados do ensaio de DP (umidade, tensões e módulo resiliente).	$\delta_a(N) = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} e^{-(\frac{\rho}{N})^\beta} \varepsilon_v h$ Onde: $\delta_a(N)$ - deslocamento permanente da camada; ε_0 , ρ , β – propriedades dos materiais; ε_v - deformação específica vertical média resiliente e h – espessura da camada.
Guimarães – Ano de 2009, modelo mecanístico-empírico, aberto, baseado nos ensaios triaxiais de carga repetida, inclui o estado de tensões, testado em solos tropicais.	$\varepsilon_p(\%) = \Psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\Psi_2} \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\Psi_3} N^{\Psi_4}$ Onde: Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 – parâmetros de regressão; ρ_0 – tensão de referência, considerada como a pressão atmosférica.

Observação: Elaborado com base em informações das teses de Svenson (1980) e Guimarães (2009) e no livro de Medina e Motta (2015).

Atualmente, o DNIT adota o modelo de Guimarães (2009) para previsão da deformação permanente, também considerado no programa MeDiNa. A Tabela 2.6 apresenta os parâmetros do modelo obtidos para alguns solos brasileiros por diversos autores.

Tabela 2.5 – Coeficientes experimentais A e B do modelo de Monismith para as argilas estudadas por Svenson (1980).

Amostra	Condições das amostras			σ_d (MPa)	σ_3 (MPa)	$\varepsilon_p = AN^B$		
	h (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	S (%)			A	B	R ²
Argila Vermelha - RJ	17,0	1,781	88	0,076	0,021	0,00930	0,058	0,95
	18,9	1,717	89			0,00299	0,072	0,99
Argila Amarela - RJ	21,1	1,688	95	0,075		0,00115	0,086	0,98
	23,3	1,614	94			0,00493	0,121	0,93
Argila Vermelha - MG	16,2	1,776	82	0,142		0,00129	0,028	0,92
	17,4	1,757	86			0,00298	0,039	0,98
	18,6	1,737	89			0,00803	0,044	0,94
Argila Vermelha - PR	18,7	1,724	92	0,070		0,00599	0,066	0,95

Fonte: Adaptado de Svenson (1980).

Tabela 2.6 – Parâmetros do modelo de previsão de deformação permanente de Guimarães (2009) para diversos solos brasileiros.

Referência	Material	Class. MCT	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R ²
Guimarães (2009)	Argila de Ribeirão Preto - SP	LG'	0,206	-0,024	1,340	0,038	0,986
	Areia Argilosa - ES	LG'	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
	Solo Papucaia - RJ	NS'/NA'	0,244	0,419	1,309	0,069	0,946
	Areia Fina de Campo Azul - MG	NA	0,050	-1,579	1,875	0,064	0,868
Osten (2012)	Solos do oeste do Maranhão (jazidas da estrada de Ferro Carajás)	LG'	0,028	-1,031	3,211	0,106	0,938
		NA'	0,066	-0,063	1,327	0,094	0,781
		LG'	0,048	0,033	2,154	0,045	0,825
		LG'	0,088	-0,390	3,938	0,082	0,986
Zago (2016)	Areia Argilosa de Santa Maria - RS	NA'	0,593	-0,198	1,332	0,042	0,920
	Argila Arenosa de Santa Maria - RS	LG'	0,385	-0,861	1,523	0,075	0,919
	Argila Arenosa de Santa Maria - RS	LG'	0,869	0,006	1,212	0,042	0,899
Norback (2018)	Solo da baixada Fluminense - RJ	LG'	0,32	-0,09	1,21	0,05	0,96
	Solo da baixada Fluminense - RJ	NA'	0,57	0,71	0,27	0,05	0,77
	Jazida Eco-Ambiental	NG'	0,39	0,84	0,54	0,06	0,81
Dalla Roza (2018)	Nova Mutum - MT	NS'	0,11	-1,15	2,15	0,06	0,99
	Lucas do Rio Verde - MT	NG'	0,13	1,07	1,21	0,05	0,98
	Sorriso - MT	NG'	0,17	0,37	1,64	0,08	0,98
		LG'	0,14	0,54	0,94	0,05	0,93
	Sinop - MT	LG'	0,18	-0,57	2,13	0,02	0,92
		NG'	0,05	-0,27	2,05	0,05	0,93
		LG'	0,18	-0,60	1,72	0,04	0,98
		LG'	0,11	0,05	1,76	0,05	0,93
		LG'	0,08	-0,22	1,90	0,04	0,95
		LG'	0,21	0,45	1,93	0,04	0,99
		LG'	0,18	0,00	1,40	0,05	0,96
	Alta Floresta - MT	NG'	0,25	0,35	0,87	0,04	1,00

Lima (2020), apresentou a compilação de um banco de dados contemplando informações de compactação, limites de consistência, composição granulométrica, classificações TRB e MCT, MRmédio e parâmetros da modelagem da deformação permanente (de acordo com o modelo de Guimarães) de 56 materiais de diversos estados brasileiros. Da pesquisa de Lima (2020), 26 materiais são solos finos, assim devido a quantidade de dados, não estão mostrados na Tabela 2.6, mas estão inseridos no banco de dados desta presente tese.

Em termos de magnitude da DP, de acordo com Motta e Medina (2015), segundo alguns países, o valor admissível do afundamento de trilha de roda para autoestradas é de 10 mm, e para estradas de menor volume de tráfego poderia chegar a 16 mm, mas se atingir 20mm recomenda-se reparo imediato. Outro entendimento importante é sobre os possíveis comportamentos que os materiais podem apresentar em relação à deformação permanente. Os autores dizem que um corpo submetido à ação de cargas repetidas desenvolve um campo

autoequilibrado de tensões residuais que passa a interagir com as cargas aplicadas em cada ciclo e dependendo dos parâmetros de escoamento plástico do material e do estado de tensões aplicado, entre outros aspectos, as tensões residuais podem atingir uma determinada magnitude de maneira a impedir que as tensões aplicadas ultrapassem o limite de elasticidade do material, fazendo com que a resposta deste às solicitações seja estritamente elástica, ou seja, o material “acomodou-se”, fenômeno também denominado de *shakedown*.

Para verificar a ocorrência do acomodamento/*shakedown*, Guimarães (2009) adotou um modelo gráfico de Dawson e Wellner (1999) e Werkmeister (2003), em que no eixo x tem-se a deformação permanente vertical total e no eixo y tem-se a taxa de acréscimo da deformação permanente. Analisando o comportamento dos materiais por este tipo de gráfico é possível detectar quatro comportamentos, indicados no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Tipos de comportamento dos materiais quanto à deformação permanente.

TIPO	COMPORTAMENTO	GRÁFICO ILUSTRATIVO
Tipo A	Acomodamento plástico, não haverá problemas de afundamento no pavimento, diz-se que o solo “entrou” em <i>shakedown</i> (acomodou)	
Tipo B	Escoamento Plástico, contribuição para deformação permanente, porém com tendência de acomodação	
Tipo C	Ruptura	
Tipo AB	Escoamento plástico nos ciclos iniciais e em seguida a taxa de acréscimo de DP tende a zero (Situação mista entre A e B)	

Observação: Elaborado com base em informações da tese de Guimarães (2009) e DNIT 179/2018 – IE.

É importante ressaltar que, de acordo com a bibliografia tradicional internacional a respeito da teoria do *shakedown* apenas os três primeiros tipos de comportamento supramencionados eram conhecidos (A, B e C). O quarto comportamento (Tipo AB) foi identificado especificamente por Guimarães (2009) em alguns solos tropicais brasileiros.

A Figura 2.24 apresenta, a título de exemplo, o gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown*, resultante de um ensaio de deformação permanente realizado na tese de Guimarães (2009). Trata-se de um solo argiloso laterítico (LG') de Ribeirão Preto. Levando em consideração os tipos de comportamento indicados no quadro anterior, observa-se a predominância do comportamento do tipo AB.

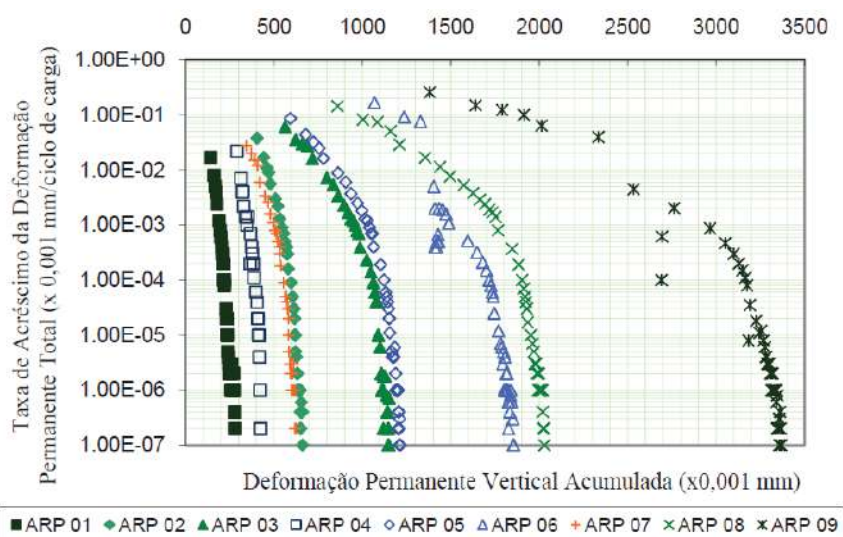


Figura 2.24 – Resultados dos ensaios de DP de um solo (LG') de Ribeirão Preto/SP – comportamento AB.

Fonte: GUIMARÃES (2009).

Contribuições mais recentes a respeito da deformação permanente e do *shakedown* podem ser consultadas nas seguintes referências: Lima e Motta (2016), Lima, Motta e Guimarães (2017), Lima *et al.*, (2019), Guimarães, Motta e Castro (2019) e Lima (2020). Esta última trouxe uma importante contribuição que foi considerada na análise dos gráficos de *shakedown* na presente tese.

Lima (2020) propôs em sua tese de doutorado um método para classificação do *shakedown* considerando a análise de dois gráficos pelo seu formato e a deformação permanente acumulada, a saber: Gráfico 1 - ε_p (%) vs. N e, Gráfico 2 - Taxa de acréscimo (ε'_p) vs. ε_p . As classes continuam sendo às indicadas na tese de Guimarães (2009) e na norma do DNIT 179/2018 – IE, porém a classificação procede-se considerando as seguintes regras:

- **Comportamento do Tipo A** - curva paralela ao eixo das ordenadas e atinge a taxa de acréscimo de $10^{-6} \times 10^{-3}$.
- **Comportamento do Tipo B** - a curva do ensaio no gráfico de análise *shakedown* tende a se tornar paralela ao eixo ϵ_p , como previsto para comportamento do tipo B, porém não atinge a taxa de acréscimo de $10^{-6} \times 10^{-3}$.
- **Comportamento do Tipo AB** - DP acumulada em 150 mil ciclos ultrapassa 1% da altura do corpo de prova (i.e. 2,00 mm para 100x200 mm e 3,00 mm para 150x300 mm) e formato de curva de comportamento AB atingindo a taxa de acréscimo de $10^{-6} \times 10^{-3}$.
- **Comportamento do Tipo C** – curva com tendência paralela ao eixo das abscissas e não atinge a taxa de acréscimo de $10^{-4} \times 10^{-3}$, apresentando taxas de acréscimos e deformações permanentes elevadas ao longo dos milhares de ciclos aplicados no ensaio.

Lima (2020) também propôs critérios para seleção dos materiais quanto ao seu comportamento mecânico à deformabilidade plástica, conforme apresentado no Quadro 2.8. A proposta leva em consideração as deformações permanentes totais lidas em 150 mil ciclos e, também, inclui a análise do comportamento do material quanto à teoria do *shakedown* (considerando a formatação gráfica e os critérios de classificação também proposto).

Quadro 2.8 – Proposta de LIMA (2020) quanto a critérios de seleção de materiais baseado no comportamento mecânico à deformação permanente.

Seleção de acordo com a ϵ_p (%)	Níveis de Tráfego	
	$\leq 5 \times 10^5$	$> 5 \times 10^5$
Indicado	< 2%	< 1%
Aceitável de acordo com o tipo de comportamento da teoria <i>shakedown</i> : • Tipo A – indicado; • Tipo B - atenção ao formato da curva e à deformação em N=150mil; • Tipo AB - dependendo do momento que se iniciou o acomodamento; • Tipo C - não indicado.	2 – 4%	1 – 3%
Não indicado	4 – 5%	3 - 5%

Fonte: Adaptado de LIMA (2020).

2.4.3.3 Dimensionamento Mecânico-empírico de pavimentos e o Método MeDiNa

Durante muito tempo os métodos de dimensionamento de pavimentos basearam-se em formulações empíricas envolvendo o número de aplicações de cargas (N), coeficientes

estruturais e no ensaio de CBR, porém, com o passar dos anos a necessidade de se projetar pavimentos considerando a análise de tensões e as condições mais próximas da realidade do ambiente tropical, principalmente pautando-se na análise dos materiais quanto à deformabilidade foi se mostrando cada vez mais necessária.

Neste sentido, é que Medina e Motta (2015) afirmam que no dimensionamento de um pavimento novo, deve-se dar atenção à predição do efeito de todos os mecanismos de degradação, dentre os quais se pode citar: a) fadiga das camadas de maior rigidez – revestimento de concreto asfáltico e camadas cimentadas; b) afundamento de trilha de roda (deformação permanente acumulada) e, c) ruptura plástica (a poucas repetições de carga).

Essa ideia já vem de muitas décadas, e pode ser apresentada no Fluxograma da Figura 2.25 apresentado por Motta (1991), que mostra um esquema de dimensionamento mecanístico de pavimentos pautado em quatro componentes principais de dados, que são: os fatores ambientais, tráfego, materiais disponíveis e técnicas construtivas.

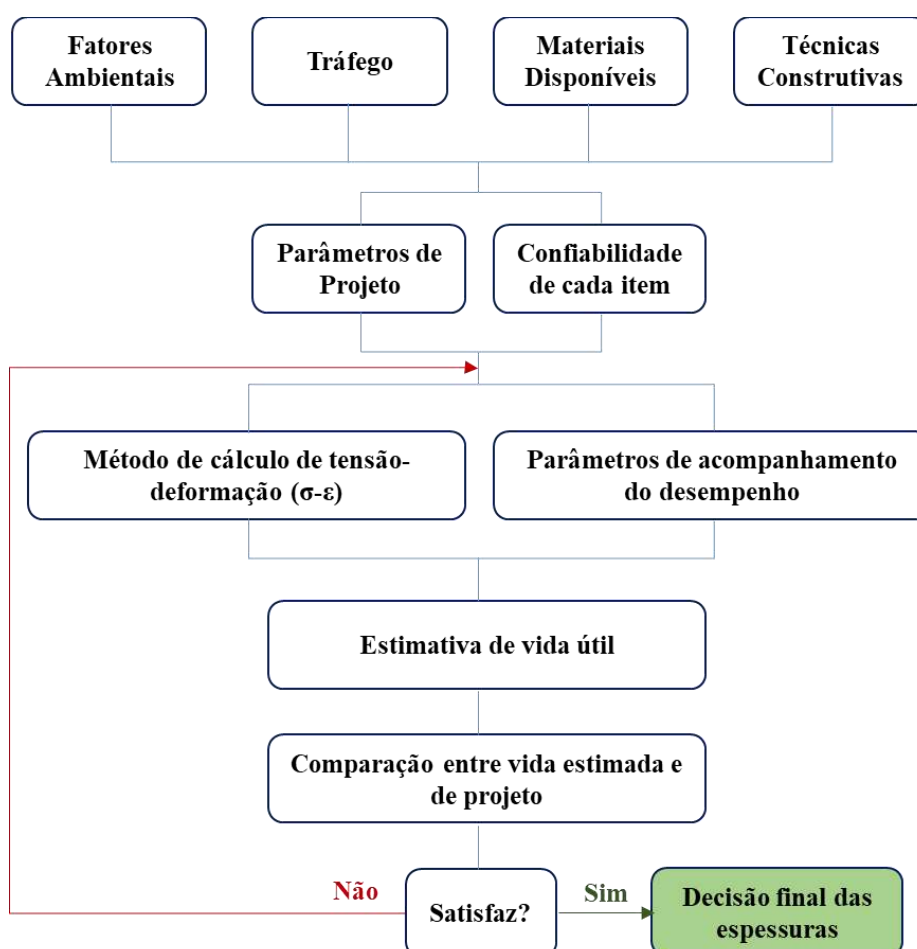


Figura 2.25 – Fluxograma “Modelo” para o dimensionamento mecanístico de pavimentos.

Fonte: Adaptado de Motta (1991).

Através dos dados de entrada é que se fixam os parâmetros a serem adotados no projeto e os critérios de confiabilidade de cada item. O dimensionamento Mecanístico passa a considerar o comportamento tensão-deformação dos materiais e os parâmetros de desempenho para então realizar a estimativa da vida útil do pavimento. Após isto verifica-se se essa vida do pavimento atende ao período de projeto requerido.

Ainda é largamente utilizado no país o método de dimensionamento do DNER, que se baseia no ensaio do CBR. Porém, em vários países a tendência é o estabelecimento de métodos mecanísticos-empíricos, como é o caso do Método MeDiNa, atual método de dimensionamento do DNIT.

Portanto, visando a objetividade desta revisão de literatura, será abordado neste item somente aspectos relacionados ao MeDiNa. Para conhecimento e aprofundamento dos conhecimentos dos demais métodos de dimensionamento existentes sugere-se a consulta das bibliografias disponíveis, dentre as quais indica-se: a tese de Motta (1991), o livro de Medina e Motta (2015) e os relatórios pertinentes ao desenvolvimento do método, disponíveis na página do DNIT, assim como o software (www.dnit.gov.br/MeDiNa).

Franco (2007) propôs um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis que foi consolidado em um programa denominado SisPav. Depois disso, através de uma convênio firmado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias e a o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, visando a Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, o SisPav foi aperfeiçoado e recebeu o nome de MeDiNa em referência à: Me – Método, Di – Dimensionamento, Na – Nacional, adotado principalmente em homenagem ao Professor Jacques de Medina.

O programa MeDiNa possui uma interface amigável e utiliza a rotina AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) para calcular as tensões e deformações de estruturas de pavimentos, considerando sistemas de rodas com eixo padrão rodoviário (8,2 tf).

Para execução do dimensionamento o programa solicita uma série de informações relacionadas à estrutura do pavimento (tipos de materiais, espessuras, módulos, coeficientes de Poisson), incluído os parâmetros dos modelos de comportamento resiliente e de deformação permanente dos materiais a serem utilizados, determinados por regressão dos resultados dos ensaios experimentais. Solicita ainda dados referente ao tráfego (tipo de via, Volume Médio Diário – VMD do 1º ano, taxa de crescimento, número N, período de projeto e etc.).

Antes do preenchimento dos dados que serão simulados, deve-se indicar o “modo” do projeto, se para pavimento novo ou projeto de reforço. O modo reforço requer a inserção de dados obtidos por retroanálises de bacias deflectométricas obtidas com o *Falling weight deflectometer* (FWD) e demais informações relacionadas a este tipo de projeto como: dados da camada asfáltica existente, idade do pavimento, etc.

Na página de “ajuda” do programa há algumas considerações a respeito do método, dentre as quais se destacam:

- Os materiais a serem produzidos em usinas ou centrais podem ser definidos pelo projetista. Nesse caso, o programa pré-estabelece parâmetros mínimos que devem ser exigidos, quando da execução da obra. Neste grupo estão as misturas asfálticas e os materiais estabilizados com cimento, por exemplo.
- Os modelos utilizados no programa MeDiNa se mostram sensíveis a pequenas variações do Número N e, portanto, uma estimativa apurada do tráfego é de grande importância para o sucesso do projeto.
- O programa MeDiNa emite Alertas quando não consegue dimensionar o pavimento ou após a avaliação da estrutura, como por exemplo: A espessura atingiu o máximo permitido para a análise (15cm para as camadas asfálticas, 25cm para as estabilizadas e 40cm para as demais); a camada apresentou deformação permanente acima do limite de 5% da sua espessura, o Subleito apresentou deformação permanente acima do limite de 5mm, dentre outros.
- Os tipos de vias foram definidos em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo DNIT. Eles definem os critérios de parada do dimensionamento, bem como os graus de confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa. A Tabela 2.7 resume os critérios e a confiabilidade de cada tipo de via:

Tabela 2.7 – Critérios de parada do dimensionamento e graus de confiabilidade por tipo de via do software MeDiNa.

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: Página de “ajuda” do programa MeDiNa (2019).

Os resultados do programa podem ser visualizados na Aba Resultados. Esta Aba somente é liberada quando uma Análise ou um Dimensionamento é realizado. Existem três tipos de relatórios que podem ser explorados pelo projetista: Evolução Mensal dos Danos, Resumo da Deformação Permanente, Relatório Completo da Análise.

2.5 Síntese do capítulo

Este capítulo não visou esgotar todos os assuntos relacionadas ao tema da pesquisa, pelo contrário, tentou-se abordar, de forma mais objetiva possível, aspectos considerados específicos e importantes no estudo de solos tropicais aplicados à pavimentação.

Buscou-se assim, cobrir três eixos relacionados, sendo:

- ✓ 1º O próprio **Solo Tropical** em sí: abordou-se conceitos de solos (tropical, laterítico, saprolítico etc.), aspectos de sua identificação (pedológica e geotécnica); o processo de formação do perfil de alteração; características do solo tropical na constituição química, mineralógica e propriedades físicas e mecânicas, finalizando, com apresentação de algumas experiências brasileiras com o uso dos solos finos lateríticos em pavimento rodoviários e ferroviários.

Marcados pela presença de óxidos e hidróxidos de Fe e Al que acabam por contribuir para um comportamento peculiar destes solos (alta cimentação após a secagem), tais solos têm mostrado excelente comportamento resiliente pois, em geral, tem apresentado altos valores de MR. Muitos deles, também tem apresentado tendência na estabilização das deformações permanentes o que é sobremaneira importante quando se pensa em um pavimento duradouro e com menos intervenções ao longo de sua vida útil. Além disso, as experiências em campo mostraram que, mesmo apresentando trincas (devido a retração por secagem), os solos tropicais finos lateríticos podem apresentar bom desempenho como camada de pavimento.

- ✓ 2º As **Classificações dos solos**: abordou-se a classificação pedológica, as classificações USCS e TRB e a classificação MCT (e MCT-M), que são metodologias utilizadas como referência no meio geotécnico.

Há 13 classes pedológicas no SiBCS, sendo duas destas consideradas promissoras para a uso na pavimentação: os Latossolos e os Argissolos. Geotecnicamente, as classificações tradicionais são a USCS e a TRB. Ambas se baseiam, principalmente, nas características

de LL, IP e Granulometria. A TRB é a mais aplicada no meio rodoviário visto que indica o possível comportamento do solo como subleito, e nela, os solos finos (que possuem mais de 35% de material passante na peneira nº 200) são rotulados como de comportamento “sofrível a mau”, fato este que (mais que comprovado) não representa a realidade geotécnica comportamental dos solos tropicais brasileiros.

Tratou-se ainda da classificação genuinamente brasileira, desenvolvida pelos engenheiros Nogami e Villibor, especificamente para solos tropicais que é a MCT e, apresentou-se também uma adaptação/modificação a MCT-M. A MCT classifica os solos em dois grandes grupos os lateríticos e os não lateríticos (cada grupo tem suas subclasses, ver detalhamento no tópico 2.3.2). A MCT mostra-se uma classificação mais adequada para os solos locais. A MCT-M, por sua vez, veio para incorporar também os solos parcialmente laterizados, chamados transicionais, sugerindo assim nova divisão das classes.

- ✓ 3º O **Pavimento rodoviário**: neste eixo, conceituou-se a estrutura do pavimento. Apresentou-se a condição atual das rodovias brasileiras com base na pesquisa da CNT (2019), indicando o desequilíbrio que há entre a importância do sistema rodoviário para o país e o real cuidado que se tem com o mesmo, uma vez que a quantidade de vias não pavimentadas é muito maior que as pavimentadas e estas, por sua vez, apresentam uma série de defeitos estruturais. A mecânica dos pavimentos também foi referida, e apresentadas informações sobre o MR, a DP e o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Entendeu-se que apesar da maior parte dos projetos brasileiros ainda estarem pautados em bases que não são totalmente adequadas a realidade tropical, como o uso do CBR e consequente dimensionamento empírico, já se pode enxergar uma mudança de mentalidade, pelo menos da comunidade acadêmica e do DNIT, visando aplicar efetivamente métodos pautados nos conceitos da mecânica dos pavimentos (comportamento resiliente, deformabilidade, *shakedown*, dimensionamento mecanístico-empírico, etc.).

3 CIÊNCIA DE DADOS APLICADA ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS

3.1 Apresentação do capítulo

Este capítulo mostra os conceitos essenciais associados a esta área do conhecimento bem como as principais ferramentas utilizadas no processo, fornecendo o embasamento teórico necessário para o entendimento das técnicas computacionais e estatísticas utilizadas no capítulo de análises dos resultados desta pesquisa. Por se tratar de um tema amplo, este capítulo resume a abordagem de alguns aspectos básicos da Ciência de Dados (*Data Science*) aqui representada por uma ferramenta de avaliação do banco de dados geotécnicos e mecânicos de solos utilizados em pavimentação, reunidos nesta pesquisa.

3.2 Conceitos básicos da Ciência de Dados e suas ferramentas para a análise de dados

VanderPlas (2016) diz que a ciência de dados (conhecida pelo seu termo em inglês: *Data Science*) é surpreendentemente difícil de definir, mas que pode ser considerada como um conjunto interdisciplinar de habilidades que estão se tornando cada vez mais importantes em muitas aplicações na indústria e na academia e que a melhor definição existente é a ilustrada pelo Diagrama de Venn de Drew Conway (Figura 3.1).

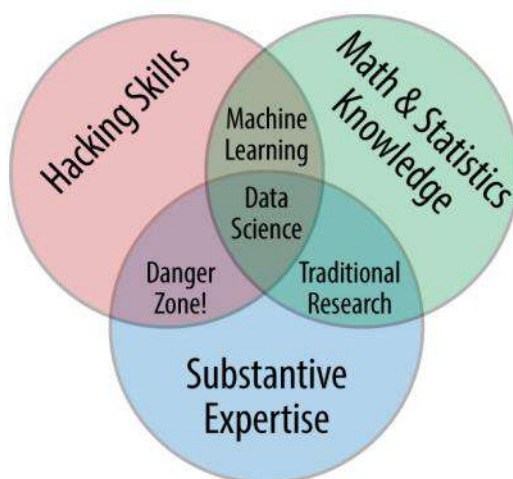


Figura 3.1 - Diagrama de Venn de Drew Conway para definição de Ciência de Dados.
Fonte: VanderPlas (2016)

Pela Figura 3.1, entende-se que a ciência de dados compreende a interseção de três áreas distintas sobrepostas: 1 – conhecimento de estatística e matemática (*Math & Statistics*

Knowledge) para modelar e resumir conjuntos de dados; 2 – habilidades de um cientista da computação (*Hacking Skills*) para projetar e usar algoritmos para armazenar, processar e visualizar esses dados com eficiência e, 3 – competência significativa (*Substantive Expertise*), o que se pode traduzir como o conhecimento suficiente em um determinado assunto de forma a ser capaz de formular as perguntas certas e também de colocar as respostas em um contexto, ou seja, o conhecimento necessário para interpretar os resultados.

Neste contexto, pode-se pensar na “ciência de dados não como um novo domínio de conhecimento a ser aprendido, mas como um novo conjunto de habilidades que você pode aplicar em sua área de especialização atual” (VanderPlas, 2016, tradução nossa).

Para Amaral (2016) a ciência de dados é composta por várias outras ciências, modelos, tecnologias, processos e procedimentos relacionados ao dado, podendo ser definida como os processos, modelos e tecnologias que estudam os dados durante todo o seu ciclo de vida: da produção ao descarte.

Para aplicação da Ciência de Dados é comum a utilização de linguagens de programação como R e Python (dentre outras) por meio da implementação de códigos e conjuntos de funções (bibliotecas) que permitem manipular e tratar dados, bem como gerar informações relevantes sobre os dados em frações de segundos.

Grus (2016) diz que existem várias bibliotecas, estruturas, módulos e kits de ferramentas de *Data Science* que implementam de modo eficiente os algoritmos e técnicas de análise de dados. Sobre a linguagem para aprender *Data Science*, o autor sugere o Python, pelos motivos a seguir: gratuito; simples de codificar e entender e, por possuir muitas bibliotecas úteis relacionadas à ciência de dados.

A linguagem de programação Python, que foi a utilizada nesta tese, tem se estabelecido como uma das linguagens mais populares para computação científica e graças à sua natureza interativa de alto nível e seu ecossistema em maturação de bibliotecas científicas, é uma escolha atraente para o desenvolvimento algorítmico e análise exploratória de dados (Millman e Aivazis, 2011).

Nessa linha, atualmente existem diversas ferramentas e plataformas para integração de vários softwares e linguagens. Para desenvolvimento da Ciência de Dados em Python, a plataforma mais utilizada é a Anaconda (<https://www.anaconda.com/>) que contém ferramentas importantes como o editor *Jupyter Notebook* (aplicação web para desenvolvimento de documentos – “cadernos” com código) que suporta as várias bibliotecas comumente utilizadas para visualização, leitura e tratamento de dados.

O *Google Colab* é outra plataforma também muito utilizada para o desenvolvimento de códigos em Python. É disponibilizada diretamente pelo navegador, nenhuma configuração é necessária e facilita o armazenamento em nuvem, bem como o compartilhamento. Porém, ao contrário da Anaconda, o *Google Colab* só permite a manipulação de um arquivo Python por vez e é necessário conexão com a internet para que os resultados sejam salvos.

O *Jupyter Notebook* (da plataforma Anaconda) fornece um ambiente de ciência de dados interativo e fácil de usar em muitas linguagens de programação e não funciona apenas como um ambiente de desenvolvimento de software, mas também como uma apresentação ou ferramenta educacional. É adequado para aqueles que estão começando a utilizar a ciência de dados. O *Jupyter Notebook* suporta marcações (*Markdowns*), permite adicionar componentes HTML de imagens e usar bibliotecas de visualização de dados como Matplotlib e Seaborn e mostrar seus gráficos no mesmo documento onde o código está. Além disso, é possível exportar o documento para arquivos PDF e HTML, ou simplesmente exportar como um arquivo Python (.py) (Butmall, Ranka e Shah, 2019).

Existem diversas bibliotecas que são utilizadas em diferentes etapas da análise em Ciência de Dados com Python, e na Figura 3.2 estão indicados alguns deles e em quais fases são geralmente executados (a biblioteca Matplotlib - <https://matplotlib.org/>, por exemplo, é usada para apresentação e exploração de dados).

Cada biblioteca possui um conjunto de módulos com funcionalidades distintas. A biblioteca Scipy (<https://scipy.org/scipylib/>), por exemplo, contém mais de 30 módulos, sendo um deles o “*scipy.cluster.hierarchy*” que fornece várias funções para agrupamento hierárquico e aglomerativo, como: geração de clusters hierárquicos a partir de matrizes de distâncias, cálculo de estatísticas em clusters, cortar ligações para gerar clusters planos e visualizar clusters com dendrogramas.

Trata-se, portanto, de um tema extenso cujo foco varia conforme o objetivo do analista, e, assim, para aprofundamento dos conhecimentos sobre as principais bibliotecas e módulos recomenda-se a consulta das seguintes referências (não se limitando a estas): Hunter (2007); Millman e Aivazis (2011); Pedregosa (2011); Harris *et al.*, (2020) e Virtanen *et al.*, (2020). Recomenda-se também a leitura do livro “Data Science do Zero” de Joel Grus (2016) que, com uma abordagem de fácil entendimento, trabalha vários conceitos e detalhes importantes sobre a ciência de dados utilizando a linguagem de programação Python.

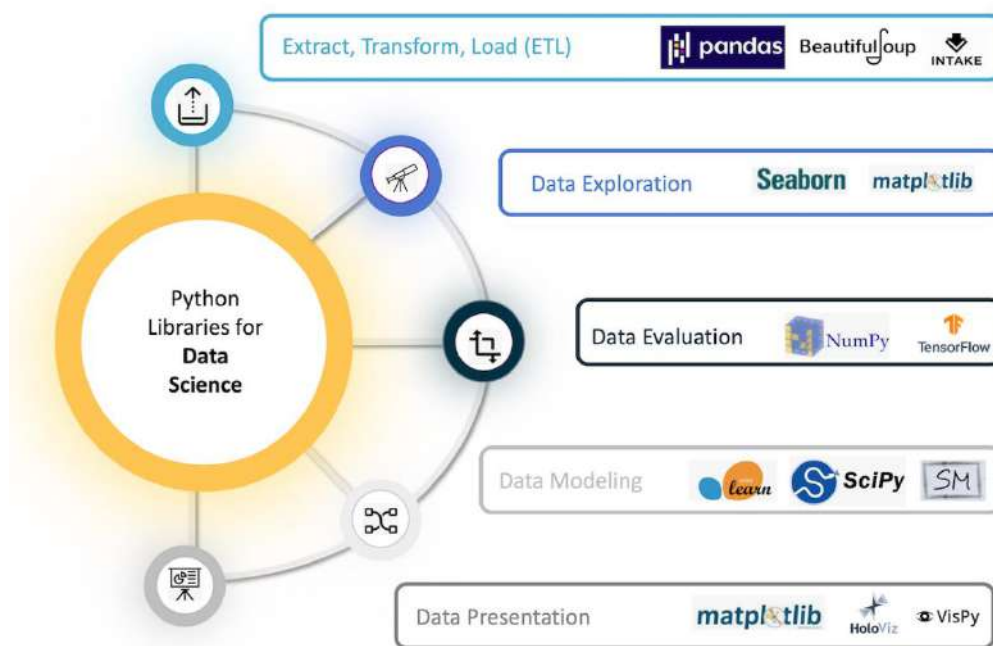


Figura 3.2 - Bibliotecas para Ciência de Dados.
 Fonte: https://numpy.org/images/content_images/ds-landscape.png.

No capítulo de Metodologia apresentam-se as bibliotecas efetivamente utilizadas nesta tese e no capítulo de resultados (na parte de análise dos solos da região de Recife usando a ciência de dados) detalha-se algumas informações sobre os códigos e recursos do Python que foram utilizados para realização das análises.

3.3 Análise exploratória de dados – AED

A Análise Exploratória de Dados (AED) faz parte da Estatística que, segundo Heiberger e Holland (2015), é o campo de estudo cujo objetivo é a transformação de dados (geralmente conjuntos de números junto com características de identificação) em informações (geralmente na forma de tabelas, gráficos e resumos escritos e verbais) que podem levar a decisões sólidas.

Nessa linha, Medri (2011) diz que a análise exploratória de dados nos fornece um extenso repertório de métodos para um estudo detalhado dos dados, antes de adaptá-los. Nessa abordagem, a finalidade é obter dos dados a maior quantidade possível de informação, que indique modelos plausíveis a serem utilizados numa fase posterior.

Na Ciência de Dados, a AED é uma importante etapa da Mineração de Dados (*Data Mining*) e constitui-se da aplicação de técnicas de estatística descritiva e gráfica para a análise

de conjuntos de dados, com o intuito de descobrir ou confirmar algum padrão ou comportamento peculiar sobre os dados analisados.

As principais técnicas da AED e que foram utilizadas nesta tese consistem nas medidas-resumo que englobam as medidas de posição (média, moda e mediana) e de dispersão (desvio-padrão), as análises bidimensionais por meio de associações entre variáveis (matrizes de correlação, gráficos de dispersão etc.) e a análise de agrupamento (Cluster) que por não ser tão trivial é abordada no subtópico seguinte. Para embasamento teórico das técnicas mais básicas pode ser consultado, com uma grande riqueza de detalhes, o livro de Morettin e Bussab (2017).

Ressalta-se que além da AED, esta tese também aplicou as técnicas de regressão linear e não linear, simples e múltipla, quando da análise dos resultados dos ensaios realizados nos solos da região de Recife.

3.3.1 Análise de Cluster

A Análise de *Cluster*, também chamada de análise de agrupamentos ou de reconhecimento de padrão não supervisionado (na ciência de dados faz parte da tecnologia de aprendizado de máquina não-supervisionado - *Unsupervised Machine Learning*), é um conjunto de ferramentas para criar grupos (clusters) com propriedades homogêneas a partir de amostras grandes e heterogêneas. A premissa principal é de que os grupos ou “clusters” formados devam ser homogêneos tanto quanto possível e as diferenças entre os vários grupos tão grandes quanto possível.

Frank e Todeschini (1994) afirmam que a Análise de Cluster é um conjunto de métodos exploratórios multivariados que buscam encontrar clusters, com base em algum critério de similaridade entre os objetos (ou variáveis). Dizem ainda que o resultado da clusterização depende muito do método utilizado, da padronização das variáveis e da medida de similaridade escolhida. Assim, os métodos de agrupamento existentes resumem-se em dois principais grupos: hierárquico e não-hierárquico, cada um com seus subgrupos conforme esquema mostrado na Figura 3.3.

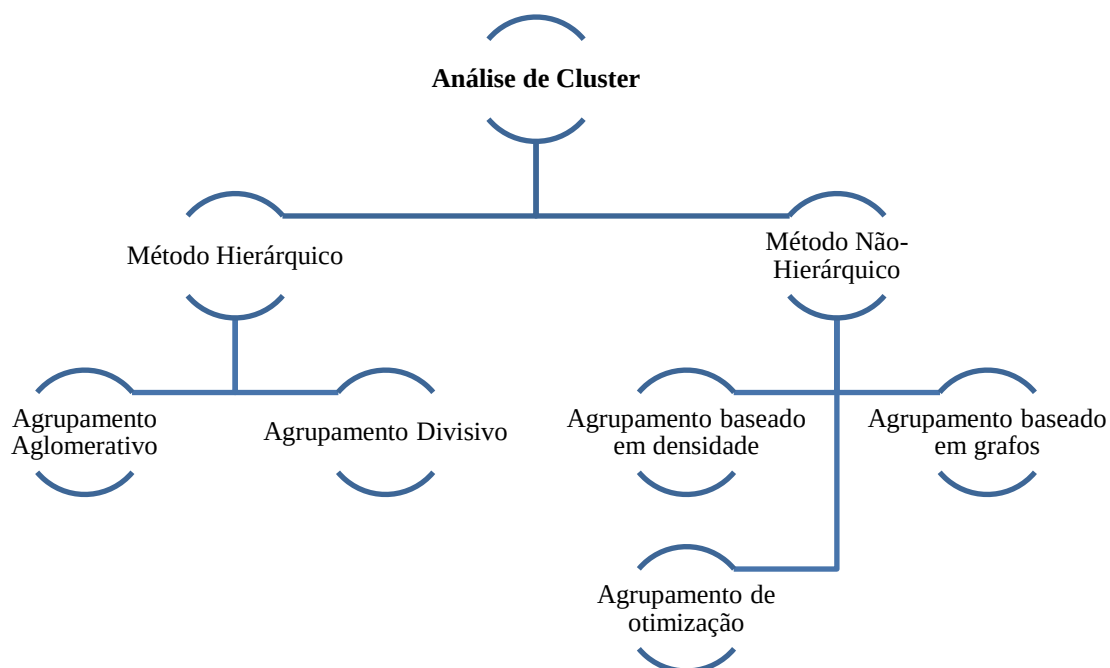


Figura 3.3 - Métodos de agrupamento.
 Fonte: Traduzido e adaptado de Frank e Todeschini (1994).

O método hierárquico, que é o utilizado nesta tese, é frequentemente utilizado na prática. Começa-se com a melhor estrutura possível, calcula-se a matriz de distância para os clusters e juntam-se os clusters que têm a menor distância (Härdle e Simar, 2015).

Como mostra o esquema da Figura 3.3 pode-se fazer o agrupamento hierárquico de duas maneiras: aglomerativa (começa da partição mais fina possível, ou seja, cada observação forma um grupo, ou divisiva (começa com a partição mais grossa possível, ou seja, começa com um cluster contendo todas as observações e prossegue-se dividindo o cluster único em clusters de tamanhos menores).

O agrupamento em geral, e especialmente o agrupamento hierárquico, deve ser visto como uma análise exploratória de dados, e diferentes combinações podem revelar diferentes características do conjunto de dados (Chen *et al.*, 2007).

Ferreira (2008) afirma que as técnicas de agrupamento objetivam justamente otimizar a separação entre os objetos de uma coleção, possibilitando a descoberta de novos padrões, previamente desconhecidos e insuspeitos. Muito embora essas técnicas não sejam ainda capazes de determinar os grupos com total precisão, é consenso que grupos bem formados são aqueles que apresentam a mínima distância entre os seus objetos e a máxima distância para os demais grupos.

Härdle e Simar (2015) dizem que a análise de agrupamento pode ser dividida em duas etapas fundamentais: 1 – Escolha da medida de proximidade (verifica-se cada par de

observações quanto a semelhança de seus valores) e, 2 – Escolha do algoritmo de criação do grupo (com base nas medidas de proximidade, os objetos são atribuídos aos grupos de modo que as diferenças entre os grupos se tornem grandes e as observações dentro do grupo se tornem o mais próximas possível).

Sobre a etapa 1, a proximidade entre os pontos de dados é medida por uma distância ou matriz de distâncias de similaridade cujos componentes fornecem o coeficiente de similaridade ou a distância entre dois pontos. Uma variedade de medidas de distância existe para os diversos tipos de dados, sendo que, para variáveis quantitativas, as mais utilizadas são: Euclidiana, generalizada/ponderada, Minkowski.

A distância Euclidiana é a medida de similaridade mais comumente usada e segundo Hair *et al.*, (2009) ela é, essencialmente, uma medida do comprimento de um segmento de reta desenhado entre dois objetos, quando representados graficamente, ou seja, é o comprimento da hipotenusa de um triângulo retângulo, conforme se calcula pela fórmula indicada sob a Figura 3.4.

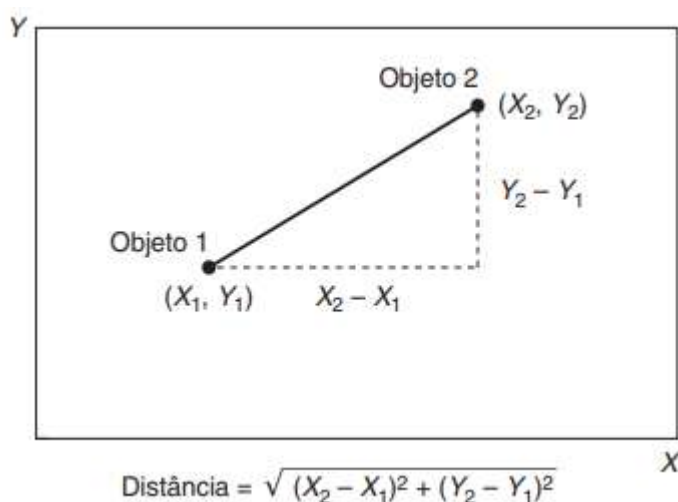


Figura 3.4 - Um exemplo de distância euclidiana entre dois objetos medidos sobre duas variáveis, X e Y.
Fonte: Hair *et al.*, (2009).

Hair *et al.*, (2009) afirmam que a distância de Minkowsky emprega a soma das diferenças absolutas das variáveis (isto é, os dois lados de um triângulo retângulo em vez da hipotenusa), que apesar de ser um procedimento mais simples de calcular, pode conduzir a agrupamentos inválidos se as variáveis forem altamente correlacionadas. Já a distância generalizada/ponderada explica as correlações entre variáveis de uma maneira que pondera igualmente cada uma delas, mas depende de variáveis padronizadas.

Assim, um detalhe importante para a análise de agrupamentos também inclui a padronização das variáveis, visto que, como muito bem colocado por Hair *et al.*, (2009), a maioria das análises de agrupamento usando medidas de distância é bastante sensível a diferentes escalas ou magnitudes entre as variáveis. Em geral, variáveis com maior dispersão (ou seja, maiores desvios-padrão) têm maior impacto sobre o valor de similaridade final.

A forma mais comum de padronização é a conversão de cada variável em escores padrão (também conhecidos como escores Z) pela subtração da média e divisão pelo desvio-padrão para cada variável. O processo converte cada escore de dados iniciais em um valor padronizado com uma média de 0 e um desvio-padrão de 1 e, em troca, elimina o viés introduzido pelas diferenças nas escalas dos vários atributos ou variáveis usadas na análise (Hair *et al.*, 2009).

Sobre a etapa 2, ressalta-se a colocação de Ferreira (2008) quando diz que o processo de perceber padrões e agrupar objetos tendo por origem uma grande quantidade de amostras e variáveis não é tarefa simples, sendo necessária a utilização de algoritmos de segmentação, especializados em descoberta e formação de grupos de dados.

Assim, existem vários algoritmos de criação dos grupos que variam conforme o método de ligação entre os clusters, e os principais estão indicados no Quadro 3.1. Hair *et al.*, (2009) afirmam que, combinado com a medida de similaridade escolhida, o algoritmo de agrupamento fornece os meios para representar a semelhança entre agrupamentos com múltiplos membros. No entanto, de acordo com Härdle e Simar (2015), Metz (2006) e Frank e Todeschini (1994) não existe uma combinação “correta” de medida de distância e método de ligação.

O resultado da Análise de Clusters pode ser apresentado na forma de gráfico, denominado dendrograma, em que se apresenta as observações, a sequência dos grupos e as distâncias entre os grupos, conforme esquema exemplificado na Figura 3.5. Hastie, Tibshirani e Friedman (2009) afirmam que um dendrograma fornece uma descrição completa altamente interpretável do agrupamento hierárquico em um formato gráfico e que esta é uma das principais razões para a popularidade deste método de agrupamento.

No dendrograma, as alturas dos ramos correspondem às distâncias entre os clusters. Grandes distâncias indicam o agrupamento de grupos heterogêneos. Assim, ao se escolher “cortar a árvore” em um nível desejado, os ramos descrevem os clusters correspondentes. Conforme indica Hair *et al.*, (2009), a estrutura em árvore do dendrograma retrata cada estágio do processo. Tipicamente, o gráfico é escalonado de maneira que distâncias menores entre combinações indicam maior homogeneidade.

Quadro 3.1 – Métodos de ligação em agrupamento de dados.

Métodos de ligação	Forma de agrupamento	Comentário
Ligação simples (<i>Single linkage</i>)	Define a distância entre dois grupos como a menor distância entre um elemento de um grupo até um elemento do outro grupo, por isso é também chamado de algoritmo do vizinho mais próximo (<i>Nearest Neighbour algorithm</i>).	Tende a produzir grandes aglomerados, fracamente ligados e com pouca coesão interna.
Ligação completa (<i>Complete linkage</i>)	A distância entre dois clusters é calculada como a maior distância entre dois objetos em clusters opostos, por isso é também chamado de algoritmo de vizinho mais distante (<i>Farthest Neighbour algorithm</i>).	Tende a produzir aglomerados bem separados e pequenos.
Ligação média (<i>Average linkage</i>)	A distância entre dois clusters é calculada como a média das distâncias entre todos os pares de objetos em clusters opostos.	Propõe um meio-termo entre os dois algoritmos anteriores.
Ligação centróide (<i>Centroid linkage</i>)	A distância entre dois clusters é calculada como a distância entre seus centróides.	Cada cluster é representado por seu centróide.
Ligação de Ward	A distância entre dois clusters é calculada através da soma dos desvios quadrados de cada objeto do centróide de seu próprio cluster, une dois clusters que resultem no menor aumento na soma dos quadrados do erro total dentro do grupo, por isso é também chamado de método da mínima variância.	Ao contrário dos outros métodos, não reúne grupos com a menor distância, mas sim aqueles que não aumentam drasticamente a heterogeneidade, desta forma, unifica os grupos de modo que a variação dentro desses grupos seja minimizada, ou seja, os grupos criados são tão homogêneos quanto possível.

Nota: quadro desenvolvido com base nas seguintes referências - Frank e Todeschini (1994) e Härdle e Simar (2015).

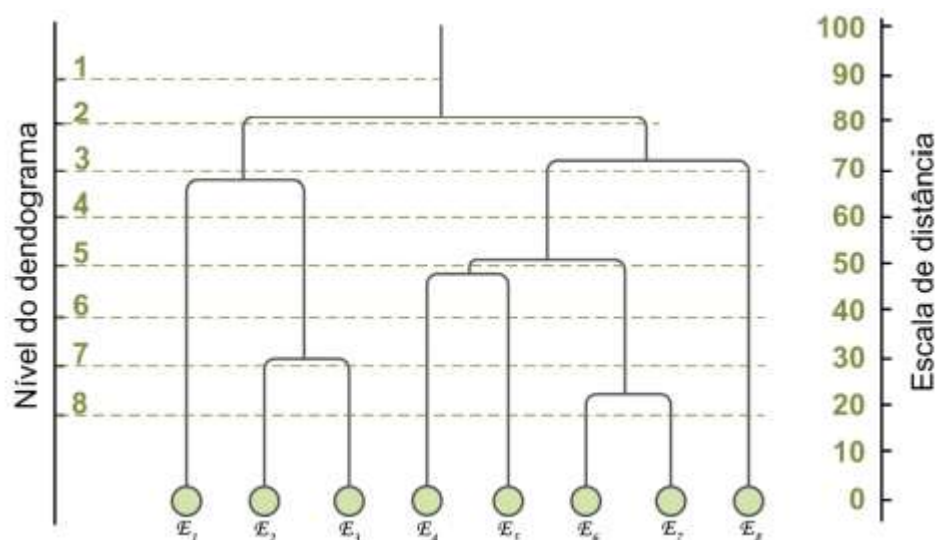


Figura 3.5 - Clustering representado por meio do Dendrograma.

Fonte: Metz (2006)

Para aprofundamento dos conhecimentos teóricos da Análise de *Clusters* sugere-se a consulta das seguintes referências: Hastie, Tibshirani e Friedman (2009), Hair *et al.*, (2009), Härdle e Simar (2015), Forsyth (2018), dentre outras.

3.4 Síntese do capítulo

Este capítulo abordou de forma sintetizada alguns conceitos associados a Ciência de dados e as ferramentas estatísticas e computacionais comumente utilizadas para sua aplicação na análise de conjuntos de dados. Foram citadas diversas referências bibliográficas que podem prover o aprofundamento teórico necessário para “iniciação” nas diversas técnicas aplicadas nesta área de conhecimento. Remete-se ao termo “iniciação” pelo fato de tratar-se de um tema bastante amplo e com diversas possibilidades de direcionamento conforme o objetivo do analista/cientista.

Em resumo, a Ciência de Dados pode ser considerada como interdisciplinar visto que incorpora diversas outras áreas do conhecimento: estatística, computação, matemática, dentre outras, além da especialidade de cada analista. Atualmente, existem diversas ferramentas disponíveis para implementação dos códigos e algoritmos para análise de dados. Ao longo da breve revisão de literatura apresentada neste capítulo, foram citadas as linguagens de programação Python e R, bem como as plataformas de desenvolvimento Anaconda e *Google Colab* e algumas das bibliotecas disponíveis para viabilizar as análises.

A AED pode ser vista como o primeiro passo para o conhecimento da natureza e comportamento de um conjunto de dados. A técnica de análise de Cluster foi citada como um tipo de AED que pode ser realizada utilizando diferentes métodos de ligação e medidas de similaridade, visando mostrar o agrupamento dos dados de forma clara e coerente, auxiliando na tomada de decisões dos cientistas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Apresentação do capítulo e breve descrição da metodologia

Este capítulo apresenta as características da área de estudo, que é a Região Metropolitana de Recife (RMRecife), situada em Pernambuco – Brasil, os materiais (solos) e os métodos utilizados. Inicia-se com indicação da localização geográfica, caracterização do clima e os aspectos geológicos e pedológicos da região em que a pesquisa se insere. Em seguida, apresenta-se o programa de coleta de materiais, onde mostra-se a distribuição dos pontos de amostragem e suas respectivas coordenadas, as peculiaridades observadas em campo, bem como a indicação da unidade geológica e da classe pedológica que cada solo estudado pertence.

Apresenta-se também as descrições de todos os ensaios de laboratório executados, destacando as normas seguidas, os laboratórios onde os mesmos foram realizados, os equipamentos utilizados e as características particulares de cada ensaio.

Em seguida, apresentam-se os critérios utilizados como base para a construção do Banco de Dados de Solos Finos (BDSF). As referências e as informações geotécnicas que foram incorporadas ao BDSF são apresentadas no Capítulo 7. Ao final deste capítulo, descreveu-se uma síntese da metodologia utilizada como base para as análises estatísticas utilizando os fundamentos da Ciência de Dados.

Para sintetizar a metodologia desta pesquisa, construiu-se o fluxograma metodológico apresentado nas Figuras 4.1 e 4.2, contemplando a Campanha Experimental e os aspectos abordados nos capítulos de resultados, sendo:

- **Campanha Experimental:** dividida em duas partes - campo e laboratório. Na primeira, realizou-se o planejamento da coleta e a coleta dos materiais propriamente dita e na segunda, referem-se os ensaios executados em laboratório (ensaios de MEV, contração e químicos para medida dos índices K_i e K_r foram previstos, no entanto, devido as dificuldades durante a pandemia po COVID-19 não foi possível a conclusão deles);
- **Apresentação e Análise dos Resultados:** apresenta-se duas vertentes de contribuições da pesquisa, a primeira refere-se aos solos da própria tese, com a apresentação da caracterização básica, da avaliação do comportamento mecânico destes, além das simulações de dimensionamento de estruturas de pavimento utilizando o MeDiNa e da análise integrada dos resultados utilizando as ferramentas da Ciência de Dados. Foram

verificadas possíveis correlações entre as propriedades físicas, entre as propriedades físicas e mecânicas, AED e Análise de Cluster. Duas análises complementares foram realizadas: 1. Comparação das imagens extraídas com Stereomicroscópio também foi realizada para os solos da RMRecife e, 2. Análise das tensões atuantes vs. MR dos solos da classe MCT LA'. A segunda vertente está na criação de um Banco de Dados de Solos Finos, baseando-se na coleta bibliográfica em teses e dissertações em que tenham sido realizados pelo menos os ensaios de MR, DP e MCT, seguida da análise integrada dos resultados nos mesmos padrões adotados na primeira vertente, porém, tendo-se em mente que, nem todas as correlações realizadas na primeira foram medidas nesta visto que, atualmente (tomando-se como exemplo a COPPE/UFRJ) muitos trabalhos científicos brasileiros já não estão realizando ensaios de limites de consistência (importante para a classificação tradicional) e de CBR. Também para a análise do banco de dados, foi aplicada a técnica de estatística de análise multivariada por meio da Análise de *Clusters*. Uma análise complementar através de testes de regressão linear múltipla também foi realizada com os dados do BDSF.

Como ferramentas de auxílio para as análises foram utilizados os softwares Excel, Statistica e a plataforma Anaconda para implementação dos códigos e algoritmos em linguagem de programação Python.

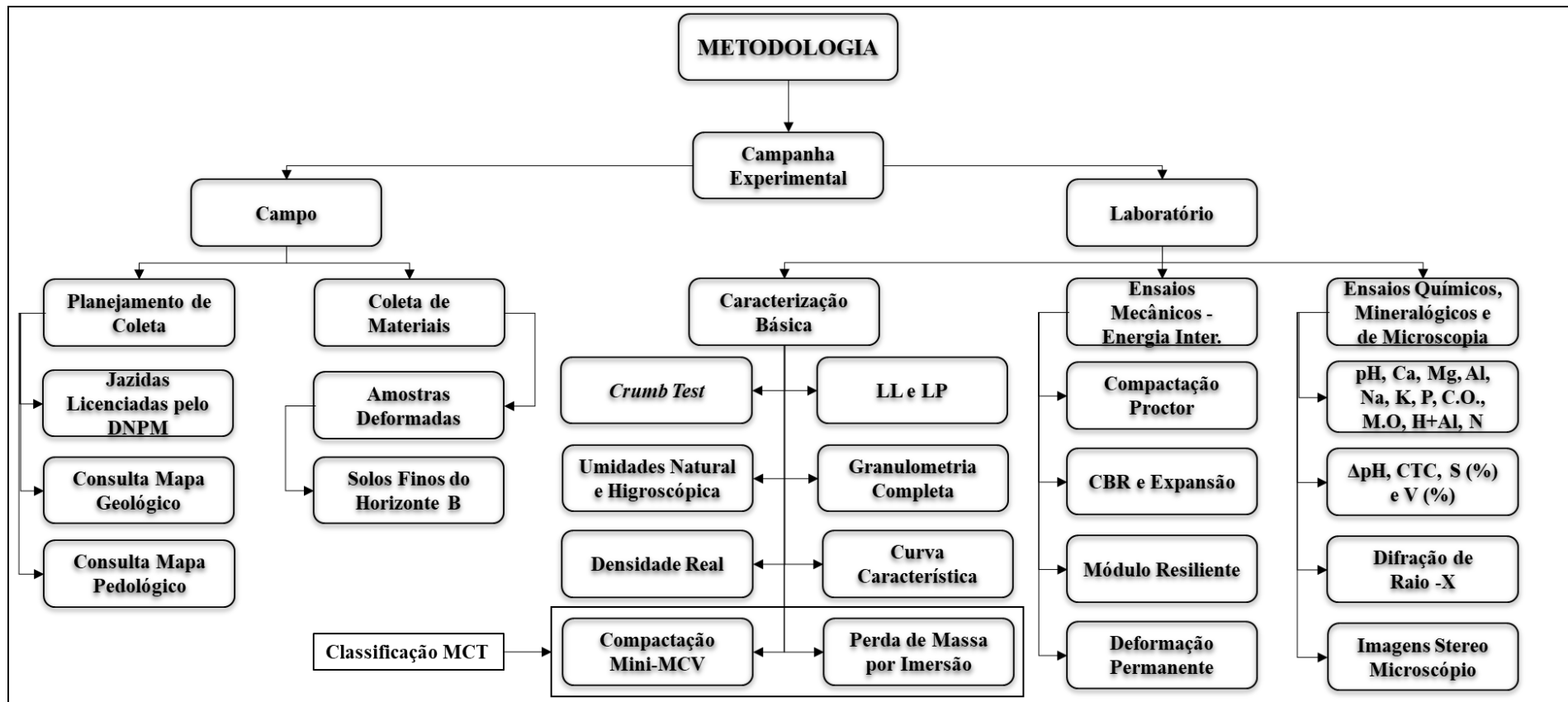


Figura 4.1 – Fluxograma Metodológico desta pesquisa – Campanha Experimental.

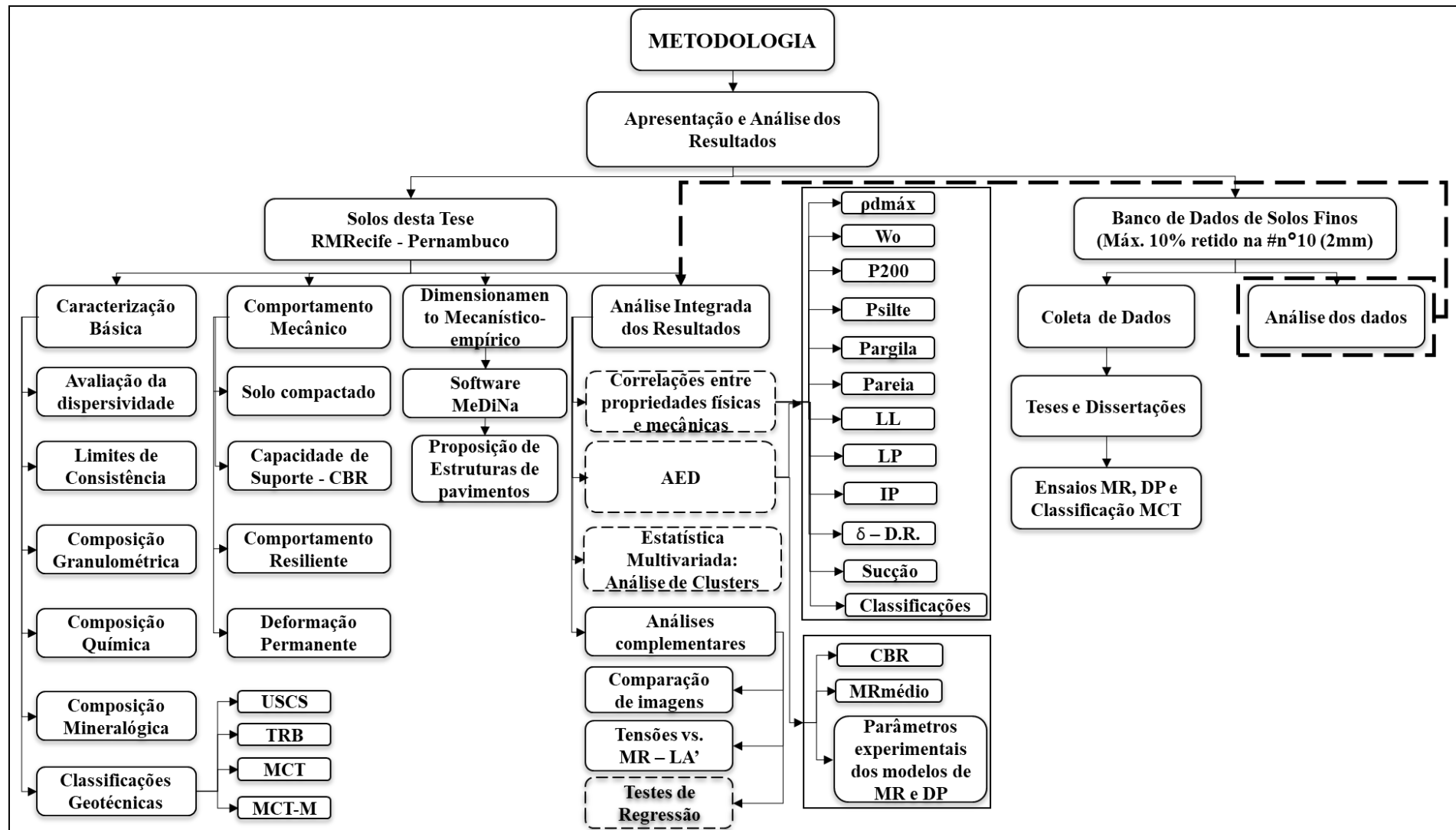


Figura 4.2 – Fluxograma Metodológico desta pesquisa – Apresentação e Análise de Resultados.

4.2 A Região Metropolitana de Recife (RMRecife)

4.2.1 Localização e clima

Parte do nordeste brasileiro e situada junto à costa litorânea do país, a região de pesquisa compreende a Região Metropolitana de Recife (RMRecife, Figura 4.3). A RMRecife é composta pela cidade de Recife e os 14 municípios de seus arredores, os quais caracterizam a maior aglomeração urbana do estado de Pernambuco.

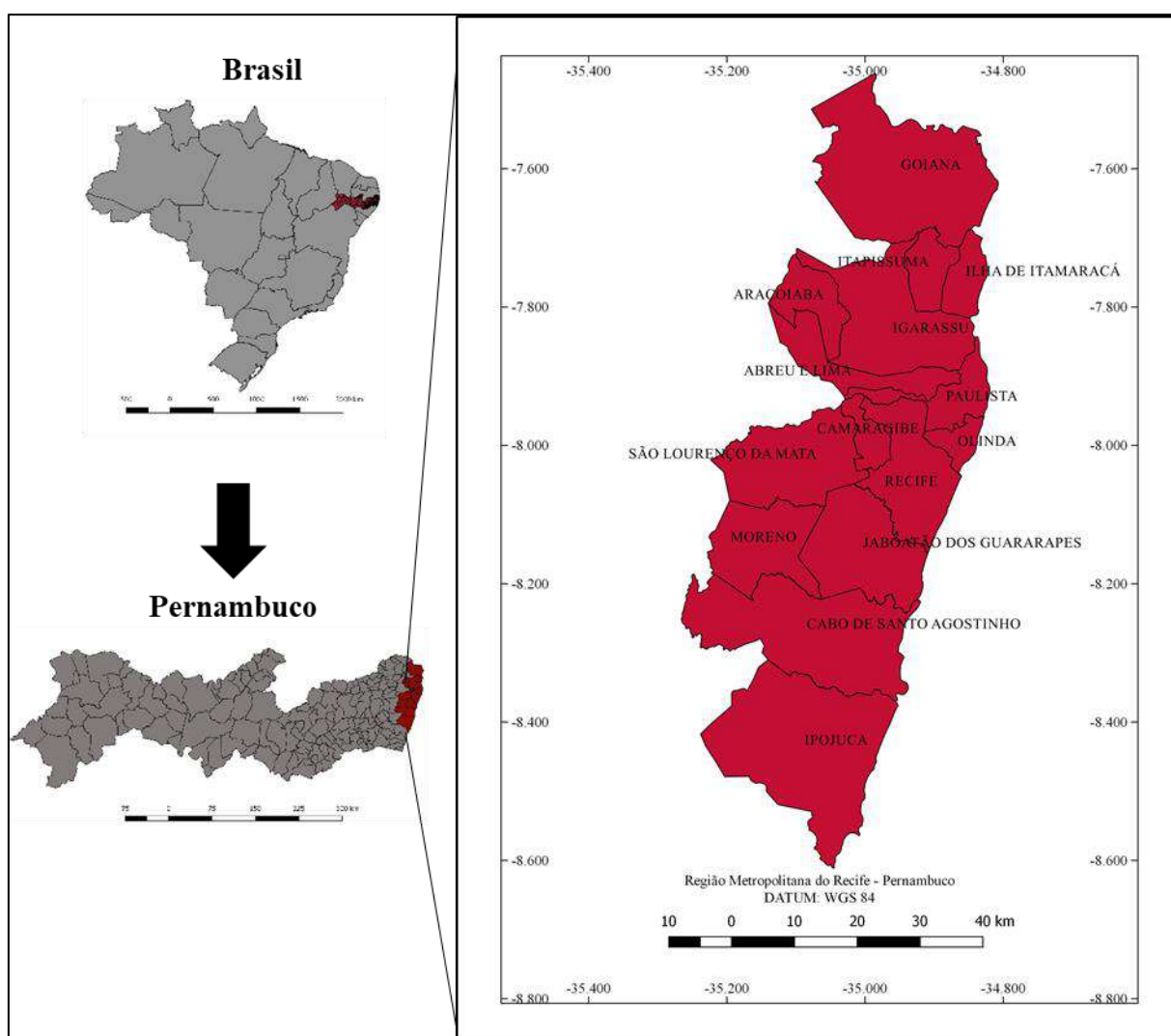


Figura 4.3 – Área de Pesquisa: Região Metropolitana do Recife - Pernambuco.

Característico da região, o clima é marcado por grandes volumes de precipitação pluviométrica e altas temperaturas. O gráfico apresentado na Figura 4.4 mostra um resumo da variação da precipitação, nos anos de 2018 e 2020, na cidade de Recife (capital do estado de

Pernambuco) e as médias mensais de um período de 7 (sete) anos (2012-2018) baseado nos dados disponíveis na plataforma da Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC).

No mesmo gráfico, apresenta-se ainda os valores de temperaturas máximas e mínimas registradas em Recife também no ano de 2018, com base nos dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As temperaturas de 2020 foram similares.

Os dados apresentados confirmam as características do ambiente tropical que, segundo a CHESWORTH *et al.*, (2008), são precipitações variando entre 1,000 – 1,500 mm por ano (a soma total da precipitação, em Recife, no ano de 2018 foi de 1.467mm, no ano de 2020 foi de 1638mm e no acumulado de 2012-2018, 1681 mm) e temperaturas maiores que 20°C.

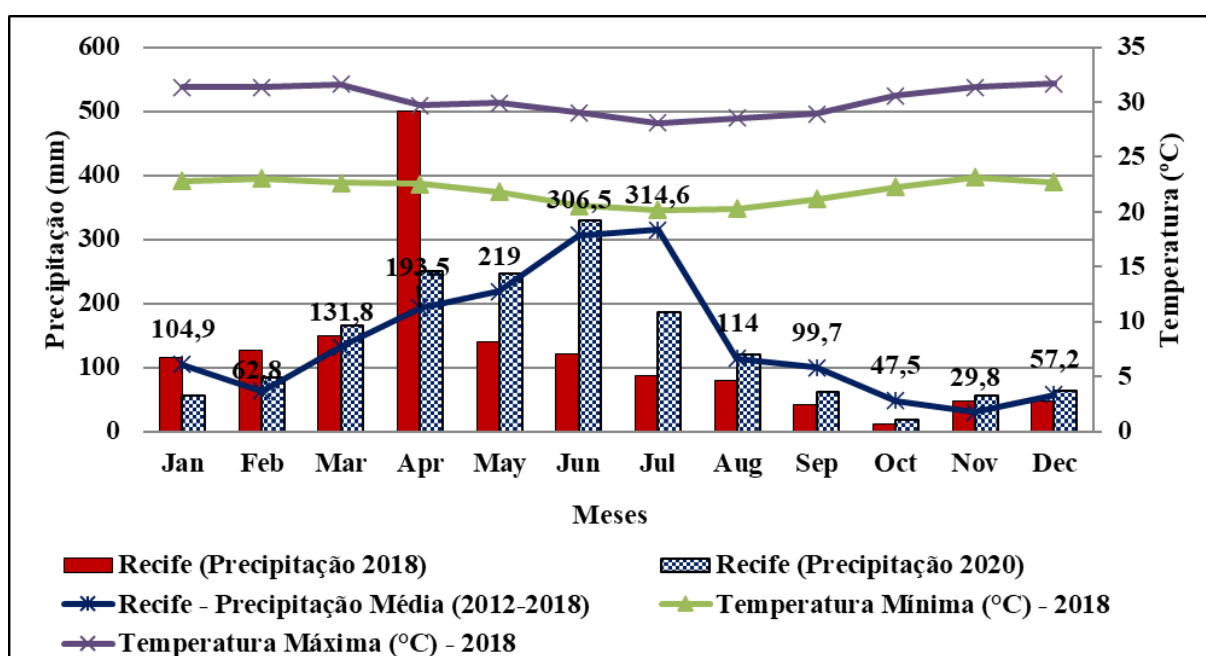


Figura 4.4 – Dados Pluviométricos e de temperatura da cidade de Recife-Pernambuco.

No boletim climatológico disponível no site da APAC, tem-se que na RMRecife, em 2018, teve-se um acumulado de precipitação de 1476,1 mm, que é similar ao observado na capital durante o mesmo período. Para ilustrar o volume de chuvas do ano 2019 apresenta-se a Figura 4.5, que mostra um mapa com a distribuição espacial da precipitação acumulada (mm) dos meses de janeiro a dezembro, em todo estado de Pernambuco. No mapa, pode ser visto que a RMRecife, como um todo, apresentou valores de precipitação entre 1.500 e 2.000 mm.

Para fins comparativos, o gráfico da Figura 4.6 apresenta o valor de precipitação total acumulada de cada um dos municípios da RMRecife, no ano de 2019. Apresenta-se no mesmo gráfico, como linhas de referência, a média acumulada de Recife no ano de 2018 e no

período de 2012-2018. Observa-se que, em geral, em 2019, houve um aumento no volume de chuva na maioria dos municípios, exceto em São Lourenço da Mata que apresentou volume menor que a média de 2018.

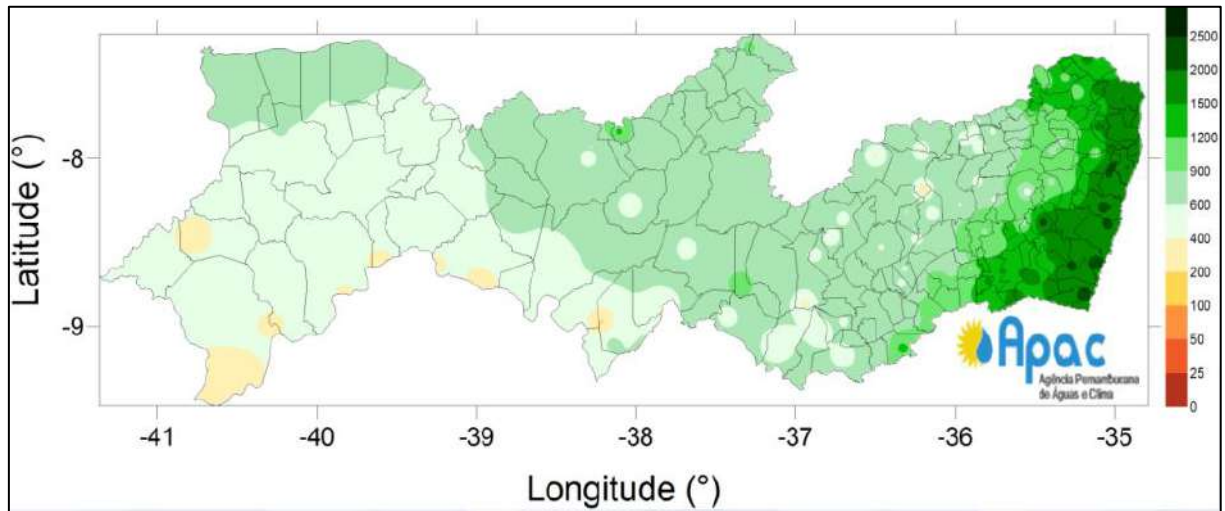


Figura 4.5 – Distribuição espacial da precipitação acumulada (mm) de janeiro a dezembro de 2019 no estado de Pernambuco. Fonte: APAC (2019).

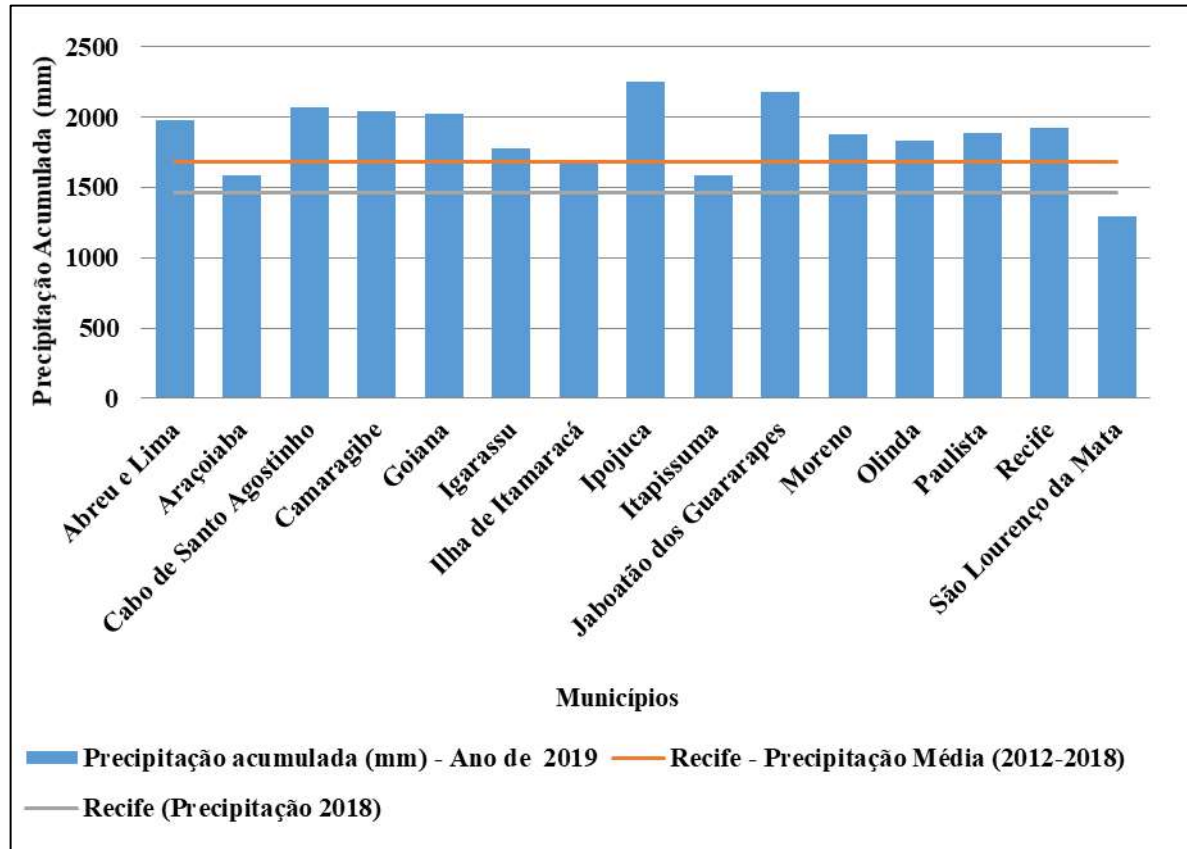


Figura 4.6 – Precipitação acumulada (mm) em 2019 em cada um dos municípios da RMRecife, elaborado com os dados disponibilizados em APAC (2019).

Em relação ao balanço hídrico, uma publicação recente de Nascimento e Ribeiro (2020) contempla o estudo do balanço hídrico anual da microrregião de Recife – PE, que no artigo referem-se a boa parte dos municípios da RMRecife, a saber: Abreu e Lima, Paulista, Olinda, Camaragibe, São Lourenço da Mata, Recife, Moreno e Jaboatão dos Guararapes.

Nascimento e Ribeiro (2020) analisaram uma série histórica de 1967 a 2017 obtida junto a APAC e geraram o gráfico apresentado na Figura 4.7, o qual mostra os dados de reposição, retirada, excedente e déficit hídrico, sendo os dois primeiros responsáveis pela alteração de umidade no solo.

Assim, nota-se que o período de reposição de água no solo (que corresponde ao aumento de umidade e redução de sucção no solo) ocorre nos meses de março e abril, já a retirada (correspondente ao período de aumento da sucção e redução de umidade no solo) ocorre entre os meses de setembro a fevereiro (sendo o maior índice em outubro – 98 mm e o menor em fevereiro – 1 mm).

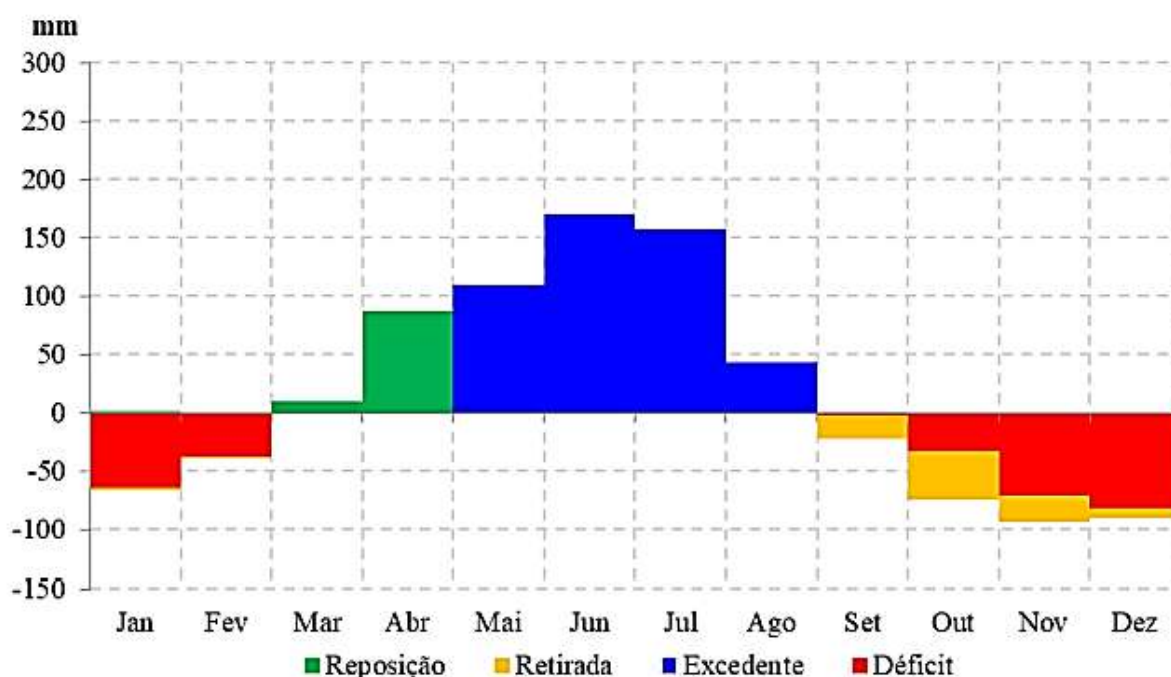


Figura 4.7 – Gráfico da reposição, retirada, excedente e déficit hídrico mensal.

Fonte: Nascimento e Ribeiro (2020).

4.2.2 Aspectos geológicos e pedológicos

Para abordar os aspectos geológicos e pedológicos da região de pesquisa, optou-se por sintetizar o entendimento exposto no relatório de Geodiversidade do estado de Pernambuco publicado em 2014 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Também utilizaram-se as informações disponíveis no acervo do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas e Planícies (GEGEP) e no Boletim de Pesquisa nº 11 da Embrapa (2000).

O mapa apresentado na Figura 4.8 mostra os principais compartimentos ambientais do estado de Pernambuco. Extraí-se que na área que compreende a RMRecife há a predominância de 3 compartimentos ambientais, que aparecem no mapa como: 1 – Baixada Litorânea (de norte a sul da RMRecife); 2 – Tabuleiros Costeiros (porção mais ao norte) e 4 – Mar de Morros (porção central e do sul).

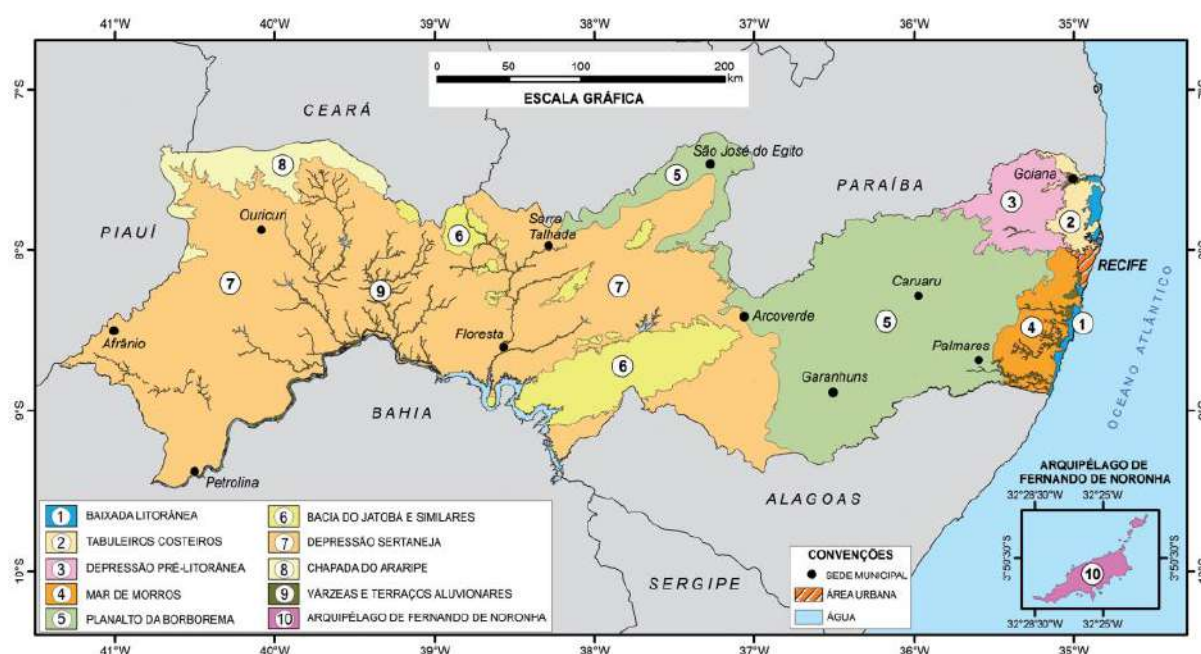


Figura 4.8 – Principais compartimentos ambientais do estado de Pernambuco. Fonte: CPRM (2014).

De acordo com a CPRM (2014), a Baixada Litorânea compreende as paisagens de praias, mangues e dunas, com altitudes de 0 a 10 metros. Geologicamente, é composto por sedimentos quaternários arenoquartzosos com intercalações de sedimentos mais finos depositados em ambientes de mangues e leitos de rios. Pedologicamente, como consequência da geologia e ambiente de formação, predomina os Neossolos quartzarênicos e os Espodosolos.

Já os Tabuleiros Costeiros (altitude média na faixa de 50 a 150 metros) são compostos por sedimentos paleocênicos/neocênicos do Grupo Barreiras, não consolidados e com granulometria diversificada, observando-se o predomínio de sedimentos argilosos e

argiloarenosos e, com menor frequência, arenosos. Pode apresentar ainda a presença de concreções ferruginosas e seixos.

No parágrafo anterior mencionou-se o termo “Grupo” Barreiras conforme adotado no texto utilizado como referência (CPRM, 2014), no entanto, é válido ressaltar que existe uma discussão sobre a nomenclatura desta unidade geológica, sendo o termo mais utilizado o de “Formação” Barreiras, o qual será o considerado nesta tese.

Os solos que predominam nos Tabuleiros Costeiros são os Argissolos Amarelos e os Latossolos Amarelos. A CPRM afirma que se apresenta o fenômeno de coesão natural (bem expressivo na camada entre 30 e 70 cm de profundidade), que é um forte endurecimento pedogenético do solo quando este atinge o estado seco (reversível no estado úmido).

Em menor ocorrência, neste compartimento também aparecem os Espodossolos e os Argissolos acinzentados, nas áreas de depressões suaves. Raramente, encontram-se Plintossolos em áreas rebaixadas (normalmente no terço inferior de encostas).

No compartimento Mar de Morros, como o próprio nome indica, sugere-se uma paisagem caracterizada por apresentar uma superfície composta por um conjunto de morros e colinas. Na geologia, destacam-se as rochas do pré-cambriano, compostas predominantemente pelas rochas ígneas ácidas (maciços granítico-granodioríticos) e rochas metamórficas do tipo gnaiss. De forma localizada, podem ocorrer basaltos, traquitos e riolitos. Capeando o topo de alguns morros pode-se encontrar os sedimentos do Grupo Barreiras, bem como, alguns bolsões desses sedimentos no extremo sul da unidade.

No Mar de Morros, raramente aparecem os Argissolos vermelhos, e sim os Latossolos amarelos, Argissolos Amarelos e Argissolos vermelhos-amarelos. Em proporção menor, podem ser encontrados Nitossolos vermelhos (onde ocorrem rochas vulcânicas básicas).

No tópico seguinte, é apresentado o programa de coleta de materiais (solos) efetuado nesta pesquisa, e nele indicam-se as unidades geológicas e pedológicas de cada amostra coletada. Assim, visando a objetividade, será detalhado aqui somente as características das referidas unidades geológicas identificadas, sendo: Formação Barreiras, Complexo Salgadinho (Metagranito), Formação Ipojuca (Traquito, Riolito) e Formação Algodoads, mostradas no Quadro 4.1.

As unidades pedológicas identificadas nas amostras coletadas na região de estudo foram os Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e os Latossolos Amarelos. A caracterização das classes pedológicas foi feita na revisão de literatura (item 2.3.1), portando, não se fará detalhamentos aqui.

Quadro 4.1 – Descrição das unidades geológicas identificadas.

Unidade geológica	Descrição das características
Formação Barreiras	Do período terciário, é composto por sedimentos arenosos à areno-argilosos quartzosos, de granulometria fina à grossa, coloração amarelado à avermelhado, por vezes com níveis de grãos de seixos e/ou concreções ferruginosas.
Complexo salgadinho (Metagranito)	Representada por granitos, ortognaisses migmatíticos enriquecidos em magnetita e gnaisses milonitizados, coloração cinza a rósea, granulação fina a média. Magnetita é abundante.
Formação Ipojuca_Traquito_Riolito	Do período cretáceo, é representada por rochas como traquitos, basaltos, andesitos e granito-calco-alcalino de manifestações vulcânicas e subvulcânicas que ocorrem na faixa costeira sul do Recife, sobretudo nos municípios de Cabo e Ipojuca.
Formação Algodóais	Três fácies características de leque aluvial: proximal - conglomerados polimodais oligomíticos maciços, de coloração roxa, contendo exclusivamente seixos de rochas vulcânicas; fácies mediana - arcóseo médio a grosseiro, mostrando estratificação cruzada, contendo seixos de quartzo e de tufo vulcânico dispersos numa matriz constituída de quartzo, feldspato e biotita e, fácies distal - arcóseo médio a grosseiro, creme-róseo, constituído de quartzo, feldspato e biotita (rara), mostrando estratificação cruzada, textura imatura e, algumas vezes, tectonizados e intercalados com camadas argilosas.

Observação: Elaborado com base nas informações disponíveis no acervo do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas e Planícies (GEGEP) e no Boletim de Pesquisa nº 11 da Embrapa (2000).

4.3 O programa de coleta de materiais

4.3.1 Pontos de coleta, unidades geológicas e classes pedológicas das amostras

A amostragem consistiu na coleta de amostras deformadas de solos de textura fina (máximo 10% de material retido na peneira de nº 10 – abertura 2 mm, conforme critério da Metodologia MCT). Ao todo foram coletadas 13 (treze) amostras de solos, distribuídos ao longo da área de pesquisa, abrangendo 11 (onze) dos 15 (quinze) municípios da Região Metropolitana do Recife.

Como ponto de partida para o planejamento da coleta, foram consultadas as jazidas de solo com licenciamentos ativos no Sistema de Cadastro Mineiro do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), disponível em <https://sistemas.dnpm.gov.br/SCM>, filtrando por aquelas com finalidade de uso para construção civil e/ou industrial. Em seguida, verificou-se nos mapas pedológicos, produzidos pelo GEGEP e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as classificações pedológicas em que as jazidas ativas se encontravam, fazendo-se a seleção somente daquelas que estavam inseridas nas classes de Latossolos e Argissolos, por serem as mais promissoras de apresentarem comportamento laterítico na classificação MCT, de acordo com Villibor e Nogami (2009).

Já em campo, ao visitar as jazidas previamente selecionadas, muitas delas já estavam exauridas ou não se conseguiu acesso devido tratar-se de propriedades particulares. Desta maneira, a solução encontrada foi de prospectar *in loco* pontos próximos aos pré-selecionados em que fosse possível realizar a coleta, como outras jazidas ou taludes próximos às rodovias.

Para a realização da coleta propriamente dita, foram utilizados: enxada - para limpeza da superfície lateral do talude, a fim de visualizar as características do perfil, como a transição da cobertura vegetal para o horizonte B; pá e picareta – para desagregação do solo e retirada da amostra deformada; sacos plásticos e de nylon para armazenamento e preservação de umidade e, um carrinho de mão – para transporte dos sacos até o veículo.

A Figura 4.9 apresenta um mapa com a distribuição dos pontos de coleta das amostras de solos desta pesquisa. A Tabela 4.1 apresenta a identificação das amostras (número mais as letras iniciais do município a que ela pertence), a descrição completa do nome do município e as coordenadas geográficas em graus decimais do ponto de coleta.

No município de Jaboatão dos Guararapes foram coletadas duas amostras, sendo assim optou-se por identificá-las pelo nome do bairro/referência local em que estão inseridas, que são: amostra 09 – Monte Guararapes (MGU) e 10 – Jazida da Muribeca (MUR). O mesmo também ocorreu em Cabo de Santo Agostinho, optou-se por manter as iniciais do município para a amostra 11 – CAB e ajustar a identificação da amostra 12 - Suape (SUA).

Tabela 4.1 – Identificação, município e coordenadas das amostras coletadas.

Identificação das amostras	Municípios	Coordenadas (graus decimais)
01 - GOI	GOIANA	-7.6022335, -34.9791729
02 - ARA	ARAÇOIABA	-7.786700, -35.096100
03 - ITA	ILHA DE ITAMARACÁ	-7.7950813, -34.8433398
04 - IGA	IGARASSU	-7.8421533, -34.8573302
05 - PAU	PAULISTA	- 7.972881, - 34.899030
06 - CAM	CAMARAGIBE	-7.9989573, -34.9994796
07 - SLM	SÃO LOURENÇO DA MATA	-7.975538, -35.034169
08 - REC	RECIFE	-7.9608592, -34.9174720
09 - MGU	JABOATÃO DOS GUARARAPES	-8.1549456, -34.9283903
10 - MUR	JABOATÃO DOS GUARARAPES	-8.147603, -34.950908
11 - CAB	CABO DE SANTO AGOSTINHO	-8.245080, -35.008151
12 - SUA	CABO DE SANTO AGOSTINHO	-8.348985, -34.957827
13 - IPO	IPOJUCA	-8.522147, -35.028575

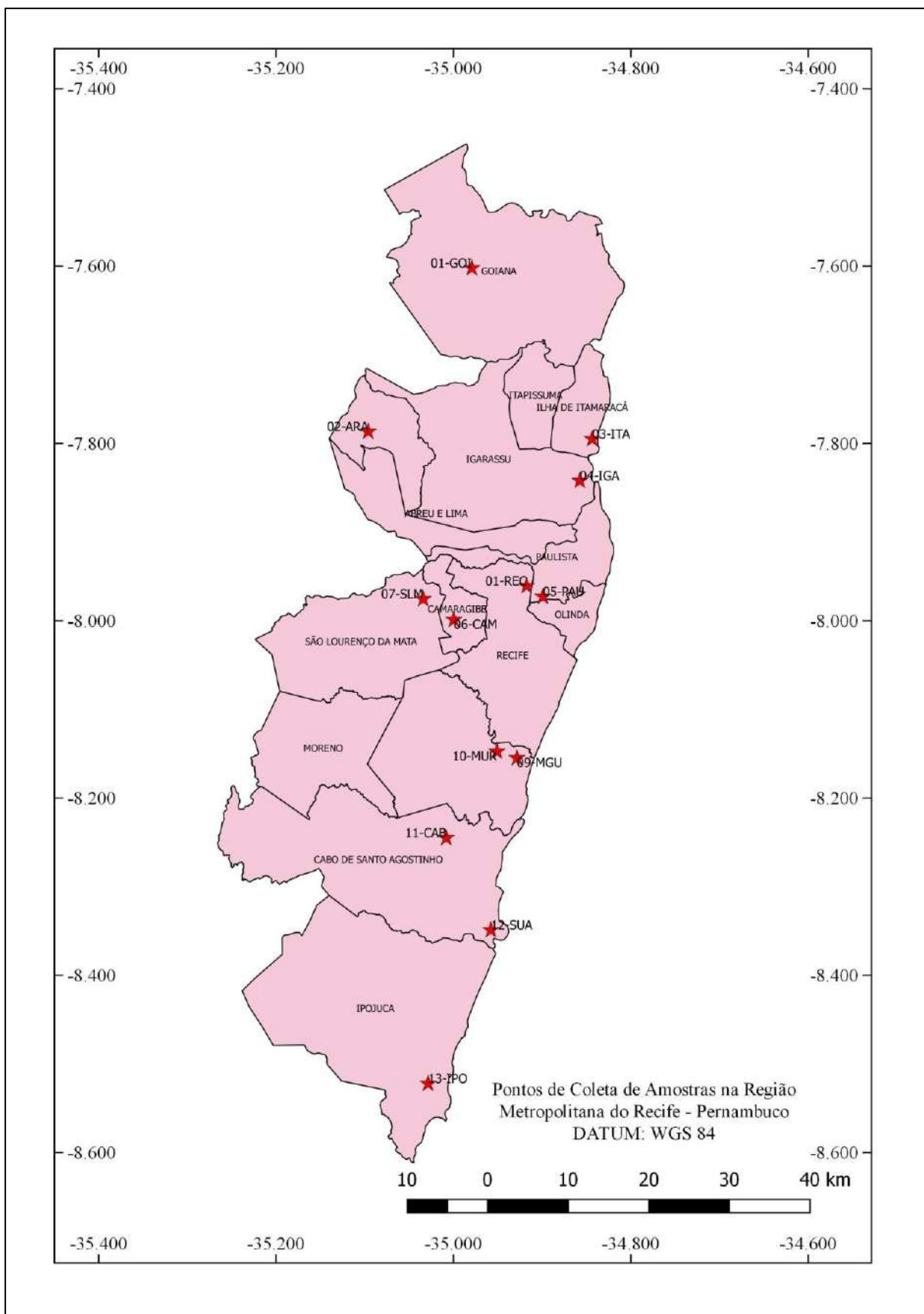


Figura 4.9 – Distribuição dos Pontos de coleta de amostras na Região Metropolitana do Recife.

O Quadro 4.2 apresenta as unidades geológicas e as classes pedológicas das amostras coletadas, obtidas através dos mapas produzidos pelo GEGEP (disponíveis na escala de 1:25.000) e nos mapas geológicos da CPRM, escala de 1:1.000.000 e, pedológico do IBGE, escala de 1:250.000. Verifica-se que a maior parte das amostras pertence à Formação Barreiras e, quanto à classe pedológica, predominam os Argissolos (9 das treze amostras, aproximadamente 70%), resultado compatível com as características predominantes na região de estudo (apresentadas no tópico 4.2).

Quadro 4.2 – Geologia e pedologia das amostras coletadas.

Amostra	Geologia		Pedologia	
	Unidade geológica	Sigla da Unidade	Unidade pedológica	Sigla da Unidade
01 - GOI	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Amarelo Distrófico	Pad2
02 - ARA	Formação Barreiras	ENb	Latossolo Amarelo Distrófico	LAd2
03 - ITA	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd4
04 - IGA	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd4
05 - PAU	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd5
06 - CAM	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd7
07 - SLM	Complexo salgadinho (Metagranito)	PPs	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd7
08 - REC	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd5
09 - MGU	Formação Barreiras	ENb	Área urbana	-
10 - MUR	Formação Barreiras	ENb	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd10
11 - CAB	Formação Ipojuca_Traquito_Riolito	K_T_R_I_P	Latossolo Amarelo Distrófico	LAd3
12 - SUA	Formação Algodóais	K2a	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd2
13 - IPO	Formação Barreiras	ENb	Latossolo Amarelo Distrófico	LAd3

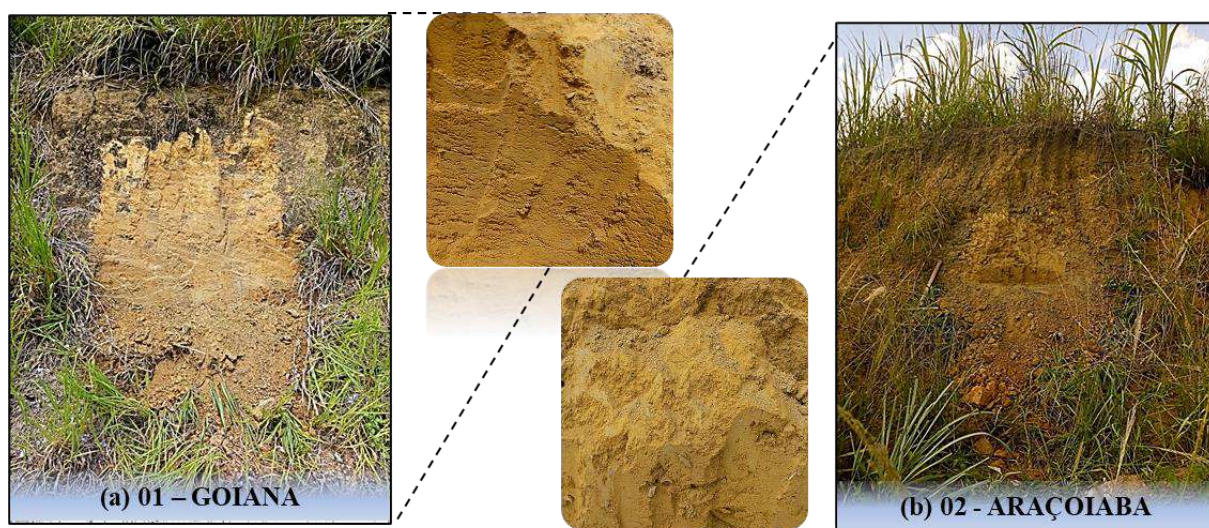
Nos mapas, o solo 11-CAB é indicado como da formação Ipojuca que é representada pelas rochas de traquito e reolito, no entanto, acreditasse também tratar-se da formação Barreiras devido às características observadas em campo.

A Figura 4.10 de (a) até (m) mostra uma visão geral de cada ponto de coleta no campo, incluindo a descrição da profundidade de coleta e algumas características observadas. Inicialmente, estabeleceu-se como critério a profundidade de pelo menos 1 (um) metro abaixo da cobertura vegetal, porém nem sempre foi possível obedecer a esta proposição visto que em alguns casos a altura do talude era muito elevada e havia dificuldade de acesso para abertura de trincheira. Assim, apesar da variação na profundidade de coleta, sempre foi observada a homogeneidade do perfil. No Apêndice I apresentam-se os relatórios de coleta, onde são

mostradas, além das imagens a seguir, outras mais aproximadas e a descrição das características do perfil.

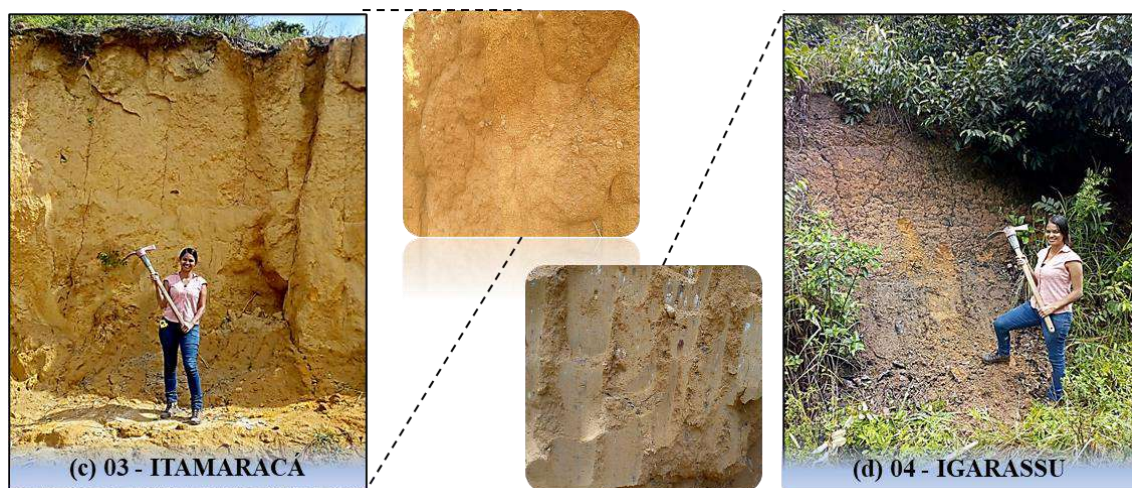
É importante notar que em algumas jazidas foi observado o trincamento do solo, como pode ser claramente evidenciado na amostra 09-MGU, comportamento típico de solos lateríticos conforme apresentado na revisão de literatura.

(a) 01 – GOI - Prof. Coleta – 1,10m e (b) 02 – ARA - Prof. Coleta 1,80m



Obs.: Amostra 02-ARA - Presença de concreções ferruginosas.

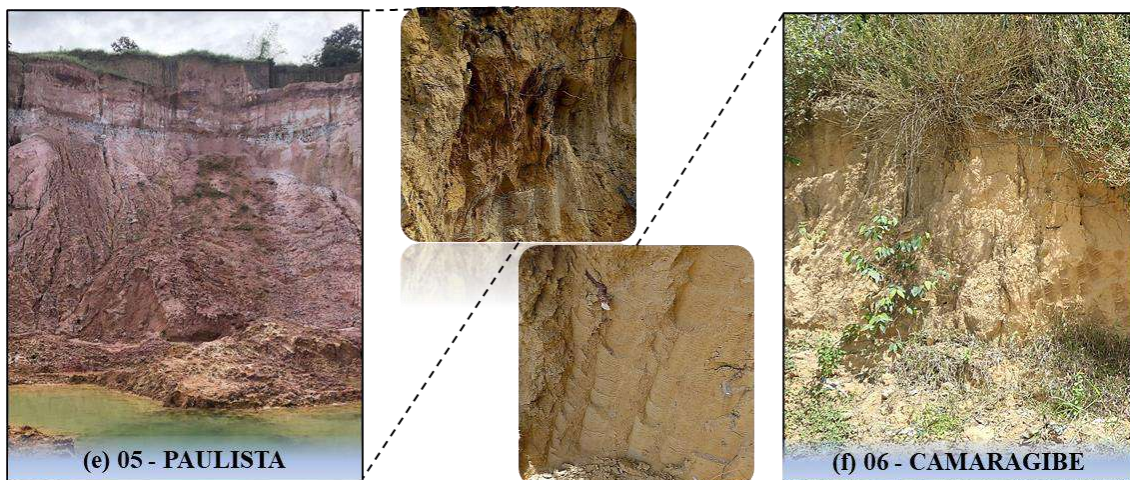
(c) 03-ITA - Prof. Coleta 2,90m e (d) 04-IGA - Prof. Coleta – 2,10m



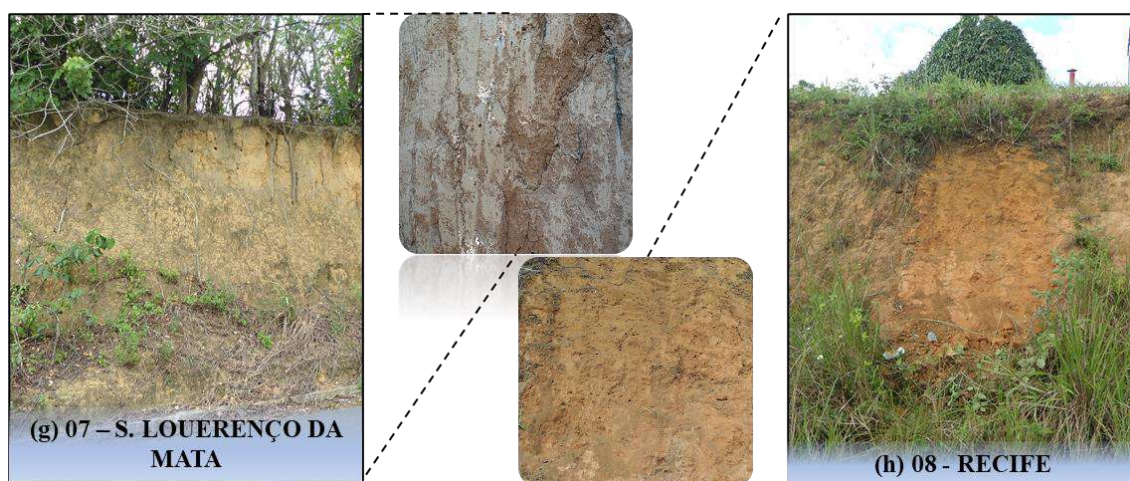
Obs.: 1. Amostra 03-ITA - Linha de Seixos a 2,50 m de profundidade; Amostra 04-IGA - Presença de concreções ferruginosas.

Figura 4.10 – Aspectos das amostras nos pontos de coleta. (Continua)

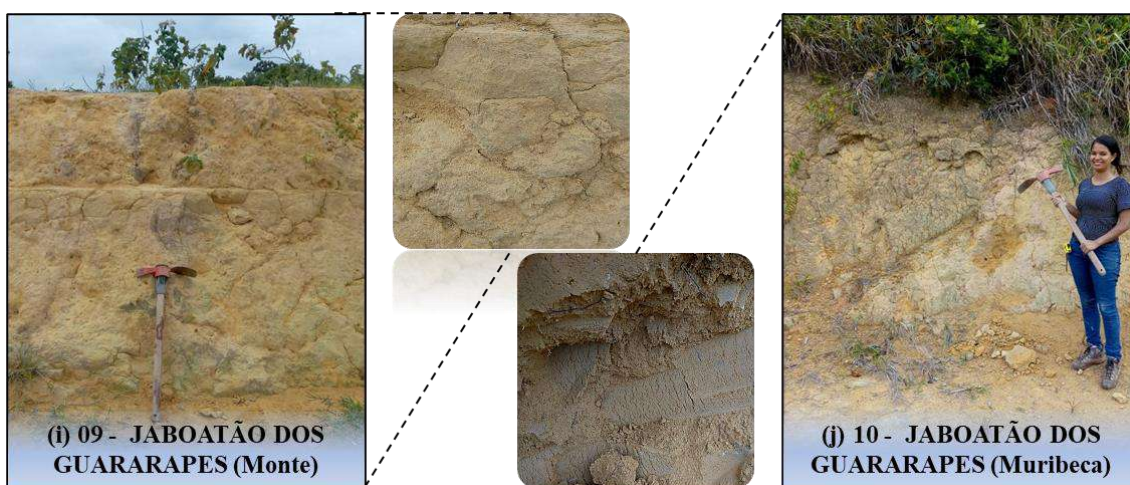
(e) 05-PAU - Prof. Coleta – 1,00m e (f) 06-CAM - Prof. Coleta – 1,50m



(g) 07-SLM - Prof. Coleta – 2,00m e (h) 08-REC - Prof. Coleta – 1,45m



(i) 09-MGU - Prof. Coleta – 0,5m e (j) 10-MUR - Prof. Coleta – 1,10m



Obs.: Presença de seixo rolado espalhados em pontos isolados no talude.

Figura 4.10 – Aspectos das amostras nos pontos de coleta. (Continua)

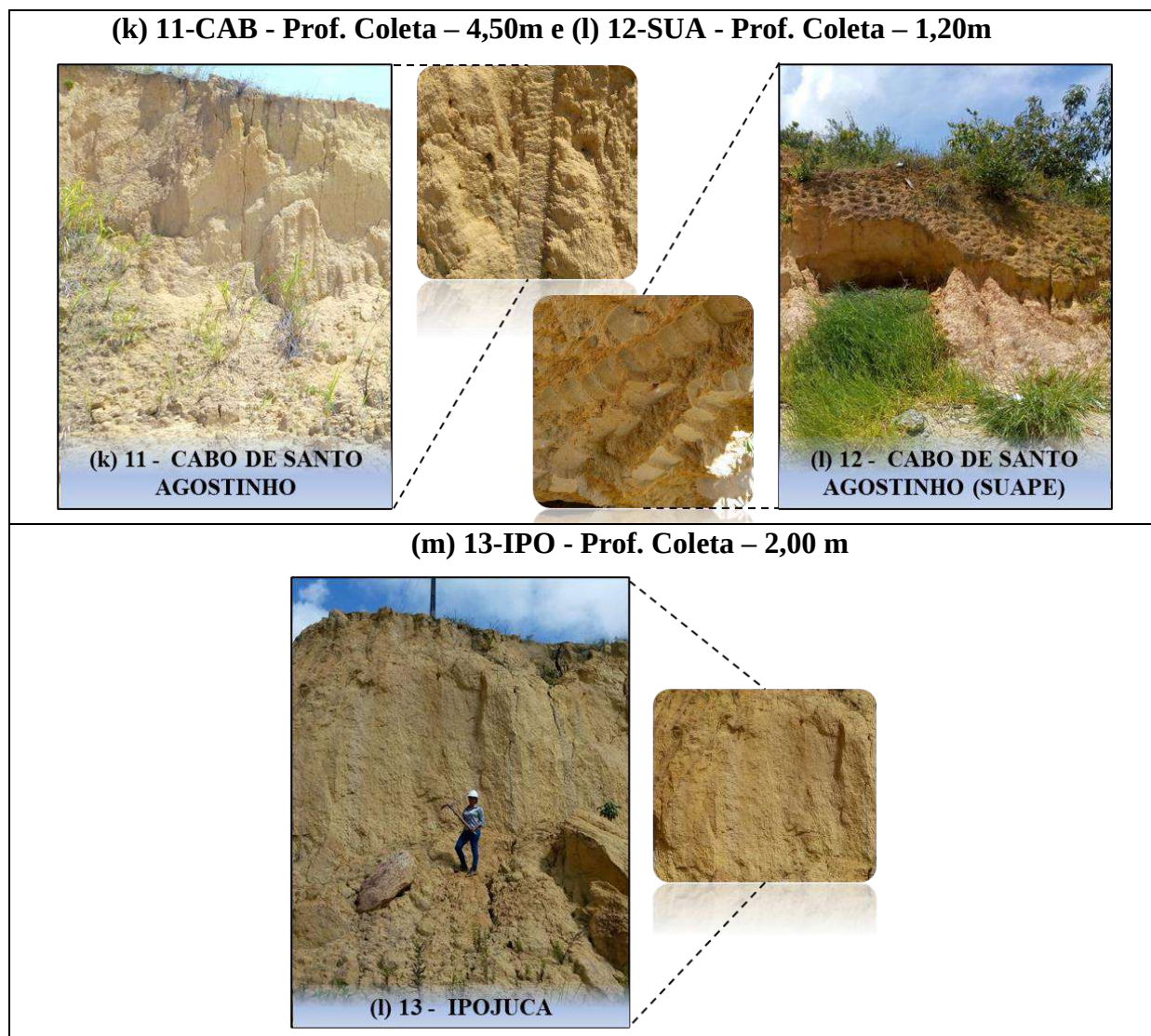


Figura 4.10 – Aspectos das amostras nos pontos de coleta. (Finaliza)

4.4 Descrição dos ensaios

Nos tópicos que se seguem apresenta-se a descrição dos ensaios realizados nesta pesquisa, visando destacar os critérios adotados, as normas que serviram como referência, os laboratórios utilizados e outros aspectos particulares.

É válido ressaltar que serão citadas as normas que foram ou que podem ser utilizadas como referência para execução dos tipos de ensaios realizados aqui. Devido a gratuidade das normas do DNIT a maioria das normas indicadas são deste órgão, porém, frisa-se que, no laboratório, os ensaios nem sempre seguiram integralmente o disposto nas normas, mas uniu-se o exposto nas normas com a prática dos laboratórios em que foram realizados.

Preliminarmente, realizaram-se atividades de secagem das amostras ao ar, destorroamento com almofariz e mão de gral, homogeneização/quarteamento, peneiramento,

pesagem e separação em sacos plásticos, nas quantidades adequadas para realização de cada ensaio, seguindo como referência a norma DNER-ME 041/94. A Figura 4.11 (de (a) até (f)) ilustra algumas das atividades mencionadas. A Figura 4.11(f) apresenta as amostras 1 a 4 desta pesquisa (da direita para esquerda), quando da separação das porções necessárias para os ensaios de caracterização.



Figura 4.11 – (a)-(f) Atividades Preliminares aos ensaios.

Nesta fase (preliminar) muitos dos solos coletados apresentaram resistência à desagregação tornando difícil o processo de destorroamento. Isto ocorreu pelo fato de os solos apresentarem uma cimentação natural elevada, principalmente aqueles que se encontravam mais secos em campo (amostras 9 a 13, as demais (1 a 8) estavam tálil e visualmente úmidas, congruente com a fase de transição do período de déficit hídrico para o de reposição de água no solo.

A Figura 4.12(a)–(c) mostra torrões de algumas das amostras que apresentaram o comportamento supracitado, e também pode-se observar a alta porosidade, característica de solos pedologicamente classificados como Latossolos, trincamento típico de solos de comportamento laterítico.

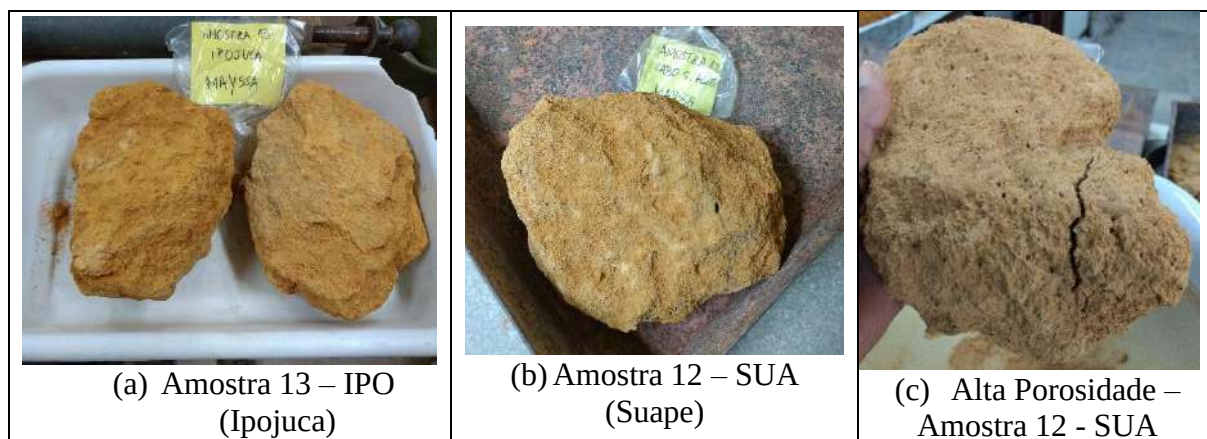


Figura 4.12 – (a)-(c) Alta cimentação natural e porosidade de alguns solos desta pesquisa.

4.4.1 Caracterização básica

4.4.1.1 *Crumb Test*

Para análise do grau de dispersibilidade do solo realizou-se o ensaio de *Crumb Test*. A norma de referência utilizada foi a Norma Brasileira (NBR) 13.601 da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT). Trata-se de um ensaio simples, em que se faz a imersão de um torrão do solo em um béquer de vidro com 150 ml de água destilada.

O ensaio é realizado com três torrões a fim de confirmar o comportamento do solo. A Figura 4.13 de (a) até (d) apresenta uma síntese do passo a passo do referido ensaio. Os ensaios de *Crumb Test* desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI/ UFPE).

Após a imersão do torrão, durante uma hora, observam-se as reações ocorridas e atribui-se um grau conforme Quadro 4.3. De acordo com a norma, o torrão de solo deve ser extraído de uma amostra indeformada, no entanto, como as amostras coletadas foram deformadas, lapidou-se os torrões (de aproximadamente 2 gramas, cada) a partir da amostra do solo seco ao ar antes do destorroamento (Figura 4.13 (a) e (b)).

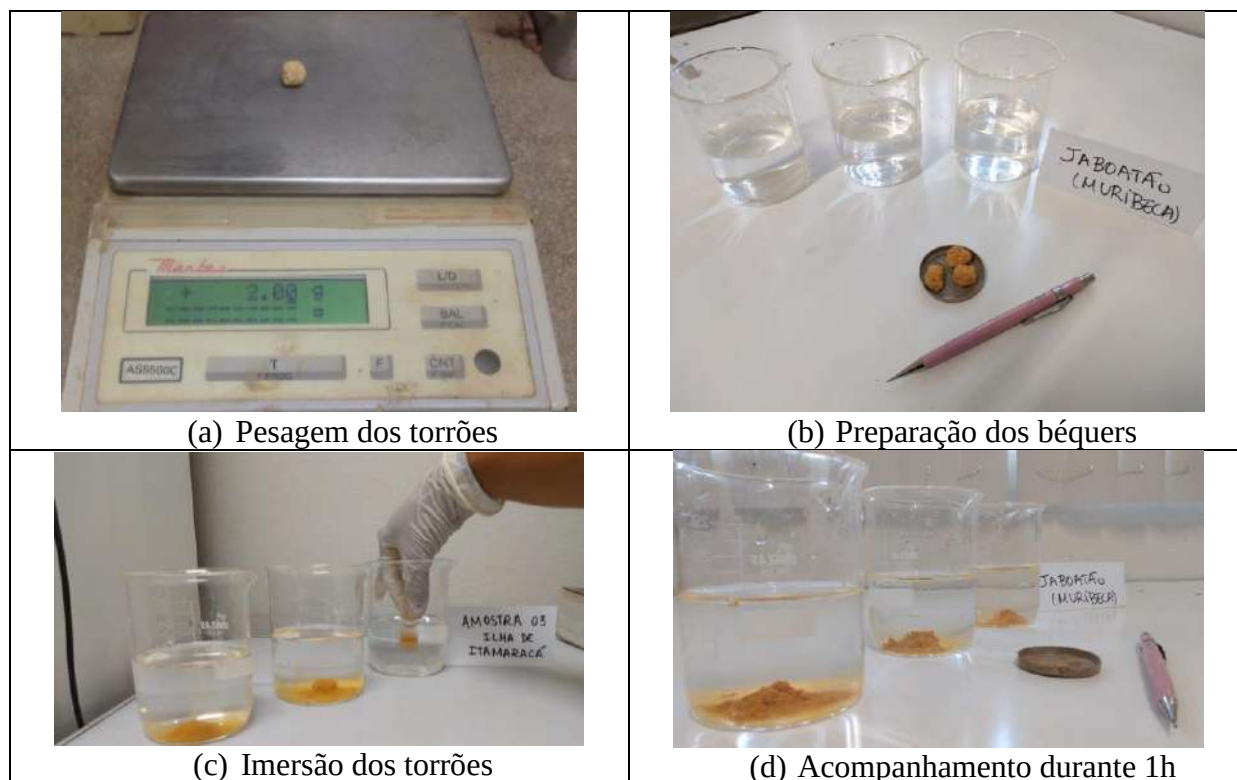


Figura 4.13 – (a)-(d) Passo a Passo do ensaio de *Crumb Test*.

Quadro 4.3 – Graus de dispersibilidade do solo com base na NBR 13.601.

Grau	Comportamento	Características
1	Não Dispersivo	O torrão de solo pode absorver água, sofrer esboroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido, provocado por colóides em suspensão.
2	Levemente Dispersivo	Há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão (se a turvação for facilmente visível, registra-se como grau 3).
3	Moderadamente Dispersivo	Observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer, facilmente reconhecível.
4	Fortemente Dispersivo	Observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água torna-se turva.
CONCLUSÃO: Classifica-se o solo como não-dispersivo, se o grau atribuído tiver sido 1 ou 2, ou dispersivo, se o grau tiver sido 3 ou 4, de acordo com o comportamento médio dos torrões.		

4.4.1.2 Umidades Natural e Higroscópica

Foram realizadas medidas de umidade em todas as amostras coletadas em duas situações: 1ª - Amostra úmida (recém chegada do campo) para obtenção da umidade “natural” (h_{nat}) e a 2ª – Amostra seca ao ar para obtenção da umidade higroscópica (h). O método utilizado foi o da Estufa, em que se pesam três pequenas porções do solo (para obtenção de um valor de

umidade médio), antes e após o processo de secagem via estufa (durante 24h a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). A norma utilizada como referência para execução destes ensaios foi a DNER-ME 213/94.

4.4.1.3 Densidade Real dos grãos (δ)

A densidade real dos grãos (δ) foi medida utilizando-se o método do picnômetro. Como referência adotou-se a norma DNER-ME 093/94. O ensaio consiste em uma série de pesagens na seguinte ordem: peso do picnômetro vazio (seco e limpo); peso do picnômetro mais amostra de solo (geralmente 10g); adiciona-se água destilada até cobrir com excesso a amostra; em seguida, para expulsar todo ar existente e por alguns minutos usa-se uma bomba a vácuo, agitando alternadamente; após, enche-se completamente o picnômetro com água destilada, coloca-se a tampa de modo que a água aflore à sua superfície superior, enxuga-se e pesa-se o conjunto.

A amostra de solo utilizada deve ser passante na peneira de nº 10 (2 mm) e previamente seca em estufa à $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. A Figura 4.14 de (a) até (c) ilustra algumas das etapas deste ensaio executadas no LSI/UFPE.

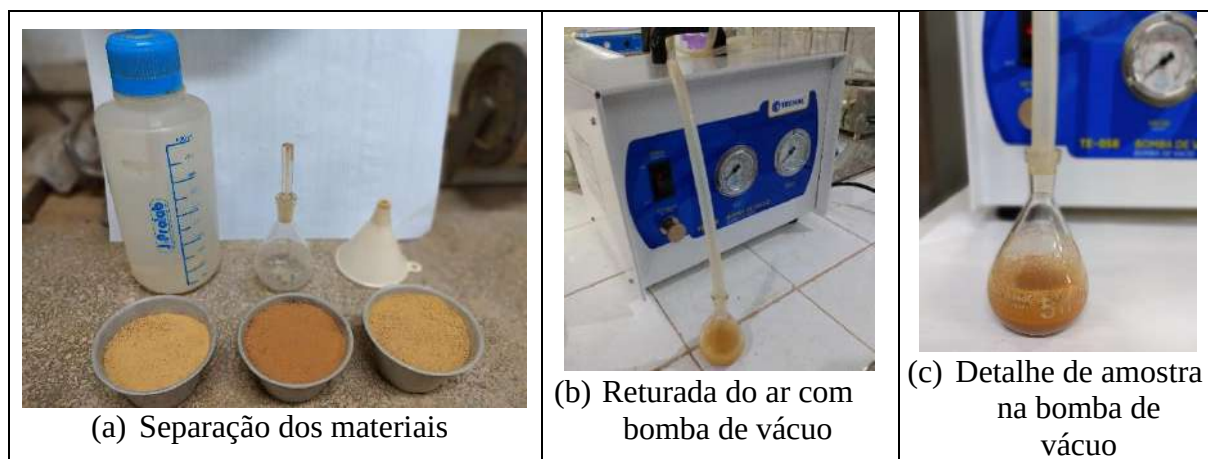


Figura 4.14 – (a)-(c) Ilustração de algumas etapas do ensaio de densidade real dos grãos.

4.4.1.4 Limite de liquidez e de Plasticidade

Os ensaios de limite de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram realizados tanto nas amostras secas ao ar quanto sem prévia secagem. Para estes ensaios, utiliza-se somente o material passante na peneira de nº 40 (0,42 mm), porém para o caso de amostras naturais (sem prévia secagem), devido algumas delas estarem com determinada umidade, não foi possível a

passagem do solo por esta peneira, assim optou-se por utilizar a peneira de nº 10 (2 mm) a fim de obter um padrão com amostras sem a fração mais grosseira.

O ensaio de LL foi executado utilizando-se o aparelho de Casagrande, variando-se a umidade do solo para obtenção de diferentes números de golpes necessários para o fechamento (em 1 cm) do talude de abertura feito com o cinzel. O LL marca a transição do estado plástico para o líquido, sendo indicado numericamente pelo valor de umidade corresponde a 25 golpes para fechamento da abertura. A norma utilizada como referência foi a DNER-ME 122/94.

Já o ensaio de LP foi executado moldando-se cilindros do solo em uma placa de vidro até se obter cilindros homogêneos e com espessuras semelhantes à do cilindro padrão. O ensaio é finalizado ao atingir-se a umidade capaz de fragmentar o cilindro. A norma utilizada como referência é a DNER-ME 082/94. A Figura 4.15 apresenta imagens relacionadas aos referidos ensaios (LL e LP) registradas no LSI/UFPE.

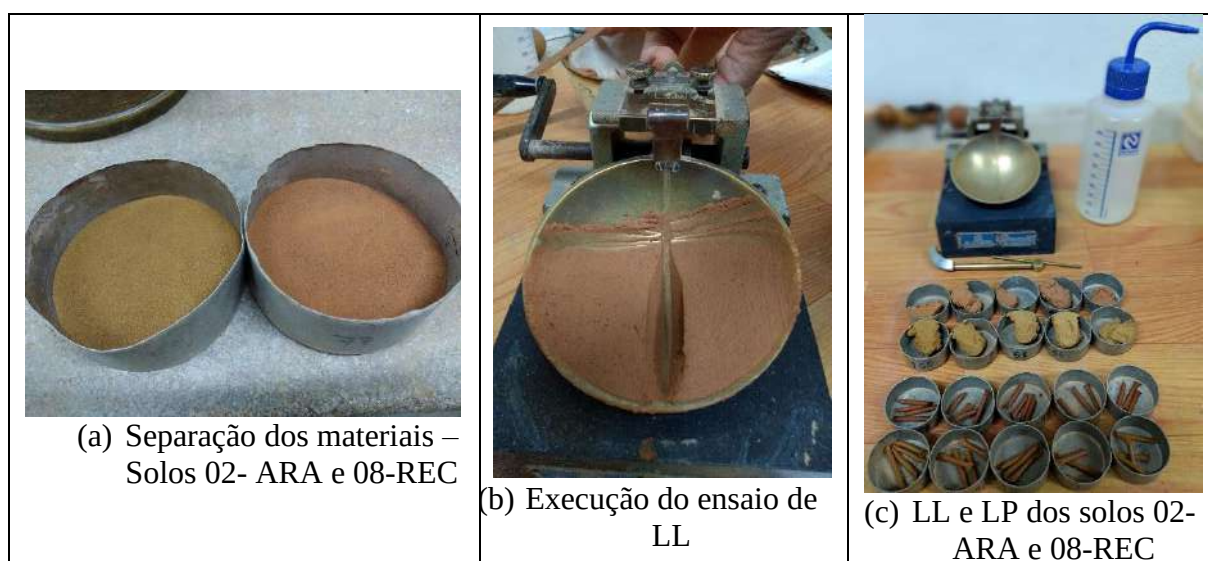


Figura 4.15 – (a)-(c) Imagens relacionadas aos ensaios de LL e LP executados em Laboratório.

4.4.1.5 Granulometria por peneiramento e sedimentação

Para analisar a composição granulométrica dos solos foram realizados, no LSI/UFPE, o peneiramento e a sedimentação com e sem uso de defloculante (Hexametáfosfato de Sódio) de cada amostra. A norma utilizada como referência foi a DNER 051/94. Em linhas gerais, o procedimento do ensaio visa obter uma distribuição representativa dos tamanhos dos grãos que compõem o solo, assim pode-se dividir os passos do ensaio em três partes, obtenção da granulometria das partes: (1) grossa – material maior que 2 mm; (2) fina – menor que 2 mm

e maior que 0,075 mm e, (3) dos sedimentos mais finos – menores que 0,075, conforme descritos a seguir:

- **Peneiramento material grosso (1):** com o material retido na peneira de nº 10 (2 mm), lava-se o material para que todos os grumos de material fino sejam descartados, portanto, a lavagem na peneira segue até que a água proveniente desta lavagem esteja límpida. Em seguida, transfere-se esse material para um recipiente e leva-se à estufa ($100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) por 24 horas. Após a secagem, procede-se o peneiramento nas peneiras com aberturas superiores, conforme lista indicada em norma ou conforme a prática do laboratório (Quadro 4.4).
- **Sedimentação (3):** com o material passante na peneira nº 10, recolhe-se duas porções de 70 g de solo (em uma delas adiciona-se 5,71 g do hexametáfosfato) e adiciona-se 125 ml de água destilada em ambas. Mistura-se bem e deixa-se em repouso por no mínimo 12 horas. Com cada porção preparada realiza-se a fase de dispersão, com auxílio de um copo dispersor elétrico. Devido a plasticidade dos solos estudados, esse processo de dispersão durou 10 minutos. Em seguida, transfere-se o conteúdo para as provetas e completa-se até 1000 mL com água, agita-se durante um minuto e inicia-se a fase de sedimentação propriamente dita onde realizam-se leituras periódicas com o densímetro (Quadro 4.4).
- **Peneiramento fino (2):** com o material proveniente do processo de sedimentação, lava-se na peneira de nº 200 (0,075 mm). O material retido deve ser levado para secagem em estufa ($100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) por 24 horas, após isto procede-se o peneiramento nas peneiras com aberturas superiores, conforme lista indicada em norma ou conforme a prática do laboratório (Quadro 4.4).

O Quadro 4.4 apresenta uma lista com indicação das peneiras e suas respectivas aberturas as quais foram utilizadas nesta pesquisa, tanto para peneiramento grosso quanto fino, bem como os tempos em que foram feitas as leituras no densímetro, durante a sedimentação. A Figura 4.16 (a)-(f) apresenta algumas imagens registradas em laboratório, durante a execução deste ensaio.

As Figuras 4.17 e 4.18 de (a) até (m) mostram imagens do material retido em cada peneira de todas amostras desta pesquisa, sendo o primeiro conjunto referente ao material fino (menor que 2mm) e o segundo ao material grosso (maior que 2mm). Através das imagens pode-se visualizar as características e a proporção da fração mais grossa, considerando que a quantidade de material total utilizada para o ensaio foi de 1,5 kg.

Quadro 4.4 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria e tempos de leitura durante o ensaio de sedimentação.

PENEIRAMENTO GROSSO		PENEIRAMENTO FINO		SEDIMENTAÇÃO	
Peneira		Peneira		Tempos de leitura	
Identificação/Polegada	Abertura (mm)	Identificação/Polegada	Abertura (mm)	30s	1 h
2"	50,8	No. 16	1,19	1 min.	2 h
1 1/2"	38,1	No. 30	0,59	2 min.	4 h
1"	25,4	No. 40	0,42	4 min.	8 h
3/4"	19,1	No. 50	0,297	8 min.	25 h
3/8"	9,52	No. 100	0,149	15 min.	
No. 4	4,76	No. 200	0,075	30 min.	
No. 10	2			30s	



(a) Materiais para peneiramento grosso das amostras 1 a 4.



(b) Lavagem do material na peneira.



(c) Conjuntos de Peneiras



(d) Pesagem e Mistura do defloculante



(e) Sedimentação



(f) Materiais para peneiramento fino das amostras 1 a 4.

Figura 4.16 – (a)-(c) Imagens relacionadas ao ensaio de granulometria executados em Laboratório.

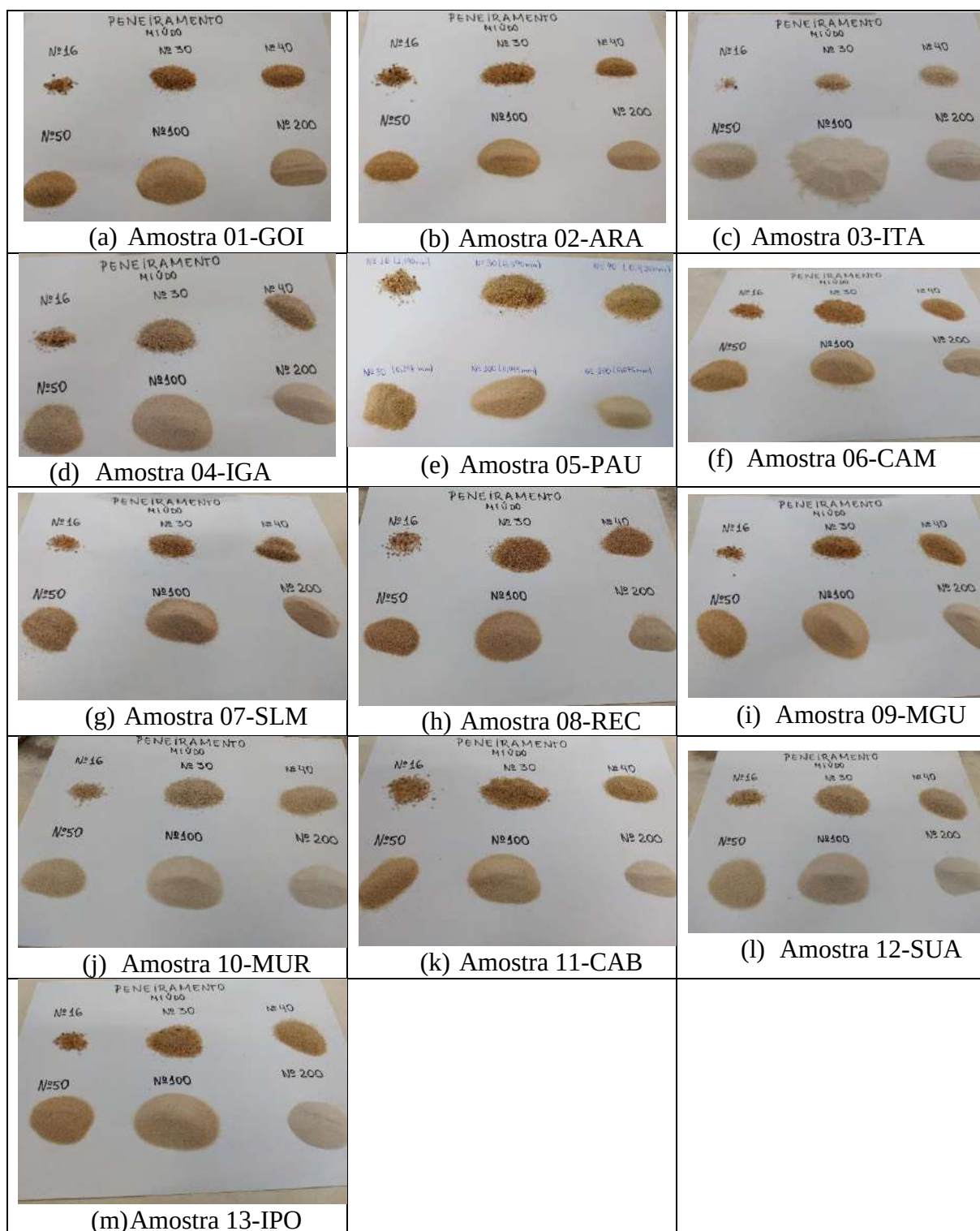


Figura 4.17 – (a)-(m) Material fino (menor que 2mm) retido em cada peneira.

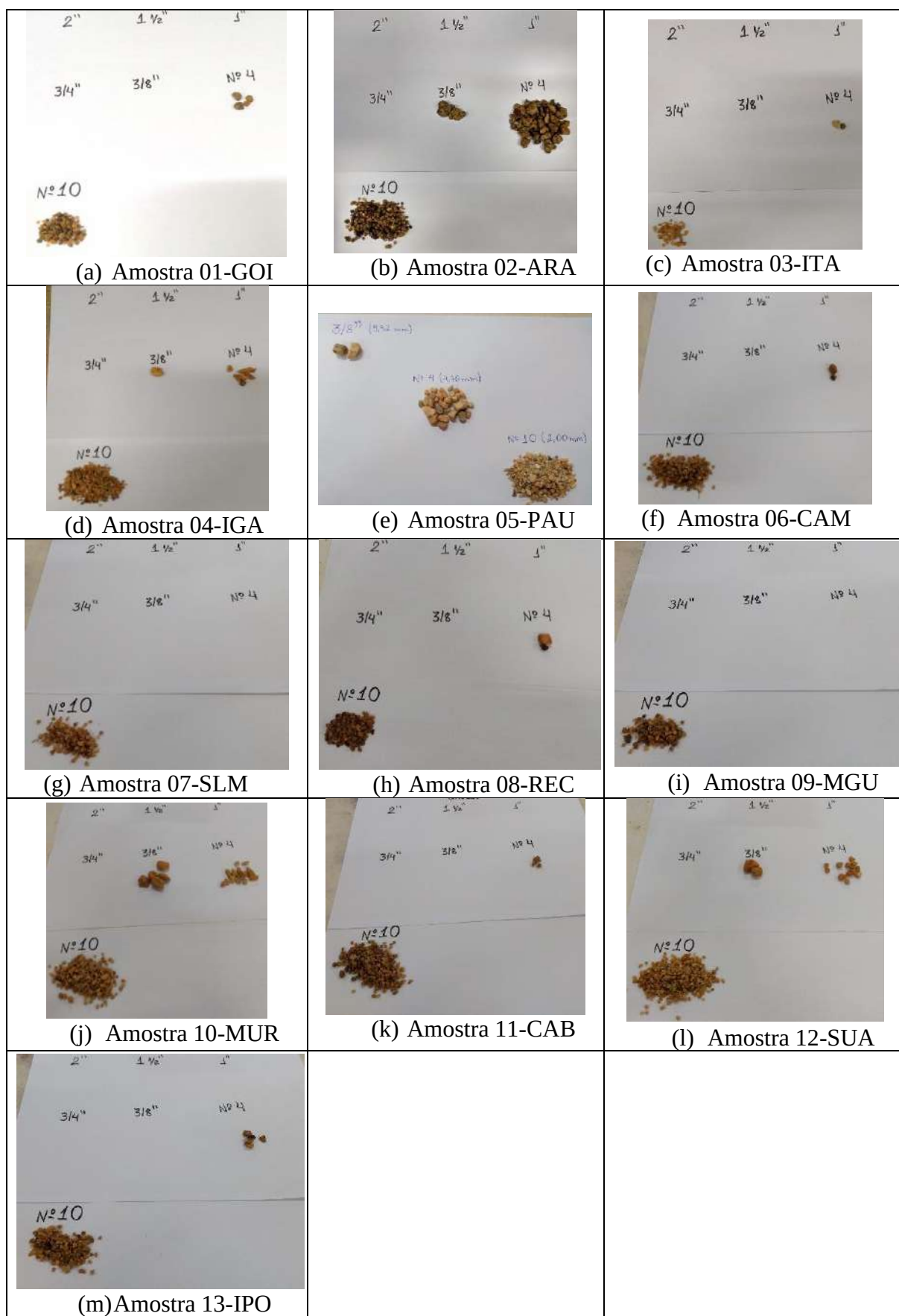


Figura 4.18 – (a)-(m) Material grosso (maior que 2mm) retido em cada peneira.

4.4.1.6 Soil–Water Characteristic Curve (SWCC) – Método do Papel Filtro

O ensaio de curva característica (*Soil–Water Characteristic Curve* - SWCC) visa analisar a variação da sucção com a umidade e foi realizado utilizando o Método do Papel Filtro. A norma utilizada como referência foi a da ASTM D5298 – 16, no entanto, adotaram-se alguns procedimentos específicos conforme será explanado adiante.

O papel filtro utilizado foi o Whatman n° 42 que é um dos papéis calibrados sugeridos pela norma. Para o ensaio, foram moldados corpos de prova miniatura (anéis de aço de ~60,25 mm de diâmetro e ~20,6 mm de altura) a partir de CPs maiores, compactados próximos à umidade ótima e energia intermediária (cilindro de CBR – 5 camadas, 26 golpes por camada).

Um dos anéis moldados foi imediatamente pesado e colocado em contato com o papel para medida da sucção matricial na umidade ótima. Sete CPs foram umedecidos (por pulverização ou saturação por capilaridade) e outros sete passaram pelo processo de secagem (ao ar e com auxílio de secador e de estufa), considerando obter uma variação de 2% de umidade de um CP para outro. Na saturação por capilaridade, alguns CPs foram colocados em bandejas, sobre pedras porosas cobertas com papéis filtros comuns e água, a fim de atingir a máxima saturação possível.

É válido ressaltar que devido tratar-se de CPs compactados dificilmente se alcançaria a saturação (S) máxima, inclusive alguns corpos de prova ficaram no processo de saturação até 15 dias e mesmo assim não alcançaram $S=100\%$.

Quando os CPs alcançavam o peso corresponde à umidade previamente calculada, realizava-se a colocação do papel filtro (também previamente pesado) em contato com o solo, sendo procedida a embalagem deste conjunto com papel filme seguido de papel alumínio e armazenamento em caixa de isopor.

O tempo de contato adotado foi de 7 dias, após isto, pesava-se novamente o papel (agora úmido), tomando-se o cuidado de realizar esta etapa muito rapidamente (máximo 3 segundos) a fim de não perder umidade no processo, e então levava-se o papel à estufa para secagem e posterior pesagem da sua condição “seca após estufa”. Para pesagem dos papéis utilizou-se balança eletrônica com precisão de quatro casas decimais (0,0001).

Considerando os procedimentos adotados, obteve-se curvas características com uma trajetória mista. A medida de sucção também foi feita com os solos que saíram do ensaio de MR, sendo três corpos de prova (de cada amostra) moldados próximos da umidade ótima.

Antes da colocação do papel, efetuou-se raspagens nas laterais para retirada dos resquícios da vaselina utilizada como desmoldante.

A Figura 4.19 (a)-(i) ilustra algumas das atividades supramencionadas, realizadas no LSI/UFPE e no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ (CPs do ensaio de MR), nas amostras de solo desta pesquisa.



Figura 4.19 – (a)-(i) Ensaio da Curva Característica - Método do Papel Filtro, procedimentos adotados no LSI/UFPE, durante a realização dos ensaios desta pesquisa e na COPPE.

Atualmente existem diversas propostas para modelagem do comportamento de curvas características. Para todos os solos desta pesquisa foram testados ajustes considerando os modelos propostos por Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980), Kogusi (1996), Fredlund e Xing (1994), Durner (1994) e Seki (2007), cujas equações estão indicadas no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Modelos de ajuste de SWCC.

Modelo	Equação	Parâmetros
Brooks e Corey (1964)	Para $\psi > \psi_b$: $S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda$; para $\psi \leq \psi_b$: $S_e = 1$	λ
Van Genuchten (1980)	$S_e = \left[\frac{1}{1+(\alpha\psi)^n}\right]^m$, onde: $m = 1 - \frac{1}{n}$	α, n e m
Fredlund e Xing (1994)	$S_e = \left[\frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]}\right]^m$	a, m e n
Durner (1994)	$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1+(\alpha_1\psi)^{n_1}}\right]^{m_1} + (1-w_1) \left[\frac{1}{1+(\alpha_2\psi)^{n_2}}\right]^{m_2}$	$w_1, \alpha_1, n_1, m_1, \alpha_2, n_2$ e m_2
Kogusi (1996)	$S_e = Q \left[\frac{\ln\left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)}{\sigma}\right]$	σ
Gitirana Jr. and Fredlund (2004)	$S_e = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b1}\psi_{res1}}}\right)^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{res1}\psi_{b2}}}\right)^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b2}\psi_{res2}}}\right)^{d_3}} + S_4$	d_1, d_2, d_3
Seki (2007)	$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln\left(\frac{\psi}{\psi_{b1}}\right)}{\sigma_1}\right] + (1-w_1) Q \left[\frac{\ln\left(\frac{\psi}{\psi_{b2}}\right)}{\sigma_2}\right]$	σ_1 e σ_2

Notations: S_e = Saturação Efetiva ($S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$, onde θ = teor de umidade a ser calculado nos modelos para obtenção da curva característica de sucção e umidade; θ_s = umidade de saturação e, θ_r = umidade residual); ψ = sucção (kPa); ψ_b = sucção no ponto de entrada de ar; α = inverso da pressão de entrada de ar (kPa⁻¹); S = grau de saturação; ψ_{res} = sucção residual; Q = função de distribuição normal cumulativa complementar; Os índices 1 e 2 de ψ_{b1} , ψ_{b2} , w_1 , α_1 , n_1 , m_1 , α_2 , n_2 , m_2 , σ_1 e σ_2 referem-se aos modelos bimodais, onde há dois valores distintos de entrada de ar e dois pontos residuais distintos, dando um total de quatro pontos de flexão.

O modelo de Brooks e Corey (1964) foi um dos primeiros usados para modelar a SWCC e ainda hoje é largamente utilizado. No trecho inicial da curva até o ponto de entrada de ar a equação é constante, após este ponto torna-se uma exponencial em função de ψ_b e de λ (índice associado ao tamanho dos poros).

Nas décadas de 1980 e 1990, Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) propuseram modelos considerando três parâmetros de ajuste, e assim como o modelo de Brooks

e Corey (1964) são unimodais e estão limitados ao intervalo de ψ_b e a sucção residual, por serem equações assintóticas.

Durner (1994) propôs um modelo bimodal tomando como referência a equação de Van Genuchten (1980) e incorporando parâmetros duplos. Kogusi (1996) propôs um modelo unimodal porém adicionando uma função de distribuição normal cumulativa complementar e o seu modelo juntamente com o modelo de Durner (1994) foram usados como referência na elaboração do Modelo de Seki (2007), dando origem a um modelo bimodal.

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) também propuseram um modelo bimodal, mas diferente de Durner (1994) e Seki (2007) que usaram como referência o teor de umidade do solo, os autores adotaram o grau de saturação (S). Um parâmetro adicional, a , é usado para definir a nitidez das transições nos pontos de flexão, mais detalhes podem ser obtidos na publicação referenciada.

4.4.2 Classificação MCT

Para realizar a classificação MCT dos solos tropicais finos deve-se realizar basicamente dois ensaios: o de compactação em cilindro miniatura (cilindros com 50 mm de diâmetro), denominado Mini-MCV e, a Perda de Massa Por Imersão (PMI).

A metodologia foi criada especificamente para solos tropicais finos, considerados como aqueles solos que possuem 100% de material passante na peneira de nº 10 (2mm), porém, como exceção, considera-se também os solos com no máximo 10% retidos nesta peneira. Por isso, para a realização dos ensaios procede-se o peneiramento prévio do solo na referida peneira para verificar se atende a esta condição.

4.4.2.1 Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por imersão

Para realização do ensaio de compactação Mini-MCV, separam-se cinco porções de 250 g do solo passante na peneira nº 10. Assim, como num ensaio de compactação tradicional, é procedida a homogeneização de cada porção do solo para obtenção de uma umidade próxima a ótima e outras 2% e 4% abaixo e acima desta. É válido ressaltar que, para este ensaio a prioridade é a caracterização do ramo seco da curva, pois é desta que se extrai o parâmetro d' da classificação.

As porções de solos homogeneizadas são levadas a câmara úmida por 24h. Após isto, procede-se a pesagem de duas cápsulas para aferição da umidade e 200 g da porção é pesada para então realizar a compactação dos CPs propriamente dita, adotando-se a série de golpes prevista na norma DNER-ME 258/94.

Trata-se de uma série de golpes sucessiva (1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256) seguida de leituras no extensômetro. Os critérios de paralização do ensaio são: quando a diferença entre a leitura do golpe $4n$ e a leitura do golpe n seja menor que 2 mm (n é o número de golpes); quando houver intensa exsudação de água no topo e na base do CP; quando atingir 256 golpes, finalizando o ensaio quando o primeiro deles ocorrer.

Deste ensaio, obtém-se além do parâmetro d' , o c' que se refere à inclinação da curva de deformabilidade mais próxima do valor de Mini-MCV igual a 10. O valor de Mini-MCV por sua vez é calculado, para cada CP, através da seguinte equação matemática: $\text{Mini-MCV} = 10 \log B$, onde B é o número de golpes correspondente a $4n - n = 2\text{mm}$.

Já o ensaio de PMI, normatizado pela DNER-ME 256/94 consiste na imersão dos CPs advindos do ensaio de compactação Mini-MCV em água, durante 24h. Antes da imersão faz-se o deslocamento do CP de dentro do molde, em 10 mm, de forma suave e continua. O material desprendido durante a imersão é levado à estufa para secagem e pesagem. O aspecto do material é anotado e influi no cálculo da PMI (%): quando o material cai no formato de “bolacha” considera-se um fator de redução de 0,5. A Figura 4.20 (a)-(d) ilustra alguns dos procedimentos mencionados realizados no LSI/UFPE.

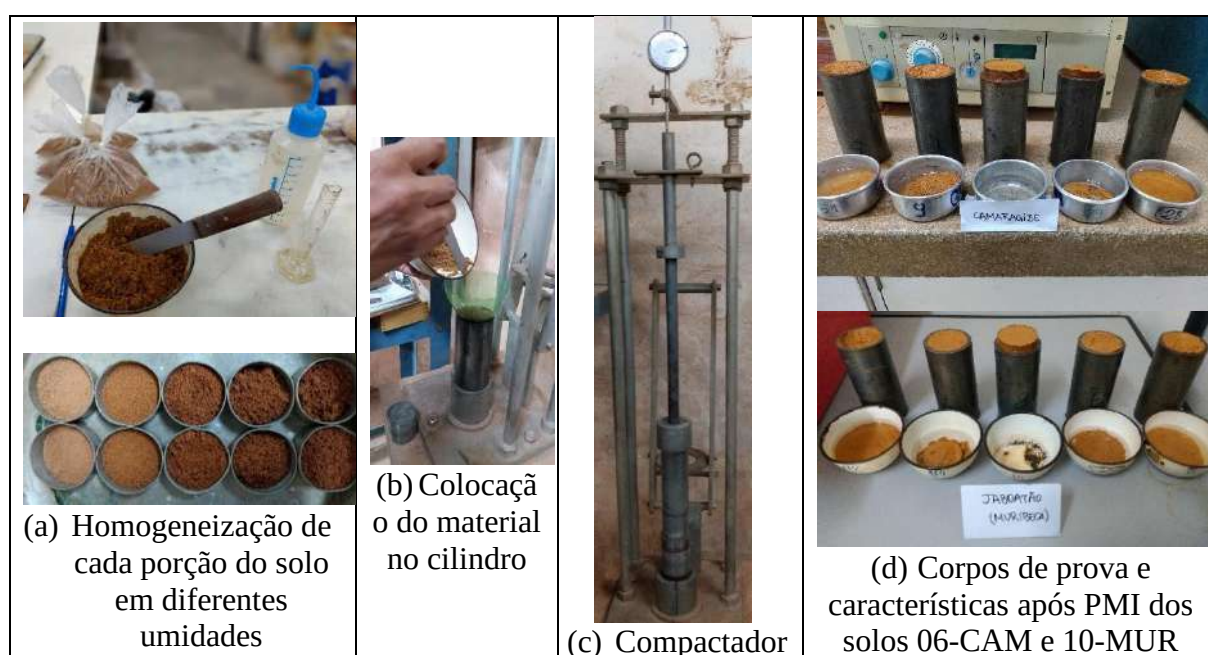


Figura 4.20 – (a)-(d) Ensaio de compactação Mini-MCV e PMI.

4.4.3 Ensaios químicos, mineralógicos e microscopia

4.4.3.1 Químico

A campanha de ensaios químicos foi realizada no Laboratório de Química Ambiental dos Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) onde contratou-se as seguintes análises: Potencial Hidrogeniônico (pH) em Água (pH_{H2O}) e em Cloreto de Potássio (pH_{KCl}), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Sódio (Na), Potássio (K), Fósforo (P), Carbono Orgânico (C.O.), M.O. (Matéria Orgânica), Acidez Potencial (H+Al) e Nitrogênio (N).

Todos os ensaios foram realizados seguindo o procedimento descrito no Manual de Métodos de Análises de Solo da Embrapa (2017). Para realização dos ensaios químicos, as amostras dos solos foram previamente secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira de nº 10 e separadas em sacos plásticos devidamente identificados.

4.4.3.2 Difração de Raios-X

Os ensaios de Difração de Raios-X (DRX) foram realizados no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE, utilizando-se o difratômetro D2 PHASER da Bruker. A escolha da configuração adotada no equipamento para realização dos ensaios nos solos desta pesquisa foi feita com base na orientação constante no Manual de Métodos de Análises de Solo da Embrapa (2017), assim adotou-se: Faixa de varredura (2 θ): 2° a 45°; Passo angular: 0,05° e Velocidade de varredura: 2°/min.

Para as análises foram utilizadas frações do solo passantes na peneira de nº 200, seguida da secagem em estufa (100 °C $\pm$ 5°C) por 24 horas. As amostras foram compactadas no porta amostras por meio de prensagem manual com auxílio de placa de vidro. Todas as etapas foram realizadas utilizando cuidados como o uso de luvas, limpeza dos porta-amostras com álcool, e uso de cotonetes para limpeza das bordas internas após o processo de compactação das amostras.

A Figura 4.21 (a)-(g) mostra os registros fotográficos realizados no laboratório em que se pode visualizar o difratômetro e os aspectos de armazenamento e preparação das

amostras. Na Figura 4.21(a) é possível observar as diferenças em termos de cores das amostras de solo desta pesquisa.

Para identificação dos minerais nos difratogramas foram utilizados o software X'Pert HighScore Plus versão 2.0.1 que contém atualmente um dos melhores bancos de dados, e o site Mineralogy Database (disponível em <http://webmineral.com/>).

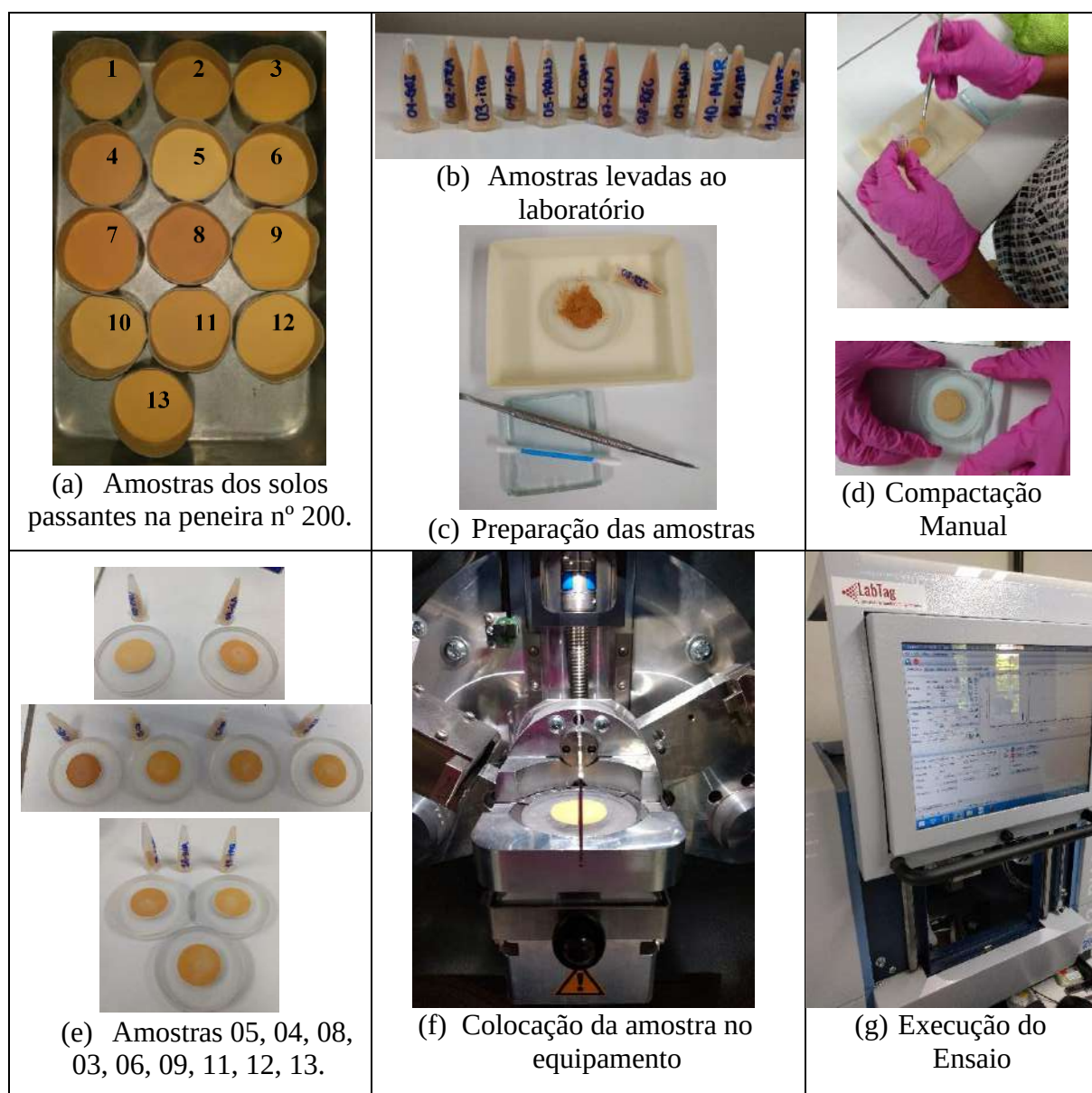


Figura 4.21 – (a)-(g) Alguns registros do ensaio de Difração de Raios-X.

4.4.3.3 Microscopia – Imagens com Stereo Microscópio

Como foram realizados ensaios de DRX na fração fina do solo, passante na peneira de nº 200, pensou-se em analisar também a parte mineralógica que fica retida nesta peneira.

Para isso foram feitas imagens microscópicas de duas frações dos solos: (a) passante na peneira nº 10 e retido na peneira de nº 200 e, (b) material retido na peneira de nº 10.

As imagens foram feitas no Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da UFPE, através de um Stereo Microscópio Zeiss Discovery V8. Na fração (a) foram feitas imagens com aproximações de 80x e 100x. Em algumas amostras, quando observada alguma peculiaridade efetuou-se imagens com aproximação maior (315x, 400x). Na fração (b) foram feitas aproximações de 50x, também fazendo-se uso de aproximações maiores quando pertinentes (80x, 125x, 160x). A Figura 4.22(a)-(c) apresenta o aspecto das amostras separadas de cada fração e o microscópio utilizado.

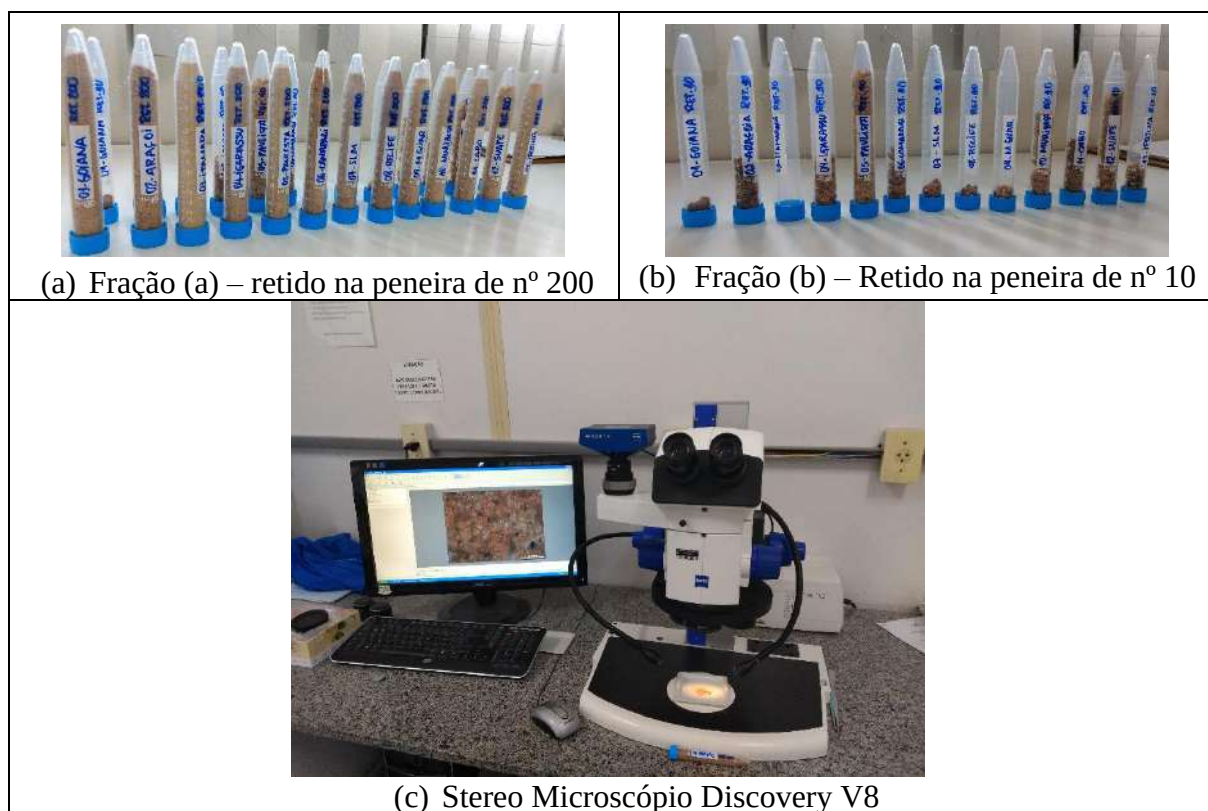


Figura 4.22 – (a)-(c) Alguns registros do ensaio de microscopia com Stereo Microscópio.

4.4.4 Ensaios mecânicos

4.4.4.1 Compactação, CBR e Expansão

Foram realizados ensaios de compactação em cilindros de dimensões de 11,4 cm de altura e 15 cm de diâmetro que também são próprios para a realização do ensaio de CBR. Para cada amostra foram compactados 5 (cinco) CPs com umidades crescentes sendo um

próximo da ótima e os outros $\pm 2\%$ e $\pm 4\%$. Utilizou-se a Energia Proctor Intermediária, que é obtida com 26 golpes por camada (5 camadas).

Através do ensaio de compactação se obtém as curvas de compactação de cada solo, mostrando a variação da sua densidade a partir de diferentes teores de umidade. Como principais parâmetros extraídos das curvas têm-se a o Teor de umidade ótimo (umidade ótima - $W_{ót}$ em %) e a Massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$, em g/cm^3).

Após a compactação (manual), realizou-se o ensaio de expansão, em que, a cada molde adicionam-se sobrecarga-padrão e faz-se a imersão dos solos compactados em um tanque com água, deixando-os imersos durante 96 horas. Através de extensômetros faz-se o acompanhamento da expansão, realizando-se leituras periódicas (inicial e diárias).

Após o término do ensaio de expansão, retira-se o molde do tanque de imersão e aguarda-se 15 minutos para então iniciar o ensaio de CBR utilizando-se uma prensa universal disponível no LSI/UFPE e extensômetros para a leitura da penetração e da pressão no pistão.

A justificativa para a realização do ensaio de CBR, mesmo considerando que não se aplica ao novo método de dimensionamento, e pode não ser adequado para os solos tropicais, se deve ao fato de se tratar de uma medida de resistência do solo à penetração de um pistão e pode ser utilizada para fins comparativos entre os solos. Também, localmente, ainda é considerado relevante para muitos profissionais, e julgou-se que, nesta fase de divulgação do novo método, seria importante contextualizar este parâmetro comum ao meio técnico. Não se pretende usar este parâmetro para fins de dimensionamento de pavimento nesta pesquisa.

As normas utilizadas como referência para execução dos ensaios de Compactação, CBR e Expansão foram: DNIT 164/2013-ME e DNIT 172/2016-ME. A Figura 4.23 (a)-(d) apresenta imagens ilustrativas do passo-a-passo realizado em laboratório no que concerne a realização dos três ensaios citados.



Figura 4.23 – (a)-(d) Passo-a-passo dos ensaios de Compactação, CBR e Expansão realizados no LSI/UFPE.

4.4.4.2 Módulo Resiliente - MR

Os ensaios de Módulo Resiliente (MR) foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Para cada amostra foram confeccionados 3 (três) CPs, compactados próximos à umidade ótima e na energia equivalente à intermediária. A norma utilizada como referência foi a DNIT 134/2018-ME.

A homogeneização dos solos foi realizada sempre 24h horas antes da realização dos ensaios, durante este período os mesmos foram armazenados em sacos fechados e levados a uma câmara úmida. Foram utilizados cilindros tripartidos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e para atingir a energia determinada foi utilizado um compactador automático e os CPs compactados em 10 camadas, sendo a primeira com 17 golpes e as demais com 18 golpes. Foi utilizado vaselina no molde para ajudar na desmoldagem.

Logo após a compactação, os CPs eram desmoldados e levados à máquina para realização do ensaio propriamente dito. Por se tratar de um ensaio triaxial de cargas repetidas,

envolve-se o CP com uma membrana vedada nas extremidades com auxílio de elásticos, encaixa-se no topo do CP o cabeçote (*top-cap*) onde, por sua vez, está acoplado um conjunto com os transdutores mecânicos – eletromagnéticos do tipo LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) utilizados para realizar as leituras dos deslocamentos, em seguida coloca-se na câmara triaxial, e fecha-se a câmara com a tampa onde está o pistão de aplicação da carga cíclica..

Ao final, checa-se o conjunto devidamente acoplado para então iniciar a fase de condicionamento (que visa reduzir com as deformações permanentes que podem ocorrer nas primeiras aplicações de tensão desvio) e depois o ensaio propriamente dito.

A frequência das cargas repetidas na tensão vertical (tensão desvio) é de 1 Hz, ou seja, 60 ciclos por minuto (correspondente a um pulso de carga de 0,10 segundo e 0,9 segundo de repouso). Durante todo o ensaio a tensão confinante é mantida constante, ou seja, não cíclica, mas varia com o nível da tensão desvio aplicada. Os pares de tensões são definidos na norma.

Na fase de condicionamento, aplicam-se 500 repetições de cada tensão desvio correspondente aos pares constantes e na fase do ensaio aplicam-se 18 pares de tensões, conforme indicados na Tabela 4.2. A Figura 4.24(a)-(e) apresenta imagens registradas no laboratório referente a execução deste ensaio, onde pode-se observar a fase de homogeneização, a câmara úmida, o equipamento triaxial, a montagem do CP no equipamento e a tela do ensaio.

Tabela 4.2 – Tensões aplicadas na fase de condicionamento e de ensaio de MR

Tensão Confinante - σ_3 (MPa)	Tensão Desvio - σ_d (MPa)	Tensão Confinante - σ_3 (MPa)	Tensão Desvio - σ_d (MPa)
Fase de condicionamento		Fase de ensaio	
0,070	0,070	0,020	0,020
0,070	0,210	0,020	0,039
0,105	0,315	0,020	0,059
		0,034	0,034
		0,034	0,069
		0,034	0,103
		0,049	0,049
		0,049	0,098
		0,049	0,147
		0,069	0,069
		0,069	0,137
		0,069	0,206
		0,103	0,103
		0,103	0,206
		0,103	0,309
		0,137	0,137
		0,137	0,275
		0,137	0,412

É válido ressaltar que tanto antes quanto após o ensaio são aferidas a umidade do material. Antes da compactação coletam-se três capsulas de umidade e após o término do ensaio de MR afere-se a umidade do CP. A Figura 4.25 (a)-(m) apresenta aspectos dos corpos de prova de cada amostra desta pesquisa.

O ensaio de MR foi executado nas treze amostras desta pesquisa, sendo válido ressaltar que o processo de desmoldagem das amostras 01-GOI e 02-ARA (principalmente) foram bastante trabalhosas, mesmo com colocação de vaselina nas paredes do molde, inclusive dois CPs da amostra 02-ARA foram descartados devido às trincas geradas pelo alto grau de impactos utilizados para desmoldar cada CP. Nestes dois solos observou-se também que, durante a compactação, muito do material agregava-se ao soquete, devido ao alto teor de finos (Silte+Argila) desses solos conforme está apresentado no capítulo de resultados.

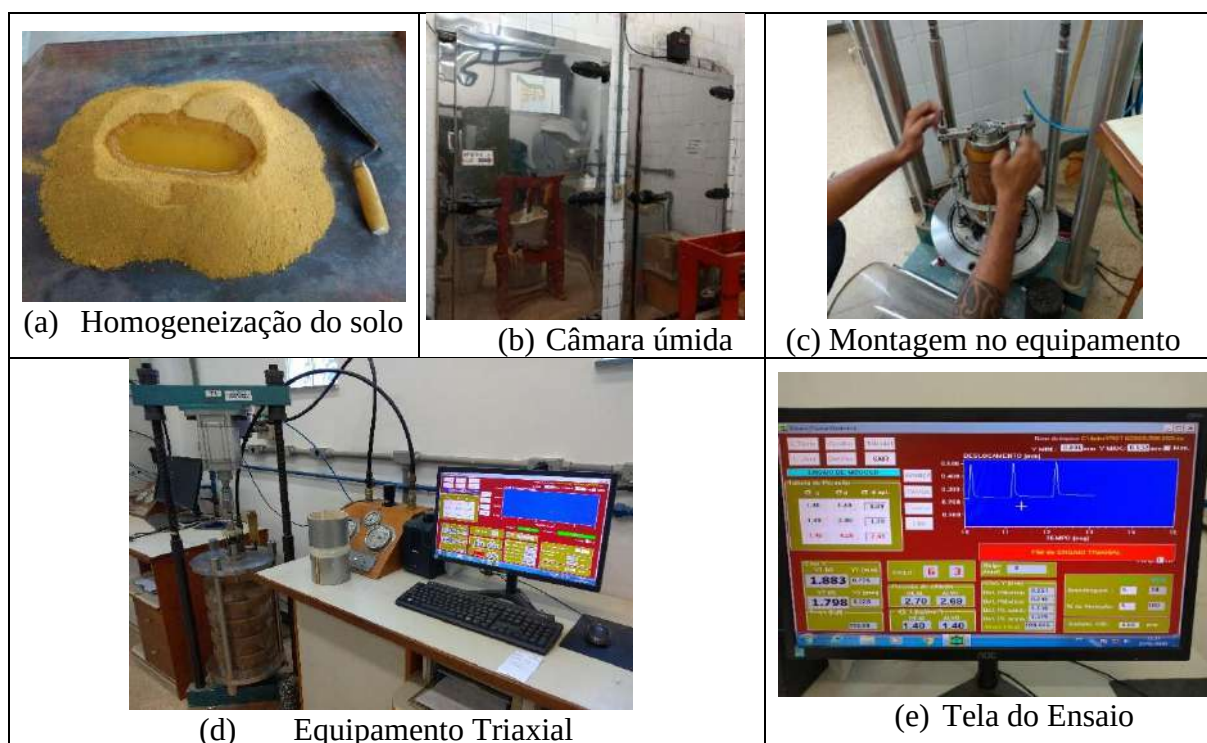


Figura 4.24 – (a)-(e) Imagens registradas durante execução do ensaio de MR.



Figura 4.25 – (a)-(m) Aspectos dos corpos de prova preparados para ensaios de MR dos solos desta pesquisa.

4.4.4.3 Deformação Permanente - DP

Os ensaios de Deformação Permanente (DP) também foram executados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e foram feitos utilizando-se o mesmo equipamento utilizado para MR, porém, a frequência de carregamento foi de 2 Hz.

O processo de preparação do CP, quanto a homogeneização e a compactação, segue os mesmos procedimentos utilizados para realização do ensaio de MR, porém, no ensaio de DP utiliza-se um CP para cada par de tensão da norma, totalizando nove corpos de prova para cada solo ensaiado. A norma utilizada como referência foi a DNIT 179/2018-IE, e a mesma orienta a execução do ensaio considerando os pares de tensões indicados na Tabela 4.3, cujos resultados são utilizados para determinação dos parâmetros do Modelo de Guimarães (2009).

Tabela 4.3 – Tensões aplicadas na fase de condicionamento e de ensaio de DP.

Tensão Confinante - σ_3 (kPa)	Tensão Desvio - σ_d (kPa)	Ensaio
Fase de condicionamento		
30	30	0
Fase de ensaio		
40	40	1
	80	2
	120	3
80	80	4
	160	5
	240	6
120	120	7
	240	8
	360	9

Os ensaios de cada CP foram encerrados, conforme orientação da norma, quando se atingia os 150.000 ciclos de aplicação de cargas. Após os ensaios de alguns CPs, foram realizados ensaios de MR afim de analisar o comportamento resiliente destes antes e após os ciclos de aplicação de cargas do ensaio de DP (para verificação do enrijecimento e outras peculiaridades de comportamento). No Quadro 4.6 indicam-se em quais corpos de prova foram realizados ensaio de MR após DP.

Durante a execução dos ensaios de DP, enfrentaram-se alguns problemas como queda de energia, queda na pressão do ar comprimido (defeito no compressor), ressecamento de CPs devido a uma folga na membrana e até falha na leitura de um dos LVDTs. Em todas as situações, buscou-se solução para que os ensaios não fossem descartados, no entanto, a fim de manter um histórico destes acontecimentos até para tentar justificar algum comportamento peculiar apresenta-se também no Quadro 4.6 em quais CPs esses problemas ocorreram.

Nos solos 01GO-LG', 03IT-NA' e 10MU-LA' foram realizados ensaios considerando os nove pares de tensões previsto em norma, porém nas demais amostras foram considerados apenas seis, para reduzir o tempo necessário para finalização dos ensaios frente à quantidade de amostras da pesquisa e à realidade em que o país se encontrava referente ao enfrentamento da pandemia de COVID-19. Os seis pares de tensões escolhidos seguiram a sugestão disponível na tese de LIMA (2020), que após testar várias combinações, identificou que a de melhor acurácia foi a que considera os seguintes pares de tensões confinante e desvio (σ_3/σ_d), respectivamente: 40/40, 40/120, 80/80, 80/240, 120/240 e 120/360.

Quadro 4.6 – Corpos de Prova em que foram executados ensaios de MR após DP e indicação de eventuais imprevistos enfrentados durante a execução do ensaio de DP.

Amostra	Nº do CP (Tensões σ_3, σ_d)	MR após DP?	Problemas
01-GOI	01 (40kPa, 40kPa)	Não	-
	02 (40kPa, 80kPa)	Não	-
	03 (40kPa, 120kPa)	Não	-
	04 (80kPa, 80kPa)	Não	-
	05 (80kPa, 160kPa)	Não	-
	06 (80kPa, 240kPa)	Não	-
	07 (120kPa, 120kPa)	Não	-
	08 (120kPa, 240kPa)	Não	-
	09 (120kPa, 360kPa)	Sim	Queda de energia em 44.000 ciclos.
03-ITA	01 (40kPa, 40kPa)	Sim	Queda brusca da deformação a partir do ciclo 95.000 – leitura do LVDT 2. Ressecamento – Folga na membrana.
	02 (40kPa, 80kPa)	Sim	-
	03 (40kPa, 120kPa)	Sim	Problema no compressor - queda do ar comprimido a partir do ciclo 65.000.
	04 (80kPa, 80kPa)	Sim	Problema no compressor - queda do ar comprimido a partir do ciclo 110.000.
	05 (80kPa, 160kPa)	Sim	-
	06 (80kPa, 240kPa)	Sim	-
	07 (120kPa, 120kPa)	Sim	Diminuição da deformação até o ciclo 900 – sem causa aparente.
	08 (120kPa, 240kPa)	Sim	-
	09 (120kPa, 360kPa)	Sim	-
10-MUR	01 (40kPa, 40kPa)	Sim	Queda de energia em 37.000 ciclos
	02 (40kPa, 80kPa)	Sim	-
	03 (40kPa, 120kPa)	Sim	-
	04 (80kPa, 80kPa)	Sim	-
	05 (80kPa, 160kPa)	Sim	-
	06 (80kPa, 240kPa)	Não	-
	07 (120kPa, 120kPa)	Não	-
	08 (120kPa, 240kPa)	Não	-
	09 (120kPa, 360kPa)	Sim	-

Os procedimentos adotados para mitigar os problemas que efetivamente apareceram nos gráficos de resultados dos ensaios foram: desconsiderar das análises os resultados a partir de onde se teve a queda “brusca” da deformação registradas devido a

problemas no compressor de ar comprimido; e recalculer a deformação manualmente considerando apenas um LVTD, no caso em que houve problema em apenas um dos LVDTs, haja vista que o ensaio padrão considera a média das leituras dos dois LVDTs.

4.5 Sobre o Banco de Dados de Solos Finos - BDSF

Para a construção do BDSF considerou-se como critério inicial, a escolha por trabalhos que tivessem realizado além dos ensaios de granulometria, a classificação MCT e os ensaios de MR e DP – aspectos que compõem a base da mecânica dos pavimentos, assim, restringiram-se bastante a quantidade de trabalhos disponíveis. Conforme mencionado anteriormente, foram considerados solos finos aqueles com no máximo 10% de material retido na peneira de nº 10 (2 mm), que é um dos critérios adotados pela Metodologia MCT.

Outro critério utilizado para refinar os dados do BDSF foi o de considerar somente os trabalhos que adotaram o modelo de Guimarães (2009) para previsão da deformação permanente, uma vez que pesquisas anteriores a este ano adotavam em geral pares de tensões distintos entre si e equações diferentes do modelo tradicional (Monismith) para cada par de tensão ensaiado, assim, sete referências levantadas na pesquisa inicial foram excluídas.

A pesquisa foi realizada na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), bem como no acervo de arquivos da autora e dos orientadores. A lista dos trabalhos inseridos no Banco de Dados é apresentada no Capítulo 7 (Quadro 7.1).

Para auxiliar a análise dos dados do BDSF utilizou-se técnicas de estatística descritiva, análise de correlação, análise multivariada por meio da Análise de *Clusters* e análise de regressão linear múltipla utilizando-se ferramentas da Ciência de Dados cuja metodologia é mais bem detalhada no tópico seguinte.

Para analisar a relação entre duas ou mais variáveis foi utilizada a técnica de correlação de Pearson, que já vem sendo utilizada, com sucesso, por diversos pesquisadores na análise do comportamento mecânico dos materiais (Dalla Roza, 2018; Norback, 2018; Lima, 2020; entre outros). Essa técnica também foi utilizada para a análise integrada dos solos desta tese. A técnica de correlação de Pearson, tem como resultado uma matriz contendo o parâmetro “*r*”, que representa a intensidade de relação entre as variáveis. Assim, quanto mais próximo de $|1|$ maior é a intensidade de correlação. O valor de “*r*” pode ser positivo ou negativo, o primeiro indica uma correlação positiva entre as variáveis, ou seja, o aumento de uma variável está relacionado ao aumento da outra e, o segundo indica uma correlação negativa, ou seja, contrária (enquanto uma variável aumenta, a outra diminui).

Para interpretação do nível de correlação entre as variáveis, será utilizada a seguinte regra (extraída do artigo de Mukaka, 2012):

- r entre 0,90 e 1,00 (positivo ou negativo) – correlação muito forte;
- r entre 0,70 e 0,90 (positivo ou negativo) – correlação forte;
- r entre 0,50 e 0,70 (positivo ou negativo) – correlação moderada;
- r entre 0,30 e 0,50 (positivo ou negativo) – correlação fraca;
- r entre 0,00 e 0,30 (positivo ou negativo) – correlação desprezível;

Para a Análise de Cluster foi adotado, como o algoritmo de criação do grupo, o agrupamento hierárquico que estabelece uma estrutura em forma de árvore, sendo o cálculo das distâncias realizado pelo método de Ward. Para medir a proximidade dos objetos foi utilizado como medida a distância Euclidiana que é na verdade uma medida de dissimilaridade (quanto maior o valor observado menos parecidos são os objetos).

4.6 Sobre a análise estatística usando a Ciência de Dados

Para realização da análise estatística dos dados desta tese e do banco de dados utilizando a Ciência de Dados montou-se *Notebooks* (documentos) no Jupiter Notebook do ambiente Anaconda e, visando melhorar o entendimento do uso destas ferramentas, dividiu-se o processo em 6 passos considerados essenciais:

- 1º Passo - Importar bibliotecas necessárias para as análises
- 2º Passo – Leitura e visualização da Base de Dados a ser analisada
- 3º Passo - Realizar o Tratamento dos dados
- 4º Passo - Análise Exploratória de Dados
- 5º Passo - Análise Exploratória de Dados AUTOMATIZADA
- 6º Passo - Análise de Agrupamentos de Dados - Método Hierárquico

O detalhamento do “passo-a-passo” supracitado é apresentado no capítulo de resultados para garantir um entendimento completo da aplicação. Ressalta-se ainda que este “passo-a-passo” não é uma regra, mas sim a melhor forma que a autora encontrou de transmitir o aprendizado que teve de adquirir, de maneira simples, objetiva e organizada, existindo muitas possibilidades de realização das análises bem como da escrita dos códigos. No Quadro 4.7 são

apresentadas as bibliotecas que foram efetivamente aplicadas neste trabalho cujos objetivos individuais estão especificados na coluna “Aplicação”.

Quadro 4.7 – Principais Bibliotecas utilizadas nas análises com Python.

Biblioteca	Aplicação
Numpy	Análise de dados - oferece funções matemáticas, geradores de números aleatórios, rotinas de álgebra linear, transformações de Fourier, etc.
Pandas	Manipulação e Análise de dados – oferece estruturas e operações para manipular tabelas numéricas e séries temporais.
Statistics	Exploração de dados - fornece funções para o cálculo de estatísticas matemáticas de dados numéricos, ao nível de calculadoras gráficas e científicas.
Scipy	Modelagem de dados - fornece algoritmos fundamentais para funções estatísticas (distribuições de probabilidades, testes de hipóteses, estatísticas de frequência, funções de correlação etc.).
Scikit-learn	Modelagem de dados - algoritmos de aprendizado de máquina, supervisionados e não supervisionados (Classificação, Regressão, Clustering, seleção de modelo, etc.)
Matplotlib	Apresentação e exploração de dados – aplicada para criação de gráficos e visualização de dados em geral
Seaborn	Apresentação e exploração de dados – aplicada para visualização de dados estatísticos
Statsmodels	Análise e Modelagem de dados – aplicada para geração de modelos estatísticos, testes de hipóteses e exploração de dados

Além das bibliotecas supracitadas (e alguns de seus módulos), também foram utilizados: o Pandas Profiling (um módulo do Python) e a biblioteca Sweetviz para realização da análise exploratória de dados de forma automatizada. Ressalta-se que o objetivo da utilização dessas duas ferramentas consiste apenas em mostrar que existem funções que geram relatórios padrões sobre os dados de forma até mais rápida e objetiva do que utilizando outros métodos conforme se verá no capítulo de resultados, no entanto, de maneira alguma essa facilidade substitui a análise criteriosa do analista.

4.7 Síntese do capítulo

O presente capítulo apresentou uma síntese dos materiais e métodos aplicados à pesquisa. Iniciou-se a introdução com uma breve descrição da metodologia adotada para que fosse possível visualizar melhor as possíveis contribuições da pesquisa.

Os materiais foram 13 (treze) solos de textura fina coletados ao longo da RMRecife (Estado de Pernambuco). Conforme apresentado, a área de pesquisa é marcada, climaticamente, por grandes volumes de chuva e altas temperaturas, o que era de se esperar, uma vez que geograficamente localiza-se na faixa tropical.

Em termos de geologia, observou-se a presença marcante da Formação Barreiras, principalmente na porção norte da RMRecife, sendo também encontradas (em menor

proporção) sedimentos típicos de manguezais, bem como, ocorrências de formações geológicas compostas por rochas ígneas ácidas (maciços granítico-granodioríticos) e rochas metamórficas do tipo gnaiss, e de forma localizada, podendo ainda ocorrer basaltos, traquitos e riolitos.

Já em termos de Pedologia, na RMRecife predominam os Argissolos Amarelos e Vermelhos-Amarelos, seguido dos Latossolos Amarelos e em menor proporção aparecem os Neossolos, Espodossolos e Nitossolos. Assim, os solos coletados são, em sua maioria, compostos por Argissolos da Formação Barreiras.

Neste capítulo, também foram descritos, de forma sumariada, os ensaios realizados, dando ênfase nas informações básicas e particulares do que foi realizado em laboratório.

A pesquisa previu a realização de uma extensa campanha experimental que compreendeu desde os ensaios mais básicos de caracterização (granulometria, LL, LP e vários outros.), bem como ensaios químicos e mineralógicos (DRX e imagens Microscópicas) até ensaios mecânicos (MR e DP), proporcionando um detalhamento geotécnico valioso sobre os solos tropicais finos da RMRecife.

Por último, abordou-se os critérios adotados para escolha das referências bibliográficas e dos parâmetros para compor o BDSF e, tratou-se também sobre as técnicas de Ciências de Dados utilizadas para análise dos dados que incluem a estatística descritiva, análise de correlações, análise multivariada (*Clusters*) e análises de regressão. As ferramentas que auxiliaram as análises foram os softwares Excel, Statistica (versão 10.0) e a plataforma Anaconda para implementação dos códigos e algoritmos em linguagem de programação Python.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS – SOLOS DE RMRecife

5.1 Apresentação do capítulo

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios físicos, químicos, minelalógicos e mecânicos dos treze solos da RMRecife estudados nesta tese. Inicia-se a com a Classificação MCT que é utilizada, nesta pesquisa, como referência na análise dos demais ensaios, sendo que no mesmo item apresenta-se também a classificação MCT-M, a título de curiosidade.

Em seguida, apresenta-se em tópicos específicos a composição granulométrica, os limites de consistência, as classificações geotécnicas tradicionais e o grau de dispersão dos solos por meio do ensaio de *Crumb Test*. Preferiu-se apresentar os resultados do ensaio de compactação no tópico de caracterização para que a análise dos ensaios seguintes não fosse prejudicada, e em seguida abordou-se o ensaio de curva característica (realizado com CPs compactados).

Em continuidade à caracterização apresentou-se dados da constituição química, mineralógica e microscópica dos solos. A seguir, discutiu-se os ensaios de CBR, MR e DP. No último tópico realizou-se uma análise integrada dos resultados dos ensaios, por meio de medidas de correlação e análise de agrupamento, utilizando algumas ferramentas da Ciência de Dados.

5.2 Caracterização básica dos solos estudados

5.2.1 Classificações MCT e MCT-M

O gráfico da Figura 5.1 apresenta o ábaco de classificação MCT com a indicação dos solos desta pesquisa. Os solos da classe LG' foram identificados com a cor verde, os solos LA' com a cor vermelha e os NA' com a cor azul. O gráfico da Figura 5.2 apresenta o ábaco da Classificação MCT-M, e mantiveram-se as cores e marcadores utilizados no ábaco da classificação MCT, facilitando a observação de quais amostras tiveram sua classe alterada. E na Tabela 5.1 apresenta-se uma síntese dos resultados de cada amostras desta pesquisa no que concerne: as classificações MCT e MCT-M; os coeficientes c' e d' ; o índice e' e as Perdas de Massa por Imersão dos CPs moldados próximos à umidade ótima ($PMI_{w_{ót}}$, %) e aqueles utilizados no cálculo de e' (PMI , %).

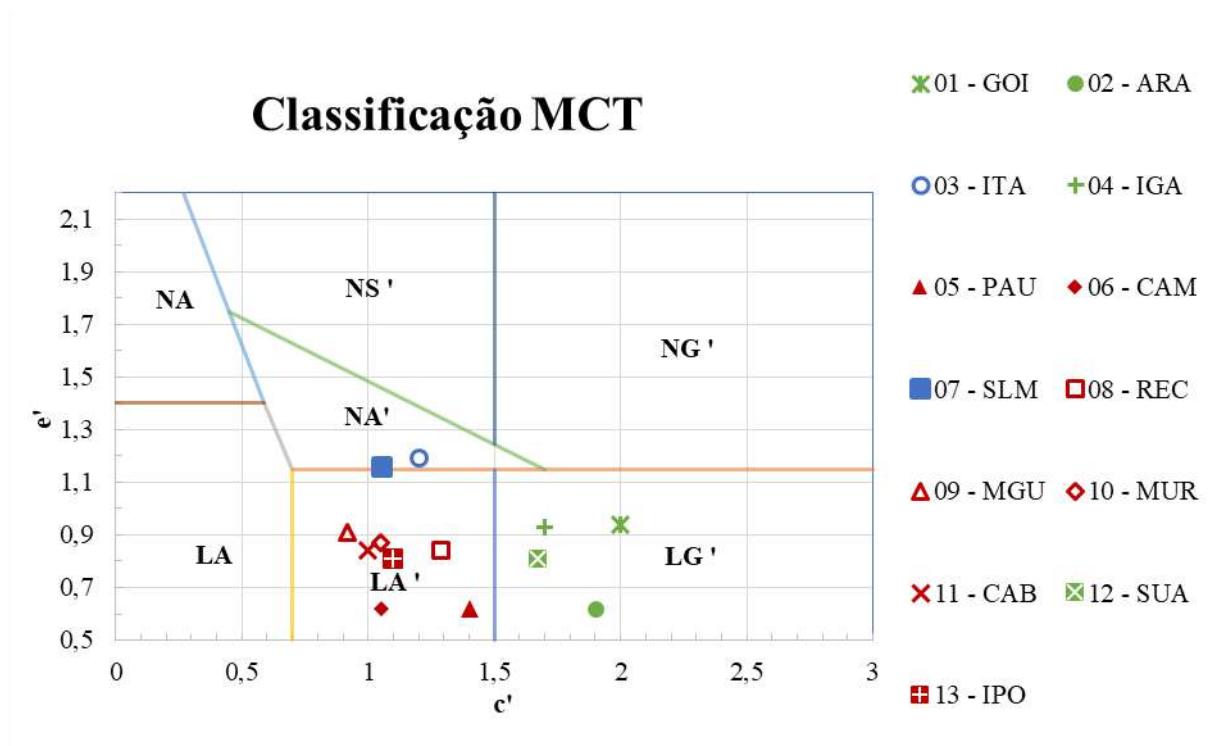


Figura 5.1 – Gráfico da Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1995) com indicação dos solos desta pesquisa.

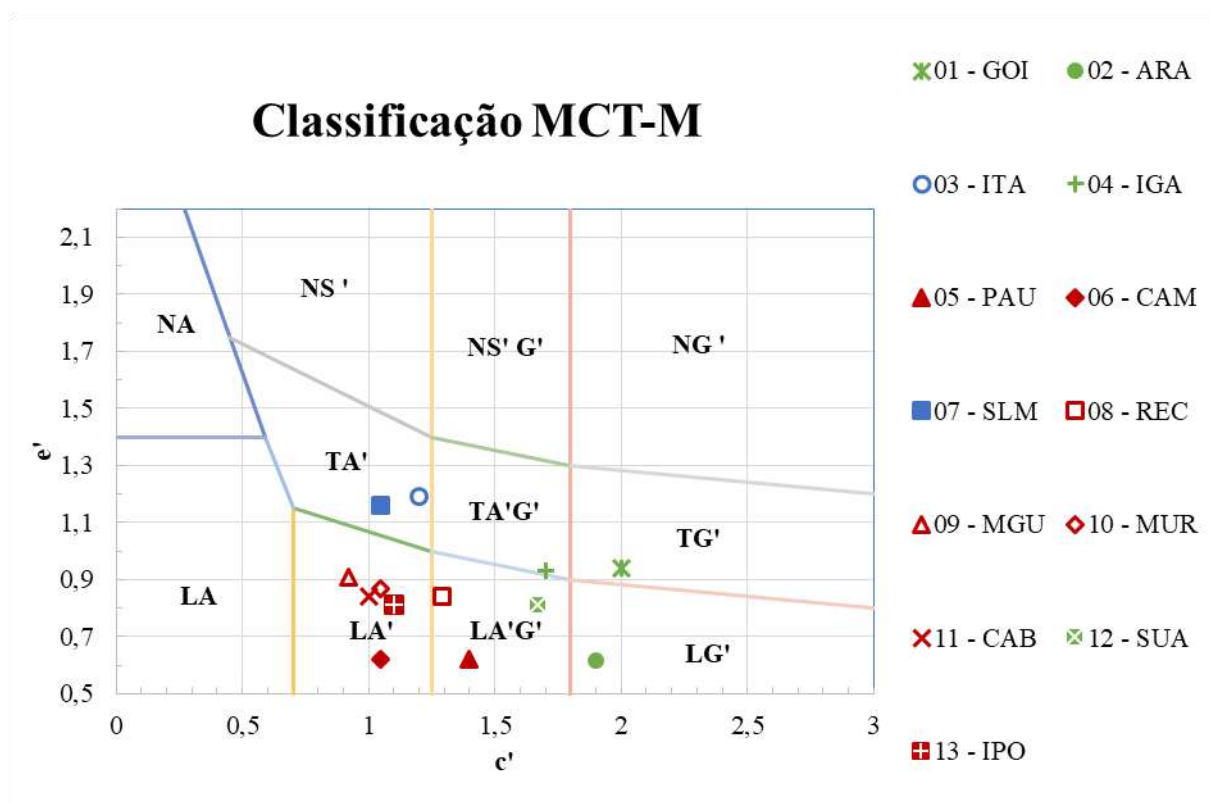


Figura 5.2 – Gráfico da Classificação MCT-M (Vertamatti, 1988) com indicação dos solos desta pesquisa.

Tabela 5.1 – Parâmetros da Classificação MCT e MCT-M

AMOSTRA	MCT	MCT-M	d'	PMI _{wót} (%)	PMI (%)	e'	c'
01 - GOI	LG'	TG'	247,06	74,50	75	0,94	2,00
02 - ARA	LG'	LG'	138,90	0,00	10	0,62	1,90
03 - ITA	NA'	TA'	133,33	97,84	153	1,19	1,20
04 - IGA	LG'	TA'G'	86,67	37,58	58	0,93	1,70
05 - PAU	LA'	LA'G'	130,77	9,07	9	0,62	1,40
06 - CAM	LA'	LA'	140,00	0,00	10	0,62	1,05
07 - SLM	NA'	TA'	147,40	33,66	143	1,16	1,05
08 - REC	LA'	LA'G'	107,14	0,00	40	0,84	1,29
09 - MGU	LA'	LA'	109,09	0,00	58	0,91	0,92
10 - MUR	LA'	LA'	216,67	0,00	56	0,87	1,05
11 - CAB	LA'	LA'	187,50	0,00	49	0,84	1,00
12 - SUA	LG'	LA'G'	150,00	39,46	40	0,81	1,67
13 - IPO	LA'	LA'	153,85	41,78	40	0,81	1,10

Analisando as classificações MCT obtidas, pode-se verificar que de modo geral, as amostras da região mais ao norte da RMRecife apresentam comportamento argiloso, com exceção da amostra 03-ITA (trata-se de um solo predominantemente arenoso fino, conforme composição granulométrica), passando para um comportamento mais arenoso quando se verifica as amostras coletadas na direção sul (com exceção da amostra 12-SUA).

Considerando a classificação MCT-M, verifica-se que as amostras classificadas pela MCT como não lateríticas passaram a se encaixar na faixa de solos transicionais arenosos. As amostras 01-GOI e a 04 – IGA, antes classificados como solos argilosos lateríticos (LG') também se encaixaram na faixa transicional, sendo que a amostra 04-IGA encontra-se em transição entre o comportamento argiloso e arenoso (TA'G').

Os solos 08-REC e 05-PAU classificados pela MCT como LA' passaram a encaixar-se na faixa de transição do comportamento argiloso para arenoso e a amostra 12-SUA, LG' pela MCT, também se encaixou nessa transição de comportamento (LA'G'), o que se correlaciona melhor com a composição granulométrica deste solo, que possui quantidade significativa da fração areia.

A fim de analisar os parâmetros utilizados na classificação elaborou-se os gráficos das Figuras 5.3 a 5.4 que apresentam, respectivamente as curvas de compactação Mini-MCV, o parâmetro d', a PMI_{wót} (%), as curvas de deformabilidade e os índices c' e e'.

A Figura 5.3 mostra as curvas de compactação Mini-MCV (correspondente a 12 golpes, conforme metodologia MCT) das treze amostras estudadas. Para padronizar, além de cada solo ter sido identificado com um marcador diferente, as cores das linhas seguem os grupos

da classificação MCT, da mesma forma como foi apresentado no ábaco de classificação: LG' – cor verde, LA' – cor vermelha e NA' – cor azul.

Ao observar as curvas de compactação Mini-MCV obtidas observa-se que os solos classificados como LA' (com exceção da amostra 08-REC) apresentaram formatos e valores de peso específico aparente seco (γ_s) e de umidade ótima ($W_{ót}$) aproximados. A amostra 03-ITA foi a que apresentou maior valor de γ_s e menor W_o , já a amostra 08-REC apresentou menor valor de γ_s e maior $W_{ót}$. A amostra 01-GOI apresentou inclinação mais elevada e valor de peso específico maior do que dos demais solos, comportamento confirmado através da repetição do ensaio.

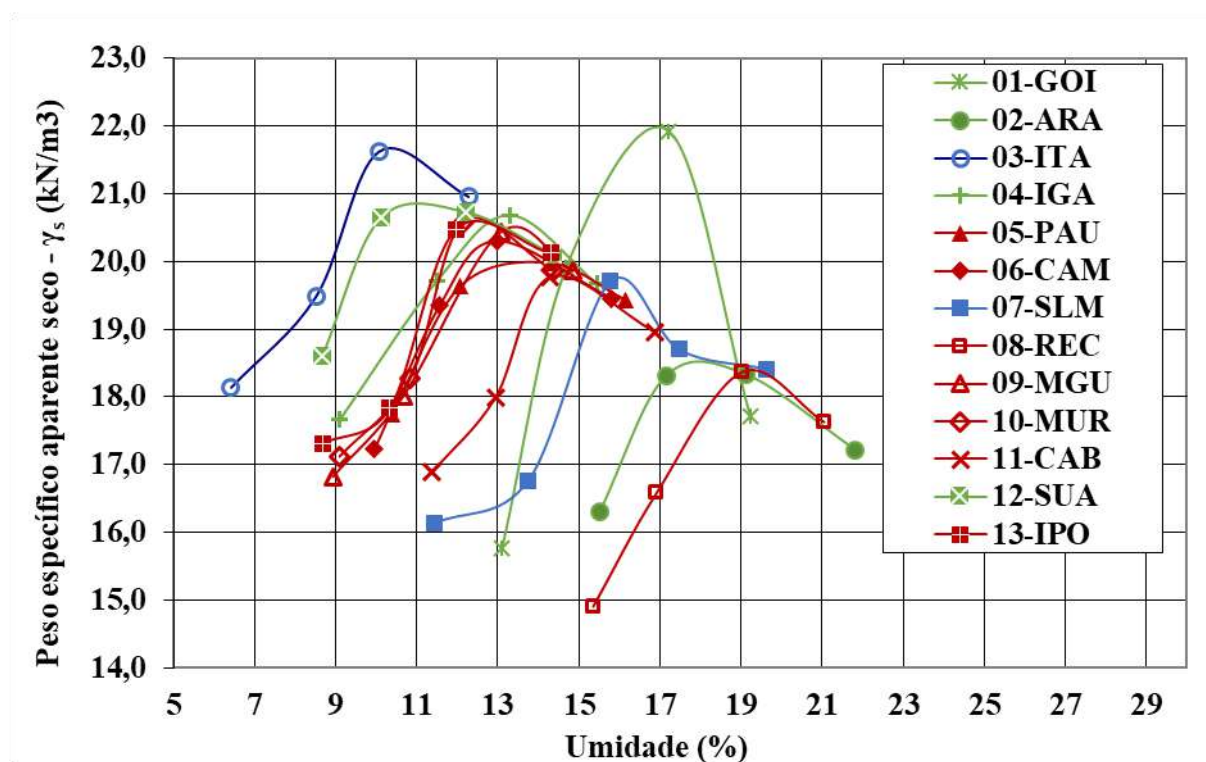


Figura 5.3 – Curvas de compactação Mini-MCV (12 golpes) das amostras desta pesquisa.

Analisando a Figura 5.4, observa-se que o coeficiente d' , associado à inclinação do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV, apresenta importante variação entre as amostras, indicando diferentes comportamentos, porém todos apresentaram valores acima de 20 que indicam solos de comportamento laterítico (Villibor e Nogami, 2009).

Villibor e Nogami (2009) consideram um d' acima de 100 como muito elevado e típico de areias finas argilosas, e, das amostras avaliadas, somente 04-IGA (LG') apresentou valor inferior a este. Quanto maior o valor de d' maior é a inclinação da curva de compactação, observa-se que o solo que apresentou o maior valor de d' foi a amostra 01-GOI (LG') seguida

das amostras 10-MUR (LA'), 11-CAB (LA') e 13-IPO (LA'), indicando tratarem-se de amostras mais sensíveis a variação da densidade com a variação da umidade, quando comparado às demais amostras.

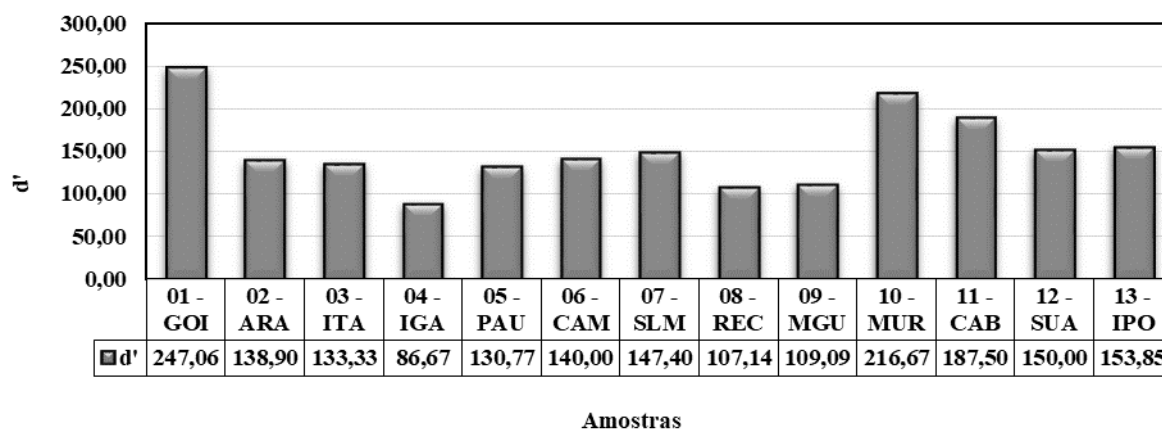


Figura 5.4 – Coeficiente d' da Classificação MCT das amostras desta pesquisa.

Em relação à Perda de Massa por Imersão (PMI), apresenta-se na Figura 5.5 os valores obtidos para os CPs moldados próximos à umidade ótima. Observa-se que seis das 13 amostras não apresentaram perdas, mesmo após 24 horas de imersão. Dentre as que apresentaram perda, a amostra 03-ITA apresentou a maior PMI (97,84%) e a amostra 05-PAU a menor PMI (9,07%).

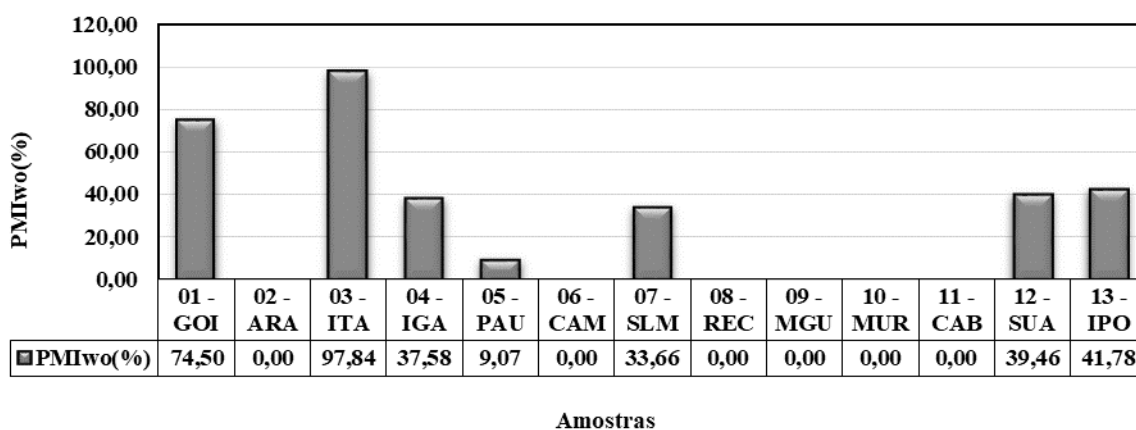


Figura 5.5 – Perda de Massa por Imersão nos CP's próximos à umidade ótima das amostras desta pesquisa.

A Figura 5.6 apresenta as curvas de deformabilidade (mais próximas do Mini-MCV=10) dos solos deste estudo. Seguiu-se a mesma padronização já mencionada, e, observa-se que as amostras classificadas como LG' apresentaram deformações maiores típica de solos

argilosos, sendo que as amostras 04-IGA e 12-SUA apresentaram comportamento semelhante. Os solos LA' e NA' apresentam, coerentemente, deformações menores típica de solos arenosos.

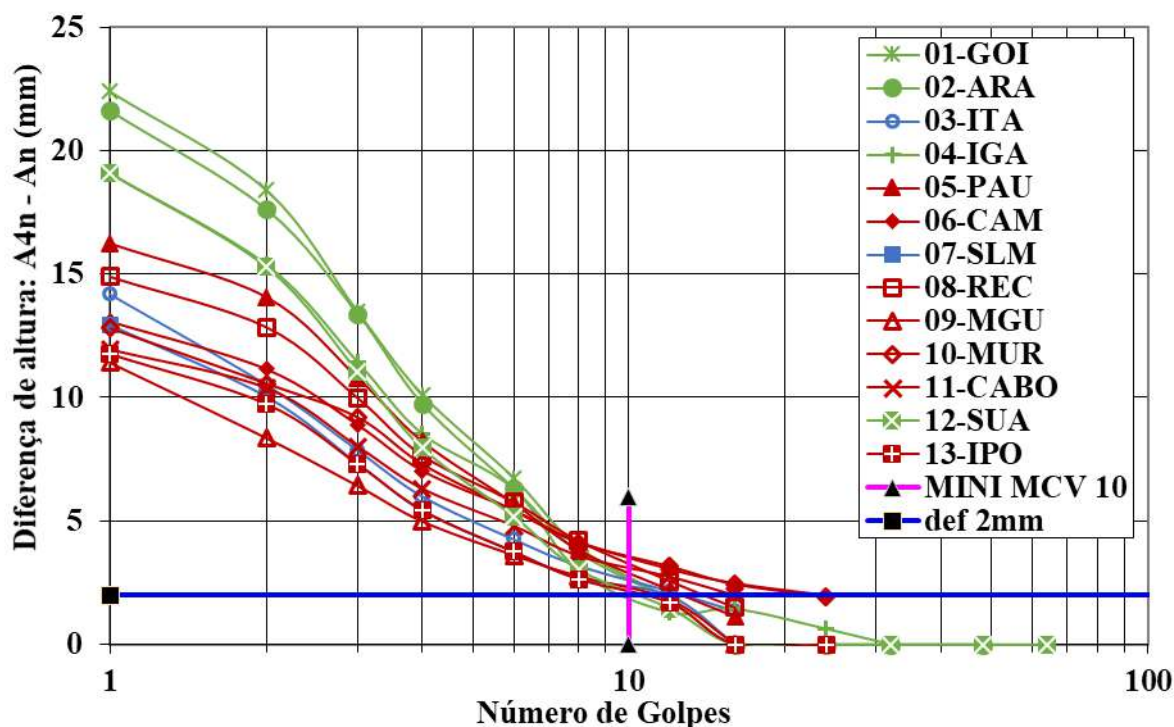


Figura 5.6 – Curvas de deformabilidade dos solos estudados.

O coeficiente c' , associado à inclinação da curva de deformabilidade dos solos, é apresentado na Figura 5.7. Nogami e Villibor (2009) dizem que o c' correlaciona-se aproximadamente com a granulometria, sendo que valores elevados de c' ($>1,5$) caracteriza as argilas e solos argilosos e valores baixos ($<1,0$) caracterizam areias e siltes não plásticos e pouco coesivos, entretanto, para valores entre 1,0 e 1,5 encontram-se solos de vários tipos granulométricos, compreendendo areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas, argilas siltosas etc.

Entende-se que quanto maior o valor de c' mais deformável é o solo (há reduções mais acentuadas na altura do CP conforme aplicam-se os golpes no ensaio de compactação Mini-MCV), assim o solo que apresentou maior deformabilidade foi o solo 01-GOI ($c' = 2,0$) indicando comportamento de um solo argiloso; as amostras 02-ARA, 04-IGA e 12-SUA, apresentaram $c' > 1,5$ e o solo que apresentou menor foi o 09-MGU ($c' = 0,92$) que é comportamento de areias e siltes não plásticos. Esses resultados corroboram com o comportamento obtido nos ensaios de deformação permanente em que o solo 09 também foi o que apresentou menor deformação e o solo 01 uma deformação permanente mais notável.

A maior parte das amostras, oito de treze, encaixaram-se entre 1,0 e 1,5, indicando solos com comportamento granulométricos variáveis. Considerando as classificações MCT destes solos constata-se que todos apresentam comportamento arenoso ou areno-argilosos (laterítico e não laterítico).

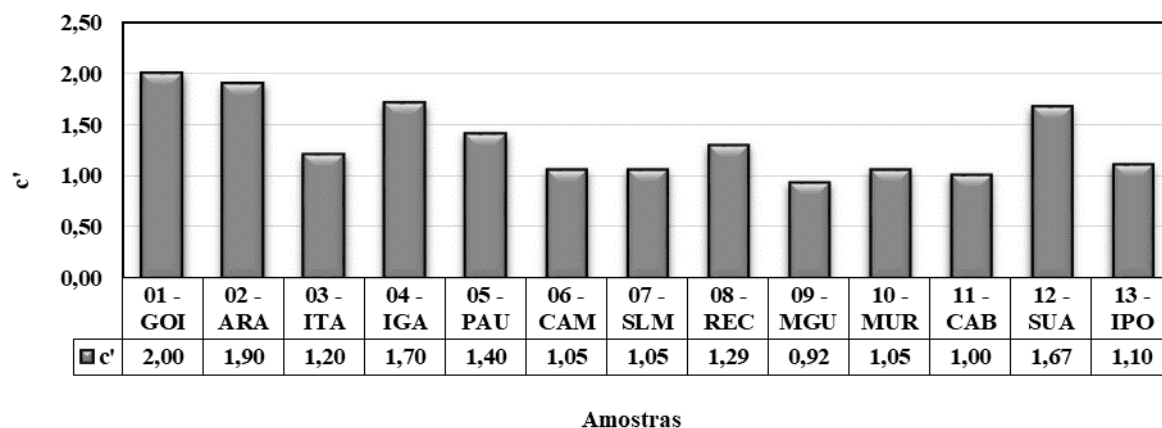


Figura 5.7 – Coeficiente de deformabilidade (c') da Classificação MCT das amostras desta pesquisa.

O índice e' indica o comportamento laterítico dos solos segundo a metodologia da Classificação MCT, assim, de modo geral pode-se considerar que quanto menor o valor de e' mais evidente é o comportamento laterítico do material. Ressalta-se que na literatura o índice e' é designado como “grau de laterização”, porém destaca-se que esta nomenclatura não pode ser levada ao “pé da letra”, pois o grau de laterização de um solo está relacionado não só aos aspectos avaliados na MCT (compactação e PMI) mas, principalmente, aos processos pedogenéticos aos quais os solos são submetidos em campo.

Assim, observando a Figura 5.8, pode-se dizer que segundo a classificação MCT, os solos 02-ARA, 05-PAU e 06-CAM apresentaram valores de e' maiores, podendo ser entendido como um comportamento laterítico mais evidente, quando comparado com as demais amostras e a amostra 03-ITA o menor. Observa-se também que os solos da região central e sul (amostras 08-REC a 13-IPO) apresentaram grau de “comportamento laterítico” similares.

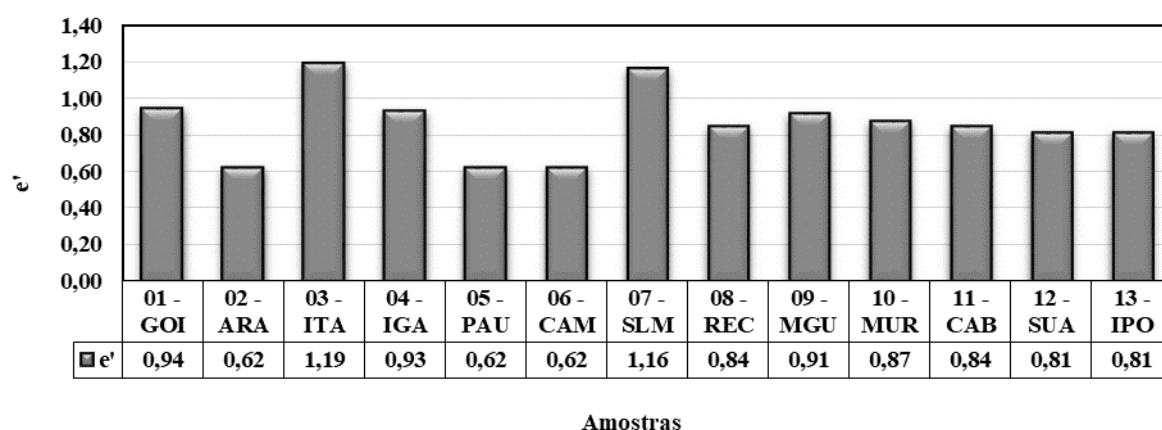


Figura 5.8 – Índice de e' das amostras desta pesquisa, segundo a Metodologia MCT.

5.2.2 Composição granulométrica

Os materiais desta pesquisa foram coletados visando a obtenção de solos de textura fina, baseando-se no critério prescrito pela Metodologia MCT que seria aqueles com 100% passante, ou no máximo 10% retidos, na peneira de nº 10 (abertura de 2 mm), podendo assim identificá-los como solos arenosos finos. No ensaio de granulometria completa (peneiramento e sedimentação), foi possível obter as composições granulométricas dos 13 solos.

Aqui também se utilizaram os marcadores conforme apresentado no tópico anterior, e manteve-se a divisão das classes MCT pelas cores (verde - LG', vermelho - LA' e azul - NA'). Mas, para melhorar a identificação dos grupos MCT (não apenas pelas cores) a partir deste tópico considerar-se-á uma nova nomenclatura das amostras considerando letras associadas aos municípios e às classes MCT, conforme indicado no Quadro 5.1.

A Figura 5.9 apresenta as curvas granulométricas de todos os solos obtidas por meio do ensaio com o uso de aparelho dispersor e defloculante, seguida da Figura 5.10 que apresenta uma outra forma gráfica de representação da composição granulométrica. Através das figuras mencionadas pode-se observar que todos os solos apresentaram representativo teor de argila (entre 32,28% e 50,17%) e areia fina (entre 18,66% e 55,85%) e, baixa porcentagem de material grosseiro (retido na peneira nº 10 – entre 0,12% e 3,76%).

A amostra 01GO-LG' apresentou a maior porcentagem de argila, já o solo 03IT-NA' a maior porcentagem de areia fina. A amostra de 08RE-LA' possui a maior porcentagem de silte (19,30%) e 12SU-LG' a de areia média (26,71%). Essas observações são coerentes com o observado de forma tátil-visual no campo.

Quadro 5.1 – Nova proposta de identificação das amostras por município e classe MCT.

Identificação inicial	Município da amostra	Classe MCT	Nova identificação
01 - GOI	GOIANA	LG'	01GO-LG'
02 - ARA	ARAÇOÍABA	LG'	02AR-LG'
03 - ITA	ILHA DE ITAMARACÁ	NA'	03IT-NA'
04 - IGA	IGARASSU	LG'	04IG-LG'
05 - PAU	PAULISTA	LA'	05PA-LA'
06 - CAM	CAMARAGIBE	LA'	06CA-LA'
07 - SLM	SÃO LOURENÇO DA MATA	NA'	07SL-NA'
08 - REC	RECIFE	LA'	08RE-LA'
09 - MGU	JABOATÃO DOS GUARARAPES	LA'	09MG-LA'
10 - MUR	JABOATÃO DOS GUARARAPES	LA'	10MU-LA'
11 - CAB	CABO DE SANTO AGOSTINHO	LA'	11CB-LA'
12 - SUA	CABO DE SANTO AGOSTINHO	LG'	12SU-LG'
13 - IPO	IPOJUCA	LA'	13IP-LA'

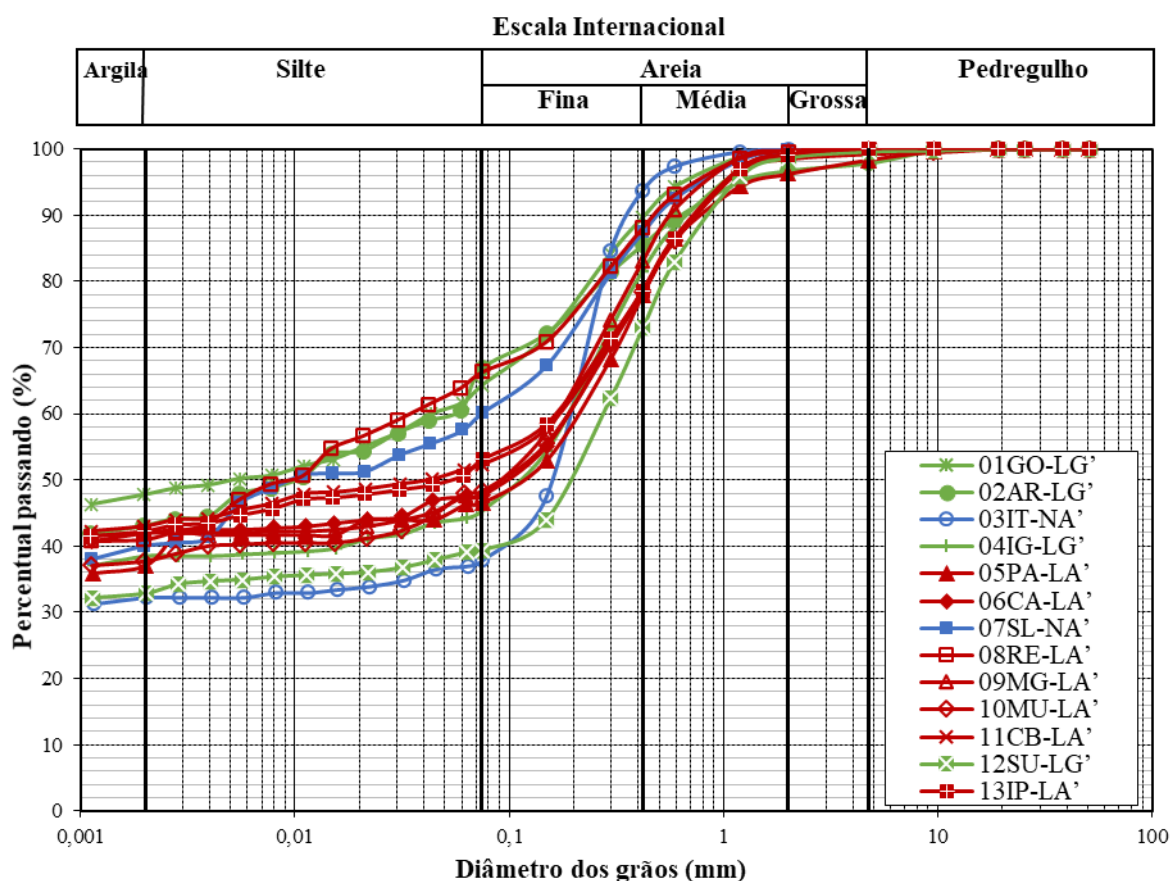


Figura 5.9 – Curvas granulométrica dos solos desta pesquisa (ensaio com uso de dispersor e defloculante).

O Apêndice II apresenta uma tabela com a porcentagem de cada fração granulométrica dos solos desta tese, incluído as porcentagens de materiais passantes e retidas a peneira de nº 10 (2 mm), usada para verificação numérica das informações apresentadas nas figuras. Ressalta-se que as figuras com as curvas granulométricas (Figuras 5.9 e 5.11 a 5.13)

estão apresentadas considerando a escala brasileira atualizada (argila < 2 μ m), porém as análises foram procedidas considerando a fração de solo com tamanho de partícula < 5 μ m, como indicado no Apêndice II e na escala da Figura 5.10.

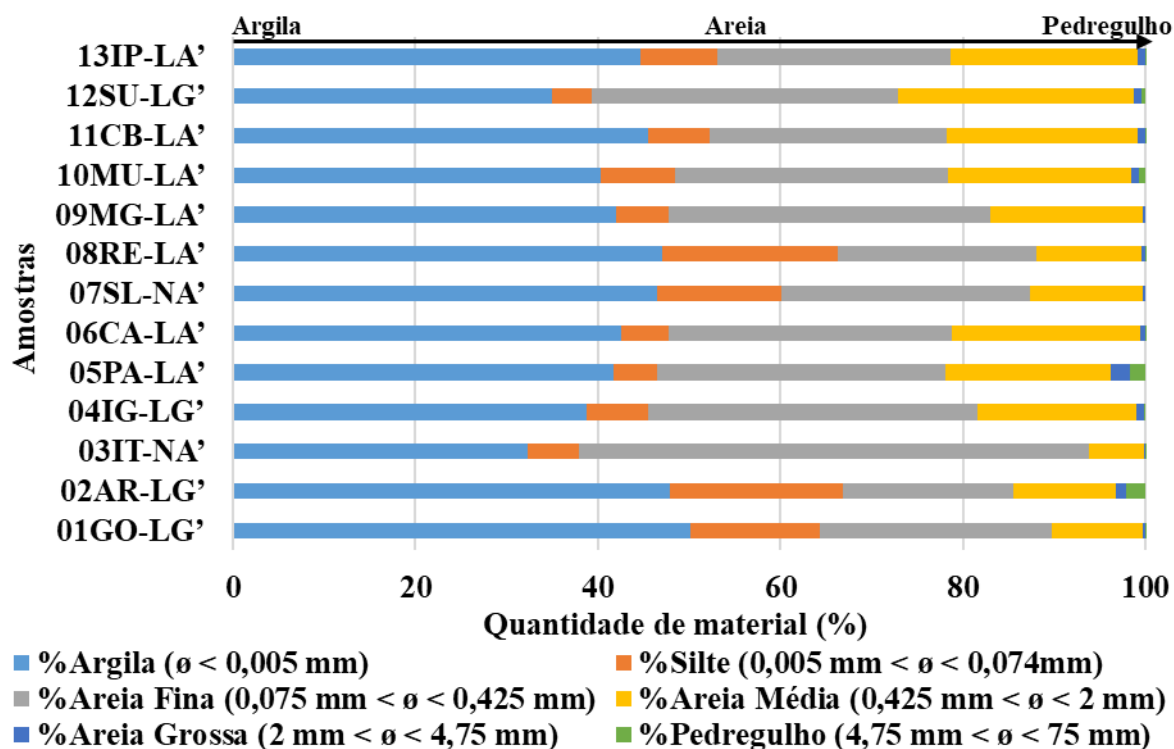


Figura 5.10 – Composição granulométrica dos solos desta pesquisa (ensaio com uso de dispersor e defloculante).

Para facilitar a visualização das curvas granulométricas por classe MCT apresenta-se as Figuras 5.11 a 5.13. Aproveita-se também os gráficos para indicar as curvas dos solos obtidas com o ensaio sem uso de defloculante e dispersor, utilizando-se a cor cinza para identificá-las. O ensaio sem defloculante mostrou que os solos estudados possuem importante material coesivo revestindo os grãos de quartzo, formando grumos não destrutíveis por meio do ensaio sem o processo mecânico de dispersão mais defloculante.

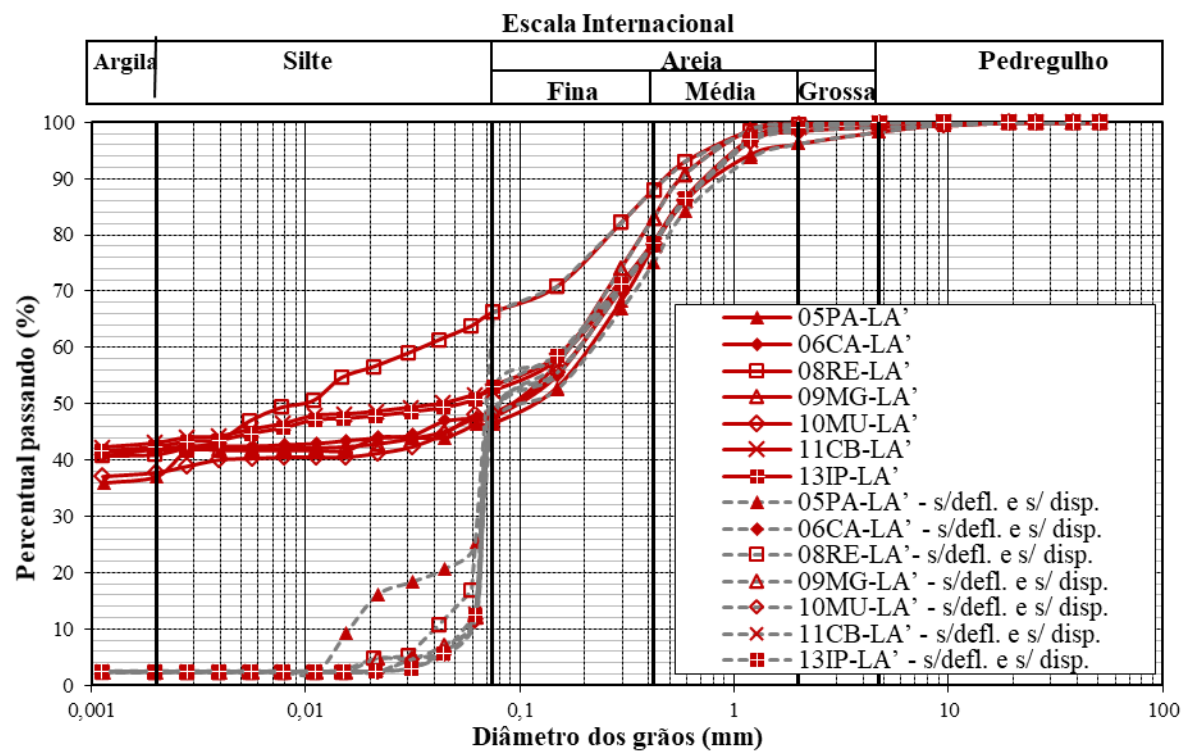


Figura 5.11 – Curvas granulométricas dos solos LA'.

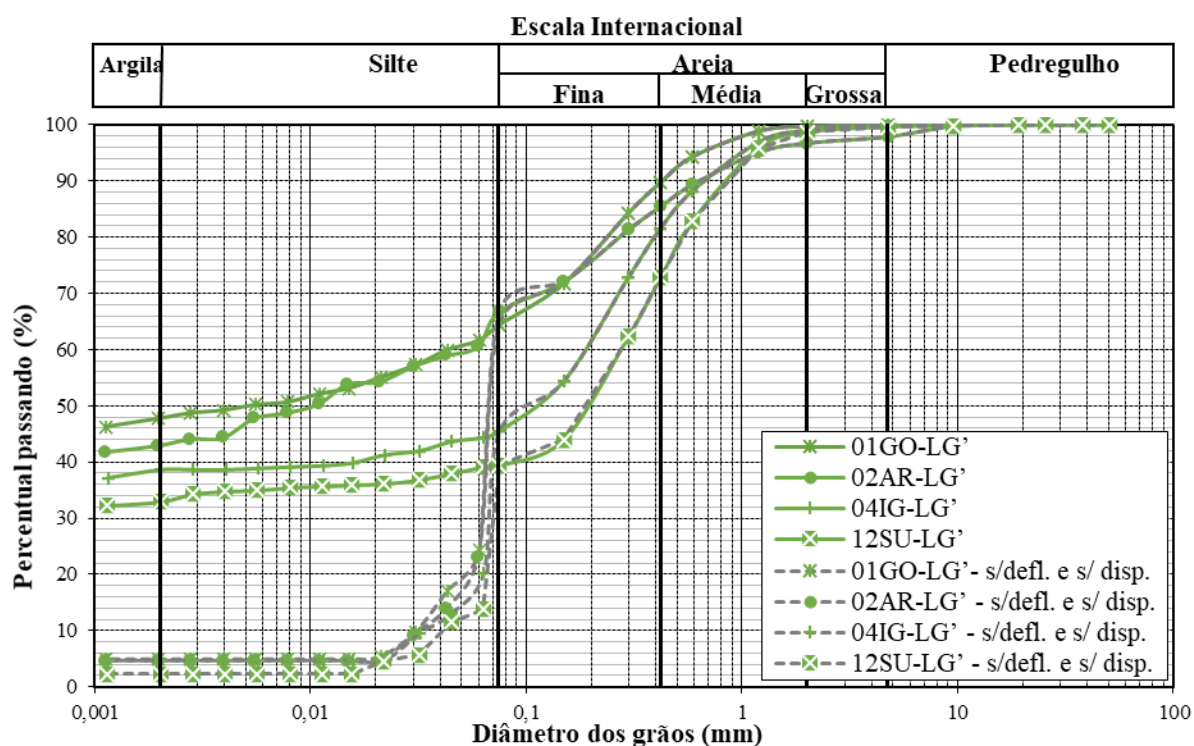


Figura 5.12 – Curvas granulométricas dos solos LG'.

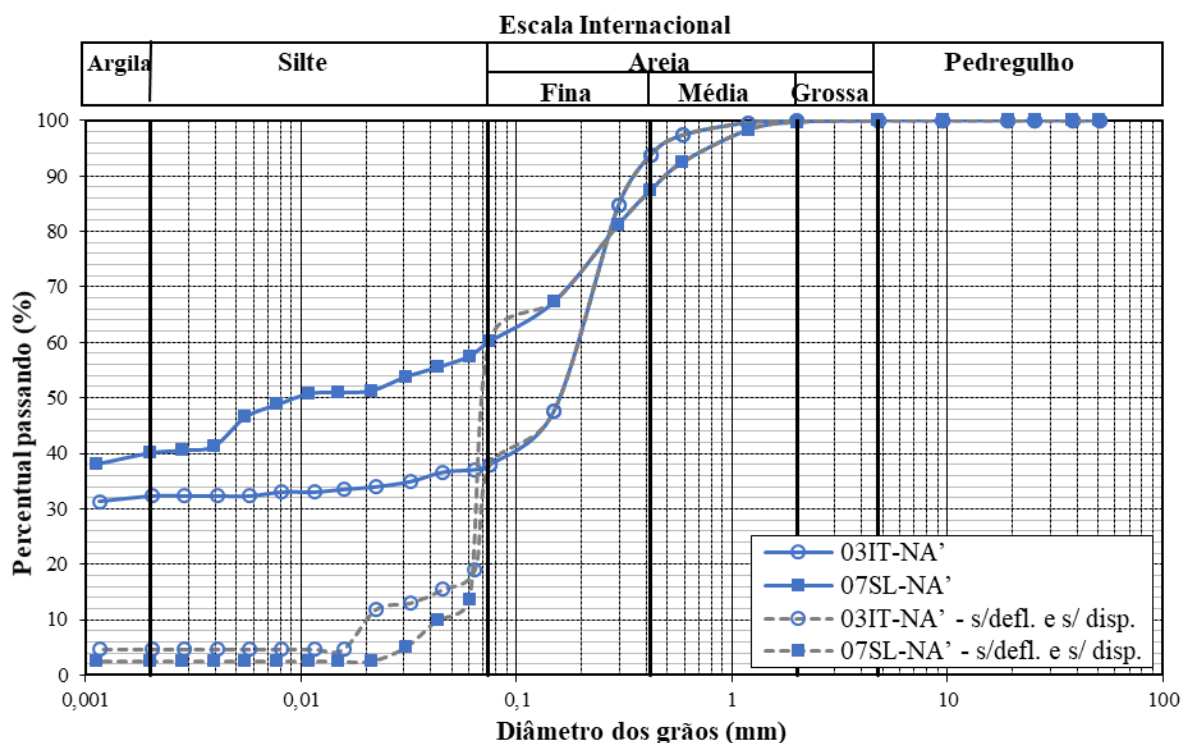


Figura 5.13 – Curvas granulométricas dos solos NA'.

Ao avaliar o comportamento das curvas (com defloculante e dispersor) observa-se que os solos arenosos lateríticos, classe LA' (Figura 5.11), apresentaram formato e valores aproximados, com exceção do solo 08RE-LA' (que apresentou a maior quantidade de silte). Por outro lado, na classe LG' (Figura 5.12), observa-se que há variações maiores em termos de porcentagem de cada material, sendo os solos 01GO-LG' e 02AR-LG' granulometricamente parecidos. Na classe NA' (Figura 5.13) observam-se solos com composições distintas.

Observou-se ainda que os solos que apresentaram comportamento não laterítico na MCT mostraram o mesmo comportamento dos solos lateríticos no que se refere aos resultados das curvas com e sem defloculante, ou seja, estes solos também se encontram com a estrutura floculada em campo, indicando que também apresentam certo comportamento laterítico, sob este aspecto. Estes solos (NA') ficaram bem próximos da divisa entre os grupos de solos lateríticos e não lateríticos no gráfico da Classificação MCT.

Em relação ao grau de dispersão das amostras, por meio do ensaio de granulometria com e sem uso de defloculante, pode-se usar o parâmetro indicado pela norma da ABNT NBR 13602, que indica a porcentagem de dispersão como sendo a relação entre as porcentagens de partículas menores que 0,005 mm obtidas pelos dois procedimentos. Com este critério, os solos estudados apresentam em geral baixos valores de dispersão (Figura 5.14).

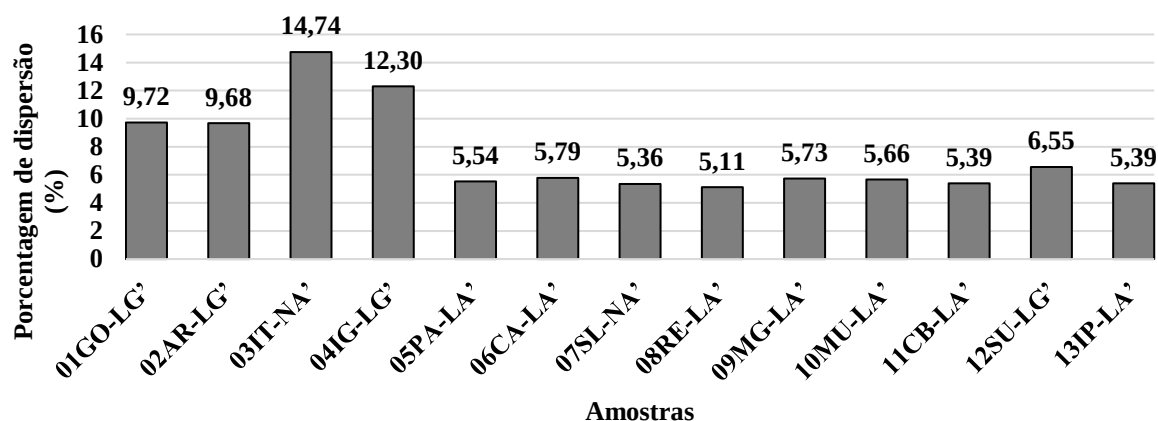


Figura 5.14 – Porcentagem de dispersão dos solos considerando os ensaios de granulometria com e sem defloculante.

Comparando os solos entre si, observa-se que o solo 03IT-NA' apresentou maior porcentagem de dispersão, seguido dos solos 04IG-LG, 01GO-LG' e 02AR-LG', respectivamente. As amostras 5 a 13 apresentaram valores de dispersão semelhantes.

5.2.3 Limites de consistência

A Figura 5.15 apresenta um gráfico com os valores de LL com e sem secagem prévia ao ar. Observa-se que para todos os solos houve um aumento no valor do LL com a secagem e o mesmo ocorre com o LP, apresentado na Figura 5.16. Resulta assim, por consequência, no mesmo comportamento quando se verifica o IP (Figura 5.16).

Dentre os resultados obtidos, os solos com maiores variações entre as modalidades ensaiadas (com e sem secagem) foram os solos 06CA-LA', 10MU-LA' e 11CB-LA' que são da mesma classe MCT, um indicativo de que este grupo seja mais sensível.

No geral, o comportamento observado foi oposto ao observado em outros trabalhos, como mencionado na revisão bibliográfica, o que pode denotar um comportamento peculiar dos solos estudados. Ressalta-se que foram refeitos os ensaios de LL e LP em alguns solos para confirmar o comportamento observado e a tendência foi a mesma.

Apenas para fins comparativos, com a regra antiga de seleção dos solos para pavimentação, tradicional, tem-se que para camada de base aceitava-se apenas solos que possuam LL menor que 25% e IP máximo de 6%. Assim, pelo método tradicional de ensaio

(com secagem prévia e destorroamento), todos os solos da pesquisa seriam desqualificados (o solo 03IT-NA' atenderia somente ao critério de LL).

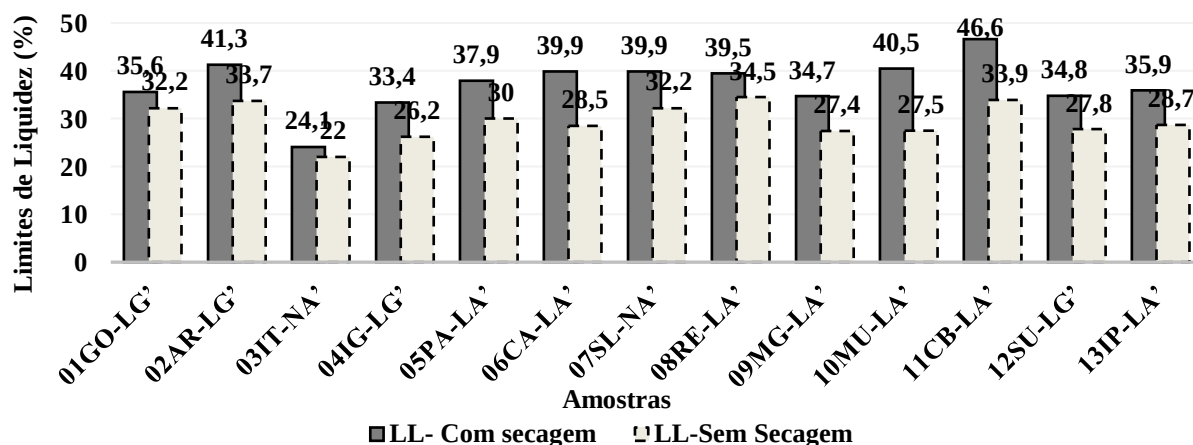


Figura 5.15 – Limite de Liquidez (LL) com e sem secagem prévia ao ar dos solos desta pesquisa.

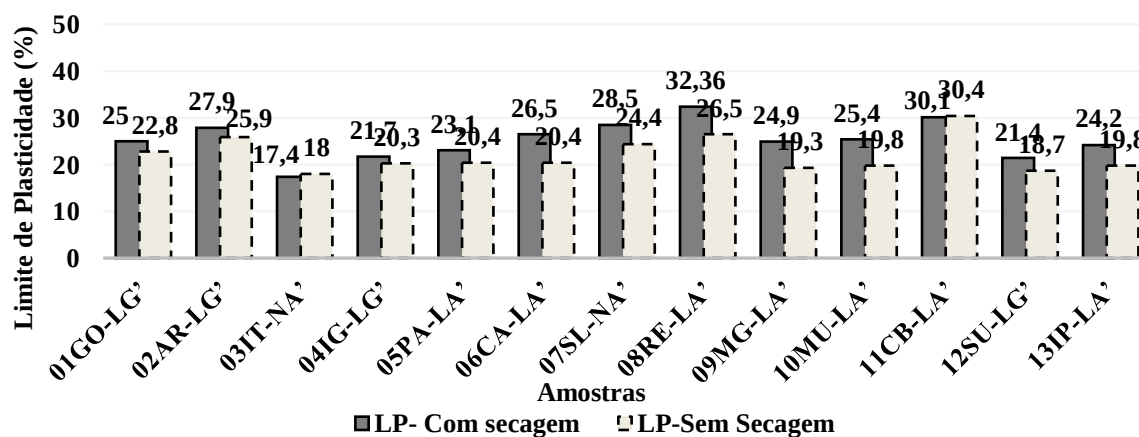


Figura 5.16 – Limite de Plasticidade (LP) com e sem secagem prévia ao ar dos solos desta pesquisa.

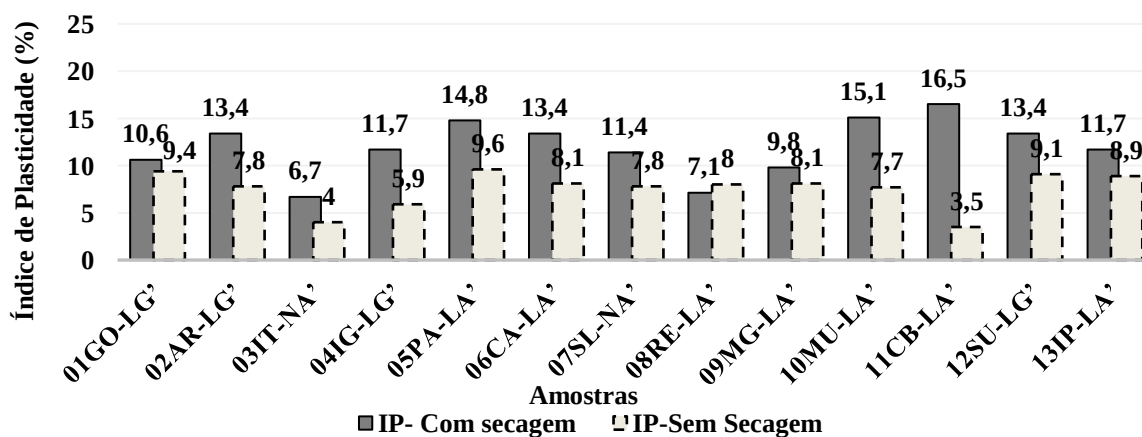


Figura 5.17 – Índice de Plasticidade (IP) com e sem secagem prévia ao ar dos solos desta pesquisa.

Porém, de acordo com a especificação de serviço nº 098 do DNIT (Brasil, 2007) que estabelece a sistemática da execução da camada de base estabilizada granulometricamente com o emprego de solo laterítico (granular – “laterita”) são admitidos materiais com $IP \leq 15\%$, assim, considerando este valor, a maioria dos solos desta pesquisa, embora não sejam granulares, se enquadrariam (exceção dos solos 10 e 11, no ensaio tradicional com secagem).

Uma informação importante que se pode extrair com os valores do índice de plasticidade dos solos é a atividade da argila, que é obtida através da relação entre o IP e a porcentagem de argila. O gráfico apresentado na Figura 5.18 mostra o índice de atividade calculado para os solos desta pesquisa.

De acordo com Pinto (2006) pode-se classificar a atividade da argila da seguinte forma: Atividade menor que 0,75 - inativa; entre 0,75 - 1,25 – normal e, maior que 1,25 – ativa. Assim, observa-se que todos os solos apresentaram argila considerada inativa.

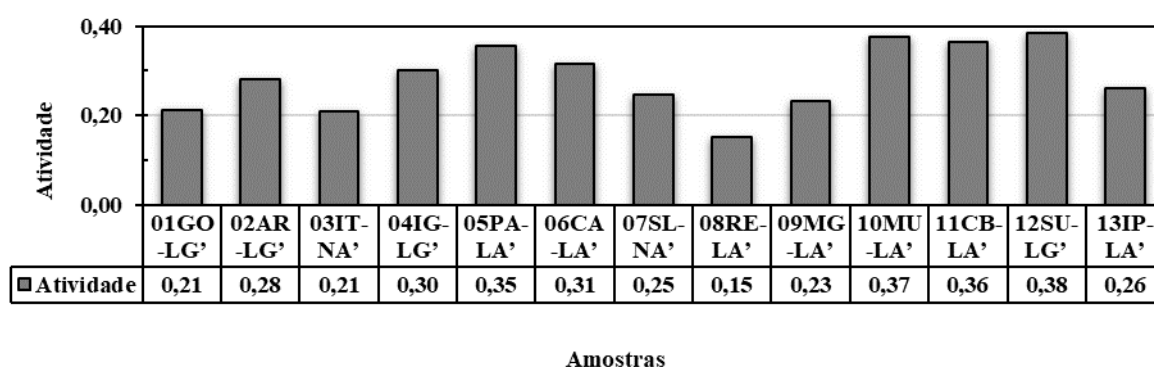


Figura 5.18 – Índice de Atividade da argila para os solos estudados.

5.2.4 Classificações Tradicionais – USCS e TRB

O Quadro 5.2 apresenta as classificações geotécnicas USCS e TRB obtidas para as amostras dos solos desta pesquisa e para melhor visualização plotou-se os resultados de LL e IP no Gráfico de Plasticidade de Casagrande apresentado na Figura 5.19.

A Figura 5.20 também apresenta um esquema com a divisão das classes obtidas. Observa-se que não há relações diretas entre a classificação MCT com as classificações USCS e TRB. Em relação à classe USCS, cinco amostras foram classificadas como ML (solos siltosos de baixa compressibilidade), quatro foram classificadas como SC (areia argilosa), duas como SM (areia siltosa). A amostra 03IT-NA' ficou classificada como SM-SC e somente a amostra 13 foi classificada como CL (solo argiloso de baixa compressibilidade).

Quadro 5.2 – Classificações Geotécnicas dos solos desta pesquisa.

Amostra	Classe MCT	Classe MCT-M	Classe USCS	Classe TRB
01GO-LG'	LG'	TG'	ML	A-6
02AR-LG'	LG'	LG'	ML	A-7-6
03IT-NA'	NA'	TA'	SM-SC	A-4
04IG-LG'	LG'	TA'G'	SC	A-6
05PA-LA'	LA'	LA'G'	SC	A-6
06CA-LA'	LA'	LA'	SM	A-6
07SL-NA'	NA'	TA'	ML	A-6
08RE-LA'	LA'	LA'G'	ML	A-4
09MG-LA'	LA'	LA'	SM	A-4
10MU-LA'	LA'	LA'	SC	A-7-6
11CB-LA'	LA'	LA'	ML	A-7-5
12SU-LG'	LG'	LA'G'	SC	A-6
13IP-LA'	LA'	LA'	CL	A-6

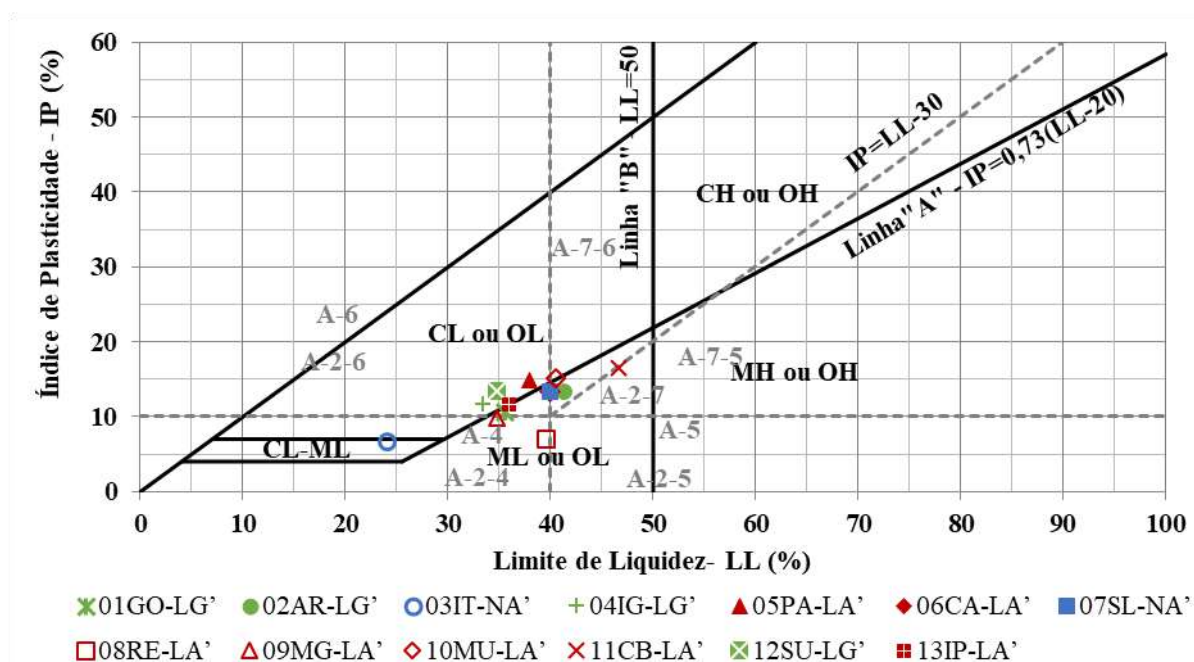


Figura 5.19 – Gráfico de Plasticidade de Casagrande com indicação das classificações USCS e TRB dos solos desta pesquisa.

Em relação à classificação TRB, três amostras foram classificadas como A-4 (solos siltsos não plásticos a moderadamente plásticos), sete como A-6 (solos argilosos plásticos), uma (11CB-LA') como A-7-5 (IP moderados em relação ao LL, podendo ser elásticos e sujeitos a alta variação de volume) e duas (02AR-LG' e 10MU-LA') como A-7-6 (alto IP em relação ao LL e sujeitos a alterações de volume extremamente altas). De acordo com esta classificação, todos os solos da pesquisa apresentariam comportamento sofrível a mau como subleito.

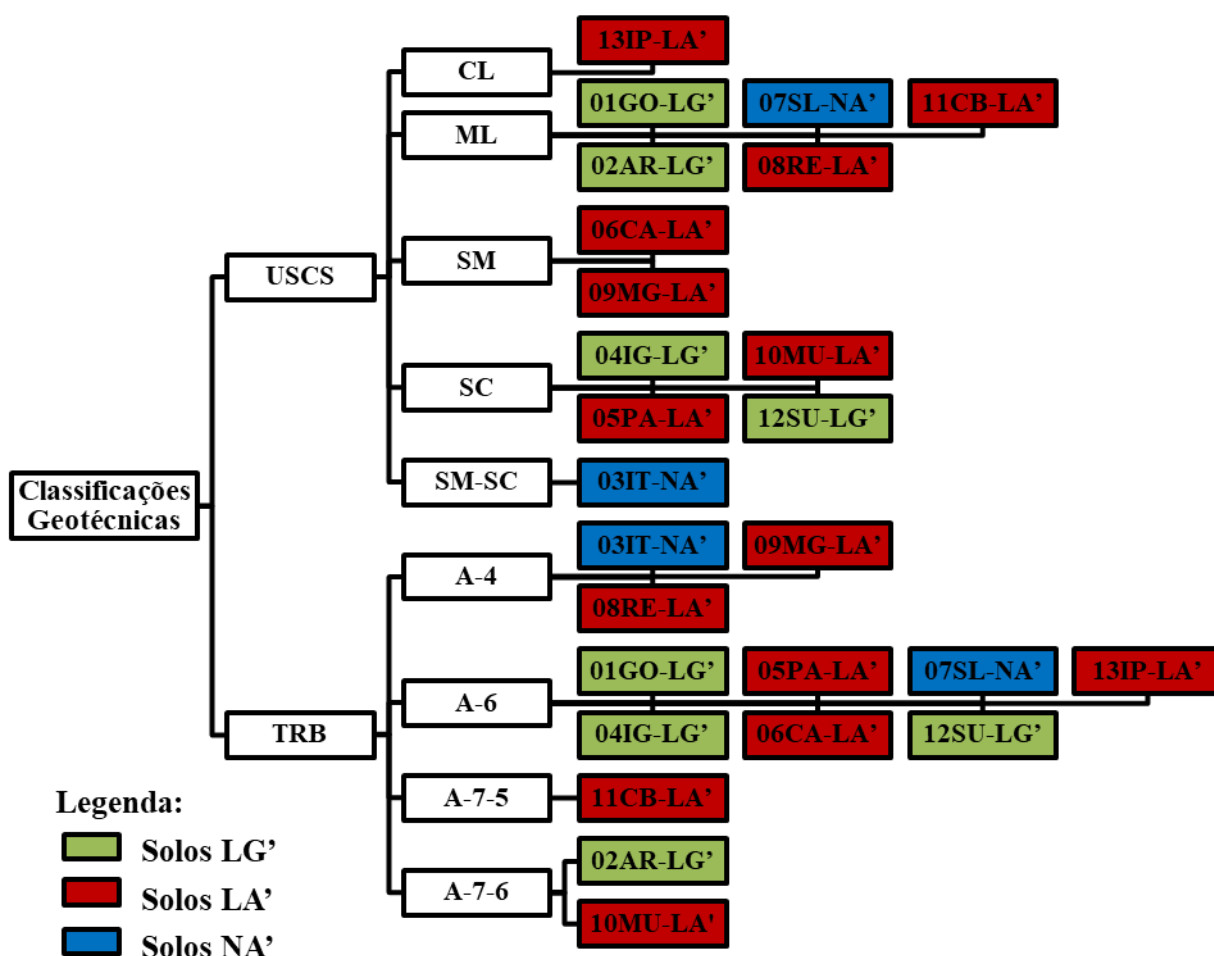


Figura 5.20 – Esquema ilustrativo das classes dos solos obtidas através dos sistemas USCS e TRB.

5.2.5 Avaliação da dispersão – Crumb Test

Todos os solos estudados apresentaram comportamento não dispersivo (Grau 1) por meio do ensaio de *Crumb Test*. O Quadro 5.3 apresenta a descrição do comportamento apresentado pelos solos durante o tempo de observação (1 hora).

Dos resultados obtidos destacam-se os comportamentos dos solos 01GO-LG', cujos torrões não se desfizeram durante o tempo de ensaio, o solo 03ITA-NA', cujos torrões se desfizeram rapidamente apresentando assim correspondência com o ensaio de PMI e a amostra 09MG-LA' cujos torrões se desfizeram parcialmente.

Quadro 5.3 – Resultado do ensaio de dispersibilidade *Crumb Test*.

Amostra	Comportamento	Grau
01GO-LG'	Não houve turvação da água e os torrões se mantiveram praticamente intactos.	Grau 1 - Não Dispersivo
02AR-LG'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
03IT-NA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram rapidamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
04IG-LG'	Não houve turvação da água e dois torrões se desfizeram totalmente de forma gradual e um se desfez parcialmente, também de forma gradual.	Grau 1 - Não Dispersivo
05PA-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
06CA-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
07SL-NA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
08RE-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
09MG-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram parcialmente.	Grau 1 - Não Dispersivo
10MU-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
11CB-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
12SU-LG'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo
13IP-LA'	Não houve turvação da água e os torrões se desfizeram gradativamente.	Grau 1 - Não Dispersivo

5.2.6 Compactação

A compactação é um ensaio mecânico, porém devido ao seu caráter básico seus resultados serão apresentados neste tópico. A Figura 5.21 apresenta um gráfico com todas as curvas de compactação dos solos desta pesquisa e as Figuras 5.22(a)-(b) e 5.23 mostram as curvas por grupos MCT. As curvas de compactação individuais estão no Apêndice III.

Observa-se diferentes formatos de curvas. A amostra 09MG-LA' apresentou formato de curva típico de solo arenoso laterítico fino conforme indicado por Pinto (2006), com uma curva bastante íngreme verifica-se, na região correspondente à umidade ótima, uma mudança sensível da massa específica com pequena variação da umidade.

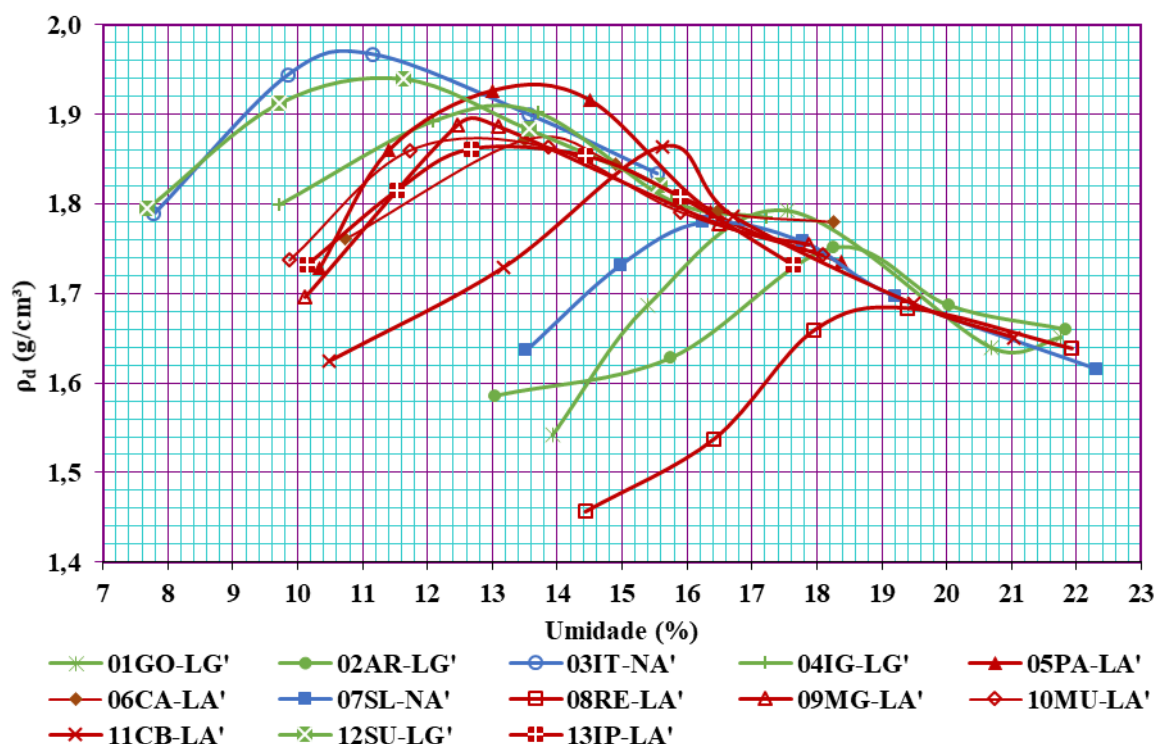


Figura 5.21 – Curvas de Compactação (energia intermediária) dos solos desta pesquisa.

Os resultados obtidos mostram certa correspondência com a granulometria, o solo 03IT-NA', por exemplo, tem uma grande porcentagem de areia fina em sua composição o que é refletido na curva de compactação (baixa umidade ótima e alta massa específica seca). Por outro lado, o solo 08RE-LA', que possui a maior porcentagem de silte, comparado aos demais solos, apresentou maior umidade e menor massa específica.

Em relação aos grupos da MCT, observa-se que os grupos NA' e LG' se subdividem internamente como também foi observado nas curvas granulométricas. No grupo LA' o solo 08RE-LA' se distancia dos demais solos do grupo.

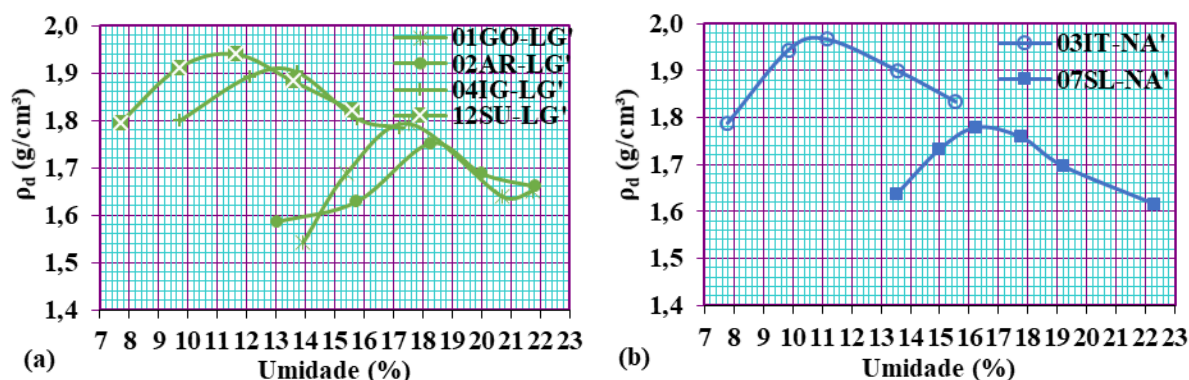


Figura 5.22 – Curvas de Compactação dos solos dos grupos MCT (a) LG' e (b) NA'.

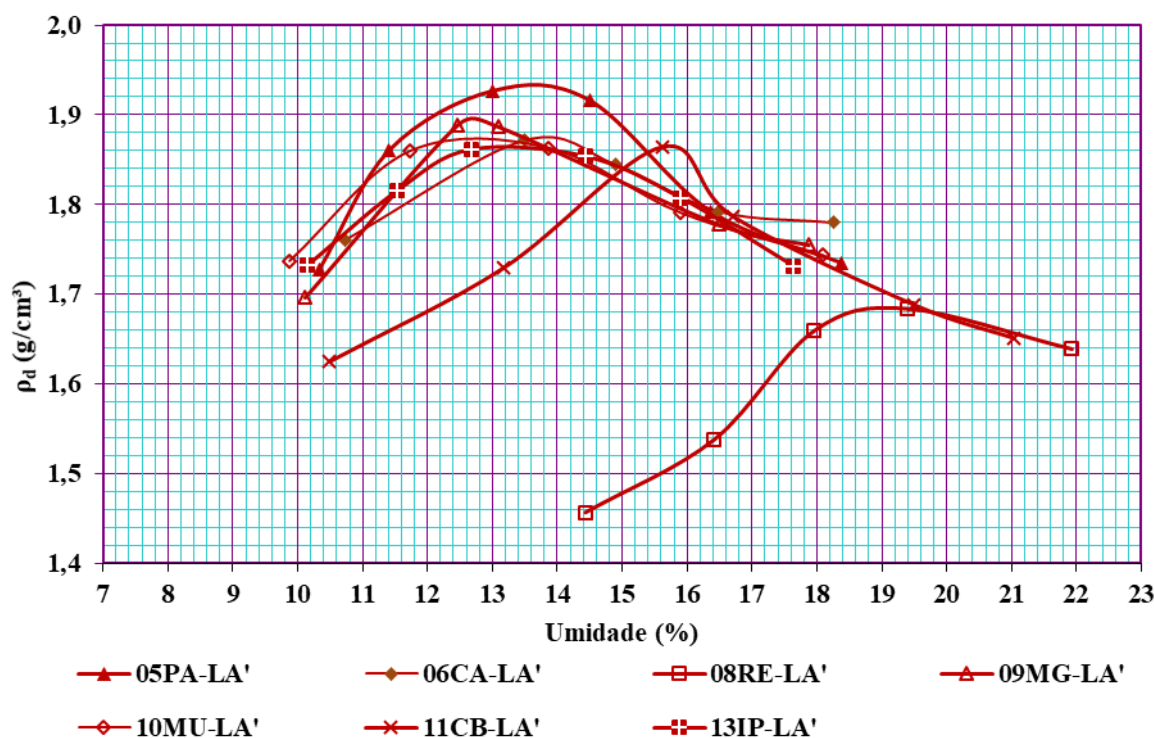


Figura 5.23 – Curvas de Compactação dos solos do grupo MCT LA'.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de umidade ótima ($W_{ót}$, %) e massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$, g/cm³) obtidas. Os valores de $\rho_{dmáx}$ obtidos variaram entre 1,69 - 1,97 g/cm³ e de umidade ótima entre 10,6 – 19 %.

Tabela 5.2 – Massa específica seca máxima e umidade ótima dos solos desta pesquisa.

Amostra	Energia de compactação	$\rho_{dmáx}$, (g/cm ³)	$W_{ót}$ (%)
01GO-LG'	Proctor Intermediária	1,79	17,4
02AR-LG'	Proctor Intermediária	1,75	18,4
03IT-NA'	Proctor Intermediária	1,97	10,6
04IG-LG'	Proctor Intermediária	1,91	13,1
05PA-LA'	Proctor Intermediária	1,94	13,7
06CA-LA'	Proctor Intermediária	1,88	13,8
07SL-NA'	Proctor Intermediária	1,78	16,5
08RE-LA'	Proctor Intermediária	1,69	19
09MG-LA'	Proctor Intermediária	1,90	12,7
10MU-LA'	Proctor Intermediária	1,87	12,7
11CB-LA'	Proctor Intermediária	1,86	15,6
12SU-LG'	Proctor Intermediária	1,94	11,2
13IP-LA'	Proctor Intermediária	1,86	13,2

5.2.7 Curvas característica (SWCC)

As curvas características dos solos estudados, obtidas pelo método do papel filtro, estão apresentadas na Figura 5.24. Observa-se que na fase de saturação há uma ampla diferença nos valores de sucção versus umidade entre os solos, porém próximo de 10.000 kPa as curvas se aglomeram mostrando um comportamento semelhante.

Verifica-se que todos os solos apresentam grande variação do valor da sucção nas umidades mais altas, ou seja, na zona de macroestrutura (parte inicial da curva que é associada aos poros de dimensões maiores), assim como, em geral, apresentam elevados valores de sucção e pontos de entrada de ar. Este comportamento concorda com o observado por Boszczowski e Ligocki (2012) que quanto mais intemperizado o solo, maiores são os valores de sucção apresentados.

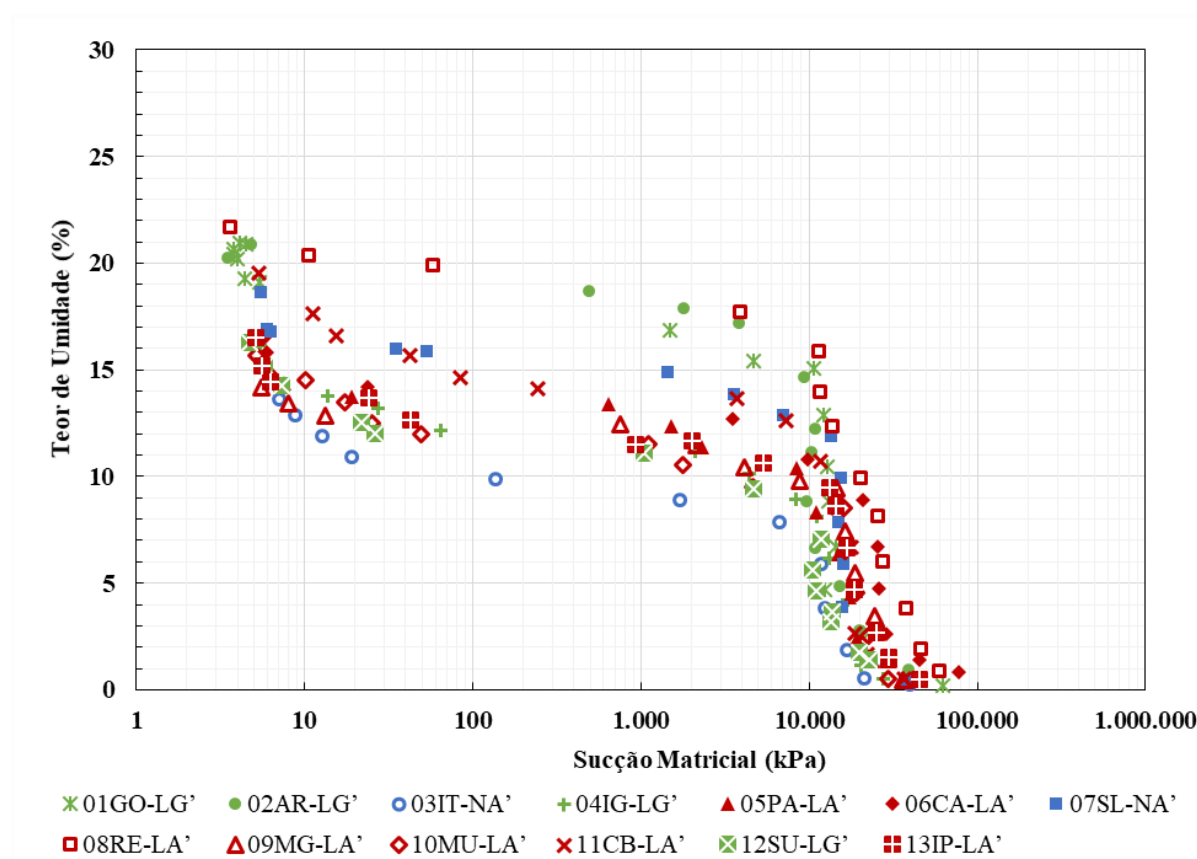


Figura 5.24 – Curvas Características dos solos desta pesquisa.

Considerando as curvas típicas dos solos apresentadas em Gitirana Jr. e Fredlund (2004) verifica-se que os solos desta pesquisa se assemelham aos indicados como argilosos, os quais apresentam valores de entrada de ar superiores aos de solos siltosos e arenosos. Além

disso, o formato das curvas sugere um comportamento bimodal, indicando que tanto os microporos quanto os macroporos controlam os fluxos de entrada e saída de água conforme relatam Feuerharmel *et al.*, (2006).

Os altos valores de sucção obtidos também se assemelham aos obtidos por Marinho e Stuermer (2000) quando estudaram um solo residual maduro de Gnaiss (45% de argila), compactado nas energias Proctor normal e modificado, obtendo valores de entrada de ar variando entre 1000 e 2000 kPa e sucção residual de 15.000kPa.

Na Figura 5.24 também pode-se observar que não há um agrupamento bem definido dos solos de acordo com as classes MCT, então para melhor visualizar este aspecto apresentam-se as Figuras 5.25 a 5.27, cada uma com um grupo MCT. Os solos do grupo LA' apresentaram valores de sucção sutilmente maiores que os demais grupos estudados.

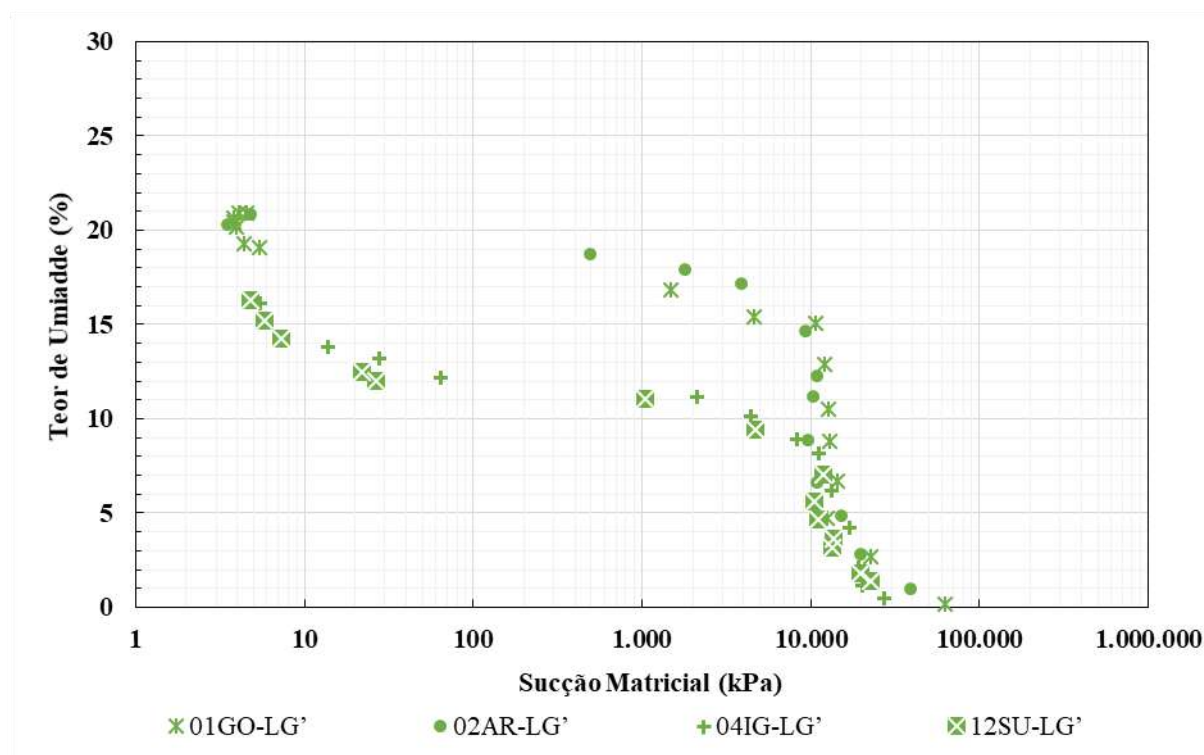


Figura 5.25 – Curvas Características dos solos da Classe LG' desta pesquisa.

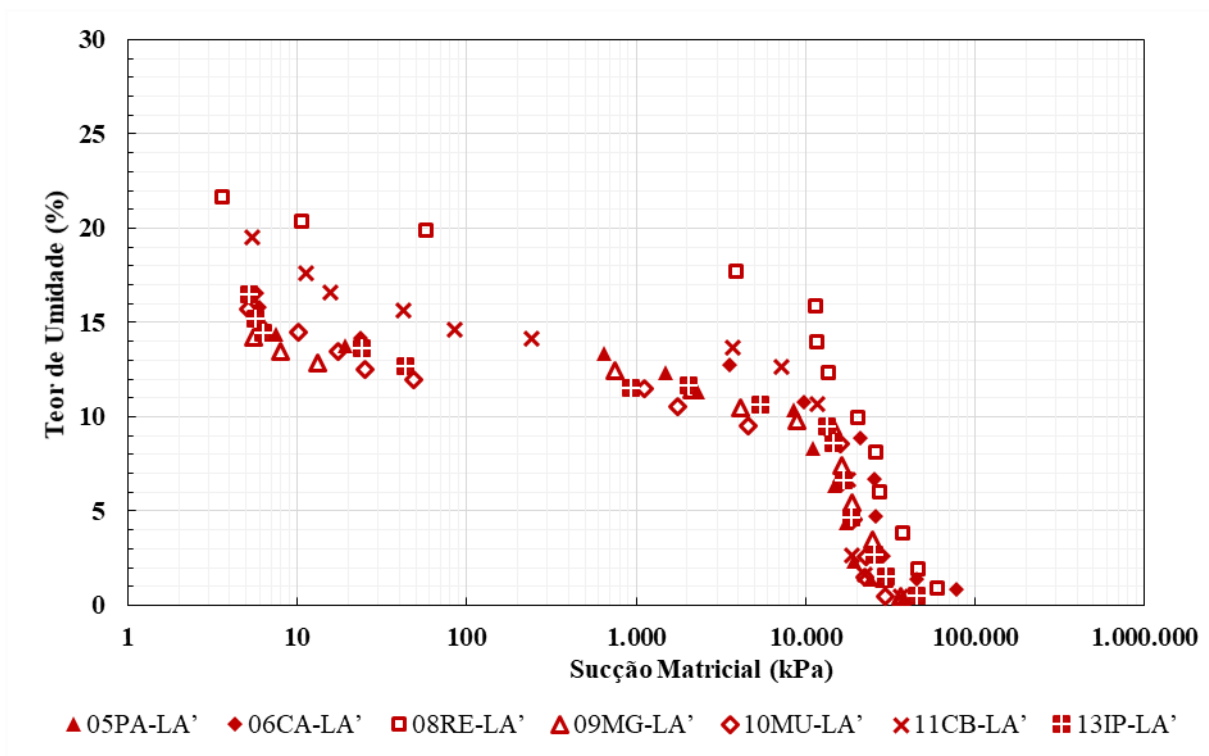


Figura 5.26 – Curvas Características dos solos da Classe LA' desta pesquisa.

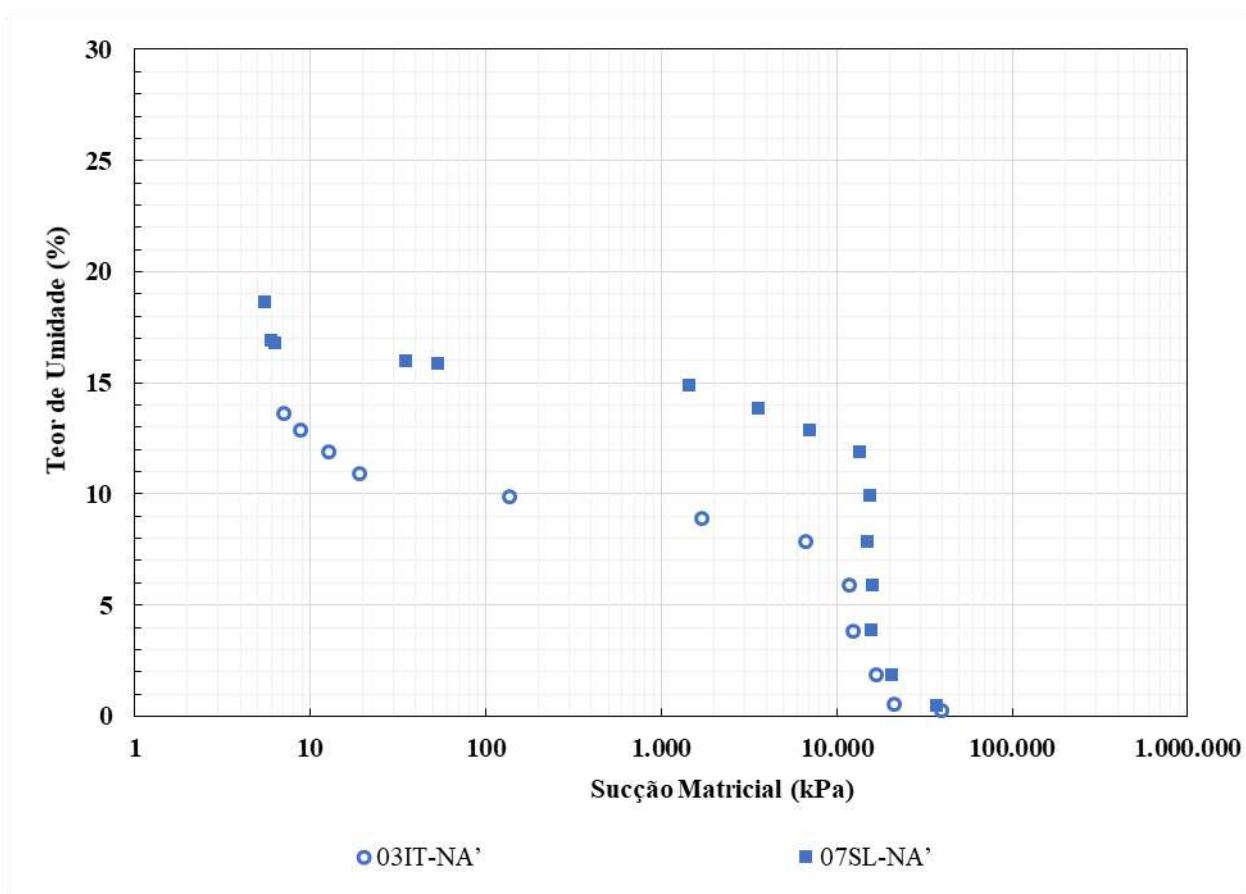


Figura 5.27 – Curvas Características dos solos da Classe NA' desta pesquisa.

Nota-se que alguns solos apresentam comportamento semelhantes de acordo com a granulometria. Os solos 01 e 02 (Figura 5.28a), por exemplo, apresentam valores bastante aproximados, assim como foi observado em suas composições granulométricas; os solos 07 e 11 (Figura 5.28b) apresentam distribuição granulométrica semelhantes; os solos 04, 05 e 09 (Figura 5.28c) possuem tanto composição quanto distribuição granulométricas semelhantes; os solos 10 e 13 (Figura 5.28d) apresentam porcentagem de areia média e grossa similares e os solos 03 e 12 (Figura 5.28e) apresentam porcentagem de silte e argila análogas.

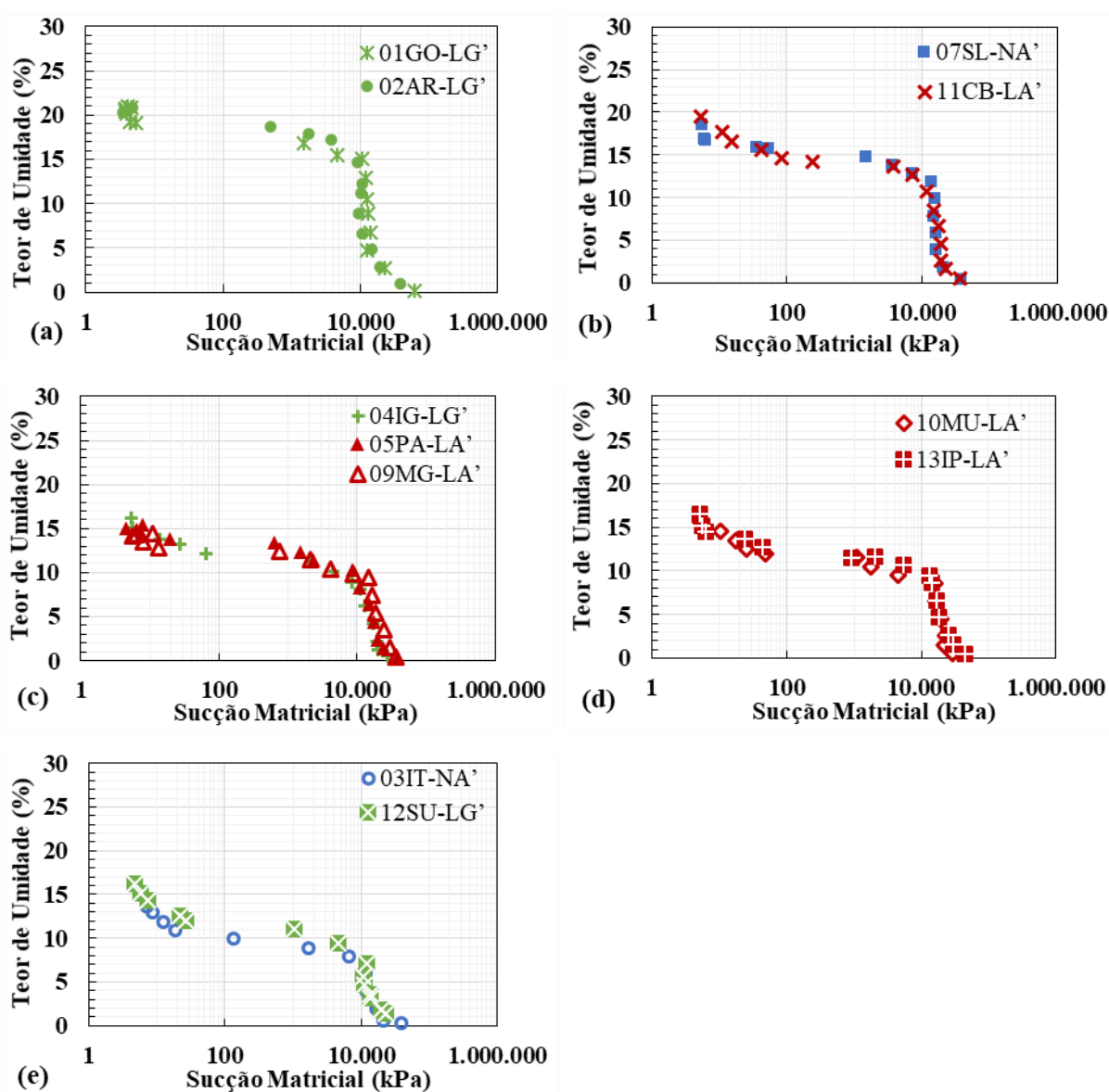


Figura 5.28 – Curvas características com comportamentos e valores semelhantes.

Para todos os solos desta pesquisa foram feitos ajustes considerando os modelos propostos por Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980), Kogusi (1996), Fredlund e Xing (1994), Durner (1994), Gitirana Jr. e Fredlund (2004) e Seki (2007). Como esperado, devido às peculiaridades de comportamento dos solos lateríticos, os modelos bimodais foram os que apresentaram em geral melhor enquadramento.

Devido as similaridades entre os modelos de Durner (1994) e Seki (2007), optou-se por apresentar somente os resultados das modelagens de ajuste das SWCC pelos modelos de Seki (2007) e Gitirana Jr. e Fredlund (2004), conforme mostram as Tabelas 5.3 e 5.4. As equações dos dois modelos mencionados estão apresentadas a seguir (4) e (5).

$$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(\frac{h}{h_{m1}})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(\frac{h}{h_{m2}})}{\sigma_2} \right] \quad (4)$$

Onde:

S_e – Saturação Efetiva (umidade prevista pelo modelo)

h – Sucção obtida no ensaio em laboratório

Q - Função de distribuição normal

$w_1, h_{m1}, h_{m2}, \sigma_1$ e σ_2 – parâmetros do modelo

$$S_e = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b1} \psi_{res1}}} \right)^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{res1} \psi_{b2}}} \right)^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b2} \psi_{res2}}} \right)^{d_3}} \quad (5)$$

Onde:

S = grau de saturação

ψ = sucção obtida no ensaio em laboratório

ψ_b = sucção no ponto de entrada de ar

ψ_{res} = sucção residual

d_1, d_2, d_3 = parâmetros do modelo

Quando se leva em consideração apenas o coeficiente de determinação (R^2), o modelo de Seki (2007) exibe resultados ligeiramente melhores, como pode ser identificado nas Tabelas 5.3 e 5.4. No entanto, o modelo de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) também apresenta valores satisfatórios e, além disso apresenta como vantagem a complementação da curva nas

regiões próximas à saturação e residual, o que pode ser visto como uma modelagem mais completa da SWCC, indicado no gráfico da Figura 5.29.

Tabela 5.3 – Parâmetros do Modelo de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) para as curvas características dos solos desta pesquisa.

Solos	Modelo de Gitirana Jr. e Fredlund (2004)								
	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	ψ_{b2}	S_b	ψ_{res2}	S_{res2}	a	R ²
01GO-LG'	3,50	5,00	0,840	10.000,0	0,820	26.800,0	0,015	0,055	0,992
02AR-LG'	3,00	6,00	0,890	7.500,0	0,850	22.500,0	0,080	0,030	0,944
03IT-NA'	2,50	16,00	0,700	8.000,0	0,620	21.500,0	0,015	0,040	0,990
04IG-LG'	4,00	5,50	0,740	10.000,0	0,590	23.000,0	0,025	0,045	0,989
05PA-LA'	3,40	6,50	0,780	8.700,0	0,720	27.000,0	0,030	0,045	0,988
06CA-LA'	4,80	6,50	0,840	18.000,0	0,770	36.000,0	0,100	0,035	0,983
07SL-NA'	6,00	9,00	0,889	14.000,0	0,830	20.000,0	0,050	0,050	0,911
08RE-LA'	3,80	10,00	0,910	12.000,0	0,870	48.000,0	0,070	0,038	0,980
09MG-LA'	1,20	11,00	0,750	14.000,0	0,720	30.000,0	0,035	0,040	0,984
10MU-LA'	2,10	20,00	0,740	15.000,0	0,660	25.000,0	0,035	0,045	0,987
11CB-LA'	3,80	20,00	0,790	13.500,0	0,710	22.500,0	0,040	0,050	0,980
12SU-LG'	2,00	11,00	0,690	5.500,0	0,660	24.000,0	0,040	0,050	0,971
13IP-LA'	3,50	6,50	0,730	13.800,0	0,650	30.000,0	0,040	0,050	0,990

Tabela 5.4 – Parâmetros do Modelo de Seki (2007) para as curvas características dos solos desta pesquisa.

Amostra	θ_s	θ_r	w1	hm1 = ψ_{b1}	σ_1	hm2 = ψ_{b2}	σ_2	R ²
01GO-LG'	20,575	1,473100	0,22217	5,8572	0,1984	12907,13922	0,21023	0,944
02AR-LG'	20,670	0,002595	0,29700	2269,3	3,3357	11189,11044	0,37209	0,946
03IT-NA'	34,343	0,060703	0,74413	0,82979	2,3626	12612,46939	0,35558	0,992
04IG-LG'	17,635	0,000008	0,40126	14,533	1,8539	14388,72914	0,38821	0,992
05PA-LA'	14,353	0,255290	0,30154	1463,6	1,0567	15841,96674	0,32833	0,994
06CA-LA'	29,307	0,988570	0,63061	0,32463	4,2509	24626,43652	0,20083	0,985
07SL-NA'	23,603	1,014300	0,39466	5,3570	0,1855	15118,56470	0,14148	0,958
08RE-LA'	22,259	0,000049	0,18043	19,195	1,8731	21346,07762	0,71993	0,992
09MG-LA'	13,486	0,257970	0,27207	1526,5	1,1224	20380,32625	0,31759	0,990
10MU-LA'	23,905	0,453910	0,57464	2,6168	2,4520	18170,33176	0,20870	0,987
11CB-LA'	33,595	0,173300	0,61646	1,0421	3,1588	16277,25290	0,29486	0,988
12SU-LG'	17,195	0,001530	0,32755	8,1296	0,8277	10181,03091	0,77011	0,978
13IP-LA'	26,854	0,603890	0,60050	1,2120	3,1550	17888,41044	0,33955	0,989

Nota: θ_s é a umidade de saturação e θ_r é a umidade residual.

Como mencionado no capítulo de Materiais e Métodos, também foram realizados medida de sucção nos CPs que saíram do ensaio de MR. A Figura 5.29 mostra, a título de exemplo, a curva característica da amostra 11CB-LA' com as curvas de ajustes dos modelos bimodais testados e com a adição dos valores de sucção medidos após o ensaio de MR. Nele é possível notar que os três modelos se adequaram bem ao formato da curva e esse fato foi notado nas SWCC de todos os solos.

No gráfico também foi indicado o valor da umidade ótima como referência. Ressalta-se que as umidades do ensaio de papel filtro após o ensaio de MR são ligeiramente menores do que as umidades de compactação realizadas para o ensaio de MR propriamente dito, pois sempre há perdas durante o processo.

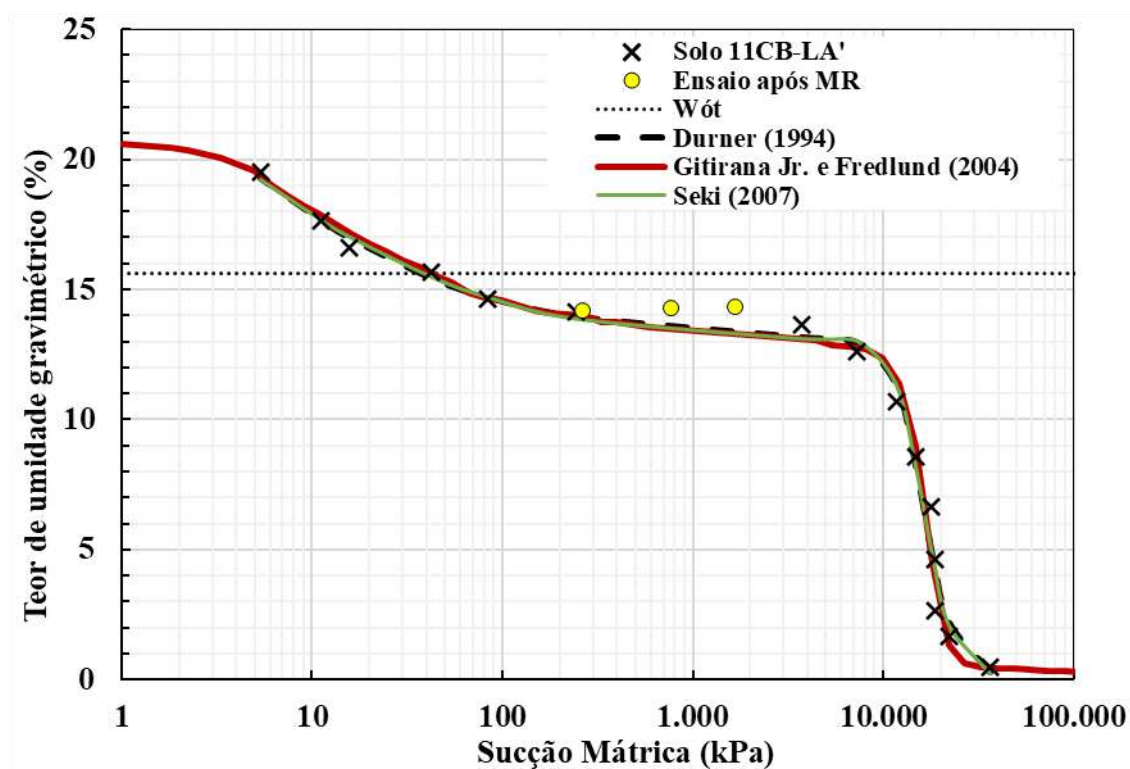


Figura 5.29 – Curva Característica do solo 11CB-LA' e os ajustes segundo os modelos de Durner (1994), Gitirana e Fredlund (2004) e Seki (2007).

Em relação aos valores de sucção medidos após o MR, observa-se que houve uma boa correspondência com a SWCC. Nota-se que os valores de umidade dos corpos de prova do MR foram ligeiramente menores que a W_o , o que também foi notado na maioria dos solos estudados nesta pesquisa. Observou-se que nos solos 05 e 07 para umidades semelhantes obteve-se valores de sucção ligeiramente maiores nos corpos de prova do MR, mostrando uma sensibilidade desses materiais à variação de sucção vs. umidade.

Além disso, os valores encaixaram-se em um trecho da curva na qual não se conseguiu obter pontos na SWCC indicando que o processo adotado no ato da compactação influenciou nos valores de sucção obtidos, visto que para traçar as SWCC utilizou-se a compactação manual e no MR usou-se compactador automático. Esse entendimento pode ser associado à afirmação de Camapum de Carvalho *et al.*, (2015) que dizem que o processo de

compactação atinge apenas os macroporos e que estes juntamente com a água controlam o comportamento dos solos tropicais intemperizados.

Neste contexto, entende-se que o processo de compactação influenciou diretamente no arranjo estrutural das partículas dos solos estudados e consequentemente no seu comportamento não-saturado. Outrossim, pode-se inferir ainda que a compactação automática seja benéfica para o comportamento não saturado desses solos, visto que pode proporcionar um controle melhor da distribuição dos poros e, por consequência, valores de sucção maiores que as obtidas pela compactação manual.

A Figura 5.30 apresenta um gráfico com os valores de sucção correspondentes à umidade ótima extraídas das curvas características ajustadas. Os solos 02AR-LG' e 12SU-LG' apresentam valores altos de sucção na umidade ótima ($\psi_{-w_{ót}}$, 800 e 1000 kPa, respectivamente), os solos 01GO-LG', 05PA-LA', 08RE-LA' e 09MG-LA' apresentam valores entre 100 e 400 kPa, as demais amostras mostraram valores inferiores a 50kPa.

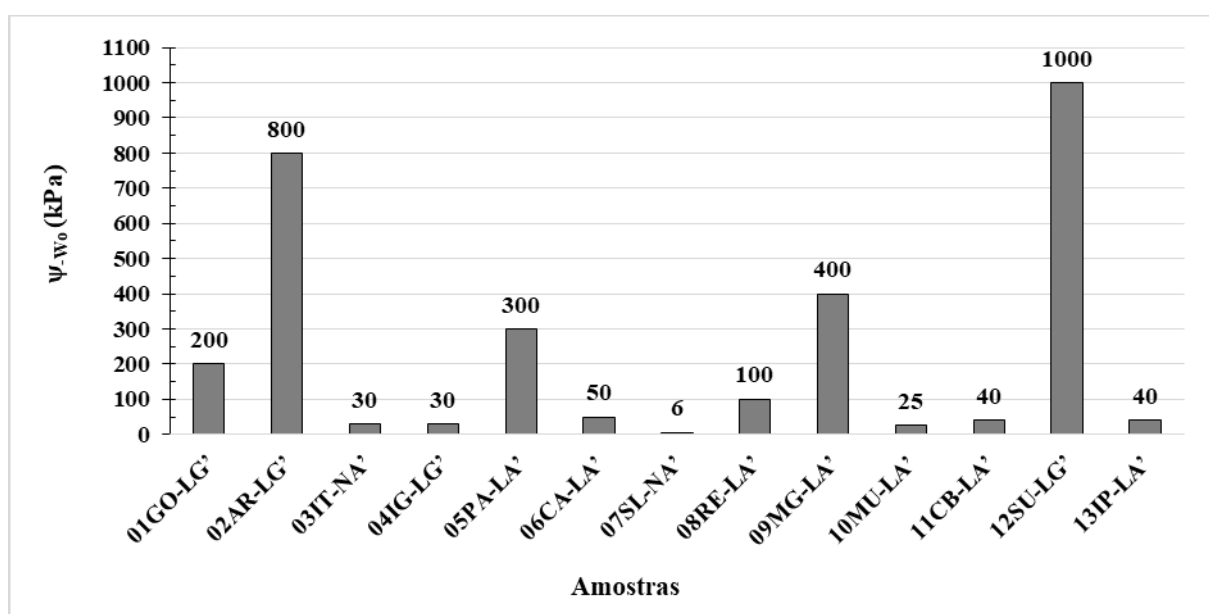


Figura 5.30 – Sucção na umidade ótima ($\psi_{-w_{ót}}$) dos solos desta pesquisa.

Ressalta-se que, apesar da amostra 07SL-NA' ter apresentado o menor valor de sucção na umidade ótima considerando a SWCC (6 kPa), ao considerar a sucção obtida com os corpos de prova do MR (em umidade próxima), o valor da sucção sobe para a faixa de 400 a 800 kPa. Assim, julgou-se importante indicar aqui e separadamente na Tabela 5.5, as faixas de variação dos valores de sucção mátrica próximo da umidade ótima (máximo de $\pm 1,5\%$ da W_o) observadas nos solos desta pesquisa considerando as duas fontes: SWCC e medida pós MR.

Nota-se que há uma faixa de valores de sucção em torno da umidade ótima bastante ampla, corroborando com as observações de Fredlund, Sheng e Zhao (2011) quando estudaram a estimativa da sucção do solo em campo. No solo 05, por exemplo, há uma diferença de 673 kPa entre a sucção referente à umidade de 13,8% que é apenas 0,1 % acima da W_o e a umidade de 13,2 que é 0,5% abaixo da W_o , já no solo 09, em que a variação de umidade é menor ainda (0,2% abaixo e 0,1% acima da W_o) obteve-se uma grande variação de sucção (mais de 1.000 kPa).

Tabela 5.5 – Faixas de variação dos valores de sucção mátrica próximo a umidade ótima (máximo de $\pm 1,5\%$ da W_o) dos solos desta tese

Solo	W_o (%)	$\theta_{\min}$ (%)	Desvio de umidade 1 ($W_o - \theta_{\min}$)	$\theta_{\max}$ (%)	Desvio de umidade 2 ($\theta_{\max} - W_o$)	$\Psi_{\min}$ (kPa)	$\Psi_{\max}$ (kPa)	Dif. Ψ
01GO-LG'	17,4	16,7	0,7	19,1	1,7	5,41	755	750
02AR-LG'	18,4	18	0,4	18,7	0,3	490,00	846	356
03IT-NA'	10,6	9,95	0,7	10,8	0,2	19,30	1.109	1.090
04IG-LG'	13,1	12,6	0,5	13,1	0,0	27,56	676	648
05PA-LA'	13,7	13,2	0,5	13,8	0,1	19,12	692	673
06CA-LA'	13,8	13,1	0,7	14,2	0,4	23,75	757	733
07SL-NA'	16,5	15,9	0,6	16,8	0,3	6,24	813	807
08RE-LA'	19	17,8	1,2	19,9	0,9	58,37	1.371	1.313
09MG-LA'	12,7	12,5	0,2	12,8	0,1	13,25	1.088	1.075
10MU-LA'	12,7	12,1	0,6	12,5	-0,2	25,00	1.671	1.646
11CB-LA'	15,6	14,3	1,3	15,7	0,1	42,41	1.673	1.631
12SU-LG'	11,2	11	0,2	12,1	0,9	423,00	1.038	615
13IP-LA'	13,2	12	1,2	13,7	0,5	24,26	1.770	1.746

5.2.8 Constituição química

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados dos ensaios químicos realizados. Na Tabela 5.6 constam os resultados de pH em água (pH_{H_2O}), pH em KCl (pH_{KCl}), ΔpH (diferença entre o pH obtido em KCl e o pH obtido em água), Ca, Mg, Na, K e também a densidade real dos grãos (δ). Na Tabela 5.7 constam os resultados de Al, P, CO, MO, H+Al, N e CTC.

Tabela 5.6 – Parte 1 dos Resultados dos ensaios químicos dos solos desta pesquisa.

Amostra	δ	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Δ pH	Ca (cmol _c dm ⁻³)	Mg (cmol _c dm ⁻³)	Na (cmol _c dm ⁻³)	K (cmol _c dm ⁻³)
01GO-LG'	2,634	4,70	4,00	-0,70	0,70	0,30	0,08	0,08
02AR-LG'	2,674	4,90	4,10	-0,80	0,80	0,45	0,10	0,04
03IT-NA'	2,654	4,90	4,00	-0,90	0,35	0,33	0,11	0,02
04IG-LG'	2,629	4,80	3,90	-0,90	0,25	0,33	0,08	0,03
05PA-LA'	2,642	4,60	3,90	-0,70	0,18	0,08	0,06	0,01
06CA-LA'	2,666	4,60	4,00	-0,60	0,15	0,50	0,03	0,01
07SL-NA'	2,693	4,40	4,10	-0,30	0,30	0,25	0,04	0,09
08RE-LA'	2,699	4,60	4,10	-0,50	0,50	0,05	0,00	0,04
09MG-LA'	2,679	4,60	4,00	-0,60	0,35	0,00	0,03	0,01
10MU-LA'	2,681	4,50	3,90	-0,60	0,05	0,45	0,03	0,01
11CB-LA'	2,682	4,40	4,00	-0,40	0,25	0,15	0,04	0,02
12SU-LG'	2,674	4,80	4,00	-0,80	0,15	0,00	0,01	0,00
13IP-LA'	2,681	4,70	4,00	-0,70	0,30	0,40	0,03	0,00

Tabela 5.7 – Parte 2 dos Resultados dos ensaios químicos dos solos desta pesquisa.

Amostra	Al (cmol _c dm ⁻³)	P (mg dm ⁻³)	CO (gkg ⁻¹)	MO (gkg ⁻¹)	H+Al (cmol _c dm ⁻³)	N (gkg ⁻¹)	CTC (cmol _c dm ⁻³)	S (%)	V (%)
01GO-LG'	0,67	0,00	4,40	7,59	3,47	0,42	4,63	36,61	25,05
02AR-LG'	0,55	0,00	4,13	7,12	3,16	0,36	4,55	28,35	30,55
03IT-NA'	0,62	0,00	2,23	3,85	1,99	0,16	2,80	43,36	28,93
04IG-LG'	1,10	2,00	3,21	5,53	2,86	0,18	3,55	61,45	19,44
05PA-LA'	1,25	1,00	2,97	5,11	3,42	0,26	3,75	79,11	8,80
06CA-LA'	0,82	0,00	2,54	4,37	3,16	0,29	3,85	54,30	17,92
07SL-NA'	0,48	0,00	2,51	4,32	3,16	0,31	3,84	41,38	17,71
08RE-LA'	0,67	0,00	4,17	7,19	3,81	0,31	4,40	53,17	13,41
09MG-LA'	1,06	0,00	3,29	5,68	5,03	0,21	5,42	73,10	7,20
10MU-LA'	1,20	0,00	3,63	6,25	5,20	0,21	5,74	68,97	9,41
11CB-LA'	0,60	0,00	3,87	6,67	4,00	0,23	4,46	56,60	10,31
12SU-LG'	1,01	0,00	3,45	5,94	3,91	0,18	4,07	86,32	3,93
13IP-LA'	0,91	0,00	2,57	4,43	3,91	0,21	4,64	55,49	15,73

Os valores de densidade real dos grãos obtidos foram entre 2,629 – 2,699 que é aproximada, de acordo com dados de Gidigas (1976), ao do mineral de quartzo (2,65 a 2,66) e do argilomineral caulinita (2,60 a 2,68) o que é coerente uma vez que boa parte dos solos estudados é composta pelas frações areia e argila. Somente as amostras 07SL-NA' e 08RE-LA' apresentaram valores acima dos de referência, inferindo que há outros minerais mais pesados nesses solos, podendo ser óxido de ferro uma vez que estes dois solos apresentaram coloração avermelhada.

A medida de pH reflete a acidez ativa do solo, e os resultados obtidos são considerados baixos (< 5), ou seja, são solos com elevada acidez. Especificamente em água obteve-se valores entre 4,4 e 4,9 (Figura 5.31) indicando a presença de alumínio trocável (Sobral *et al.*, 2015), o que indica possíveis ganhos em processos de estabilizações químicas, ou seja, para os solos desta pesquisa também pode ser viável a aplicação deste procedimento para melhorar as condições mecânicas dos mesmos para uso em pavimentos submetidos a tráfego pesado (observado os cuidados com a drenagem).

Ao analisar o ΔpH ($\text{pH}_{\text{KCL}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), associa-se o predomínio de argilas silicatadas (esmetitas ou caulinitas), uma vez que foram obtidos valores negativos. Um valor positivo indica predominância de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio como gibbsita, goethita e hematita; um valor negativo indica uma predominância de minerais de argila como caulinita e illita segundo Farias (2012) e Camapum de Carvalho *et al.*, (2015b).

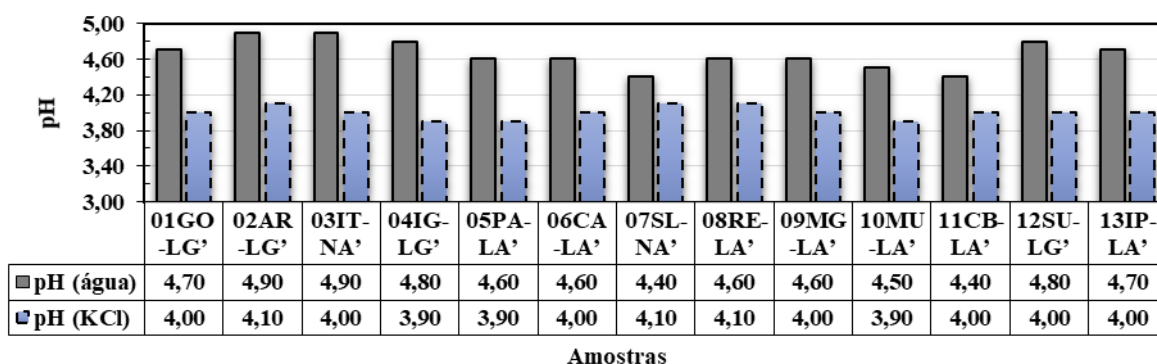


Figura 5.31 Valores do pH em água (H_2O) e em KCL dos solos deste estudo.

Os teores de alumínio apresentaram níveis variáveis. Segundo a bibliografia supramencionada tem-se que: $\text{Al} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ - baixo, entre $0,5-1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ - médio e, $>1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ - alto. O solo 07SL-NA' apresentou baixo teor de Al, as amostras 04IG-LG', 05PA-LA', 09MG-LA', 10MU-LA', 12SU-LG' apresentaram alto teor e as demais como teor médio.

Quanto ao cálcio, todos os resultados indicam baixa presença ($<1,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e ao magnésio a maioria apresentou valor baixo ($<0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), somente os solos 02, 06 e 10 apresentaram teor médio ($0,4\text{-}1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Tais resultados são típicos de solos bastante intemperizados como é o caso dos solos lateríticos.

A Figura 5.32 apresenta graficamente os resultados da Capacidade de Troca Catiônica (CTC). Segundo Sobral *et al.*, (2015) solos com CTC menor que $5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ indicam predominância de argila 1:1 como a caulinita, característica também confirmada por Gidigas (1976) e Das (2008) quando indicam uma CTC entre $3\text{-}15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a caulinita. Valores acima de CTC de $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ indicam presença de argila do tipo 2:1, que são as argilas expansivas. Dos resultados obtidos, a CTC apresentou valores entre $2,8 - 5,74 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Onze solos mostraram predominância das argilas do tipo 1:1 e somente os solos 09MG-LA' e 10MU-LA' apresentaram $\text{CTC} > 5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, mas ainda assim considera-se uma CTC baixa.

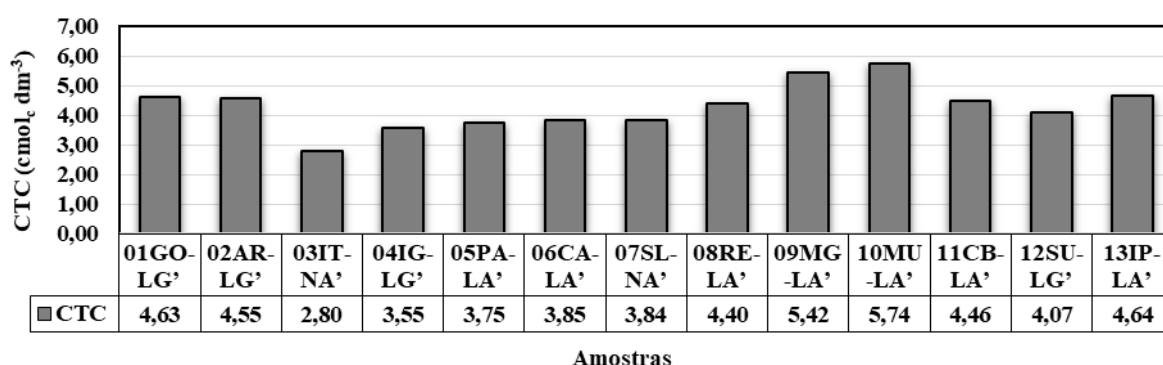


Figura 5.32 – Capacidade de Troca Catiônica dos solos deste estudo.

Em relação a Matéria Orgânica (MO) todos os solos analisados apresentaram baixos teores ($< 15 \text{ g.kg}^{-1}$) segundo critério indicado por Prezotti (2013). O fósforo (P) só foi identificado em duas amostras (04IG-LG' e 05PA-LA') porém ainda assim com baixíssimo teor ($<5 \text{ mg.dm}^{-3}$) segundo Prezotti (2013). Estes resultados corroboram com a indicação de que os solos estudados são bem intemperizados.

Para todos os solos, a porcentagem de saturação por bases (V, %) indicadas na Tabela 5.7 são consideradas “baixas” ($< 50\%$) segundo Prezotti (2013). Já saturação por alumínio (S, %) apresentou classificação como “baixa” ($< 50\%$) segundo Prezotti (2013) nos solos 01GO-LG', 02AR-LG', 03IT-NA' e o 07SL-NA'; classe “média” ($50\% - 70\%$); nos solos 04IG-LG', 06CA-LA', 08RE-LA', 10MU-LA', 11CB-LA' e 13IP-LA' e, classe “alta” ($>70\%$) nos solos 05PA-LA', 09MG-LA' e 12SU-LG'.

5.2.9 Mineralogia por DRX e Microscopia

As Figuras 5.33 a 5.39 apresentam os difratogramas resultantes dos ensaios de DRX realizados. De maneira geral observa-se que os solos são basicamente constituídos pelos mesmos minerais, que são: Caulinita (K), Ilita (I), Quartzo (Qz), Alumina (A), Hematita (He), Goetita (Gt), Calcita (Ca) e a Gibbsita (Gb) sendo mais expressivos os picos de caulinita e quartzo.

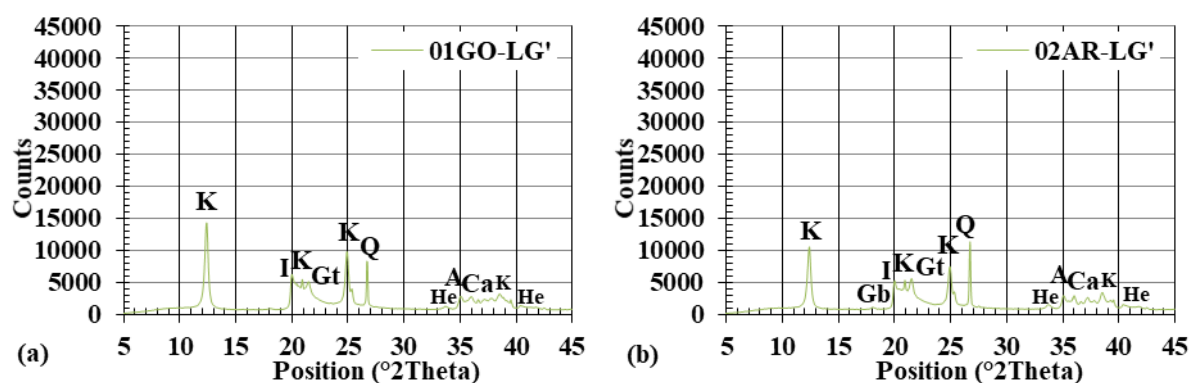


Figura 5.33 – Difratoograma dos solos (a) 01GO-LG' e 02AR-LG'.

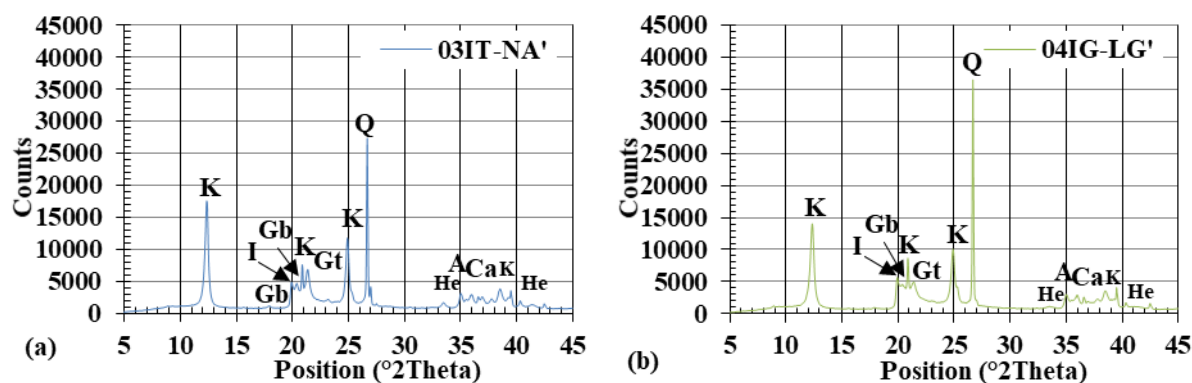


Figura 5.34 – Difratoograma dos solos (a) 03IT-NA' e 04IG-LG'.

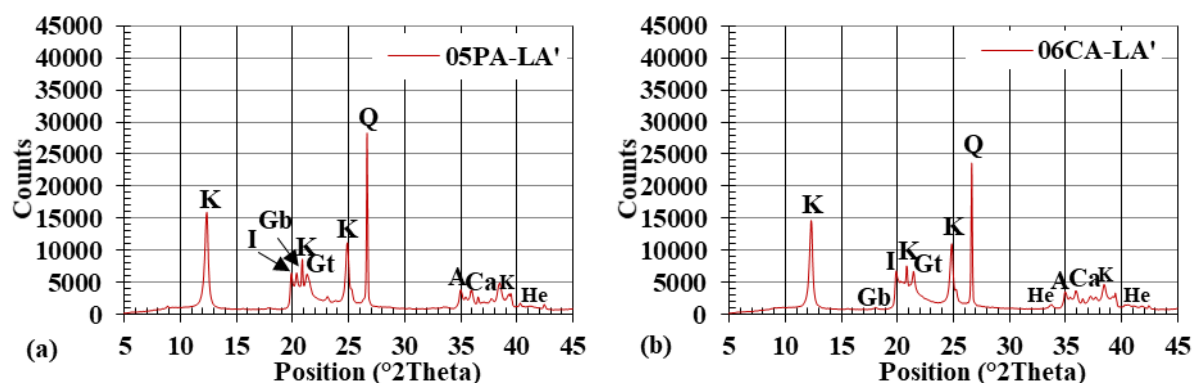


Figura 5.35 – Difratoograma dos solos (a) 05PA-LA' e 06CA-LA'.

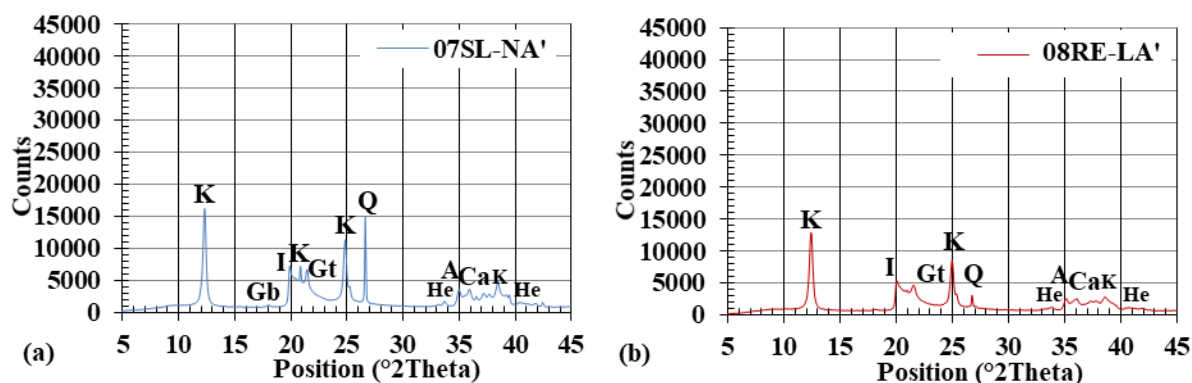


Figura 5.36 – Difratoograma dos solos (a) 07SL-NA' e 08RE-LA'.

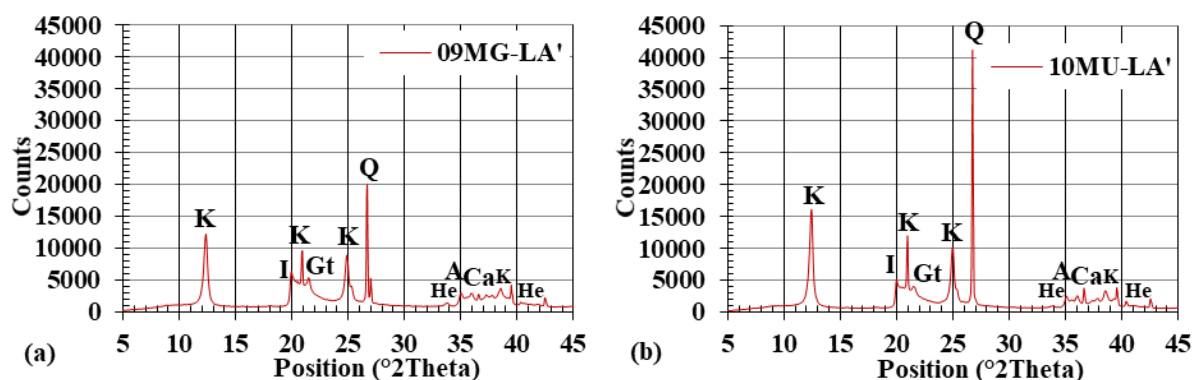


Figura 5.37 – Difratoograma dos solos (a) 09MG-LA' e 10MU-LA'.

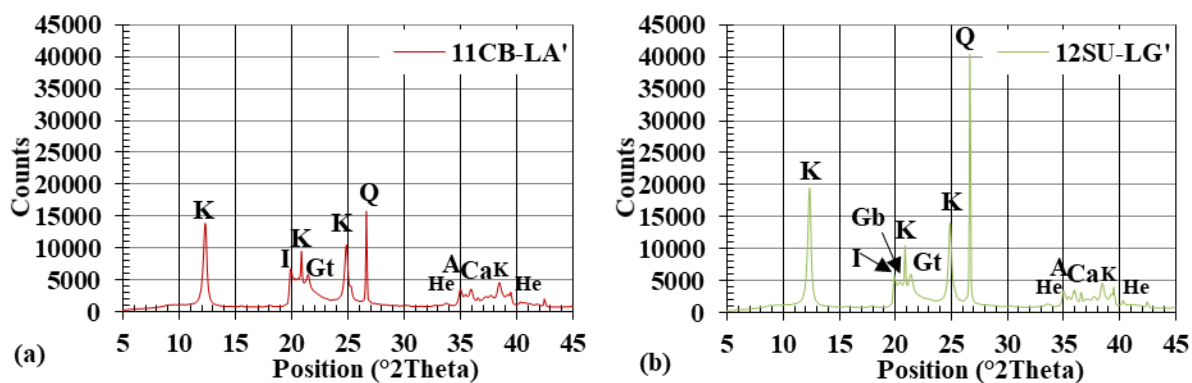


Figura 5.38 – Difratoograma dos solos (a) 11CB-LA' e 12SU-LG'.

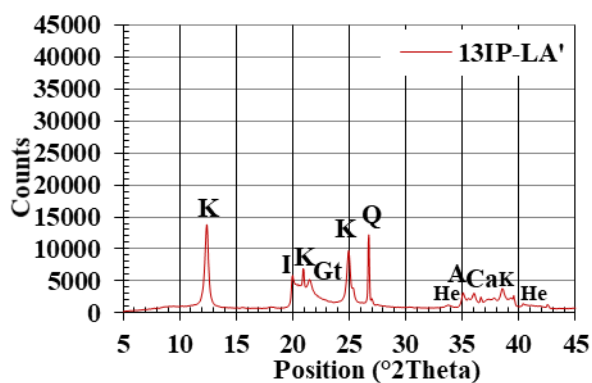


Figura 5.39 – Difratoograma do solo 13IP-LA'.

A caulinita é um argilomineral de estrutura 1:1, não expansivo, com a seguinte fórmula química: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, sendo, portanto, composto basicamente por alumínio e sílica. A illita, cuja fórmula química é $\text{K}_{0,6}(\text{H}_3\text{O})_{0,4}\text{Al}_{1,3}\text{Mg}_{0,3}\text{Fe}^{2+}_{0,1}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})$, composta fundamentalmente por potássio, alumínio, magnésio, ferro e sílica, também é um argilomineral que não apresenta caráter expansivo, apesar de ser do grupo das micas, com estrutura 2:1.

A indicação da presença da caulinita e illita (que se apresentou em menor proporção - inferido pela intensidade dos picos) corroboram com os resultados dos ensaios químicos e também com a pedologia, uma vez que ambos indicaram tratar-se de solos bem desenvolvidos. Porém, verifica-se que os solos estudados ainda podem sofrer mais com os processos de intemperismo, o que talvez resultaria em difratogramas sem a indicação da presença da illita e, também, com resultados de ΔpH positivos que são típicos das argilas óxídicas, onde predominam os óxidos de ferro e alumínio, como ocorrem em alguns latossolos, segundo Lespch (2011).

Ainda assim, foi observada sutilmente a presença da gibbsita (fórmula química: $\text{Al}(\text{OH})_3$) em alguns dos solos estudados, a saber as amostras 02 a 07 e a número 12, que é um hidróxido de alumínio, resultante da decomposição da caulinita. Marangon (2004) também encontrou a presença destes elementos nos solos de sua pesquisa e afirmou que devido ao fato de a gibbsita ser bem reativa à cal hidratada, pode-se ter a perspectiva de uso alternativo destes solos estabilizados quimicamente com a cal em projetos com maior volume de tráfego.

Também foram observados a presença dos óxidos de ferro (Hematita - Fe_2O_3 e Goetita - FeO) e de alumínio (alumina - Al_2O_3), que são típicos de solos tropicais lateríticos. De forma sutil, também foi identificada a presença de calcita (CaCO_3), um carbonato de cálcio que é o principal constituinte do calcário, porém também é muito comum de ser encontrado nos solos (Gidigas, 1976). O Quadro 5.4 apresenta um resumo dos resultados das análises mineralógicas por DRX para as amostras deste estudo.

As imagens realizadas através do Stereo Microscópio estão apresentadas nas Figuras 5.40 a 5.60. Conforme mencionado no capítulo 3, foram extraídas imagens das frações fina (material passante na peneira n.º 10 e retido na peneira n.º 200) e grossa (material retido na peneira n.º 10) e com várias aproximações, porém para otimização do espaço será apresentado aqui apenas uma imagem de cada fração (por amostra), e alguma imagem registrada especificamente para detalhar algum mineral especial identificado.

Quadro 5.4 – Composição mineralógica dos solos por meio da análise ensaio de DRX.

Amostra	Caulinita	Ilita	Quartzo	Alumina	Hematita	Goetita	Calcita	Gibbsita
01GO-LG'	++	+	+	traços	traços	+	traços	-
02AR-LG'	++	+	++	traços	traços	+	traços	traços
03IT-NA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	traços
04IG-LG'	++	+	++	traços	traços	+	traços	traços
05PA-LA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	+
06CA-LA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	traços
07SL-NA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	traços
08RE-LA'	++	+	+	traços	traços	+	traços	-
09MG-LA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	-
10MU-LA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	-
11CB-LA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	-
12SU-LG'	++	+	++	traços	traços	+	traços	traços
13IP-LA'	++	+	++	traços	traços	+	traços	-

++: presença predominante (picos maiores); +: presente em menores proporções (picos médios); traços: picos sutis; -: ausente/não detectado.

Ao analisar as imagens observa-se uma certa semelhança nos minerais encontrados nestas frações, sendo marcadamente compostos por grãos de: quartzo (Qz), hidróxidos de ferro (limonita - L, detalhe nas Figuras 5.43, 5.45, 5.47, 5.50 e 5.60), concreções de hidróxido de ferro revestido por sílica - C (detalhe nas Figuras 5.45 e 5.56), aglomerados de hidróxidos de ferro e grãos de quartzo – A (detalhe nas Figuras 5.45, 5.50, 5.58 e 5.60), e (em algumas amostras) fragmentos de rocha “fresca” – R (detalhe nas Figuras 5.43 e 5.54).

De acordo com o relato de King (s.d.), antigamente o termo “limonita” era utilizado para se referir a muitos óxidos de ferro, amorfos e de composição variável, como goetita, magnetita e hematita (por exemplo). Diz ainda que a definição mais recente, indica tratar-se de um mineralóide composto por óxidos de ferro hidratados, sendo também, usado em campo e em sala de aula para denotar o conjunto de óxidos e hidróxidos de ferro cuja identidade exata não pode ser feita sem testes laboratoriais e este foi o sentido dado ao termo limonita nesta tese.

Os grãos de quartzo da maioria das amostras apresentaram-se impregnados por limonita (exceto amostra 03IT-NA'). Nas amostras 04IG-LG', 06CA-LA' e 12SU-LG' foram observados indícios de fraturamento dos grãos de quartzo, indicando tratar-se de materiais que ainda sofreriam redução com o intemperismo. Para evitar repetições nas análises, montou-se o Quadro 5.5 que apresenta quais dos elementos citados foram observados em cada amostra.

Quadro 5.5 – Composição dos solos por meio da análise das imagens por Stereo microscópio.

Amostra	Quartzo	Limonita	Concreções de limonita e sílica	Aglo- mera- dos	Fragmen- to de Rocha	Impregna- ção por limonita	Indícios de fratura- mento
01GO-LG'	X	X	X	-	-	X	-
02AR-LG'	X	X	X	-	-	X	-
03IT-NA'	X	X	-	-	X	-	-
04IG-LG'	X	X	X	X	-	X	X
05PA-LA'	X	X	-	X	X	X	-
06CA-LA'	X	X	X	X	-	X	X
07SL-NA'	X	X	X	-	-	X	-
08RE-LA'	X	X	X	-	-	X	-
09MG-LA'	X	X	X	-	X	X	-
10MU-LA'	X	-	-	-	-	X	-
11CB-LA'	X	X	X	-	-	X	-
12SU-LG'	X	X	X	X	-	X	X
13IP-LA'	X	X	-	X	X	X	-

Notações: "X": indicação da presença do elemento; "-": ausente/não detectado.

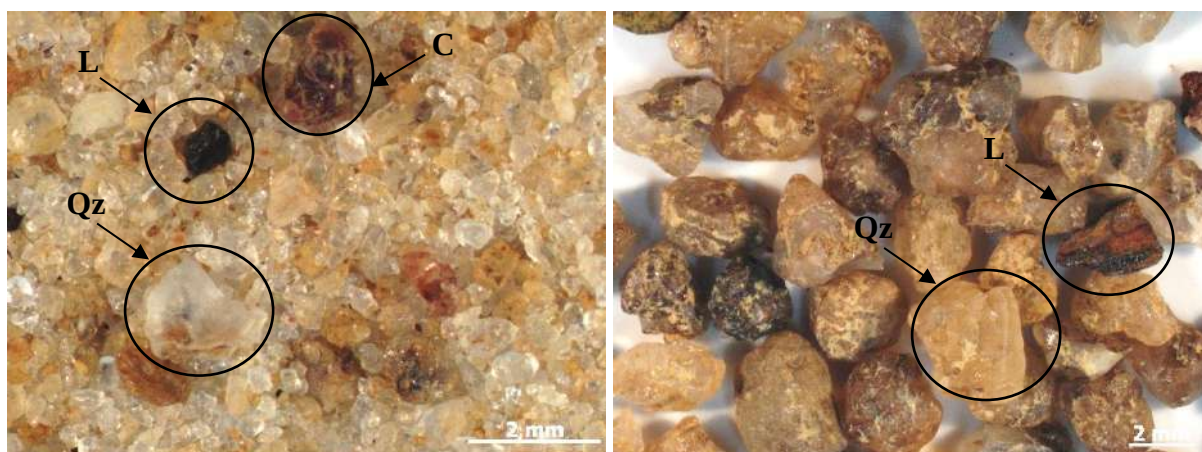


Figura 5.40 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 01GO-LG'.

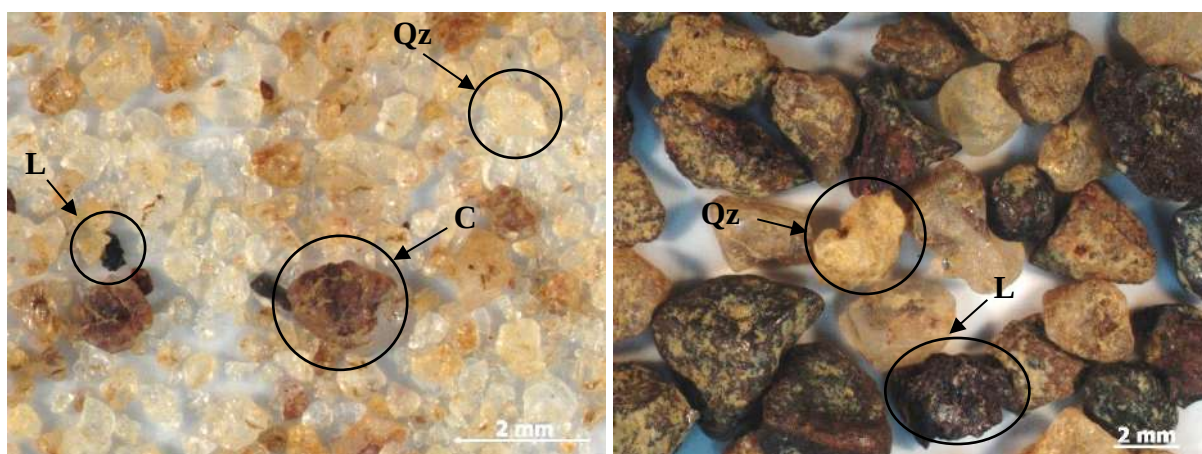


Figura 5.41 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 02AR-LG'.

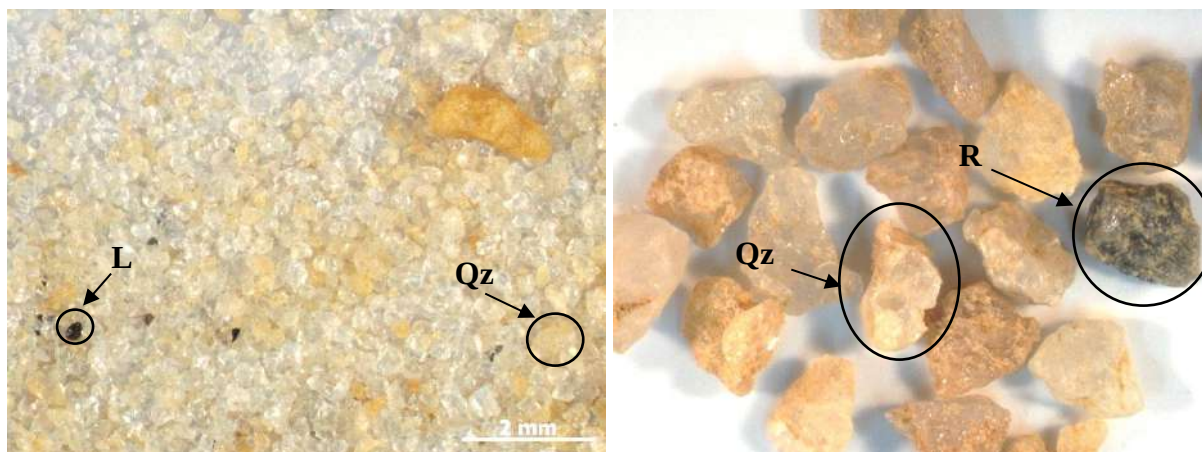


Figura 5.42 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 03IT-NA'.

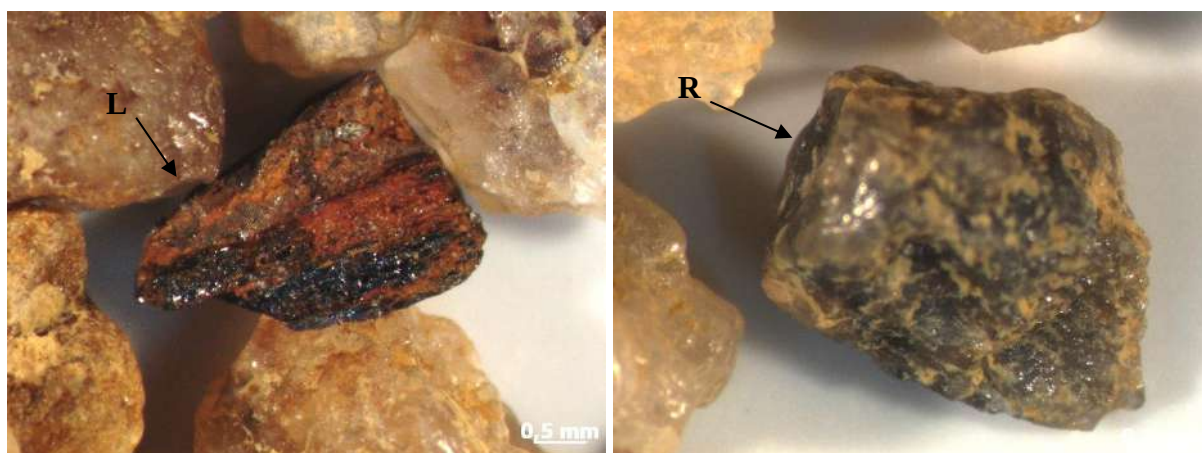


Figura 5.43 – Imagens microscópicas (detalhe) das amostras 01GO-LG' (à esquerda) e 03IT-NA' (à direita).

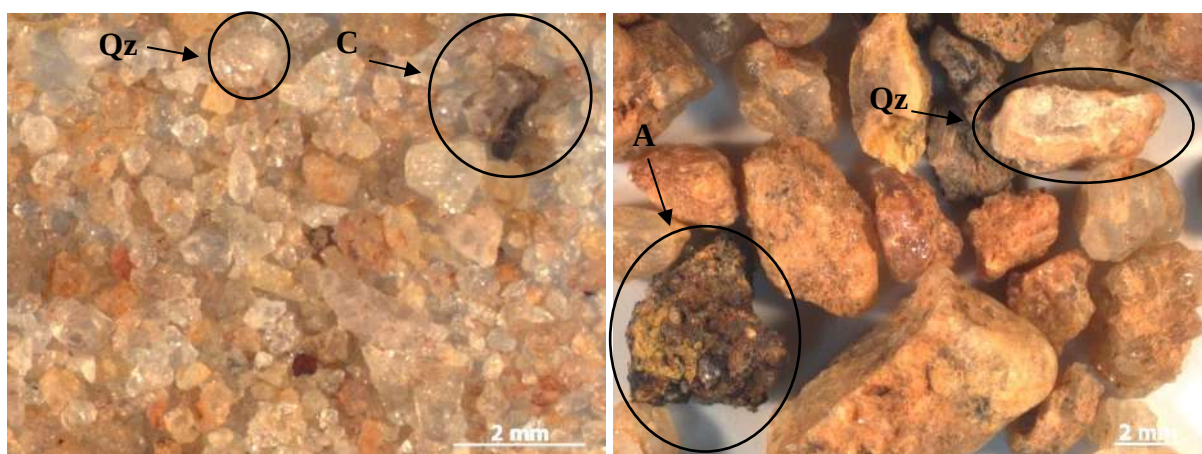


Figura 5.44 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 04IG-LG'.



Figura 5.45 – Imagens microscópicas (detalhe) da amostra 04IG-LG'.

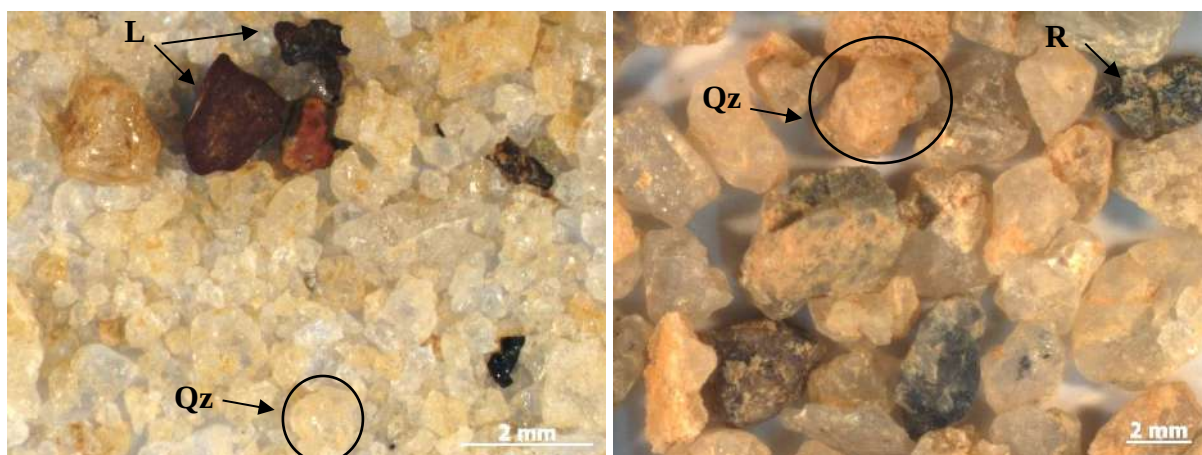


Figura 5.46 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 05PA-LA'.

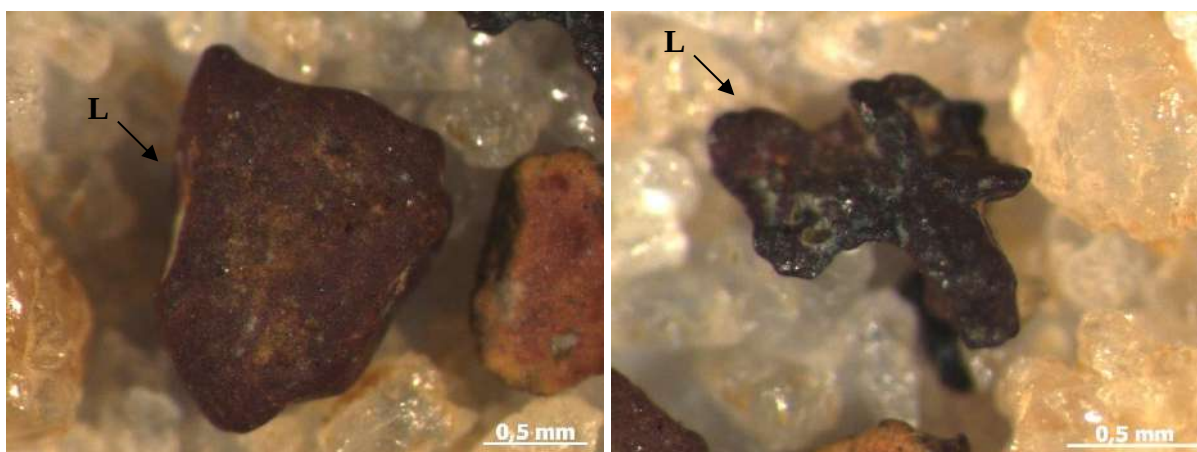


Figura 5.47 – Imagens microscópicas (detalhe) da amostra 05PA-LA'.

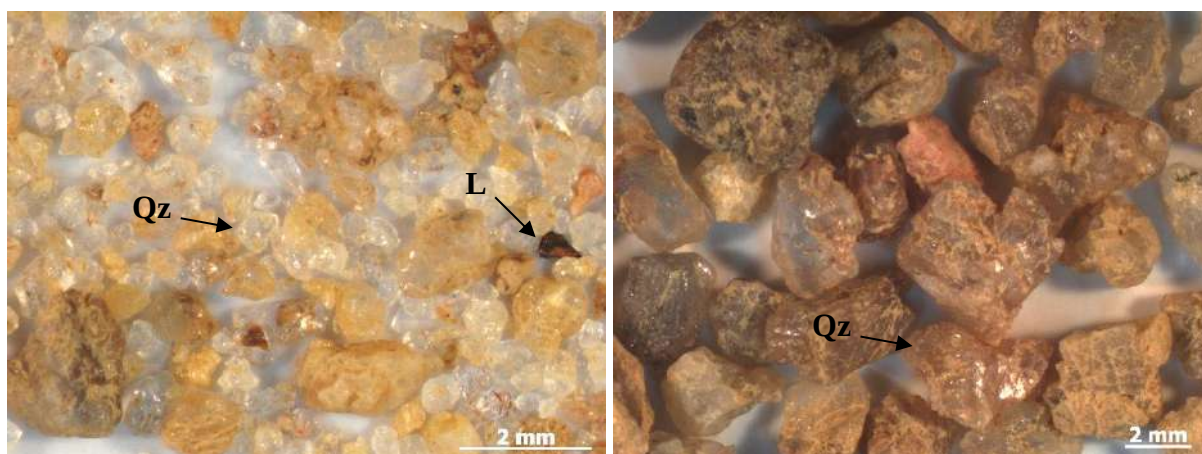


Figura 5.48 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 06CA-LA'.

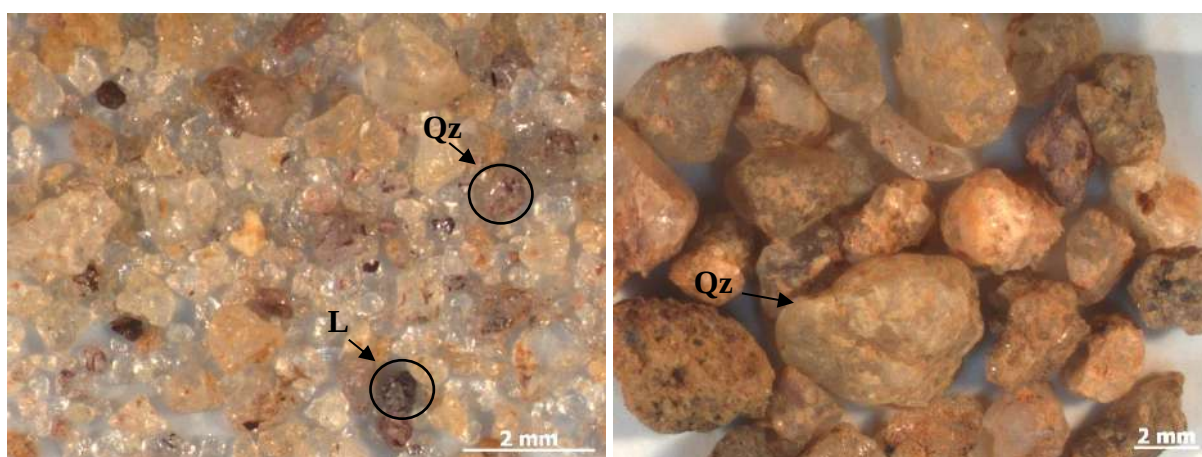


Figura 5.49 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 07SL-NA'.

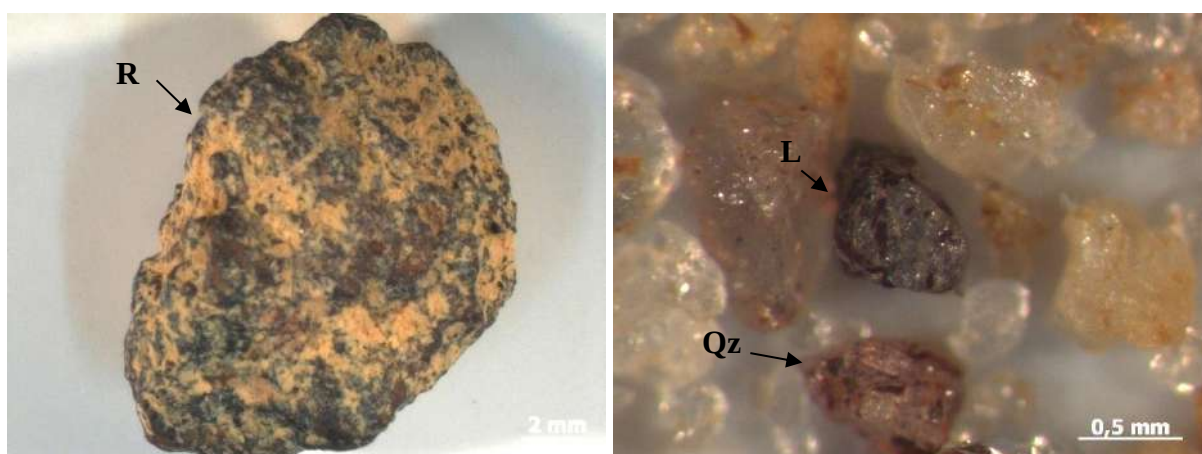


Figura 5.50 – Imagens microscópicas (detalhe) das amostras 06CA-LA' (à esquerda) e 07SL-NA' (à direita).

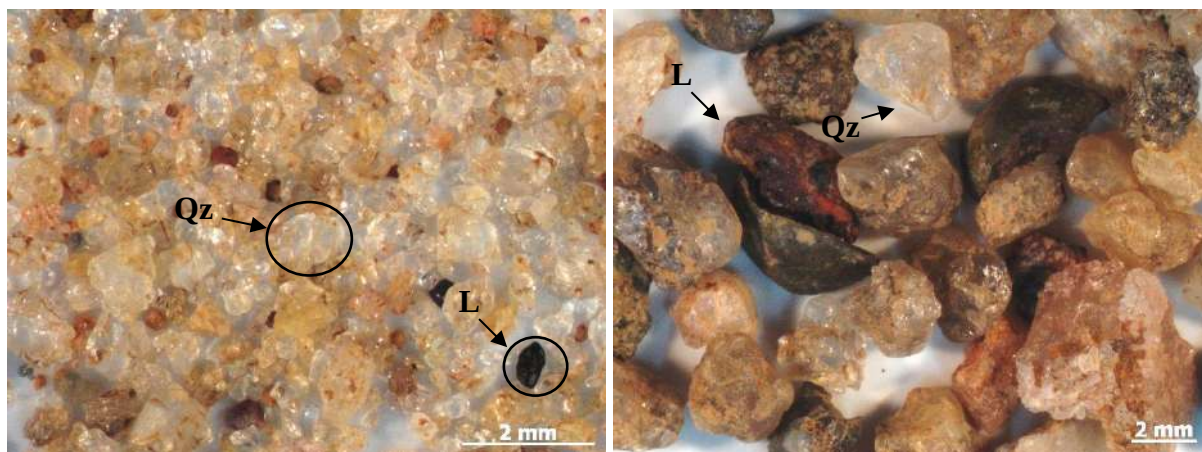


Figura 5.51 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 08RE-LA'.

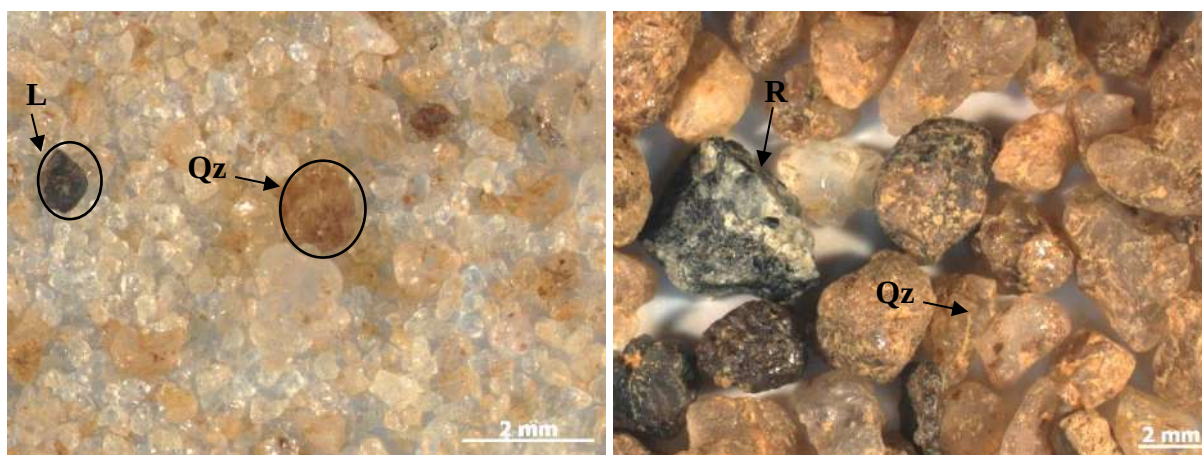


Figura 5.52 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 09MG-LA'.

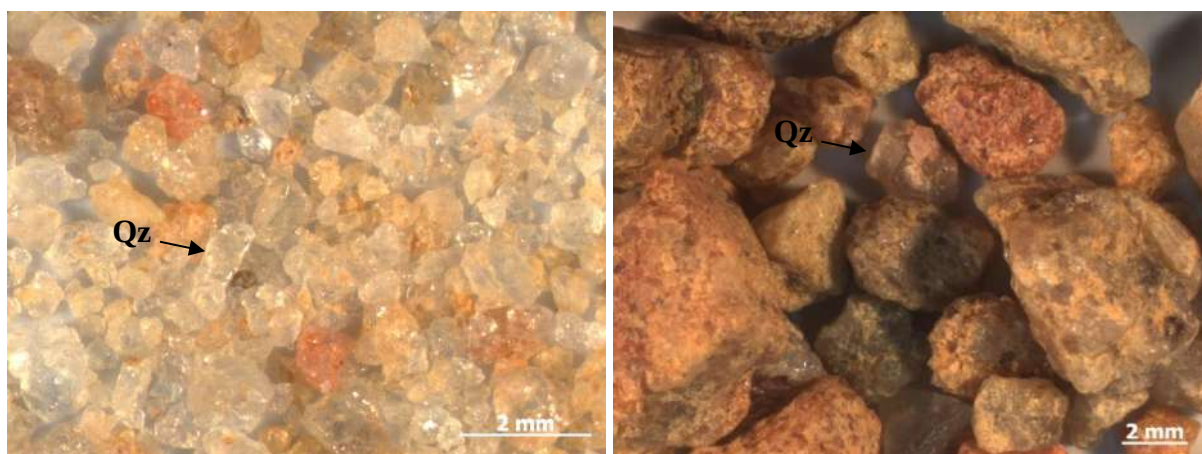


Figura 5.53 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 10MU-LA'.

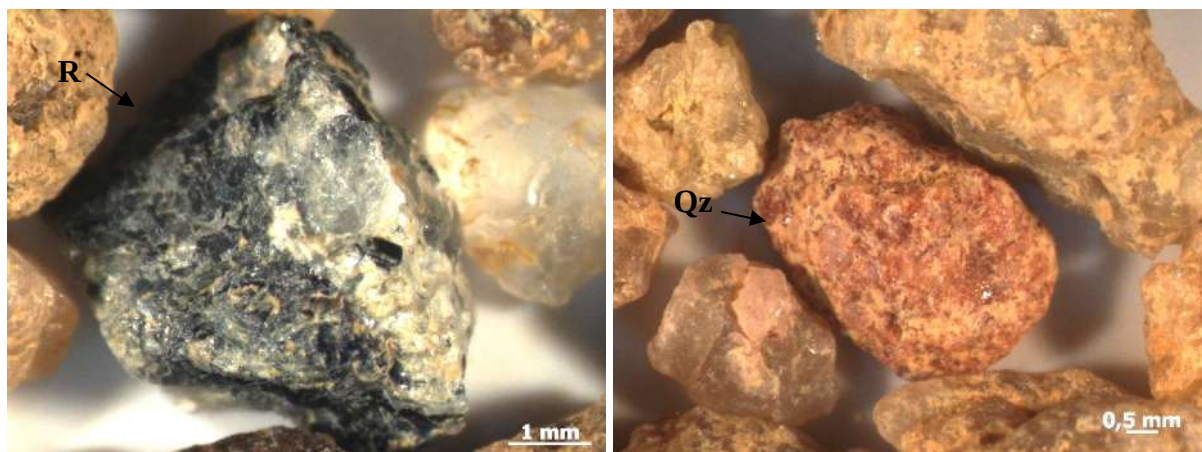


Figura 5.54 – Images microscópicas (detalhe) das amostras 09MG-LA' (à esquerda) e 10MU-LA' (à direita).

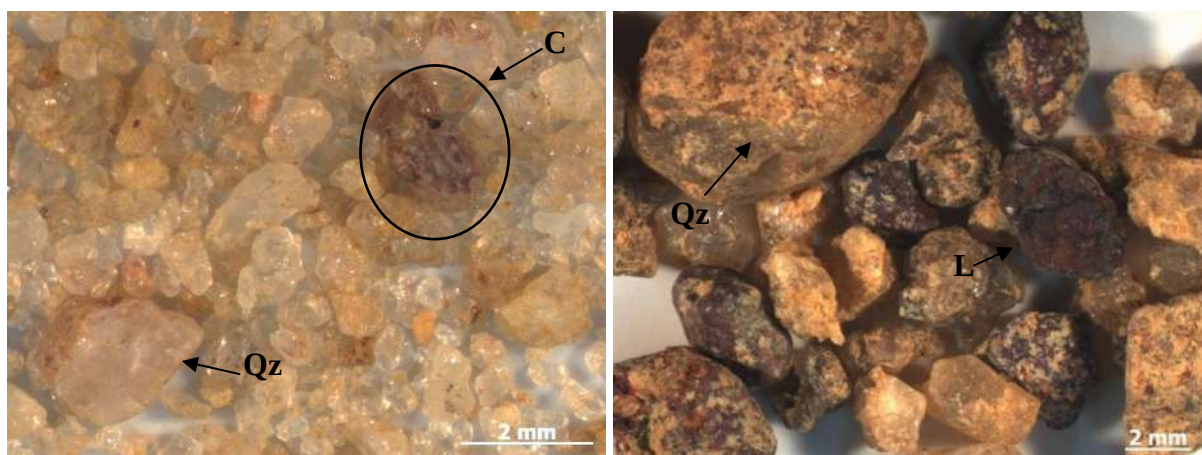


Figura 5.55 – Images microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 11CB-LA'.

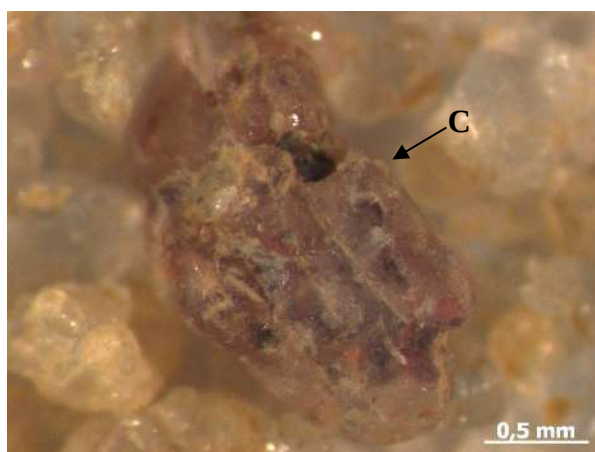


Figura 5.56 – Imagem microscópica (detalhe) da amostra 11CB-LA'.

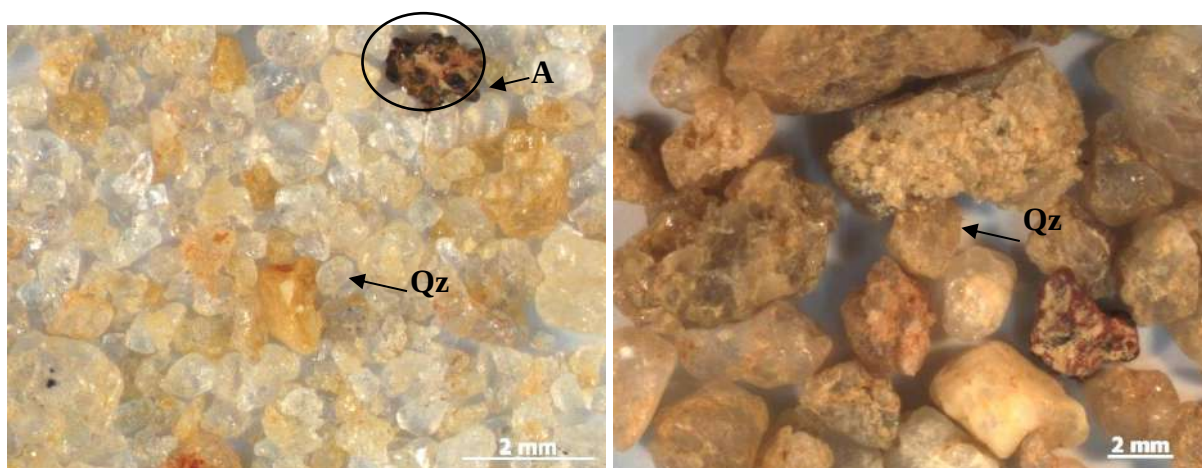


Figura 5.57 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 12SU-LG'.

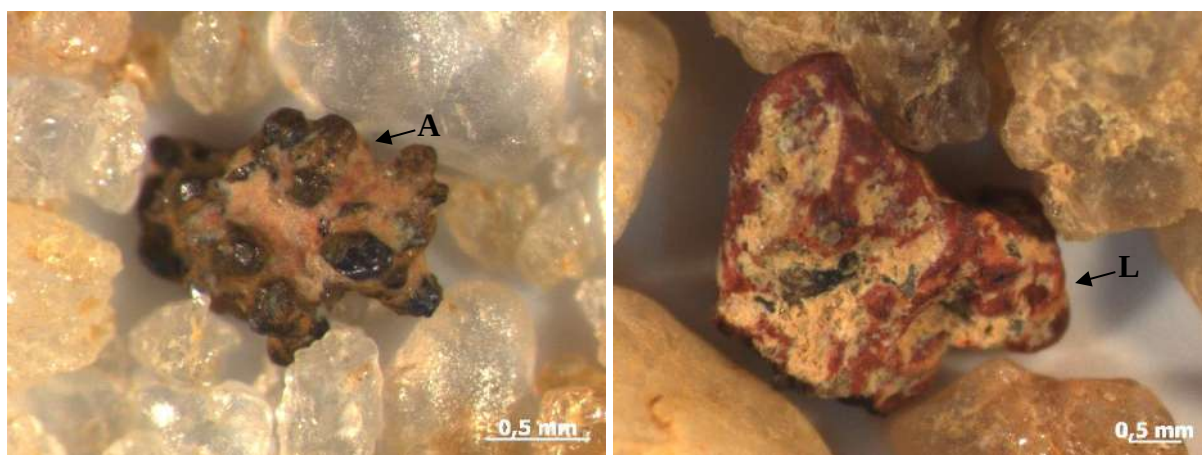


Figura 5.58 – Imagens microscópicas (detalhe) da amostra 12SU-LG'.

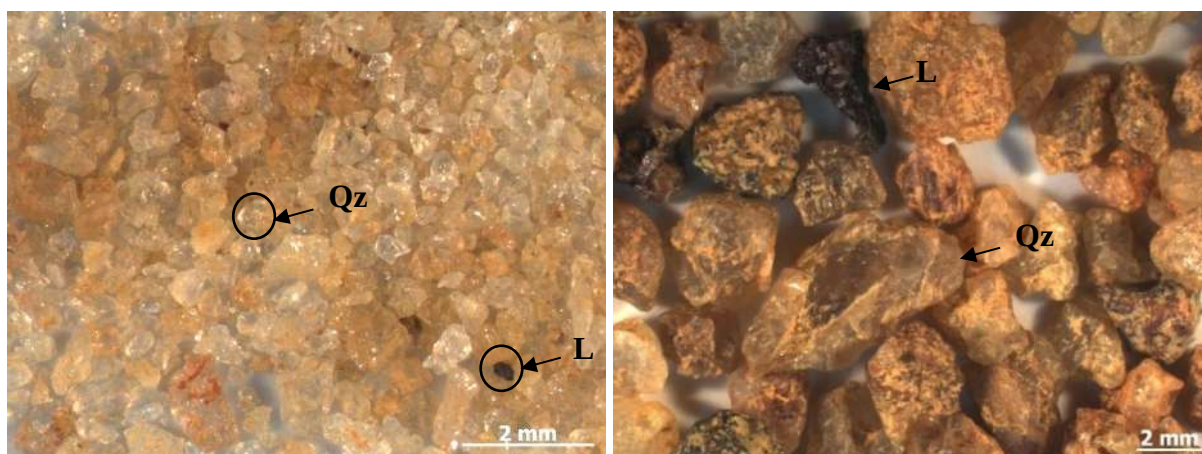


Figura 5.59 – Imagens microscópicas das frações fina (à esquerda) e grossa (à direita) da amostra 13IP-LA'.

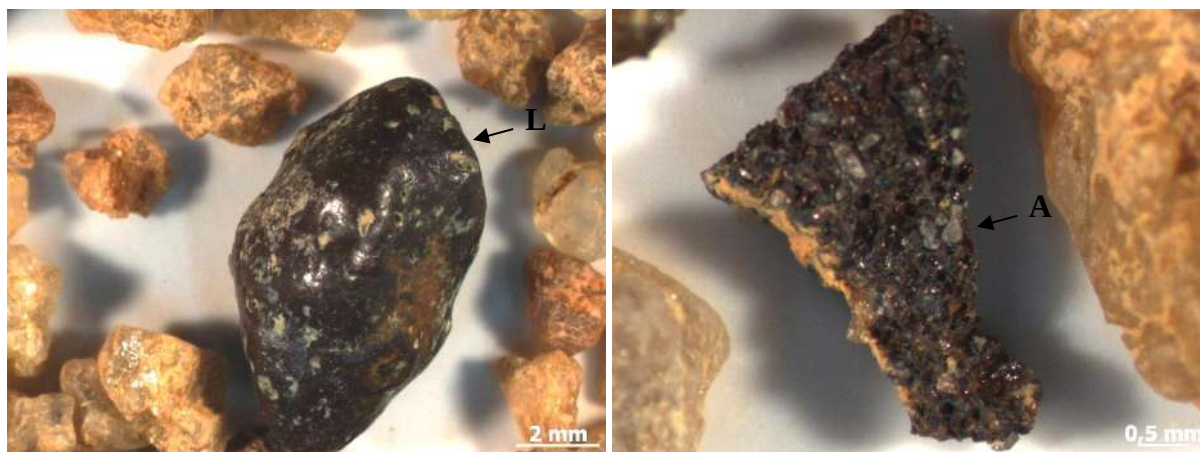


Figura 5.60 – Imagens microscópicas (detalhe) da amostra 13IP-LA’.

5.3 Resultado do comportamento mecânico dos solos

5.3.1 *Califórnia Bearing Ratio* - CBR

A Figura 5.61 apresenta os resultados de CBR (%) e de Expansão (%) correspondentes à $W_{ót}$ e $\rho_{dmáx}$ dos solos estudados. Seis solos apresentaram valores de CBR abaixo de 20%, que é, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (Brasil, 2006), o mínimo admitido para aplicação em camadas de sub-base, pelo método empírico de dimensionamento. Os demais solos apresentaram valores superiores a 20%, chegando a um máximo de 35% (amostra 03IT-NA’), o que, pelas diretrizes mencionadas, poderiam ser indicados para camada de sub-base e, nenhum dos solos seriam indicados para camada de base, para a qual se requer $CBR > 60\%$. Todavia, por se tratar de solos finos pode-se afirmar que os valores de CBR obtidos são considerados altos. Já foi explicado que este ensaio foi realizado somente como parte de uma estratégia de convencimento do meio técnico regional.

Em relação a expansão, 6 (seis) solos apresentaram expansão de 0% após as 96h de imersão em água, e as outras 7 amostras exibiram valores de expansão baixos, mostrando coerência com as análises anteriores. Segundo as diretrizes tradicionais apresentadas pelo DNIT em Brasil (2006) e considerando somente a expansão, solos com expansão menor que 1% podem ser indicados para sub-base e menor que 0,5% para base, assim, doze dos treze solos poderiam ser indicados para essas camadas. Somente a amostra 04IG-LG’ não seria indicada para base por apresentar expansão de 0,6% de acordo com o critério do DNIT.

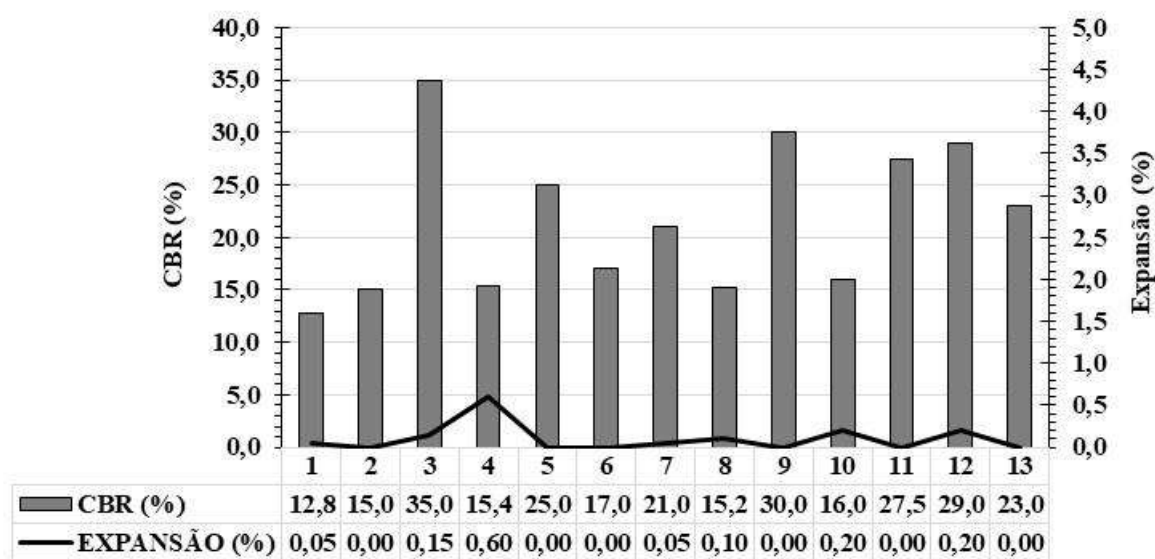


Figura 5.61 – CBR e Expansão dos solos desta pesquisa.

Ressalta-se que os resultados apresentados até este ponto corroboram com os obtidos na dissertação de Chaves (2000) que realizou a caracterização geotécnica dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza, constituídos pela mesma formação geológica da maioria dos solos da RMRecife (Formação Barreiras). As similaridades identificadas estão nos solos classificados como LG', principalmente as amostras 04IG-LG' e 12SU-LG' que são argissolos de mesmas classes TRB e USCS (A-6 e SC, respectivamente).

Outros autores também obtiveram valores semelhantes, como por exemplo, Castro (2002), Marangon (2004) e Medrado (2009), para solos de Minas Gerais; Silva (2003) e Dalla Rosa (2018) para solos do estado de Mato Grosso; Thuler (2005) para solos do Rio de Janeiro; entre outros.

5.3.2 Comportamento Resiliente

5.3.2.1 Modelos Arenoso/Granular, Areno-argiloso e Composto

Os resultados dos ensaios de módulo resiliente estão apresentados nas Tabelas 5.8 a 5.10, organizadas por classe MCT. Os gráficos de módulo resiliente pelos três modelos estudados estão apresentados no Apêndice III. Para a testagem dos modelos foram considerados os CPs: individualmente, em conjunto (Todos – T, três CPs) e em dupla quando algum CP ficou com umidade distante de $\pm 0,5\%$ da $W_{ót}$ sendo observado também discrepâncias dos valores de MR obtidos comparado aos demais CPs.

Na amostra 06CA-LA', o CP-3 ficou com diferença de umidade maior que 0,5% da $W_{ót}$, porém os resultados foram semelhantes aos do CP-1 ($W_{ót}$), ao contrário do CP-2 que mostrou valores discrepantes dos demais CPs, o que pode ser devido a uma trinca no CP (observada logo após a desmoldagem), assim, na testagem dos CPs em dupla optou-se por considerar os CPs 1 e 3.

Os CPs provenientes do ensaio de deformação permanente (DP) foram identificados nas Tabelas 5.8 a 5.10 conforme par de tensões aplicados nos ensaios, da seguinte forma: DP ($\sigma_3 \times \sigma_d$, ambas em kPa). Os valores do coeficiente de correção (R^2) acima de 0,5 foram marcados com a cor vermelha e negrito e, os valores de k_1 e k_2 positivos foram formatados em *itálico e sublinhado*.

A Figura 5.62 apresenta graficamente os valores de $MR_{médio}$ dos CPs mais próximos da umidade ótima. Observa-se que todos os solos apresentaram valores acima de 400 MPa, que é considerado um valor alto para solos finos, sendo comparável aos valores encontrados para materiais pedregulhosos. A amostra 03IT-NA' apresentou o maior valor de $MR_{médio}$ (765 MPa).

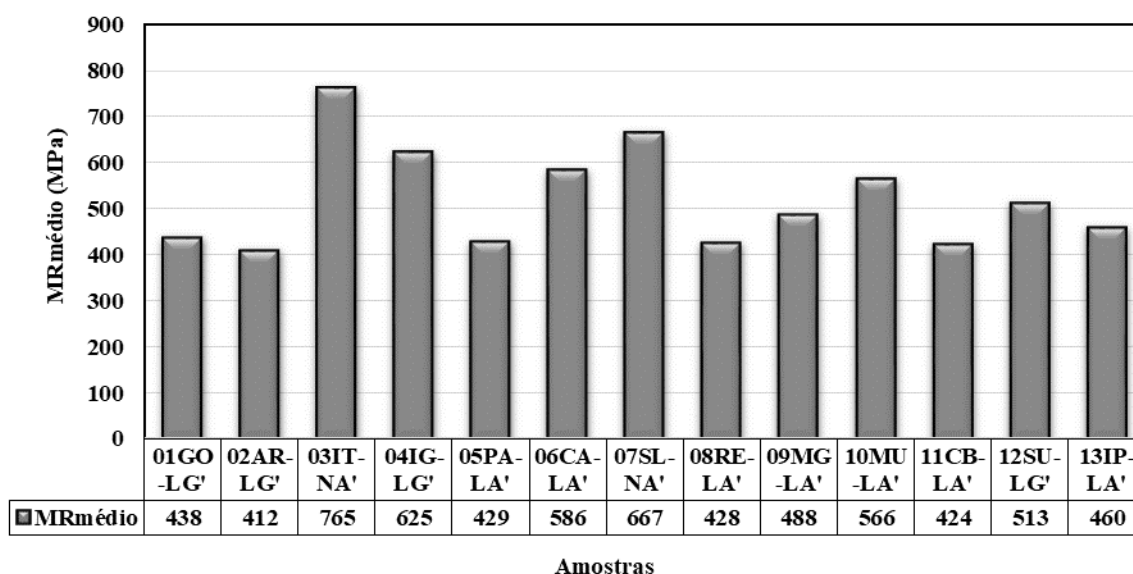


Figura 5.62 – $MR_{médio}$ dos CPs mais próximos da umidade ótima.

Tabela 5.8 – Resultados do $MR_{\text{médio}}$ e pelos modelos em função da tensão confinante, tensão desvio e modelo composto dos solos LG'.

Amostra	CP	W_c	$W_{ót}$	ΔW	$MR_{\text{médio}}$	Arenoso/Granular $MR = K_1 \sigma_3^{K_2}$			Areno-Argiloso $MR = K_1 \sigma_d^{K_2}$			Composto $MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$			
		%	%	%	MPa	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
01GO-LG'	1	18,2	17,4	0,8	332	145,810	-0,262	0,211	125,570	-0,396	0,719	252,472	<u>0,448</u>	-0,661	0,822
	2	17,3		-0,1	438	195,260	-0,262	0,251	185,490	-0,353	0,682	368,115	<u>0,337</u>	-0,489	0,707
	3	17,6		0,2	479	252,500	-0,209	0,234	225,640	-0,313	0,783	337,942	<u>0,325</u>	-0,545	0,968
	T	-		-	416	193,000	-0,244	0,182	173,860	-0,354	0,569	320,016	<u>0,361</u>	-0,554	0,465
	2+3	-		-	459	222,040	-0,235	0,235	204,580	-0,333	0,701	354,122	<u>0,330</u>	-0,515	0,811
	DP (120x360)	17,4		-0,0	1016	971,380	-0,012	0,003	825,130	-0,087	0,246	1142,209	<u>0,242</u>	-0,251	0,602
02AR-LG'	1	18,6	18,4	0,2	378	107,160	-0,410	0,401	115,350	-0,485	0,837	224,168	<u>0,271</u>	-0,552	0,803
	2	18,6		0,2	392	190,000	-0,235	0,223	178,480	-0,323	0,633	334,416	<u>0,343</u>	-0,490	0,687
	3	18,3		-0,1	412	146,560	-0,336	0,330	146,520	-0,424	0,785	293,929	<u>0,325</u>	-0,541	0,797
	T	-		-	394	143,970	-0,327	0,314	144,490	-0,411	0,741	281,783	<u>0,316</u>	-0,530	0,748
04IG-LG'	1	12,6	13,1	-0,5	444	208,720	-0,244	0,231	187,680	-0,355	0,728	367,849	<u>0,384</u>	-0,552	0,824
	2	13,3		0,2	371	168,010	-0,257	0,251	153,670	-0,363	0,750	286,212	<u>0,358</u>	-0,550	0,831
	3	13,1		-	625	129,070	-0,527	0,528	145,580	-0,624	0,978	184,932	<u>0,123</u>	-0,677	0,989
	T	-		-	477	175,040	-0,320	0,236	171,120	-0,416	0,577	294,548	<u>0,249</u>	-0,516	0,478
12SU-LG'	1	11,3	11,2	0,1	513	315,930	-0,159	0,204	282,470	-0,250	0,753	428,296	<u>0,296</u>	-0,441	0,959
	2	11,9		0,7	364	185,200	-0,219	0,218	166,610	-0,323	0,706	291,533	<u>0,333</u>	-0,505	0,820
	3	11,0		-0,2	443	406,930	-0,021	0,004	311,870	-0,143	0,268	552,251	<u>0,408</u>	-0,411	0,661
	T	-		-	440	287,690	-0,133	0,087	244,840	-0,239	0,415	418,069	<u>0,346</u>	-0,449	0,601
	1+3	-		-	478	358,550	-0,090	0,062	296,800	-0,197	0,439	483,139	<u>0,348</u>	-0,425	0,702

Tabela 5.9 – Resultados do $MR_{\text{médio}}$ e pelos modelos em função da tensão confinante, tensão desvio e modelo composto dos solos LA'. (Continua)

Amostra	CP	W_c	$W_{ót}$	ΔW	$MR_{\text{médio}}$	Arenoso/Granular $MR = K_1 \sigma_3^{K_2}$ (MPa)			Areno-Argiloso $MR = K_1 \sigma_d^{K_2}$ (MPa)			Composto $MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$ (MPa)			
		%	%	%	MPa	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
05PA-LA'	1	13,5	13,7	-0,2	429	124,520	-0,401	0,392	130,390	-0,486	0,859	228,092	<u>0,266</u>	-0,590	0,868
	2	13,3		-0,4	421	188,190	-0,259	0,236	163,600	-0,388	0,793	303,022	<u>0,426</u>	-0,657	0,982
	3	13,1		-0,6	545	119,980	-0,508	0,554	140,230	-0,584	0,965	165,695	<u>0,007</u>	-0,526	0,945
	T	-		-	463	146,340	-0,375	0,341	149,310	-0,467	0,765	238,579	<u>0,207</u>	-0,538	0,724
	1+2	-		-	425	153,080	-0,330	0,314	146,050	-0,437	0,822	262,867	<u>0,347</u>	-0,625	0,906
06CA-LA'	1	13,8	13,8	0,0	586	178,340	-0,417	0,429	169,680	-0,580	0,980	190,880	<u>0,051</u>	-0,593	0,986
	2	13,4		-0,4	395	274,920	-0,115	0,085	221,340	-0,240	0,553	365,299	<u>0,419</u>	-0,559	0,949
	3	13,3		-0,6	744	157,210	-0,535	0,539	190,010	-0,604	0,974	170,770	-0,032	-0,611	0,957
	T	-		-	570	222,560	-0,307	0,177	200,710	-0,449	0,499	258,112	<u>0,166</u>	-0,568	0,467
	1+3	-		-	667	164,130	-0,485	0,465	176,500	-0,602	0,937	168,431	<u>0,016</u>	-0,643	0,913
08RE-LA'	1	18,3	19	-0,7	518	439,220	-0,052	0,034	394,590	-0,113	0,240	551,723	<u>0,213</u>	-0,239	0,410
	2	18,9		-0,1	361	221,230	-0,157	0,129	182,580	-0,282	0,625	371,958	<u>0,437</u>	-0,524	0,867
	3	19,0		-0,1	428	206,710	-0,240	0,305	211,770	-0,292	0,674	319,605	<u>0,188</u>	-0,358	0,625
	T	-		-	436	271,830	-0,149	0,106	248,020	-0,229	0,370	409,774	<u>0,267</u>	-0,357	0,428
	2+3	-		-	394	213,850	-0,198	0,190	196,630	-0,287	0,595	341,579	<u>0,301</u>	-0,434	0,642
09MG-LA'	1	12,8	12,7	0,1	488	473,590	-0,005	0,000	367,570	-0,118	0,310	601,392	<u>0,362</u>	-0,358	0,873
	2	12,6		-0,1	479	719,530	<u>0,147</u>	0,297	486,210	<u>0,013</u>	0,004	853,710	<u>0,428</u>	-0,281	0,792
	3	12,8		0,1	556	409,750	-0,100	0,124	370,430	-0,171	0,536	546,730	<u>0,238</u>	-0,303	0,698
	T	-		-	507	518,790	<u>0,014</u>	0,002	404,540	-0,092	0,150	650,470	<u>0,340</u>	-0,315	0,580
10MU-LA'	1	12,5	12,7	-0,2	568	293,740	-0,219	0,350	299,710	-0,268	0,780	407,403	<u>0,161</u>	-0,342	0,757
	2	12,5		-0,2	566	374,110	-0,136	0,178	338,600	-0,216	0,667	511,145	<u>0,269</u>	-0,377	0,813
	3	12,3		-0,4	706	349,940	-0,236	0,285	316,840	-0,350	0,827	387,636	<u>0,212</u>	-0,529	0,913
	T	-		-	611	345,200	-0,188	0,214	326,940	-0,263	0,604	461,531	<u>0,212</u>	-0,386	0,588
	DP (40x40)	12,3		-0,4	781	1734,000	<u>0,287</u>	0,559	1132,600	<u>0,175</u>	0,311	1552,982	<u>0,313</u>	-0,089	0,523
	DP (40X80)	12,4		-0,3	1247	2891,000	<u>0,300</u>	0,813	1805,500	<u>0,172</u>	0,399	2809,084	<u>0,371</u>	-0,105	0,855
	DP (40X120)	12,2		-0,5	769	820,580	<u>0,031</u>	0,009	679,170	-0,044	0,027	968,125	<u>0,252</u>	-0,214	0,240
	DP (80x80)	12,8		0,1	669	353,580	-0,205	0,170	325,750	-0,295	0,525	622,079	<u>0,328</u>	-0,436	0,625
	DP (80x160)	12,8		0,1	1174	3926,900	<u>0,435</u>	0,885	2290,600	<u>0,312</u>	0,680	3445,917	<u>0,376</u>	<u>0,011</u>	0,904
	DP (120x360)	12,9		0,2	1331	3302,600	<u>0,325</u>	0,872	2276,100	<u>0,246</u>	0,748	3121,158	<u>0,261</u>	<u>0,053</u>	0,943

Tabela 5.9 – Resultados do $MR_{\text{médio}}$ e pelos modelos em função da tensão confinante, tensão desvio e modelo composto dos solos LA'. (Finaliza)

Amostra	CP	W_c	$W_{ót}$	ΔW	$MR_{\text{médio}}$	Arenoso/Granular $MR = K_1 \sigma_3^{K_2}$ (MPa)			Areno-Argiloso $MR = K_1 \sigma_d^{K_2}$ (MPa)			Composto $MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$ (MPa)			
		%	%	%	MPa	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
11CB-LA'	1	14,3	15,6	-1,3	461	458,090	<u>0,003</u>	0,000	350,390	<u>0,114</u>	0,254	597,182	<u>0,383</u>	-0,364	0,826
	2	15,3		-0,3	549	317,750	-0,173	0,133	272,800	-0,286	0,540	526,710	<u>0,405</u>	-0,516	0,654
	3	15,3		-0,3	424	155,030	-0,326	0,321	149,560	-0,428	0,822	285,965	<u>0,354</u>	-0,599	0,860
	T	-		-	478	282,590	-0,166	0,113	242,700	-0,276	0,470	453,111	<u>0,383</u>	-0,495	0,595
	2+3	-		-	487	221,950	-0,250	0,193	201,990	-0,357	0,586	402,725	<u>0,386</u>	-0,554	0,643
12SU-LG'	1	11,3	11,2	0,1	513	315,930	-0,159	0,204	282,470	-0,250	0,753	428,296	<u>0,296</u>	-0,441	0,959
	2	11,9		0,7	364	185,200	-0,219	0,218	166,610	-0,323	0,706	291,533	<u>0,333</u>	-0,505	0,820
	3	11,0		-0,2	443	406,930	-0,021	0,004	311,870	-0,143	0,268	552,251	<u>0,408</u>	-0,411	0,661
	T	-		-	440	287,690	-0,133	0,087	244,840	-0,239	0,415	418,069	<u>0,346</u>	-0,449	0,601
	1+3	-		-	478	358,550	-0,090	0,062	296,800	-0,197	0,439	483,139	<u>0,348</u>	-0,425	0,702
13IP-LA'	1	12,1	13,2	-1,2	590	604,120	<u>0,025</u>	0,003	363,570	-0,191	0,252	889,513	<u>0,687</u>	-0,666	0,897
	2	13,1		-0,1	460	256,640	-0,194	0,287	256,110	-0,245	0,686	354,544	<u>0,164</u>	-0,315	0,703
	3	13,0		-0,2	932	165,630	-0,571	0,508	183,890	-0,689	0,974	219,601	<u>0,157</u>	-0,808	0,986
	T	-		-	655	320,560	-0,213	0,097	281,750	-0,328	0,333	462,641	<u>0,301</u>	-0,522	0,294
	2+3	-		-	689	227,130	-0,343	0,197	242,590	-0,408	0,395	341,143	<u>0,135</u>	-0,471	0,298

Tabela 5.10 – Resultados do $MR_{\text{médio}}$ e pelos modelos em função da tensão confinante, tensão desvio e modelo composto dos solos NA'.

Amostra	CP	W_c	W_{ot}	ΔW	$MR_{\text{médio}}$	Arenoso/Granular $MR = K_1 \sigma_3^{K_2}$			Areno-Argiloso $MR = K_1 \sigma_d^{K_2}$			Composto $MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$			
		%	%	%	MPa	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
03IT-NA'	1	10,1	10,6	-0,5	972	176,250	-0,569	0,596	220,480	-0,630	0,967	182,028	<u>0,011</u>	-0,721	0,973
	2	10,1		-0,5	410	352,660	-0,045	0,022	275,280	-0,166	0,444	456,581	<u>0,384</u>	-0,428	0,930
	3	10,6		0,0	765	210,620	-0,423	0,517	250,890	-0,457	0,900	322,789	<u>0,086</u>	-0,465	0,851
	T	-		-	711	252,680	-0,317	0,175	266,250	-0,380	0,361	320,407	<u>0,091</u>	-0,452	0,341
	1+3	-		-	865	199,810	-0,481	0,502	245,670	-0,521	0,832	289,024	<u>0,026</u>	-0,498	0,698
	DP (40x40)	10,8		0,2	919	629,590	-0,128	0,413	658,810	-0,142	0,755	710,904	<u>0,050</u>	-0,173	0,734
	DP (40x80)	10,6		0,0	392	456,020	<u>0,061</u>	0,034	339,460	-0,053	0,039	564,600	<u>0,371</u>	-0,303	0,434
	DP (40x120)	10,3		-0,3	930	1560,300	<u>0,184</u>	0,558	1106,700	<u>0,082</u>	0,164	1635,796	<u>0,319</u>	-0,152	0,707
	DP (80x80)	10,7		0,1	733	1894,400	<u>0,339</u>	0,839	1218,700	<u>0,235</u>	0,598	1734,125	<u>0,324</u>	-0,023	0,872
	DP (80x160)	10,7		0,1	524	288,950	-0,185	0,130	232,980	-0,328	0,611	425,485	<u>0,491</u>	-0,685	0,747
	DP (80x240)	10,4		-0,2	669	532,490	-0,071	0,049	467,180	-0,148	0,315	681,165	<u>0,252</u>	-0,305	0,473
	DP (120x120)	10,3		-0,3	621	483,460	-0,080	0,063	400,590	-0,183	0,498	668,500	<u>0,354</u>	-0,406	0,795
	DP (120x240)	10,5		-0,1	628	244,100	-0,310	0,379	254,570	-0,373	0,819	362,610	<u>0,223</u>	-0,505	0,816
	DP (120x360)	10,8		0,2	744	183,970	-0,463	0,661	250,270	-0,449	0,927	267,380	-0,026	-0,393	0,913
07SL-NA'	1	15,9	16,5	-0,6	570	306,630	-0,203	0,223	282,080	-0,292	0,692	493,703	<u>0,321</u>	-0,458	0,782
	2	16,0		-0,5	434	206,110	-0,243	0,251	190,300	-0,341	0,740	353,476	<u>0,343</u>	-0,510	0,814
	3	16,2		-0,3	667	194,460	-0,403	0,464	218,590	-0,457	0,892	341,753	<u>0,227</u>	-0,557	0,842
	T	-		-	557	230,770	-0,283	0,247	227,240	-0,364	0,609	383,649	<u>0,285</u>	-0,508	0,583

Analisando os resultados de $MR_{\text{médio}}$ considerando as diferenças de umidade entre os CPs, verifica-se que os CPs mais secos mostraram valores médios maiores do que aqueles mais próximos da $W_{\text{ót}}$, assim como os mais úmidos apresentaram valores menores. Como exemplos, tem-se:

- Amostra 01GO-LG' - com o aumento de 0,8% da $W_{\text{ót}}$ (CP-1) houve uma redução de 24% do $MR_{\text{médio}}$ (comparado com o CP-2 que é o mais próximo da $W_{\text{ót}}$). Comportamento análogo foi observado na amostra 12SU-LG' onde a diferença foi de 28% no valor do $MR_{\text{médio}}$ entre os CP-1 e CP-2;
- Amostra 03IT-NA' – uma redução de 0,5% da $W_{\text{ót}}$ (CP-1) levou a um aumento do $MR_{\text{médio}}$ em 27% (comparado ao CP-3 compactado na umidade ótima);
- Amostra 04IG-LG' – para um aumento de 0,2% da $W_{\text{ót}}$ (CP-2) houve uma redução de 40% do $MR_{\text{médio}}$ e a redução de 0,5% da $W_{\text{ót}}$ levou a um aumento do $MR_{\text{médio}}$ em 29% (comparados ao CP-3 compactado na umidade ótima). Pode-se inferir que este solo é bastante sensível ao aumento de umidade, o que também pode ser observado na curva de compactação do mesmo;
- Amostra 11CB-LA' – apresentou uma diferença de 1% de umidade entre o CP-1 e CP-2, porém isto só representou um aumento de 16% do valor do $MR_{\text{médio}}$ do CP mais seco (CP-1), mostrando que neste solo a compactação nesta variação de umidade não foi muito influente no valor do módulo. O mesmo resultado pode ser observado na amostra 13IP-LA' onde a diferença foi de 28% no valor do $MR_{\text{médio}}$ entre o CP-1 e o CP-2.

Comportamento análogo foi observado por outros pesquisadores, em outros solos, como na dissertação de Werk (2000), por exemplo, que estudou a influência de diferentes métodos de compactação no comportamento resiliente, a diferentes umidades, em um solo argiloso e outro arenoso.

Os resultados dos modelos testados mostraram que o modelo composto apresentou o melhor enquadramento para a modelagem do MR, seguido do modelo em função da Tensão desvio que é o comumente empregado em solos predominantemente argilosos. Estes resultados corroboram com as pesquisas de Marangon e Motta (2006), Takeda *et al.*, (2006) e Costa e Motta (2007).

No modelo composto, K_2 apresentou em geral valores positivos indicando um aumento do valor do MR com o aumento da tensão confinante, por outro lado K_3 apresentou valores opostos, ou seja, o aumento da tensão desvio provoca a redução nos valores de MR, corroborando com o observado nos outros dois modelos testados e mostrando a importante influência da tensão desvio no comportamento resiliente destes solos finos.

Observou-se que na modelagem individual do CP, na maioria das amostras os valores de R^2 foram altos ($>0,8$), havendo uma redução do coeficiente quando se modelou os três CPs juntos, o que já era esperado uma vez que devido à variação da umidade de um CP para outro a faixa de valores de MR também variou causando uma pequena dispersão dos dados. Somente a amostra 08RE-LA' apresentou alguns CPs com $R^2 < 0,8$ (CP-1 e CP-3), porém o CP-2 que foi compactado em umidade bem próximo à $W_{ót}$ obteve-se $R^2 = 0,931$.

5.3.2.2 Modelagem complementar dos solos LA' – Modelo Teta e Universal

De forma complementar às modelagens anteriores, realizou-se a modelagem dos solos LA' seguindo os modelos Theta (Hicks and Monismith, 1970) e o Universal (ARA, 2004 adaptado de Witczak and Uzan, 1988). A Tabela 5.11 apresenta os resultados dos parâmetros obtidos.

Tabela 5.11 – Parâmetros do comportamento resiliente dos solos LA' segundo os modelos Theta e Universal.

Solo	05PA-LA'	06CA-LA'	08RE-LA'	09MG-LA'	10MU-LA'	11CB-LA'	13IP-LA'
Modelo Theta - $M_R = k_1 \theta^{k_2}$							
K₁	267,64	349,64	297,67	484	455	344	409,41
K₂	-0,41	-0,40	-0,21	-0,04	-0,23	-0,26	-0,40
R²	0,50	0,28	0,28	0,02	0,31	0,27	0,22
Modelo Universal - $M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$							
K₁	9110	10781	6097	5929	9061	8471	13306
K₂	0,24	0,18	0,40	0,41	0,23	0,46	0,23
K₃	-2,19	-1,83	-1,94	-1,27	-1,44	-2,38	-2,09
R²	0,77	0,46	0,81	0,61	0,62	0,72	0,35

Onde: $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$.

Os resultados obtidos mostram que os solos LA' apresentam baixa aderência ao modelo Theta ($R^2 \leq 0,5$), sendo coerente com a bibliografia que afirma que se trata de um modelo comumente adotado para solos granulares (Chu, 2020). Os Solos 05PA-LA', 08RE-LA', 09MG-LA', 10MU-LA' e 11CB-LA' foram razoavelmente explicados pelo modelo

Universal (R^2 variando entre 0,61 e 0,81), no entanto, foram resultados similares aos apresentados pelo modelo composto.

Mais uma vez ressalta-se que a modelagem considerando em conjunto os dados dos três corpos de prova de cada solo, resulta em valores de R^2 menores, assim, observando os resultados dos ajustes, não se pode dizer que um determinado solo (como o 13IP-LA', por exemplo) possui tendência ao comportamento linear, se ao modelar os resultados de um CP individual obteve-se alguma tendência de não linearidade.

5.3.2.3 Resumo do comportamento resiliente por classe MCT

A Tabela 5.12 apresenta os valores mínimos, máximos e médios do $MR_{\text{médio}}$ e dos parâmetros dos modelos testados. Para os cálculos foram considerados somente as simulações com os três corpos de prova ou aquelas com dois CPs próximos, o mesmo critério foi utilizado para montagem dos gráficos apresentados nas Figuras 5.63 e 5.64.

Tabela 5.12 – Valores mínimos, máximos e médios dos parâmetros de MR por grupos MCT.

MCT		MR médio	Arenoso/Granular $MR = K_1 \sigma_3^{K_2}$ MPa			Areno-Argiloso $MR = K_1 \sigma_d^{K_2}$ MPa			Composto $MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$ MPa			
		MPa	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
LG'	Mín	394	143,970	-0,327	0,062	144,490	-0,416	0,439	281,783	0,249	-0,530	0,478
	Máx	478	358,550	-0,090	0,314	296,800	-0,197	0,741	483,139	0,348	-0,425	0,811
	Méd	452	224,900	-0,243	0,212	204,248	-0,339	0,614	353,398	0,311	-0,496	0,685
	Dp	40	94,703	0,110	0,107	66,419	0,102	0,136	92,060	0,043	0,048	0,145
NA'	Mín	557	199,810	-0,481	0,247	227,240	-0,521	0,609	289,024	0,026	-0,508	0,583
	Máx	865	230,770	-0,283	0,502	245,670	-0,364	0,832	383,649	0,285	-0,498	0,698
	Méd	711	215,290	-0,382	0,374	236,455	-0,443	0,721	336,337	0,156	-0,503	0,641
	Dp	218	21,892	0,140	0,180	13,032	0,111	0,157	66,911	0,183	0,007	0,082
LA'	Mín	394	153,080	-0,485	0,002	146,050	-0,602	0,150	168,431	0,016	-0,643	0,298
	Máx	689	518,790	0,014	0,465	404,540	-0,092	0,937	650,470	0,386	-0,315	0,913
	Méd	540	263,447	-0,254	0,225	242,177	-0,349	0,584	375,535	0,248	-0,490	0,653
	Dp	117	128,730	0,156	0,140	92,006	0,159	0,260	153,648	0,134	0,123	0,211

*Dp – Desvio padrão

Ao se considerar os grupos da Classificação MCT verifica-se que em termos de $MR_{\text{médio}}$, o grupo LG' apresenta valores similares, porém nas modelagens observa-se que a amostra 12SU-LG' diverge um pouco dos demais, visto que é um solo com maior quantidade de areia média em sua composição, conforme Figura 5.63 (a)-(c). O Grupo NA' que é composto apenas por dois solos mostrou-se heterogêneo (Figura 5.63 (d)-(f)), o que pode ser explicado por apresentarem outras características geotécnicas também distintas, como por exemplo: composição granulométrica, $W_{\text{ót}}$, etc.

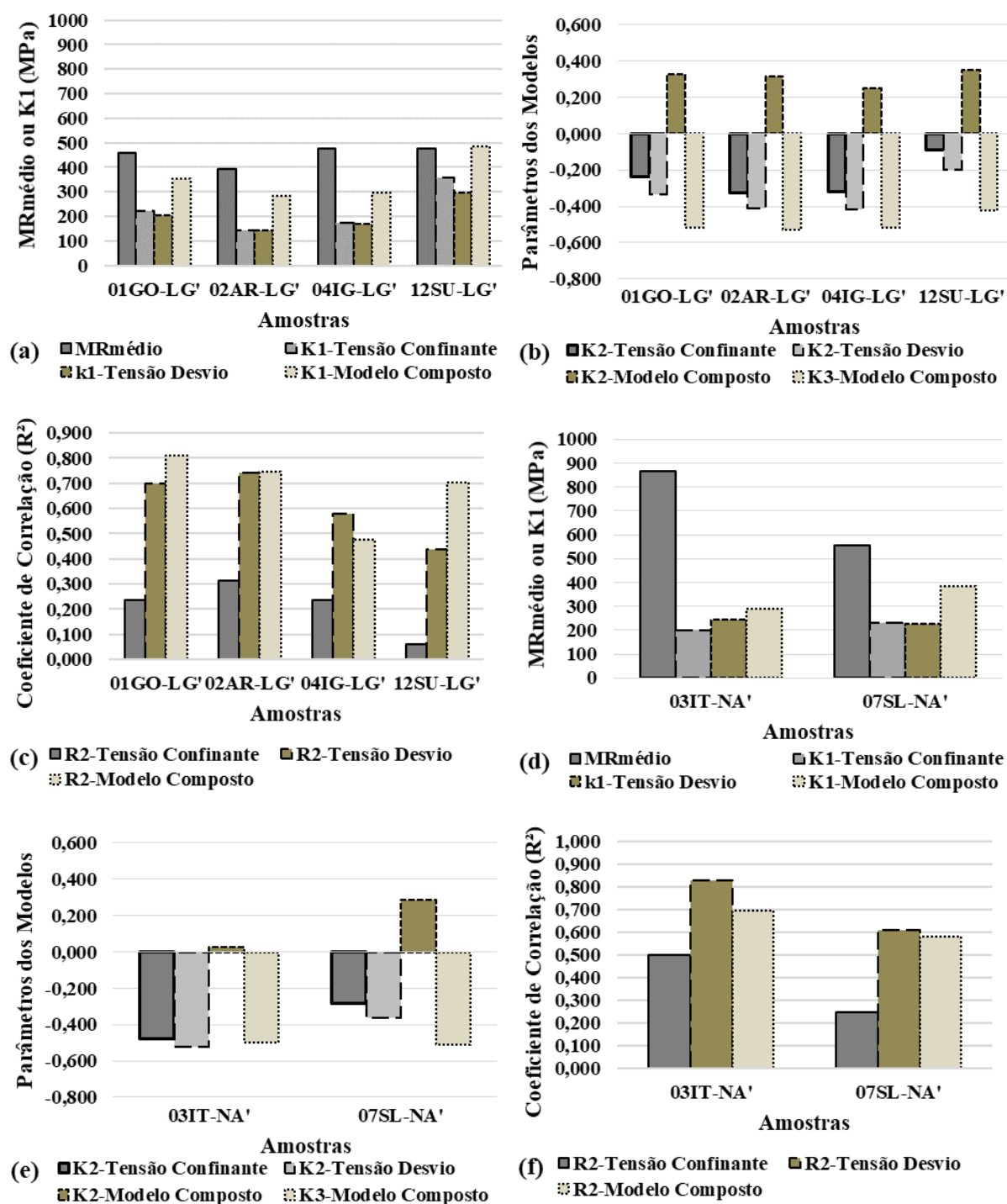


Figura 5.63 – MR médio e Parâmetros dos modelos de MR dos grupos LG' (a, b, c) e NA' (d, e, f).

O Grupo LA' apresentou $MR_{\text{médio}}$ variável (394 a 689 kPa), Figura 5.64 (a)-(c). Em relação aos parâmetros dos modelos, somente os solos 06CA-LA' e 09MG-LA' apresentaram comportamento oposto aos demais do grupo, o primeiro com valor extremamente baixo de K_2

no modelo composto e o segundo com K_2 no modelo em função da tensão confinante também muito baixo, e R^2 muito baixo.

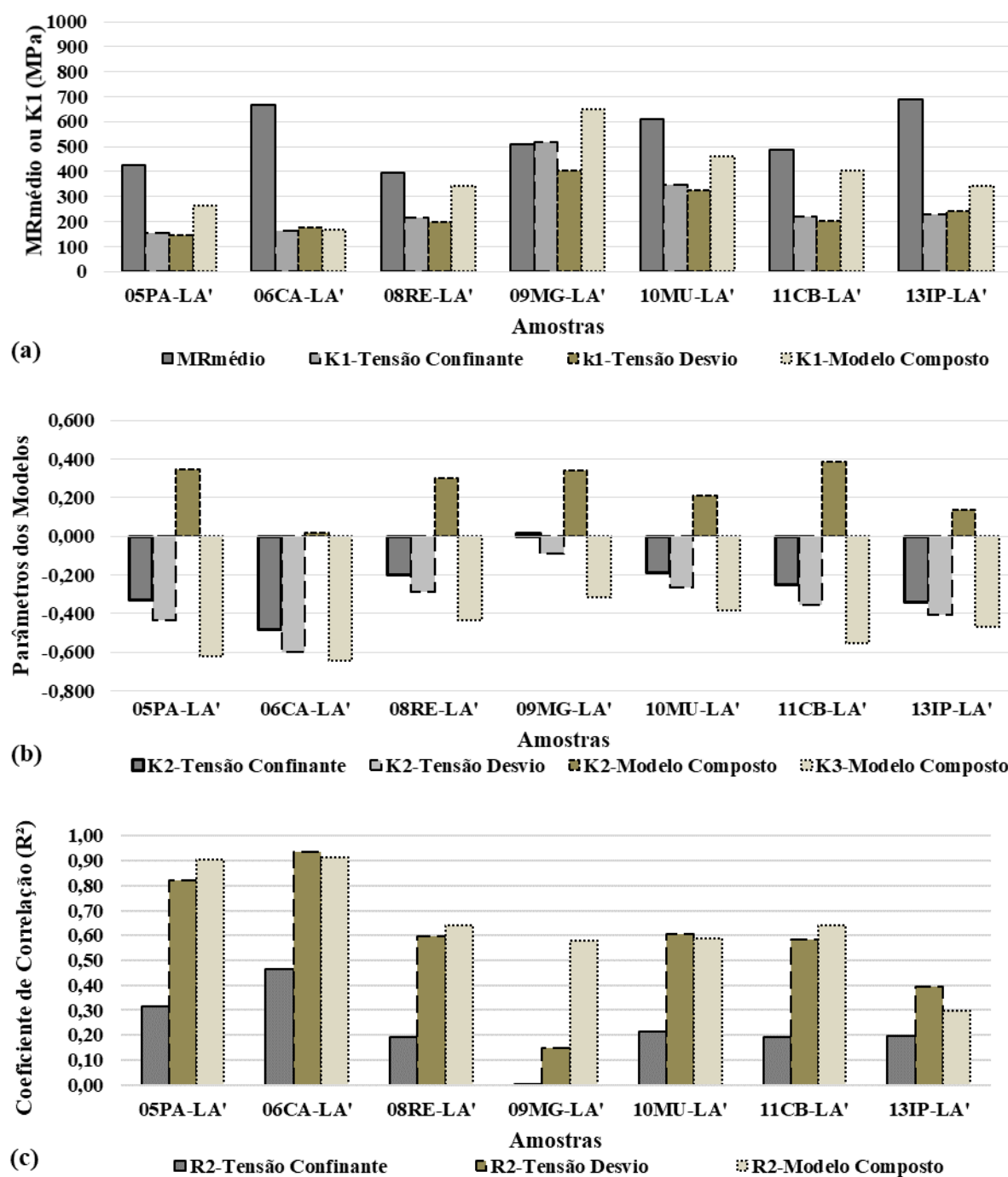


Figura 5.64 – MRmédio e Parâmetros dos modelos de MR do grupo LA' (a, b, c).

5.3.2.4 Comportamento Resiliente após ensaio de DP

No que se refere aos resultados MR obtidos através dos CPs do ensaio de DP, verifica-se que:

- Na amostra 01GO-LG' houve um ligeiro aumento do valor do módulo (Figura 5.65), mesmo não tendo sido completado todos os ciclos do ensaio de DP, pois o ensaio foi paralisado em 44.000 golpes.

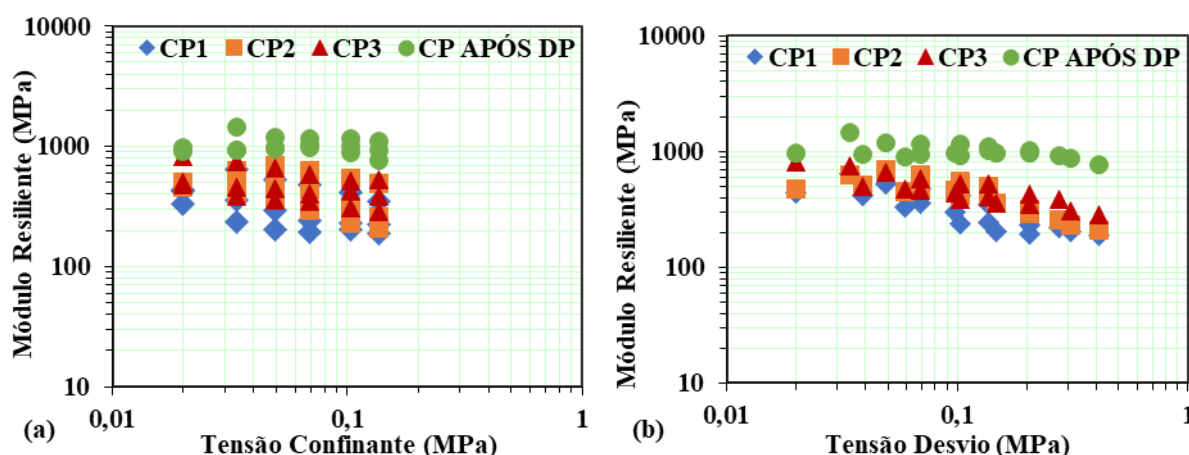


Figura 5.65 – Gráfico de MR da amostra 01GO-LG' em função das tensões (a) confinante e (b) desvio.

- Na amostra 03IT-NA' houve variação no valor MR conforme pares de tensões aplicados no ensaio de DP. Na Figura 5.66, apresenta-se o $MR_{\text{médio}}$ dos CPs 1+3 como valor de referência e os módulos médios obtidos em cada CP que foi submetido à DP. Na tensão confinante de 40kPa obteve-se resultado semelhante ao obtido no ensaio de MR tradicional, mesmo com a variação da tensão desvio (exceto CP correspondente à DP 40kPa/80kPa, que sem causa aparente apresentou MR muito inferior). Nas Tensões confinantes de 80kPa e 120kPa observa-se valores de $MR_{\text{médio}}$ análogos entre si e, também, quando comparado ao MR tradicional, isto mesmo com variação significativa da tensão desvio.
- Na amostra 10MU-LA' observou-se aumento no valor do MR nos CPs da DP, sendo mais acentuado nos últimos pares de tensões, indicando um aumento da rigidez do material, conforme Figura 5.67. Também se observou que o aumento das tensões durante o ensaio de MR provocou na maioria dos corpos de prova advindos do ensaio de DP um aumento do MR, inclusive em relação à tensão confinante,

indicando que para corpos de provas nessa condição a tensão confinante passou a ser mais influente, como pode ser constatado pelos valores de K_2 e R^2 do modelo arenoso/granular, fato este não identificado nos CPs do MR tradicional.

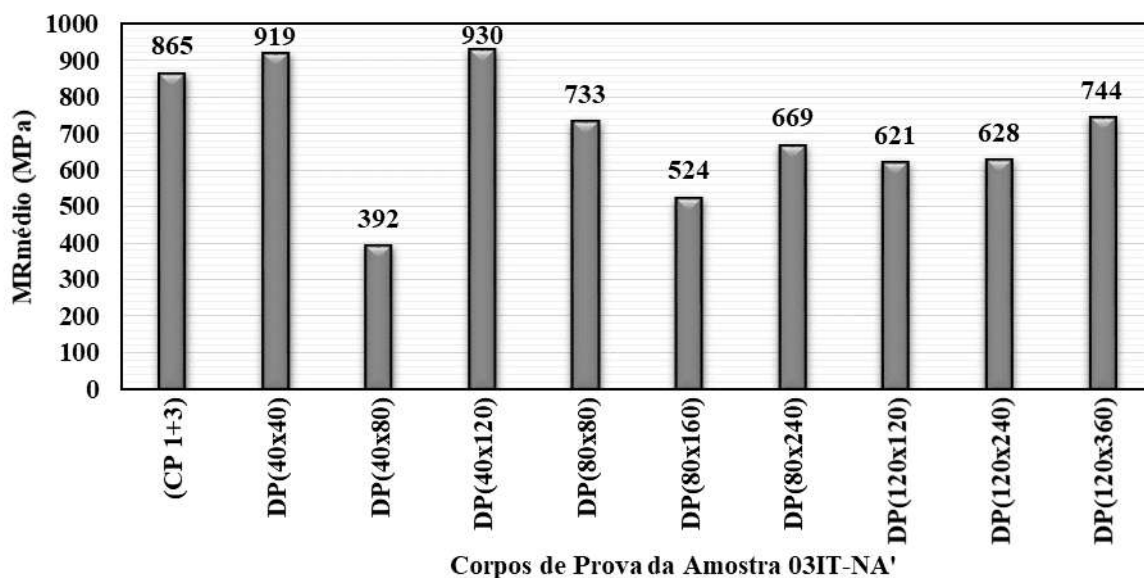


Figura 5.66 – MR_{médio} do CPs após DP da amostra 03IT-NA'.

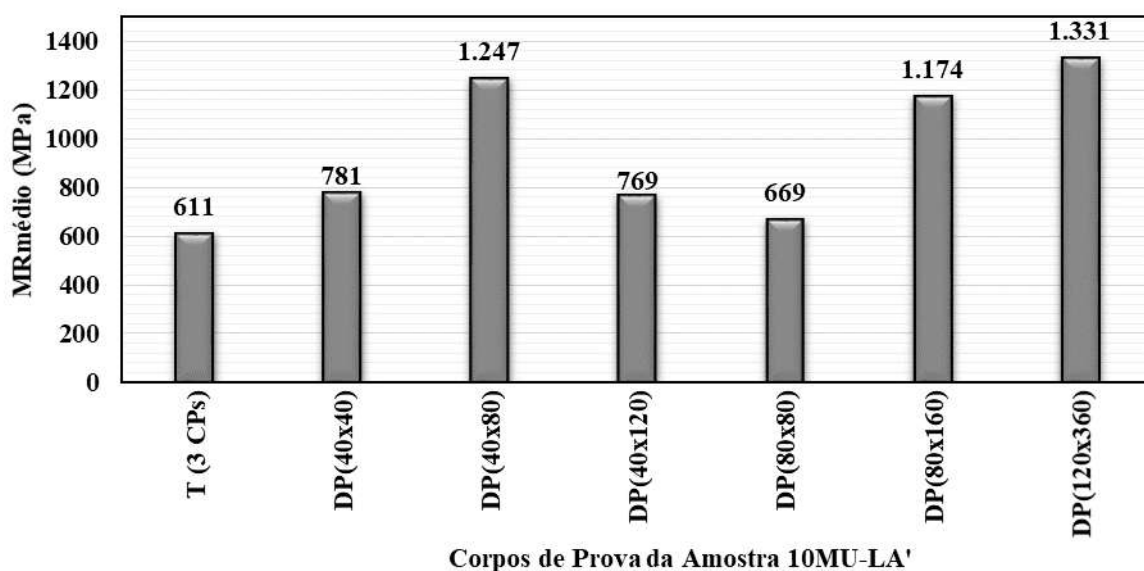


Figura 5.67 – MR_{médio} do CPs após DP da amostra 10MU-LA'.

5.3.3 Deformação Permanente

5.3.3.1 Análise da DP e Modelagem pelo Modelo de Guimarães (2009)

As Figuras 5.68 a 5.80 apresentam os gráficos de deformação permanente dos solos estudados. Em uma análise geral, todos apresentam valores de deformação total relativamente baixos, (considerando que o limite admitido no MeDiNa para o somatório de contribuição de todas as camadas é de 10 mm para Via Arterial Principal) e também em termos de porcentagem (máximo de 5% da altura da camada, neste caso do CP), visto que as máximas deformações ficaram em torno de 3,5% da altura.

Analisando por grupos MCT, tem-se que na Classe LG', composta pelos solos argilosos de comportamento laterítico, os materiais apresentaram, no último par de tensão ($\sigma_3 = 120kPa$ e $\sigma_d = 360kPa$), deformações maiores que 3% (6 mm) com excessão do solo 12SU-LG' que apresentou deformações consideravelmente baixas podendo este resultado estar associado à sua formação geológica (Formação Algodoads) que é diferente da demais (Formação Barreiras), estando também condizente com sua composição granulométrica (mais de 60% de areia). Em relação ao aumento da deformação com o aumento do número de aplicação de cargas (N), comportamento este que será melhor discutido na análise dos gráficos de ocorrência do *shakedown*, somente a amostra 01GO-LG' mostrou em alguns CPs o referido comportamento, as demais amostras LG' tenderam a estabilização da DP.

As amostras do grupo NA' mostram deformações permanentes menores do que os encontrados no grupo LG' (mas se deve considerar que o número de amostras foi menor: NA' – 2 solos e LG' – 4 solos), e para as duas amostras do grupo observou-se a tendência para a estabilização da deformação com o acréscimo do N.

No caso do grupo LA', somente os solos 06CA-LA' e 13IP-LA' apresentaram DP acima de 3% (6 mm) e somente a amostra 10MU-LA' mostrou uma clara tendência de aumento da DP com o aumento do N. Ressalta-se que, considerando os diversos aspectos geotécnicos dos materiais estudados, somente a amostra 10MU-LA' não apresentou concreções ferruginosas evidentes nas frações maiores que 0,074 mm (retido na peneira nº 200), possivelmente indicando que o grau de laterização pode influenciar nos resultados de DP.

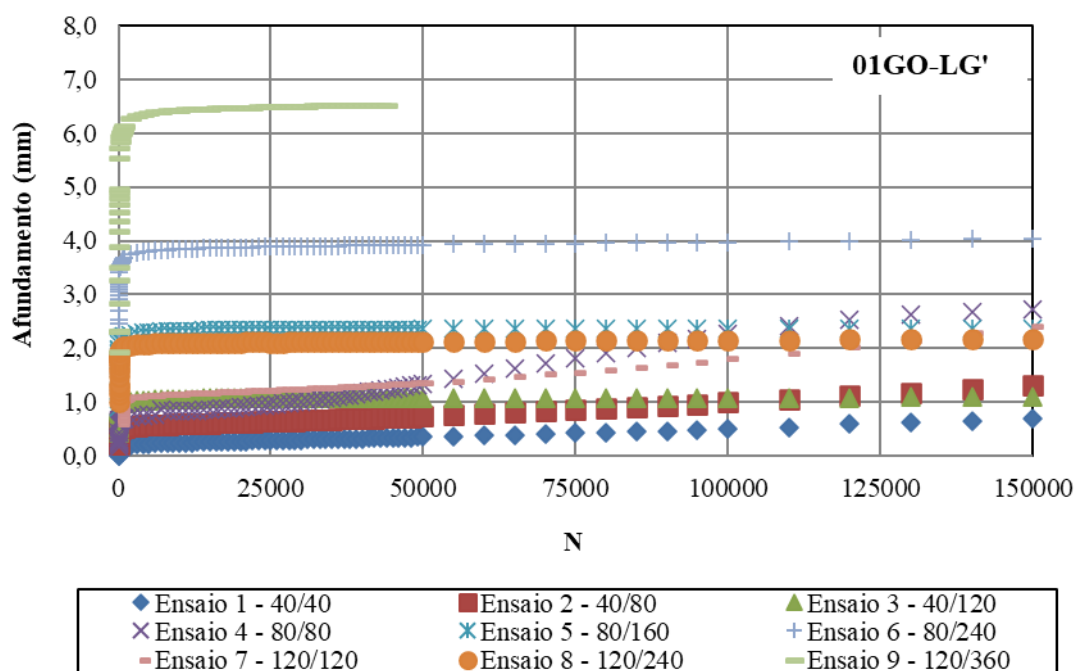


Figura 5.68 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 01GO-LG'.

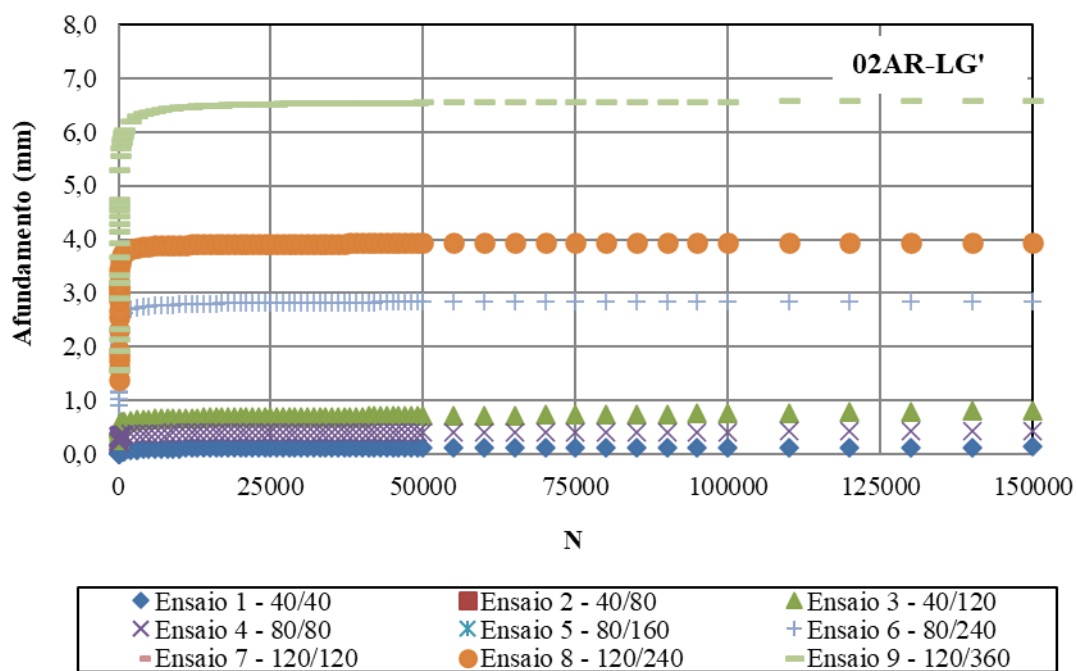


Figura 5.69 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 02AR-LG'.

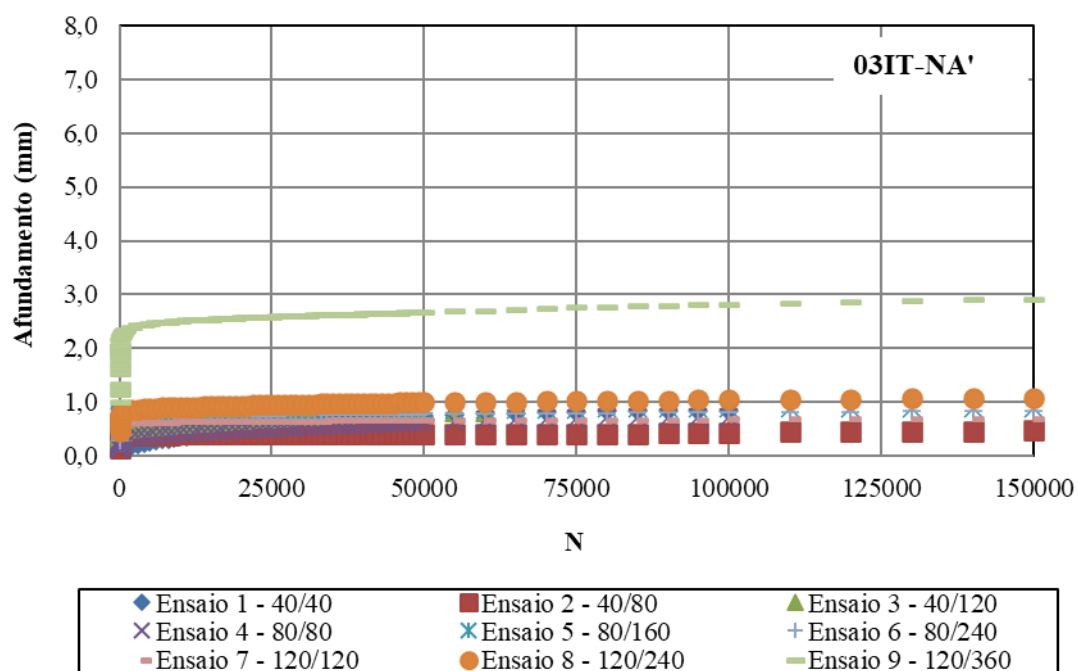


Figura 5.70 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 03IT-NA'.

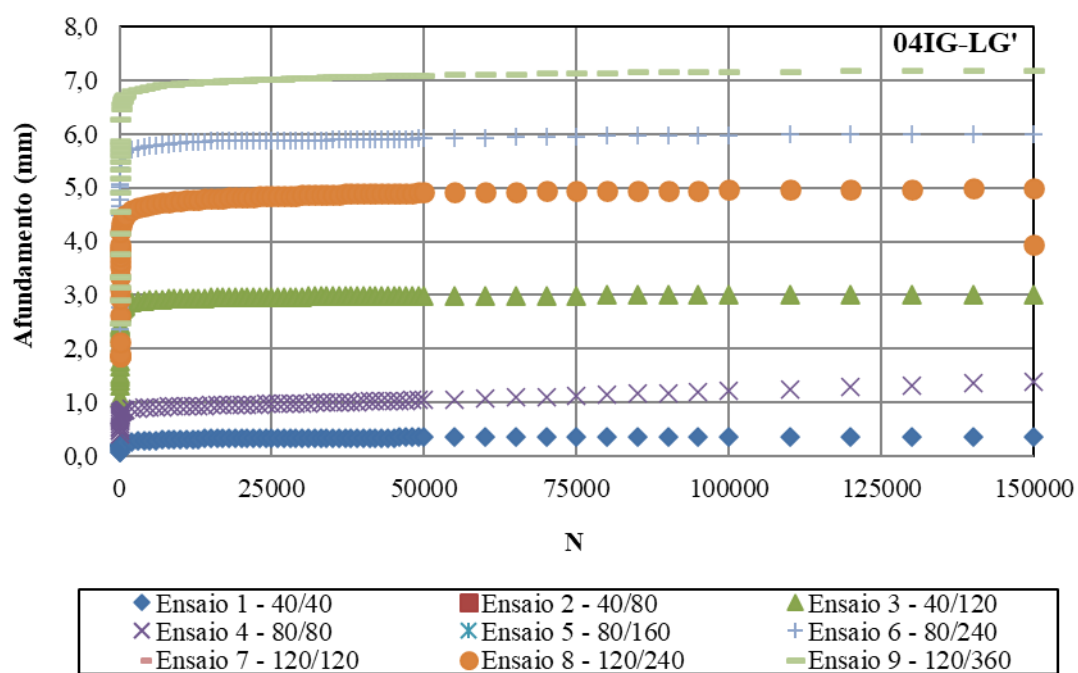


Figura 5.71 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 04IG-LG'.

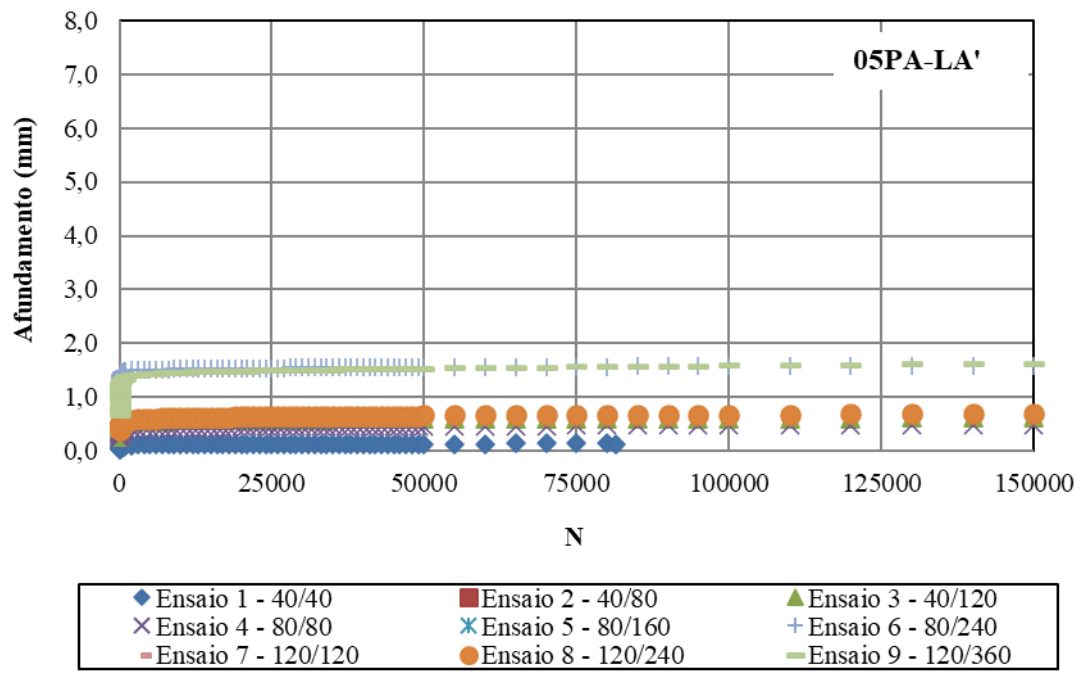


Figura 5.72 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 05PA-LA'.

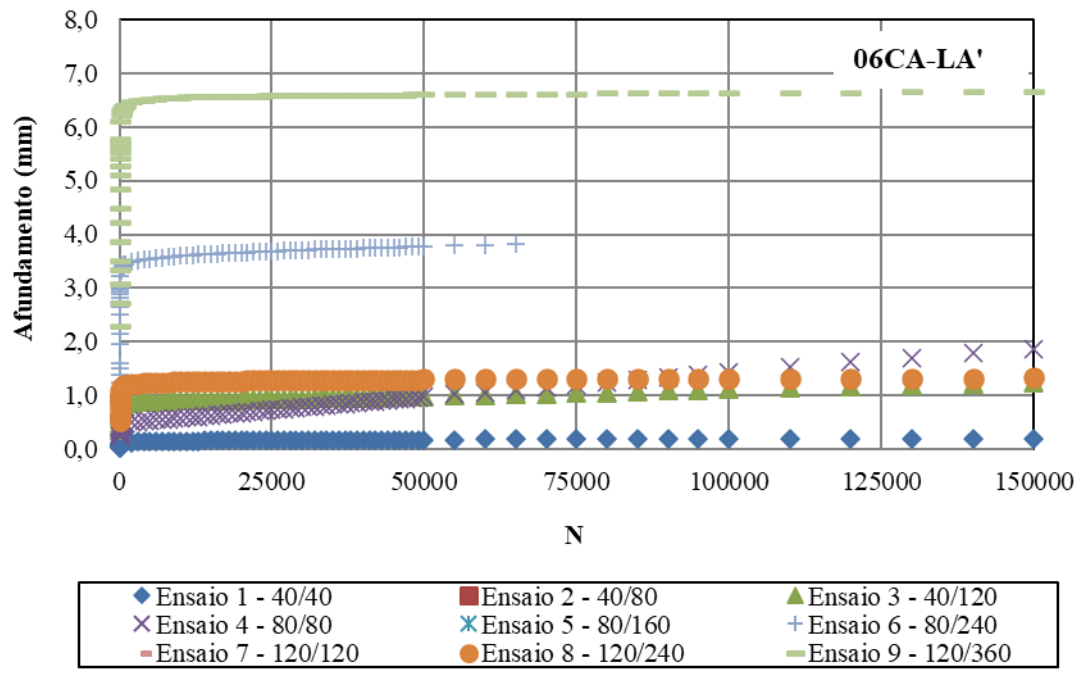


Figura 5.73 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 06CA-LA'.

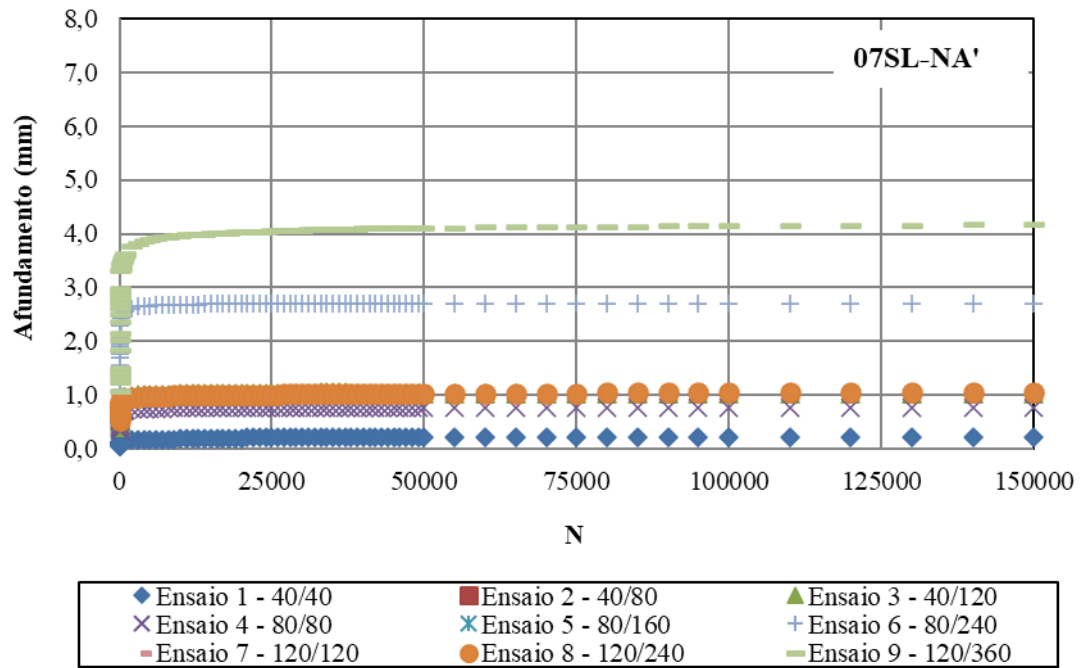


Figura 5.74 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 07SL-NA'.

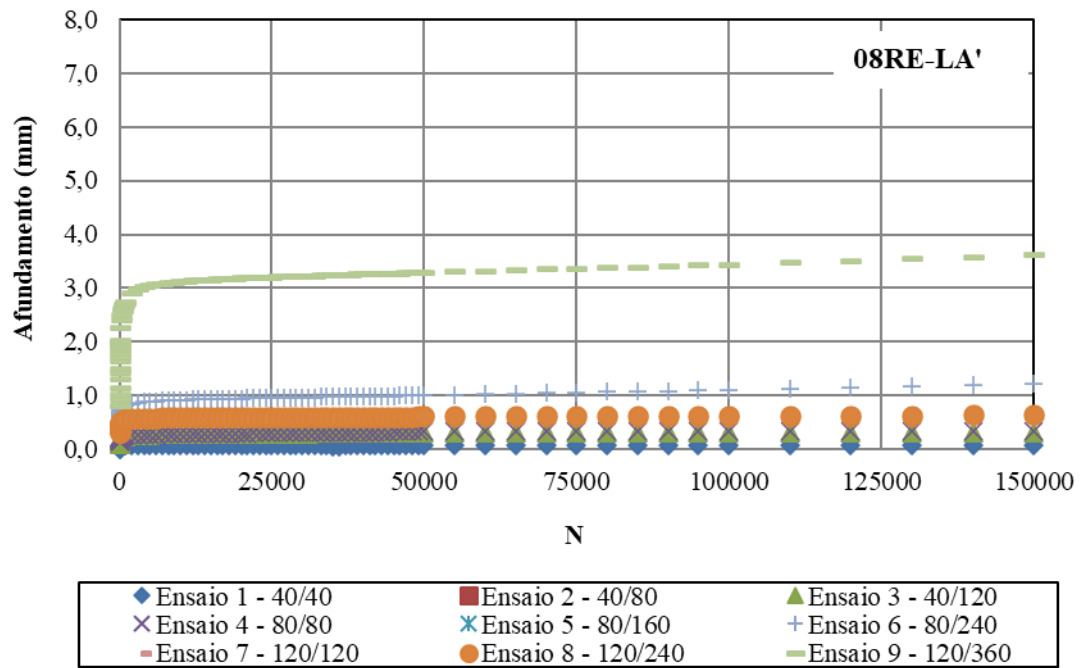


Figura 5.75 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 08RE-LA'.

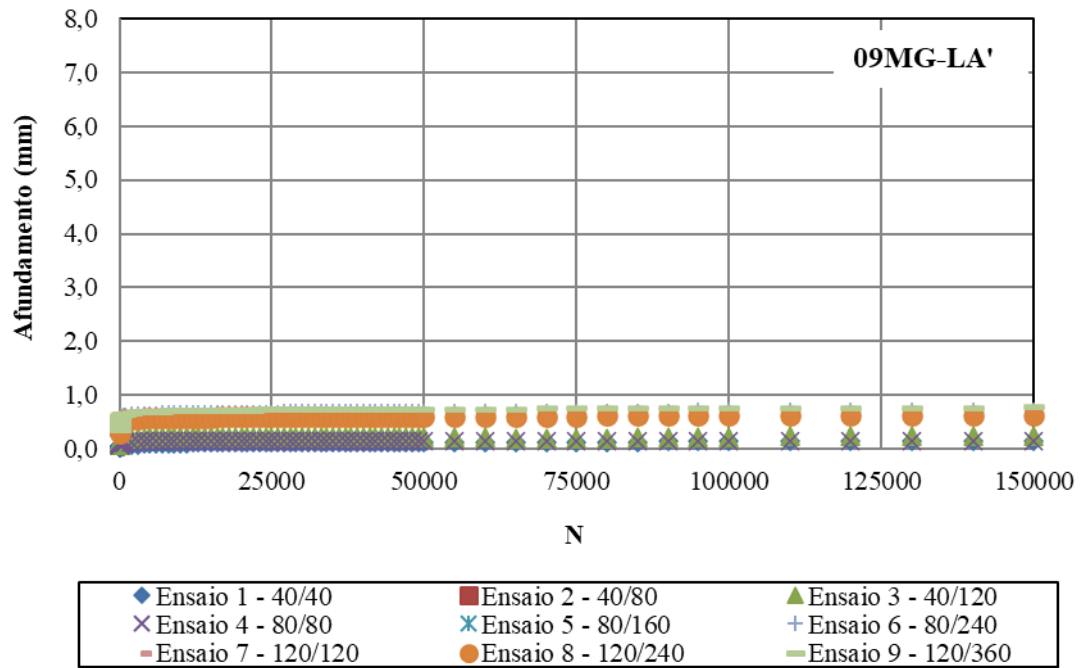


Figura 5.76 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 09MG-LA'.

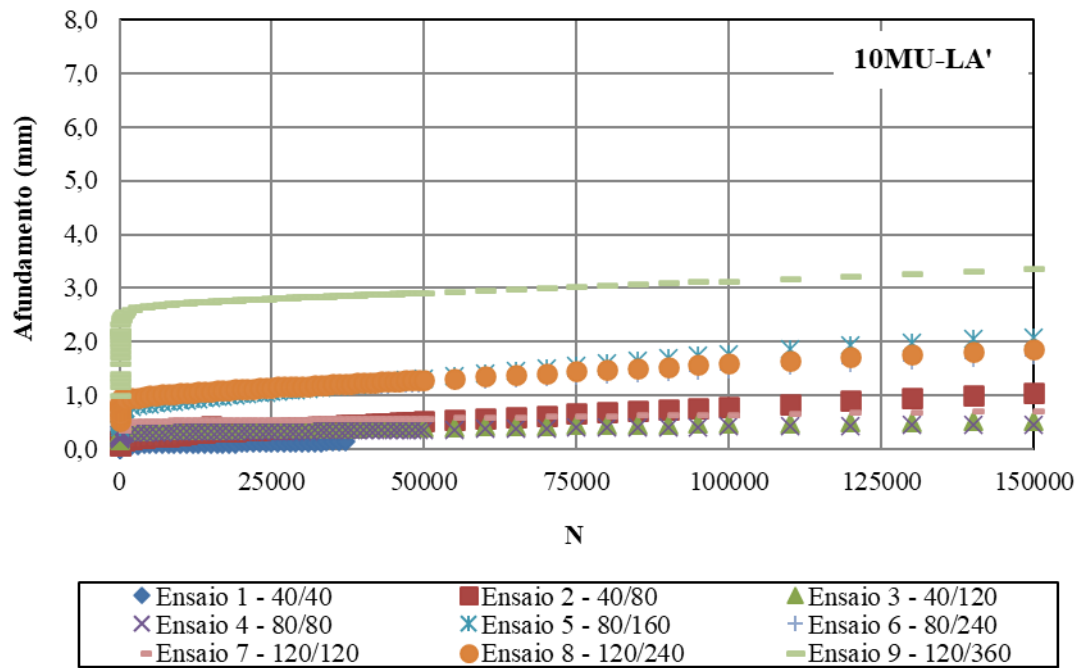


Figura 5.77 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 10MU-LA'.

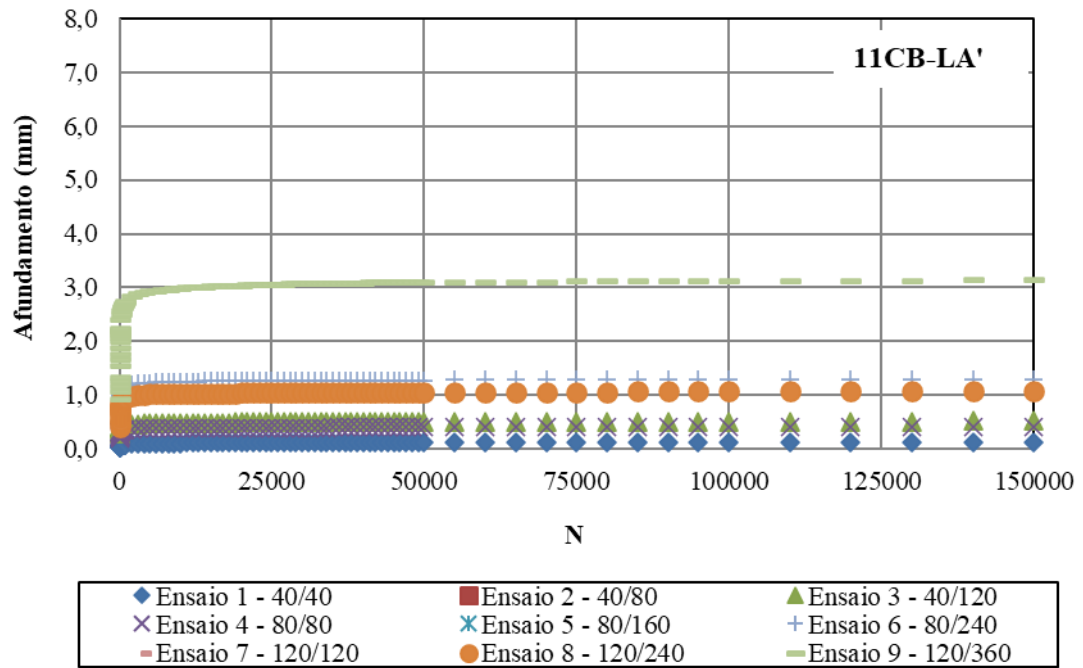


Figura 5.78 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 11CB-LA'.

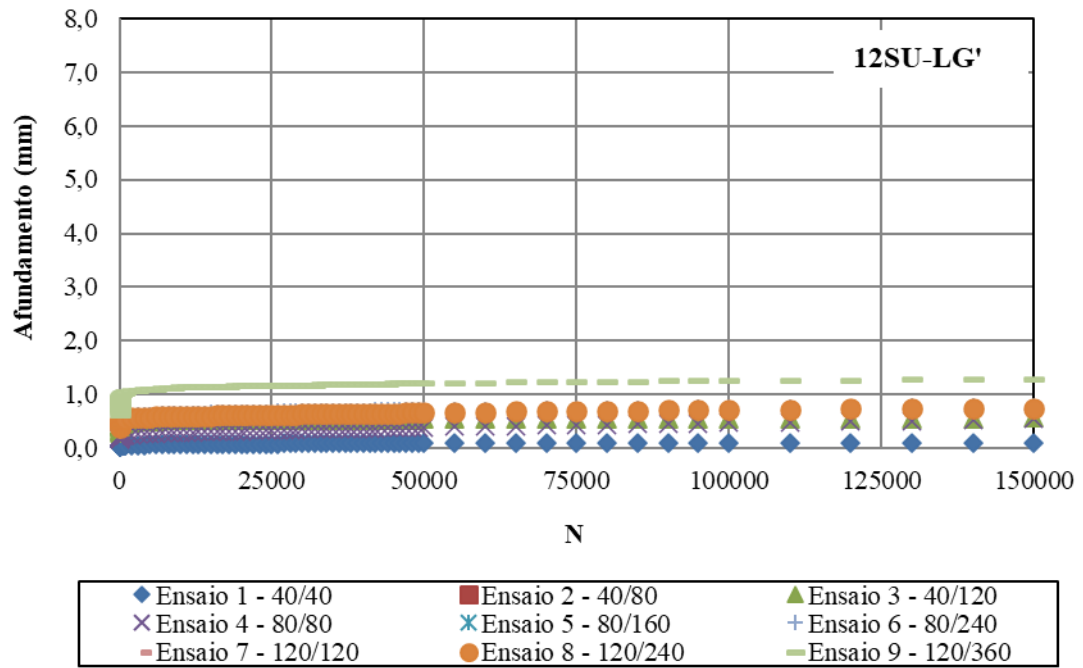


Figura 5.79 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 12SU-LG'.

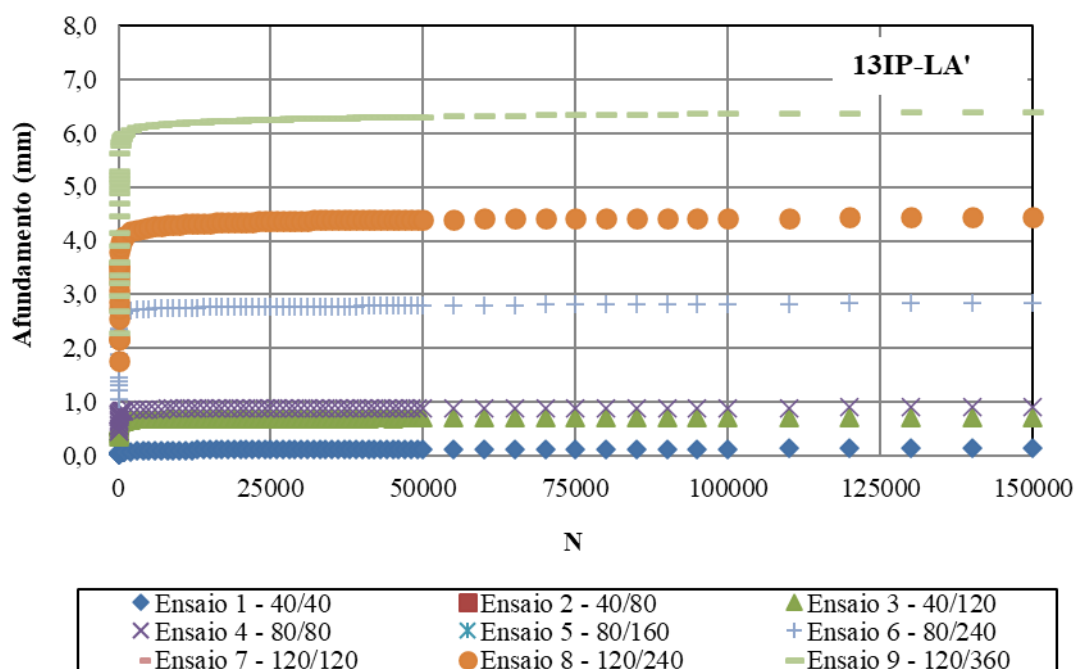


Figura 5.80 – Gráfico de deformação permanente (mm) do solo 13IP-LA'.

As Figuras 5.81 a 5.83 mostram os valores da deformação permanente em milímetros fixando os valores da tensão confinante e variando a tensão desvio. Observa-se que na tensão confinante de 40kPa (Figura 5.81) o afundamento é consideravelmente baixo, sendo que ao triplicar a tensão desvio de 40kPa para 120kPa, em geral, não houve aumento considerável da deformação (com exceção do solo 04IG-LG').

Na Figura 5.82, considerando a tensão confinante de 80kPa e variando a tensão desvio de 80 kPa para 240 kPa, observa-se um aumento na magnitude do afundamento quando comparado à tensão confinante anterior, sendo mais evidente nos solos 01GO-LG', 04IG-LG', 06CA-LA' e 07SL-NA' e a variação da tensão desvio nestes solos resultou num aumento considerável da deformação permanente.

Para a tensão confinante de 120kPa os solos apresentaram aumento do afundamento, comparado às tensões anteriores, e a variação da tensão desvio de 240kPa para 360kPa resultou no aumento considerável das deformações (com exceção dos solos 05PA-LA', 09MU-LA' e 12SU-LG').

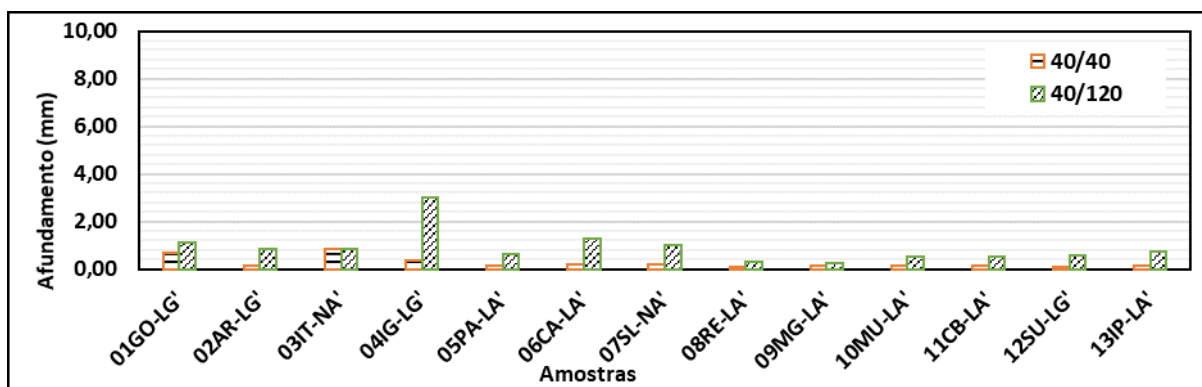


Figura 5.81 – Gráfico de afundamento (mm) dos solos fixando a Tensão confinante em 40 kPa e variando a Tensão desvio de 40 kPa para 120 kPa.

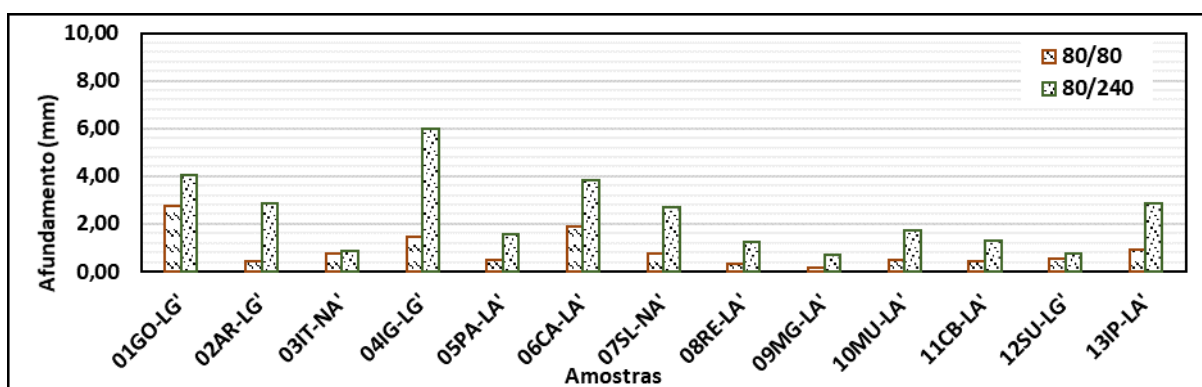


Figura 5.82 – Gráfico de afundamento (mm) dos solos fixando a Tensão confinante em 80 kPa e variando a Tensão desvio de 80 kPa para 240 kPa.

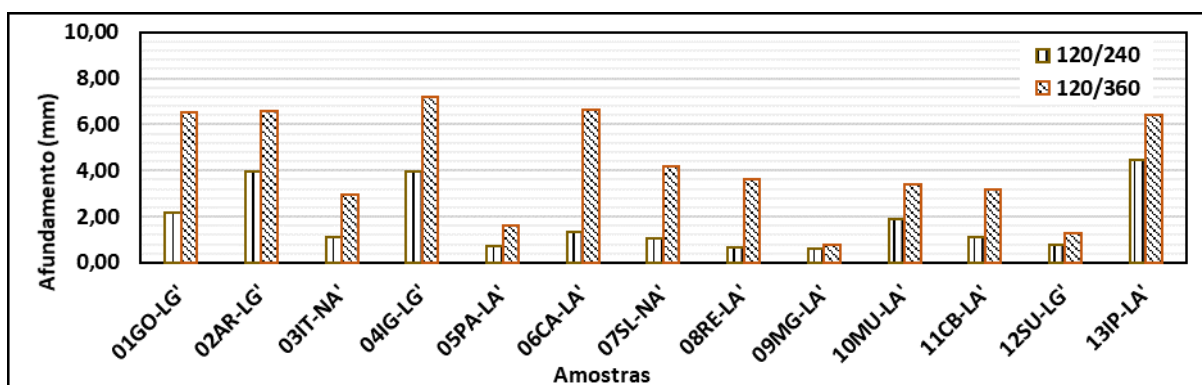


Figura 5.83 – Gráfico de afundamento (mm) dos solos fixando a Tensão confinante em 120 kPa e variando a Tensão desvio de 240 kPa para 360 kPa.

Para verificar o comportamento dos solos ao se variar a tensão confinante montou-se os gráficos das Figuras 5.84 e 5.85(a). Na Figura 5.84 variou-se σ_3 de 80 kPa para 120 kPa e fixou-se a tensão desvio em 240 kPa e, ao contrário do comportamento mostrado nos gráficos anteriores em que o aumento da tensão desvio provocou em todos os solos o aumento da

deformação, neste caso o aumento da tensão confinante resultou em afundamentos menores em boa parte dos solos. Somente nos solos 02AR-LG', 10MU-LA' e 13IP-LA' houve aumento do afundamento com o aumento da tensão confinante.

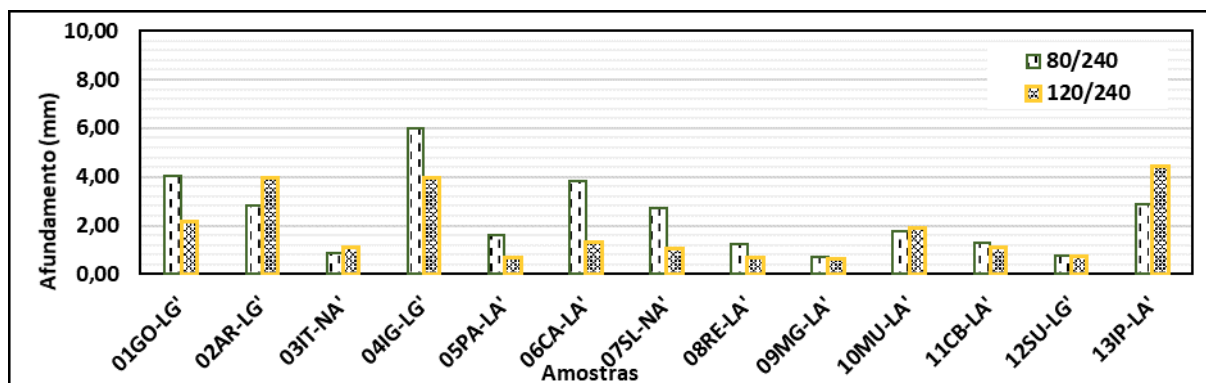


Figura 5.84 – Gráfico de afundamento (mm) dos solos fixando a Tensão desvio em 240 kPa e variando a Tensão confinante de 80 kPa para 120 kPa.

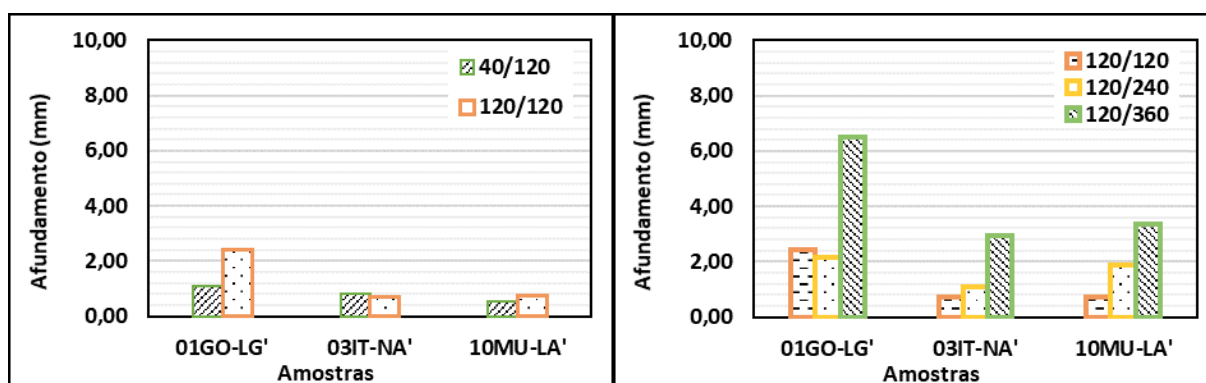


Figura 5.85 – Gráfico de afundamento (mm) de três solos (a) fixando a Tensão desvio em 120 kPa e variando a Tensão confinante de 40 kPa para 120 kPa e (b) fixando a Tensão confinante em 120 kPa e variando a tensão desvio segundo as três razões de tensões -1, 2, e 3.

Na Figura 5.85(a), fixou-se a tensão desvio em 120 kPa e variou-se a tensão confinante de 40 kPa para 120 kPa, mas, nesses pares de tensões foram ensaiados somente os três primeiros solos testados em laboratório que foram as amostras 01GO-LG', 03IT-NA' e 10MU-LA'. Observou-se que no solo de comportamento argiloso a variação da tensão confinante provocou um aumento do afundamento, o que não pode ser considerado regra uma vez que no gráfico anterior (com uma tensão desvio maior) a variação da σ_3 provocou efeito contrário.

Na Figura 5.85(b), fixou-se a tensão confinante em 120kPa e variou-se a tensão desvio considerando as razões de tensões 1, 2 e 3. Nos solos de comportamento arenoso houve um progressivo aumento do afundamento com o aumento da tensão desvio.

De modo geral, vê-se que a variação da tensão desvio parece apresentar um impacto maior na magnitude das deformações permanentes do que a variação da tensão confinante. Em termos de razão de tensões, observa-se variações maiores das deformações permanentes na razão de tensões igual a 3, onde a tensão desvio é 3 vezes maior que a tensão confinante. Isto está associado à natureza dos solos analisados, mas também é razoável que a tensão vertical seja mais significativa de forma geral. Mas, devido a ser um fenômeno complexo, ensaiar com vários conjuntos de tensões permite avaliar de forma mais completa cada material.

Tomando a amostra 01GO-LG' como exemplo, observa-se que a tensão confinante exerce influência importante na deformação permanente, indicando assim que para este solo tanto a tensão desvio quanto a confinante e a razão de tensões são determinantes para definir o comportamento do mesmo à deformação.

A Tabela 5.13 apresenta os parâmetros de regressão do modelo de Guimarães (2009) aplicados aos solos estudados. Observa-se que a maioria dos solos apresentaram valores elevados de R^2 (0,778 – 0,988) indicando um bom enquadramento dos dados ao modelo usado.

Tabela 5.13 – Parâmetros de regressão do Modelo de Guimarães (2009) para os ensaios de deformação permanente dos solos ensaiados.

Solo	Parâmetros do Modelo de Guimarães (2009)				
	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
01GO-LG'	0,209	-0,447	1,727	0,056	0,894
02AR-LG'	0,279	0,792	1,299	0,063	0,980
03IT-NA'	0,125	0,246	1,244	0,055	0,778
04IG-LG'	0,462	-0,510	1,300	0,051	0,960
05PA-LA'	0,071	-1,022	1,659	0,047	0,847
06CA-LA'	0,021	-2,314	3,900	0,047	0,961
07SL-NA'	0,032	-1,860	2,977	0,063	0,934
08RE-LA'	0,005	-1,224	3,961	0,084	0,975
09MG-LA'	0,076	0,043	0,912	0,047	0,929
10MU-LA'	0,102	0,165	1,415	0,074	0,914
11CB-LA'	0,042	-0,529	2,386	0,059	0,967
12SU-LG'	0,088	-0,269	1,066	0,050	0,927
13IP-LA'	0,470	1,088	0,950	0,048	0,988

Analisando os resultados da regressão, observa-se que praticamente metade dos solos apresentam comportamentos opostos em relação ao parâmetro Ψ_2 que está associado à tensão confinante, assim tem-se que para aqueles que apresentaram valores negativos entende-se que o aumento da tensão confinante está relacionado à uma redução da deformação

permanente. Para ajudar nesta análise plotou-se graficamente os resultados de Ψ_2 e Ψ_3 na Figura 5.86.

Ainda sobre Ψ_2 , observa-se que a influência da tensão confinante nos solos 06CA-LA', 07SL-NA' e 08RE-LA' foi bem maior do que nos demais solos, mas também se observa isso em relação à tensão desvio (refletido pelo Ψ_3). Todos os valores de Ψ_3 são positivos indicando que a variação da tensão desvio aumenta a deformação permanente, o que é esperado e congruente com as análises anteriores. Nota-se que ao contrário do observado no comportamento resiliente, onde a tensão desvio é a que tem maior influência nos solos argilosos, na deformação permanente, observa-se influência de ambas as tensões.

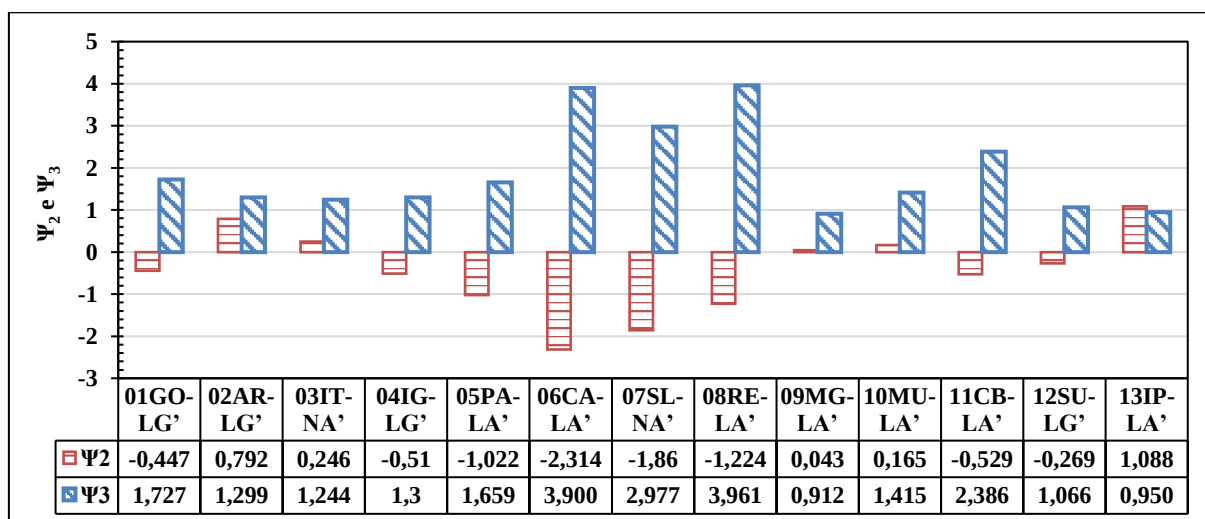


Figura 5.86 – Resultados dos parâmetros Ψ_2 e Ψ_3 do modelo de Guimarães (2009) aplicados aos solos estudados.

5.3.3.2 Análise da ocorrência de shakedown

Para verificar a ocorrência do acomodamento/*shakedown*, adotou-se o modelo de gráfico de DAWSON e WELLNER (1999) e os critérios de classificação propostos por LIMA (2020). Conforme mostrado nas Figuras 5.87 a 5.99, fixou-se como padrão, inclusive para fins comparativos entre um solo e outro, o eixo x em 40×10^{-3} por ser o máximo valor possível para visualização de todos os ensaios plotados. O Quadro 5.6 apresenta um resumo indicando os tipos de comportamento observados em cada ensaio. Neste quadro, os comportamentos A, B, AB, referem-se aos modelos apresentados no Quadro 2.7 do capítulo 2, sendo que A representa o acomodamento, sendo este o mais desejado para a seleção de um solo para uma camada de

um pavimento ou para o subleito, embora o B e o AB ainda sejam aceitáveis, dependendo da posição da camada e da estrutura total do pavimento.

Quadro 5.6 – Tipos de comportamento dos solos desta pesquisa quanto à deformação permanente.

Solo/Pares de tensões	40/40	40/80	40/120	80/80	80/160	80/240	120/120	120/240	120/360
01GO-LG'	B	B	A	B	AB	AB	B	AB	AB
02AR-LG'	A	-	A	A	-	AB	-	AB	AB
03IT-NA'	A	A	A	A	A	A	A	A	B
04IG-LG'	A	-	AB	B	-	AB	-	AB	AB
05PA-LA'	A	-	A	A	-	A	-	A	A
06CA-LA'	A	-	B	B	-	AB	-	A	AB
07SL-NA'	A	-	A	A	-	AB	-	A	AB
08RE-LA'	A	-	A	A	-	B	-	A	B
09MG-LA'	A	-	A	A	-	A	-	A	A
10MU-LA'	B	B	B	B	B	B	B	B	B
11CB-LA'	A	-	A	A	-	A	-	A	AB
12SU-LG'	A	-	A	B	-	B	-	B	B
13IP-LA'	A	-	A	A	-	AB	-	AB	AB

Analisando os resultados dos gráficos e do Quadro 5.6, observa-se que não houve em nenhum dos solos o comportamento do tipo C que é caracterizado pela ruptura. Não foi observado um padrão claro de comportamento considerando as classes MCT.

Fazendo uma análise geral por estado de tensão, nota-se que no par de tensão mais baixo (40/40) somente os solos 01GO-LG' e o 10MU-LA' apresentaram comportamento diferente de A (ou seja, B). Nos pares de tensões 40/120 e 80/80 também predominou o comportamento do tipo A. Nos pares de tensões 80/240 e 120/240 predominaram os comportamentos dos tipos A e AB. No último par de tensão somente os solos 03IT-NA', 08RE-LA', 10MU-LA' e 12SU-LG' apresentaram classificação B com contribuição para deformação permanente, porém com tendência de acomodação.

No solo 01GO-LG' (Figura 5.87) tem-se a ocorrência de três tipos de comportamento, sendo o tipo A somente no Ensaio 3 – pares de tensões confinante e desvio iguais a 40 e 120 kPa, respectivamente, indicando que o material entrou em *Shakedown* nesta combinação de tensões. Nos ensaios com razão de tensão 1 (40/40, 80/80 e 120/120) e o ensaio 2 (40/80) foi observado o comportamento do tipo B, onde apesar do comportamento inicial ser semelhante ao do tipo A, ocorre escoamento plástico, ou seja, há contribuição para deformação permanente, porém com tendência de acomodação. Já nos Ensaios 5, 6, 8 e 9 cuja

razão de tensões é de 2 e 3, observou-se comportamento do tipo AB (situação mista entre A e B) em que há o escoamento plástico nos ciclos iniciais seguido da taxa de acréscimo de DP tendendo a zero, ou seja, apesar do material indicar o *Shakedown*, a magnitude das deformações iniciais não deve ser desconsiderada.

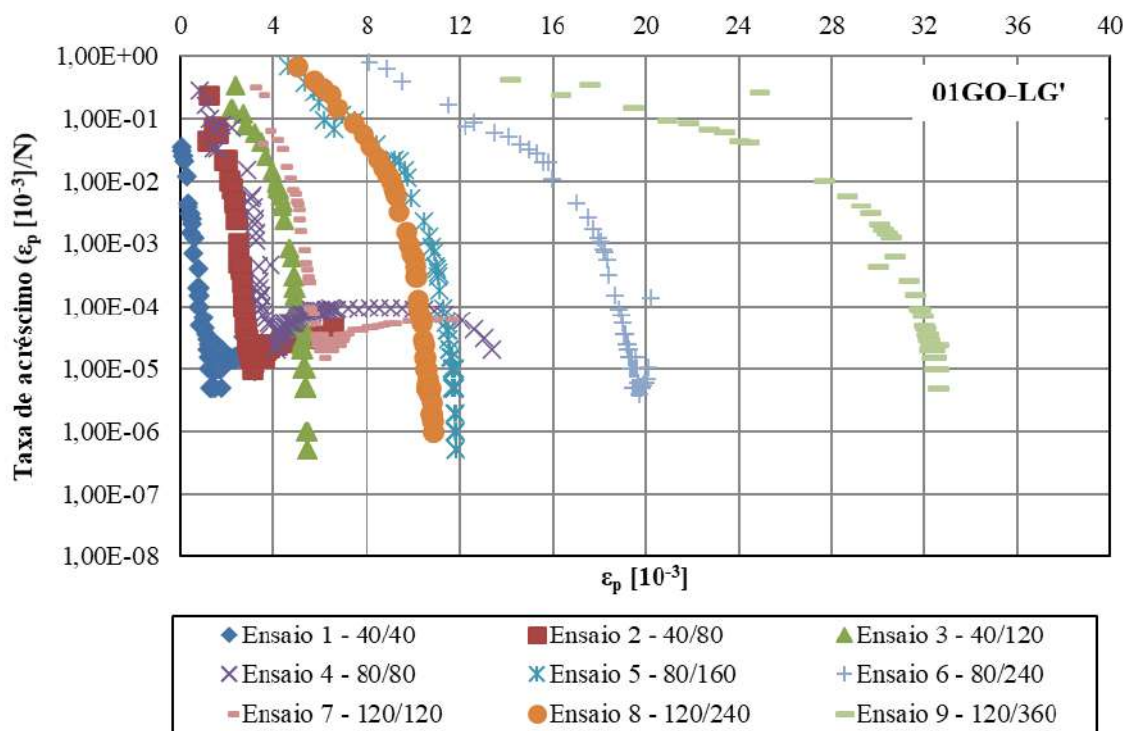


Figura 5.87 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 01GO-LG', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

Nos solos 02AR-LG' e 13IP-LA' (Figuras 5.88 e 5.99) predominou o comportamento do Tipo A nos pares de tensões mais baixos e o tipo AB nos demais. No solo 03IT-NA' predominou o comportamento do tipo A, com exceção do último ensaio que se caracterizou como do tipo B. Neste solo, observou-se um comportamento peculiar, onde entre a taxa de acréscimo de $1,0 \times 10^{-4}$ e $1,0 \times 10^{-5}$ houve um aumento da deformação permanente até a faixa de 4×10^{-3} , no entanto após este ponto o comportamento tendeu novamente ao comportamento do tipo A entrando em *shakedown*.

No solo 04IG-LG' somente no par de tensão 40/40 houve comportamento do tipo A, no ensaio 4 o comportamento foi do tipo B e nos demais ensaios predominou o tipo AB. Nos solos 05PA-LA' e 09MG-LA' (Figuras 5.91 e 5.95, respectivamente) todos os ensaios mostraram comportamento do tipo A. No solo 10MU-LA' (Figura 5.96) todos os ensaios apresentaram comportamento do tipo B.

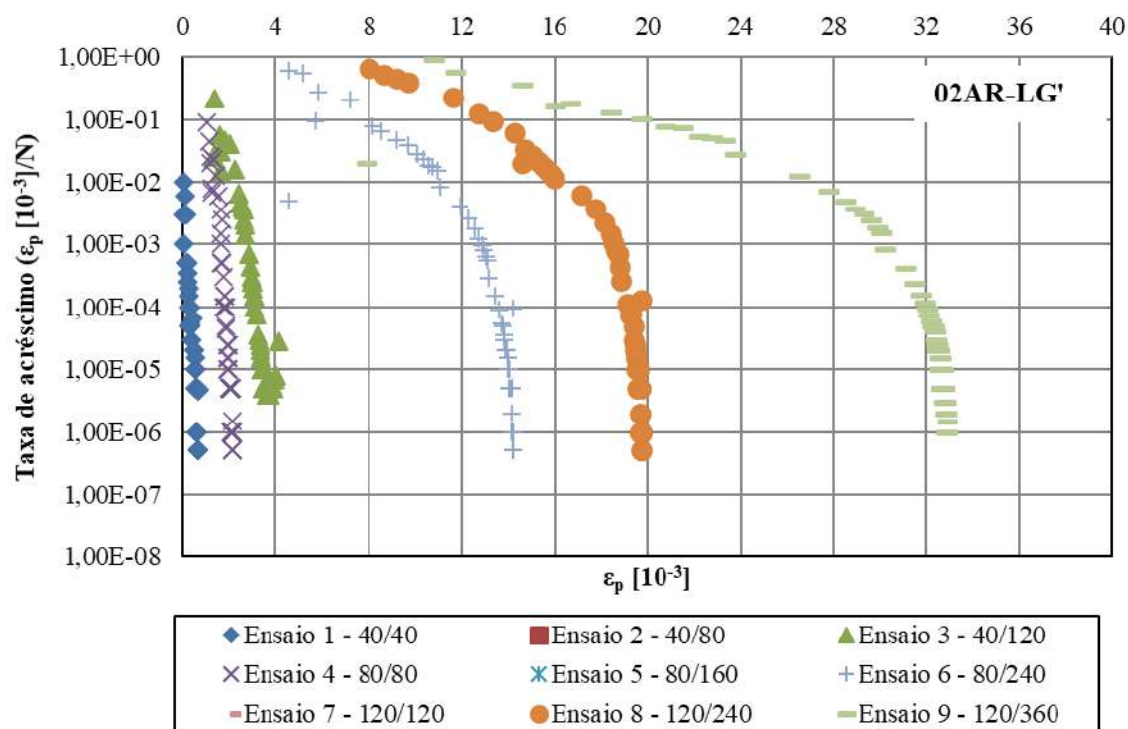


Figura 5.88 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 02AR-LG', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

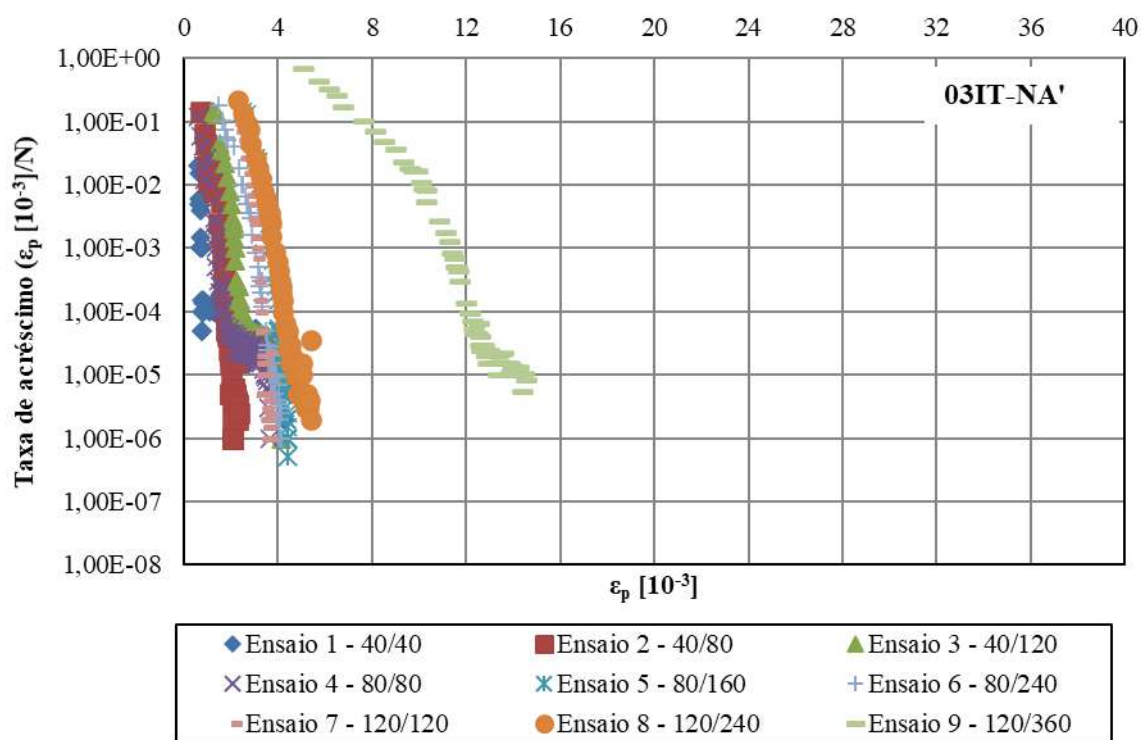


Figura 5.89 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 03IT-NA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

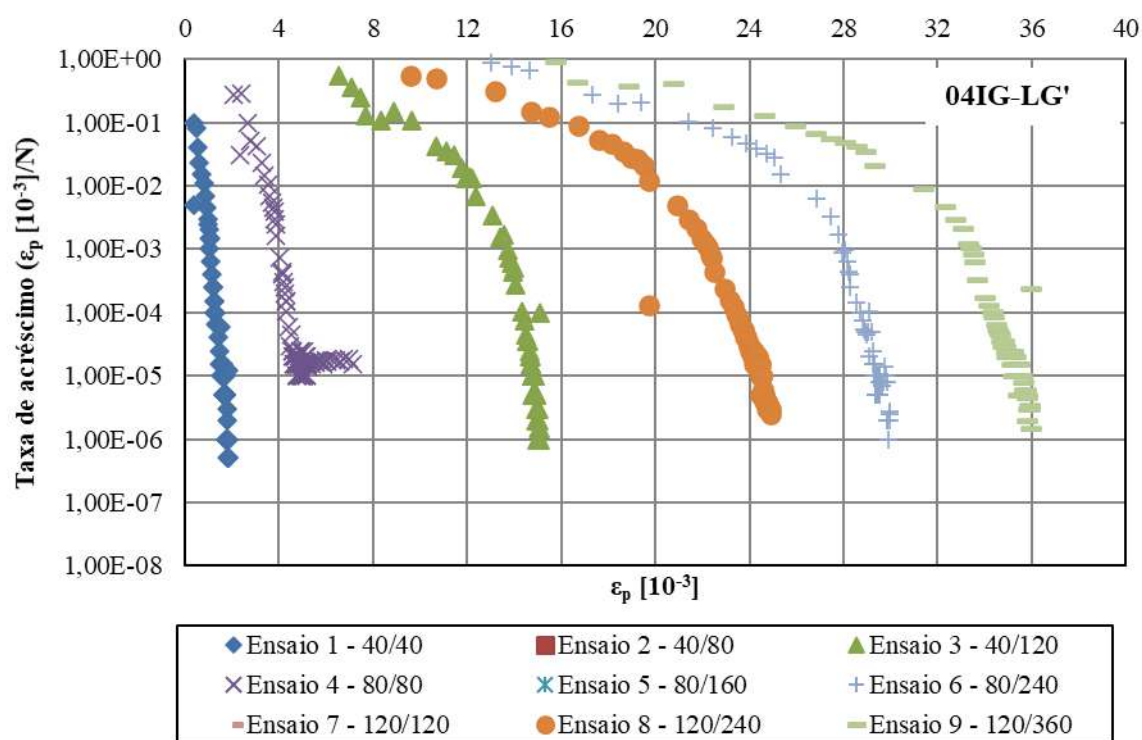


Figura 5.90 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 04IG-LG', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

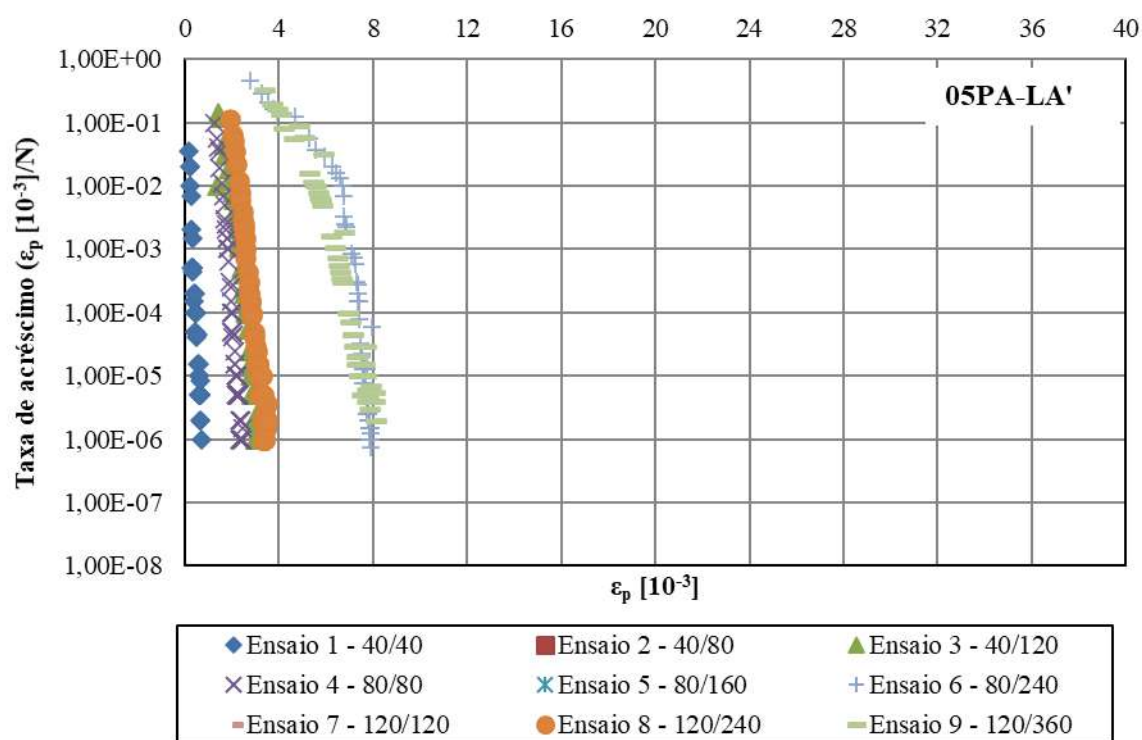


Figura 5.91 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 05PA-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

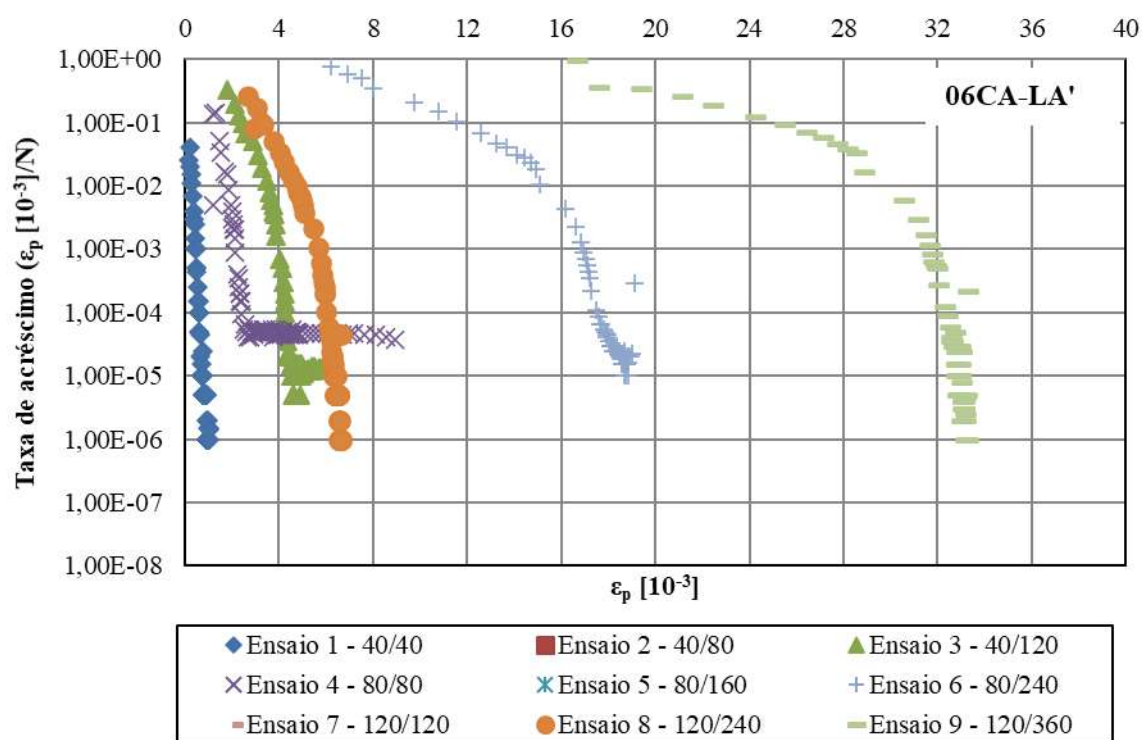


Figura 5.92 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 06CA-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

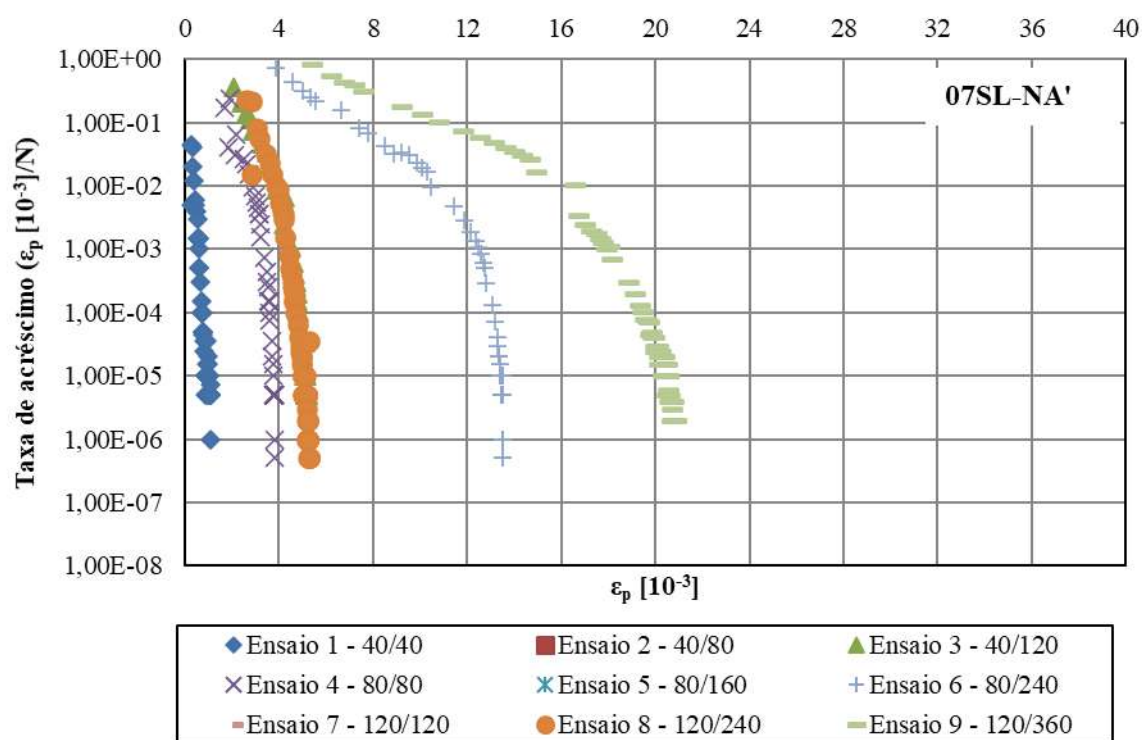


Figura 5.93 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 07SL-NA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

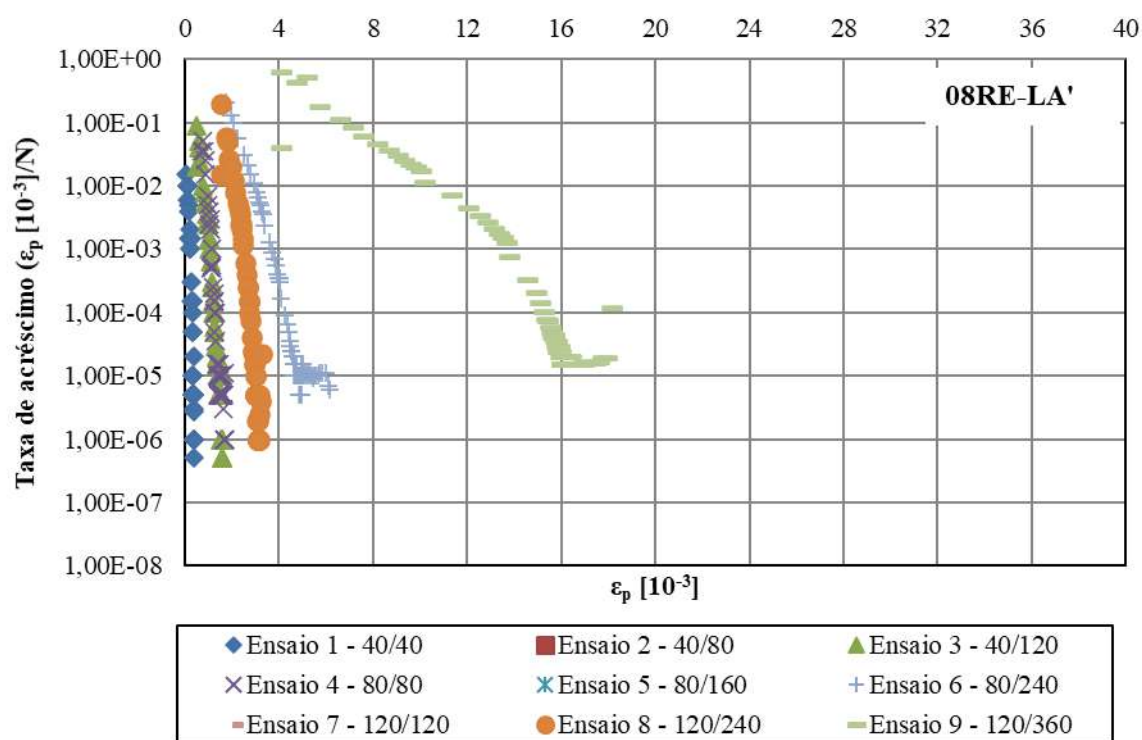


Figura 5.94 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 08RE-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

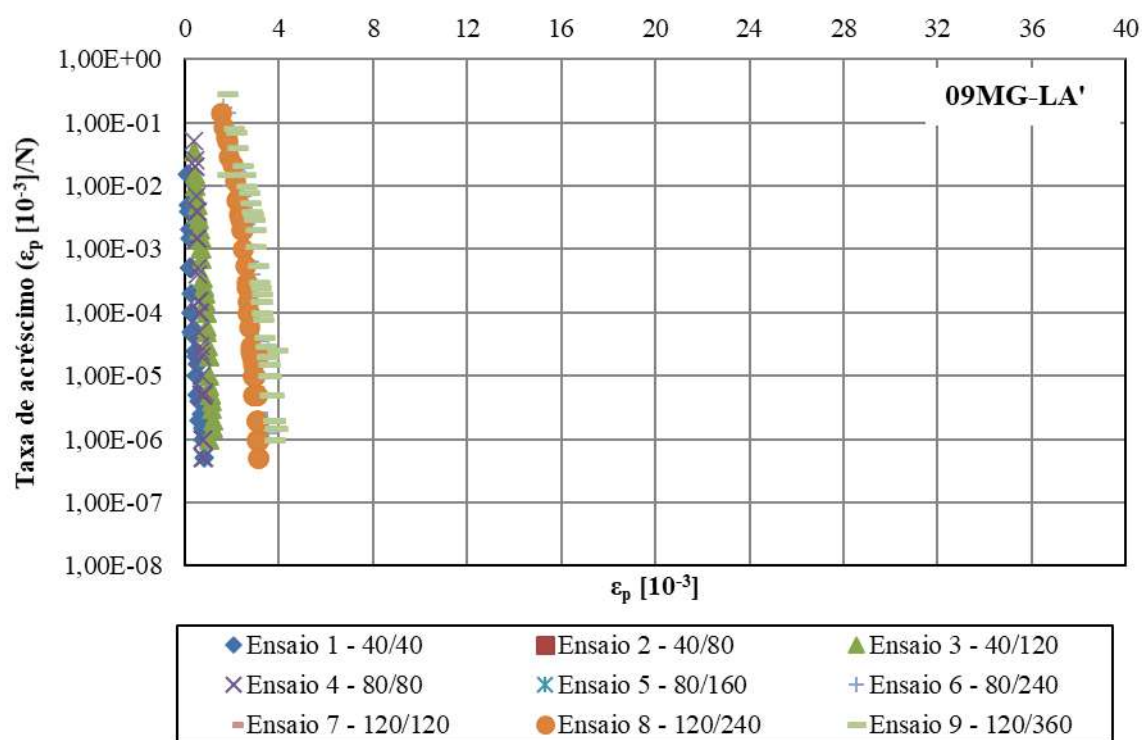


Figura 5.95 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 09MG-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

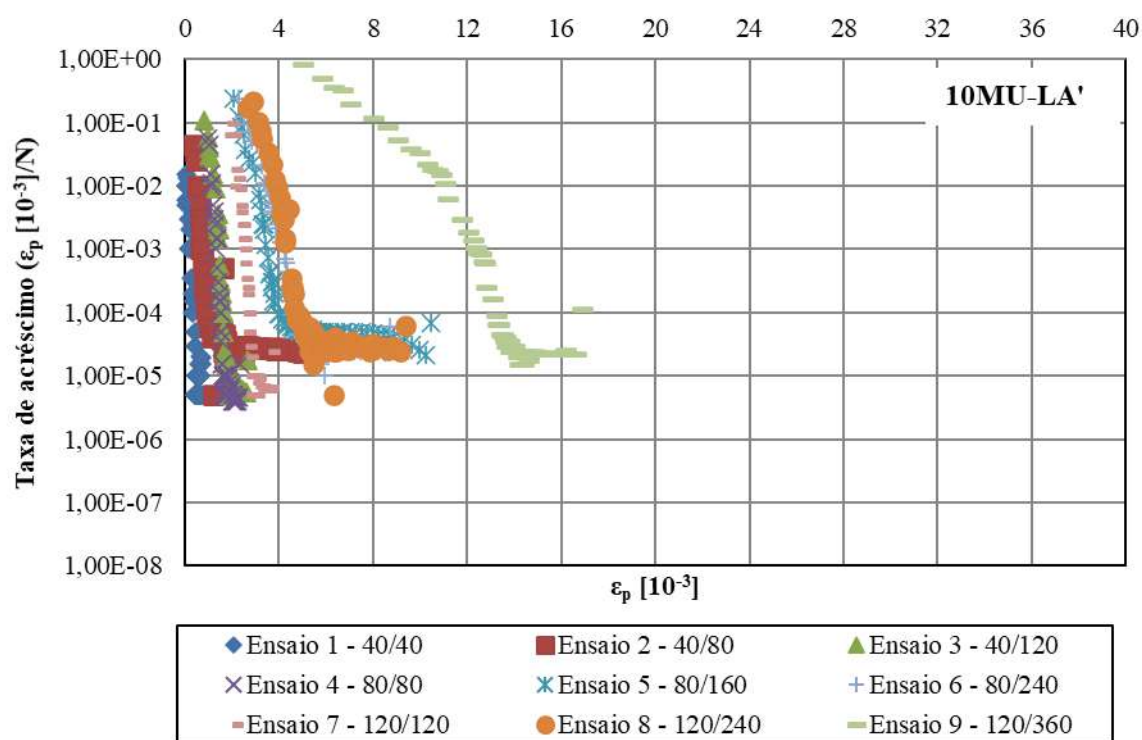


Figura 5.96 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 10MU-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

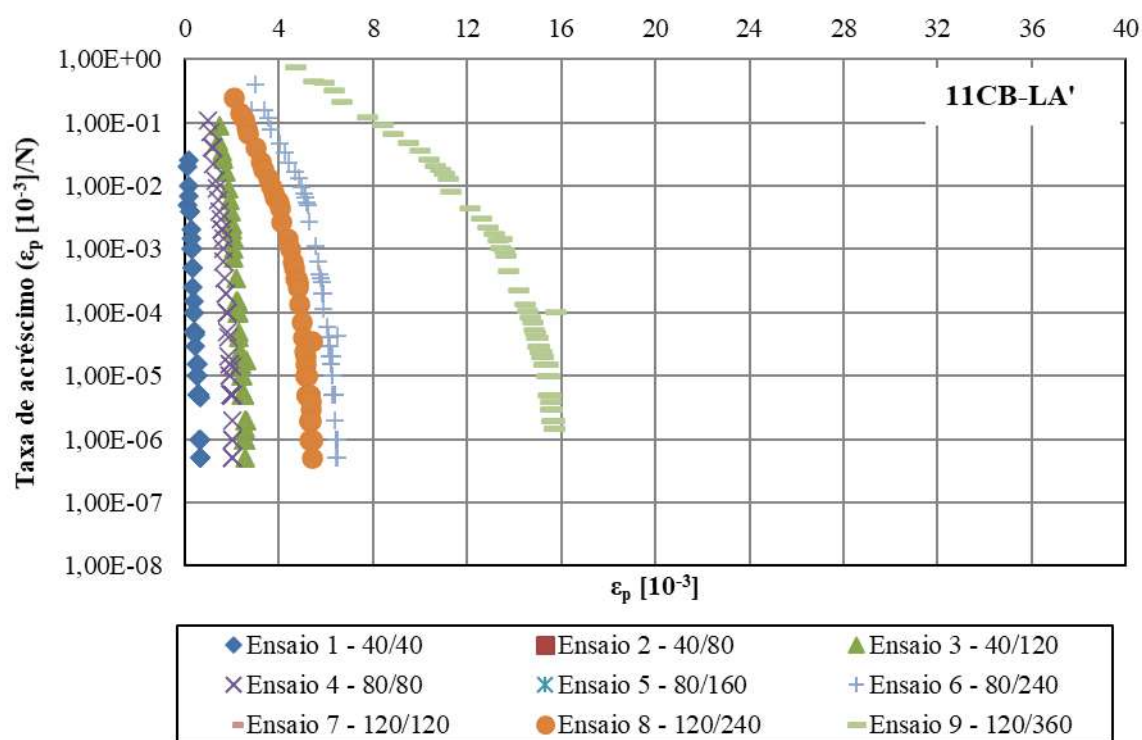


Figura 5.97 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 11CB-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

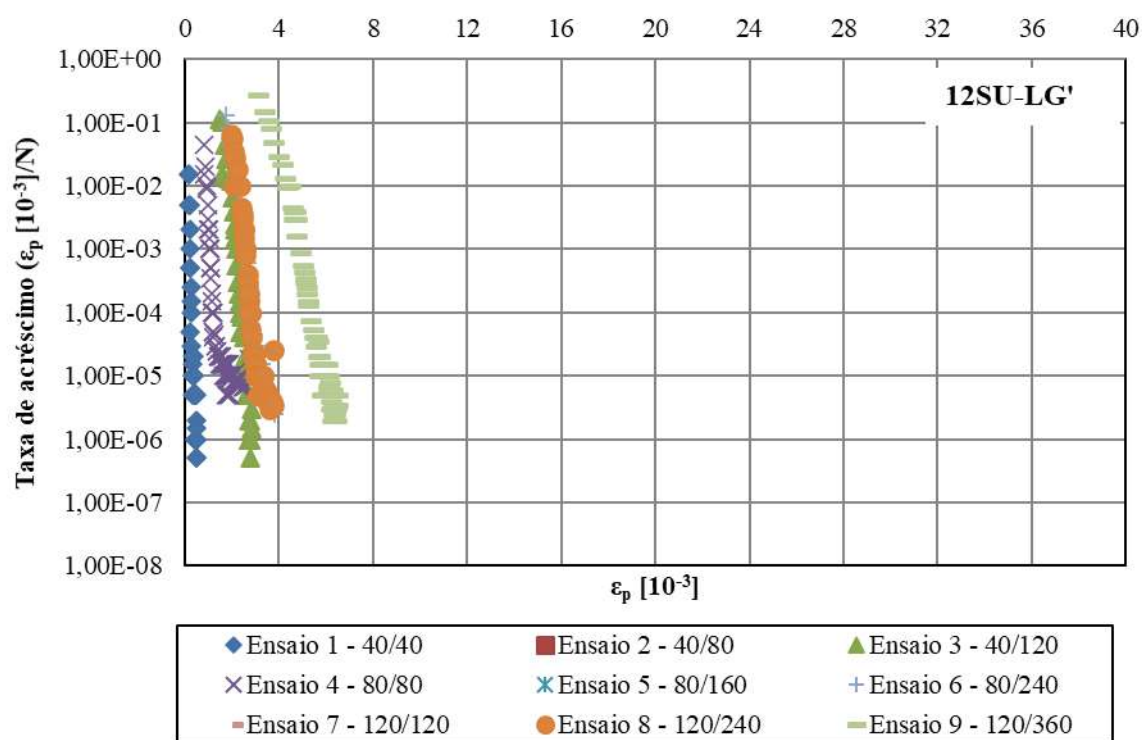


Figura 5.98 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 12SU-LG', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

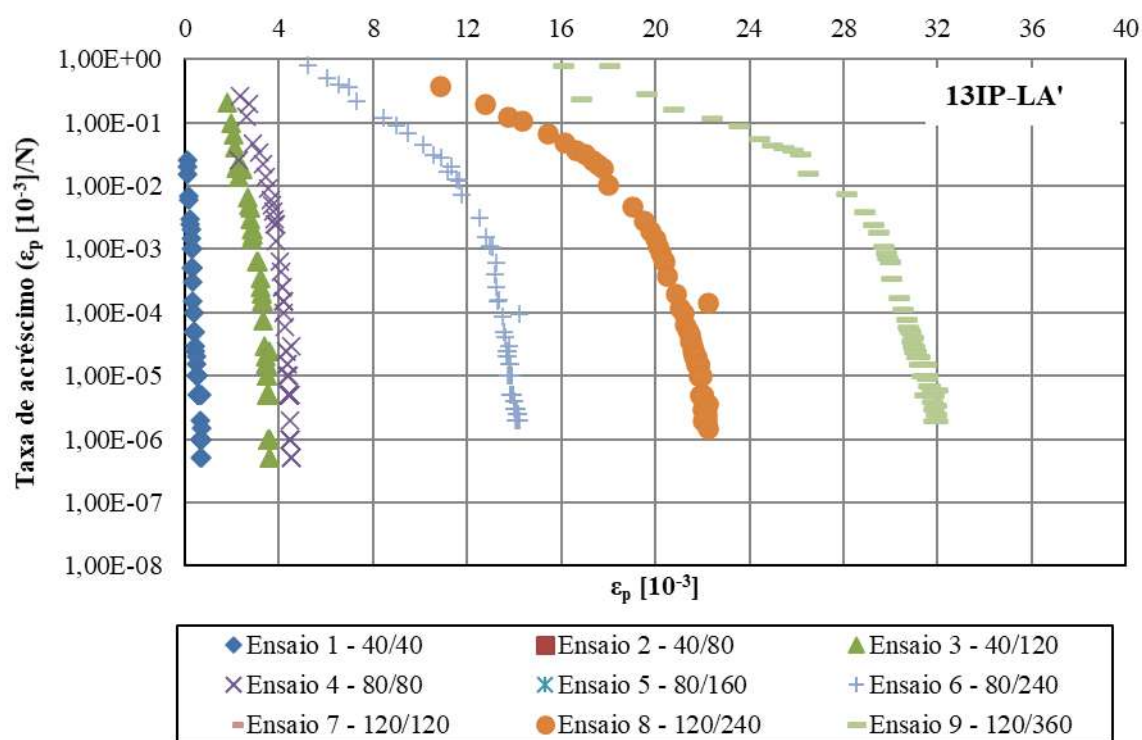


Figura 5.99 – Gráfico de pesquisa de ocorrência de *shakedown* no solo 13IP-LA', seguindo o modelo proposto por LIMA (2020).

5.3.3.3 *Análise complementar – Escolha dos solos considerando os critérios de LIMA (2020)*

Para analisar a escolha dos solos estudados quanto à deformação permanente realizou-se, para cada material, os cálculos de previsão da deformação permanente utilizando o modelo de Guimarães (2009) considerando quatro diferentes pares de tensões e três níveis de tráfego e analisou-se os resultados através da adoção dos critérios propostos por LIMA (2020), os quais foram apresentados no Quadro 2.8 (Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica).

A Tabela 5.14 mostra os resultados desta análise. Conforme indicado na legenda: as “células” marcadas com a cor verde enquadraram-se no perfil de “Indicado”, ou seja, apresentaram resultados de ε_p (%) menor do que 2% nos níveis de tráfego leve e menor que 1% nos níveis de tráfego médio e pesado; às marcadas na cor amarela encaixaram-se no critério “Aceitável de acordo com o tipo de comportamento” e, as marcadas em vermelho e sublinhado são condições em que não é indicado o uso.

No par de tensão 40/40 kPa, nos três níveis de tráfego todos os solos foram classificados como indicados para o uso, assim como nas tensões 80/80 kPa. No par de tensão 80/240 kPa mais da metade dos solos permanecem como indicado para uso, porém cinco solos necessitam também de análise complementar de seu comportamento para definição do seu uso e o solo 04IG-LG’ encaixou-se como não indicado, nos três níveis de tráfego.

No par de tensão 120/360 kPa, tensões correspondentes à camada de base em situações de revestimento pouco espesso segundo Lima (2020), dois solos (09MG-LA’ e 12SU-LG’) permaneceram indicados para uso, que foram solos que apresentam valores baixos de deformação permanente e comportamentos predominantemente do tipo A. Por outro lado, boa parte dos solos marcados como indicados anteriormente passaram a necessitar de uma análise mais profunda ou mesmo a ser “não indicado” para uso principalmente nos níveis de tráfego médio e pesado.

Esse tipo de análise é bastante interessante num nível preliminar, onde no caso dos solos estudados entende-se que a maioria poderia ser com certeza utilizada em níveis de tensões baixos, mas em níveis altos, que caracterizaria camadas de pavimento mais próximas da superfície, necessitaria de uma avaliação mais apurada. Como são solos finos é esperado este comportamento, especialmente das classes não lateríticas. Todavia, é válido ressaltar que a definição final da utilização ou não do material requer a análise dos demais parâmetros geotécnicos e também das características de projeto adotadas para o adequado dimensionamento do pavimento.

Tabela 5.14 – Análise da previsão de deformação permanente para três diferentes tráfegos e quatro níveis de tensões.

Solo	Modelo DP - ε_p (%)											
	$\sigma_3/\sigma_d = 40/40$ kPa			$\sigma_3/\sigma_d = 80/80$ kPa			$\sigma_3/\sigma_d = 80/240$ kPa			$\sigma_3/\sigma_d = 120/360$ kPa		
	TL	TM	TP	TL	TM	TP	TL	TM	TP	TL	TM	TP
01GO-LG'	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	2,2	2,4	2,8	3,7	<u>4,0</u>	<u>4,7</u>
02AR-LG'	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,5	1,7	1,8	2,2	3,9	<u>4,2</u>	<u>5,1</u>
03IT-NA'	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,7	0,8	0,9	1,3	1,4	1,7
04IG-LG'	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,9	3,2	3,4	3,9	4,3	4,7	5,4
05PA-LA'	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
06CA-LA'	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,1	2,5	3,8	<u>4,1</u>	<u>4,7</u>
07SL-NA'	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	1,5	1,6	2,0	2,4	2,6	<u>3,1</u>
08RE-LA'	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,7	0,9	1,9	2,2	2,8
09MG-LA'	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6
10MU-LA'	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,9	1,0	1,2	1,7	1,9	2,4
11CB-LA'	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,8	0,9	1,1	1,8	1,9	2,3
12SU-LG'	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
13IP-LA'	0,1	0,1	0,2	0,6	0,6	0,7	1,6	1,7	2,0	3,6	<u>3,9</u>	<u>4,5</u>

Legenda:

Não indicado
Aceitável de acordo com o tipo de comportamento
Indicado

Nota: TL – Tráfego Leve (5×10^5); TM – Tráfego Médio (2×10^6) e, TP – Tráfego Pesado (4×10^7)

Os demais resultados que podem ser obtidos com o ensaio de deformação permanente, como a deformação resiliente e modulo resiliente são apresentados no Apêndice III.

5.4 Análise integrada dos resultados

A matriz de correlação de Pearson calculada considerando todos os solos desta pesquisa (RMRecife) está apresentada, em partes, no Apêndice VI. Ao todo, analisaram-se correlações entre 57 variáveis geotécnicas, mas buscando a objetividade, neste tópico serão discutidas apenas as correlações classificadas como Muito Forte (r entre $\pm 0,9$ e $\pm 1,0$), fazendo menção as correlações Forte e Moderada quando pertinente.

5.4.1 Correlações entre propriedades físicas

As propriedades físicas que apresentaram correlação Muito Forte foram: positiva - Pag vs. Pr10, Pped vs. Pr10, Pp200 vs. Pargila e Pp200 vs. Psilte; e as negativas - Pargila vs. Pareia, Psilte vs. Pareia, Pag vs. Pp10, Pped vs. Pp10, Pp10 vs. Pr10 e Pp200 vs. Pareia. Observa-se que todas estão associadas à granulometria dos materiais e que algumas são bem óbvias visto que associam as peneiras com as porcentagens das frações correspondentes. As Figuras 5.100 a 5.103 apresentam os gráficos de dispersão (*Scatterplot*) de algumas das correlações mencionadas. As expressões da correlação linear entre as variáveis estão listadas no Quadro 5.7, bem como o respectivo coeficiente de Pearson, com valor- $p < 0,05$ (confiabilidade de 95%).

Em síntese têm-se que, para os solos analisados:

- Quanto maior a porcentagem de material retido na peneira de nº 10, maior a quantidade de areia grossa e pedregulho na composição granulométrica do solo, o que é totalmente explicável uma vez que essas frações são justamente as que tem diâmetros superiores à malha desta peneira. Comportamento oposto é observado quando se considera a porcentagem passante nesta peneira, em que se tem diminuição das porcentagens de areia grossa e pedregulho, assim, quanto maior as porcentagens de frações mais grossas (Pag e Pped) menores serão as frações finas (Pargila, Psilte, Paf e Pam). Para fins ilustrativos apresenta-se apenas um gráfico de dispersão de cada relação destas frações com a peneira mencionada (Figura 5.100(a) - Pag vs. Pr10 e Figura 5.100(b) - Pped vs. Pp10). Os solos 02AR-LG' e 05PA-LA' fogem da tendência por terem quantidade de material grosseiro (pedregulho e areia grossa) um pouco maior que os demais solos ($Pped + Pag > 3\%$).

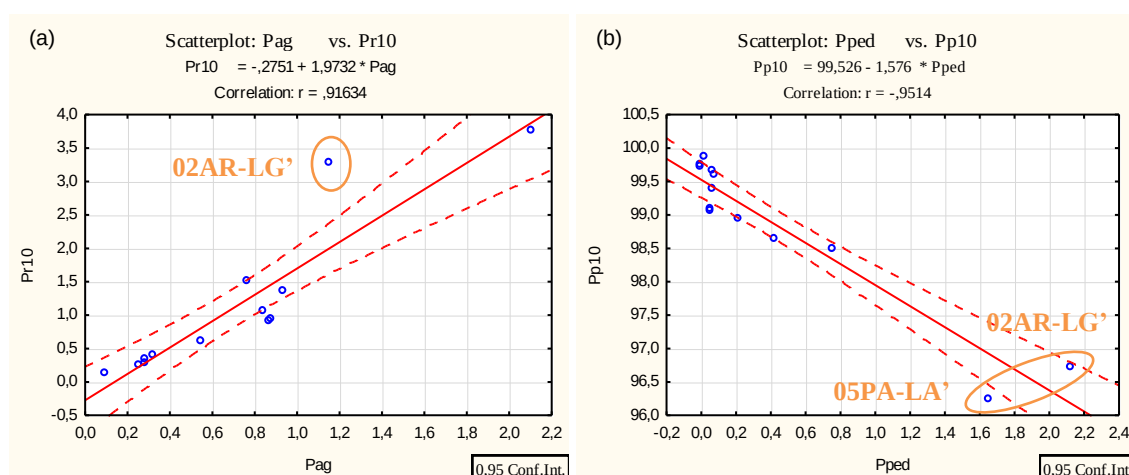


Figura 5.100 – Gráficos de dispersão de (a) Pag vs. Pr10 e (b) Pped vs. Pp10.

- Quanto maior a porcentagem de argila menor a porcentagem de areia (Figura 5.101(a)), fato também já esperado uma vez que, por se tratar de solos essencialmente finos, as frações granulométricas mais expressivas dos materiais estudados são justamente argila, silte e areia. Todavia, através da matriz de correlação observou-se que, das diferentes frações de areia, a areia fina apresentou uma correlação negativa forte com a porcentagem de argila.
- Quanto maior a porcentagem de silte menor a porcentagem de areia (Figura 5.101(b)). No entanto, além da areia fina, a areia média também se correlaciona negativamente com a porcentagem de silte, só que de forma moderada.

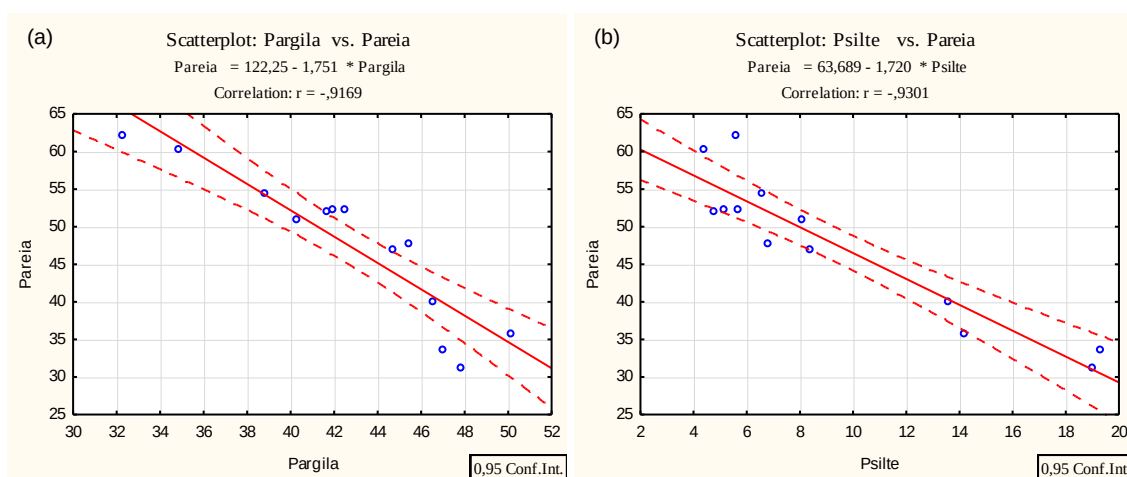


Figura 5.101 – Gráficos de dispersão de (a) Pargila vs. Pareia e (b) Psilte vs. Pareia.

- As porcentagens de silte e argila estão relacionadas positivamente com a porcentagem de material passante na peneira nº 200 (Figura 5.102 – (a) e (b)), o que reflete a realidade uma vez que Pp200 é numericamente igual à soma destas frações.

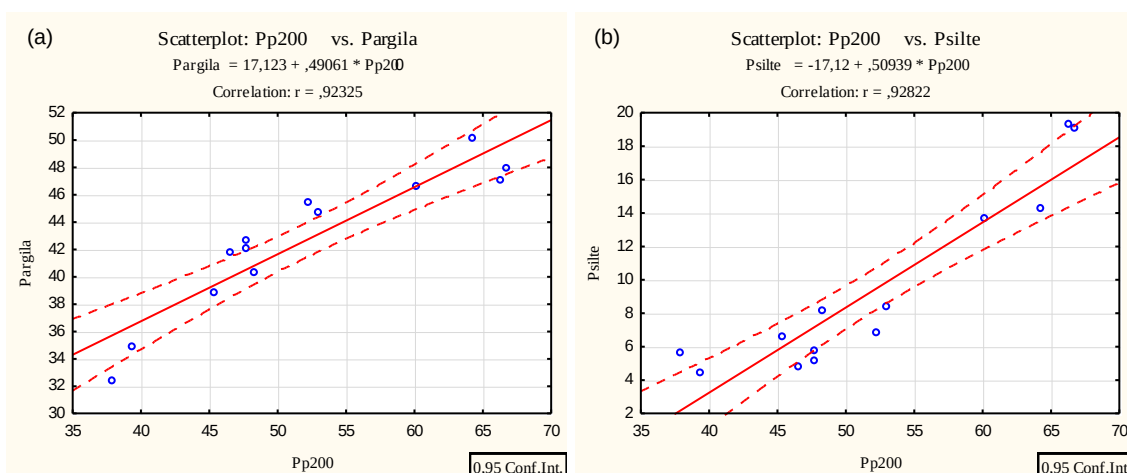


Figura 5.102 – Gráficos de dispersão de (a) Pp200 vs. Pargila e (b) Pp200 vs. Psilte.

- Observou-se uma correlação negativa quase perfeita (muito próximo à -1,0) entre a porcentagem de material passando na peneira nº 200 e a porcentagem de areia, indicando assim uma peculiaridade dos solos estudados (Figura 5.103(a)). Além disso, a fração de areia fina apresentou intensidade de correlação forte com a Pp200, conforme Figura 5.103(b).

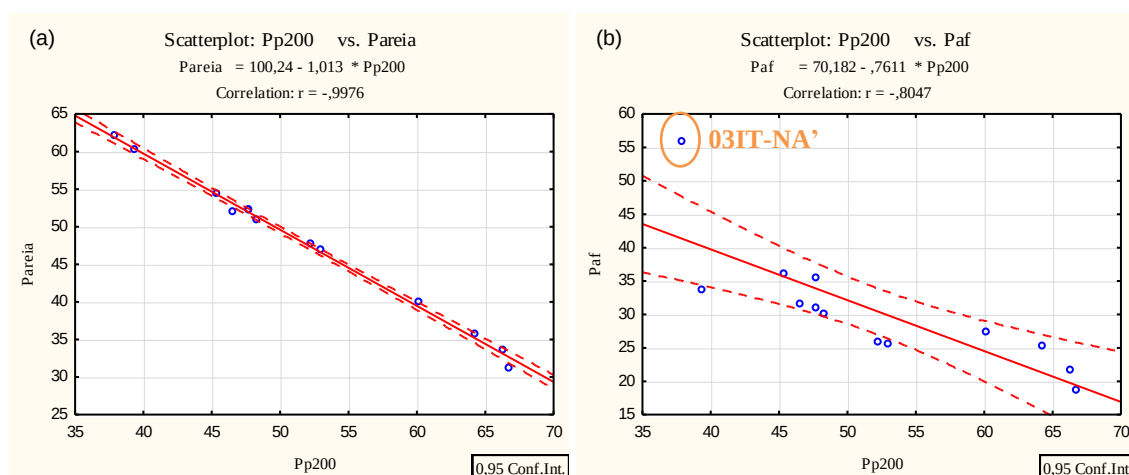


Figura 5.103 – Gráficos de dispersão de (a) Pp200 vs. Pareia e (b) Pp200 vs. Paf.

Quadro 5.7 – Expressões da correlação linear entre propriedades de granulometria com intensidade muito forte (coeficiente de Pearson entre $\pm 0,9$ e $\pm 1,0$).

Variáveis correlacionadas	Expressão da correlação linear	Coefficiente de Pearson (r)
Pag vs. Pr10	$Pr10 = -0,2751 + 1,9732 * Pag$	0,916
Pped vs. Pr10	$Pr10 = 0,47352 + 1,5757 * Pped$	0,951
Pag vs. Pp10	$Pp10 = 100,28 - 1,973 * Pag$	-0,916
Pped vs. Pp10	$Pp10 = 99,526 - 1,576 * Pped$	-0,951
Pp200 vs. Pargila	$Pargila = 17,123 + ,49061 * Pp200$	0,923
Pp200 vs. Psilte	$Psilte = -17,12 + ,50939 * Pp200$	0,928
Pp200 vs. Pareia	$Pareia = 100,24 - 1,013 * Pp200$	-0,9976
Pargila vs. Pareia	$Pareia = 122,25 - 1,751 * Pargila$	-0,916
Psilte vs. Pareia	$Pareia = 63,689 - 1,720 * Psilte$	-0,930

5.4.2 Correlações entre propriedades físicas e mecânicas

As correlações classificadas como muito forte entre propriedades físicas e mecânicas foram: positiva – LL1 vs. W_o , $\rho_{dm\acute{a}x}$ vs. Pareia, Pp200 vs. W_o ; e as negativas - $\rho_{dm\acute{a}x}$ vs. W_o , $\rho_{dm\acute{a}x}$ vs. Psilte, W_o vs. Pareia, Pp200 vs. $\rho_{dm\acute{a}x}$. Observa-se que a maioria das correlações estão ligadas à umidade ótima. Aqui também as correlações são as esperadas em termos de características que são interdependentes.

Foram identificadas correlações fortes e importantes entre algumas variáveis físicas e os parâmetros Sb e Sres1 do modelo de ajuste das curvas características, tais como: Sb vs. Pareia, Pp200 e LL1 e, Sres1 vs. Pareia, Pp200 e Pargila. Além disso, uma correlação moderada (negativa) que merece destaque é a observada entre MRmédio vs. M.O.

As Figuras 5.104 a 5.109 apresentam os gráficos de dispersão (*Scatterplot*) das correlações mencionadas. As expressões de correlação linear entre as variáveis estão listadas no Quadro 5.8, bem como o respectivo coeficiente de Pearson, com valor- $p < 0,05$ (confiabilidade de 95%).

Em síntese têm-se que, para os solos analisados:

- Quanto maior o Limite de Liquidez sem secagem prévia (LL1) maior a umidade ótima (Figura 5.104), indicando que para solos tropicais a realização de ensaios de consistência sem a prévia secagem e sem destorroamento pode fornecer resultados mais adequados.

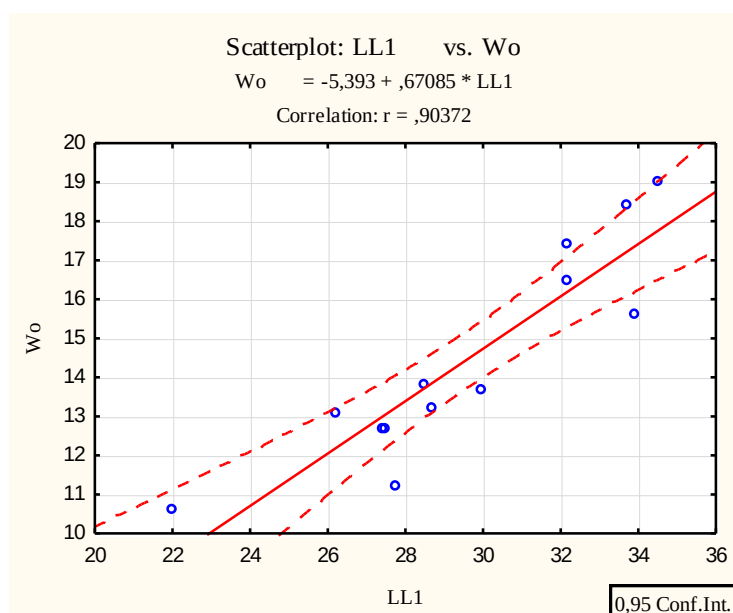


Figura 5.104 – Gráfico de dispersão de LL1 vs. W_o .

- Quanto maior a porcentagem de areia, menor a umidade ótima (Figura 5.105(a)) e maior a massa específica aparente seca máxima (Figura 5.105(b)).

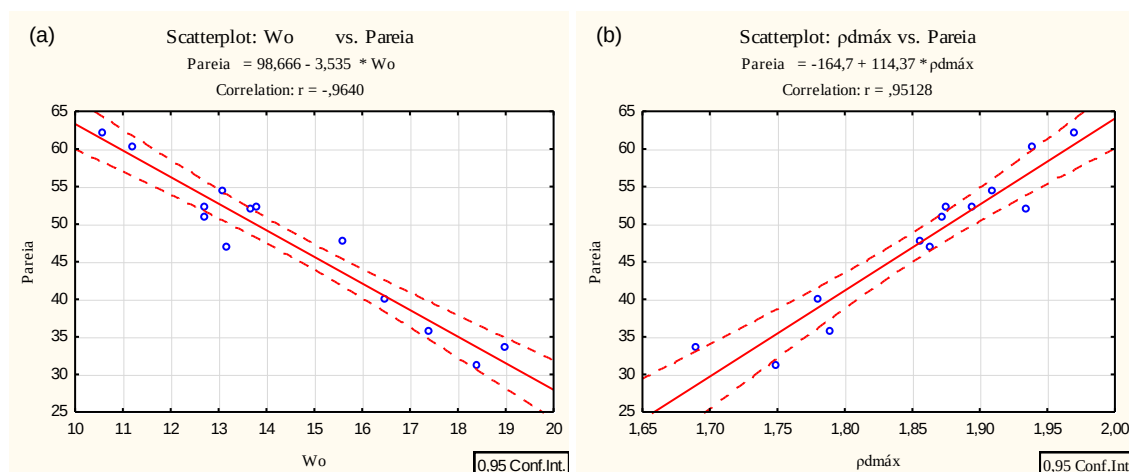


Figura 5.105 – Gráficos de dispersão de (a) W_o vs. Pareia e (b) $\rho_{dmáx}$ vs. Pareia.

- Quanto maior a porcentagem de silte+argila (porcentagem de material passante na peneira de nº 200) maior a umidade ótima (Figura 5.106(a)) e menor a massa específica aparente seca máxima (Figura 5.106(b)).

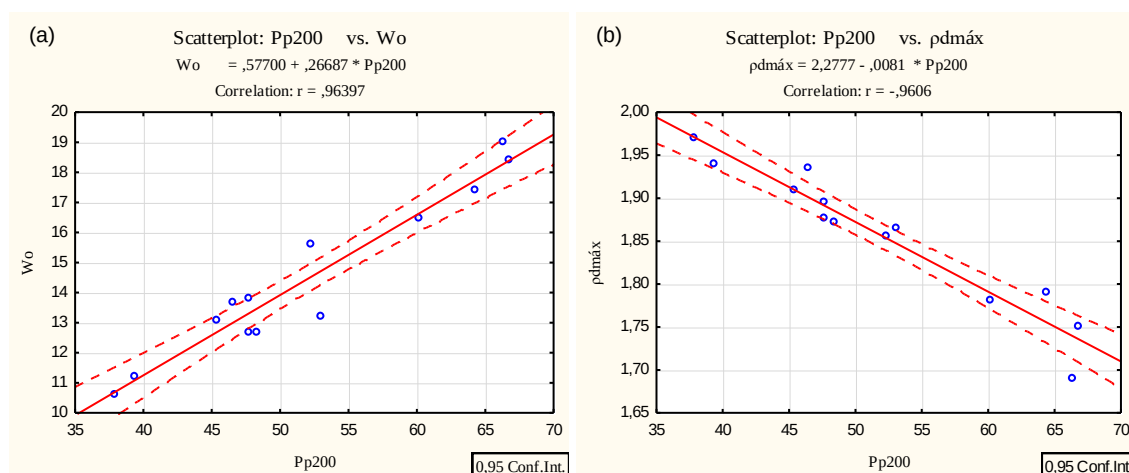


Figura 5.106 – Gráficos de dispersão de (a) Pp200 vs. W_o e (b) Pp200 vs. $\rho_{dmáx}$.

- Quanto maior a porcentagem de silte, menor a massa específica aparente seca máxima (Figura 5.107(a)) e maior a umidade ótima, como é observado nos mais diversos tipos de solos (Figura 5.107(b)).
- O parâmetro S_b , que faz parte do modelo de Gitirana Jr. e Fredlund (2004), que se refere ao grau de saturação no segundo ponto de entrada de ar (zona de microporos), apresentou relações fortes com o LL1 (sem secagem prévia) e as porcentagens de areia e de material passante na peneira nº 200 (Figura 5.108 a-c). Entende-se que quanto maior a porcentagem

de finos, ou seja, menor a quantidade de areia e maior a plasticidade dos solos, maiores foram os valores do grau de saturação no ponto de entrada de ar dos microporos.

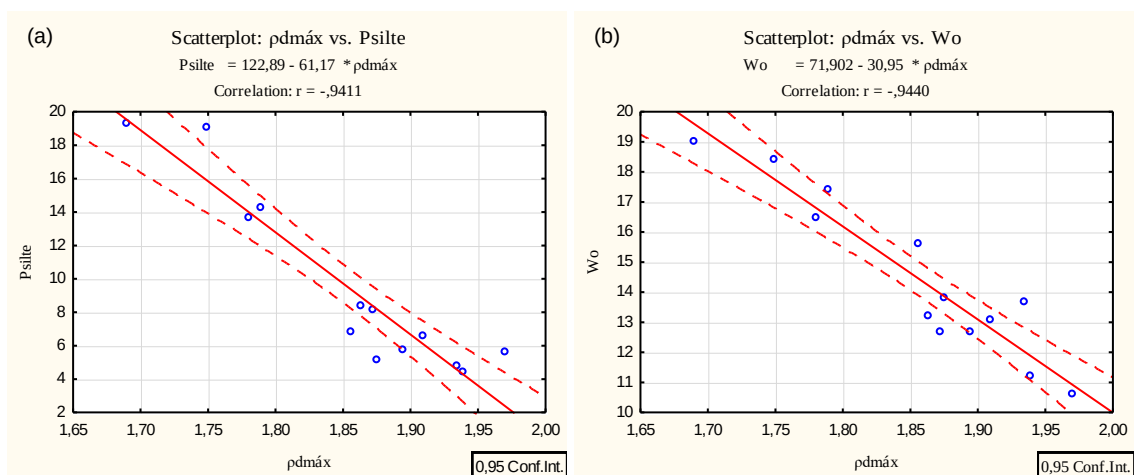


Figura 5.107 – Gráficos de dispersão de (a) $\rho_{dmáx}$ vs. $Psilte$ e (b) $\rho_{dmáx}$ vs. Wo .

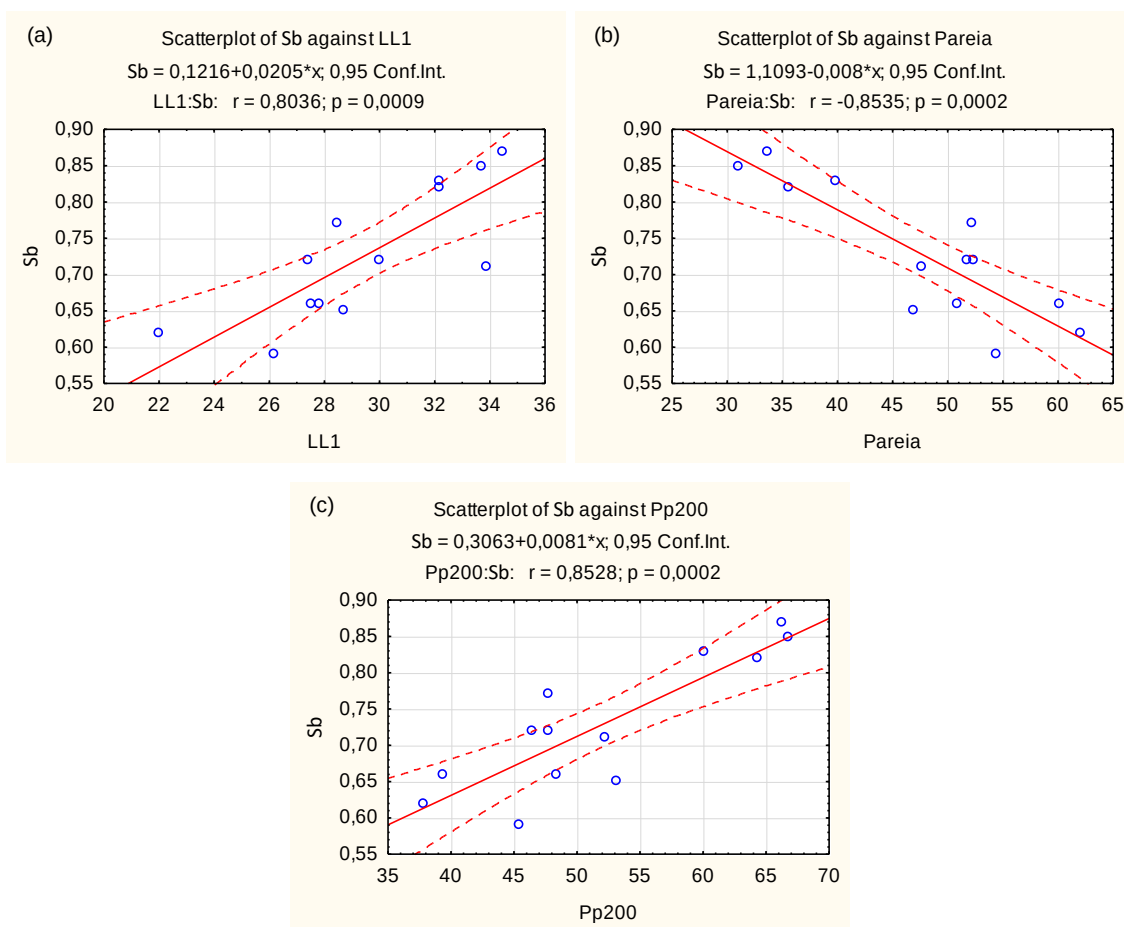


Figura 5.108 – Gráficos de dispersão de (a) Sb vs. $LL1$, (b) Sb vs. $Pareia$ e (c) Sb vs. $Pp200$.

- A correlação entre o MR_{médio} e o teor de matéria orgânica (Figura 5.109), apesar de moderada, pode ser considerada importante e mostrou que quanto maior a quantidade de M.O. no solo menor tende a ser o valor do MR.

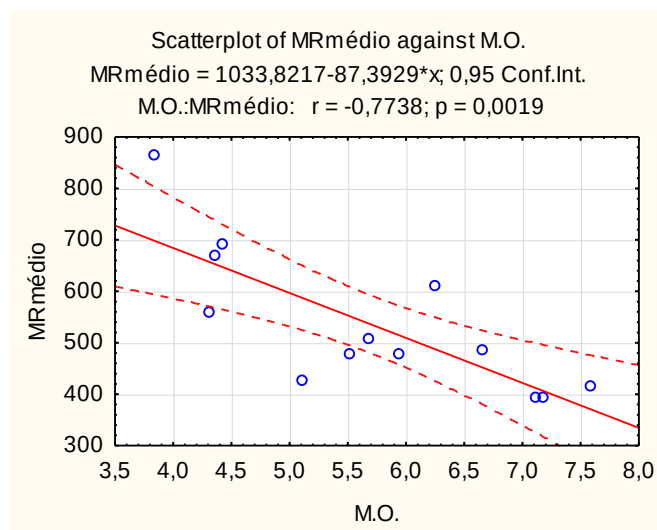


Figura 5.109 – Gráficos de dispersão de MR_{médio} vs. M.O.

Quadro 5.8 – Expressões de correlação linear entre propriedades físicas e mecânicas dos solos desta pesquisa.

Variáveis correlacionadas	Expressão de correlação linear	Coefficiente de Pearson (r)	Intensidade
LL1 vs. W _o	$W_o = -5,393 + ,67085 * LL1$	0,903	Muito Forte
$\rho_{dmáx}$ vs. Pareia	$Pareia = -164,7 + 114,37 * \rho_{dmáx}$	0,951	Muito Forte
Pp200 vs. W _o	$W_o = ,57700 + ,26687 * Pp200$	0,963	Muito Forte
$\rho_{dmáx}$ vs. W _o	$W_o = 71,902 - 30,95 * \rho_{dmáx}$	-0,944	Muito Forte
$\rho_{dmáx}$ vs. Psilte	$Psilte = 122,89 - 61,17 * \rho_{dmáx}$	-0,941	Muito Forte
W _o vs. Pareia	$Pareia = 98,666 - 3,535 * W_o$	-0,964	Muito Forte
Pp200 vs. $\rho_{dmáx}$	$\rho_{dmáx} = 2,2777 - ,0081 * Pp200$	-0,960	Muito Forte
Sb vs. Pareia	$Sb = 1,1093 - 0,008 * Pareia$	-0,853	Forte
Sb vs. Pp200	$Sb = 0,3063 + 0,0081 * Pp200$	0,852	Forte
Sb vs. LL1	$Sb = 0,1216 + 0,0205 * LL1$	0,803	Forte
Sres1 vs. Pareia	$Sres1 = 1,1077 - 0,0066 * Pareia$	-0,871	Forte
Sres1 vs. Pp200	$Sres1 = 0,4403 + 0,0068 * Pp200$	0,872	Forte
Sres1 vs. Pargila	$Sres1 = 0,2925 + 0,0117 * Pargila$	0,803	Forte
MR _{médio} vs. M.O.	$MR_{médio} = 1033,8217 - 87,3929 * M.O.$	-0,773	Moderada

5.4.3 Correlações entre propriedades mecânicas

As correlações classificadas como muito forte entre propriedades mecânicas foram: positiva – K1TC x K1TD, K1TC x K1MC, K2TC x K2TD, K2TC x K1MC, K2TD x K1MC, PMI x ϵ' , Sres1 vs Wo, Sres1 vs. Sb, SMR vs Ψ_{res1} . Observa-se que a maioria das correlações estão ligadas aos coeficientes de regressão dos modelos de módulo de resiliência.

Foram identificadas algumas correlações fortes e moderadas importantes entre as seguintes variáveis: Ψ_2 vs. Ψ_3 , CBR vs. ϵ_p (mm), Ψ_{b2} x c' , Sb vs. Wo, Sb vs. $\rho_{dmáx}$, Sres1 vs. $\rho_{dmáx}$, Sres1 vs. Wo.

As Figuras 5.110 a 5.116 apresentam os gráficos de dispersão das correlações acima mencionadas. As expressões de correlação linear entre as variáveis estão listadas no Quadro 5.9, bem como o respectivo coeficiente de Pearson, com valor- $p < 0,05$ (confiabilidade de 95%).

Em síntese têm-se que, para os solos da região de Recife analisados na presente pesquisa:

- Quanto maior o parâmetro de regressão K1 do modelo em função da tensão confinante maior também ele é nos modelos em função da tensão desvio e no composto (Figura 5.110 (a) e (b)), o que é esperado uma vez que este parâmetro retrata a magnitude do módulo resiliente.

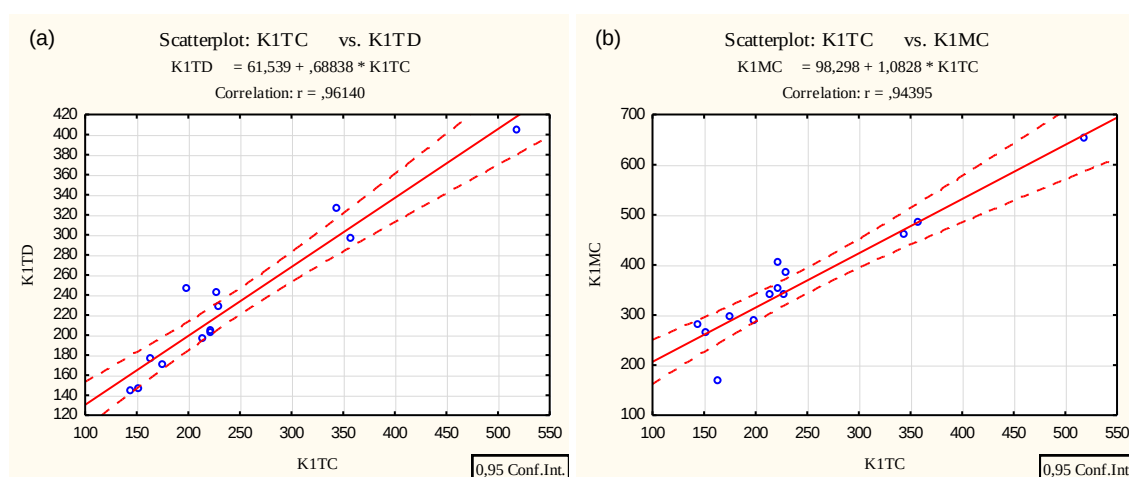


Figura 5.110 – Gráficos de dispersão de (a) K1TC vs. K1TD e (b) K1TC vs. K1MC.

- O parâmetro K2TC também se correlacionou positivamente com o K2TD (Figura 5.111(a)), o que em uma análise mais imediata indicaria que a influência de ambas as tensões (confinante e desvio) trabalham em paralelo, o que não é de fato verdade uma vez que no modelo composto observou-se valores opostos para K_2 e K_3 (positivos e negativos,

respectivamente), assim entende-se que essa correlação entre K2TC e K2TD somente foi apontada devido ao fato de que, para a maioria dos solos da Região de Recife, o aumento de cada tipo de tensão individualmente resultou na redução do módulo resiliente (os valores de K2 tanto no modelo em função da tensão confinante como no modelo em função da tensão desvio foram negativos em sua maioria).

- Os parâmetros K2TC e K2TD apresentaram relação muito forte com o parâmetro K1 do modelo composto (Figura 5.111(b) e Figura 5.112, o que pode retratar que quanto menor a influência das tensões maior tende a ser a magnitude do módulo resiliente.

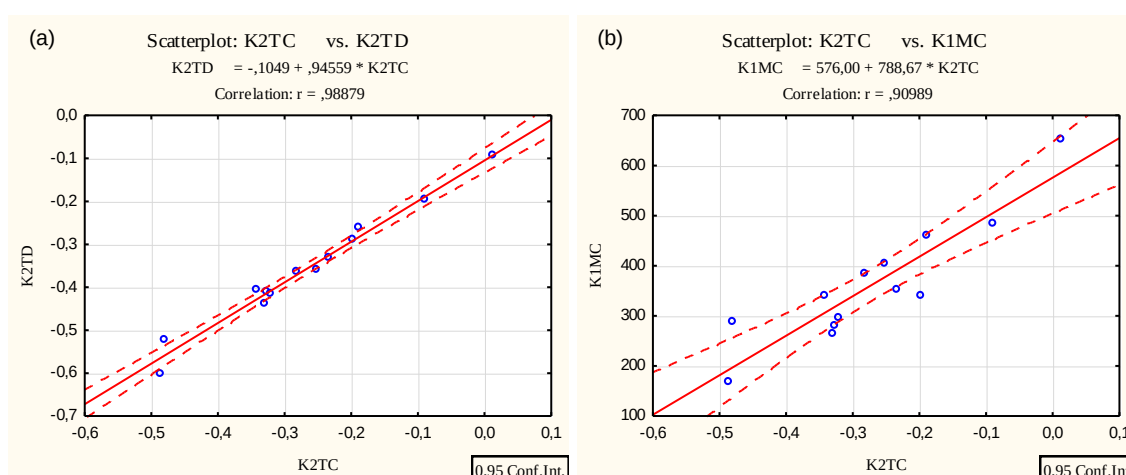


Figura 5.111 – Gráficos de dispersão de (a) K2TC vs. K2TD e (b) K2TC vs. K1MC.

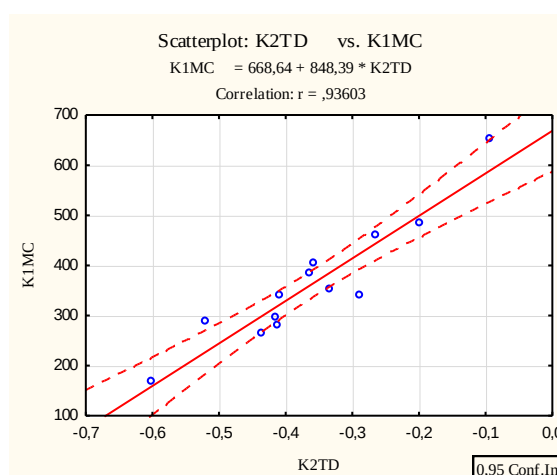


Figura 5.112 – Gráficos de dispersão de K2TD vs. K1MC.

- O parâmetro Sres1, que faz parte do modelo de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) e refere-se ao grau de saturação residual do solo no primeiro trecho (zona de macroporos), apresentou correlação muito forte e positiva com Sb e com a umidade ótima (Figura 5.113(a)) e

consequentemente negativa com o $\rho_{dm\acute{a}x}$ (forte), indicando que quanto maior W_o maior foi o valor da Sres1 observada para os solos desta pesquisa. Assim, solos argilosos tendem a apresentar valores maiores do grau de saturação na zona de macroporos do que os solos arenosos, corroborado pelas correlações fortes observadas entre Sres1 e as porcentagens de argila, areia e passantes na peneira nº 200 (Figuras 5.113(b)-(d)). Além disso, quanto maior o grau de saturação no primeiro ponto de entrada de ar (macroporos) maior foi o grau de saturação no segundo ponto (microporos), indicando coerência nos resultados obtidos em laboratório.

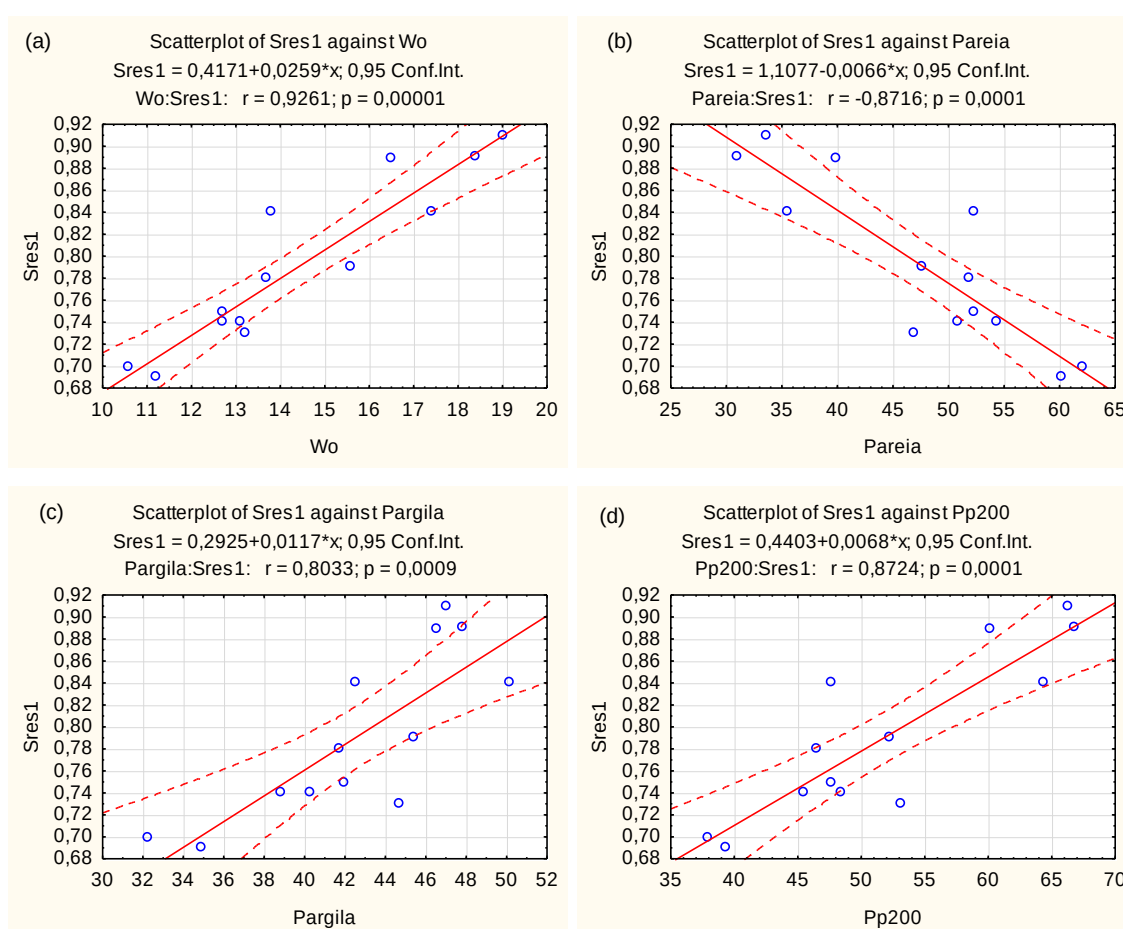


Figura 5.113 – Gráficos de dispersão de (a) Sres1 vs. W_o , (b) Sres1 vs. Pareia, (c) Sres1 vs. Pargila e (d) Sres1 vs. Pp200.

- O parâmetro S_b apresentou relação forte e positiva com a umidade ótima (Figura 5.114(a)) e consequentemente negativa com o $\rho_{dm\acute{a}x}$ (Figura 5.114(b)), corroborando com a análise realizada no tópico anterior em que foram identificadas as relações entre S_b e algumas propriedades físicas (Pareia, Pp200 e LL1). Entende-se que quanto maior a porcentagem

de finos (maior a umidade ótima e menor o $\rho_{dm\acute{a}x}$) maior tendem a ser os valores do grau de saturação no ponto de entrada de ar dos microporos.

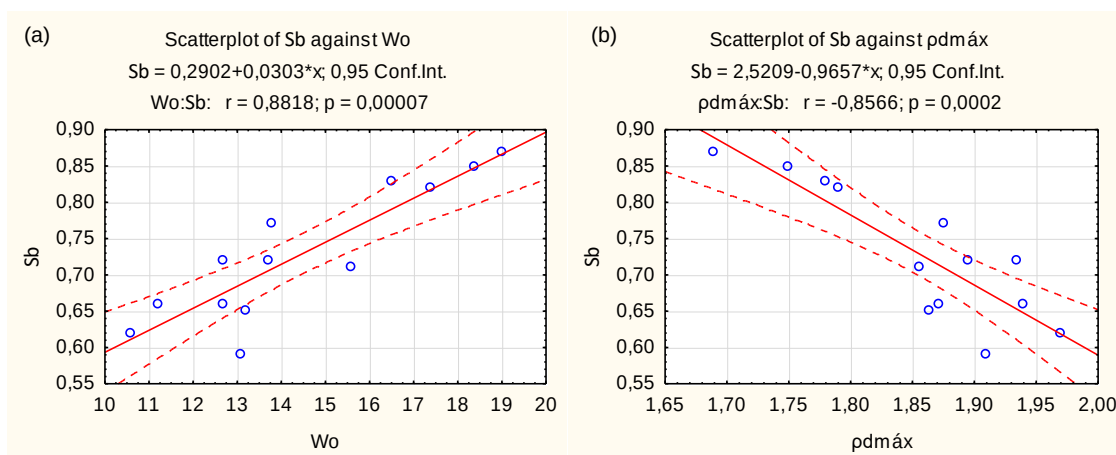


Figura 5.114 – Gráficos de dispersão de (a) S_b vs. W_o , (b) S_b vs. $\rho_{dm\acute{a}x}$.

- A sucção identificada no ponto correspondente à umidade em que se realizou o ensaio de MR (SMR) apresentou relação muito forte com a sucção residual do primeiro trecho da curva característica bimodal (associado aos macroporos) – Figura 5.115(a), mostrando que quanto maior a capacidade de retenção do solo em seus macroporos maior tende a ser a sucção dele no ponto de umidade ótima.
- Embora de forma moderada, o coeficiente c' da Classificação MCT apresentou relação negativa importante com o parâmetro Ψ_{b2} que é a sucção no 2º ponto de entrada de ar (associado aos microporos) – Figura 5.115(b), ou seja, como c' está associado ao comportamento granulométrico do material, entende-se que quanto mais argiloso for o comportamento do solo menor o valor da sucção no segundo ponto de entrada de ar.

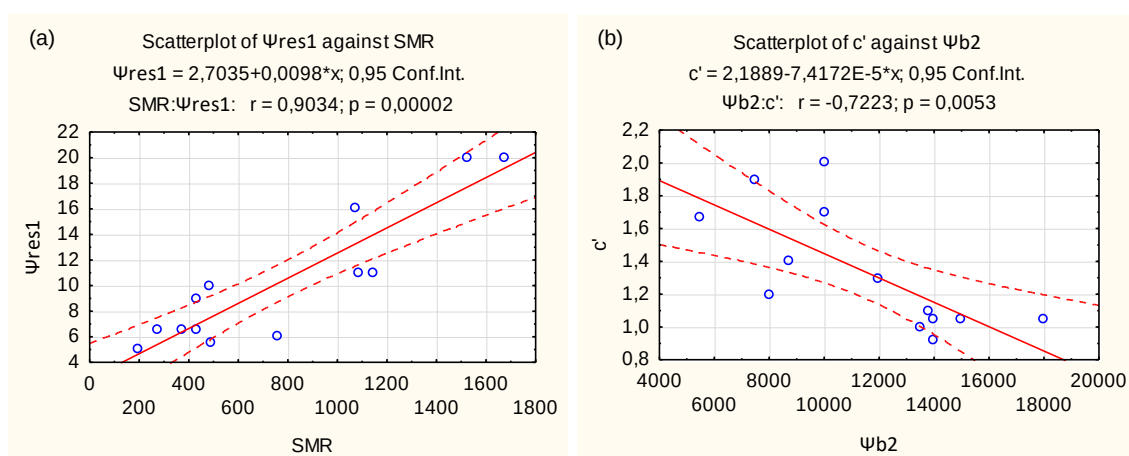


Figura 5.115 – Gráficos de dispersão de (a) Ψ_{res1} vs. SMR e (b) Ψ_{b2} vs. c' .

- Também de forma moderada, encontrou-se correlação entre o CBR e a deformação permanente máxima no par de tensão 120kPa/360kPa - ε_p (mm) – Figura 5.116(a), mostrando que os solos desta tese com valores CBR mais altos tenderam a apresentar magnitudes de ε_p menores, no entanto, esta é uma informação relativa não devendo ser considerada uma regra.
- Relação forte e negativa foi identificada entre os parâmetros Ψ_2 e Ψ_3 do modelo de Guimarães (2009) obtidos para o solo desta tese – Figura 5.116(b), indicando que quanto maior foi a influência da tensão confinante (representada por Ψ_2) menor foi a influência da tensão desvio (representada por Ψ_3) e, vice-versa, o que está ligado a natureza “composta” dos materiais que tem proporções de areia e argila diferentes.

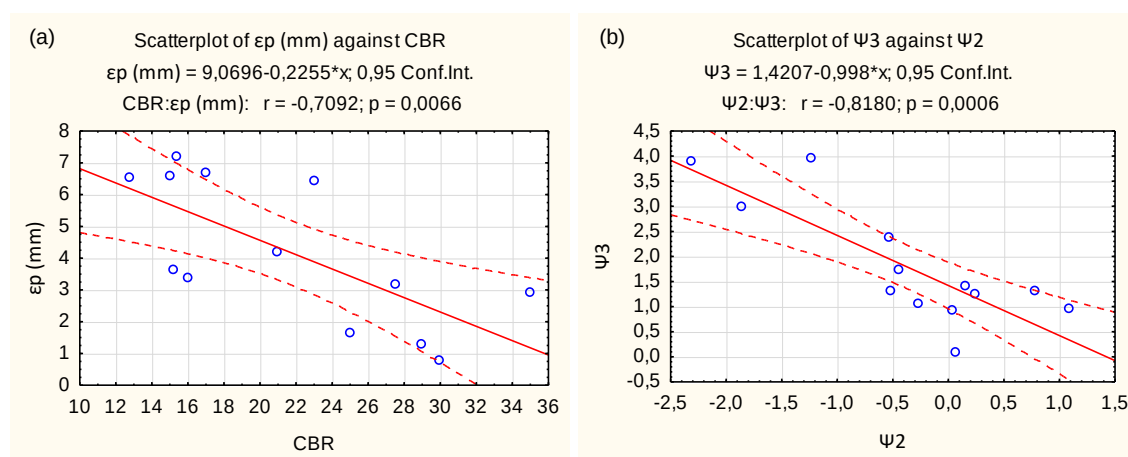


Figura 5.116 – Gráficos de dispersão de (a) CBR vs. ε_p (mm) e (b) Ψ_2 vs. Ψ_3 .

Quadro 5.9 – Expressões da correlação linear entre propriedades mecânicas dos solos da RMRecife desta pesquisa

Variáveis correlacionadas	Expressões de correlação linear	Coefficiente de Pearson (r)	Intensidade
K1TC vs. K1TD	$K1TD = 61,539 + ,68838 * K1TC$	0,961	Muito Forte
K1TC vs. K1MC	$K1MC = 98,298 + 1,0828 * K1TC$	0,943	Muito Forte
K2TC vs. K2TD	$K2TD = -,1049 + ,94559 * K2TC$	0,988	Muito Forte
K2TC vs. K1MC	$K1MC = 576,00 + 788,67 * K2TC$	0,909	Muito Forte
K2TD vs. K1MC	$K1MC = 668,64 + 848,39 * K2TD$	0,936	Muito Forte
Wo vs. Sres1	$Sres1 = 0,4171 + 0,0259 * Wo$	0,926	Muito Forte
PMI vs. e'	$e' = ,63755 + ,00388 * PMI$	0,971	Muito Forte
Sres1 vs. $\rho_{dm\acute{a}x}$	$Sres1 = 2,3002 - 0,8129 * \rho_{dm\acute{a}x}$	-0,886	Forte
Sres1 vs. Sb	$Sb = -0,1843 + 1,1533 * Sres1$	0,937	Muito Forte
Sb vs. $\rho_{dm\acute{a}x}$	$Sb = 2,5209 - 0,9657 * \rho_{dm\acute{a}x}$	-0,856	Forte
Sb vs. Wo	$Sb = 0,2902 + 0,0303 * Wo$	0,881	Forte
Ψ_{res1} vs. SMR	$\Psi_{res1} = 2,7035 + 0,0098 * SMR$	0,903	Muito Forte

Ψ_2 vs. Ψ_3	$\Psi_3 = 1,4207-0,998 * \Psi_2$	-0,8180	Forte
Ψ_{b2} vs. c'	$c' = 2,1889-7,4172E-5 * \Psi_{b2}$	-0,722	Moderada
CBR vs. ε_p	$\varepsilon_p = 9,0696-0,2255 * CBR$	-0,709	Moderada

5.4.4 Análise estatística utilizando Ciência de Dados

A análise dos solos da região metropolitana de Recife foi feita em detalhes nos tópicos anteriores, e, neste item o foco principal é apresentar alguns detalhes do uso das ferramentas da ciência de dados para as análises e tecer alguns comentários sobre os resultados obtidos, supondo que a aplicação no BDSF que será feito mais adiante apresentará resultados mais robustos. A aplicação inicial a este banco de dados menor inicialmente serviu também para o aprendizado da ferramenta.

5.4.4.1 Passos iniciais – importação das bibliotecas, leitura e visualização da Base de Dados

A Figura 5.117 apresenta a parte inicial do *Notebook* criado para escrita e execução dos códigos necessários para a análise dos dados. Assim como em um arquivo de texto é possível escrever informações que não são necessariamente códigos (“*Code*”, o tipo de informação é selecionado no ponto 1 indicado na Figura 5.117), como a identificação do trabalho por exemplo, essas linhas são denominadas de “*Markdown*”. Conforme mencionado no capítulo de metodologia, o primeiro passo realizado foi a importação das bibliotecas necessárias para a análise (Figura 5.117, ponto 2). De maneira prática, os comandos utilizados para importação das bibliotecas seguem a seguinte regra: *import* nome da biblioteca *as* simplificação do nome da biblioteca. A execução do código é realizada clicando no botão “*Run*” (Figura 5.117, ponto 3).

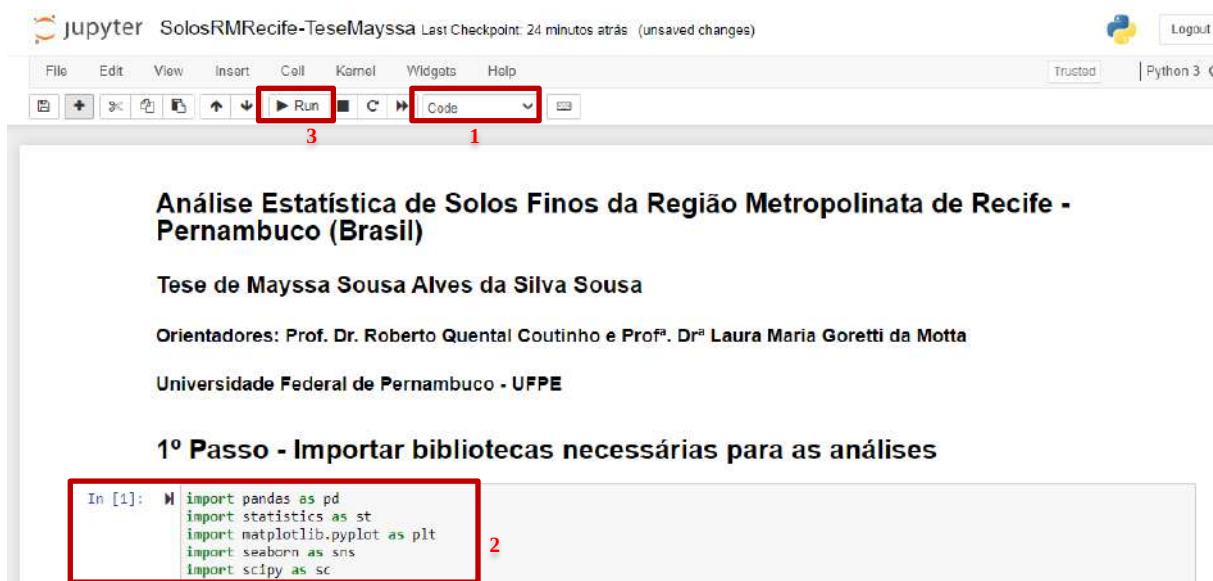


Figura 5.117 – Importação de Bibliotecas Python.

As bibliotecas importadas e suas funções foram explicitadas no capítulo de metodologia. Assim, procede-se para o 2º Passo – Leitura e visualização da Base de Dados a ser analisada (Figura 5.118). No ponto 1, fez-se a leitura do banco de dados dos solos da RMRecife utilizando a função “read_excel” da biblioteca Pandas e armazenou-se os dados em um Dataframe (estrutura de dados bidimensional semelhante a uma tabela do Excel) nomeando-o arbitrariamente como “dados”. O Pandas suporta outras extensões de arquivos, como “.csv”, por exemplo. Note que no ponto 1 a indicação do endereço do arquivo é feita utilizando barras inclinadas para direita, diferente da direção que é usada no Windows, isto se deve ao fato de que no Python a barra nesta outra direção tem outro significado.

No ponto 2, carrega-se os dados do Dataframe para visualização, conforme apresentado na Figura 5.118. No ponto 3 identifica-se as dimensões da base de dados que neste caso é de 13 linhas (13 solos da RMRecife) e 59 colunas (descontando as colunas Amostra e MCT que são qualitativas tem-se 57 variáveis para análise).

Ainda dentro desse 2º Passo, pode-se utilizar outras funções para conhecer melhor a estrutura do Dataframe (df), como por exemplo o “df.columns” – neste caso “dados.columns”, uma vez que “dados” foi o nome dado ao Dataframe criado, tal função mostra os nomes das colunas existentes na base de dados carregada, Figura 5.119. Isso se fez necessário uma vez que no código anterior (Figura 5.118) não foi possível visualizar os nomes de todas as colunas, devido ao tamanho da base de dados.

In [2]: dados = pd.read_excel('C:/Users/Mayssa/Desktop/Bases de Dados/Dados dos solos da tese_rev1.xlsx')

dados

Out[2]:

	Amostra	MCT	δ	LL1	LP1	IP1	LL2	LP2	IP2	pdmáx	...	PMIwo	PMI	e'	c'	Pp200	ϵ_p (mm)	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	
0	01GO-LG'	LG'	2.634	32.2	22.8	9.4	35.6	25.00	10.60	1.790	...	74.50	75	0.94	2.00	64.363157	6.521	0.209000	-0.447000	1.727000	0.054
1	02AR-LG'	LG'	2.674	33.7	25.9	7.8	41.3	27.90	13.40	1.750	...	0.00	10	0.62	1.90	66.831499	6.585	0.279000	0.792000	1.299000	0.063
2	03IT-NA'	NA'	2.654	22.0	18.0	4.0	24.1	17.40	6.70	1.970	...	97.84	153	1.19	1.20	37.882812	2.926	0.125000	0.246000	1.244000	0.054
3	04IG-LG'	LG'	2.629	26.2	20.3	5.9	33.4	21.70	11.70	1.910	...	37.58	58	0.93	1.70	45.432873	7.191	0.462000	-0.510000	1.300000	0.054
4	05PA-LA'	LA'	2.642	30.0	20.4	9.6	37.9	23.10	14.80	1.935	...	9.07	9	0.62	1.40	46.514166	1.632	0.071000	0.071000	0.071000	0.074
5	06CA-LA'	LA'	2.666	28.5	20.4	8.1	39.9	26.50	13.40	1.876	...	0.00	10	0.62	1.05	47.702131	6.660	0.021125	-2.313778	3.900356	0.044
6	07SL-NA'	NA'	2.693	32.2	24.4	7.8	39.9	28.50	11.40	1.780	...	33.66	143	1.16	1.05	60.128043	4.178	0.032000	-1.860000	2.977000	0.063
7	08RE-LA'	LA'	2.699	34.5	26.5	8.0	39.5	32.36	7.14	1.690	...	0.00	40	0.84	1.29	66.316582	3.627	0.005000	-1.224000	3.961000	0.083
8	09MG-LA'	LA'	2.679	27.4	19.3	8.1	34.7	24.90	9.80	1.895	...	0.00	58	0.91	0.92	47.699556	0.784	0.076000	0.043000	0.912000	0.044
9	10MU-LA'	LA'	2.681	27.5	19.8	7.7	40.5	25.40	15.10	1.872	...	0.00	56	0.87	1.05	48.382485	3.373	0.102000	0.165000	1.415000	0.074
10	11CB-LA'	LA'	2.682	33.9	30.4	3.5	46.6	30.10	16.50	1.856	...	0.00	49	0.84	1.00	52.284627	3.147	0.042000	-0.529000	2.386000	0.054
11	12SU-LG'	LG'	2.674	27.8	18.7	9.1	34.8	21.40	13.40	1.940	...	39.46	40	0.81	1.67	39.359044	1.303	0.088000	-0.269000	1.066000	0.054
12	13IP-LA'	LA'	2.681	28.7	19.8	8.9	35.9	24.20	11.70	1.864	...	41.78	40	0.81	1.10	53.089677	6.403	0.469617	1.087587	0.949930	0.044

13 rows x 59 columns

Figura 5.118 – Leitura e visualização da base de dados dos solos da RMRecife no Python.

In [3]: `dados.columns`

Out[3]: Index(['Amostra', 'MCT', ' δ ', 'LL1', 'LP1', 'IP1', 'LL2', 'LP2', 'IP2', 'pdmáx', 'Wo', 'Pargila', 'Psilte', 'Pareia', 'Paf', 'Pam', 'Pag', 'Pped', 'Pp10', 'Pr10', 'CBR', 'Exp.', 'pHagua', 'pHKCl', ' ΔpH ', 'M.O.', 'CTC', 'S(%)', 'V(%)', 'MRmédio', 'K1TC', 'K2TC', 'K1TD', 'K2TD', 'K1MC', 'K2MC', 'K3MC', 'SWo', ' θ_s ', ' θ_r ', 'SMR', ' Ψ_b1 ', ' Ψ_{res1} ', 'Sres1', ' Ψ_b2 ', 'Sb', ' Ψ_{res2} ', 'Sres2', 'd', 'PMIwo', 'PMI', 'e', 'c', 'Pp200', ' ϵ_p (mm)', ' Ψ_1 ', ' Ψ_2 ', ' Ψ_3 ', ' Ψ_4 '], dtype='object')

Figura 5.119 – Lista de colunas pertencentes a base de dados analisada.

5.4.4.2 Tratamento e Análise Exploratória de Dados

O 3º passo refere-se ao tratamento dos dados no que diz respeito a substituição de dados faltantes, correção de dados errôneos e/ou a remoção de linhas ou colunas que não contribuem para as análises. É uma ação necessária sempre que se utiliza base de dados não tratadas e é uma etapa que em geral consome a maior parte do tempo do analista de dados. No caso deste trabalho as bases de dados já foram montadas evitando estes tipos de problemas, podendo-se assim avançar para a etapa seguinte: a Análise Exploratória dos Dados (4º Passo).

Nesta etapa de análise estatística básica dos dados optou-se por dividi-la em 3 partes: 1 – Exploração das Medidas Resumo (média, mediana, moda, quartis e desvio-padrão); 2 – Exploração de representações gráficas e tabulares dos dados (Tabelas de frequências, gráficos de setores, de barras, histogramas e boxplots) e, 3 – Exploração da associação entre variáveis quantitativas e qualitativas (gráficos de dispersão e correlação).

Para exploração das Medidas Resumo existe a função “describe” que fornece um resumo contendo a quantidade de amostras, a média (mean), o desvio padrão (std), o valor mínimo encontrado (min), o primeiro quartil (25%), o segundo quartil (50%, mediana), o terceiro quartil (75%) e o valor máximo encontrado (max) para cada variável do Dataframe, Figura 5.120.

Medidas Resumo

```
In [5]: # Resumo de Estatística descritiva dos dados com o comando 'Describe'
dados.describe()
```

Out[5]:

	Ø	LL1	LP1	IP1	LL2	LP2	IP2	pdmáx	Wo	Pargila	...	PMIwo	PMI	e'
count	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	13.000000	...	13.000000	13.000000	13.000000
mean	2.668308	29.584615	22.053846	7.530769	37.238462	25.266154	11.972308	1.85600	14.453846	42.634391	...	25.683846	57.000000	0.858462
std	0.022107	3.614980	3.699688	1.926302	5.312805	3.960205	2.924318	0.08184	2.683473	5.150894	...	32.245818	45.269563	0.180594
min	2.629000	22.000000	18.000000	3.500000	24.100000	17.400000	6.700000	1.69000	10.600000	32.281323	...	0.000000	9.000000	0.620000
25%	2.654000	27.500000	19.800000	7.700000	34.800000	23.100000	10.600000	1.79000	12.700000	40.307800	...	0.000000	40.000000	0.810000
50%	2.674000	28.700000	20.400000	8.000000	37.900000	25.000000	11.700000	1.87200	13.700000	42.554965	...	9.070000	49.000000	0.840000
75%	2.681000	32.200000	24.400000	8.900000	39.900000	27.900000	13.400000	1.91000	16.500000	46.528182	...	39.460000	58.000000	0.930000
max	2.699000	34.500000	30.400000	9.600000	46.600000	32.360000	16.500000	1.97000	19.000000	50.171503	...	97.840000	153.000000	1.190000

8 rows x 57 columns

Figura 5.120 – Aplicação da função “describe” sobre os dados da RMRecife.

A ferramenta “describe” fornece uma grande quantidade de informações de forma resumida, no entanto, quando se tem um Dataframe com muitas variáveis (como é o caso) os dados de algumas não aparecem, sendo assim, de acordo com o interesse do pesquisador pode-se explorar as medidas de posição de uma forma mais individualizada, como pode ser visto na Figura 5.121(a) em que se faz uso das funções mean(), median() e std() para a variável Pargila e estas mesmas funções mais a de min() e max() para a variável Pareia (julhou-se pertinente devido a variabilidade dos dados desta pesquisa), Figura 5.121(b). Esta mesma estrutura de códigos pode ser usada para analisar quaisquer outras variáveis do Dataframe.

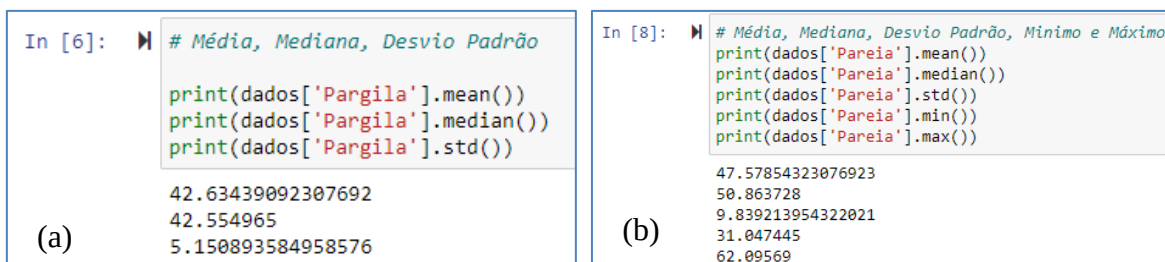


Figura 5.121 – Medidas de Posição das variáveis (a) Pargila e (b) Pareia.

Os resultados mostram que a média e a mediana da porcentagem de argila dos solos da região metropolitana de Recife são semelhantes: em torno de 42,5% com um desvio padrão de aproximadamente 5%. Já a porcentagem de areia tem uma média em torno de 47,5% com um desvio-padrão de quase 10% e mediana de 50%, e assim trata-se de um atributo bastante variável com diferença entre o valor máximo e mínimo de cerca de 30%.

Uma medida resumo que faz mais sentido para atributos que tendem a se repetir é a moda, a qual pode ser implementada em Python através da função “mode()” da biblioteca Statistics. Dentre as variáveis estudadas, escolheu-se aqui a Classificação MCT para exemplificar (Figura 5.122(a)). O resultado mostra que a classe que ocorre mais vezes no banco de dados dos solos da região de Recife é a de solos com comportamento arenoso laterítico (LA’).

Uma ferramenta de grande valia para a análise de dados é a operação “groupby” do Pandas, em que é possível fazer a aplicação de alguma função dividida por grupos de acordo com o interesse do usuário. Como exemplo, calculou-se a média da porcentagem de argila por grupo MCT (Figura 5.122(b)), e os resultados mostram que a média de argila para os grupos LA’ e LG’ são bastante semelhantes, sendo a média menor para grupo NA o que faz sentido apesar da pequena quantidade de solos deste grupo ser pequena.

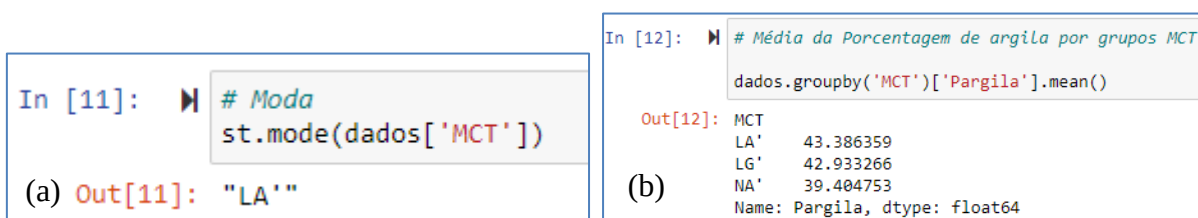


Figura 5.122 – Valores de (a) Moda da Classe MCT e (b) Média de argila por grupo MCT.

A segunda parte da análise dos dados compreende as representações gráficas e tabulares dos dados. Uma representação tabular comumente utilizada nas análises são as tabelas de frequências absolutas e relativas. Para este trabalho, utilizou-se a função “crosstab” do

Pandas aplicado à variável MCT e armazenando em um Dataframe nomeado como “freq_abs”, Figura 5.123.

Na tabela de frequência absoluta identifica-se a quantidade de solos em cada classe MCT e na tabela de frequência relativa identifica-se a representatividade de cada classe considerando o valor total de amostras. Assim, da mesma forma como identificado na medida de Moda, a classe com maior representatividade é a LA’ representando cerca de 54% dos dados.

Representação gráfica e tabular dos dados

```
In [13]: # Tabela de frequências absolutas
freq_abs = pd.crosstab(index=dados['MCT'], columns='count')
freq_abs
```

```
Out[13]:
```

col_0	count
MCT	
LA'	7
LG'	4
NA'	2

```
In [14]: # Tabela de frequências relativas
freq_rel = freq_abs/freq_abs.sum()
freq_rel
```

```
Out[14]:
```

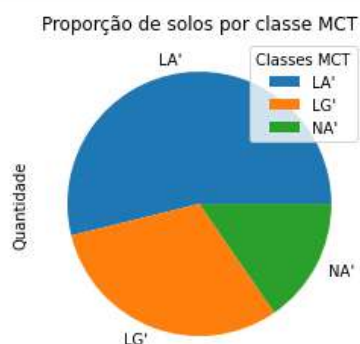
col_0	count
MCT	
LA'	0.538462
LG'	0.307692
NA'	0.153846

Figura 5.123 – Tabelas de frequências absolutas e relativas da variável MCT.

Estes mesmos resultados também podem ser obtidos através de representações gráficas como o gráfico de setores (pizza) e o gráfico de barras, por exemplo (Figura 5.124), utilizando as funções “plot.pie” e “plot.bar”. Parâmetros como o título do gráfico, identificação de eixo e título da legenda podem ser passados para a função da forma como está indicada na figura, fazendo-se menção os parâmetros como: “title”, “ylabel”, etc.

```
In [5]: # Gráfico de Setores (Pizza)
freq_abs.plot.pie(y='Quantidade', title='Proporção de solos por classe MCT')
plt.legend(title='Classes MCT')

plt.show()
```



```
In [6]: # Gráfico de Barras
freq_abs.plot.bar(title='Proporção de solos por classe MCT', ylabel='Quantidade')
plt.legend(title='Classes MCT')

plt.show()
```

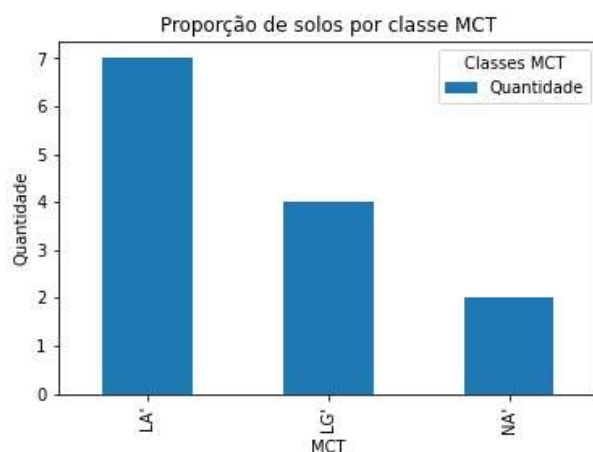


Figura 5.124 – Gráfico de Setores e de Barras referentes às classes MCT dos solos da RMRecife.

Outra representação gráfica que pode ser feita no Python é o histograma, com auxílio da função “histplot” da biblioteca Seaborn, como pode ser visto na Figura 5.125(a), mostrada a seguir. Para a variável umidade ótima, por exemplo, observa-se que a maior parte dos dados está entre o valor de 12 e 14% indicando a predominância de solos com comportamento arenoso.

O *boxplot* ou gráfico de caixa é outra ferramenta estatística interessante para análise de dados, principalmente para detecção de outliers, e pode ser rapidamente obtida utilizando o Python. A Figura 5.125(b) apresenta o exemplo de um *boxplot* da variável $MR_{\text{médio}}$ em que se observa que cerca 75% dos dados estão entre 400 e 600 MPa.

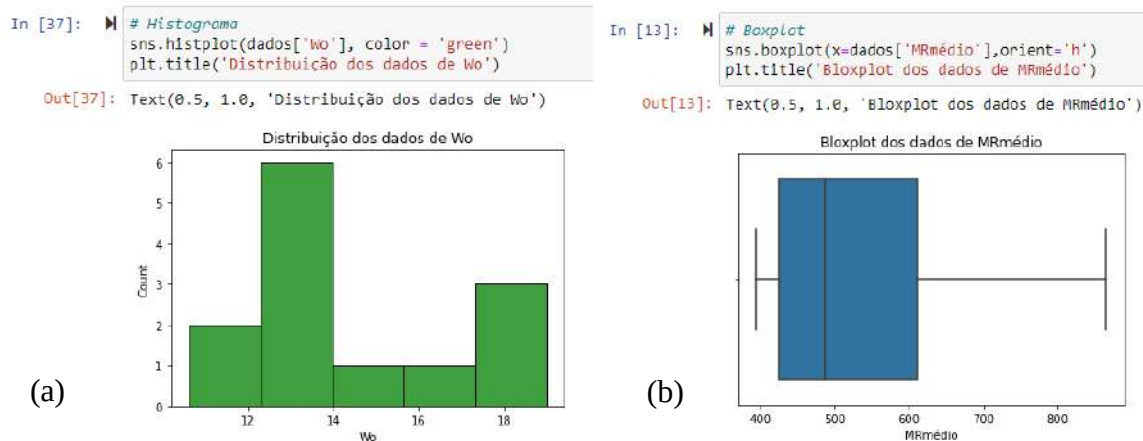


Figura 5.125 – Valores de (a) Histograma dos dados de umidade ótima e (b) Boxplot dos dados de MRmedio dos solos da região de Recife.

Para avaliar as associações entre variáveis quantitativas e qualitativas dos solos analisados pode-se fazer uma análise preliminar utilizando também o boxplot, só que agora mostrando mais de uma variável dentro do mesmo gráfico. Ao analisar o MRmedio por classe MCT obtém o gráfico de caixa apresentado na Figura 5.126, onde nota-se que os valores de módulo resiliente médio obtidos para a classe LG' foram menores do que os obtidos para as classes de solo com comportamento arenoso.

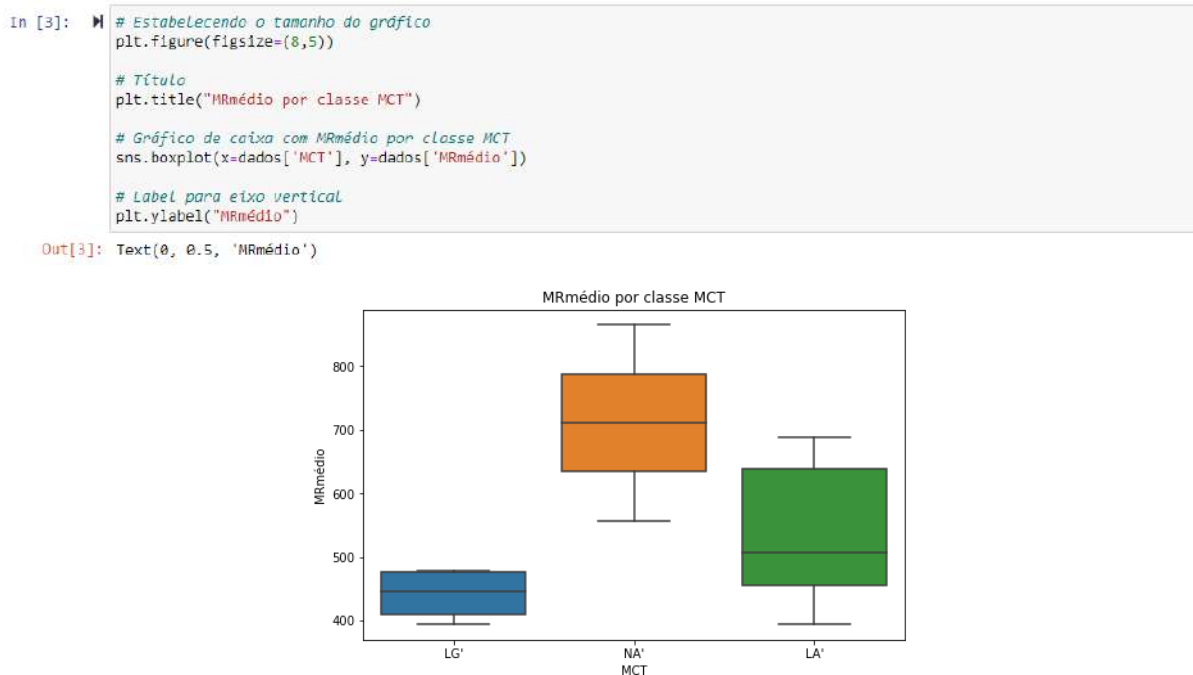


Figura 5.126 – Boxplot dos dados de MRmedio por classe MCT dos solos da região de Recife.

Da mesma forma, pode-se analisar por exemplo a distribuição da umidade ótima por classe MCT, conforme apresentado na Figura 5.127(a). Nota-se que a classe LG' apresenta uma variabilidade maior desse atributo e na classe LA' apesar de apresentar uma faixa de valores mais homogênea, detectou-se a presença de um outlier, tendo-se assim um solo com valor de W_o muito acima (maior que 18,5) dos demais solos deste grupo.

A detecção de qual amostra do banco de dados é de fato o outlier detectado pode ser feito através de um filtro, conforme indicado na Figura 5.127(b) onde se pede que seja exibido as linhas em que o valor de ' W_o ' seja maior ou igual ($\geq$) a 18,5. Obteve-se como resultado a amostra 08RE-LA', que é um solo composto por uma grande porcentagem de argila (aproximadamente 47%), o que explica este valor de umidade ótima.

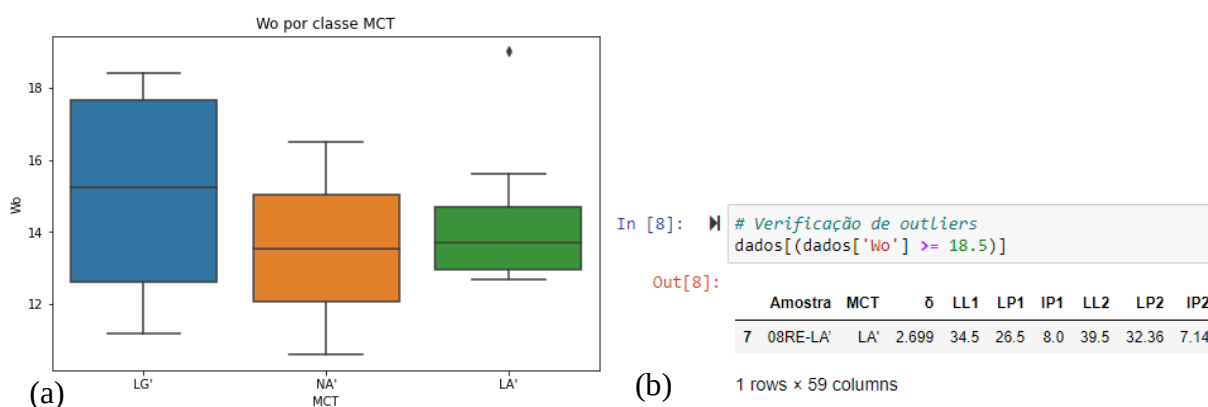


Figura 5.127 – Valores de (a) Boxplot dos dados de W_o por classe MCT e (b) Filtro para detecção de outlier.

A associação entre variáveis também pode ser feita utilizando os gráficos de dispersão usando a função "relplot" da biblioteca Seaborn. Como exemplo, relacionou-se a W_o e o $MR_{\text{médio}}$ na primeira linha de código, conforme mostra a Figura 5.128. Na segunda linha, relacionou-se as mesmas variáveis, porém adicionando o parâmetro "hue", que divide o gráfico em grupos de acordo com a variável indicada, diferenciando cada grupo por cores distintas.

Os resultados mostram que os solos com umidade ótima maiores tendem a apresentar valores médios de módulo resiliente menores. Em relação à classificação MCT não se observa agrupamentos específicos, no entanto, nota-se que os solos da classe LG' foram os que apresentaram $MR_{\text{médio}}$ menores comparado às demais classes.


```
In [17]: # Gráfico de dispersão entre variáveis quantitativas

sns.relplot(x='Wo', y='MRmedio', data=dados)
sns.relplot(x='Wo', y='MRmedio', hue='MCT', data=dados)

Out[17]: <seaborn.axisgrid.FacetGrid at 0x232a9ca4220>
```

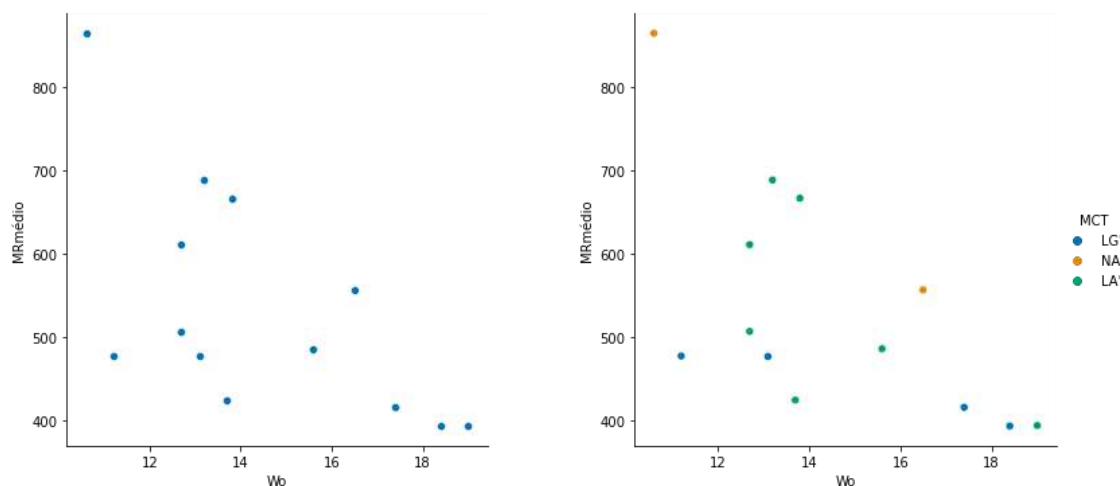


Figura 5.128 – Gráfico de dispersão entre as variáveis W_o e MR_{medio} .

Com a mesma estrutura de código pode-se montar um gráfico conjunto que apresenta a junção do gráfico de dispersão com o de distribuição das variáveis, implementado pela função ‘jointplot’ da biblioteca Seaborn, conforme exemplo da Figura 5.129.

```
In [48]: # Gráfico conjunto de dispersão e distribuição - Formato padrão

sns.jointplot(x="Wo", y="MRmedio", data=dados)
sns.jointplot(x="Wo", y="MRmedio", hue = 'MCT', data=dados)

Out[48]: <seaborn.axisgrid.JointGrid at 0x232ade28df0>
```

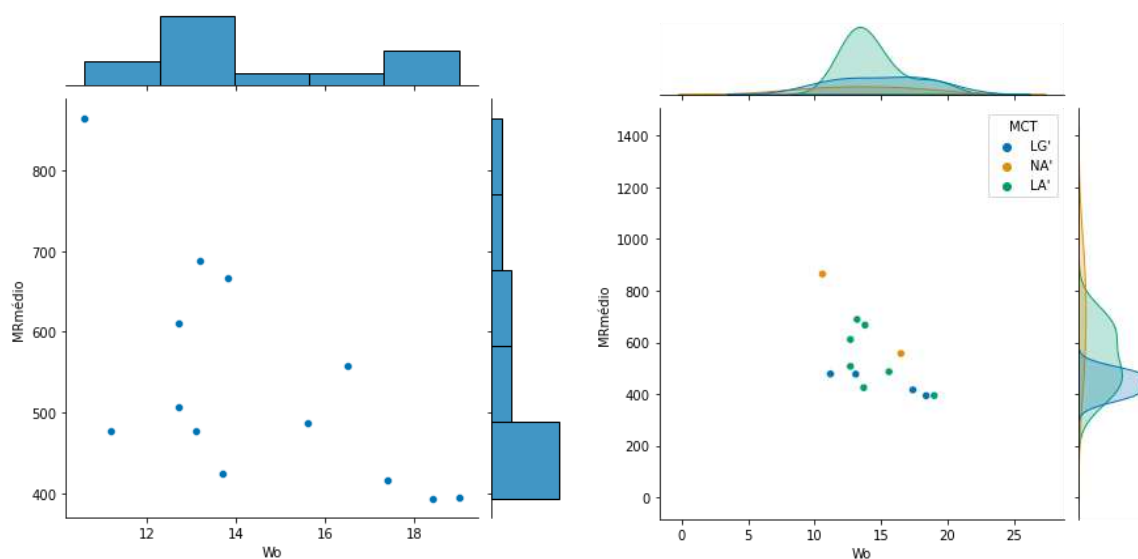


Figura 5.129 – Gráfico de dispersão e de distribuição entre as variáveis W_o e MR_{medio} .

No primeiro gráfico (lado esquerdo), tem-se a forma gráfica padrão com os histogramas mostrando a distribuição dos dados selecionados, já no segundo gráfico (lado direito), em que se pediu o agrupamento dos dados em função de sua Classe MCT, tem-se as distribuições no formato da curva de Gauss. Dos resultados, nota-se que a Classe LA' apresentou a curva de distribuição de W_o muito semelhante à normal, com média acentuada em aproximadamente 14%.

Outro formato gráfico bastante interessante e de grande valia para análise de dados é o implementado pela função 'pairplot'. A Figura 5.130 mostra um exemplo relacionando às variáveis de $MR_{\text{médio}}$, W_o , Pargila, e' e S_b . Na diagonal do gráfico observa-se os histogramas de distribuição dos dados de cada variável. Dos resultados observa-se a relação exponencial entre $MR_{\text{médio}}$ e W_o e as relações aparentemente lineares entre a umidade ótima e a porcentagem de argila bem como com a saturação no ponto de entrada de ar da SWCC.

Nos tópicos 5.4.1 a 5.4.3 deste capítulo, foi desenvolvida a análise da matriz de correlação de Pearson para os solos da região de Recife, e, agora aqui, com auxílio das bibliotecas Python também é possível montar uma matriz, inclusive gráfica, contendo a indicação das correlações entre as variáveis através da função "corr" do Pandas, conforme apresentado na Figura 5.131. Analisando os resultados desta figura, reafirma-se as correlações obtidas e analisadas nos tópicos mencionados. Pelo gráfico da Figura 5.131, vê-se claramente as fortes correlações entre as variáveis físicas no quadrante superior esquerdo e entre as variáveis referentes aos parâmetros do módulo resiliente (na região central do gráfico). Nota-se também as correlações fortes negativas e positivas entre as variáveis associadas à curva característica e as variáveis associadas à granulometria, aos limites de consistências e à curva de compactação (umidade ótima e densidade máxima).

```
In [61]: # Gráfico Multivariado
sns.pairplot(dados[['MRmédio', 'Wo', 'Pargila', "e'", 'Sb']])
```

```
Out[61]: <seaborn.axisgrid.PairGrid at 0x232b4d9ecd0>
```

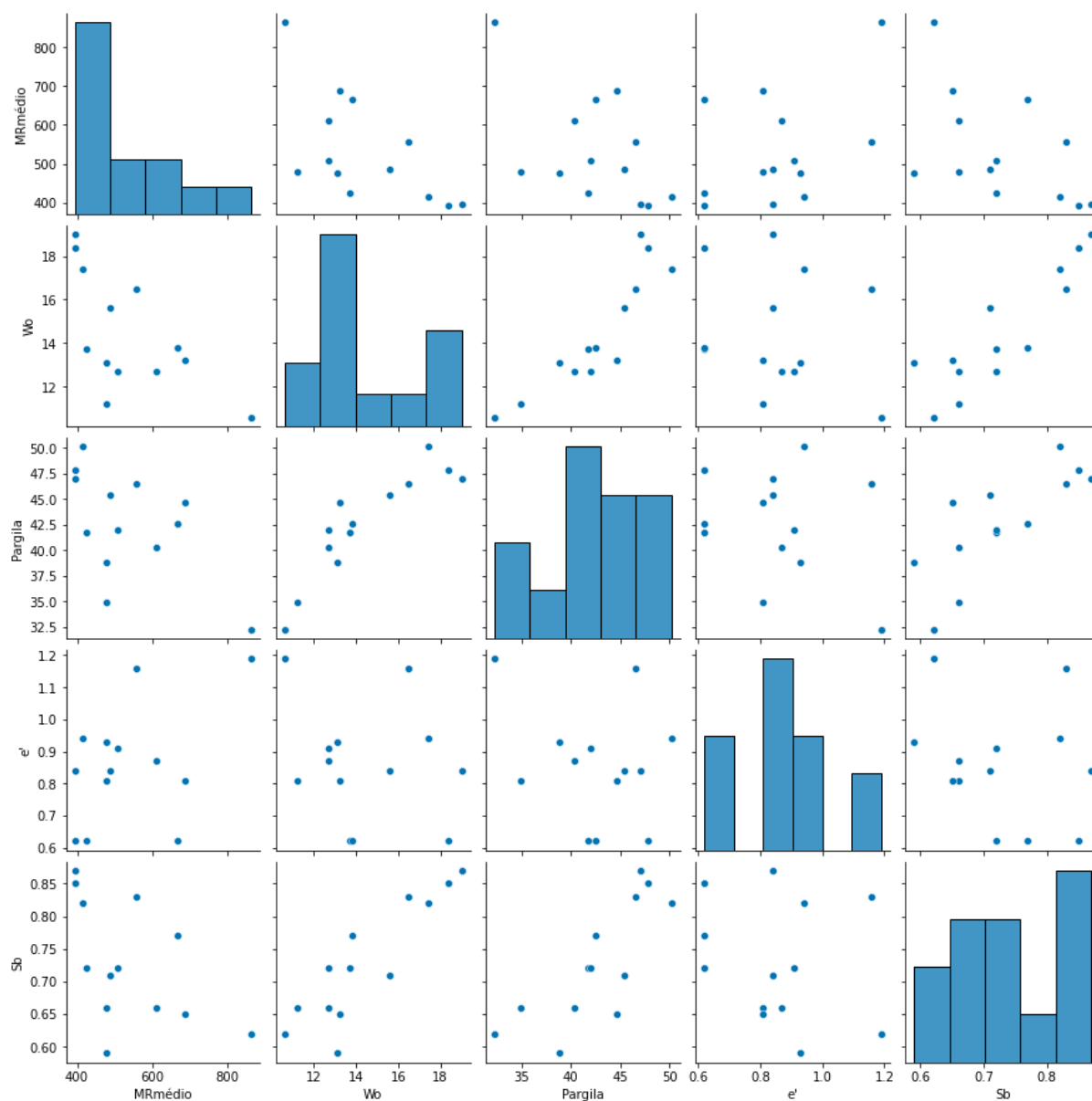


Figura 5.130 – Gráfico de dispersão e de distribuição entre as várias variáveis.

```
In [38]: #Gráfico de Correlação
corr = dados.corr(method='pearson')
plt.figure(figsize=(14, 12))
plt.imshow(corr, cmap='Spectral')
plt.colorbar()
plt.xticks(range(len(corr)), corr.columns, rotation='vertical')
plt.yticks(range(len(corr)), corr.columns);
plt.suptitle('Correlação entre variáveis', fontsize=15, fontweight='bold')
plt.show()
```

Correlação entre variáveis

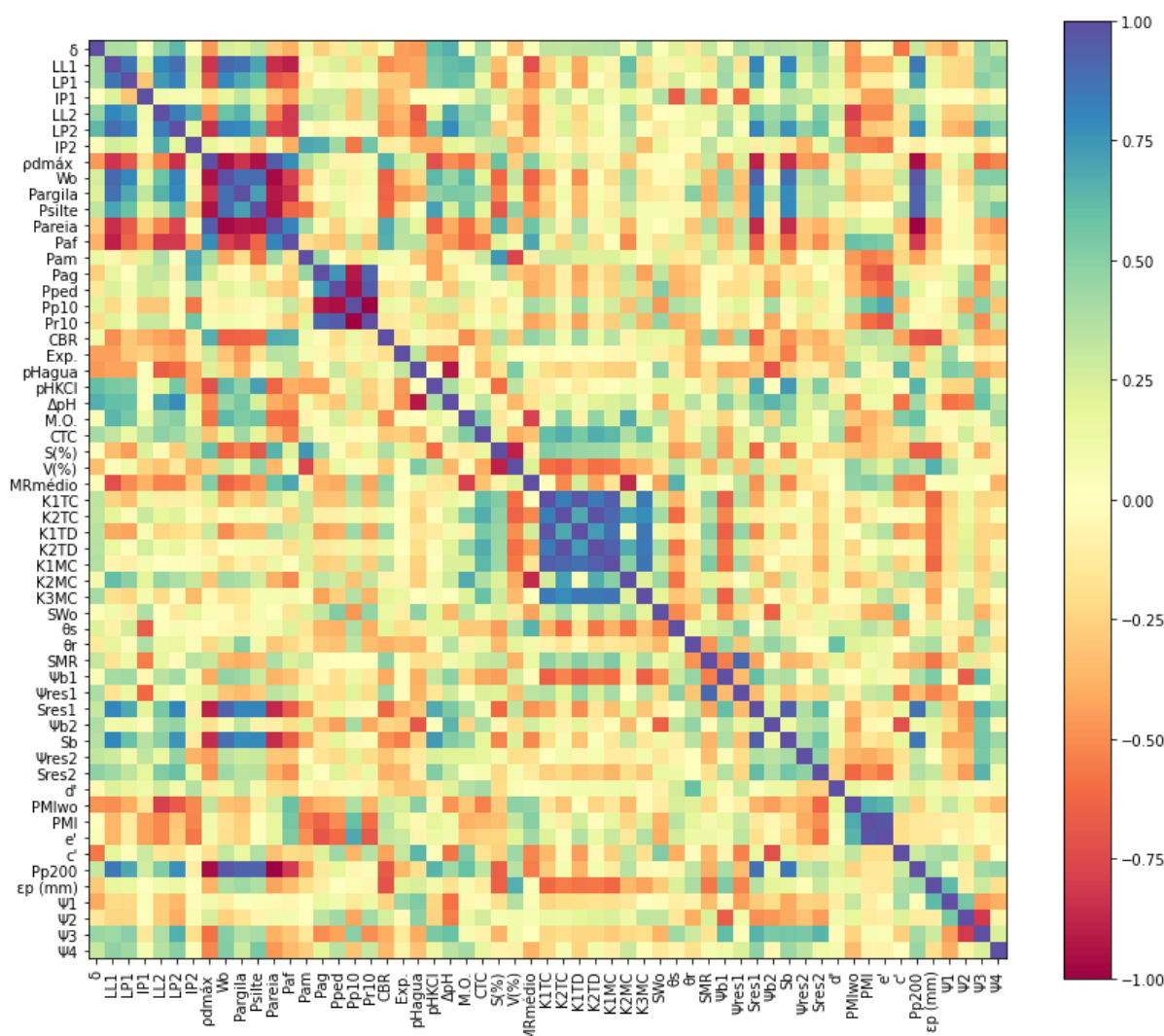


Figura 5.131 – Gráfico de correlação de Pearson dos solos da região de Recife.

Utilizando as bibliotecas Python também é possível obter o valor do coeficiente de correlação de Pearson com o módulo “stats” e a função “pearsonr” da biblioteca Scipy, como feito nos exemplos apresentados na Figura 5.132. A porcentagem de areia, por exemplo, apresentou correlações fortes com as variáveis associadas à saturação residual inicial e a do ponto de entrada de ar das curvas características.

```
In [43]: # Coeficiente de Correlação de Pearson
from scipy.stats import pearsonr

print('Correlação entre Wo e MR Médio:', pearsonr(dados['Wo'], dados['MRmédio']))
print('Correlação entre Wo e Sres1:', pearsonr(dados['Wo'], dados['Sres1']))
print('Correlação entre Wo e Sb:', pearsonr(dados['Wo'], dados['Sb']))
print('Correlação entre Pareia e Sb:', pearsonr(dados['Pareia'], dados['Sb']))
print('Correlação entre Pareia e Sres1:', pearsonr(dados['Pareia'], dados['Sres1']))
print('Correlação entre Pargila e Sb:', pearsonr(dados['Pargila'], dados['Sb']))

Correlação entre Wo e MR Médio: (-0.6355992771323669, 0.019558765362545628)
Correlação entre Wo e Sres1: (0.9261067601580475, 5.525759363906452e-06)
Correlação entre Wo e Sb: (0.8817920489494435, 6.707702280573219e-05)
Correlação entre Pareia e Sb: (-0.8535300997062697, 0.00020606910885897627)
Correlação entre Pareia e Sres1: (-0.8715963477495432, 0.00010359596401961389)
Correlação entre Pargila e Sb: (0.7843391867091022, 0.0015019703596826698)
```

Figura 5.132 – Coeficiente de correlação de Pearson para algumas variáveis.

Existem vários outros formatos gráficos interessantes para exploração da associação entre variáveis (heatmap, clustermap etc.) os quais podem ser visualizados em <https://seaborn.pydata.org/>, sendo que aqui escolheu-se mostrar apenas alguns para exemplificação.

5.4.4.3 Análise Exploratória de Dados Automatizada

O 5º Passo constitui a análise exploratória de dados automatizada que pode ser feita por meio dos Relatórios gerados pelas bibliotecas Pandas Profiling e Sweetviz. Os códigos implementados compreendem, primeiramente a instalação das bibliotecas como indicado na Figura 5.133.

5º Passo - Análise Exploratória de Dados AUTOMATIZADA

```
In [15]: # Instalando o Pandas Profiling
!pip install pandas-profiling

In [16]: # Instalando o Sweetviz
!pip install sweetviz
```

Figura 5.133 – Instalação das bibliotecas Pandas Profiling e Sweetviz.

Para gerar o relatório pelo Pandas Profiling faz-se a importação e execução da função “profile report()” e, também, pode ser gerado em formato HTML através da criação de um objeto (no caso nomeou-se como “Relatório”), assim o arquivo gerado pode ser compartilhado como indica a Figura 5.134.

```
In [19]: # Importando o Profile_report
from pandas_profiling import profile_report
# Aplicando aos dados e Gerando o relatório em HTML
Relatório = dados.profile_report(title='Relatório do Pandas Profiling')
Relatório.to_file(output_file='output.html')
```

Summarize dataset: 100%  72/72 [12:14<00:00, 10.20s/it, Completed]

Generate report structure: 100%  1/1 [00:49<00:00, 49.64s/it]

Render HTML: 100%  1/1 [00:36<00:00, 36.19s/it]

Export report to file: 100%  1/1 [00:02<00:00, 2.16s/it]

Figura 5.134 – Importação e execução da função profile_report.

O relatório do Pandas Profiling é composto por seis partes, como pode ser visto no canto superior direito da Figura 5.135: 1 – um Overview contendo uma visão global dos dados (quantidade e tipos de variáveis e amostras, bem como avisos de quais colunas tem dados com valores igual a zero – “Warnings”), 2 – Informações sobre cada variável (tipo, porcentagem de valores únicos, média, valores mínimo e máximo, histograma, etc.), 3 – Interações entre variáveis (é possível selecionar as variáveis que se deseja relacionar), 4 – Correlações (apresenta matrizes de correlação com base em diferentes coeficientes: de Pearson, Spearman, Kendal e, Phik), 5 – Valores Perdidos (em bases de dados não tratadas costuma-se ter uma quantidade relevante de informações faltantes) e, 6 – Amostra (contém a estrutura de dados analisada – primeiras e últimas linhas).

Assim, em relação aos dados analisados nesta etapa, de acordo com o relatório do Pandas Profiling, tem-se um total de 59 variáveis sendo 3 categóricas e 56 numéricas. No entanto, sabe-se que, na realidade, só se tem duas variáveis categóricas nessa base de dados, mostrando que a análise automatizada requer alguns cuidados. A variável identificada como sendo categórica pelo programa e que não é, foi pHKCl devido a quantidade de valores repetidos.

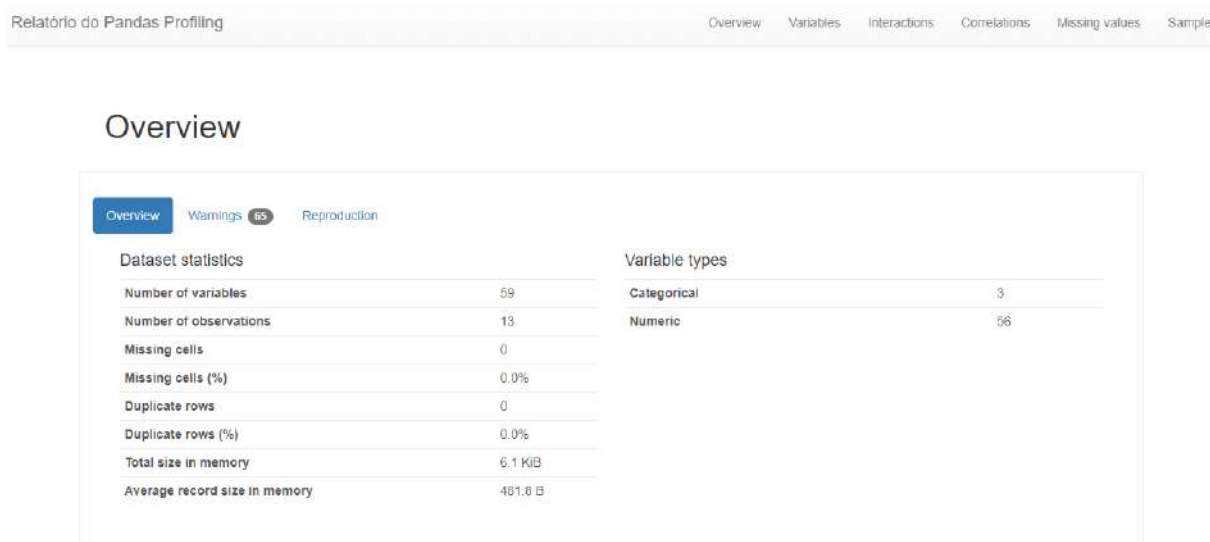


Figura 5.135 – Visão Global dos dados no Relatório do Pandas Profiling.

O Pandas Profiling foi citado aqui por ser uma das bibliotecas mais usadas para a análise exploratória de dados, porém, como utiliza métodos interativos, costuma gerar arquivos “pesados” o que dificulta o manuseio por máquinas menos robustas. A título de exemplo, o tamanho do arquivo gerado com os dados da região de Recife foi de aproximadamente 57 MB, portanto optou-se por detalhar melhor o 5º Passo com o relatório da biblioteca Sweetviz que gerou um arquivo de tamanho bem menor (4,3 MB, apenas).

A exploração dos dados de forma automatizada utilizando a biblioteca Sweetviz é feita utilizando a função “analyze” e, assim como o Pandas Profiling, pode-se gerar um relatório no formato html através da função “show_html”, conforme pode ser visualizado na estrutura de códigos da Figura 5.136.

```
In [4]: # Importando
import sweetviz as sw

# analisando os dados do banco com a sweetviz library
study_report = sw.analyze(dados)

# Gerar relatório
study_report.show_html('G:/Meu Drive/1. Tese Mayssa/9. ESCRITA DA TESE/3. Análises Estatística - Solos da Tese/Dados_RMRecife')
```

Done! Use 'show' commands to display/save. [100%] 00:17 -> (00:00 left)

Figura 5.136 – Geração de Relatório com a biblioteca Sweetviz.

A Figura 5.137 mostra uma visão da formatação do relatório gerado pela Sweetviz. Na parte superior direita apresenta-se um resumo da estrutura do DataFrame, onde pode-se notar que foram identificadas 11 variáveis categóricas o que é uma informação incorreta como

já foi dito anteriormente, porém compreensível uma vez que devido a quantidade de valores que se repetem, o algoritmo divide os mesmos em categorias. As variáveis identificadas como categóricas foram: MCT, IP2, Exp., pHagua, pHKCl, ΔpH , Ψ_{res1} , Sres2, PMI_{wo} , PMI e e'.

Na parte inferior da Figura 5.137 aparece um resumo das informações de cada variável, quando numérica apresentam-se os dados estatísticos básicos e ao clicar no cartão de uma variável automaticamente é exibido na lateral mais informações sobre a mesma incluindo as correlações importantes identificadas.

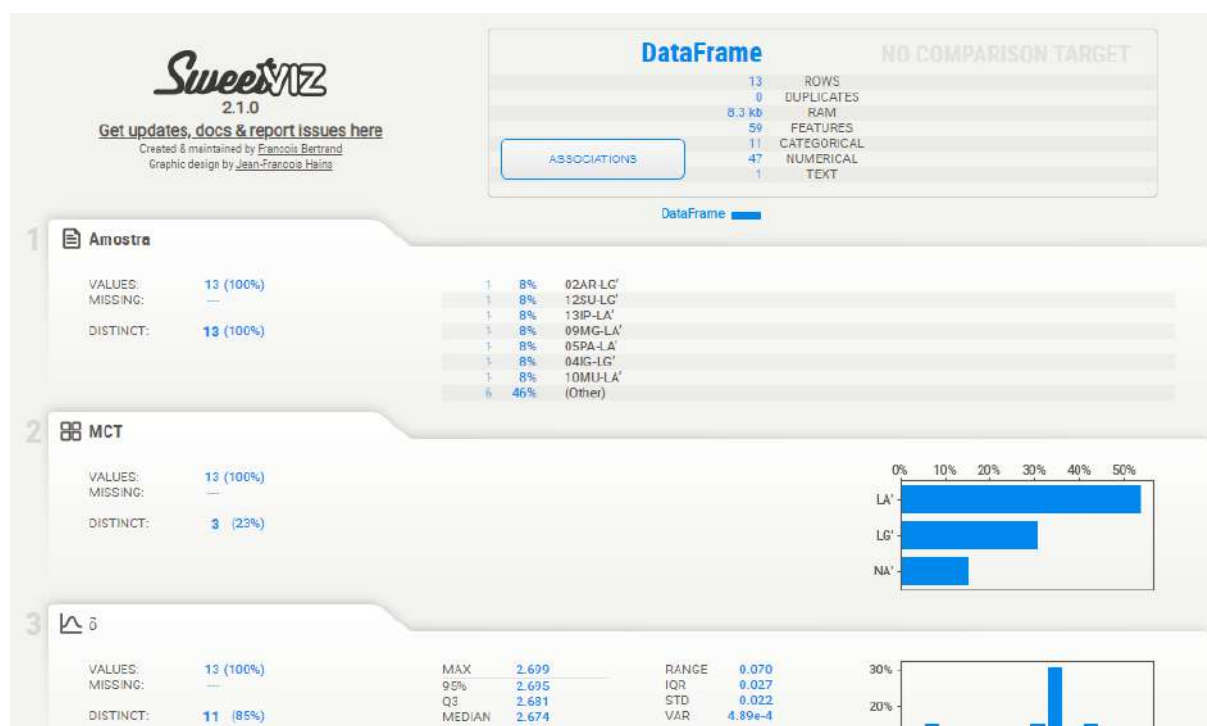


Figura 5.137 – Parte inicial do Relatório gerado com a biblioteca Sweetviz.

Ao clicar nas informações da variável Pp200, por exemplo, é possível visualizar (dentre outras informações) o histograma dos dados e as associações numéricas e categóricas importantes identificadas entre esta variável e as demais como mostra a Figura 5.138. Nota-se que, além das relações com as variáveis físicas, a porcentagem de material passando na peneira 200 correlaciona-se fortemente com os dados mecânicos da curva de compactação ($\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_o) e da curva característica (Sres1, Sb), como constatado na análise de correlações feitas no início deste capítulo, a diferença é que aqui, com esta ferramenta, tem-se a informação de forma muito mais clara e de obtenção também mais ágil.

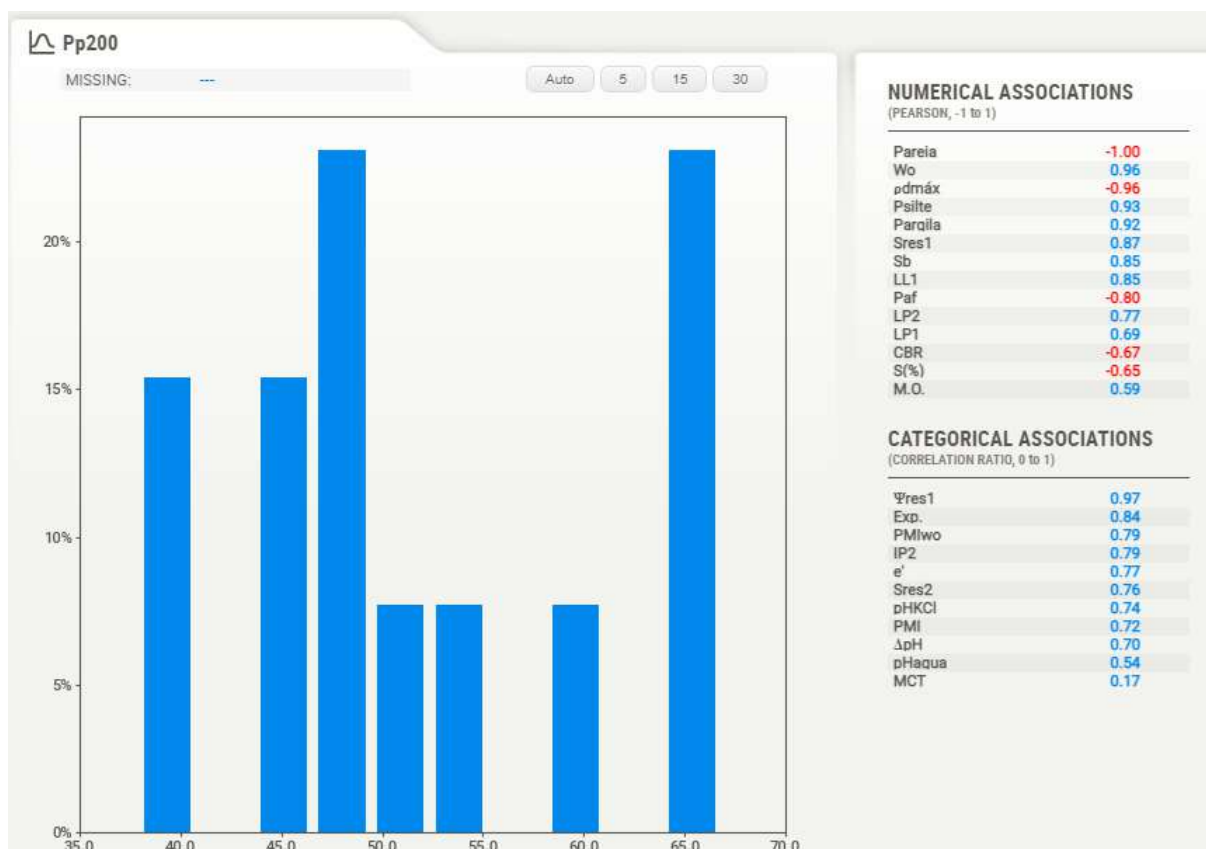


Figura 5.138 – Informações da variável Pp200 obtidas com a biblioteca Sweetviz.

Outra informação interessante que pode ser obtida nos cartões são as variáveis que podem estar recebendo ou fornecendo informação para outras variáveis. Para exemplificar, a Figura 5.139 mostra o detalhamento das informações da variável e' , onde foi apontado que e' pode estar fornecendo informação para MCT (que é uma certeza) e para expansão, índice de plasticidade (método tradicional com secagem), Ψ_{res1} , Sres2 e os dados referentes ao pH (ambos com coeficientes de incerteza semelhantes ao da MCT).

Consultando as informações de cada variável (cartão por cartão) notou-se que há uma quantidade enorme de associações identificadas e que seria impossível esgotar a apresentação e discussão das mesmas nesta tese, o que não é o objetivo, assim optou-se por mostrar, a seguir recortes das informações da variável Ψ_{res1} que apresentou associações bastante relevantes com diversas características geotécnicas estudadas. Em seguida, apresenta-se a matriz de correlação de todas as variáveis que pode ser obtida no botão “Associations” (semelhante àquela gerada anteriormente por meio de código no Python). Adicionalmente, os arquivos contendo os relatórios e Notebooks utilizados nesta tese serão livremente disponibilizados para consulta via armazenamento em nuvem.

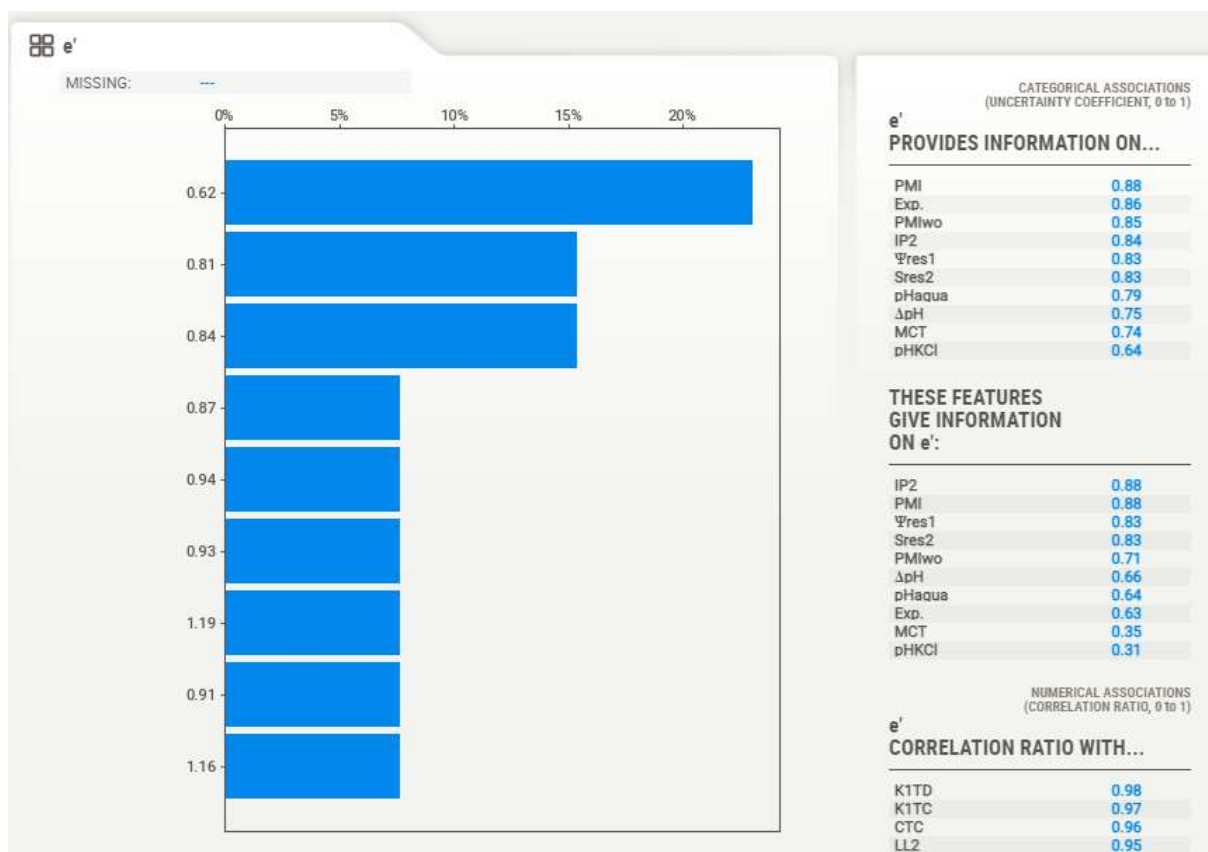


Figura 5.139 – Informações da variável e' obtidas com a biblioteca Sweetviz.

Pelo relatório da Sweetviz (Figura 5.140), a Ψ_{res1} (sucção residual dos macroporos) apresenta razão de correlação (coeficiente de correlação não linear entre uma variável quantitativa e outra categórica) alta com a SMR (Sucção obtida nos corpos de prova do ensaio de MR), com o teor de matéria orgânica, com as porcentagens de areia e silte, com dados da curva de compactação tradicional ($\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_o) e da obtida pela MCT (d'), com o limite de liquidez, com K2TC, com a saturação por bases ($V\%$) e com outras variáveis da curva característica (Ψ_{res2} e S_b).

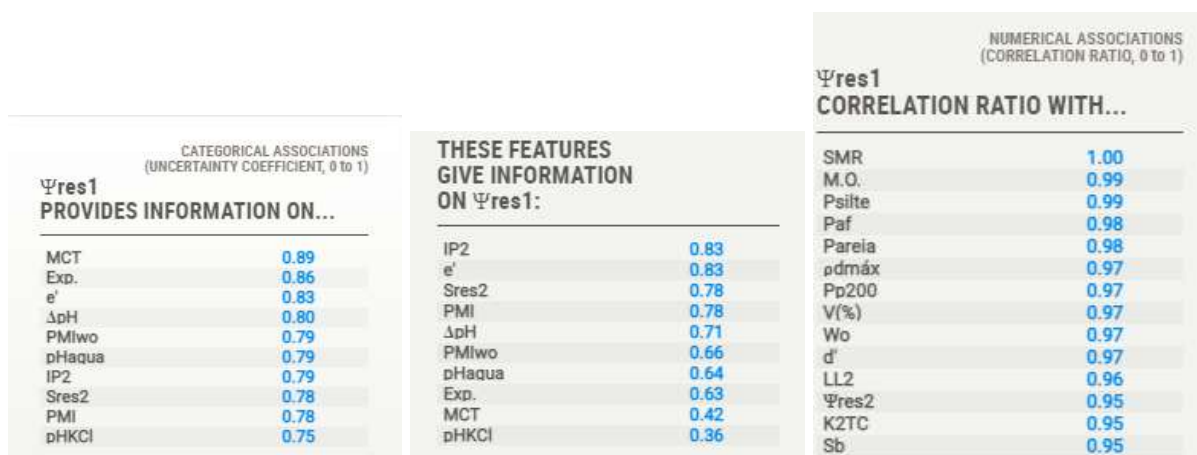


Figura 5.140 – Informações da variável e' e suas correlações obtidas com a biblioteca Sweetviz.

Na matriz de correlação gerada pela Sweetviz (Figura 5.141), os quadrados são associações categóricas assimétricas (cada quadrado representa o quanto o título da linha (à esquerda) dá informações sobre cada coluna) e os círculos são as correlações numéricas simétricas (de Pearson). A diagonal é deixada em branco intencionalmente para maior clareza.

Adicional às análises das correlações numéricas já efetuadas, o uso dessa biblioteca se torna relevante por mostrar, ao mesmo tempo, as associações categóricas (categóricas-categóricas e categóricas-numéricas), e o algoritmo identificou que várias variáveis podem “explicar” outras, assim a análise das associações categóricas é feita considerando o quanto o elemento à esquerda (linha) FORNECE INFORMAÇÃO sobre o elemento da vertical (coluna).

No caso da classificação MCT (primeira linha), por exemplo, a variável que apresentou a associação categórica com diversas variáveis e a mais forte foi com o coeficiente c' . Ao visualizar a relação inversa (na linha de c' , atributo à esquerda) observa-se o mesmo resultado (isso se faz necessário por que as associações categóricas são assimétricas), em suma os resultados indicam que ambas as variáveis fornecem informação uma para outra e por ser uma relação conhecida, portanto esperada, corrobora com a veracidade da informação apresentada pela análise realizada com esta ferramenta.

Na matriz também se observa que há linhas e colunas quase que completamente preenchidas com a cor “azul escuro” mostrando que as variáveis correspondentes podem estar associadas a praticamente todas as outras variáveis da matriz, sendo que os atributos que apresentaram esse comportamento foram: IP2, Exp., pHágua, pHKCl, ΔpH , Ψ_{res1} , Sres2, PMIwo, PMI e e' .

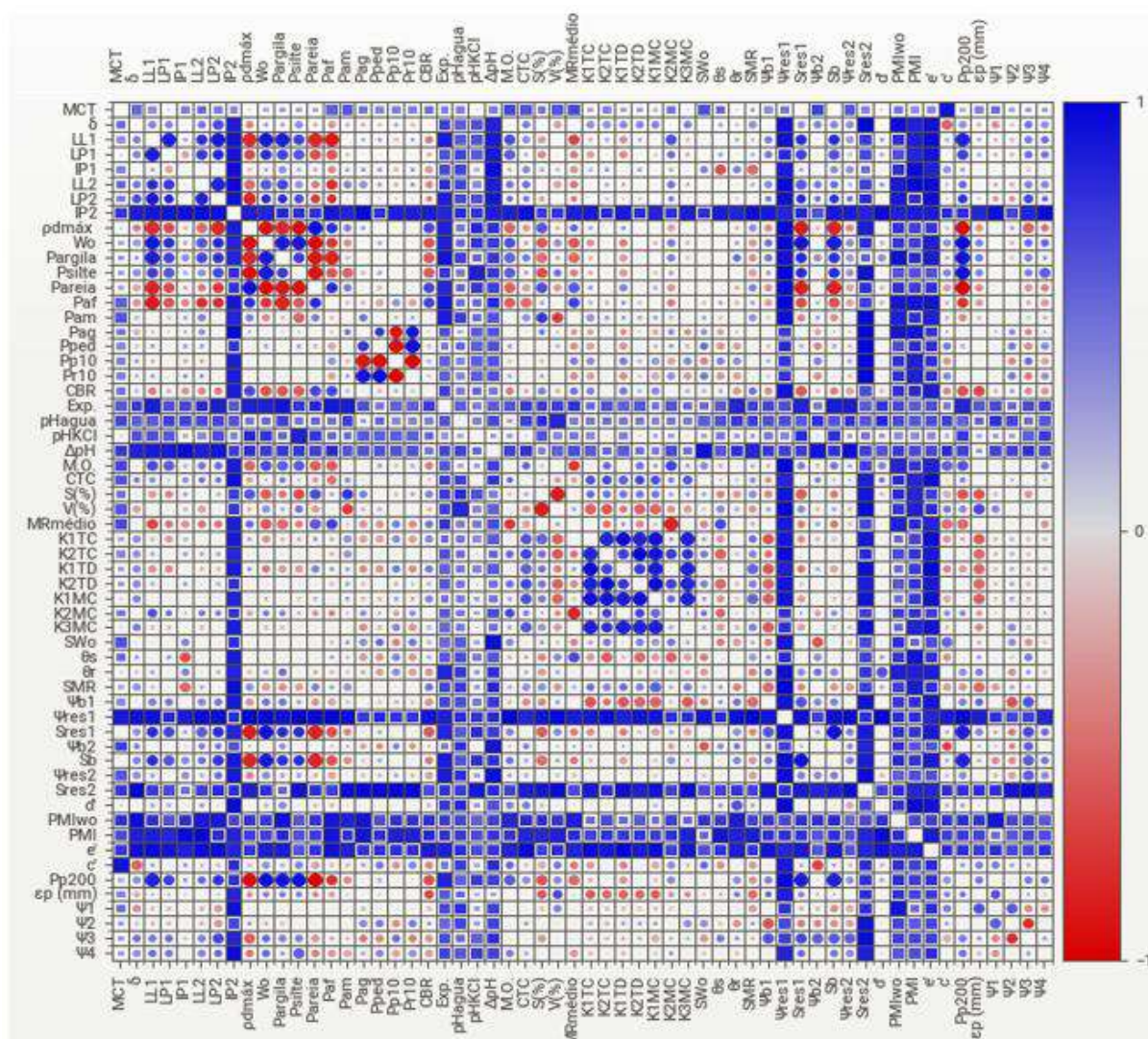


Figura 5.141 – Matriz de correlação gerada com a biblioteca Sweetviz.

5.4.4.4 Análise de Agrupamentos de Dados - Método Hierárquico

Para o 6º e último passo que consiste na Análise de Agrupamentos de Dados por meio do Método Hierárquico e implementação via códigos e bibliotecas no Python faz-se necessário, primeiramente, proceder a padronização dos dados que consiste em ajustá-los de forma que apresentem média igual a zero e desvio padrão igual a 1 (Método Z-score Normalization), devido ao fato de ter-se vários atributos com intervalos de valores e escalas diferentes.

Antes de realizar a padronização dos dados, criou-se um novo Dataframe (conforme Figura 5.142): 1 – excluindo a coluna MCT porque apresenta dados categóricos (para possibilitar a clusterização) por meio da função “drop” e, 2 - tornando os dados da coluna

Amostra como os índices das linhas para que as folhas do dendrograma já mostrem os nomes dos solos.

6º Passo - Análise de Agrupamentos de Dados - Método Hierárquico

```
In [3]: #Excluindo a coluna MCT e transformando a coluna Amostra na identificação (índice) das linhas
dados1 = dados.drop(columns=['MCT'])
dados2 = dados1.set_index('Amostra')
dados2.head()
```

Out[3]:

	δ	LL1	LP1	IP1	LL2	LP2	IP2	pdmáx	Wo	Pargila	...	PMIwo	PMI	e'	c'	Pp200	εp (mm)	Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4
Amostra																					
01GO-LG'	2.634	32.2	22.8	9.4	35.6	25.0	10.6	1.790	17.4	50.171503	...	74.50	75	0.94	2.0	64.363157	6.521	0.209	-0.447	1.727	0.056
02AR-LG'	2.674	33.7	25.9	7.8	41.3	27.9	13.4	1.750	18.4	47.832141	...	0.00	10	0.62	1.9	66.831499	6.585	0.279	0.792	1.299	0.063
03IT-NA'	2.654	22.0	18.0	4.0	24.1	17.4	6.7	1.970	10.6	32.281323	...	97.84	153	1.19	1.2	37.882812	2.926	0.125	0.246	1.244	0.055
04IG-LG'	2.629	26.2	20.3	5.9	33.4	21.7	11.7	1.910	13.1	38.812105	...	37.58	58	0.93	1.7	45.432873	7.191	0.462	-0.510	1.300	0.051
05PA-LA'	2.642	30.0	20.4	9.6	37.9	23.1	14.8	1.935	13.7	41.693139	...	9.07	9	0.62	1.4	46.514166	1.632	0.071	0.071	0.071	0.071

5 rows x 57 columns

Figura 5.142 – Exclusão da coluna MCT e colocando a coluna Amostra como índice.

Para realizar a padronização faz-se necessário criar uma matriz através da função “array” da biblioteca Numpy e utilizar as funções “StandardScaler” e “transform” da biblioteca Sklearn para executar a padronização propriamente dita. A checagem do resultado é feita verificando se a média e o desvio padrão estão próximo de 0 e 1, respectivamente, conforme mostra a Figura 5.143.

```
In [4]: import numpy as np
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
X = np.array(dados2)
# prepara a função para transformar os dados
scaler = StandardScaler().fit(X)
# realiza a padronização (média=0, desvio padrão = 1)
rescaledX = scaler.transform(X)
print(rescaledX)
```

```
In [5]: #Checando se os dados foram padronizados
for i in np.arange(0,rescaledX.shape[1]):
    print('Média da coluna', i, 'é igual a: ', np.mean(rescaledX[:,i]))
    print('Desvio padrão da coluna', i, 'é igual a: ', np.std(rescaledX[:,i]),'\n')
```

```

Média da coluna 0 é igual a:  9.65040013712636e-15
Desvio padrão da coluna 0 é igual a:  0.9999999999999999

Média da coluna 1 é igual a:  7.301851431188529e-16
Desvio padrão da coluna 1 é igual a:  1.0

Média da coluna 2 é igual a:  -1.5372318802502168e-15
Desvio padrão da coluna 2 é igual a:  0.9999999999999998

Média da coluna 3 é igual a:  -4.099285014000578e-16
Desvio padrão da coluna 3 é igual a:  1.0
```

Figura 5.143 – Padronização dos dados.

Em seguida, pode-se executar os algoritmos de clusterização. No caso desta tese foi utilizado o agrupamento hierárquico, portanto importou-se a função “hierarchy” do módulo de clusterização (Cluster) da biblioteca Scipy. Como descrito no capítulo de metodologia foi feita a implementação com o método de Ward e a distância euclidiana. O dendrograma criado está apresentado na Figura 5.144 a seguir. Posteriormente (Figura 5.145) apresenta-se o mesmo dendrograma, porém com algumas informações de análise dos clusters criados.

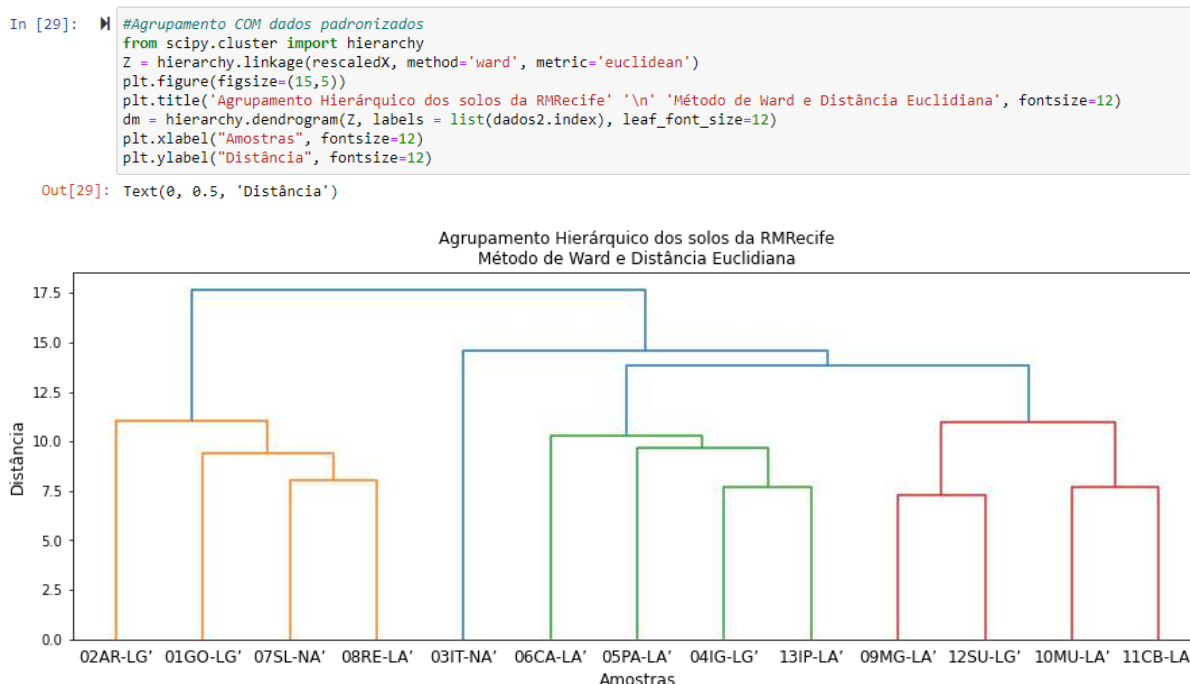


Figura 5.144 – Dendrograma do agrupamento hierárquico dos solos da RMRecife.

Buscando entender como o algoritmo agrupou os dados, procedeu-se uma análise do dendrograma de cima para baixo, ou seja, notando qual ou quais das variáveis geotécnicas poderiam ter sido utilizadas como divisor dos solos em cada Cluster. Para isso, realizou-se três linhas de corte no dendrograma conforme indicado na Figura 5.145 e identificou-se os clusters criados. Ressalta-se que, com certeza, a clusterização obtida passou por um processo muito mais complexo do que será pontuado aqui, uma vez que o mesmo levou em consideração mais de 50 atributos.

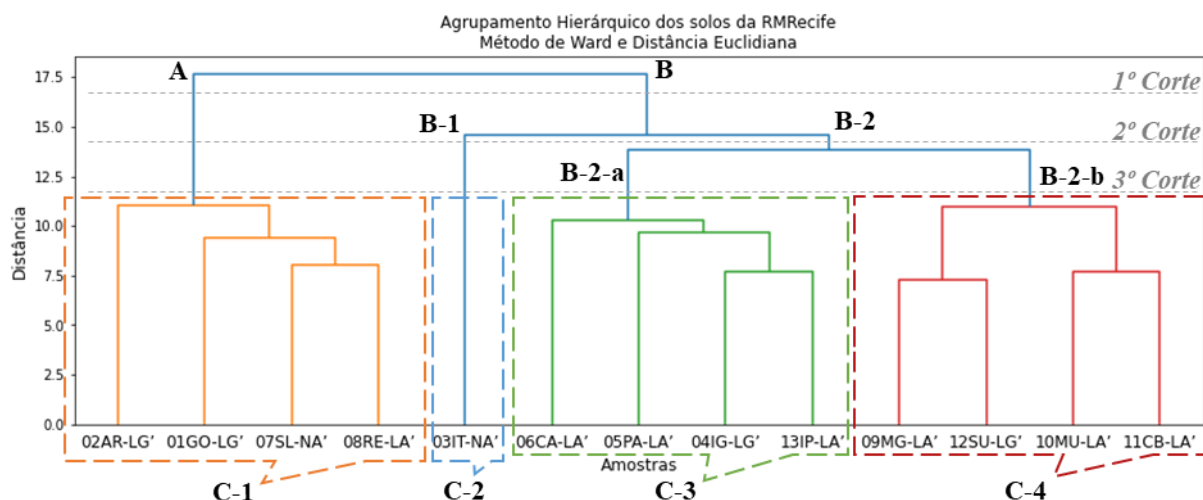


Figura 5.145 – Análise do dendrograma do agrupamento hierárquico dos solos da RMRecife.

Inicialmente, no primeiro corte, o algoritmo dividiu os solos em dois grandes grupos (A e B), podendo ter sido de acordo com os resultados do ensaio de compactação (umidade ótima e massa específica aparente seca máxima). O gráfico da Figura 5.146 mostra a divisão clara desses grupos por meio das curvas de compactação, e assim os solos do grupo A são compostos por aqueles com maiores valores de umidade ótima ($W_o > 16\%$) e menores valores de $\rho_{dm\acute{a}x}$ ($< 1,8 \text{ g/cm}^3$) e o Grupo B pelos solos com $W_o < 16\%$ e $\rho_{dm\acute{a}x} > 1,8 \text{ g/cm}^3$.

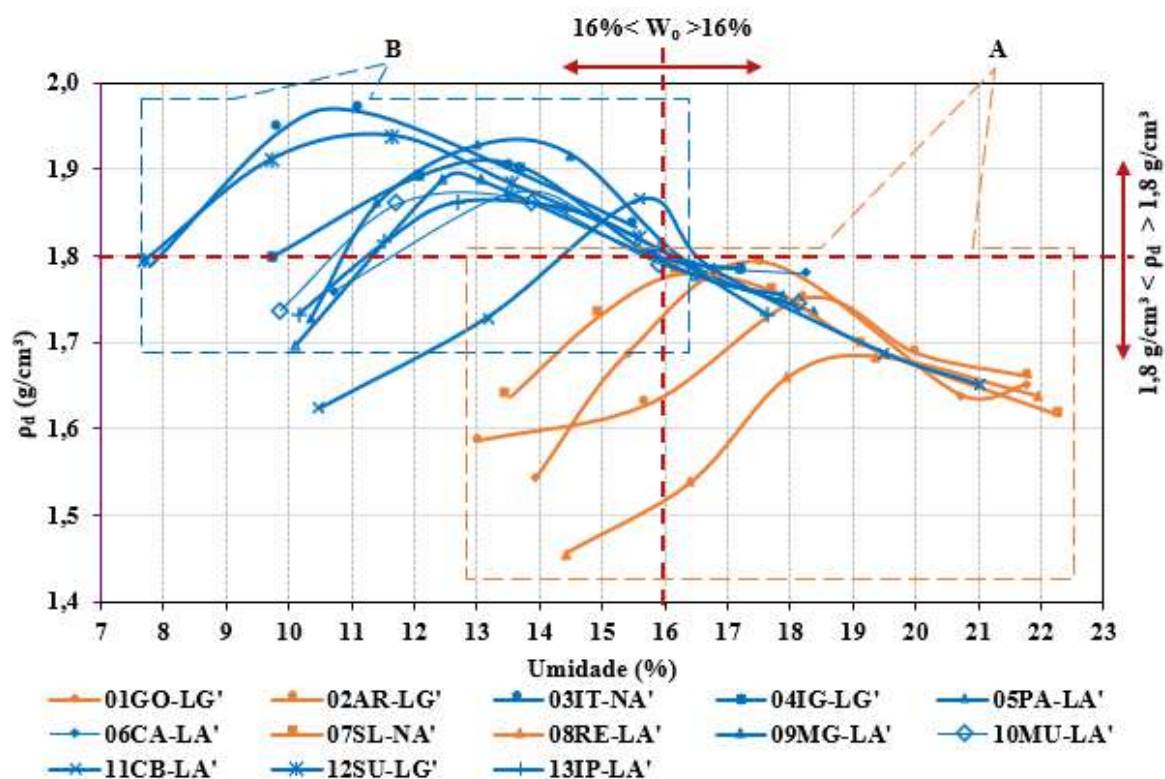


Figura 5.146 – Divisão dos grupos A e B pelas curvas de compactação dos solos da RMRecife.

Pelo segundo corte, observa-se que o grupo B é subdividido em outros dois grupos (B-1 e B-2), já o grupo A se mantém o mesmo (mostrando que os solos deste grupo possuem características mais homogêneas que os solos do grupo B). Essa parte do agrupamento pode ter sido feita com base na composição granulométrica, principalmente pelas frações silte e areia fina dos solos. A subdivisão do grupo B, se deu pela alta % de areia fina do solo 03IT-NA' (55,85%) o que o diferenciou dos demais solos do grupo, como pode ser constatado pelo gráfico da Figura 5.147.

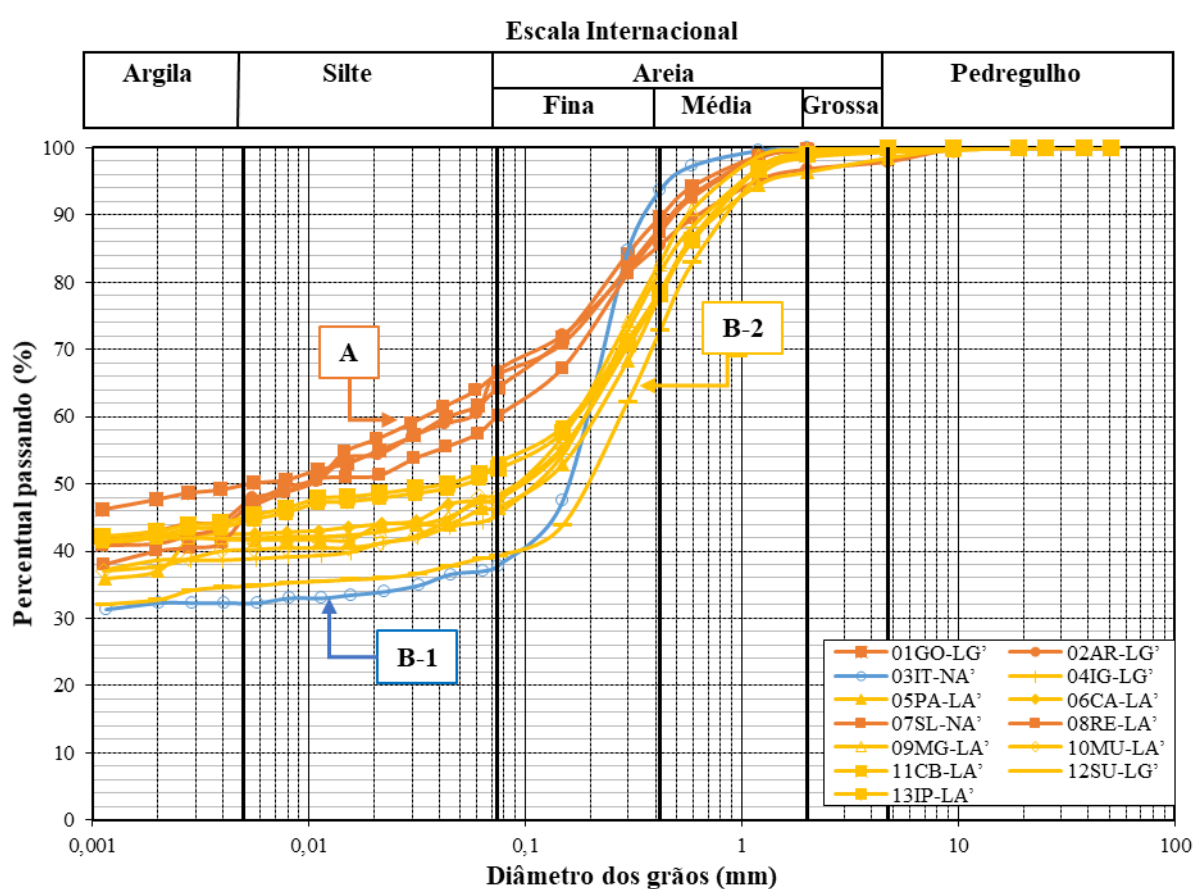


Figura 5.147 – Divisão dos grupos A, B1 e B2 pelas curvas granulométricas.

Na terceira e última linha de corte, o grupo A novamente manteve-se homogêneo, o Grupo B-1 por ser composto somente pelo solo 03IT-NA' também não teve alterações (e não terá), já o grupo B-2 subdividiu-se em dois subgrupos (B-2-a e B-2-b), cuja divisão pode ter sido realizada em função do teor de matéria orgânica encontrada nos solos, como se vê na Figura 5.148 (B-2-a: M.O. entre 4,37 – 5,53 g/kg; B-2-b: 5,68 – 6,67 g/kg), mas também pode estar associada ao comportamento de diversas outras variáveis que, apesar de apresentarem certa

“sobreposição” de valores entre os grupos tendem a apresentar resultados mais baixos ou mais altos como por exemplo: ε_p - B-2-a: entre 1,63 – 7,19 mm; B-2-b: 0,78 – 3,37 mm; ψ_{b1} - B-2-a: entre 3,4 – 4,8 kPa; B-2-b: 1,2 – 3,8 kPa.

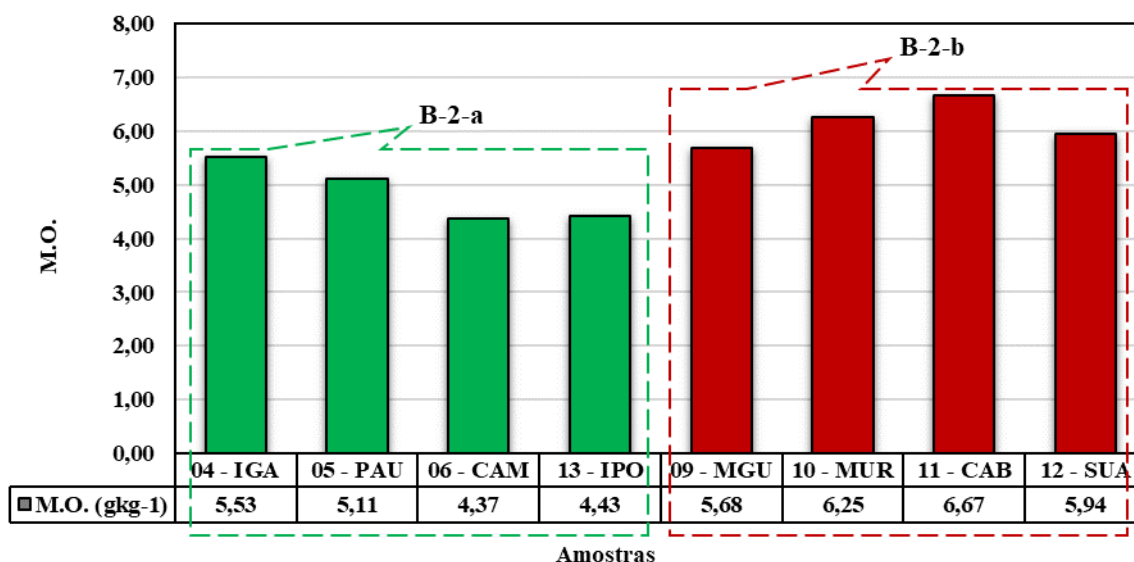


Figura 5.148 – Divisão dos grupos B-2-a e B-2-b considerando o teor de matéria orgânica.

Nessa fase da análise obteve-se a identificação clara de 4 Clusters no dendrograma, o Cluster 1 (C-1) composto por 4 solos do grupo A (01GO-LG', 02AR-LG', 07SL-NA' e 08RE-LA'), o Cluster 2 (C-2) composto pelo solo do grupo B-1 (03IT-NA'), o Cluster 3 (C-3) formado por 4 solos do subgrupo B-2-a (04IG-LG', 05PA-LA', 06CA-LA' e 13IP-LA') e o Cluster 4 (C-4) composto por 4 solos do subgrupo B-2-b (09MG-LA', 10MU-LA', 11CB-LA' e 12SULG'). De cada cluster foi identificadas semelhanças maiores entre alguns pares de solos, a saber: do C-1 - 07SL-NA' e 08RE-LA', do C-3 - 04IG-LG' e 13IP-LA' e do C-4 - 10MU-LA' e 11CB-LA').

Os solos 07SL-NA' e 08RE-LA', apesar de serem de classes MCT diferentes, são de classe USCS idênticas e apresentam valores de limite de liquidez, %argila, pHKCl, δ , ε_p e S_b semelhantes. Os solos 04IG-LG' e 13IP-LA' também apesar de classes MCT diferentes são da mesma classe TRB (A-6) e apresentam valores de IP, umidade ótima, K₂TC, K₂TD, ε_p , Ψ_{b1} e S_{res1} parecidos. Os solos 10MU-LA' e 11CB-LA' são de mesma classe MCT com valores de c' , e' , % silte, IP, ε_p e Ψ_{res1} semelhantes.

As análises multivariadas, como a análise de agrupamento aplicada nesta tese, consideraram três ou mais variáveis para caracterizar o comportamento do objeto analisado,

assim entende-se que vários parâmetros geotécnicos foram usados ao mesmo tempo para formar os grupos com as características mais homogêneas possíveis.

Neste sentido, foram testados outros agrupamentos excluindo, por exemplo, os parâmetros dos modelos bidimensionais de comportamento resiliente (mantendo somente os associados ao modelo composto que apresentou o melhor enquadramento para a maioria dos solos) e observou-se que, excluindo apenas os dados associados ao modelo em função da tensão desvio ou da tensão confinante, não há alteração no dendrograma, porém retirando de uma só vez todos os parâmetros associados aos dois modelos obtém-se um dendrograma com outra estrutura de agrupamento, evidenciando a associação que o algoritmo faz entre as diversas variáveis.

5.4.4.5 *Análise complementar – Comparação de imagens do Stereo Microscópio*

Como uma análise complementar e uma forma de aproveitamento das ferramentas da Ciência de Dados para análise de imagens, separou-se as imagens feitas no Stereo Microscópio para comparação dos solos entre si e para verificação de alguma similaridade com os resultados obtidos na clusterização.

De forma sucinta, o processo de comparação de imagens no Python é feito por meio da implementação de uma função que recebe a imagem e a processa transformando-a em vetores.

A função aplicada nesta tese (existem várias outras funções/técnicas) para vetorização das imagens foi a BIC (do inglês, *Border-Interior Classification*), que transforma e reescala a imagem, computa dois histogramas de cor: um para os pixels do “interior” e outro para os pixels de “borda” (extremidade da imagem), em seguida normaliza os histogramas e concatena-os em um único vetor. Os vetores representam as frequências das cores na imagem o que permite, com auxílio de uma medida de distância, comparar imagens quanto à similaridade de cores.

Para realizar a comparação deve-se definir uma imagem como referência para que seja calculada a distância das demais imagens relacionadas a ela. Nas Figuras 5.149 a 5.156, a seguir, mostra-se a estrutura de códigos utilizada para realizar a comparação entre as imagens, considerando a distância euclidiana como medida. Os pacotes/bibliotecas utilizados são apresentados ao longo do código. Na Figura 5.156, mostra-se a definição da imagem 12SU-LG’ como referência, no entanto toda a estrutura de código foi executada várias vezes alterando

essa imagem de consulta para comparação dos resultados com os clusters formados anteriormente.

```
In [6]: # inclui aqui as bibliotecas e funções
# inclua os pacotes necessários e as funções necessárias
from skimage import feature
from os import listdir
import imageio
import matplotlib.pyplot as plt

def rescale_image_colors(img, n_colors=32):
    # RGB para escala de cinza
    img = np.array(img, dtype=np.float64, copy=False)
    if (len(img.shape) > 2):
        img = img[:, :, 0]*0.2126 + img[:, :, 1]*0.7152 + img[:, :, 2]*0.0772

    # reescalando numero de cores
    img = img/255.0
    img = (img*(n_colors-1)).astype(np.uint8)
    return img
```

Figura 5.149 – Inclusão das bibliotecas e definição da função para reescalar as imagens.

```
In [42]: import numpy as np
imgQ = imageio.imread("C:/Users/Mayssa/Desktop/Bases de Dados/imagens/fino/12-SUAPE2.jpg")
img = rescale_image_colors(imgQ, n_colors = 32)
print('Tamanho da imagem original:', imgQ.shape)
print('Tamanho da imagem reescalada:', img.shape)

Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
```

Figura 5.150 – Definição, abertura e reescala da imagem de referência.

```
In [8]: #Definindo a função Border-Interior Classification (BIC)
def BIC(img, n_colors):
    'Recebe uma imagem e retorna a concatenação de dois vetores: a_int - array (n_colors), a_bord - array (n_colors)'
    h_inter = np.zeros(n_colors)
    h_borda = np.zeros(n_colors)

    for i in range(img.shape[0]):
        for j in range(0, img.shape[1]):
            if i == 0 or i == (img.shape[0] - 1):
                h_borda[img[i, j]] += 1
                continue
            if j == 0 or j == (img.shape[1] - 1):
                h_borda[img[i, j]] += 1
                continue
            if img[i - 1, j] != img[i, j]:
                h_borda[img[i, j]] += 1
                continue
            if img[i + 1, j] != img[i, j]:
                h_borda[img[i, j]] += 1
                continue
            if img[i, j - 1] != img[i, j]:
                h_borda[img[i, j]] += 1
                continue
            if img[i, j + 1] != img[i, j]:
                h_borda[img[i, j]] += 1
                continue

            h_inter[img[i, j]] += 1

    h_borda = h_borda / h_borda.sum()
    h_inter = h_inter / h_inter.sum()
    h_BIC = np.hstack([h_borda, h_inter])
    h_BIC = h_BIC / h_BIC.sum()

    return h_BIC
```

Figura 5.151 – Definição da função BIC.

```
In [45]: #Aplicando a Função BIC na imagem query
bic_img = BIC(img, n_colors=32)
bic_img

Out[45]: array([0.00000000e+00, 4.23178124e-06, 2.91052510e-04, 1.46043473e-03,
 2.60536665e-03, 2.74501543e-03, 3.43996795e-03, 1.18456961e-02,
 4.14526482e-02, 8.36783019e-02, 1.11486747e-01, 1.05894213e-01,
 7.13370172e-02, 3.61064979e-02, 1.44863276e-02, 5.87277197e-03,
 2.65520763e-03, 1.24743507e-03, 7.72535176e-04, 4.75840291e-04,
 3.34780916e-04, 2.29926781e-04, 1.68330854e-04, 1.22721656e-04,
 8.46356248e-05, 6.58277082e-05, 5.87747395e-05, 5.26621666e-05,
 3.38542499e-05, 3.19734583e-05, 2.72714791e-04, 6.86488957e-04,
 0.00000000e+00, 0.00000000e+00, 3.66971994e-04, 3.50530597e-03,
 4.42865486e-03, 3.60395435e-03, 3.71444055e-03, 1.43526824e-02,
 6.04754063e-02, 1.07187390e-01, 1.19355339e-01, 9.97795537e-02,
 5.38764870e-02, 2.03623421e-02, 4.66935692e-03, 1.06408725e-03,
 2.45963308e-04, 3.02521716e-05, 9.20718265e-06, 5.26124723e-06,
 0.00000000e+00, 1.31531181e-06, 1.31531181e-06, 0.00000000e+00,
 0.00000000e+00, 0.00000000e+00, 0.00000000e+00, 0.00000000e+00,
 0.00000000e+00, 0.00000000e+00, 1.31531181e-05, 2.95155970e-03])
```

Figura 5.152 – Aplicação da função BIC na imagem de referência.

```
In [10]: #Abrindo e reescalando as demais imagens do diretório
l_imgs = listdir('C:/Users/Mayssa/Desktop/Bases de Dados/imagens/fino/')
n_imgs = len(l_imgs)

lista_img = []
for im in l_imgs:
    imgS = imageio.imread('C:/Users/Mayssa/Desktop/Bases de Dados/imagens/fino/'+im)
    imgR = rescale_image_colors(imgS, n_colors = 32)
    lista_img.append(imgR)
    print('\r Processando: %s' % (im), end='')
    print('Tamanho da imagem original:', imgS.shape)
    print('Tamanho da imagem reescalada:', imgR.shape)

Processando: 01-GOIANA2.jpg          Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 02-ARAÇOIABA2.jpg       Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 03-ITAMARACÁ2.jpg       Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 04-IGARASSU2.jpg        Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 05-PAULISTA2.jpg        Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 06-CAMARAGIBE2.jpg      Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 07-SLM2.jpg             Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 08-Recife2.jpg          Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 09-M.GUARARAPES2.jpg    Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 10-MURIBECA2.jpg        Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 11-CABO2.jpg            Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 12-SUAPE2.jpg           Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
Processando: 13-IPOJUCA2.jpg         Tamanho da imagem original: (1040, 1388, 3)
Tamanho da imagem reescalada: (1040, 1388)
```

Figura 5.153 – Abrindo e reescalando as demais imagens do diretório.

```
In [11]: # Aplicando a função BIC nas demais imagens do diretório
bic_imgs = []
for i in lista_img:
    bic = BIC(i, n_colors=32)
    print('\r Processando: %s' % (i), end='')
    bic_imgs.append(bic)

print(bic_imgs)
```

```
[12 11 10 ... 9 9 9]
[12 11 9 ... 9 9 10]
Processando: [[10 10 11 ... 9 9 10]]
[11 11 11 ... 10 10 10]
[11 10 11 ... 10 10 10]
...
[11 11 11 ... 14 15 15]
[12 11 11 ... 14 14 15]
Processando: [[13 13 12 ... 13 13 13]]
[13 13 12 ... 13 13 13]
[13 13 12 ... 13 13 13]
...
[11 11 11 ... 12 12 12]
[11 11 11 ... 12 11 11]
Processando: [[13 13 13 ... 8 9 8]]
[13 14 14 ... 8 8 8]
[13 13 14 ... 8 8 8]
...
[12 12 12 ... 15 15 15]
[11 11 12 ... 14 14 14]
Processando: [[14 14 14 ... 10 10 10]]
```

```
In [12]: # Definindo a função de distância euclidiana
def Euclidean_distance(A, B):
    """ Calcula a distancia Euclidiana entre dois vetores de mesmo tamanho"""
    return np.sqrt(np.sum((A-B)**2))
```

Figura 5.154 – Aplicando a função BIC às demais imagens do diretório e definindo a função de distância euclidiana.

```
In [46]: # Calculando as distâncias de cada imagem em relação a imagem de consulta (Query)
dists = []
for i in bic_imgs:
    dist = Euclidean_distance(bic_img, i)
    dists.append(dist)
print(dists)

[0.16884465607543378, 0.06059522909816962, 0.23202367017085543, 0.23802085713953064, 0.09126355533877277, 0.107808031119539
49, 0.20556063491778995, 0.1993151171335655, 0.027271843294539643, 0.31618108444917825, 0.18406775658787924, 0.0, 0.2199583
5616753573]
```

Figura 5.155 – Aplicando a função de distância euclidiana de cada imagem em relação à imagem de referência.

```
In [48]: # Exibindo a imagem de consulta, e também as 5 imagens mais próximas, com seus nomes e valores da distância obtidos.
path_imgs = 'C:/Users/Mayssa/Desktop/Bases de Dados/imagens/fino/'
plt.figure(figsize=(12,8))
plt.subplot(231); plt.imshow(imgQ); plt.title("12-SUAPE2"); plt.axis('off')
plt.subplot(232); plt.imshow(imageio.imread(path_imgs+l_imgs[k_cbir[1]])); plt.title((l_imgs[k_cbir[1]], "Rank 1 : %.4f"% dists[k_cbir[1]]))
plt.subplot(233); plt.imshow(imageio.imread(path_imgs+l_imgs[k_cbir[2]])); plt.title((l_imgs[k_cbir[2]], "Rank 2 : %.4f"% dists[k_cbir[2]]))
plt.subplot(234); plt.imshow(imageio.imread(path_imgs+l_imgs[k_cbir[3]])); plt.title((l_imgs[k_cbir[3]], "Rank 3 : %.4f"% dists[k_cbir[3]]))
plt.subplot(235); plt.imshow(imageio.imread(path_imgs+l_imgs[k_cbir[4]])); plt.title((l_imgs[k_cbir[4]], "Rank 4 : %.4f"% dists[k_cbir[4]]))
plt.subplot(236); plt.imshow(imageio.imread(path_imgs+l_imgs[k_cbir[5]])); plt.title((l_imgs[k_cbir[5]], "Rank 5 : %.4f"% dists[k_cbir[5]]))
```

Figura 5.156 – Estrutura de código para exibição da imagem de consulta e as 5 imagens mais próximas a ela.

Os testes foram realizados nas imagens da fração fina dos solos, devido a sua maior heterogeneidade em termos de distribuição de cores visto que na fração grossa houve a predominância de grãos quartzosos. As Figuras 5.157 a 5.159 apresentam as imagens mais similares às imagens das amostras 04IG-LG', 08RE-LA' e 12SU-LG', respectivamente (uma amostra de cada cluster obtido no agrupamento hierárquico, com exceção do cluster composto pela amostra 03IT-NA por ser um grupo com um elemento único), e os números apresentados ao lado de cada imagem ranqueada referem-se à distância em relação à imagem de referência.

Os solos com distribuição de cor mais similares ao solo 04IG-LG' são os solos 07SL-NA', 13IP-LA', 11CB-LA', 10MU-LA' e 03IT-NA', e nota-se que, com exceção da amostra 07SL-NA', os solos indicados fazem parte do mesmo grande grupo do agrupamento hierárquico (B) e além disso o solo 13IP-LA' coincide com o solo mais próximo de 04IG-LG' no cluster C3/B-2-a.

Out[41]: (-0.5, 1387.5, 1039.5, -0.5)

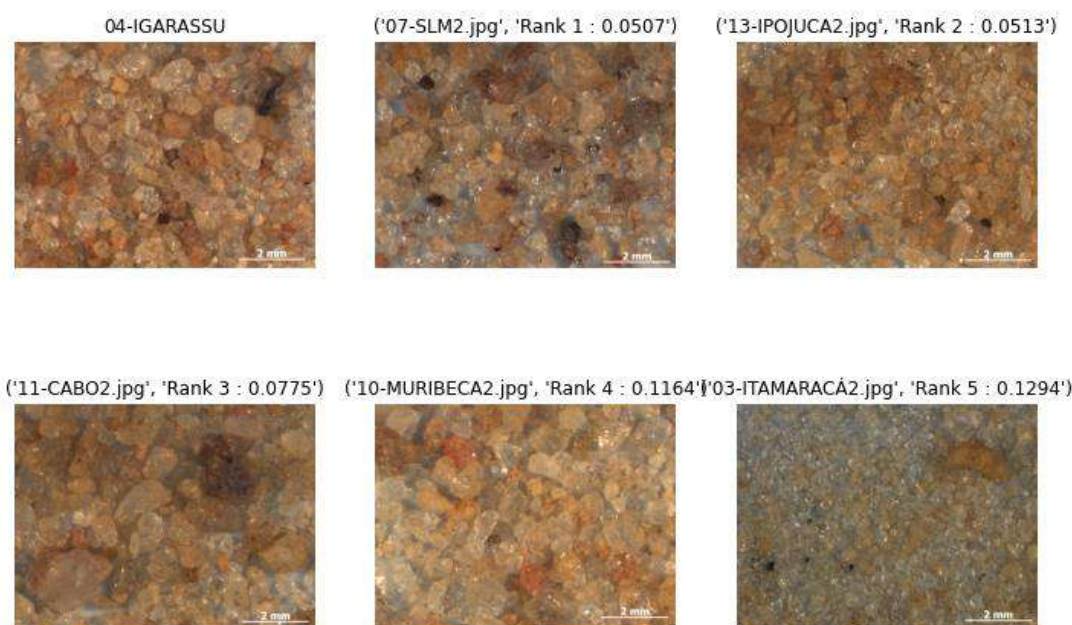


Figura 5.157 – Imagens similares à imagem da amostra 04IG-LG', fração fina.

Os solos com distribuição de cores mais similares ao solo 08RE-LA' são os solos 01GO-LG', 06CA-LA', 02AR-LG', 09MG-LA' e 12SU-LG', e nota-se que com exceção da amostra 06CA-LA', os dois solos mais próximos são os solos 01GO-LG' e 02AR-LG' que fazem parte do mesmo grande grupo do agrupamento hierárquico (A/Cluster C1).

Out[35]: (-0.5, 1387.5, 1039.5, -0.5)

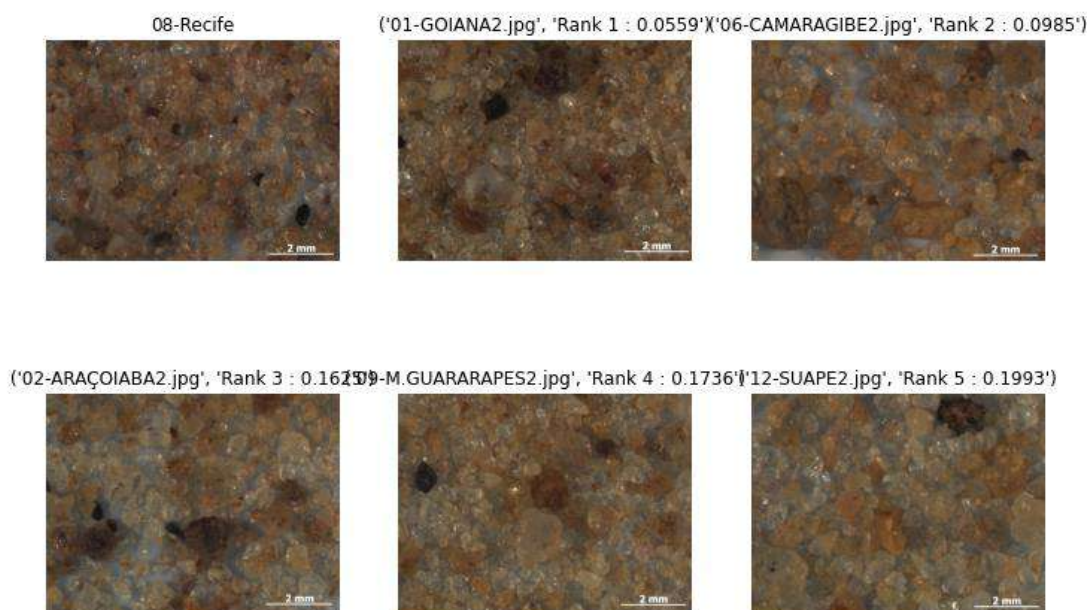


Figura 5.158 – Imagens similares à imagem da amostra 08RE-LA', fração fina.

Os solos com distribuição de cores mais similares ao solo 12SU-LG' são os solos 09MG-LA', 02AR-LG', 05PA-LA', 06CA-LA' e 01GO-LG'. Nota-se que o solo mais próximo (09MG-LA') coincide com o resultado da análise de cluster, e, com exceção dos solos 01GO-LG' e 02AR-LG', os demais solos indicados como próximos fazem parte do mesmo grande grupo e subgrupo (B e B-2).

Out[48]: (-0.5, 1387.5, 1039.5, -0.5)

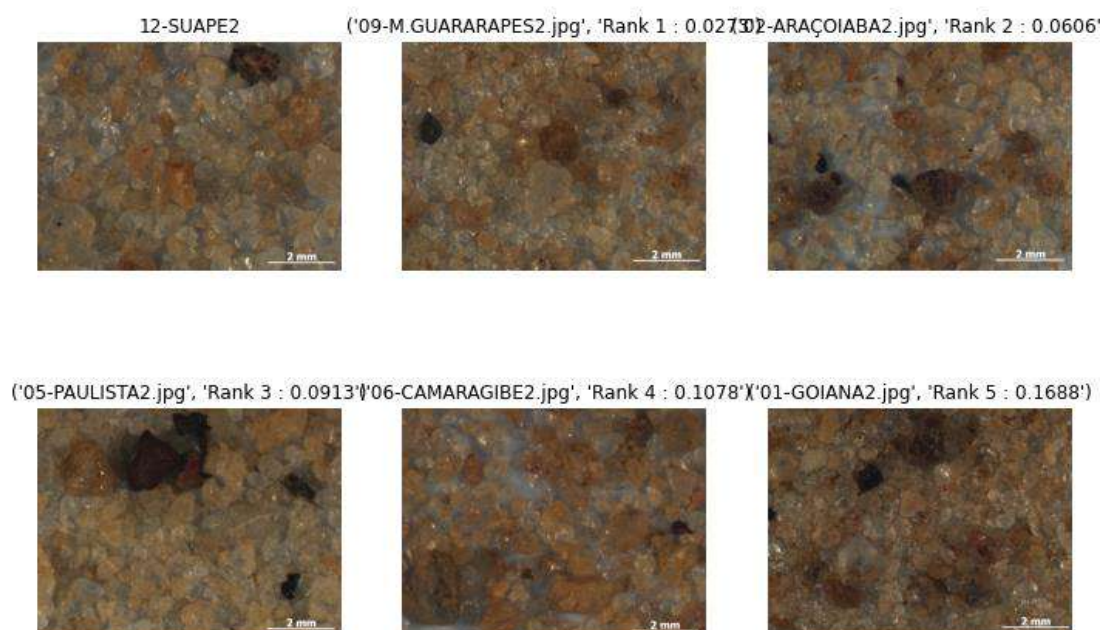


Figura 5.159 – Imagens similares à imagem da amostra 12SU-LG', fração fina.

Diante dos resultados obtidos, pode-se considerar promissor a comparação de solos através de imagens aplicando as técnicas da Ciência de Dados, uma vez que se obteve resultados muito próximos ao agrupamento obtido com a análise de cluster. Os resultados usando essas duas técnicas, mesmo não tendo sido utilizados os mesmos parâmetros, mostraram correspondência entre as características mineralógicas visualizadas nas imagens (óxidos de ferro, fragmentos de rocha, grãos de quartzo, etc.) com os resultados dos ensaios geotécnicos. As poucas variações encontradas podem ser atribuídas às próprias variações dos métodos, uma vez que cada técnica utilizada pode fornecer resultados diferentes (medidas de distância, métodos de ligação, descritor de imagem, etc.).

Como mencionado no Capítulo 4 (Materiais e Métodos), para a aquisição das imagens foi utilizado um Stereo Microscópio Zeiss Discovery V8 disponível no laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da UFPE, e, apesar de não ser trivial dispor deste tipo de equipamento, acredita-se que o acesso a esse tipo de equipamento nas universidades espalhadas pelo país não seja muito difícil, uma vez que se trata de um equipamento essencial nos laboratórios de geologia, biologia e medicina. Ressalta-se que para usar as ferramentas de Ciência de Dados apresentadas aqui, não é necessário que as imagens sejam obtidas por este tipo de microscópio em específico, o importante é que as imagens sejam de boa qualidade e que sejam obtidas utilizando-se padrões mínimos (processo de obtenção das amostras, fração do material, aproximações, etc.) para que se obtenha resultados confiáveis.

5.5 Síntese do capítulo

Este capítulo focou na apresentação e análise dos resultados dos ensaios realizados nos solos da RMRecife e foi dividido em três tópicos principais. Algumas observações interessantes são sintetizadas a seguir.

A composição granulométrica dos solos estudados mostrou-se constituída predominantemente pelas frações argila (> 30%) e areia (> 30%), limites de consistência fora dos limites estabelecidos para uso em pavimentação (pelas especificações tradicionais, LL e IP máximos de 25% e 6%, respectivamente), e classes TRB (A-4 a A-7-6) com comportamento “sofrível a mau” como camada de subleito.

Considerando o CBR, os solos seriam sumariamente descartados para uso como camada de base (CBR > 60%) e somente o solo 03IT-NA' (CBR = 35%) seria indicado para

camada de sub-base (CBR > 20%). Assim, pelos critérios tradicionais todos solos da pesquisa seriam descartados para uso em camadas de pavimento rodoviário.

No entanto, identificou-se o comportamento laterítico (de acordo com a MCT) da maioria dos materiais estudados. A laterização dos solos foi confirmada pelos ensaios químicos e mineralógicos, em que foram identificados a predominância da caulinita (argilomineral não expansivo) e a presença de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio (Alumina, Hematita, Goetita, Gibbsita, etc.).

Além disso, o comportamento mecânico dos solos também se mostrou satisfatório com valores de MR_{médio} maiores que 400 MPa, comparável ao resultado de materiais granulares de amplo uso na pavimentação tradicional. A deformação permanente dos solos também se mostrou satisfatória com valores baixos de afundamento (máximo de 7 mm – na pior situação, Solo 04IIG-LG' - $\sigma_3 = 120kPa$ e $\sigma_d = 360kPa$) e tendência de acomodamento das deformações em boa parte dos corpos de prova ensaiados.

Uma análise complementar, considerando os critérios de escolha sugeridos na tese de LIMA (2020), mostrou situações favoráveis (em termos de DP) para a maioria dos solos, para diferentes níveis de tráfego e de tensões atuantes.

Também foram apresentadas modelagens do comportamento resiliente (considerando diversos modelos) e da deformação permanente segundo o modelo de Guimarães (2009) obtidos por meio de regressão não linear.

6 DIMENSIONAMENTO PAVIMENTO – MÉTODO MEDINA

6.1 Apresentação do capítulo

Adicionalmente às análises dos ensaios de laboratório nas amostras da região metropolitana de Recife, realizou-se uma análise usando o software MeDiNa para ilustrar a aplicabilidade dos solos lateríticos de granulação fina como materiais de base, sub-base e subleito em estruturas de pavimento flexível, para diferentes níveis de tráfego. Neste contexto, este capítulo apresenta o resumo dos resultados de cada estrutura simulada seguida de uma discussão a respeito das concepções usadas como exemplo. Uma análise adicional com foco nas tensões atuantes vs. MR dos solos LA' foi inserida no tópico 6.4.

No Apêndice VII apresenta-se um exemplo do relatório que é gerado pelo MeDiNa no qual o projetista pode verificar os detalhes sobre as premissas do projeto, estrutura do pavimento, características dos materiais empregados, definições do tráfego, evolução dos danos no pavimento, análise do afundamento de trilha de roda e as deflexões a serem atingidas em cada camada.

6.2 Considerações sobre dimensionamento das estruturas de pavimentos com o MeDiNa

As simulações realizadas, que não foram pensadas para um local específico, compreenderam diferentes possibilidades de aplicação dos solos finos de Recife e sem o intuito de esgotar o tema, escolheu-se dois solos para este fim: um da classe MCT LG' (01GO-LG') e outro da classe LA' (09MG-LA').

Foram simuladas diferentes estruturas do pavimento variando os níveis de tráfego (Leve – $N = 5 \times 10^5$, Médio – $N = 2 \times 10^6$, Meio-Pesado – $N = 1 \times 10^7$ e, Pesado – $N = 5 \times 10^7$), os tipos de revestimento (Tratamento superficial Duplo – TSD para o nível de tráfego leve e, concreto asfáltico nos demais níveis de tráfego).

As características do material granular, do solo-cimento, do tratamento superficial duplo e do concreto asfáltico adotadas foram as constantes na própria base de dados do MeDiNa. Além de testar concretos asfálticos com diferentes classes de misturas asfálticas (maiores informações podem ser consultadas no Manual de utilização do MeDiNa (2020) e na IS-247 do DNIT (2021)), também escolheu-se simular uma estrutura com mistura asfáltica constituída de CAP 50/70 por ser o tipo de ligante mais utilizado na região de Recife, conforme pode ser visto na tese de de Moreira (2021).

Como subleito, na maioria dos casos adotou-se os solos desta pesquisa, que já constituem os subleitos de diversas rodovias da região (o solo 01GO-LG', por exemplo, é o subleito da BR 101 na altura de Goiana/PE), mas em algumas situações adotou-se um solo NS' (do banco de dados do MeDiNa) para fins comparativos.

Quanto às espessuras, analisaram-se as estruturas das duas formas fornecidas pelo MeDiNa: uma solicitando a avaliação da estrutura proposta (com indicação de espessuras pré-fixadas) e a outra solicitando o dimensionamento da espessura de uma camada selecionada visando a obtenção da solução mais econômica.

Quanto às definições de tráfego, considerou-se o eixo padrão rodoviário de 8,2 toneladas (Eixo simples de roda dupla) e período de projeto de 10 anos. O tipo de via selecionado para as simulações foi o Sistema Arterial Primário que é um nível intermediário entre as vias expressas e as vias secundárias e coletoras, tem como limites 30% de Área Trincada (AT) e 13mm de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) ao final do período de projeto e adotou-se nível de confiabilidade de 85% no MeDiNa. Ressalta-se que somente foram apresentadas opções que se encaixassem dentro destes requisitos, visando estruturas tecnicamente viáveis para aplicação.

As equações do módulo resiliente foram referentes ao modelo composto do corpo de prova com umidade mais próxima da ótima já apresentadas no tópico 5.3.2. As equações de deformação permanente inseridas no MeDiNa para as simulações foram as apresentadas no tópico 5.3.3, correspondentes ao modelo de Guimarães (2009) conforme o próprio programa preconiza.

6.3 Apresentação e análise dos resultados das simulações

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam resumos dos resultados das simulações obtidas para os solos 01GO-LG' e 09MG-LA', respectivamente. Para solo 01GO-LG', com o tráfego de 1×10^5 e revestimento em TSD, testou-se uma estrutura com base de brita graduada simples (BGS) de 15 cm e uma sub-base do solo fino de 30cm, e outra substituindo a camada de base pelo solo em 30 cm e excluindo a camada de sub-base, para evidenciar a potencialidade do solo neste caso, visto que os resultados de ATR são semelhantes e que a segunda seção é muito mais econômica em termos de custos construtivos. Ressalta-se que os pavimentos com revestimento de TSD tem como critério de dimensionamento somente o ATR.

Uma terceira seção foi testada aumentando-se o tráfego para 5×10^5 e utilizando um subleito de solo NS' (que tem qualidade inferior aos desta pesquisa em termos de MR, mas por

estar no subleito contribuiu menos para a deformação permanente). Assim, mostrou-se que com as mesmas espessuras adotadas na seção 2 de pavimento, mas sobre outro tipo de subleito, ainda assim o ATR permaneceu bem abaixo do limite estabelecido para a categoria da via nos dois casos.

Aumentou-se o nível do tráfego para 10^6 , e para este não é mais possível utilizar TSD, alterando-se o revestimento para uma camada de concreto asfáltico, que foi testado em duas condições: considerando a Classe 1 de mistura asfáltica, 15 cm de base com BGS, 30 cm de sub-base com o solo 01GO-LG' e o subleito sendo composto pelo mesmo solo na seção 4 e pelo solo NS' na seção 5. As duas seções tiveram desempenho semelhante tanto na fadiga quanto no ATR esperados no período de projeto.

Na seção 6, o tráfego foi elevado para 5×10^6 e a estrutura foi alterada para um revestimento asfáltico usinado com CAP 50/70, base de BGS (20 cm), sub-base de solo fino (30 cm) e subleito de solo NS', e neste caso, notou-se o aumento substancial na porcentagem de área trincada, mesmo aumentando a espessura da base e do revestimento.

Nas seções 7 a 10 testou-se, para um tráfego de 1×10^7 , a estrutura de base de BGS, sub-base e subleito do solo 01GO-LG', variando-se as classes das misturas asfálticas. No MediNa estão definidas quatro classes de misturas asfálticas quanto à fadiga, sendo a classe 1 a menos resistente e a classe 4 a mais resistente à fadiga. Mostrou-se que a simples alteração da classe de fadiga da mistura provoca uma modificação considerável da espessura do revestimento. Utilizando um concreto asfáltico de classe 4, por exemplo, tem-se uma redução de praticamente 50% da espessura necessária para atendimento aos requisitos estabelecidos para o tipo de via selecionado, e esse ganho se reflete em termos econômicos, mesmo considerando que para esta classe de fadiga em geral é necessário se utilizar um asfalto modificado por polímero, mas a diminuição da espessura compensa de alguma forma.

Para o solo 01GO-LG', a última seção apresentada mostra uma possibilidade de uso do solo para um tráfego considerado muito pesado (5×10^7) que seria composta por uma base de solo-cimento de 15 cm.

No caso do solo 09MG-LA', para os tráfegos de 10^5 e 5×10^5 não foi necessário a adição da camada de sub-base, mas apenas uma camada de base com a espessura mínima composta por este solo fino da pesquisa (15cm). Testou-se 4 seções com TSD alternando o tipo de material do subleito entre o solo desta pesquisa e o solo NS' do banco de dados do MeDiNa, e notou-se que os ATR foram muito baixos e equivalentes nos dois tipos de subleito.

Aqui é necessário fazer a observação de que se considerou para os subleitos com os dois solos desta pesquisa (01GO-LG' e 09MG-LA') os resultados dos ensaios de MR e de

deformação permanente correspondentes à energia intermediária o que não é comum, mas não se tinha resultados para a energia normal. No entanto, há hoje uma tendência a se utilizar no subleito também a energia intermediária tendo em vista que é importante garantir melhor desempenho do subleito, camada que tem importante papel para o sucesso do pavimento e considerando também que os caminhões hoje são muito mais pesados e utilizam pressão de inflação dos pneus mais elevadas.

Para o tráfego de 1×10^6 apresenta-se duas estruturas variando-se o material do subleito, em ambos os casos a % de área trincada e ATR foram semelhantes. Elevando o tráfego para 5×10^6 e utilizando a mistura asfáltica com CAP 50/70, foi necessário o aumento da espessura da camada de sub-base para 30cm e o dimensionamento da camada asfáltica para o subleito composto pelo solo desta pesquisa resultou em uma menor espessura do revestimento, quando comparado ao subleito com o solo NS'.

Assim como foi feito no conjunto de simulações anterior, para o tráfego de 10^7 , as simulações 9 a 12 envolveram estruturas semelhantes (base de BGS – 15cm, sub-base – 30 cm e subleito do solo 09MG-LA'), variando-se apenas a classe da mistura asfáltica. Assim como observado anteriormente, quanto maior a classe da mistura menor a espessura necessária para o revestimento. Na simulação 13, foi considerado uma mistura asfáltica de classe 4 no revestimento e alterou-se o subleito para o solo NS', que resultou em uma espessura de revestimento maior do que a necessária com o subleito do solo 09MG-LA' desta pesquisa.

A última simulação apresenta o resultado do dimensionamento para o tráfego 5×10^7 em que se obtiveram resultados satisfatórios ao utilizar uma camada de solo-cimento, e uma camada de sub-base de pequena espessura.

Diante dos resultados das simulações apresentadas aqui, considera-se perfeitamente possível o emprego dos solos estudados em diversas estruturas de pavimentos e em diferentes níveis de tráfego (do leve ao muito pesado). Muitas das estruturas propostas apresentaram camadas com espessuras consideradas esbeltas (15cm) e/ou sem a camada de sub-base em contraste com as técnicas tradicionais, indicando que com a adoção de uma metodologia mais moderna para análise de pavimentos (baseada nos princípios da mecânica dos pavimentos) é possível obter soluções mais econômicas e duradouras. Muitas outras possibilidades podem ser testadas, mas já ficou demonstrada a viabilidade do uso dos solos locais mesmo finos que, pelos padrões tradicionais não poderiam ser usados em base ou sub-base eventualmente.

Tabela 6.1 – Resumo dos resultados das simulações feitas com o Solo 01GO-LG’.

Seção		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N		10 ⁵	10 ⁵	5x10 ⁵	10 ⁶	10 ⁶	5x10 ⁶	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	5x10 ⁷
Revestimento	Tipo	TSD	TSD	TSD	Classe 1	Classe 1	CAP 50/70	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 4	Classe 1
	Espessura (cm)	2	2	2	5	5	8,8	14,5	12	10	7,5	8,0	5
	MR (MPa)	1.000	1.000	1.000	5.764	5.764	9.588	5.764	6.743	8.000	10.492	10.492	5.764
Base	Espessura (cm)	15	30	30	15	15	20	20	20	20	20	20	15
	Tipo	BGS C5	01GO-LG’	01GO-LG’	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	Solo cimento M5
Sub-base	Espessura (cm)	30	-	-	30	30	20	30	30	30	30	30	30
	Tipo	01GO-LG’	-	-	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’
Subleito	Tipo	01GO-LG’	01GO-LG’	NS’	01GO-LG’	NS’	NS’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	01GO-LG’	NS’	01GO-LG’
Área trincada (%)		-	-	-	6,3	6,6	28,4	28,5	29,2	29,0	28,1	29,2	17,3
ATR (mm)		10,5	10,3	7,9	11,4	8,8	5,4	5,9	6,9	7,6	9,1	6,6	4,9

Tabela 6.2 – Resumo dos resultados das simulações feitas com o Solo 09MG-LA’.

Seção		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N		10 ⁵	10 ⁵	5x10 ⁵	5x10 ⁵	10 ⁶	10 ⁶	5x10 ⁶	5x10 ⁶	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	5x10 ⁷
Revestimento	Tipo	TSD	TSD	TSD	TSD	Classe 1	Classe 1	CAP 50/70	CAP 50/70	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 4	Classe 1
	Espessura (cm)	2	2	2	2	5	5	8,5	7,7	14,4	12,2	10,4	7,5	8,5	5
	MR (MPa)	1000	1000	1000	1000	5764	5764	9588	9588	5764	6743	8000	10492	10492	5764
Base	Espessura (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tipo	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	BGS C5	Solo cimento M5
Sub-base	Espessura (cm)	-	-	-	-	15	15	30	30	30	30	30	30	30	15
	Tipo	-	-	-	-	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’
Subleito	Tipo	09MG-LA’	NS’	09MG-LA’	NS’	09MG-LA’	NS’	NS’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	09MG-LA’	NS’	09MG-LA’
Área trincada (%)		-	-	-	-	6,3	6,9	29,2	29,1	29,0	28,4	28,7	28,6	28,3	17,7
ATR (mm)		1,4	3,0	1,5	3,3	3,2	4,5	3,4	3,1	2,5	2,7	2,8	3,3	3,5	1,0

6.4 Análise Adicional – Tensões atuantes vs. MR nos solos LA'

A análise extra para verificação do comportamento tensão atuante versus MR nos solos LA' foi realizada através da simulação de uma estrutura típica (Figura 6.1) composta por um revestimento em concreto asfáltico (MR = 10492 MPa), 20 cm de base de material granular (MR = 381 MPa), 20 cm de sub-base e subleito compostos pelos solos desta pesquisa.

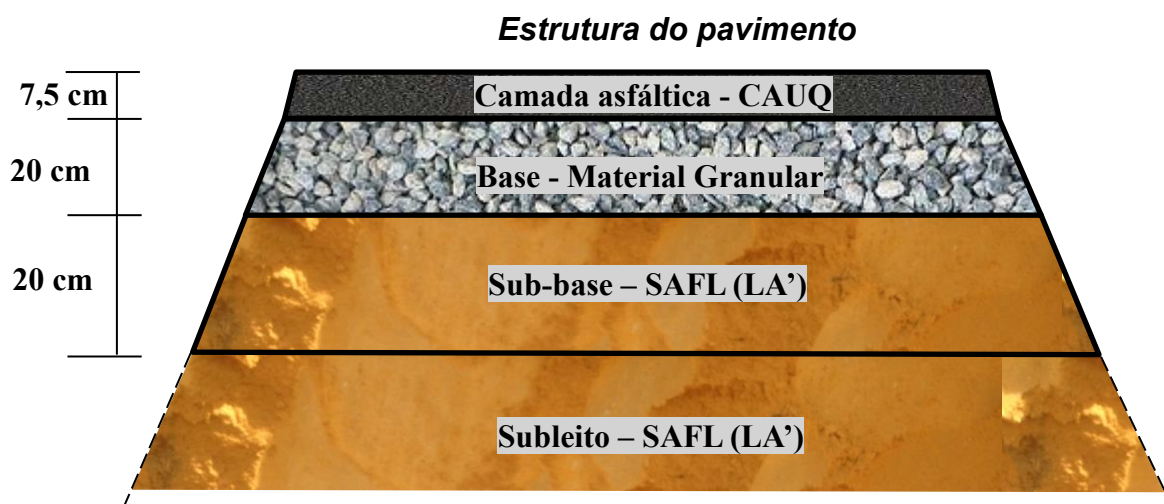


Figura 6.1 – Estrutura do pavimento simulada com os solos LA' – análise adicional.

As simulações no MeDiNa foram feitas para um tráfego de $1,0 \times 10^7$ e os mesmos critérios das simulações anteriores: eixo padrão rodoviário, período de projeto de 10 anos e Sistema Arterial Primário.

Para esta estrutura todos os sete solos LA' testados atenderam os limites estabelecidos para ATR e % de Área trincada. A máxima percentagem de área trincada foi de 29,7% para o solo 08RE-LA' e a menor foi de 25,4% para o solo 13IP-LA'. Em Termos de ATR, o máximo valor predito foi de 7,7 mm para o solo 06CA-LA' e o mínimo de 2,7 mm para o solo 08RE-LA', demonstrando mais uma vez a viabilidade do uso desses materiais na pavimentação.

A distribuição das tensões na estrutura simulada foi verificada utilizando-se a ferramenta AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) - parte integrante do método

MeDiNa. O estado de tensões e o respectivo MR foi checado no meio da camada de sub-base (profundidade de 37,5 cm) e a 25 cm abaixo do topo do subleito. A Figura 6.2 apresenta os resultados de MR nas respectivas camadas analisadas. Para fins comparativos incluiu-se os valores do $MR_{\text{médio}}$ de cada solo.

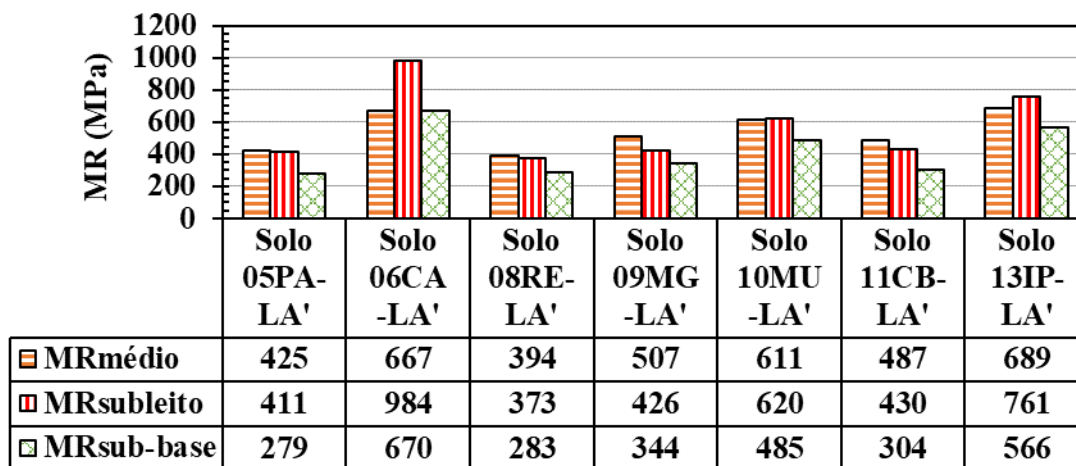


Figura 6.2 – Valores de MR obtidos nas estruturas do pavimento simuladas com os solos LA' – análise adicional.

Observou-se que, com exceção do solo 06CA-LA' (984 MPa), os valores de $MR_{\text{médio}}$ (394 - 689 MPa) foram semelhantes aos obtidos para a camada de subleito (373 - 761 MPa) e ambos foram maiores do que os obtidos na sub-base (279 - 670 MPa).

Durante as simulações, notou-se que há uma pequena diferença entre os solos em termos das tensões atuantes (considerando a mesma profundidade). Em relação à tensão confinante, os valores foram muito similares em ambas as camadas: sub-base (0,0156 – 0,0172 MPa) e subleito (0,0171 - 0,0176 MPa). Porém, em relação à tensão desvio, os valores variaram entre 0,0850 - 0,1014 MPa (sub-base) e 0,0478 - 0,0557 MPa (subleito).

As diferenças mencionadas são justificadas pelas diferenças nas propriedades constitutivas de cada solo. No entanto, os valores das tensões versus MR dos sete solos LA' foram plotados (Figura 6.3 (a)-(d)), por camada (subleito e sub-base) e por tipo de tensão (confinante e desvio) e foi observado que os resultados seguem uma tendência: solos com tensões atuantes maiores (tanto σ_3 quanto σ_d) apresentaram valores de MR maiores.

Assim, equações polinomiais e de regressão linear representativas do comportamento observado nos solos LA' foram propostas para as camadas de subleito e subbase de um pavimento rodoviário típico (Equações 6 a 13). O bom ajuste dos dados às equações é confirmado pelos altos valores de R^2 obtidos (0,9145 – 0,9932).

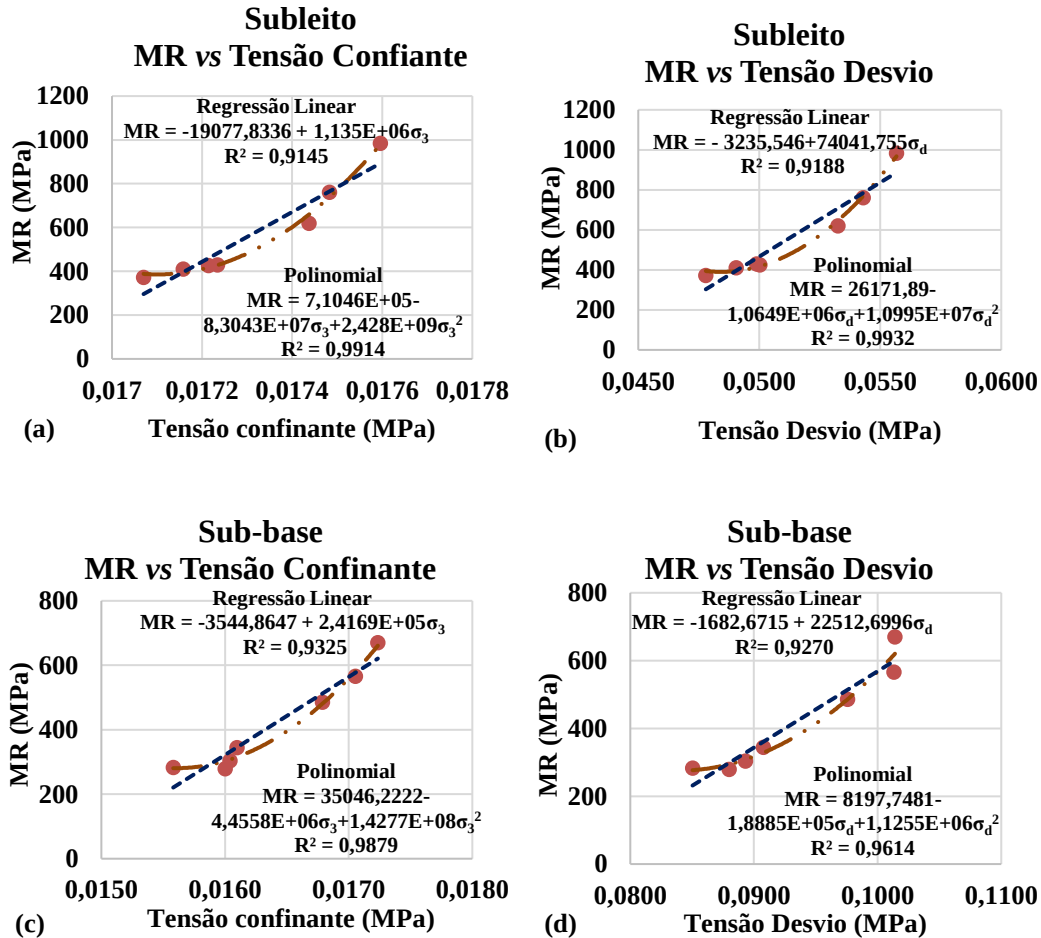


Figura 6.3 – MR vs Tensão confinante e Tensão Desvio para as camadas de (a)-(b) subleito e (c)-(d) sub-base.

- **Equações lineares:**

Subbase:

$$f(\sigma_3) \rightarrow MR = -3544,8647 + (2,4169 \times 10^5)\sigma_3 \quad R^2 = 0,9325 \quad (6)$$

$$f(\sigma_d) \rightarrow MR = -1682,6715 + 22512,6996\sigma_d \quad R^2 = 0,9270 \quad (7)$$

Subleito:

$$f(\sigma_3) \rightarrow MR = -19077,8336 + (1,135 \times 10^6)\sigma_3 \quad R^2 = 0,9145 \quad (8)$$

$$f(\sigma_d) \rightarrow MR = -3235,546 + 74041,755\sigma_d \quad R^2 = 0,9188 \quad (9)$$

- **Equações polinomiais:**

Subbase:

$$f(\sigma_3) \rightarrow MR = 35046,2222 - (4,4558 \times 10^6)\sigma_3 + (1,4277 \times 10^8)\sigma_3^2 \quad R^2=0,9879 \quad (10)$$

$$f(\sigma_d) \rightarrow MR = 8197,7481 - 1,8885E + 05\sigma_d + 1,1255E + 06\sigma_d^2 \quad R^2=0,9614 \quad (11)$$

Subleito:

$$f(\sigma_3) \rightarrow MR = 7,1046 \times 10^5 - (8,3043 \times 10^7)\sigma_3 + (2,428 \times 10^9)\sigma_3^2 \quad R^2 = 0,9914 \quad (12)$$

$$f(\sigma_d) \rightarrow MR = 26171,89 - (1,0649 \times 10^6)\sigma_d + (1,0995 \times 10^7)\sigma_d^2 \quad R^2 = 0,9932 \quad (13)$$

6.5 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou, de forma sintetizada, o resultado de 26 simulações de dimensionamento de diferentes estruturas de pavimento flexível, em níveis de tráfego variando do leve (10^5) ao pesado (10^7) e diversos tipos de materiais no revestimento (TSD, Concreto asfáltico: Classes 1 a 4, e com CAP 50/70), na base (BGS, solo fino de Recife e solo-cimento), sub-base (solo fino de Recife) e subleito (solo fino de Recife e solo NS’).

Para exemplificar, foram escolhidos dois solos da região de Recife (01GO-LG’ e 09MG-LA’) e testadas diversas outras possibilidades, no entanto, visando a objetividade selecionou-se algumas delas, todas atendendo integralmente aos requisitos estabelecidos para o tipo de via selecionado (Sistema Arterial Primário).

Os resultados mostraram que é claramente possível a aplicação de solos de granulação fina, como os da região de Recife, em diferentes estruturas de pavimentos, mostrando a necessidade de alargar o uso dos solos locais nas obras de infraestrutura, bem como notou-se a importante influência do uso de uma metodologia mais moderna de análise de pavimentos (pautada nos princípios mecanísticos) para a proposição de pavimentos mais econômicos e de melhor durabilidade.

Ao final, apresentou-se uma análise de tensões extraídas da rotina AEMC do MeDiNa – considerando uma estrutura típica de pavimento com nível de tráfego pesado e os solos da classe LA’ compondo as camadas de sub-base e subleito. Foi possível obter quatro pares de equações polinomiais e de regressão linear que refletiram a relação MR vs tensões atuantes (confinante e desvio) no meio da camada de sub-base e a 25 cm do topo do subleito.

7 BANCO DE DADOS DE SOLOS FINOS (BDSF)

7.1 Apresentação do capítulo

O presente capítulo apresenta a estrutura do Banco de Dados de Solos Finos (BDSF) montado nesta tese, indicando as referências de onde foram obtidos os valores que o compõem e os parâmetros geotécnicos considerados, e faz-se uma análise sintetizada dos solos através da aplicação de técnicas de estatística descritiva e de outras como: matriz de correlação, análise de Cluster e regressão linear múltipla, por meio do uso das ferramentas da Ciência de Dados (linguagem Python e suas bibliotecas, módulos e métodos).

7.2 Estrutura do Banco de Dados

O total de referências consultadas que atenderam aos critérios estabelecidos para compor o BDSF (constante no Capítulo 4, tópico 4.5) foi de 10 (dez), totalizando 67 amostras de solos, abrangendo nove estados sendo: 2 solos do Maranhão (MA), 12 de Mato Grosso (MT), 1 de Minas Gerais (MG), 13 de Pernambuco (PE), 4 do Rio de Janeiro (RJ), 8 do Rio Grande do Sul (RS), 1 de São Paulo (SP), 1 do Espírito Santo (ES) e 25 de diversos estados (a origem específica de cada amostra não foi identificada na referência), conforme indicado no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Lista das referências consultadas para obter os dados que compõem o Banco de Dados de Solos Finos (BDSF) desta tese.

Referência (Autor/Ano)	Instituição	Quantidade	Estado de origem dos solos
Sousa (2021) – esta pesquisa	UFPE	13	Pernambuco
Pascoal (2020)	UFSM ¹	1	Rio Grande do Sul
Santos (2020)	UFSM	3	Rio Grande do Sul
Lima (2020)	COPPE/UFRJ	25	Diversos Estados
Norback (2018)	COPPE/UFRJ	3	Rio de Janeiro
Dalla Roza (2018)	COPPE/UFRJ	12	Mato Grosso
Budny (2018)	COPPE/UFRJ	1	Rio Grande do Sul
Zago (2016)	UFSM	3	Rio Grande do Sul
Osten (2012)	IME ²	2	Maranhão
Guimarães (2009)	COPPE/UFRJ	4	São Paulo, Espírito Santo, Minas Gerais e Rio de Janeiro

¹ UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, ² IME – Instituto Militar de Engenharia.

O BDSF foi elaborado em planilha do software Excel e composto pelo máximo de informações possíveis de serem coletadas nas referências indicadas, sendo considerado os itens elencados no Quadro 7.2, que abrangem dados de identificação do material, classificações geotécnicas, características físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas. O Apêndice V apresenta o BDSF completo, composto por um total de 85 atributos geotécnicos.

Quadro 7.2 – Lista de informações que compoem o Banco de Dados de Solos Finos desta tese.

Tipo de Informação	Informação	ID	Tipo de Informação	Informação	ID	
Identificação	Referência	Ref	Características Mecânicas	Massa Espe. Seca Máxima	$\rho_{dm\acute{a}x}$	
	Instituição	Inst		Umidade ótima	$W_{\acute{o}t}$	
	Ano de publicação	Ano		Energia de compactação	E_c	
	Identificação na referência	Id Ref		Capacidade de suporte	CBR/MiniC BR	
	Identificação da Amostra no Banco	Id BDSF		Expansão	Exp.	
	Estado de origem	UF de Origem		Módulo Resiliente Médio	MR $m\acute{e}d$	
Classificações geotécnicas	Classificação TRB	TRB		Parâmetros de regressão dos modelos de MR em função das tensões confinante (TC), desvio (TD) e composto (MC)	K1	
	Classificação SUCS	SUCS			K2	
	Classificações para solos tropicais	MCT			K3	
		MCT-M			R ²	
	Coeficientes da Classificação MCT	c'			Deformação permanente máxima (Par de tensão 120 kPa/360 kPa, em mm)	ϵ_p
		d'				Ψ_1
		e'				Ψ_2
		PMI				Ψ_3
						Ψ_4
Características físicas	Composição Granulométrica (% de argila, silte, areia e, pedregulho)	Pargila	Classificação do <i>shakedown</i> , Cs (tipos A, B, C e AB) por CP	Cs – CP “x”		
		Psilte				
		Pareia				
		Pped				
	Limites de Atterberg	LL	Dados das Curvas Características - sucção matricial	Sucção na umidade ótima	$\Psi_{W\acute{o}t}$	
		LP		Saturação residual	Sres	
		IP		Saturação no ponto de entrada de ar	Sb	

	Densidade Real	δ		Sucção no ponto de entrada de ar - Macroporos	Ψ_{b_1}
Características químicas	PH em água	pH		Sucção no ponto de entrada de ar - Microporos	Ψ_{b_2}
	Diferença pH (KCl-H ₂ O)	Δ pH		Sucção residual	Ψ_{res}
	Capacidade de Troca Catiônica	CTC		Parâmetro do Modelo	a
	Teor de matéria orgânica	M.O.		Formato da curva	Fc
	Saturação por alumínio	S (%)		Modelo de ajuste	Mod
	Saturação por bases	V (%)	Características mineralógicas por DRX (1 – presença; 0 – não detectado)	Presença de Caulinita	K
	Perda ao fogo	Δ P (%)		Indicação da presença de Ilita	I
	Teor de Silica	SiO ₂ (%)		Indicação da presença de Montmorilonita	M
	Teor de Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃ (%)		Indicação da presença de óxidos/hidróxidos de ferro	Fe
	Teor de Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃ (%)		Indicação da presença de óxidos/hidróxidos alumínio	Al
	Índices de Intemperismo	Ki		Indicação da presença de Gibsita	Gib
		Kr			

*ID – “Identificação” a ser utilizada em cada coluna do BDSF.

7.3 Análise dos resultados

7.3.1 Informações iniciais sobre a manipulação e tratamento dos dados do BDSF

Na manipulação dos dados utilizando as ferramentas de Ciência de Dados (*Data Science*) costuma-se despende boa parte do tempo tratando os dados, ou seja, deixando-os prontos para as análises. Como um ponto de tratamento bastante sensível é a questão dos dados faltantes, para análise do BDSF considerou-se apenas os parâmetros mais recorrentes como os coeficientes da classificação MCT, as características físicas e características mecânicas de MR e DP (que possuem poucos dados faltantes), denominando o banco de dados como BDSF Reduzido.

No entanto, ainda assim, em alguns parâmetros haviam informações faltantes de algumas amostras e para solucionar o problema adotou-se uma das técnicas mais básicas que

é o preenchimento dos dados faltantes com os valores médios, tornando possível o aproveitamento da amostra (e não sua exclusão como poderia ter sido feito, porém reduziria ainda mais a quantidade de amostras para as análises).

Ao refinar o tratamento, a imputação dos valores médios variou de acordo com a classe MCT de cada amostra com dados faltantes. Por exemplo: os dados faltantes do parâmetro c' foram preenchidos pelos valores médios das demais amostras referentes à respectiva classe MCT do solo com o dado faltante, ou seja, como exemplo, para amostra 44 do BDSF, por exemplo, cuja classe MCT é NA', o valor de c' faltante foi preenchido com o valor médio de c' considerando os demais solos da classe NA' (do próprio BDSF). Fez mais sentido adotar esta medida porque não seria viável a inserção de um valor médio geral de c' uma vez que se sabe que este parâmetro varia conforme o comportamento geotécnico e é refletido na sua classificação MCT como visto nas análises anteriores.

Assim, essa mesma ideia foi imputada para os demais parâmetros com dados faltantes. Ao todo foram preenchidas as seguintes quantidades de informações por parâmetro: $c' - 4$, $d' - 8$, $e' - 4$, $PMI - 14$, $\rho_{dm\acute{a}x} - 2$, $MR_{m\acute{e}dio} - 16$, $K1MC - 3$, $K2MC - 3$ e $K3MC - 3$, que são relativamente poucos considerando que o BD tem 67 solos agrupados.

A densidade real dos grãos foi um atributo que apresentou uma grande quantidade de dados faltantes (35 de 67 solos do BDSF, mais de 50%), assim como os dados dos limites de Atterberg (LL, LP e IP), dessa forma, ao invés de considerar um valor médio geral para esses atributos, optou-se por excluí-los das análises. Assim, o banco de dados utilizado nesta análise passou a considerar 19 (dezenove) parâmetros geotécnicos.

7.3.2 Distribuição e correlação dos dados do BDSF

Assim como foi feito na análise dos solos da região metropolitana de Recife, seguiu-se os passos iniciais de uso das ferramentas de Ciência de Dados utilizando a linguagem de programação Python, ou seja, importou-se as principais bibliotecas necessárias, carregou-se o arquivo BDSF (Reduzido e Tratado com o preenchimento dos dados faltantes) e prosseguiu-se com a manipulação deste novo banco de dados.

Neste capítulo não será discutido os detalhes dos códigos (exceto em casos estritamente necessários), sendo o enfoque nos resultados e discussões das saídas obtidas. A

seguir, inicia-se apresentando os gráficos de setores (pizza) e de barras da variável MCT (Figura 7.1), em que é possível verificar a distribuição dos solos em termos de proporção e quantitativo das Classes MCT no BDSF.

Observou-se que há a predominância da classe de solos argilosos lateríticos (LG'), representando mais de 37% (25 solos) do universo total de amostras (67). Também em quantidade expressiva tem-se os solos classificados como argilosos, porém não lateríticos (NG', 14 solos – 20,9%). Os solos das classes LA', NA' e NS' estão em quantitativo mais equilibrado entre eles – 7, 8 e 9 solos, respectivamente. Tem-se apenas 3 solos da classe NA e 1 da classe LA.

```
In [33]: # Gráfico de Setores (Pizza) e de Barras

ax1 = plt.subplot(121)
tab.plot(kind='pie', ax=ax1, y='count', figsize=(10, 8), legend = False, autopct='%1.1f%%', fontsize=12,
        title = 'Gráfico de Pizza \n Proporção de solos por Classe MCT')
ax1.set_xlabel("Classes MCT", fontsize=12)
ax1.set_ylabel("Proporção de solos", fontsize=12)

ax2 = plt.subplot(122)
tab.plot.bar(ax=ax2, y='count', figsize=(10, 4), fontsize=12, legend = False,
        title = 'Gráfico de Barras \n Quantidade de solos por Classe MCT')
ax2.set_xlabel("MCT", fontsize=12)
ax2.set_ylabel("Quantidade de solos", fontsize=12)
plt.show()
```

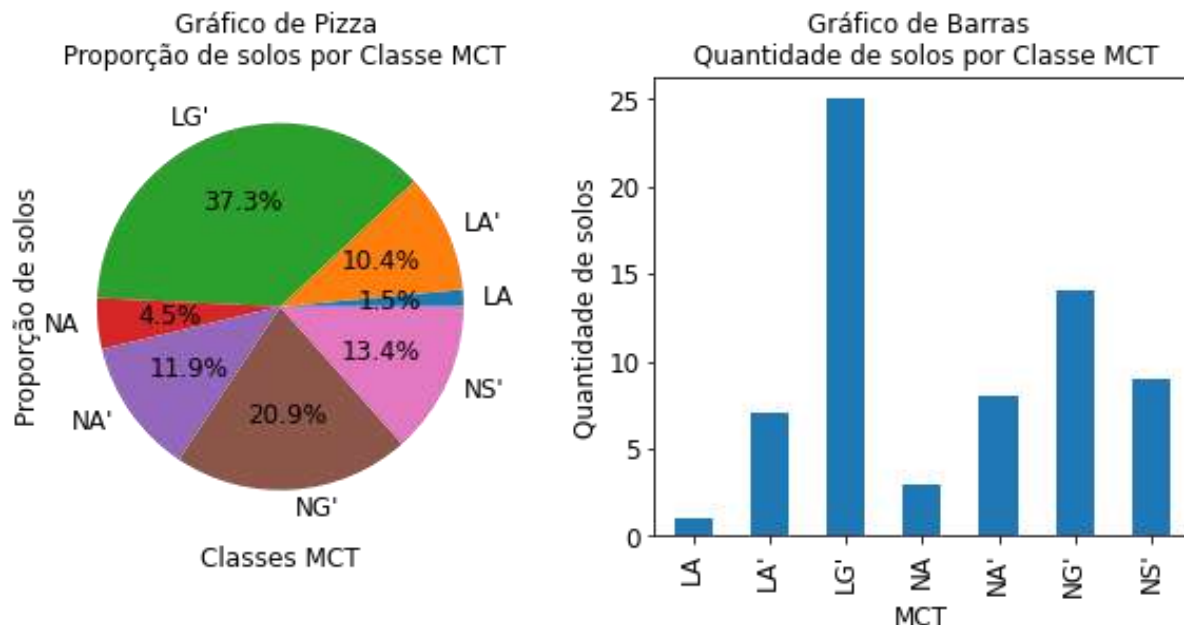


Figura 7.1 – Proporção de Classes MCT no BDSF por meio de gráficos de setores e de barras.

Para avaliar a distribuição dos dados conforme a classificação MCT, gerou-se *Boxplots* de algumas variáveis conforme é apresentado nas Figuras 7.3, 7.5 a 7.9 que seguem. A Figura 7.2 mostra a estrutura de código utilizada para umidade ótima das amostras por classe MCT, e seguiu-se este mesmo padrão para os demais *Boxplots*, alterando as variáveis de interesse.

```
In [47]: # Estabelecendo o tamanho do gráfico
plt.figure(figsize=(8,5))

# Título
plt.title("Wo por classe MCT")

# BoxPlot da Umidade ótima por classe MCT
sns.boxplot(x=dados['MCT'], y=dados['Wo'])

# Label para eixo vertical
plt.ylabel("Wo")
```

Figura 7.2 – Estrutura de códigos para geração dos boxplots.

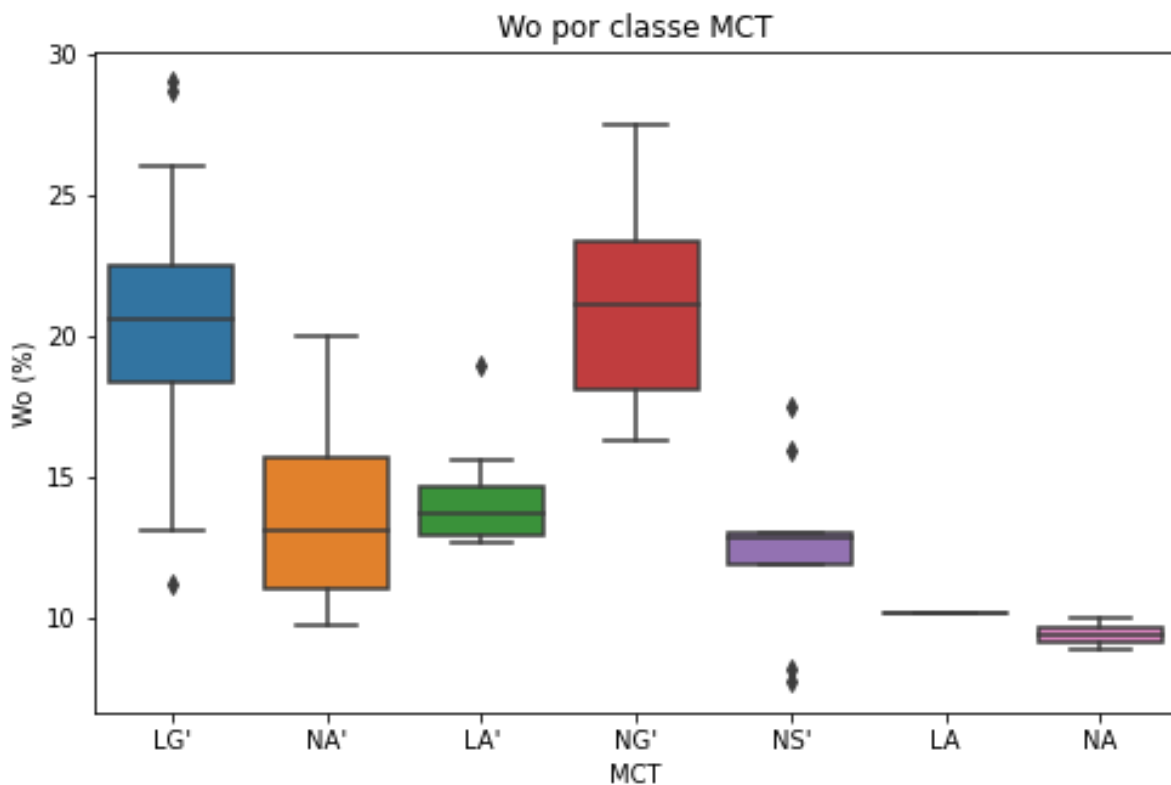


Figura 7.3 – *Boxplot* da W_o por Classe MCT para os solos do BDSF.

O Boxplot de W_o vs. Classe MCT mostrou a coerência dos dados do BDSF uma vez que solos de comportamento argiloso (LG' e NG') apresentaram os maiores valores de umidade ótima (valores médios em torno de 20 a 21%), já os solos de comportamentos arenosos e siltosos apresentaram valores intermediários (média entre 12 a 14%) e as areias valores mais baixos (aproximadamente 10%). Nota-se ainda que os grupos LG', NA' e NG' apresentaram alta variabilidade dos valores de umidade ótima. Os valores médios da umidade ótima por grupo MCT podem ser obtidos mais precisamente utilizando o método “*groupby*” do Python, conforme indicado na Figura 7.4.

```
In [77]: # Média da  $W_o$  por grupos MCT
dados.groupby('MCT')[' $W_o$ '].mean()

Out[77]: MCT
LA      10.200000
LA'     14.385714
LG'     20.984000
NA       9.433333
NA'     13.712500
NG'     21.012857
NS'     12.472222
Name:  $W_o$ , dtype: float64
```

Figura 7.4 – Média da W_o por Classe MCT para os solos do BDSF.

O Boxplot de $MR_{\text{médio}}$ vs. Classe MCT (Figura 7.5) mostrou que, em geral, os solos da classe LA' apresentaram valores maiores do que os das demais classes (394 – 689 MPa). A classe NA' apresentou cerca de 50% dos solos com valores de $MR_{\text{médio}}$ entre 200 e 400 MPa, no entanto, com alta variabilidade pois os valores limites se estenderam de 77 a 865 MPa. O grupo LG' resultou em um Boxplot com variabilidade pequena ($MR_{\text{médio}}$ entre 300 e 400MPa), porém com indicação de alguns pontos considerados pela métrica como outliers uma vez que alguns solos LG' apresentaram valores fora deste intervalo.

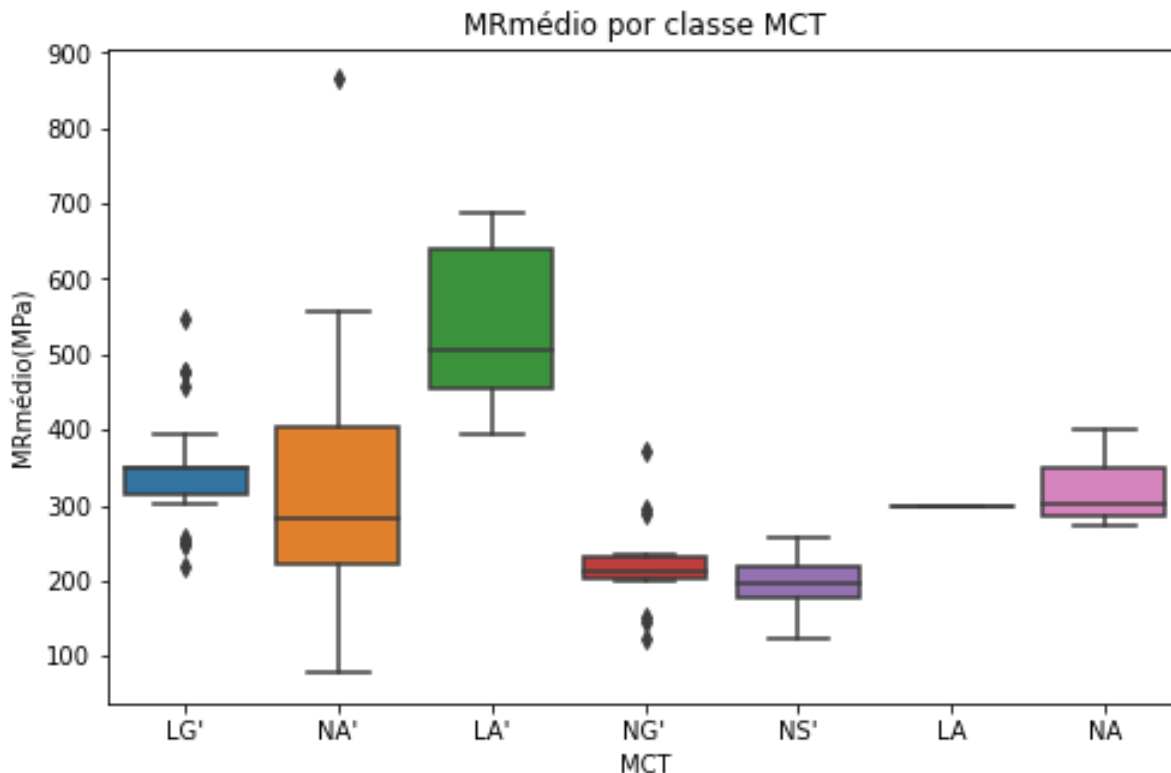


Figura 7.5 – Boxplot da $MR_{\text{médio}}$ por Classe MCT para os solos do BDSF.

Os gráficos *Boxplot* das variáveis Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4 (associadas ao modelo de deformação permanente) por classe MCT, indicou que os solos LA' tenderam a apresentar valores baixos de Ψ_1 , que pode ser considerado como a “magnitude” da deformação. O parâmetro Ψ_2 mostrou valores tanto positivos como negativos na maioria das classes, com exceção da NA' (composta de apenas 3 solos) em que a influência da tensão confinante foi predominantemente negativa, ou seja, quanto maior a tensão confinante menor a deformação permanente.

Todos os valores de Ψ_3 , que representa a influência da tensão desvio, foram positivos, indicando que quanto maior a tensão desvio maior a deformação permanente, e os maiores valores foram identificados na classe LA' mostrando que apesar dos solos dessa classe apresentarem, em geral, deformações menores também são mais sensíveis à variação da tensão desvio. Os valores de Ψ_4 também foram em geral positivos, indicando que quanto maior o número de aplicação de cargas (N) maior a deformação, como esperado.

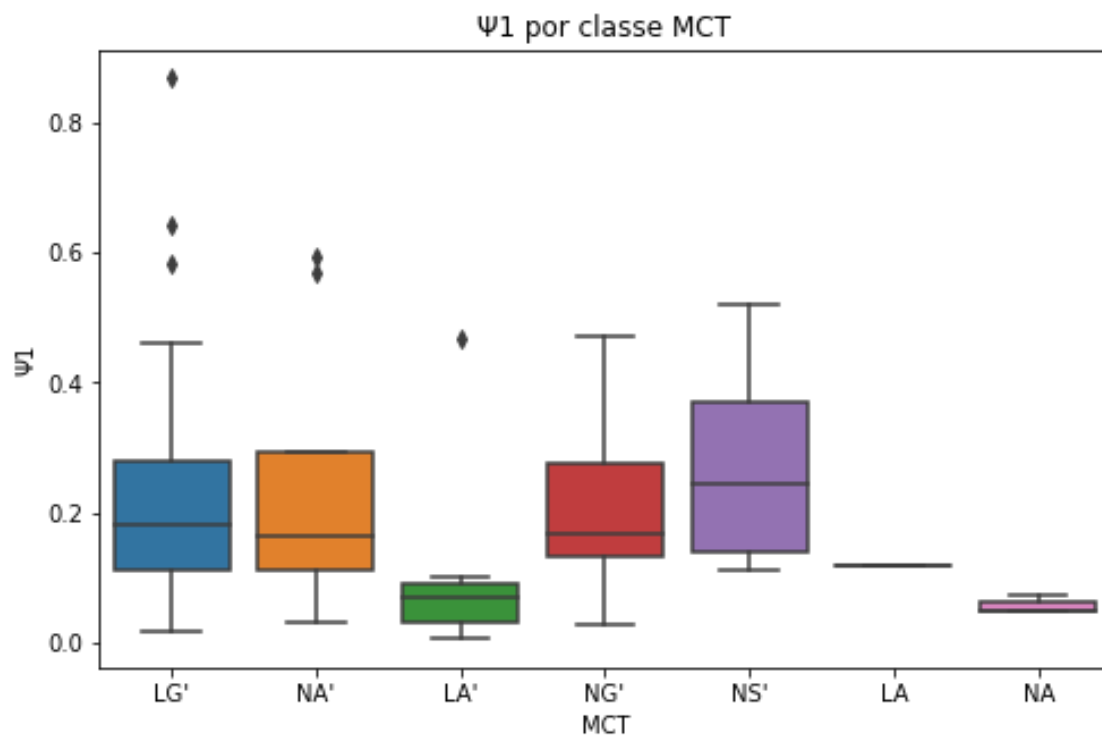


Figura 7.6 – *Boxplot* da Ψ_1 por Classe MCT para os solos do BDSF.

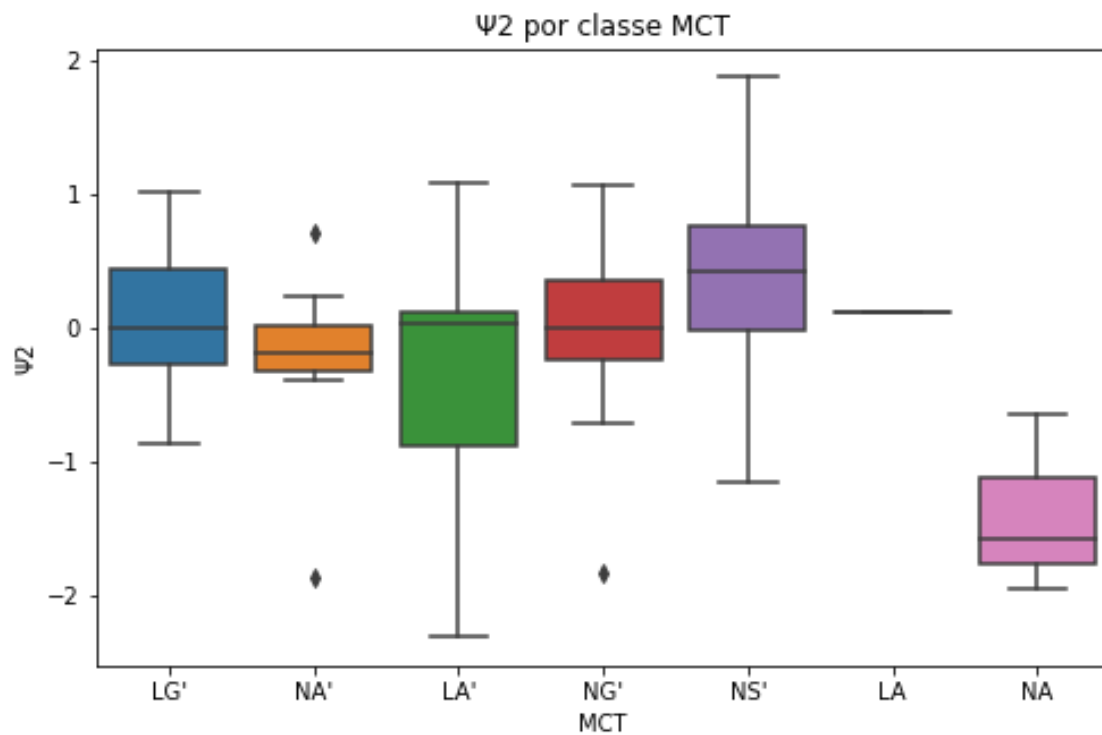


Figura 7.7 – *Boxplot* da Ψ_2 por Classe MCT para os solos do BDSF.

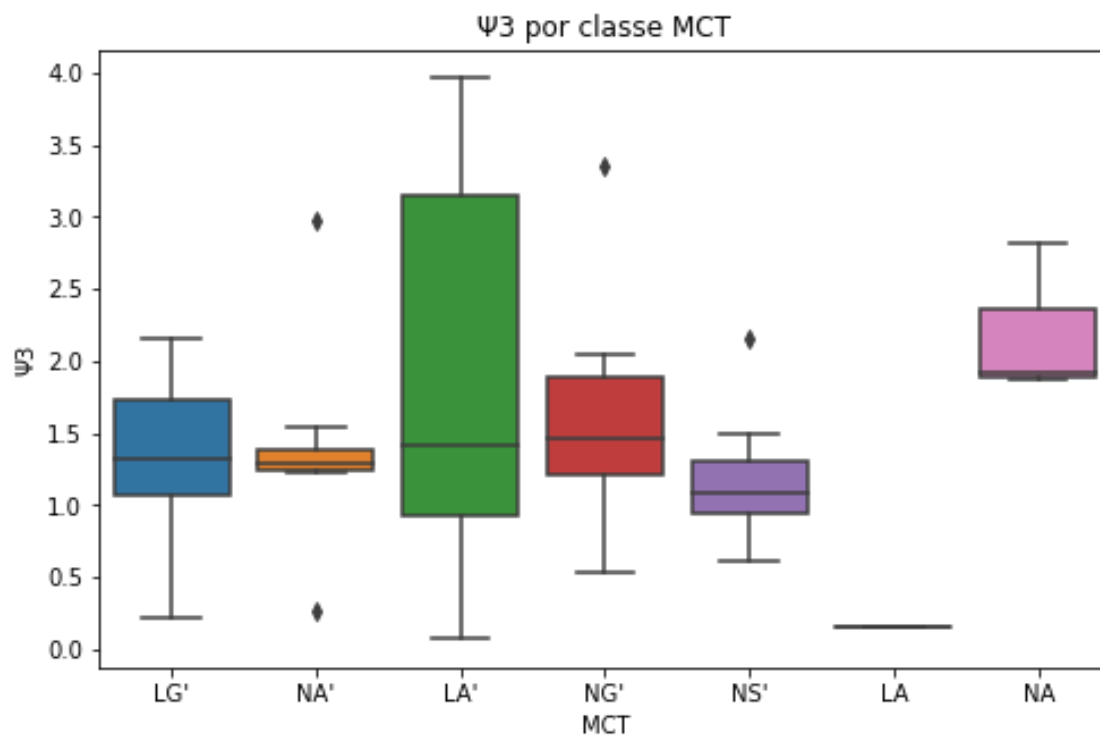


Figura 7.8 – Boxplot da Ψ_3 por Classe MCT para os solos do BDSF.

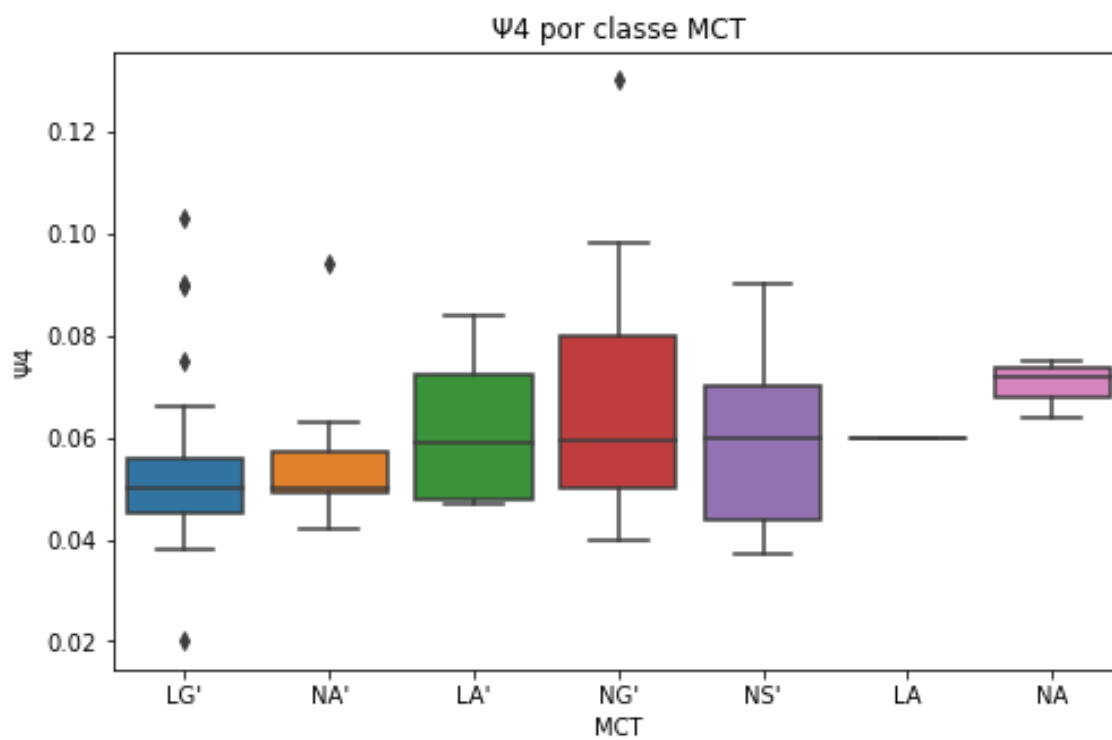


Figura 7.9 – Boxplot da Ψ_4 por Classe MCT para os solos do BDSF.

Para análise exploratória automatizada do BDSF, optou-se por utilizar os resultados da biblioteca *Sweetviz* e, também, da matriz de correlação numérica de Pearson, feita com o Excel, anterior à implementação das ferramentas de Ciência de Dados à esta Tese, apresentada no Apêndice VI que conta com uma quantidade maior de parâmetros do que as consideradas nas análises no Python – a saber, os limites de Atteberg, CBR e expansão e o conjunto de dados original – sem preenchimento de dados faltantes.

A matriz de correlação gráfica (gerada pela *Sweetviz*, Figura 7.10), indica que todas as variáveis possuem associações categóricas (representadas pelos quadrados) com a Classificação MCT, sendo as mais fortes aquelas considerando os parâmetros associados a própria classificação (c', d', e' e PMI) mas também os parâmetros: Pargila, Pareia, pdmáx, Wo e MR_{médio}.

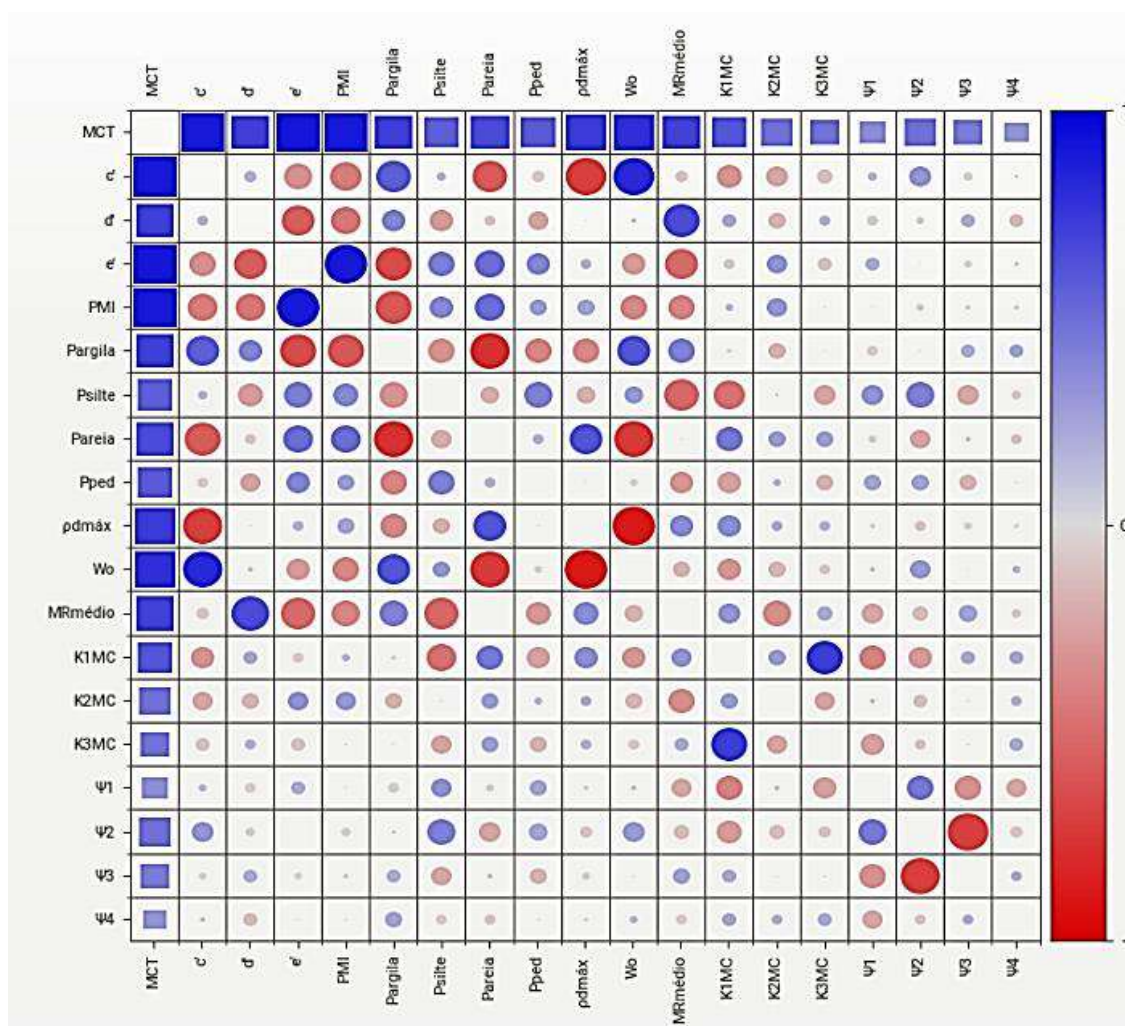


Figura 7.10 – Matriz de correlação gráfica gerada pela Biblioteca *Sweetviz* para os dados do BDSF.

Sobre correlações numéricas (representadas por círculos no gráfico da Figura 7.10), o coeficiente c' apresentou correlações positivas: moderada (r entre 0,50 e 0,70) com a porcentagem de argila e os limites de liquidez e plasticidade; forte (r entre 0,70 e 0,90) com a umidade ótima e, correlações negativas: moderada com a porcentagem de areia e o K_2 do modelo em função da tensão confinante ($K2TC$) e, forte com o $\rho_{dm\acute{a}x}$. Assim, como esperado, o c' é influenciado pela granulometria, pelos índices de consistência e pela umidade ótima. O parâmetro c' cresce com a quantidade de argila presente na amostra, também as umidades ótimas dos solos argilosos são maiores do que os arenosos e inversamente proporcionais à densidade máxima $\rho_{dm\acute{a}x}$, como sabido pelos princípios da Mecânica dos Solos.

Para c' vs. $K2TC$ obteve-se uma correlação negativa moderada, onde quanto mais argiloso é o comportamento do solo menor é a variação do valor do MR com a variação da tensão confinante. Verifica-se que a classificação MCT nesse quesito corrobora com o que já se conhece do comportamento dos solos argilosos, que é o fato deles, em geral, serem mais influenciados pela variação da tensão desvio do que da tensão confinante.

O parâmetro d' mostrou correlação negativa e moderada com o coeficiente e' , PMI e com o IP e, positiva e forte com o $MR_{m\acute{e}dio}$. Assim, nota-se que quanto mais íngreme é o ramo seco da curva de compactação (comportamento típico de solos lateríticos) menor é a PMI, menor é o IP e, maior o $MR_{m\acute{e}dio}$.

O índice e' apresentou correlação positiva muito forte com a PMI como já era esperado porque PMI entra no cálculo do e' , como também mostrou correlações negativas moderadas com a porcentagem de argila e o $MR_{m\acute{e}dio}$. A PMI apresentou correlação positiva moderada com $K2TC$ e forte com $K1TC$, indicando que quanto maior a PMI maior a magnitude e a variação do MR com a variação da tensão confinante, o que está coerente com o que se observa na classificação MCT: os solos arenosos não lateríticos são, em geral os que apresentam maiores perdas de massa por imersão e, também, são mais dependentes da tensão confinante.

Os resultados supracitados evidenciam que a classificação MCT obtida para os solos do BDSF está coerente com os resultados dos ensaios de MR, indicando que quanto mais intemperizado o solo (ou seja, aqueles que apresentam um menor valor de e' e maior valor de d' segundo a metodologia MCT), maior tende a ser o valor do $MR_{m\acute{e}dio}$.

Nogami e Villibor (1995) propuseram a classificação MCT para uma primeira análise simplificada do grau de intemperismo que ocorre nos solos tropicais brasileiros, para substituir as classificações geotécnicas clássicas (TRB e Unificada) que avaliavam a “qualidade” relativa dos solos finos baseando-se nos índices de plasticidade e na porcentagem de argila, por observação de solos de clima temperado a frio. Assim, não se levava em conta a presença dos óxidos de ferro e alumínio entre outros fatores que ocorrem na formação dos solos tropicais evoluídos, que, mesmo quando muito argilosos e com plasticidade, contém em geral argilomineral caulinita principalmente. Nos livros mais recentes dos dois autores, já se mostra que a classificação MCT “concorda” com o módulo de resiliência: os solos lateríticos tem MR maiores do que os não lateríticos.

Observou-se uma tendência moderada de aumento no valor da umidade ótima com o aumento da porcentagem de argila no solo. A quantidade de argila também apresentou relação moderada e negativa com K2TC, ou seja, quanto maior é o teor de argila menor a influência da variação da tensão confinante no comportamento resiliente do material.

Verificou-se que os solos do BDSF com maior quantidade de silte tendem a apresentar maiores valores de expansão e menores valores de $MR_{\text{médio}}$, corroborando com a experiência brasileira em que tanto na classificação MCT quanto no comportamento resiliente, os solos siltosos costumam apresentar comportamentos mecânicos inferiores aos solos argilosos e arenosos lateríticos.

A porcentagem de silte também apresentou correlação positiva moderada com K2TD, indicando que quanto maior a porcentagem dessa fração maior a influência da tensão desvio no comportamento resiliente do material, assim como é menor a magnitude do valor do módulo no modelo composto (K1MC).

No que diz respeito à quantidade de areia nos solos do BDSF, verificou-se a correlação moderada e negativa com os índices de consistência, mostrando coerência uma vez que solos arenosos tendem a apresentar valores baixos de LL e LP. Além disso, verificou-se que quanto maior é a porcentagem de areia menor é o teor de umidade ótimo (correlação forte) e maior o $\rho_{\text{dmáx}}$. E como esperado, quanto maior a porcentagem de areia maior a influência da tensão confinante no comportamento resiliente.

O Limite de Liquidez correlacionou-se moderadamente com a densidade real dos grãos e o $\rho_{\text{dmáx}}$, onde à medida que o valor do LL cresce, a densidade real também cresce e

$\rho_{dm\acute{a}x}$ decresce. O IP correlacionou-se de forma moderada e negativa com o K1MC, ou seja, quanto maior o índice de plasticidade menor a magnitude do módulo resiliente no modelo composto.

A densidade real relacionou-se com ambos os coeficientes do modelo em função da tensão desvio, indicando que os solos do BDSF com maior densidade tendem a ser influenciados pela variação da tensão desvio e apresentarem maior valor do módulo.

O CBR apresentou correlação moderada com cinco outras variáveis mecânicas, sendo correlações positivas com o $MR_{m\acute{e}dio}$ e os coeficientes K_1 dos modelos em função da tensão desvio e do modelo composto. e negativa com a deformação permanente máxima e o Ψ_1 do modelo de Guimarães (2009). Tais resultados mostram que solos com uma capacidade de suporte maior tendem a apresentar valores de módulo resiliente maior e magnitude das deformações plásticas menor, não devendo ser considerado regra uma vez que a correlação foi moderada.

Os parâmetros Ψ_1 e Ψ_2 do modelo de deformação permanente apresentaram correlação forte e negativa (-0,75) indicando que em geral, para os solos do BDSF, enquanto a influência da tensão desvio aumenta sobre a deformação permanente, a influência da tensão confinante diminui e vice-versa.

Outras correlações de nível moderado a forte foram identificadas, porém julgou-se desnecessário comentá-las por serem consideradas óbvias, no entanto, as mesmas podem ser observadas na matriz de correlação apresentada no Apêndice VI.

7.3.3 Análise de Cluster com os dados do BDSF

Assim como foi feito para os solos da região de Recife, para os solos do BDSF foi gerado, a partir do Python e do método *hierarchy* da biblioteca *Scipy*, as clusterização dos dados, cujo dendrograma está apresentado na Figura 7.11. Aos dados padronizados (média zero e desvio padrão 1) foi aplicado método de ligação de Ward e medida de distância euclidiana.

```
In [61]: #Agrupamento COM dados padronizados
from scipy.cluster import hierarchy
Z = hierarchy.linkage(rescaledX, method='ward', metric='euclidean')
plt.figure(figsize=(15,5))
plt.title('Agrupamento Hierárquico dos solos do BDSF' '\n' 'Método de Ward e Distância Euclidiana', fontsize=12)
dm = hierarchy.dendrogram(Z, labels = list(dados1.index), leaf_font_size=12)
plt.xlabel("Amostras", fontsize=12)
plt.ylabel("Distância", fontsize=12)
```

Out[61]: Text(0, 0.5, 'Distância')

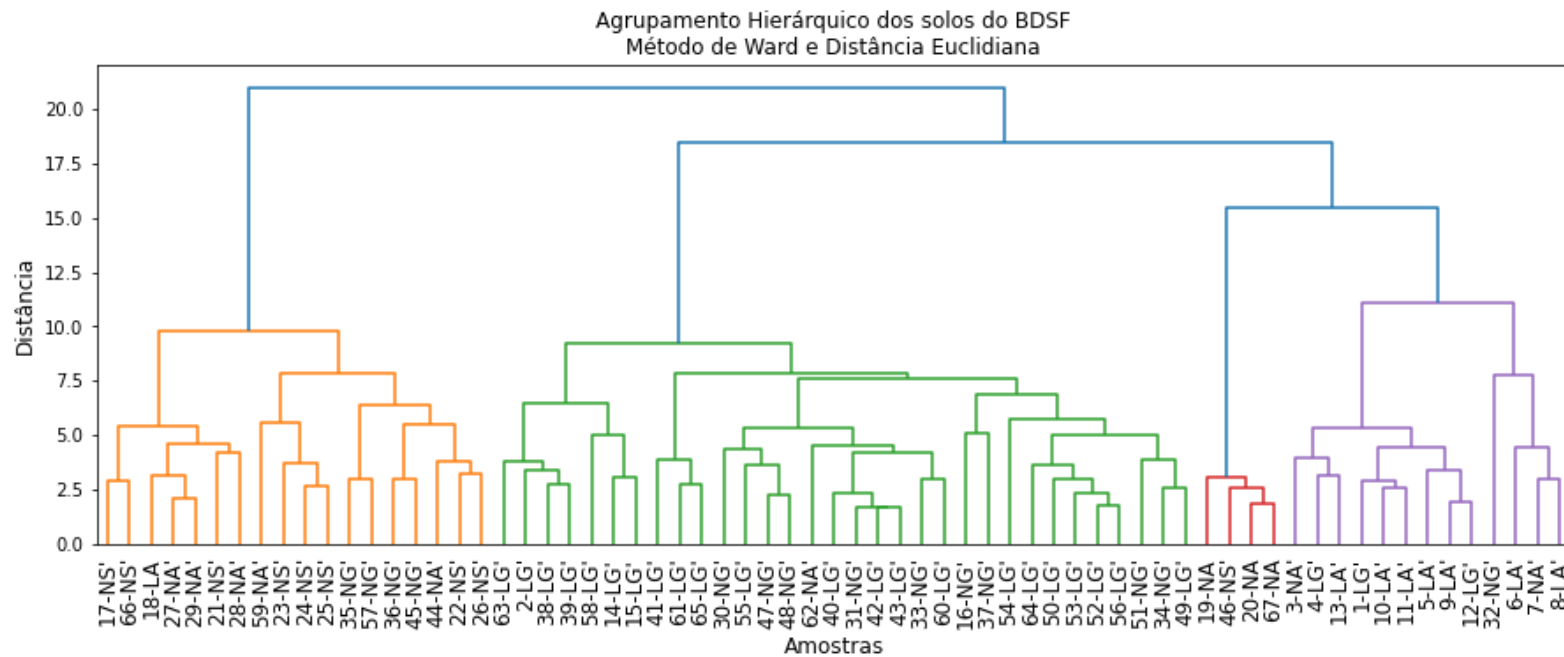


Figura 7.11 – Dendrograma de agrupamento dos solos do BDSF gerado através do Python e a biblioteca Scipy.

Em uma visão geral e imediata do dendrograma nota-se um agrupamento coerente em relação à granulometria e classificação MCT, pois observa-se uma concentração dos solos argilosos lateríticos e não lateríticos no segundo grupo (cor verde), solos lateríticos arenosos no último grupo (cor lilás), as areias não lateríticas no terceiro grupo (cor vermelha) e uma “mescla” de solos não lateríticos, principalmente siltosos, no primeiro grupo (cor laranja).

Buscando analisar quais foram os principais parâmetros geotécnicos que serviram de critério para o agrupamento dos solos do BDSF procedeu-se uma análise por cortes intermediários no dendrograma, mostrado na Figura 7.12. No primeiro corte tem-se a formação de 2 grandes grupos, A e B. Observou-se que não houve (de forma clara) uma característica geotécnica específica para esta primeira divisão, no entanto, notou-se que o grupo A é composto por 18 solos caracterizados (em sua maioria) por materiais com alta porcentagem de silte (10 a 52%), já o grupo B é composto de 49 solos (todos os solos da região de Recife se enquadraram neste grupo) caracterizados por alta porcentagem de argila (9 a 86%), como se verifica no gráfico da Figura 7.13(a).

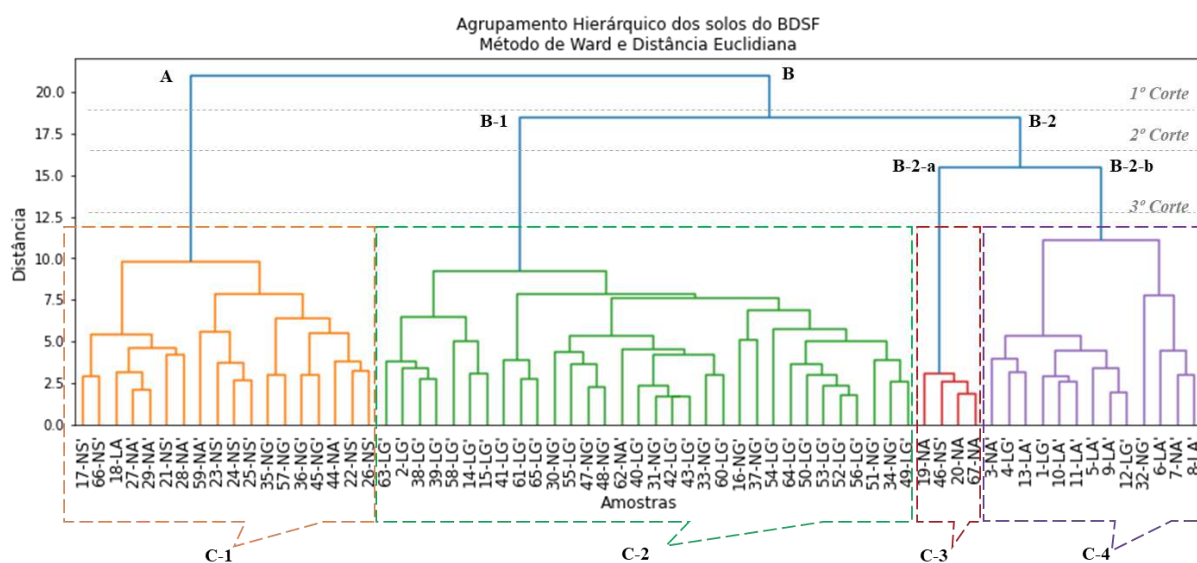


Figura 7.12 – Dendrograma de agrupamento dos solos do BDSF detalhado.

Plotando os dados de e' e c' do ábaco da classificação MCT (Figura 7.13(b)) nota-se uma melhor segregação dos grupos A e B. Delineou-se um limite arbitrário desses grupos no gráfico MCT apenas para fins ilustrativos, assim ressalta-se que na clusterização os solos da Classe NA bem como um solo NS' que fazem parte do grupo B ficaram na região delineada para o grupo A, mostrando um possível comportamento diferenciado desses solos, talvez até justificando a alocação deles em um cluster separado (corte 3, cluster C-3/subgrupo B-2-a),

visto que são solos com baixas porcentagens de argila e também silte, conforme demarcado nas Figura 7.13(a).

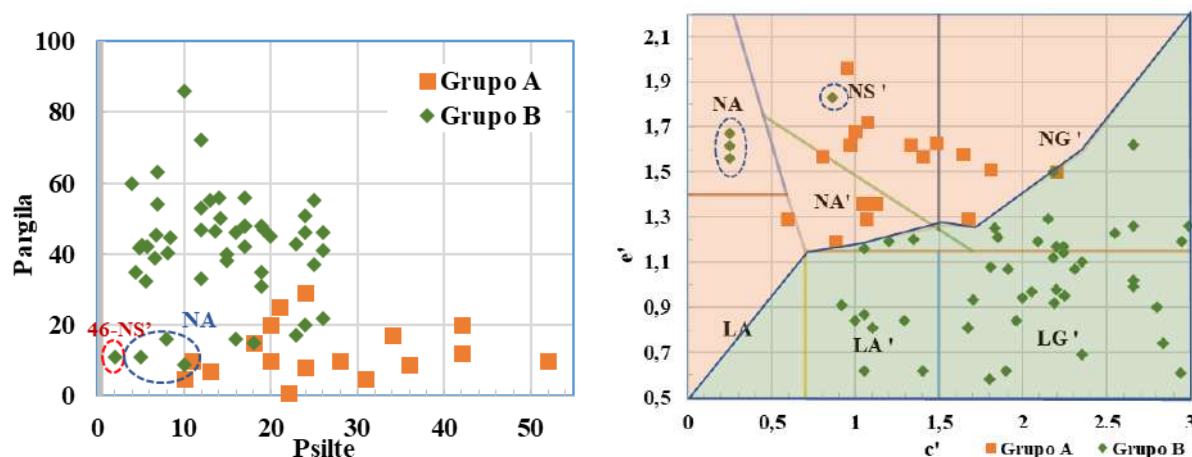


Figura 7.13 – (a) Relação de Pargila vs. Psilte, (b) limite arbitrário dos Clusters A e B no gráfico MCT.

Utilizando novamente o gráfico MCT para visualização dos agrupamentos, agora no 2º corte do dendrograma, apresenta-se a Figura 7.14(a) em que é possível verificar que os solos do subgrupo B-1, são em sua maioria marcados pelo comportamento arenoso e o grupo B-2 composto por solos de comportamento argiloso (na maior parte). Tal comportamento também pode ser observado no gráfico da Figura 7.14(b), em que se nota o grupo B-1 com valores de umidade ótima mais baixos do que os observados no grupo B-2. No terceiro corte, o algoritmo subdividiu o grupo B-2 em dois subgrupos: o B-2-a composto pelos quatro solos indicados anteriormente que se destacaram dos demais solos do grupo, conforme indicado na Figura 7.14(b).

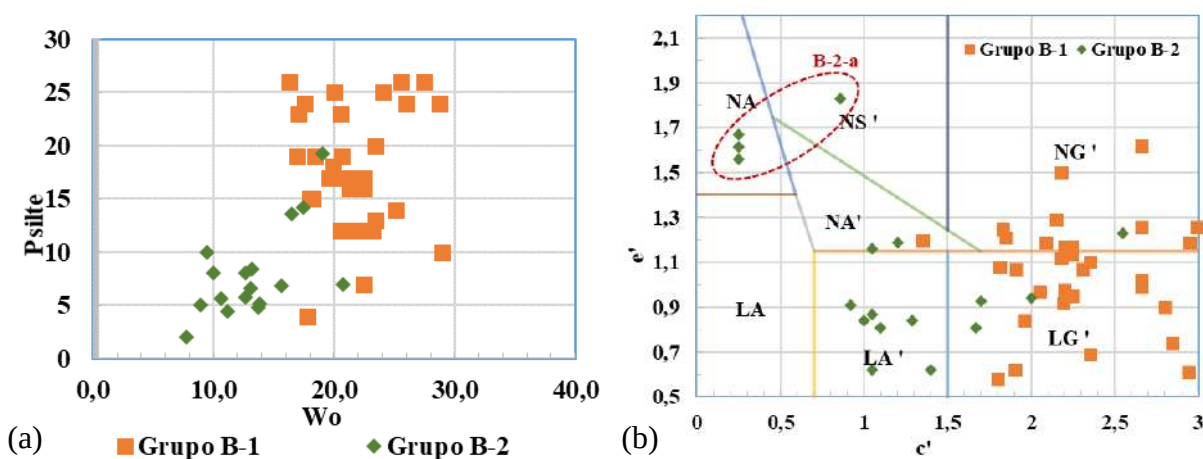


Figura 7.14 – (a) Relação de Psilte vs. W_o , (b) gráfico MCT com identificação dos subgrupos B-1 e B-2.

7.3.4 Análise complementar – testes de regressão linear múltipla

Com vistas a incrementar a análise do BDSF, realizou-se alguns testes de regressão linear múltipla utilizando a linguagem Python e o módulo Statsmodels aplicando o método OLS (do inglês *Ordinary Least Squares*), ou seja, a estimativa é feita através dos mínimos quadrados ordinários visando fornecer um melhor ajuste do modelo por meio da minimização dos quadrados do erro da regressão. Os modelos de regressão linear seguem a seguinte equação:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i \quad (14)$$

Onde:

y_i é a variável dependente/resposta;

x_{i1}, x_{i2}, x_{ip} são as variáveis independentes/preditoras;

β_0 representa o intercepto da regressão, ou seja, o valor esperado de y quando as preditoras tem valor zero;

$\beta_1, \beta_2, \beta_p$ são os coeficientes de regressão estimados e,

ε_i é o erro associado, ou seja, diferença entre o valor esperado e o valor observado de y .

Inicialmente, considerando todas as amostras do banco de dados, testou-se vários modelos de regressão alterando-se a variável resposta e as variáveis preditoras até encontrar um resultado promissor, considerando R^2 maior que 0,5. O primeiro modelo “promissor” teve como variável resposta o $MR_{\text{médio}}$ e as seguintes variáveis preditoras, associadas à granulometria, classificação MCT e deformação permanente: Pargila, Psilte, W_o , e' , d' e $\Psi 1$. A título de exemplo, a Figura 7.15 apresenta a estrutura de código utilizada para gerar o modelo de regressão, bem como a saída que consiste de um resumo dos resultados do modelo e das estatísticas da regressão.

Para esse primeiro modelo, obteve-se valores de R^2 e R^2 ajustado de 0,664 e 0,630, indicando que o modelo testado explica mais de 60% dos dados, o que pode ser considerado um valor razoável haja vista a heterogeneidade e quantidade das variáveis consideradas. No entanto, ao olhar para o nível de significância (valor-p, $P > |t|$) nota-se que algumas variáveis poderiam ser excluídas para verificar se haveria alguma melhoria no modelo. Assim procedeu-se um novo teste excluindo primeiramente a variável Psilte (Figura 7.16).

```
In [74]: #Ajusta o modelo de regressão linear múltipla
modelo1 = ols('MRmedio ~ Pargila + Psilte + Wo + e + d + Psi', data=dados2)

res1 = modelo1.fit()
print(res1.summary())
```

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          MRmedio      R-squared:                0.664
Model:                  OLS          Adj. R-squared:           0.630
Method:                 Least Squares   F-statistic:              19.73
Date:                   Mon, 14 Jun 2021   Prob (F-statistic):       1.44e-12
Time:                   09:57:45         Log-Likelihood:           -391.67
No. Observations:       67             AIC:                     797.3
Df Residuals:           60             BIC:                     812.8
Df Model:                6
Covariance Type:        nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	532.2532	97.613	5.453	0.000	336.998	727.508
Pargila	2.5888	1.069	2.421	0.019	0.449	4.728
Psilte	-1.2519	1.483	-0.844	0.402	-4.219	1.716
Wo	-12.8334	3.167	-4.052	0.000	-19.168	-6.499
e	-81.2002	53.799	-1.509	0.136	-188.813	26.413
d	0.9471	0.234	4.041	0.000	0.478	1.416
Psi	-103.9978	63.395	-1.640	0.106	-230.807	22.811

```

=====
Omnibus:                 28.598      Durbin-Watson:           1.811
Prob(Omnibus):           0.000      Jarque-Bera (JB):        76.608
Skew:                    1.266      Prob(JB):                2.32e-17
Kurtosis:                 7.586      Cond. No.:               1.01e+03
=====

```

Notes:

- [1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.
 [2] The condition number is large, 1.01e+03. This might indicate that there are strong multicollinearity or other numerical problems.

Figura 7.15 – Estrutura de código e resultado do primeiro modelo de regressão linear múltipla para o MR_{medio}.

Nessa nova regressão (Modelo 2), observou-se que houve uma pequena melhora no valor do R² ajustado mas que, assim como alertado pelo algoritmo no resultado do modelo anterior, o modelo testado pode ter multicolinearidade devido ao alto valor do número de condição (nota 2 da figura), ou seja, alguma variável apresenta alta correlação com outra, sendo neste caso as variáveis e' e d' da classificação MCT, por isso foi testado um novo modelo (Modelo 3) excluindo a variável e' (por apresentar o menor nível de significância).

No Modelo 3 (Figura 7.17) o R² ajustado diminuiu um pouco em relação ao Modelo 2, no entanto, a maioria das variáveis apresentou um bom nível de significância (valor-p < 0,001) indicando que este modelo é estatisticamente válido. Além disso, o problema com a multicolinearidade foi reduzido. Nesse modelo a variável com menor significância (P>|t| = 0,051) é a Ψ1, e assim, testou-se um novo modelo (4) excluindo esta variável.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	MRmédio	R-squared:	0.660			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.632			
Method:	Least Squares	F-statistic:	23.64			
Date:	Mon, 14 Jun 2021	Prob (F-statistic):	3.92e-13			
Time:	09:58:13	Log-Likelihood:	-392.06			
No. Observations:	67	AIC:	796.1			
Df Residuals:	61	BIC:	809.4			
Df Model:	5					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	526.2587	97.124	5.418	0.000	332.047	720.471
Pargila	3.0350	0.927	3.272	0.002	1.180	4.890
Wo	-14.3760	2.580	-5.572	0.000	-19.535	-9.217
e	-83.7165	53.589	-1.562	0.123	-190.874	23.441
d	0.9675	0.233	4.159	0.000	0.502	1.433
ψ1	-115.7762	61.694	-1.877	0.065	-239.140	7.588
Omnibus:	29.115	Durbin-Watson:	1.853			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	77.874			
Skew:	1.295	Prob(JB):	1.23e-17			
Kurtosis:	7.603	Cond. No.	1.01e+03			

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

[2] The condition number is large, 1.01e+03. This might indicate that there are strong multicollinearity or other numerical problems.

Figura 7.16 – Resultado do Modelo 2 de regressão linear múltipla para o MR_{médio}.

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	MRmédio	R-squared:	0.646			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.623			
Method:	Least Squares	F-statistic:	28.29			
Date:	Mon, 14 Jun 2021	Prob (F-statistic):	2.20e-13			
Time:	09:59:02	Log-Likelihood:	-393.38			
No. Observations:	67	AIC:	796.8			
Df Residuals:	62	BIC:	807.8			
Df Model:	4					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

Intercept	388.8718	41.693	9.327	0.000	305.529	472.215
Pargila	3.8436	0.778	4.937	0.000	2.287	5.400
Wo	-14.4462	2.609	-5.537	0.000	-19.662	-9.230
d	1.1634	0.198	5.871	0.000	0.767	1.559
ψ1	-123.8551	62.186	-1.992	0.051	-248.164	0.454
=====						
Omnibus:	23.262	Durbin-Watson:	1.723			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	49.328			
Skew:	1.105	Prob(JB):	1.94e-11			
Kurtosis:	6.575	Cond. No.	582.			

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

Figura 7.17 – Resultado do Modelo 3 de regressão linear múltipla para o MR_{médio}.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	MRmédio	R-squared:	0.623			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.605			
Method:	Least Squares	F-statistic:	34.76			
Date:	Mon, 14 Jun 2021	Prob (F-statistic):	2.24e-13			
Time:	10:03:26	Log-Likelihood:	-395.45			
No. Observations:	67	AIC:	798.9			
Df Residuals:	63	BIC:	807.7			
Df Model:	3					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	366.0837	41.025	8.923	0.000	284.101	448.066
Pargila	4.0428	0.790	5.118	0.000	2.464	5.621
Wo	-15.1017	2.649	-5.702	0.000	-20.395	-9.809
d	1.1790	0.203	5.819	0.000	0.774	1.584
Omnibus:	19.808	Durbin-Watson:		1.594		
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):		44.299		
Skew:	0.891	Prob(JB):		2.40e-10		
Kurtosis:	6.563	Cond. No.		366.		

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

Figura 7.18 – Resultado do Modelo 4 de regressão linear múltipla para o MR_{médio}.

As equações 15 e 16 expressam os modelos 3 e 4, que apresentaram os melhores resultados, com seus respectivos coeficientes de regressão obtidos considerando todos os solos do BDSF. Em suma, os modelos indicam que o aumento da porcentagem de argila e da inclinação da curva de compactação (d') proporcionam o aumento do MR_{médio}, ao contrário da umidade e da deformação permanente que ao aumentarem influenciam diminuindo a variável resposta.

- Equação do Modelo 3 para os solos do BDSF:

$$MR_{médio} = 388,87 + 3,84P_{argila} - 14,44W_o + 1,16d' - 123,85\Psi_1 \quad R^2 = 0,646 \quad (15)$$

- Equação do Modelo 4 para os solos do BDSF:

$$MR_{médio} = 366,08 + 4,04P_{argila} - 15,10W_o + 1,17d' \quad R^2 = 0,623 \quad (16)$$

Uma outra verificação importante a se fazer na análise de modelos de regressão linear é a de suposição de normalidade dos resíduos. No Python, a modelagem e plotagem da

distribuição de probabilidade dos resíduos pode ser feita utilizando os métodos “*resid*” e “*probplot*” da biblioteca *Statsmodels*, conforme apresentado na Figura 7.19, e em (a) tem-se a distribuição dos resíduos do Modelo 3 e em (b) do Modelo 4, em ambos os casos, confirma-se a suposição de normalidade, validando os modelos propostos.

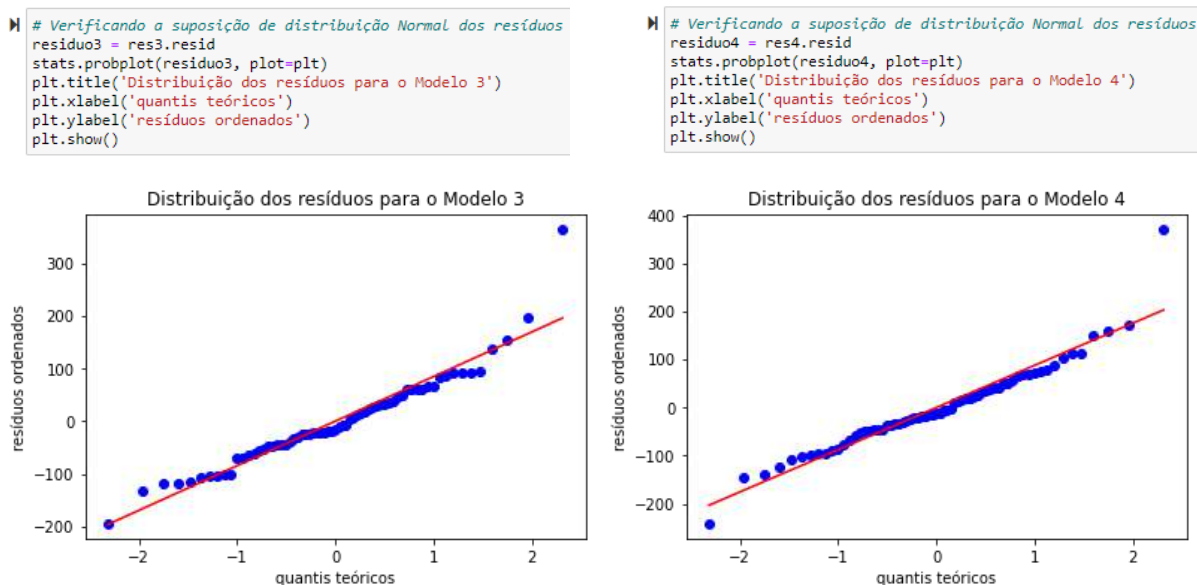


Figura 7.19 – Estrutura de códigos para geração de gráfico de distribuição de resíduos dos modelos 3 (à esquerda) e 4 (à direita).

A fim de verificar se haveria alguma melhoria nos ajustes aos modelos de regressão linear múltipla considerando as classes MCT (e não o BDSF completo), testou-se os modelos 3 e 4 com os solos dos grupos MCT mais representativos em termos de quantidade de amostras (LG', LA', NA', NG' e NS'), porém não se obteve vantagem e por isso esta análise não é apresentada aqui.

7.4 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou a estrutura do BDSF e algumas análises realizadas com auxílio de ferramentas da Ciência de Dados. O BDSF é composto por 67 solos de granulação fina cujas origens abrangem diversas regiões do país (com certeza - Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul, quiçá de outras regiões pois não se obteve indicação da procedência de algumas amostras).

Mais de 50% dos solos do BDSF são de comportamento argiloso (LG' – 25 e NG' – 14). A coerência dos dados do BDSF foi comprovada pela identificação de algumas relações

típicas da mecânica dos solos, como a W_o vs. Classe MCT em que solos de comportamento argiloso (LG' e NG') apresentaram os maiores valores de W_o (média ~ 20 a 21%), e os solos de comportamentos arenosos e siltosos apresentaram valores intermediários (média ~ 12 a 14%), seguido das areias com valores ainda mais baixos (~10%).

Os solos da classe LA' apresentaram, em geral, os maiores valores de $MR_{\text{médio}}$ (394 – 689 MPa) e os menores valores de deformação permanente. Os modelos de DP de todos os solos do BDSF indicaram que quanto maior a tensão desvio e/ou maior o número de aplicação de cargas, maior é deformação permanente. Já a influência da tensão confinante na DP variou em todas as classes dos solos. E, pela análise de correlações chegou-se à conclusão de que quando a influência da tensão desvio aumenta sobre a deformação permanente, a influência da tensão confinante diminui e vice-versa.

Os resultados evidenciaram que a classificação MCT está coerente com o comportamento resiliente, uma vez que, para os solos do BDSF, quanto mais intemperizado o solo (menor e' e maior d' , segundo a metodologia MCT), maior tende a ser o valor do $MR_{\text{médio}}$.

A granulometria e os índices da classificação MCT, bem como a umidade ótima foram os parâmetros identificados como decisivos para a clusterização dos solos do BDSF. Mas isso não quer dizer que os demais parâmetros geotécnicos não influenciaram na formação dos grupos.

Uma análise complementar visando a proposição de equações de regressão linear múltipla foi realizada. Duas equações envolvendo a porcentagem de argila, umidade ótima, d' e Ψ_1 , com valores de R^2 em torno de 0,6, foram indicadas.

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

8.1 Conclusões

Entender o comportamento geotécnico dos solos tropicais de granulação fina é tarefa essencial quando se pretende aplicá-los em estruturas de pavimentos dos mais diversos tipos (rodoviário/ferroviário, asfálticos/rígidos etc.). Apesar das classificações geotécnicas tradicionais avaliarem negativamente esses materiais, a experiência brasileira tem mostrado que a seleção adequada, seguida da caracterização física e mecânica, pautada na deformabilidade, e a adoção de um método de dimensionamento de pavimento moderno pode promover o aproveitamento dos solos finos e pavimentos econômicos.

Neste contexto, o objetivo principal desta tese foi o de contribuir com o estudo do comportamento de solos tropicais finos visando aplicação em pavimentação rodoviária, sob uma visão ampla de suas características físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas, proporcionando uma avaliação completa destes materiais.

Esta pesquisa mostrou a viabilidade do uso de 13 solos finos da Região Metropolitana do Recife, apresentando, como exemplo, vinte e seis estruturas de pavimentos, dimensionadas pelo programa MeDiNa, que atenderam integralmente aos requisitos de projeto para uma via típica de um Sistema Arterial Primário, considerando diferentes níveis de tráfego (10^5 a 5×10^7). Esta contribuição é importante para a região do estudo, e a sua aplicação em infraestrutura de transportes traz uma nova perspectiva construtiva para os órgãos competentes locais, com aproveitamento dos solos disponíveis e redução dos custos com transporte e aquisição de materiais granulares.

A viabilidade de aplicação desses solos em camadas de pavimentos está condicionada à uma construção de qualidade, com controle tecnológico adequado, tendo como critérios básicos a umidade ótima e boas condições de drenagem.

Modelos de regressão polinomial e linear para prever o MR dos solos da Classe LA' para emprego nas camadas de sub-base e subleito, em função das tensões confinante e desvio foram propostos e apresentaram coeficientes de determinação satisfatórios ($R^2 > 0,9$).

Esta tese também contribuiu, no âmbito nacional, organizando um Banco de Dados de Solos Finos (BDSF) constituído por 67 solos de diferentes regiões do país e considerando 85 (oitenta e cinco) atributos geotécnicos. Este banco de dados colabora com o banco de dados do MeDiNa e auxilia na divulgação e implantação do novo Método de Dimensionamento mecanístico-empírico Nacional (MeDiNa).

Visando melhorar as análises dos resultados dos solos da RMRecife e do BDSF, foram aplicadas técnicas e ferramentas da Ciência de Dados, utilizando a linguagem de programação Python. Essa ferramenta possibilitou a sugestão de equações de regressão linear múltipla com coeficientes de determinação razoáveis ($R^2 > 0,5$), o comparativo entre solos pela comparação de imagens microscópicas, e correlações importantes entre as variáveis geotécnicas disponíveis.

Destacam-se a seguir as principais conclusões obtidas nesta pesquisa e que evidenciam o alcance dos objetivos da tese. Enfocando aspectos associados aos objetivos específicos, a saber: 1º) Analisar o comportamento geotécnico de solos finos - elencam-se conclusões sobre a natureza dos solos, o comportamento geotécnico geral, o comportamento não-saturado, ao comportamento resiliente e de deformação permanente; 2º) Sugerir estruturas de pavimento com solos tropicais finos – apresentam-se conclusões referentes às simulações realizadas no MeDiNa; 3º) Aplicar técnicas estatísticas e de ciência de dados – listam-se às inferências sobre as correlações entre as propriedades geotécnicas dos solos, às análises de agrupamento e modelos de regressão linear múltipla, conforme descrito adiante.

Quanto à natureza dos solos:

- Em campo, os solos lateríticos com comportamento arenoso (LA') apresentaram alta cimentação natural, congruente com o período de transição entre o déficit hídrico e a reposição de água no solo.
- Os solos de comportamento argiloso (LG') encontravam-se úmidos na coleta em campo evidenciando a maior capacidade de retenção de água destes solos quando comparado aos demais solos estudados.
- Todos os solos apresentaram estrutura floculada, predominância de argilominerais caulinita e illita, elevada acidez e forte presença de hidróxidos de ferro e alumínio, confirmando sua natureza laterítica.
- As imagens microscópicas mostraram que os solos da RMRecife apresentam importante material coesivo revestindo os grãos de quartzo, formando grumos não destrutíveis e/ou removíveis por lavagem.

Quanto ao comportamento geotécnico em geral:

- A porcentagem de silte nos solos afetou diretamente os resultados da perda por imersão PMI (baixa plasticidade apesar do alto teor de argila), os índices c' e e' da classificação MCT e os

comportamentos das curvas de compactação e SWCC, mostrando que a composição granulométrica influencia no comportamento geotécnico e mecânico não saturado desses solos.

- Em todos os solos houve um aumento dos limites de liquidez e de plasticidade com a secagem prévia ao ar, mostrando que a realização do ensaio sem secagem prévia possa ser mais interessante para solos tropicais finos e corroborando com a sugestão de Ampadu (2015). Os solos com maiores variações entre as modalidades ensaiadas (com e sem secagem) foram os solos 06CA-LA', 10MU-LA' e 11CB-LA', da mesma classe MCT, podendo ser indicativo de que a classe LA' possa ser mais sensível neste aspecto.
- Pelos métodos tradicionais todos os solos da pesquisa seriam desqualificados para uso em pavimentação, visto que pela classificação TRB apresentam comportamento sofrível a mal (três solos da classe A-4, sete da A-6, um da A-7-5 e dois da A-7-6); pelos índices de consistência elevados e pelo CBR (só por este critério, sete solos poderiam ser indicados para sub-base - $\text{CBR} > 20\%$, mas nenhum para base).
- Foi observada a presença da gibbsita nas amostras 02 a 07 e 12, que é um hidróxido de alumínio resultante da decomposição da caulinita, indicando a possibilidade de uso destes solos estabilizados quimicamente com cal como uma solução em projetos com maior volume de tráfego, visto que a gibbsita é reativa à cal hidratada.
- O comportamento das curvas de compactação apresentou estreita relação com a granulometria, visto que o solo com a mais alta porcentagem de areia fina (03IT-NA'), 55,85%, apresentou o menor valor de umidade ótima (10,6%) e maior massa específica aparente seca máxima (1,97 g/cm³), assim como o solo com a maior quantidade de silte (08RE-LA'), 19,3%, apresentou o maior valor de umidade ótima (19,0%) e menor massa específica máxima (1,69 g/cm³).

Quanto ao comportamento não-saturado dos solos:

- Todos os solos apresentaram curvas características no formato bimodal com dois pontos de entrada de ar, indicando que tanto os macroporos quanto os microporos influenciam o fluxo de entrada e saída de água nos solos tropicais finos não saturados, concordando com a literatura que atribui este comportamento aos solos muito intemperizados.
- A modelagem bimodal do SWCC com o modelo de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) mostrou-se mais completa, quando comparados a outros modelos, porque apresentou a

complementação das curvas nas regiões de saturação e residual, forneceu valores mais consistentes para o ponto de entrada de ar e R^2 igualmente satisfatórios ($> 0,98$).

- Na zona de macroestrutura do SWCC, todos os solos apresentam grande variação do valor da sucção (~ 3 —10.000 kPa) e a compactação influenciou diretamente o comportamento destes solos tropicais finos lateríticos não saturados.
- Na microestrutura, as curvas SWCC mal são distinguíveis, mas a composição do tamanho de partícula do material, especialmente de silte, é refletido nesta zona.
- Não foi identificado correspondência entre os grupos da classe MCT com as curvas características, porém alguns solos de granulometria semelhante apresentam comportamento análogo nas SWCC.
- A maioria dos solos mostrou uma tendência de aumentar a sucção com o aumento da MR, e ambos são inversamente proporcionais ao teor de umidade. A sucção matricial mostrou-se mais sensível à variação da umidade do que o MR, porém, deve-se considerar também as incertezas inerentes à medição realizada pelo método do papel filtro e ao comportamento bimodal do SWCC.
- Os valores de sucção medidos após o MR encaixaram-se em um trecho da SWCC no qual não se obteve pontos no ensaio de obtenção da curva característica, indicando que o processo adotado no ato da compactação também influenciou nos valores de sucção obtidos (compactação manual vs. automática). Assim, infere-se que a compactação automática possa ser benéfica para o comportamento não saturado desses solos, podendo proporcionar valores de sucção maiores que as obtidas pela compactação manual (necessário estudos mais aprofundados).
- Os solos estudados são mecanicamente adequados para uso em infraestruturas de transporte, porém, apresentam sensibilidade à variação de sucção próxima à umidade ótima. É necessário continuar os estudos para melhor compreender o comportamento: sucção vs. módulo de resiliência em solos tropicais, para determinar se valores-limite podem ser estabelecidos como referência.

Quanto ao comportamento resiliente e à deformação permanente:

- $MR_{\text{médio}}$ de todos os solos apresentaram valores excelentes (acima de 400 MPa), porém alguns deles mostraram-se sensíveis a pequenas variações de umidade. No solo 04IG-LG', por exemplo, com um aumento de 0,2% da $W_{\text{ót}}$ houve uma redução de 40% do $MR_{\text{médio}}$ e a redução de 0,5% da $W_{\text{ót}}$ houve um aumento do $MR_{\text{médio}}$ em 29%.

- O modelo composto apresentou o melhor enquadramento para a modelagem do MR, seguido do modelo em função da tensão desvio. O modelo Universal, testado apenas para os solos LA', apresentou ajuste similar ao modelo composto.
- Considerando os resultados do modelo composto, observou-se que há um aumento do valor do MR com o aumento da tensão confinante, porém o aumento da tensão desvio provoca a redução nos valores de MR, evidenciando a importante influência da tensão desvio no comportamento resiliente destes solos.
- Os ensaios de MR realizados nos corpos de prova ensaiados após o ensaio de DP, permitiram notar um aumento na rigidez dos materiais resultando no aumento do MR e influência maior da tensão confinante no comportamento dos solos quando comparado aos resultados do MR feito em corpo de prova próprio.
- Em relação à deformação permanente, todos os solos atenderam aos limites admitidos no MeDiNa quando aplicados em estruturas típicas, que é de 10 mm para Via Arterial Principal (ou 13 mm – Sistema Arterial primário).
- Nos solos do grupo LA', somente a amostra 10MU-LA' mostrou uma clara tendência de aumento da DP com o aumento do N. Considerando os diversos aspectos geotécnicos dos materiais estudados, somente este solo não apresentou concreções ferruginosas evidentes nas frações maiores que 0,074 mm (retido na peneira nº 200), possivelmente indicando que o grau de intemperismo pode influenciar nos resultados.
- À tensão confinante de 40kPa, mesmo o aumento da tensão desvio na razão igual 3 não provocou aumentos consideráveis no afundamento (com exceção do solo 04IG-LG').
- Nos ensaios de DP, no menor nível de tensão (40/40 kPa) somente dois solos apresentaram comportamento do tipo B, os demais onze solos apresentaram comportamento do tipo A. Nos pares de tensões 40/120 e 80/80 também predominou o comportamento do tipo A. Nos pares de tensões 80/240 e 120/240 predominaram os comportamentos dos tipos A e AB. No último par de tensão somente os solos 03IT-NA', 08RE-LA', 10MU-LA' e 12SU-LG' apresentaram classificação B com certa contribuição para deformação permanente, porém com tendência de acomodação.
- De modo geral, a variação da tensão desvio apresentou impacto maior na magnitude das deformações permanentes do que a variação da tensão confinante.
- O modelo de Guimarães (2009) para previsão da DP ajustou-se bem aos solos estudados (R^2 variando entre 0,778 e 0,988), validando o modelo para os solos tropicais finos da RMRecife.

Quanto às simulações no MeDiNa:

- As simulações realizadas no programa MeDiNa mostraram que é possível o emprego dos solos finos locais em diversas estruturas de pavimentos e em diferentes níveis de tráfego (do leve ao muito pesado).
- Muitas das estruturas propostas apresentaram camadas com espessuras esbeltas (15cm) e/ou sem necessidade de camada de sub-base em contraste com o dimensionamento tradicional, indicando que, com a adoção de um método baseado nos princípios da mecânica dos pavimentos, é possível obter soluções mais econômicas e duradouras.
- Nos solos LA', em geral, os $MR_{\text{médio}}$ (394 - 689 MPa) de laboratório foram semelhantes aos previstos pela rotina AEMC do programa MeDiNa, para a camada de subleito (373 - 761 MPa) e ambos foram maiores do que os obtidos na sub-base (279 - 670 MPa).
- Nos solos LA', observou-se, nas simulações com a rotina AEMC, que com tensões atuantes maiores (σ_3 ou σ_d) nas camadas de sub-base e subleito sempre resultava valores de MR maiores. Foram propostas equações polinomiais e lineares com coeficientes de determinação satisfatórios (R^2 entre 0,915 e 0,993).

Quanto às correlações entre propriedades geotécnicas – Solos da RMRecife:

- Quanto maiores as porcentagens de argila e silte e %passante na peneira nº 200, e menor a porcentagem de areia (principalmente areia fina), maior a umidade ótima e maiores também os valores dos graus de saturação no ponto residual da zona de macroporos e no ponto de entrada de ar da zona de microporos.
- O Limite de Liquidez sem secagem prévia apresentou correlação positiva com a umidade ótima, indicando que para solos tropicais a realização de ensaios de consistência sem a prévia secagem e sem destorroamento pode fornecer resultados mais adequados, corroborando com a recomendação de Ampadu (2015).
- A sucção medida no ensaio de MR apresentou relação muito forte com a sucção residual do primeiro trecho da curva característica bimodal (associada aos macroporos), mostrando que quanto maior a capacidade de retenção do solo em seus macroporos maior tende a ser a sucção dele no ponto de umidade ótima.
- O coeficiente c' da Classificação MCT apresentou relação negativa importante com o parâmetro Ψ_{b2} (associado aos microporos), ou seja, quanto mais argiloso for o comportamento do solo menor o valor da sucção no segundo ponto de entrada de ar.

- Quanto maior a quantidade de M.O. no solo menor tende a ser o valor do MR, evidenciando a necessidade de cuidados na separação adequada da camada de matéria orgânica durante a exploração da jazida, garantindo um solo limpo de impurezas que prejudiquem seu desempenho mecânico.
- Em relação ao comportamento à deformação permanente, quanto maior foi a influência da tensão confinante (representada por Ψ_2) menor foi a influência da tensão desvio (representada por Ψ_3) e, vice-versa, justificado pela natureza “composta” dos materiais que tem proporções de areia e argila diferentes.

Quanto às análises utilizando as ferramentas da Ciência de Dados:

- Solos da RMRecife

- A média de argila ($< 0,005 \mu\text{m}$) para os grupos MCT LG' e LA' são bastante semelhantes (42,9% – 43,3%) e a maior parte dos dados de umidade ótima está entre o valor de 12 e 14% (8 solos), indicando a predominância de solos com comportamento arenoso.
- Cerca de 75% dos dados de $\text{MR}_{\text{médio}}$ estão entre 400 e 600 MPa, sendo que a Classe LG' apresentou resultados inferiores aos observados na Classe LA': LG' entre 400 e 500 MPa; LA' entre 400 e 700 MPa.
- Existe uma relação exponencial entre $\text{MR}_{\text{médio}}$ e a umidade ótima e relações lineares entre a umidade ótima e a porcentagem de argila, bem como, com a saturação no ponto de entrada de ar da SWCC, observado também na matriz de correlações.
- Os parâmetros IP_2 , Exp. , $\text{pH}_{\text{água}}$, pH_{KCl} , ΔpH , Ψ_{res1} , Sres2 , PMI_{wo} , PMI e e' apresentaram associações categóricas com todas as outras variáveis geotécnicas testadas, indicando tratarem-se de atributos geotécnicos importantes dos solos tropicais finos.
- Na análise de cluster, os dados de compactação (umidade ótima e massa específica aparente seca máxima), granulometria (principalmente frações silte e areia fina) e teor de matéria orgânica mostraram-se essenciais para a subdivisão dos grupos em diferentes níveis de agrupamento.
- As imagens microscópicas mostraram resultados coerentes com o obtido na análise de cluster na identificação de solos mais similares geotecnicamente. Destaca-se a correspondência entre as características mineralógicas visualizadas nas imagens (óxidos de ferro, fragmentos de rocha, grãos de quartzo etc.) com os resultados dos ensaios geotécnicos

considerados na análise de agrupamento, sendo promissor a comparação de solos através de imagens aplicando as técnicas da Ciência de Dados.

- Solos do BDSF

- Constatou-se a predominância da classe de solos argilosos tanto lateríticos (LG', 25 solos, mais de 37%) quanto não lateríticos (NG', 14 solos – 20,9%) em detrimento das demais classes MCT presentes no BDSF, podendo ser um retrato da realidade nacional em termos do tipo de material com mais abrangência no território nacional.
- Como esperado pelos princípios da mecânica dos solos, os solos de comportamento argiloso (LG' e NG') apresentaram os maiores valores de umidade ótima (valores médios em torno de 20 a 21%), os solos de comportamentos arenosos e siltosos apresentaram valores intermediários (média entre 12 a 14%) e as areias valores mais baixos (aproximadamente 10%).
- Em geral, os solos da classe LA' apresentaram $MR_{\text{médio}}$ maiores do que os das demais classes (394 a 689 MPa) como também foi observado com dados da RMRecife.
- A classe NA' apresentou cerca de 50% dos solos com valores de $MR_{\text{médio}}$ entre 200 e 400 MPa, no entanto, com alta variabilidade visto que existem valores entre 77 a 865 MPa.
- O grupo LG' mostrou $MR_{\text{médio}}$ com variabilidade pequena (300 a 400MPa), porém com indicação de alguns pontos considerados pela métrica como outliers, ou seja, embora a média da classe seja o valor indicado, há excessões.
- Na maioria das classes MCT, a tensão confinante pode influenciar tanto positivamente quanto negativamente na deformação permanente.
- Em todos os solos do BDSF, o aumento da tensão desvio provoca o aumento da deformação permanente e esta influência mostrou-se maior nos solos da classe LA'. Assim, entendeu-se que apesar desta classe (LA') tender a apresentar valores mais baixos para a magnitude da deformação permanente (Ψ_1) comparado aos solos das demais classes MCT, são solos mais sensíveis à variação da tensão desvio.
- A matriz de correlação gerada pelo algoritmo mostrou que todas as variáveis geotécnicas consideradas nas análises possuem associações categóricas com a Classificação MCT, ou seja, todos os parâmetros geotécnicos considerados nesta parte da análise podem fornecer informação para definição da classe MCT dos solos. As associações mais fortes identificadas foram com os parâmetros associados à própria classificação (c' , d' , e' e PMI) mas também com as porcentagens de argila e areia, $p_{\text{dmáx}}$, W_o e $MR_{\text{médio}}$.

- Para os solos do BDSF, os resultados indicaram que o c' está associado a granulometria e à quantidade de argila presente na amostra, e também com a umidade ótima e com $\rho_{dm\acute{a}x}$. Os valores de c' e a umidade dos solos argilosos são maiores do que os arenosos e inversamente proporcionais à densidade máxima, como sabido pelos princípios da Mecânica dos Solos.
- Também se conclui que quanto mais argiloso é o comportamento do solo (maior c') menor é a variação do valor do MR com a variação da tensão confinante, isto reflete uma vantagem na utilização de solos desta classe.
- Quanto mais íngreme é o ramo seco da curva de compactação – d' (comportamento típico de solos lateríticos) menor é a PMI, menor é o IP e, maior o $MR_{m\acute{e}dio}$, indicando que o d' pode estar associado não somente à própria MCT, mas também à consistência e à resiliência dos materiais.
- Os solos com maior quantidade de silte tendem a apresentar expansões maiores e menores valores de $MR_{m\acute{e}dio}$, e costumam apresentar comportamentos mecânicos inferiores aos solos argilosos e arenosos lateríticos.
- Assim como observado nos solos da RMRecife, para os solos do BDSF, quando a influência da tensão desvio aumenta sobre a deformação permanente, a influência da tensão confinante diminui e vice-versa, evidenciando a natureza “composta” dos materiais (areia, argila).
- Na análise de Cluster, à primeira vista, nota-se que o agrupamento está relacionado à granulometria (principalmente as % de argila e silte, separadamente) e à classificação MCT. Os solos com baixa porcentagens de silte e argila foram alocados em um grupo à parte dos demais. A umidade ótima também parece ter sido utilizada como referência para a subdivisão dos solos em subgrupos menores.
- Os modelos de regressão linear múltipla propostos com os solos do BDSF indicam que o aumento da % de argila e da inclinação da curva de compactação (d') proporcionam o aumento do $MR_{m\acute{e}dio}$, ao contrário da umidade e da deformação permanente que ao aumentarem influenciam diminuindo a variável resposta.

8.2 Sugestões para pesquisas futuras

Esta tese não teve o intuito de esgotar quaisquer um dos temas abordados, assim a seguir sugerem-se algumas possibilidades de pesquisas futuras:

- Analisar o comportamento não-saturado dos solos, por meio da execução de ensaios triaxiais de cargas repetidas para medida de MR com sucção controlada ou utilizando outras técnicas de medição de sucção;
- Analisar a influência do método de compactação (manual/automático) no comportamento não saturado dos solos.
- Testar os solos LG' da RMRecife pelos modelos Theta e Universal afim de verificar se há um melhor enquadramento quando comparado aos solos LA'.
- Aplicar outras técnicas de ciência de dados, como redes neurais, para previsão de comportamento resiliente e de deformação permanente dos solos tropicais finos.
- Realizar outras simulações de dimensionamento de pavimentos, variando o tráfego e a estrutura de camadas junto ao MeDiNa, como opções de aplicação dos solos finos na infraestrutura de transporte.
- Aprofundar os estudos sobre a predição de MR considerando os modelos de comportamento e as simulações realizadas no programa MeDiNa.
- Complementar a caracterização dos solos da RMRecife, estudados nesta tese, com ensaios de contração, ensaios químicos para medida dos índices K_i e K_r e análise da estrutura dos solos por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Realizar estudos dos solos da RMRecife em misturas de solo-cimento e solo-cal.
- Analisar a influência do grau de intemperismo no comportamento à deformação permanente.
- Aumentar o número de solos das classes LA', NA', NS' e NA visando fortalecer o BDSF e refazer as análises de correlações.
- Analisar o comportamento geotécnico dos solos tropicais finos submetidos a diferentes períodos de secagem.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas e Técnicas. Norma Brasileira (NBR) 13.601. **Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*)**. Rio de Janeiro, 1996.
- ALVAREZ NETO, L. **Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis com a utilização de solos tropicais em estruturas de baixo volume de tráfego**. 288 p. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.
- AMARAL, Fernando. **Introdução à Ciência de Dados: mineração de dados e big data**. Alta Books Editora, 2016.
- AMPADU, S. I.K. Laterites and lateritic soil and the potential use of the dynamic cone penetrometer. **International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ISSMGE**, Webinar Series, 2015.
- APAC, Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Boletim do clima: síntese climática**. Vol. 7. Nº 12. De dezembro de 2019. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/arquivos_portal/boletins/Boletim%20climatico%20-%20dezembro.pdf>. Acesso em: 17/03/2020.
- ARA, Inc., ERES Consultants Division. (2004). **Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures (Final report, NCHRP Project 1-37A)**. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies. Retrieved September 10, 2014, from www.trb.org/mepdg.
- ARAÚJO, A. G. ALVES, E. C. SOUZA, J. C. SILVA, I. L. A. CORRECHEL, V. Análise da determinação granulométrica de um latossolo por dois métodos: densímetro e granulômetro a laser. **Revista Mirante**. Anápolis (GO), v. 10, n. 5a, dez. 2017.
- ASTM D2487-17. **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. ASTM, West Conshohocken (2017).
- ASTM D3282-15. **Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. ASTM, West Conshohocken (2015).
- ASTM D5298 – 16. **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. ASTM, West Conshohocken (2016).
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BATISTA, I. M. **Comportamento mecânico de dois solos típicos da região de Viçosa-MG, para fins de utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa – UFV. Minas Gerais, 2001.
- BERNUCCI, L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1995.
- BERNUCCI, L. B. MOTTA, L. M. G. CERATTI, J. A. P. SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras - Abeda, 2006.

BOSZCZOWSKI, R. B. LIGOCKI, L. P. Características Geotécnicas dos solos residuais de Curitiba e RMC. **Twin Cities – Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba**. Cáp. 8. ISBN:978-85-86438-40-0. São Paulo: D’Livros, 2012.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, publicação 719. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. 274p. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, Norma nº 098 – ES. **Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço**. 07 p. Rio de Janeiro, 2007.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, Norma nº 179. **Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. 20 p. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, Norma nº 134. **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. 20 p. Rio de Janeiro, 2018.

BUDNY, J. **Verificação do Potencial de Estabilização de um Solo Laterítico com uso de Ácido Fosfórico, Ácido Cítrico e Cinza de Casca de Arroz**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2018.

BUTWALL, Mani; RANKA, Pragma; SHAH, Shuchi. Python in Field of Data Science: A Review. **International Journal of Computer Applications**. Volume 178 – No. 49, 2019.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. BARBOSA, M.C. MENDONÇA, R. M. G. FARIAS, W. M. CARSOSE, F. B. F. Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados. **Solos não saturados no contexto geotécnico**, cap. 3, p. 39-78. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS. São Paulo, 2015a.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. REZENDE, L. R. DE. CARDOSO, F. B. F. LUCENA, L. C. F. L. GUIMARAÃES, R. C., VALENCIA, Y. G. Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations. **Transportation Geotechnics**. 5:3–19, 2015b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.004>.

CAMAPUM de CARVALHO, J.; L. R. de REZENDE; F. B. F. CARDOSO; L. C. F. L. LUCENA; R. C. GUIMARÃES e Y. G. VALENCIA (2015b) Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations. **Transportation Geotechnics**. 5:3–19. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.10.004.

CARVALHO, C. A. B. **Estudo da contribuição das deformações permanentes das camadas de solo na formação das trilhas-de-roda num pavimento flexível**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1997.

CASTRO, B. A. C. (2002). **Caracterização Geotécnica de Solos da Região Central de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

CHAVES, F. J. **Caracterização geotécnica de solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2000.

CHEN, C. HÄRDLE, W. K. UNWIN, A. **Handbook of Data Visualization**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 936 p. 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-33037-0.

CHESWORTH, Ward *et al.* Tropical soils. **Encyclopedia of Soil Science**, [s.l.], p.793-803, 2008. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_607.

CHU, X. (2020) A Review on the Resilient Response of Unsaturated Subgrade Soils. **Advances in Civil Engineering**. Volume 2020, Article ID 7367484, 11 pages. DOI: 10.1155/2020/7367484.

CHU, X. (2020) A Review on the Resilient Response of Unsaturated Subgrade Soils. **Advances in Civil Engineering**. Volume 2020, Article ID 7367484, 11 pages. DOI: 10.1155/2020/7367484.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Boletim Estatístico – CNT – outubro de 2021**. CNT, Brasília, 2021. Disponível em: < <https://www.cnt.org.br/boletins>>. Último acesso em: 12/11/2021.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. CNT: SEST SENAT, Brasília, 2019.

COSTA, J. H. **Caracterização Geotécnica dos solos finos, da faixa litorânea e tabuleiros costeiros do estado de Sergipe, visando a aplicação em pavimentos de rodovias de baixo volume tráfego**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, 2006.

COSTA, J. H. MOTTA, L. M. G. Caracterização Geotécnica dos solos finos, do litoral do Estado de Sergipe, visando aplicação em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego. **Revista Pavimentação**, p. 45- 57, ano II, 2007.

COUTINHO, R. Q. e SEVERO, R. N. F. **Investigação Geotécnica para Projeto de Estabilidade de Encostas**. 5.^a Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, São Paulo, 2009.

COUTINHO R.Q. e SOUSA, M. A. S. (2021) Analysis of the Applicability of USCS, TRB and MCT Classification Systems to the Tropical Soils of Pernambuco, Brazil, for Use in Road Paving. In: Tutumluer E., Nazarian S., Al-Qadi I., Qamhia I.I. (eds) **Advances in Transportation Geotechnics IV**. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 164. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77230-7_29.

CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. ISBN 978-85-7499-141-2. Recife, 2014.

DALLA ROZA, A. E. **Contribuição para projeto mecanístico - empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso**. Dissertação de Mestrado, Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2018.

DALLA ROZA, A. E. MOTTA, L. M. G. Classificação MCT com relação ao comportamento resiliente e deformação permanente em solos do Mato Grosso. **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG**. Bahia, 2018.

DAWSON A. R. E WELLNER F. (1999). **Plastic behavior of granular materials**. Final Report ARC Project 933. University of Nottingham.

DAS, B. M. **Advanced Soil Mechanics**. 3ª Edição. Taylor & Francis: Nova York, 2008.

DELGADO, A. K. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do distrito federal para uso na pavimentação rodoviária**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2007.

DELGADO, B. G. **Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, 2012.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 164/13 – Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 2013.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 172/16 – Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 2016.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 256/94 – Solos compactados em miniatura – determinação da perda de massa por imersão**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 258/94 – Solos compactados em miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 051/94 – Solos – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 122/94 – Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 082/94 – Solos – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 093/94 – Solos – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 213/94 – Solos – determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Método de Ensaio - ME 041/94 – Solos – preparação de amostras para caracterização**. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Manual de Utilização do programa MeDiNa. 2020.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Instrução de Serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa**. 2021.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco**. Boletim de Pesquisa n. 11. ISSN 1517-5219. Embrapa Solos, 2000.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise do solo**. 3ª ed. 573 p. Brasília, 2017.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos - SiBCS**. 2020. Disponível em <www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em 25/02/2020.

FAO, Food and Agriculture Organization of United Nation. **World Reference Base for Soil Resources 2014**: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, 193 p. Rome, 2015.

FARIAS, W. M. **Processos Evolutivos de Intemperismo Químico e Sua Ação no Comportamento Hidromecânico de Solos do Planalto Central**. Tese de Doutorado. 263 p. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2012.

FERREIRA, J. G. H. M. **Elaboração e Análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2002.

FERREIRA, J. G. H. M. **Tratamento de dados geotécnicos para predição de módulos de resiliência de solos e britas utilizando ferramentas de data mining**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2008.

FEUERHARMEL, C., GEHLING, W. Y. Y. BICA, A. V. D. The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils. v. 29, n. 5, p. 419–425. **Geotechnical Testing Journal**, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ14004>.

FORSYTH, D. **Probability and Statistics for Computer Science**. Springer International Publishing AG, 2018.

FRANK, I. E.; TODESCHINI, Roberto. **The data analysis handbook**. Elsevier, 1994.

FREDLUND, D. G. RAHARDJO, H. FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2012.

FREDLUND, D. G.; D. SHENG and J. ZHAO (2011) Estimation of soil suction from the soil water characteristic curve. **Can. Geotech. J.** 48: 186–198. DOI:10.1139/T10-060.

FREITAS, J. B.; L. R. REZENDE e G. F. N. GITIRANA JR. (2020) Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. **Engineering Geology**. v. 270, 105580. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105580.

GEHLING, W. Y. Y. *et al.* Estruturas de Pavimento no contexto dos solos não saturados. **Solos não saturados no contexto geotécnico**, cap. 25, p. 687-731. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS. São Paulo, 2015.

GIDIGASU, M. D. **Laterite soil engineering: pedogenesis and engineering principles**. ISBN 0-444-41283-2. Elsevier, Amsterdam, 1976.

GITIRANA Jr., G. de F. N. FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Vol. 130, n. 2. 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(209).

GRUS, J. Data Science do Zero. Tradução de: **Data Science From Scratch: First Principles with Python**. traduzido por Welington Nascimento. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. *et al.* **Relatório Critérios de Dimensionamento - RT 03/15 - LIF**. Projeto IME/Vale: Estudos para Revisão de Critérios de Projeto da Via Permanente. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2015.

GUIMARÃES, A. C. R. MOTTA, L. M. G. CASTRO, C. D. Permanent Deformation Parameters of Fine – Grained Tropical Soils. **Road Materials and Pavement Design**. Vol.20(7), pp.1664-1681, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473283>.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecanístico Empírico para Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA FILHO, J. C. e CASTRO, C. D. Contribution to the use of alternative material in heavy haul railway sub-ballast layer, **Transportation Geotechnics**, Volume 30, 2021, 100524, ISSN 2214-3912, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100524>.

HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., and TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Bookman editora, 2009.

HAN, Z., AND VANAPALLI, S. K. (2016). State-of-the-Art: Prediction of resilient modulus of unsaturated subgrade soils. **International Journal of Geomechanics**, 16(4), 04015104, DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000631.

HARDLE, W. K. SIMAR, L. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. Fourth Edition. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2015.

HARRIS, C.R., MILLMAN, K.J., VAN DER WALT, S.J. *et al.* Array programming with NumPy. **Nature** 585, 357–362 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

HASTIE, Trevor; TIBSHIRANI, Robert; FRIEDMAN, Jerome. **The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction**. Springer Science & Business Media, 2009.

HEIBERGER, R. M.; HOLLAND, B. **Statistical Analysis and Data Display An Intermediate Course with Examples in R**. Springer, 2015.

HICKS, R.G. AND C. L. MONISMITH (1970) **Factors influencing the resilient properties of granular materials**. Thesis submitted to the University of California. Berkeley. Available in: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1971/345/345-002.pdf>>. Accessed in: 11/30/2020.

HUNTER, J. D. "Matplotlib: A 2D Graphics Environment". **Computing in Science & Engineering**, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. 3ª ed. 430 p. ISSN 0103-9598; n. 4. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

KERN, C.; GEHLING, W. Y. Y. AND NÚÑEZ, W. P. (2021) Analysis of the resilience modulus of a subgrade soil front of humidity variations. In **PanAm-UNSAT 2021**. DOI: 10.1051/mateconf/202133703013.

KING, H. M. **Limonite: An amorphous iron oxide used as an ore of iron and as a pigment for thousands of years**. Disponível em: <https://geology.com/minerals/limonite.shtml>. Acesso em: 07/05/2020.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LIMA, C. D. A. **Avaliação da deformação permanente de materiais de Pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

LIMA, C. D. A., MOTTA, L. M. G., ARAGÃO, F. T. S., GUIMARÃES, A. C. R. Mechanical Characterization of Fine-Grained Lateritic Soils for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. **Journal of Testing and Evaluation**. ASTM International, West Conshohocken, 2019. DOI: 10.1520/JTE20180890.

LIMA, C. D. A. MOTTA, L. M. G. GUIMARÃES, A. C. R. Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaiss para uso em base e sub-base de pavimentos. **Revista Transportes**. Volume 25, Número 2, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1262.

LIMA, C. D. A. MOTTA, L. M. G. Study of Permanent Deformation and Granulometric Distribution of Graded Crushed Stone Pavement Material. **Procedia Engineering**. Volume 143, Pages 854–861, 2016.

LOPES, L. S. **Análise experimental do comportamento hidráulico e Mecânico de um pavimento ferroviário**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2017.

MARANGON, M. MOTTA, L. M. G. Valores Típicos para Módulos de Resiliência de Solos Lateríticos Argilosos da Zona da Mata de Minas Gerais. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG**. Curitiba, 2006.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2004.

MARINHO, Fernando A. M.; STUERMER, Mônica M. The Influence of the Compaction Energy on the SWCC of a Residual Soil. **Advances In Unsaturated Geotechnics**, [s.l.], p. 125-141, 24 jul. 2000. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/40510\(287\)8](http://dx.doi.org/10.1061/40510(287)8).

MARSON, M. **Análise Crítica da Classificação MCT para Solos Tropicais**. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª edição. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2015.

MEDRADO, W. A. (2009). **Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação. UFOP.

MEDRI, W. **Análise Exploratória de Dados**. Notas de aula, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2011.

METZ, J. **Interpretação de cluster gerados por algoritmos de clustering hierárquico**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, USP. 2006.

MILLMAN, K. J. e M. AIVAZIS. Python for Scientists and Engineers. *Computing in Science & Engineering*. vol. 13, no. 2, pp. 9-12, March-April 2011, DOI: 10.1109/MCSE.2011.36.

MOREIRA, M. R. P. **Uma abordagem da gestão da infraestrutura urbana versus a operação do sistema de transporte coletivo: a necessidade de uma visão holística do processo**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2021.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. Saraiva Educação SA, 2017.

MORIN, W. J. TODOR, P. C. **Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics**. Instruction Manual, v. 2, 92 p. Lyon Associates, Baltimore, Maryland, USA e Road Research Institute, Rio de Janeiro, 1976.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

MUKAKA, M. A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*. 2012 Sep; 24(3): 69–71.

NASCIMENTO, G. V. S. E RIBEIRO, E. P. Balanço hídrico climatológico anual da microrregião de Recife, Pernambuco. **Interconexões: Saberes e Práticas da Geografia 2**. Capítulo 7. Editora Atena. 2020. DOI: 10.22533/at.ed.1192026117.

NOGAMI, J. S. VILLIBOR D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor: São Paulo, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00881739>.

NOGAMI, J. S. VILLIBOR, D. F. Use of lateritic fine-grained soils in road avement base courses. *Geotechnical and Geological Engineering*, n. 9, p. 167-182, 1991.

NORBACK, C. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA, L. E. **Caracterização geotécnica de latossolos do Vale do Paraíba para finalidades viárias**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São Paulo, 1991.

OSTEN, F. B. V. D. **Avaliação de quatro solos tropicais para sublastro da Estrada de Ferro Carajás**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro, 2012.

PEDREGOSA, Fabian *et al.* Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

PENNA DE CARVALHO, J. P. Limite de Liquidez em solos tropicais. p. II-20 a II-27. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEF**, 1951-1998.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª Edição. Oficina de Textos, 2006.

PRESA, E. P. Relatório geral da 7ª seção técnica: solos tropicais, especiais (expansivos, colapsíveis e dispersivos) e pavimentos. **Anais do X COBRAMSEF**, ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos), 1951 a 1998.

PREZOTTI, L. C. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. 104 p. Incaper: Espírito Santo, 2013.

QIAN, J., CHEN, X., LING, J., AND LI, J. (2021). Estimating the Contribution of Suction on the Resilient Modulus of Subgrade Soils Using Capillary Saturation. **Journal of Transportation Engineering**, Part B: Pavements, 147(1), 04020081, DOI: 10.1061/JPEODX.0000244.

REZENDE, D. S. V. **Comportamento mecânico de alguns tipos de solo através de ensaios triaxiais de cargas repetidas para projetos de pavimentos rodoviários**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2009.

RIBEIRO, M. M. P. **Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

RODRIGUES, J. K. G. *et al.* Universal Classification for the Use of Lateritic Soils in Low Cost Durable Pavements. **Soils and Rocks**, v. 36, n. 3, p. 241-249, São Paulo, 2013.

SALOUR, F. e ERLINGSSON, S. (2015) Resilient modulus modelling of unsaturated subgrade soils: laboratory investigation of silty sand subgrade, **Road Materials and Pavement Design**, 16:3, 553-568, DOI: 10.1080/14680629.2015.1021107.

SANTOS, J. D. **Contribuição ao estudo dos solos lateríticos granulares como camada de pavimento**. Tese de Doutorado, Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1998.

SEKI, K. **SWRC Fit - A nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure**. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4: 407-437. 2007.

SILVA FILHO, J. C. **Contribuição para o Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Ferroviários com Foco nos Solos Tropicais**. Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro. 2018.

SILVA, B A. **Aplicação das metodologias MCT e Resiliente a solos finos do centro-norte do Mato Grosso**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia - IME. Rio de Janeiro, 2003.

SOBRAL, L. F. BARRETO, M. C. V. SILVA, A. J. ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, 2015.

SOUSA, M. A. S. **Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento rodoviário**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2016.

SOUSA, M. A. S.; COUTINHO, R. Q. & MOTTA, L. M. G. (2021) Analysis of the unsaturated behaviour of compacted lateritic fine-grained tropical soils for use in transport

infrastructure, **Road Materials and Pavement Design**, DOI: 10.1080/14680629.2021.2009008.

Sousa, M. A. S.; Motta, L. M. G. e Coutinho, R. Q. (2021) Análise da aplicabilidade de solos tropicais finos em estruturas de pavimento flexível utilizando o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). **Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)**. 1ª Edição – 2021, ISBN: 978-65-89319-01-6.

SUNIL, B. M.; KRISHNAPPA, H. Effect of Drying on the Index Properties of Lateritic Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s.l.], v. 30, n. 4, p.869-879, 14 mar. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-012-9504-7>.

SVENSON, M. **Ensaaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

TAKEDA, M. C. PARREIRA, A. B. GIGANTE, A. C., MOTTA, L. M. G. Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais frente à variação de umidade pós-compactação. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG**. Curitiba, 2006.

THULER, R. B. (2005) **Estudo de Solos do Estado do Rio de Janeiro para Aplicação em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego** (Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

VANDERPLAS, J. **Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data**. Estados Unidos: O'Reilly Media, 2016.

VARGAS, M. O uso dos limites de Atterberg na classificação de solos tropicais. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEG**. Olinda/Recife, 1982.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 276p., 1988.

VILLIBOR D. F. NOGAMI, J. S. CINCERRE, J. R. SERRA, P. R. M. ZUPOLINNI NETO, A. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. 196 p. 2ª Edição. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VILLIBOR D. F. NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. 291 p. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com uso de solos tropicais**. Curso OnLine. Egis Brasil, 2017.

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E. *et al.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**. **17**, 261–272 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.

WERK, S. M. S. **Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente dos solos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2000.

WERKMEISTER, S. **Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions**. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Dresden, 2003.

YAO, Y.; J. ZHENG; J. ZHANG; PENG, J. AND J. LI (2018) Model for predicting resilient modulus of unsaturated subgrade soils in South China. **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol. 22, no. 6, pp. 2089–2098. DOI: 10.1007/s12205-018-1703-1.

ZAGO, J. P. A. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria, RS. 2016.

ZHANG, J.; J. PENG; L. ZENG; J. LI AND F. LI (2021b) Rapid estimation of resilient modulus of subgrade soils using performance-related soil properties, **International Journal of Pavement Engineering**, 22:6, 732- 739, DOI: 10.1080/10298436.2019.1643022.

ZHANG, JIAN.; S. ZHANG AND T. XU, (2020) Individual Effect of Matric Suction on Soil Microstructure and Hydraulic Conductivity. **KSCE Journal of Civil Engineering**. 24(5):1448-1459. DOI: 10.1007/s12205- 020-1381-7.

APÊNDICE A – RELATÓRIOS DE CAMPO - COLETA DE AMOSTRAS DEFORMADAS

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	01	Data:	20/03/2019
Município:	GOIANA-PE	Bairro:	
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Amarelo Distrófico
Coordenadas:	-7.6022335, -34.9791729		
Contatos do local:	Não se aplica. Talude na BR101 (Km 12) - Rod. Prestes Maia, Goiana - PE, 55900-000		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:		Visita em campo	
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,15	Seco	Cobertura vegetal com várias raízes finas	Ponto de coleta – 1,10m de profundidade 
0,15 – 2,20	Seco	Solo argilo-arenoso amarelo com raízes finas	
2,2 -	Seco	Aparentemente mesmo solo	
Visão geral			
			
Observações:			

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	02	Data:	20/03/2019	
Município:	ARAÇOIABA-PE	Bairro:		
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Latossolo Amarelo Distrófico	
Coordenadas:	-7.786700, -35.096100			
Contatos do local:	Não se aplica. Talude na PE-041, Araçoiaba - PE, 53690-000			
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo			
Descrição do perfil				
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto	
0,0 – 0,20	Seco	Cobertura vegetal com muitas raízes finas	Ponto de coleta – 1,80m de profundidade 	
0,20 – 3,10	Seco	Solo areno-argiloso amarelo, com presença de poucos grãos pedregulhosos com indicativo de concreção ferruginosa. Ainda com presença de pequenas raízes finas.		
3,10 -	Seco			
Visão geral				
				

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	03	Data:	18/03/2019	
Município:	Ilha de Itamaracá-PE	Bairro:	Pilar	
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	
Coordenadas:	-7.7950813,-34.8433398			
Contatos do local:	Não se aplica. Talude na R. Barra Mansa, 242-306 - Pilar, Ilha de Itamaracá - PE, 53900-000			
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo			
Descrição do perfil				
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto	
0,0 – 0,20	Seco	Cobertura vegetal com poucas raízes curtas	Ponto de coleta – 2,90m de profundidade 	
0,20 – 3,90	Seco	Solo amarelo argilo-arenoso, úmido, média coesão.		
3,90 -	Seco	Aparentemente mesmo solo		
Visão geral  Altura total do ponto mais alto da encosta em relação à rua é de aproximadamente 10 metros				
Observações: Há presença de uma sutil linha de seixo à aproximadamente 2,50 m de profundidade (do topo do talude).				

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	04	Data:	18/03/2019
Município:	Igarassu-PE	Bairro:	Encanto Igarassú
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico
Coordenadas:	-7.8421533, -34.8573302		
Contatos do local:	Não se aplica. Talude na PE-014 - Encanto Igarassú, Igarassu - PE, 53620-250		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,30	Seco	Cobertura Vegetal, solo escuro raízes finas e longas	Ponto de coleta – 2,10m de profundidade 
0,30 – 3,30	Seco	Solo argilo-arenoso vermelho amarelo (Alaranjado) com raízes finas e alongadas e também com concreções ferruginosas	
3,30 -			
Visão geral			
			
Observações: O talude tem um patamar no seu topo que dar acesso a um outro talude que dá continuidade à encosta. Devido à dificuldade de acesso a esse talude superior, a coleta foi feita no talude junto à rodovia. Aparentemente mesmo solo do talude superior.			

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº da amostra:	05	Data:	10/07/2018
Município:	Paulista-PE	Bairro:	Murueira
Formação geológica:	F. Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico
Coordenadas	25 M	9118213,79 S	0290677,44 E
	-7.972881°, -34.899030°		
Contatos do local:	Sr. Ivaldo (operador da escavadeira) e Sr. Falcão (proprietário)		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	DNPM – Processo 840196/2015 - Jazida de argila licenciada para uso na construção civil		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	NA	Descrição	Foto
0,0 – 0,10	Seco	Cobertura vegetal com presença de raízes alongadas, porém pouco orgânico	Ponto de coleta – 1,00m de profundidade 
0,10 – 2,0	Seco	Solo areno-argiloso amarelo	
2,0 -	Seco	Solo arenoso branco	
Visão geral			
			

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	06	Data:	11/03/2019
Município:	Camaragibe -PE	Bairro:	
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Amarelo Distrocoeso
Coordenadas:	-7.9989573,-34.9994796		
Contatos do local:	Não se aplica. Talude da Estrada do Lixão, Camaragibe - PE, 54789-750		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,30	Seco	Cobertura vegetal com bastante raiz, algumas grossas e longas	Ponto de coleta – 1,50m de profundidade 
0,30 – 3,60	Seco	Solo arenoso-argiloso amarelo com poucas raízes	
3,60 -			
Visão geral 			

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	07	Data:	11/03/2019
Município:	São Lourenço da Mata -PE	Bairro:	
Formação geológica:	Complexo Salgadinho (Metagranito)	Unidade Pedológica:	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico
Coordenadas:	-7.975538, -35.034169		
Contatos do local:	Não se aplica. Talude da Rua Alzira Amaral Peixoto, 186-1258, São Lourenço da Mata - PE		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,30	Seco	Cobertura vegetal com raízes longas	Ponto de coleta – 2,00m de profundidade 
0,30 – 4,00	Seco	Solo areno-argiloso vermelho-amarelo com poucas raízes longas	
4,00 -			
Visão geral 			

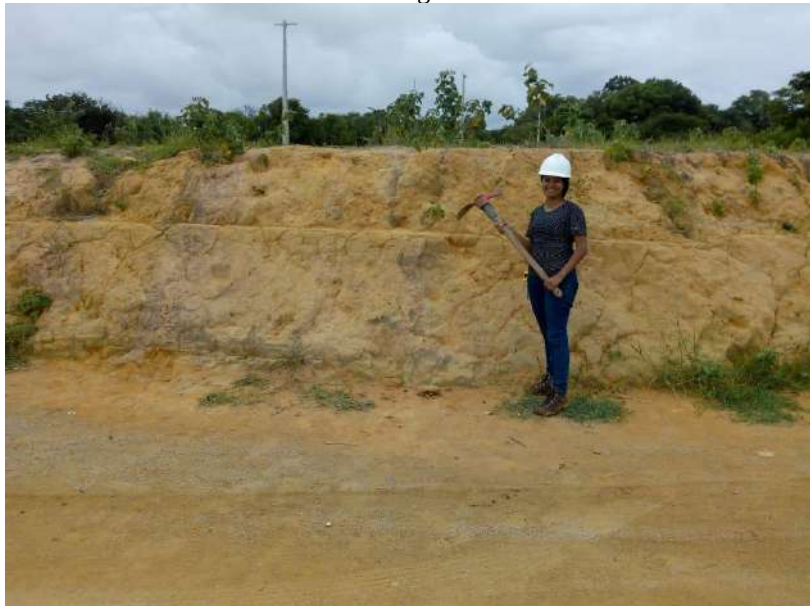
RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	08	Data:	11/03/2019
Município:	Recife -PE	Bairro:	Guabiraba
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico
Coordenadas:	-7.9608592,-34.9174720		
Contatos do local:	Talude de um “caixão” feito em propriedade particular. Fruto da extração de material como jazida. Visita autorizada pelo proprietário do local.		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,20	Seco	Cobertura vegetal com raízes curtas	Ponto de coleta – 1,45m de profundidade 
0,20 – 2,45	Seco	Solo argiloso vermelho-amarelo com presença de pequenas raízes	
2,45 -		Aparentemente o mesmo solo	

Visão geral



RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	09	Data:	12/03/2019
Município:	Jaboatão dos Guararapes -PE	Bairro:	
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Área urbana
Coordenadas:	-8.1549456,-34.9283903		
Contatos do local:	Talude em corte do Monte dos Guararapes (parte do Parque Histórico Nacional dos Guararapes)		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,05	Seco	Cobertura vegetal praticamente sem raízes (pouquíssima vegetação)	
0,05 – 1,70	Seco	Solo areno-argiloso amarelo, coeso.	
1,70 -			
Visão geral			
			
Observações: Há uma linha à 0,5 m de profundidade, porém tanto acima quanto abaixo é o mesmo solo. Toda região do Monte Guararapes possui grande abundância deste solo.			

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	10	Data:	12/03/2019
Município:	Jaboatão dos Guararapes -PE	Bairro:	Muribeca
Formação geológica:		Unidade Pedológica:	
Coordenadas:	-8.147603,-34.950908		
Contatos do local:	Talude em corte na jazida da Muribeca.		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,60	Seco	Cobertura vegetal com muitas raízes	Ponto de coleta – 1,10m de profundidade 
0,60 – 2,20	Seco	Solo amarelo/laranja areno-argiloso com média coesão	
2,20 -			
Visão geral 			
Observações: Ao longo de vários pontos do talude haviam presença de seixo rolado. A amostra foi coletada num ponto onde não haviam os mesmos visivelmente.			

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	11	Data:	22/03/2019
Município:	CABO DE S. AGOST.-PE	Bairro:	
Formação geológica:	Formação Ipojuca	Unidade Pedológica:	Argissolo vermelho-amarelo ou amarelo distrófico
Coordenadas:	-8.245080, -35.008151		
Contatos do local:	Não se aplica. Talude de jazida junto À BR 101.		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,0 – 0,15	Seco	Cobertura vegetal, pouquíssimas raízes	Ponto de coleta – 4,50m de profundidade 
0,15 – 6,50	Seco	Solo Arenoso-argiloso amarelo, coeso.	
6,5 -	Seco		

Visão geral



RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

Nº Amostra:	12	Data:	13/03/2019	
Município:	Cabo de S. Agostinho -PE	Bairro:	Suape	
Formação geológica:	Formação Algodoads	Unidade Pedológica:	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	
Coordenadas:	-8.348985, -34.957827			
Contatos do local:	Talude de corte de encosta, atrás do Minha Casa Minha Vida			
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo			
Descrição do perfil				
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto	
0,00 – 0,20	Seco	Cobertura Vegetal	Ponto de coleta – 1,20m de profundidade 	
0,20 – 2,30	Seco	Solo arenoso laranja, coesão média, sem presença de raízes ponto de coleta		
2,30 – 4,00	Seco	Solo fino rosado bastante erodível		
Visão geral				
				

RELATÓRIO DE COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA

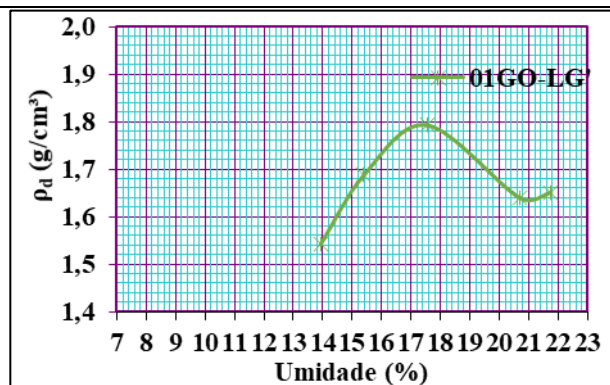
Nº Amostra:	13	Data:	13/03/2019
Município:	Ipojuca -PE	Bairro:	
Formação geológica:	Formação Barreiras	Unidade Pedológica:	Argissolo Amarelo/Vermelho-Amarelo/Vermelho-Amarelo Plintítico
Coordenadas:	-8.522147,-35.028575		
Contatos do local:	Talude de próximo a PE-051		
Fonte de obtenção do ponto de coleta:	Visita em campo		
Descrição do perfil			
Prof. (m)	Nível da Água	Descrição	Foto
0,00 – 0,15	Seco	Cobertura Vegetal pouquíssimas raízes	Ponto de coleta – 2,00m de profundidade 
0,15 – 10,00	Seco	Solo areno-argiloso amarelo com grande coesão	
10,00 –	Seco		
Visão geral			
			
Observações: Na lateral, a espessura do solo coletado vai diminuindo, dando lugar ao horizonte saprolítico composto por solo argiloso branco/rosado e com alto grau de erodibilidade.			

APÊNDICE B – DADOS DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS

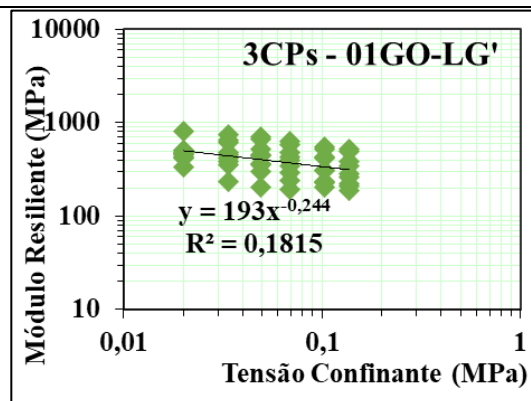
AMOSTRA	GRANULOMETRIA (c/defloculante)						Total	%Pass. #2,00mm (nº10)	%Ret. #2,00mm (nº10)
	%Argila ($\phi < 0,005$ mm)	%Silte ($0,005 \text{ mm} < \phi < 0,074\text{mm}$)	%Areia Fina ($0,075 \text{ mm} < \phi < 0,425 \text{ mm}$)	%Areia Média ($0,425 \text{ mm} < \phi < 2 \text{ mm}$)	%Areia Grossa ($2 \text{ mm} < \phi < 4,75 \text{ mm}$)	%Pedregulho ($4,75 \text{ mm} < \phi < 75 \text{ mm}$)			
01 - GOI	50,17	14,19	25,34	9,95	0,28	0,06	100	99,66	0,34
02 - ARA	47,83	19,00	18,66	11,24	1,15	2,12	100	96,73	3,27
03 - ITA	32,28	5,60	55,85	6,14	0,10	0,02	100	99,88	0,12
04 - IGA	38,81	6,62	36,17	17,34	0,84	0,22	100	98,95	1,05
05 - PAU	41,69	4,82	31,50	18,23	2,10	1,65	100	96,24	3,76
06 - CAM	42,55	5,15	31,06	20,62	0,55	0,07	100	99,38	0,62
07 - SLM	46,53	13,60	27,27	12,31	0,29	0,00	100	99,71	0,29
08 - REC	47,01	19,30	21,75	11,54	0,32	0,08	100	99,61	0,39
09 - MGU	41,99	5,70	35,32	16,73	0,25	0,00	100	99,75	0,25
10 - MUR	40,31	8,07	29,94	20,16	0,77	0,75	100	98,48	1,52
11 - CAB	45,45	6,84	25,94	20,85	0,88	0,05	100	99,07	0,93
12 - SUA	34,92	4,44	33,58	25,71	0,94	0,42	100	98,64	1,36
13 - IPO	44,69	8,40	25,50	20,50	0,86	0,05	100	99,09	0,91

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE COMPACTAÇÃO, MÓDULO RESILIENTE E DEFORMAÇÃO RESILIENTE

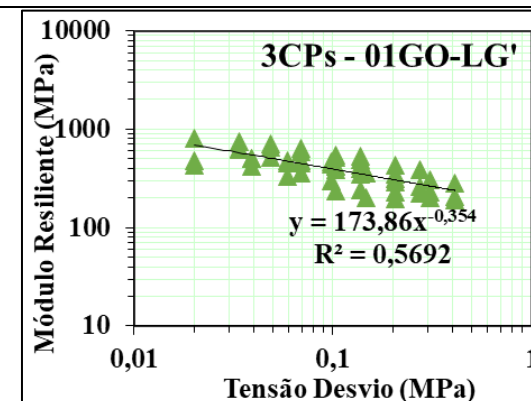
AMOSTRA 01GO-LG'



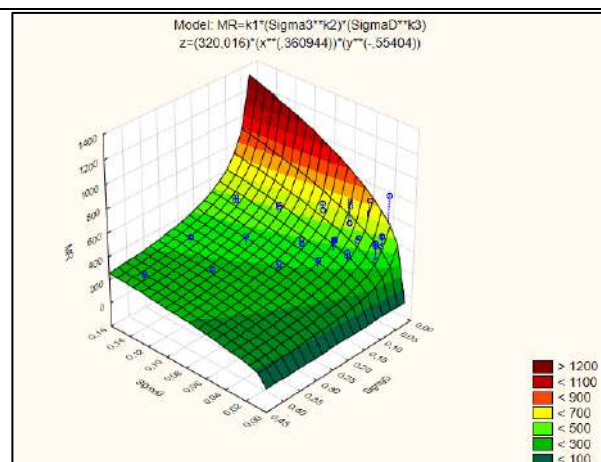
Curva de Compactação – Energia Intermediária



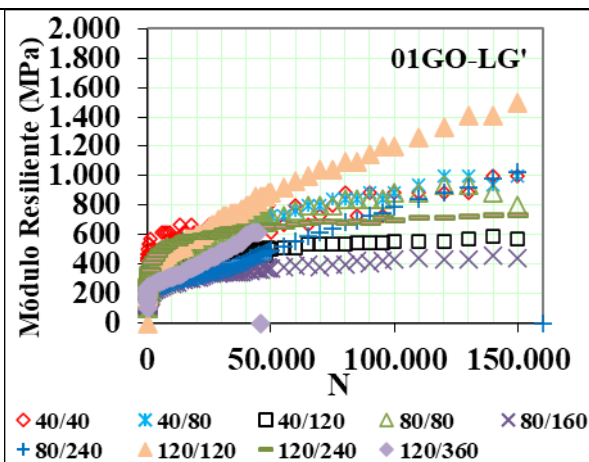
Modelo MR em função da T. Confinante



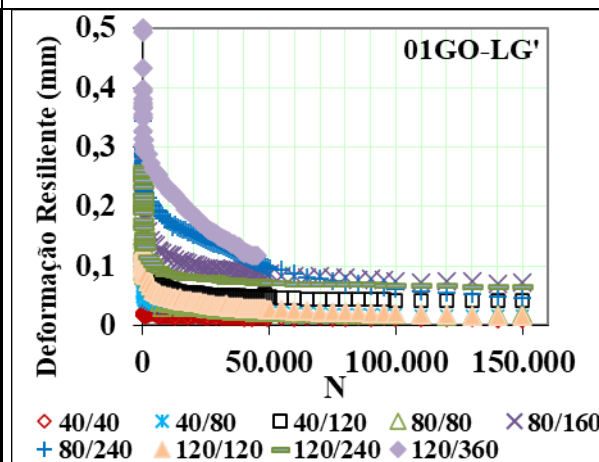
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

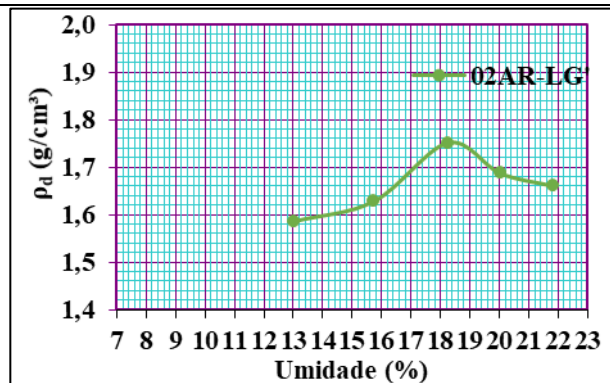


MR obtido através do ensaio de DP

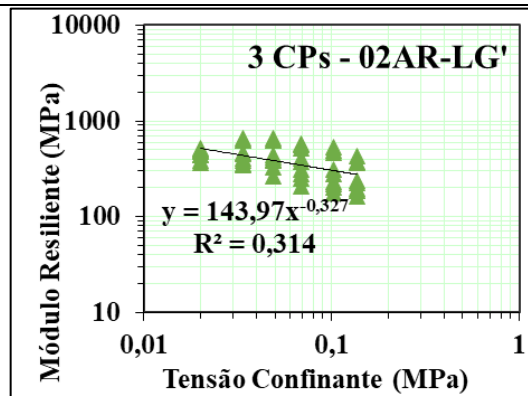


Deformação Resiliente

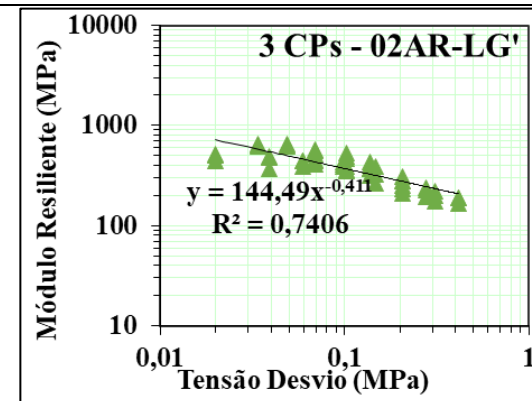
AMOSTRA 02AR-LG'



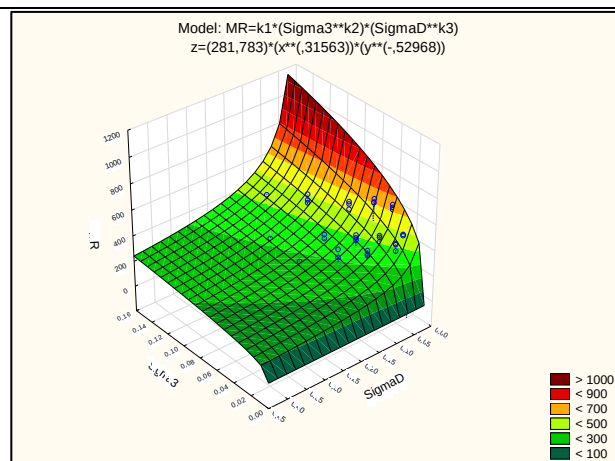
Curva de Compactação – Energia Intermediária



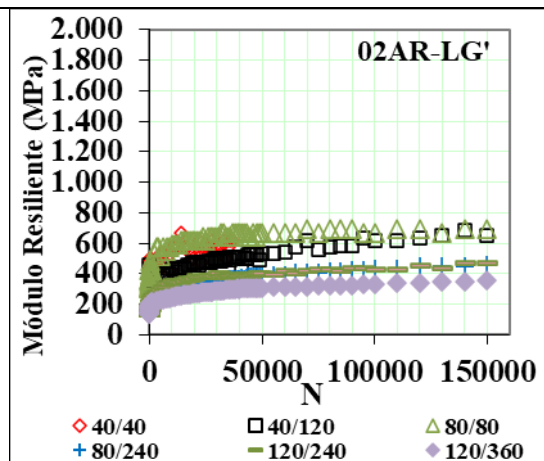
Modelo MR em função da T. Confinante



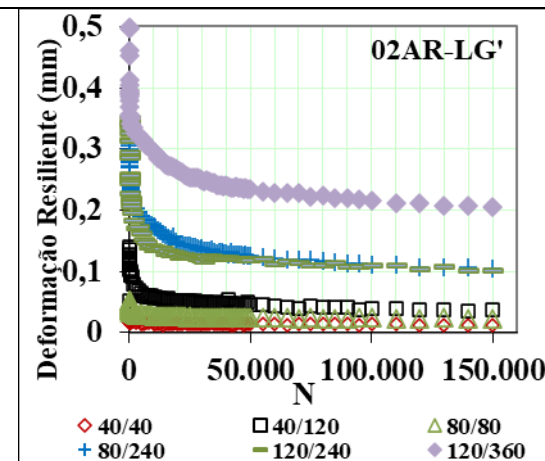
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto – 3 Corpos de prova

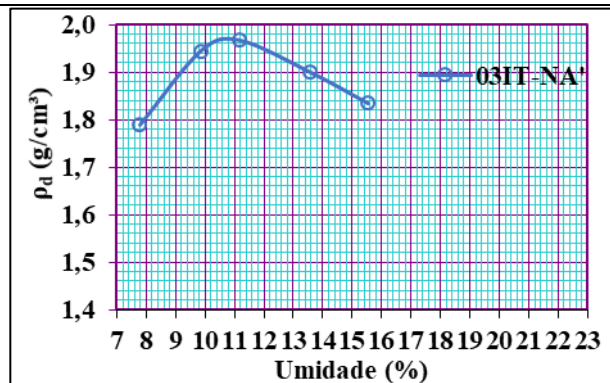


MR obtido através do ensaio de DP

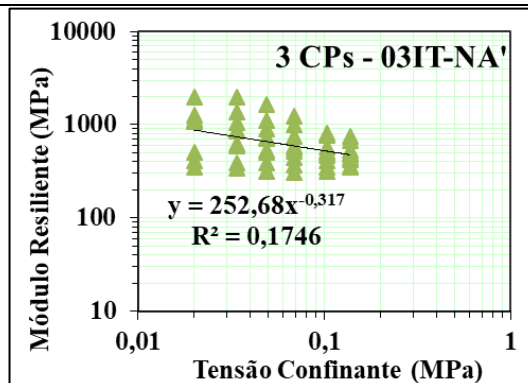


Deformação Resiliente

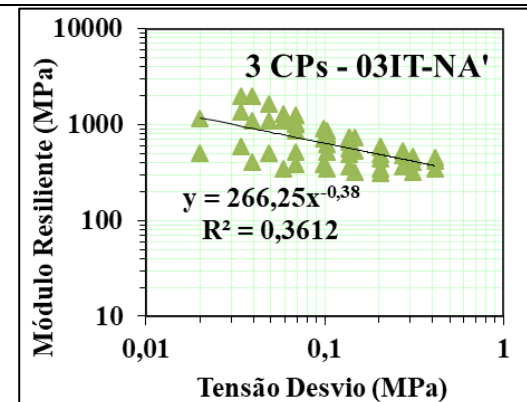
AMOSTRA 03IT-NA'



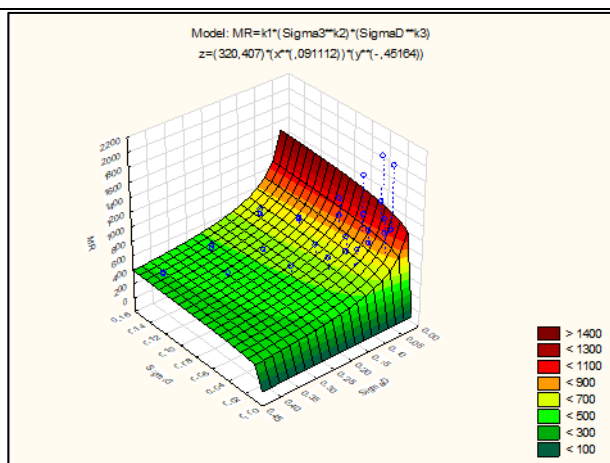
Curva de Compactação – Energia Intermediária



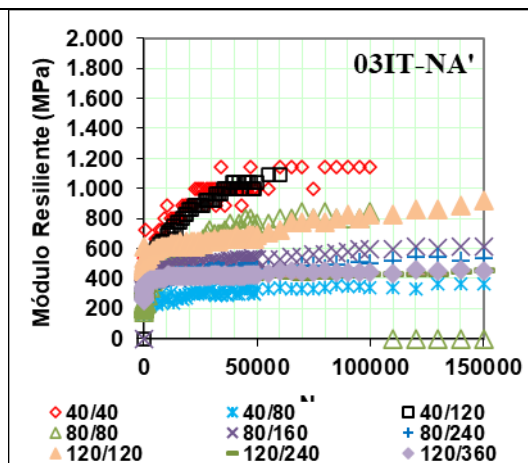
Modelo MR em função da T. Confinante



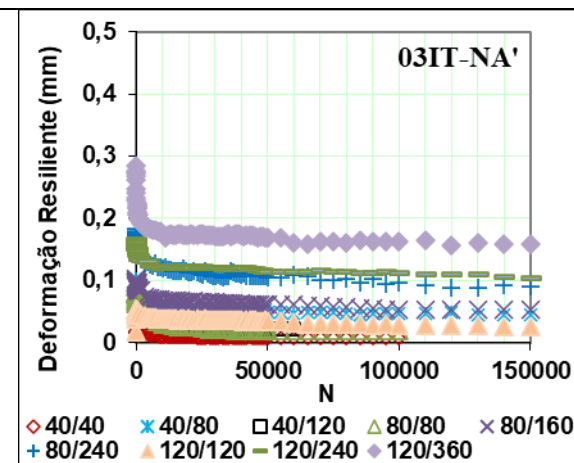
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

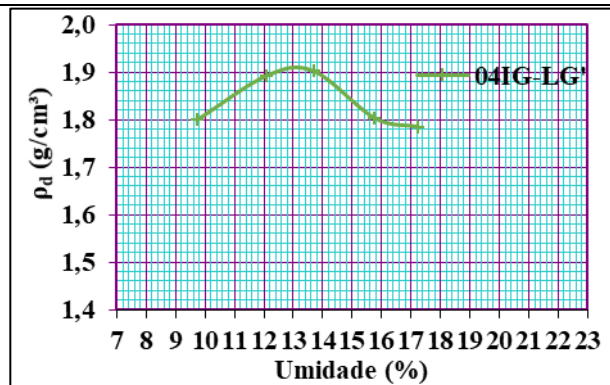


MR obtido através do ensaio de DP

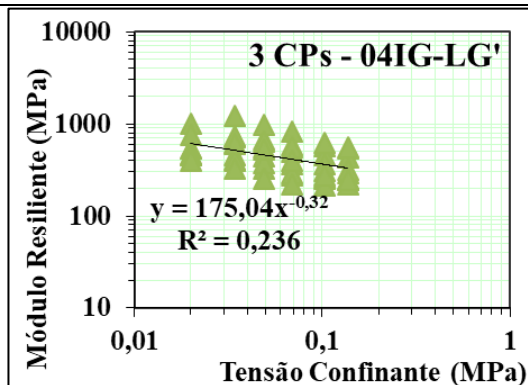


Deformação Resiliente

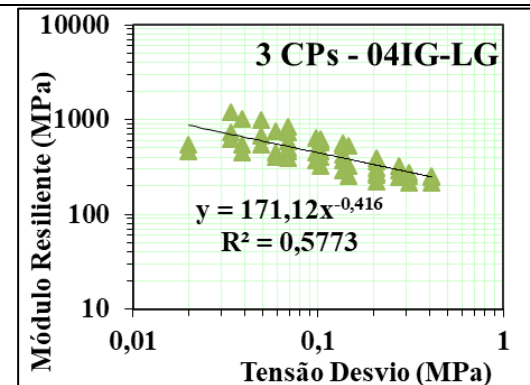
AMOSTRA 04IG-LG'



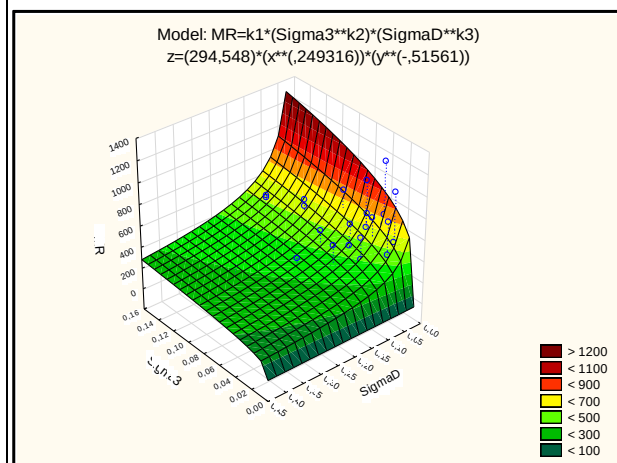
Curva de Compactação – Energia Intermediária



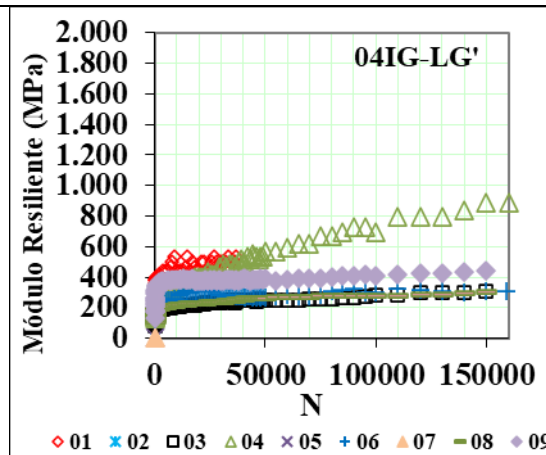
Modelo MR em função da T. Confinante



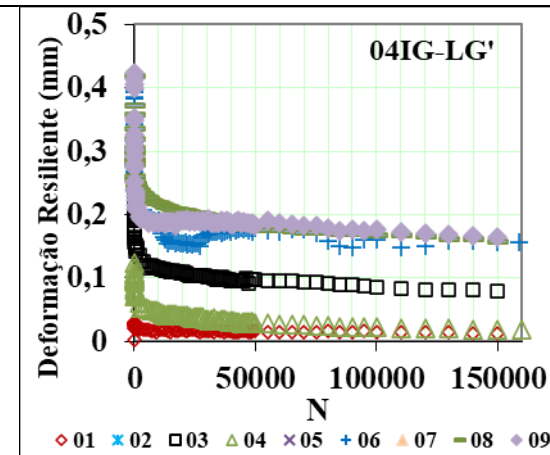
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

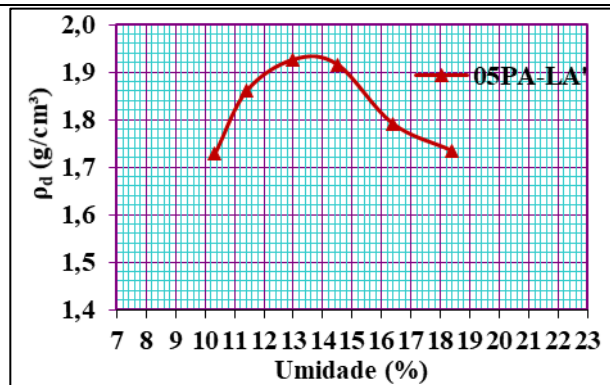


MR obtido através do ensaio de DP

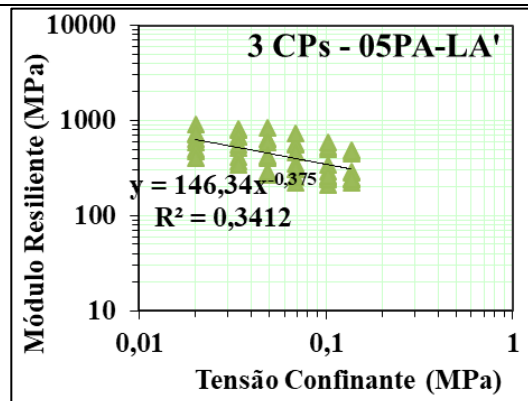


Deformação Resiliente

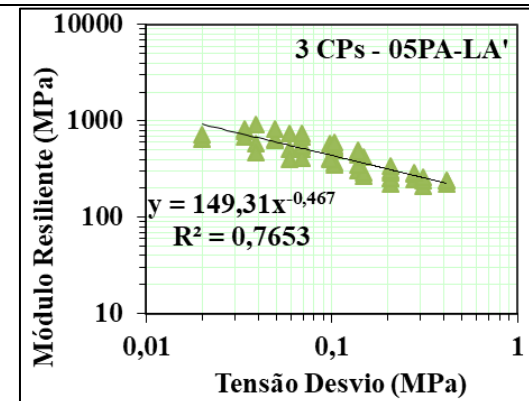
AMOSTRA 05PA-LA'



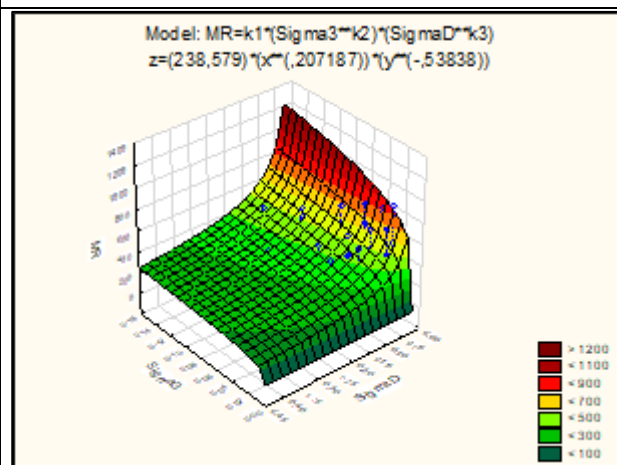
Curva de Compactação – Energia Intermediária



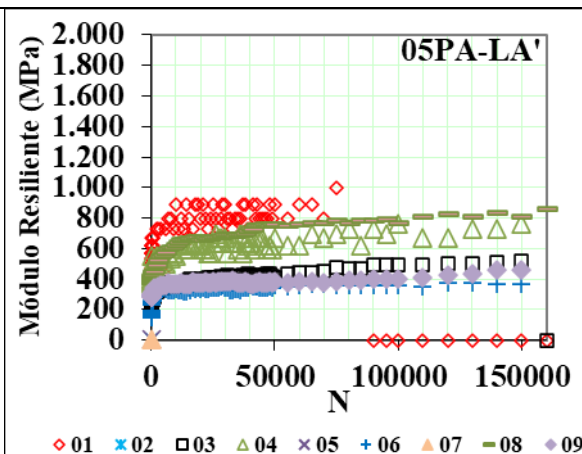
Modelo MR em função da T. Confinante



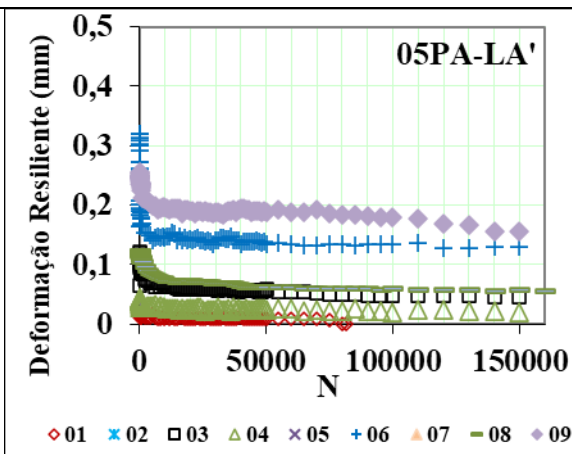
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

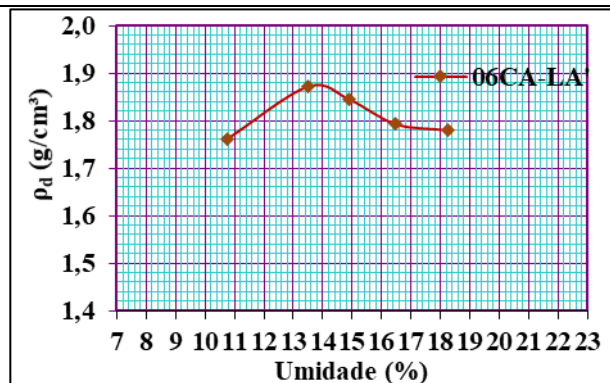


MR obtido através do ensaio de DP

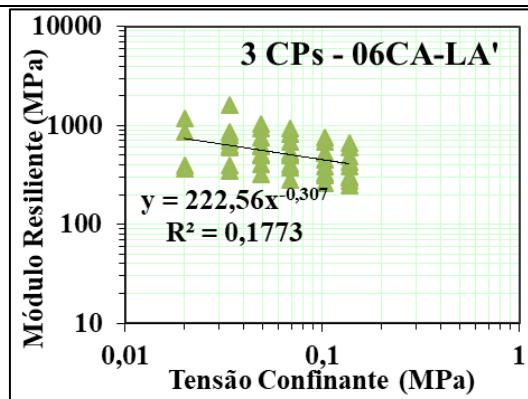


Deformação Resiliente

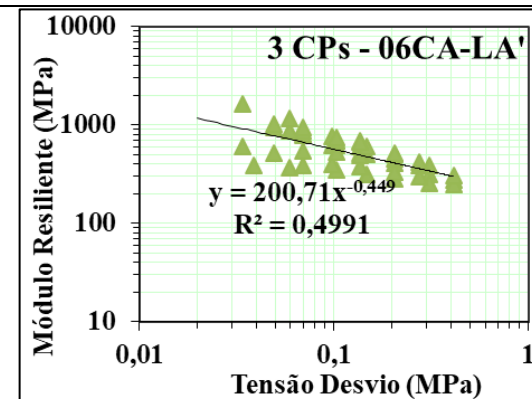
AMOSTRA 06CA-LA'



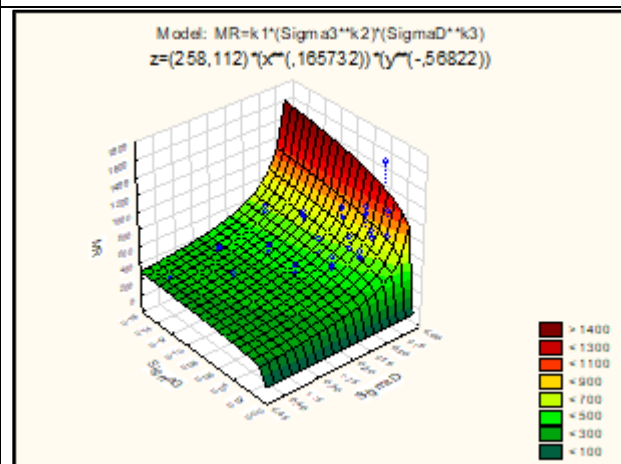
Curva de Compactação – Energia Intermediária



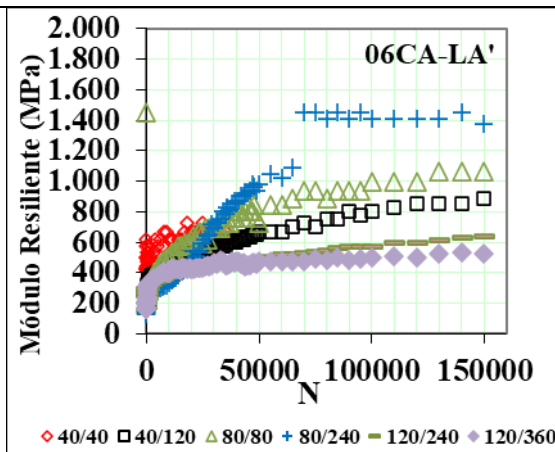
Modelo MR em função da T. Confinante



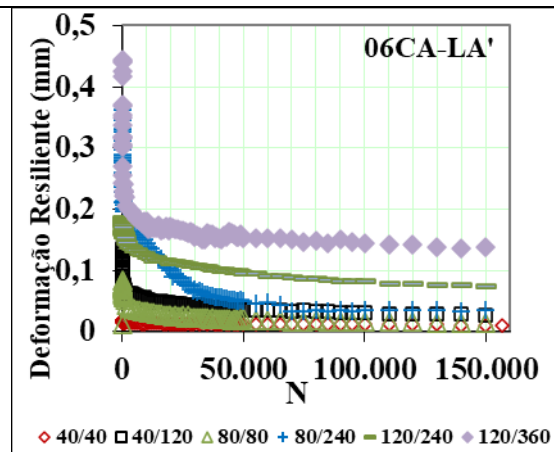
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

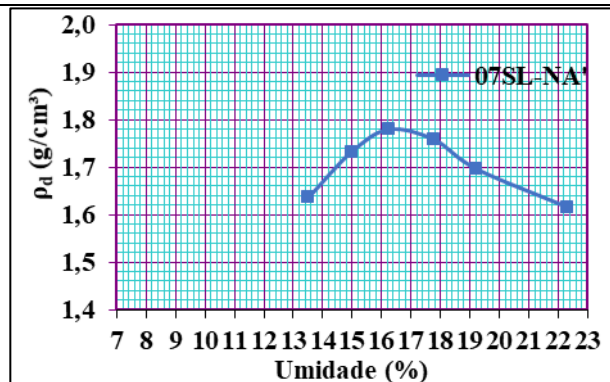


MR obtido através do ensaio de DP

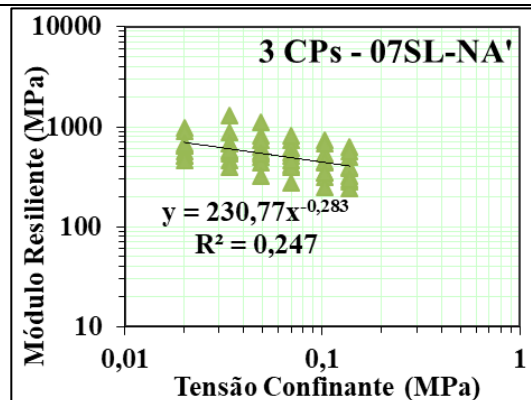


Deformação Resiliente

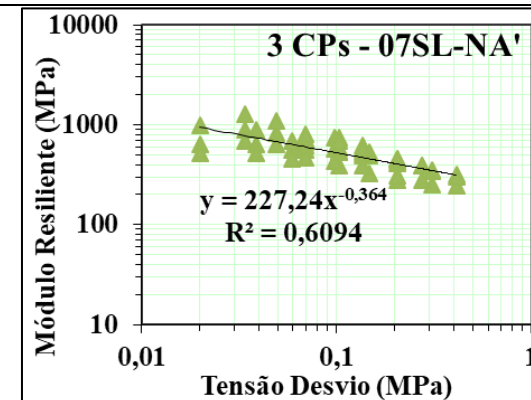
AMOSTRA 07SL-NA'



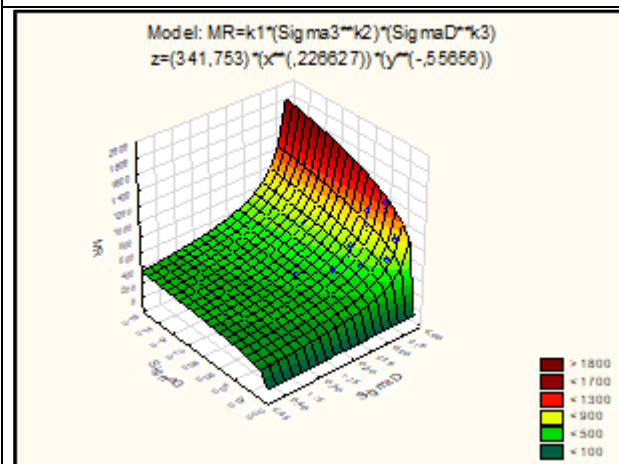
Curva de Compactação – Energia Intermediária



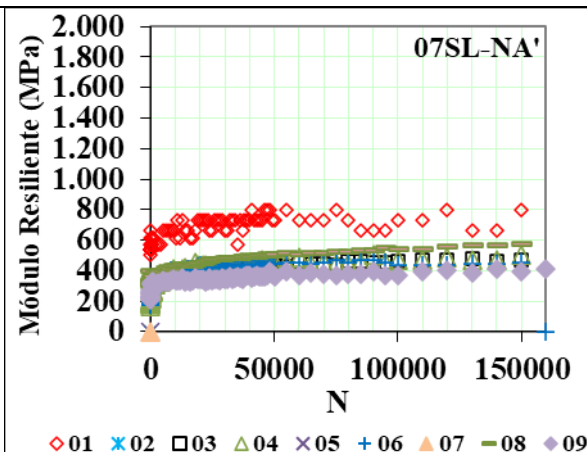
Modelo MR em função da T. Confinante



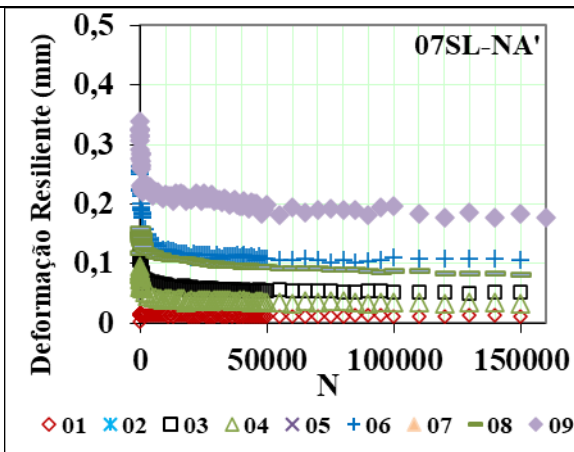
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

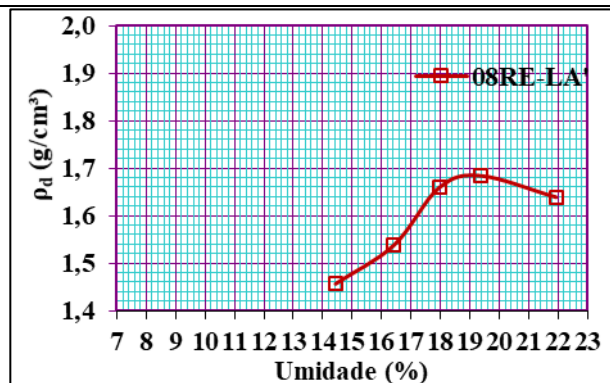


MR obtido através do ensaio de DP

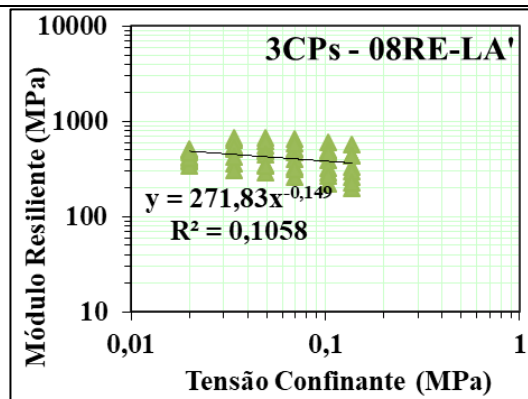


Deformação Resiliente

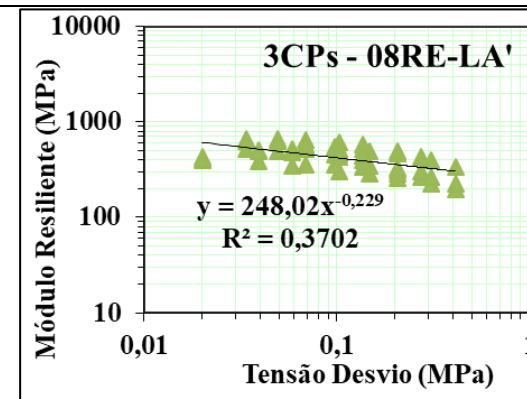
AMOSTRA 08RE-LA'



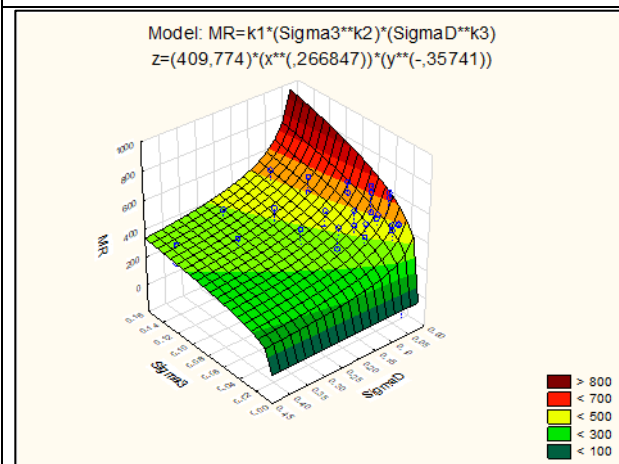
Curva de Compactação – Energia Intermediária



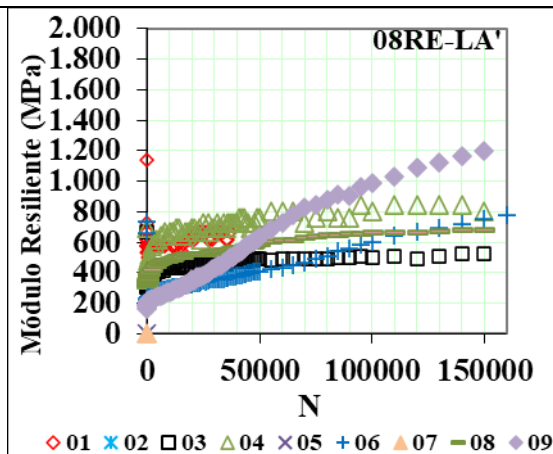
Modelo MR em função da T. Confinante



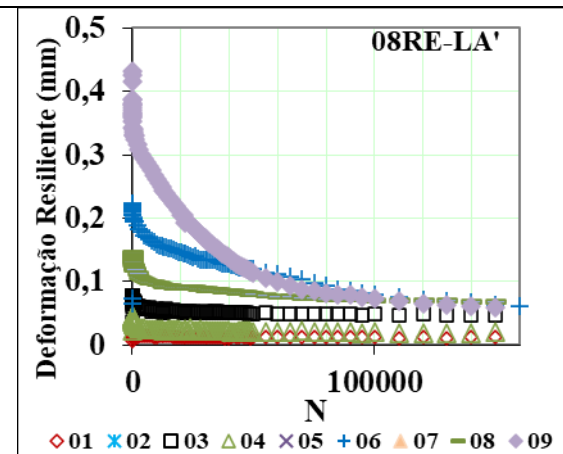
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

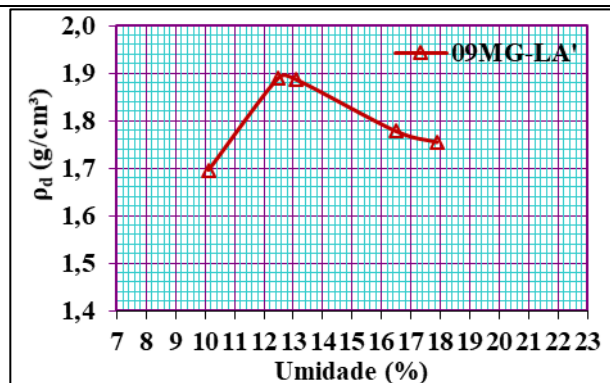


MR obtido através do ensaio de DP

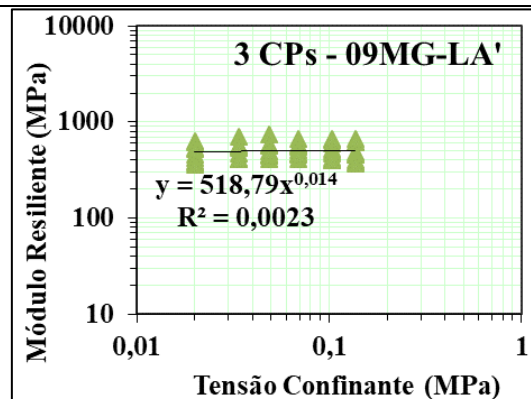


Deformação Resiliente

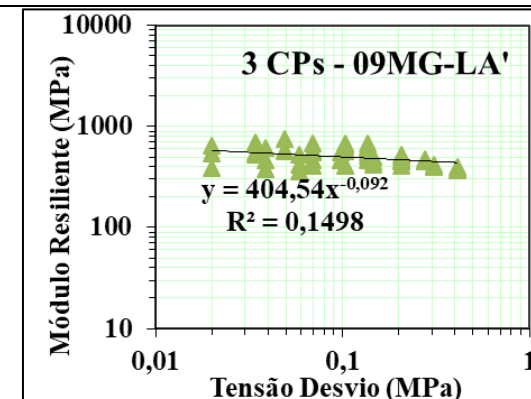
AMOSTRA 09MG-LA'



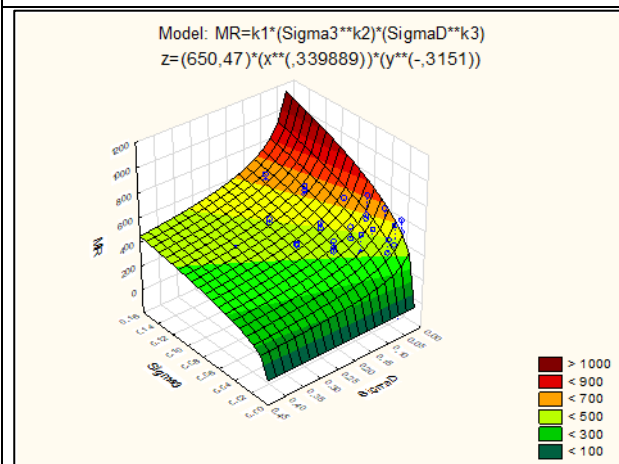
Curva de Compactação – Energia Intermediária



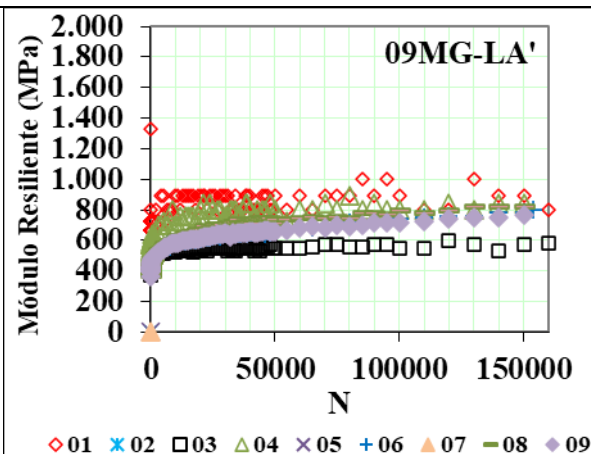
Modelo MR em função da T. Confinante



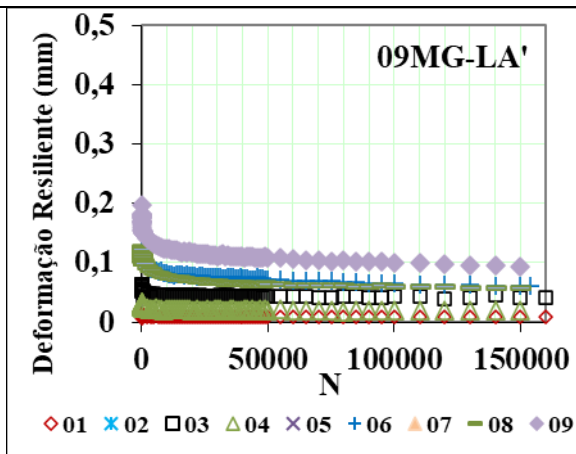
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

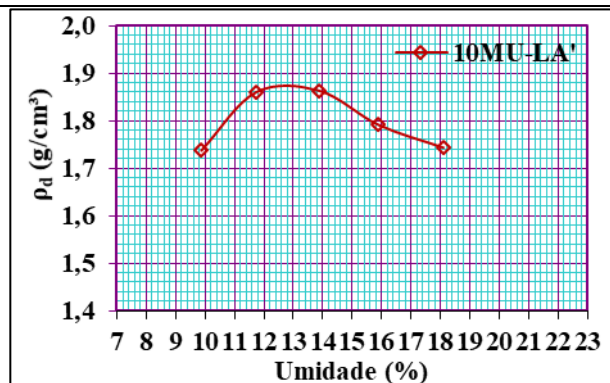


MR obtido através do ensaio de DP

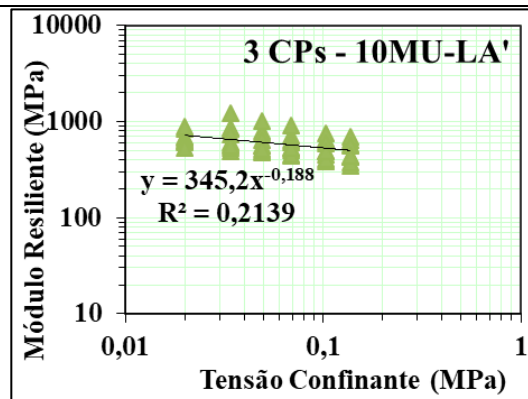


Deformação Resiliente

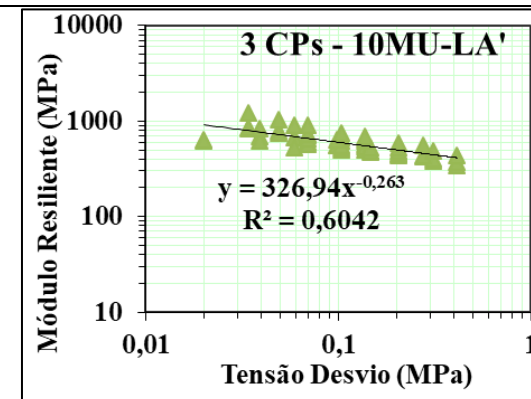
AMOSTRA 10MU-LA'



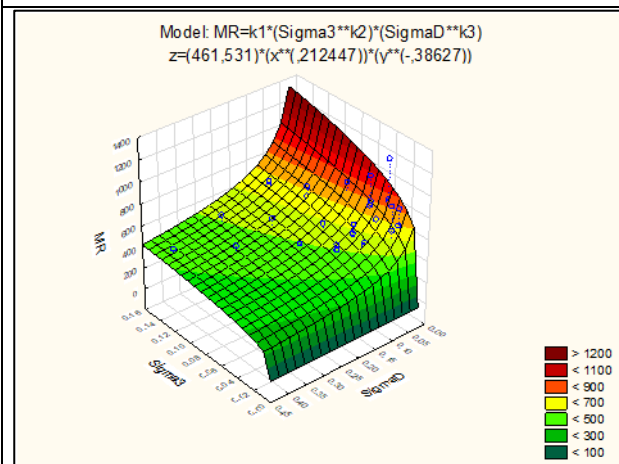
Curva de Compactação – Energia Intermediária



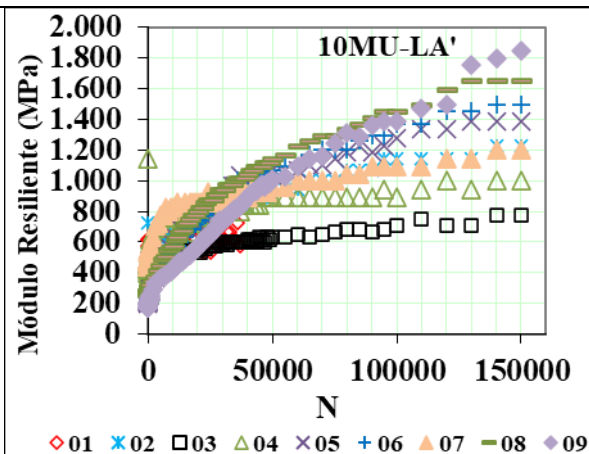
Modelo MR em função da T. Confinante



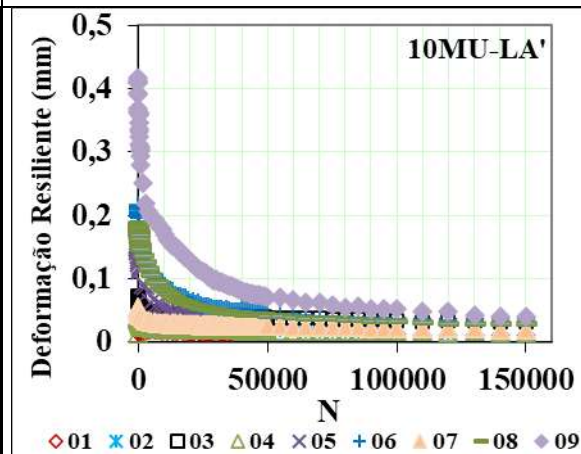
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

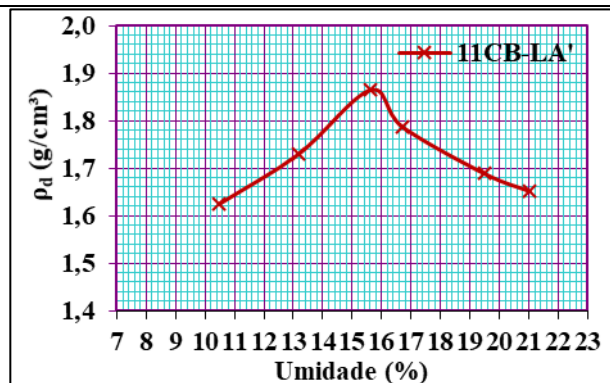


MR obtido através do ensaio de DP

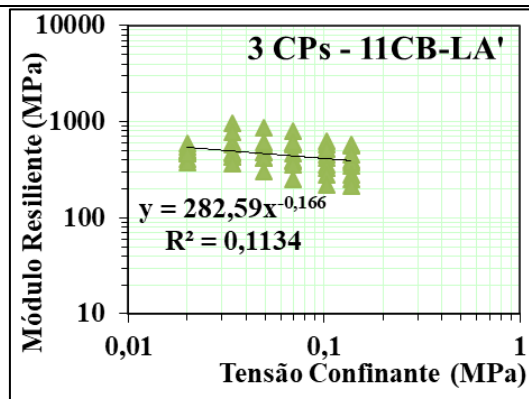


Deformação Resiliente

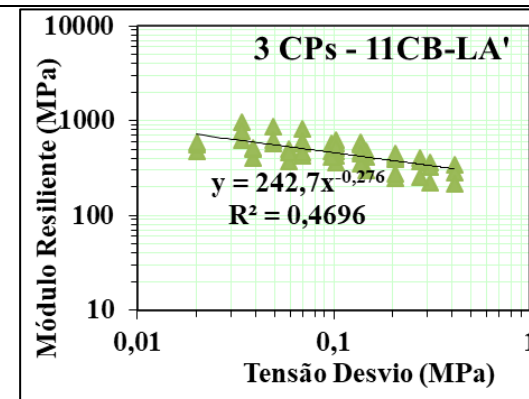
AMOSTRA 11CB-LA'



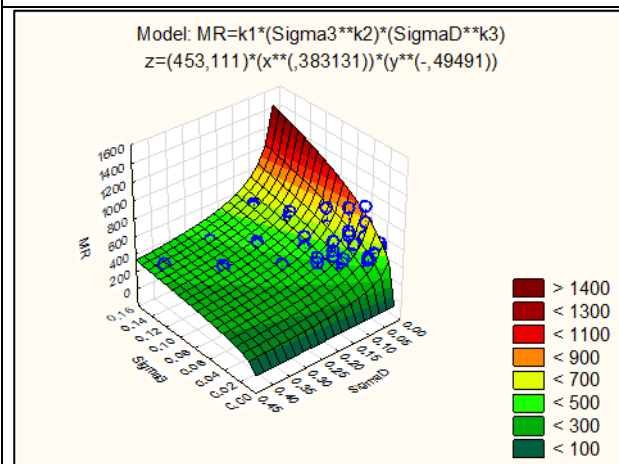
Curva de Compactação – Energia Intermediária



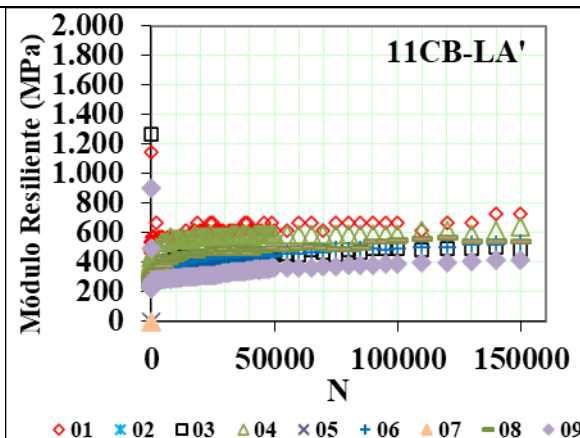
Modelo MR em função da T. Confinante



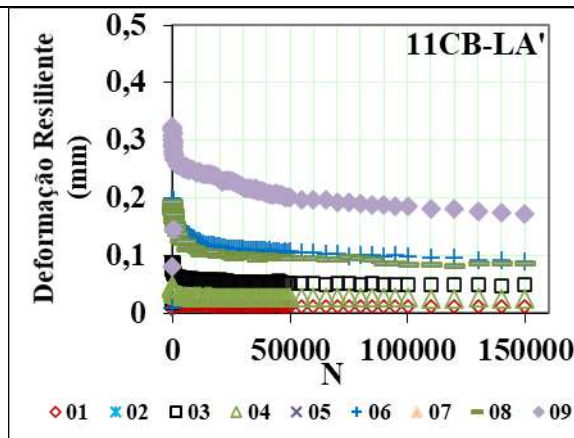
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

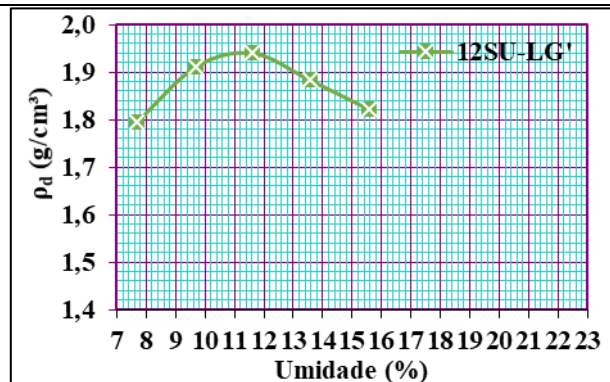


MR obtido através do ensaio de DP

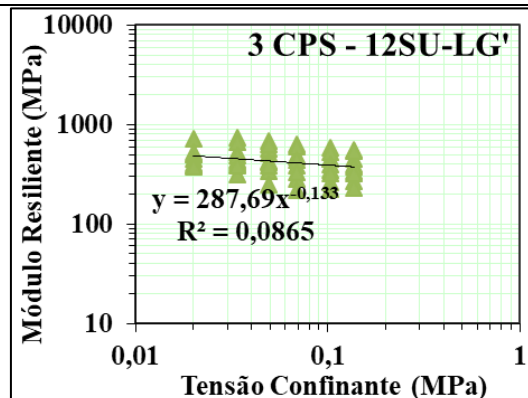


Deformação Resiliente

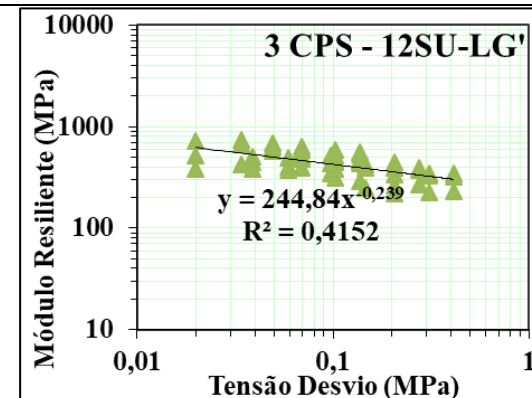
AMOSTRA 12SU-LG'



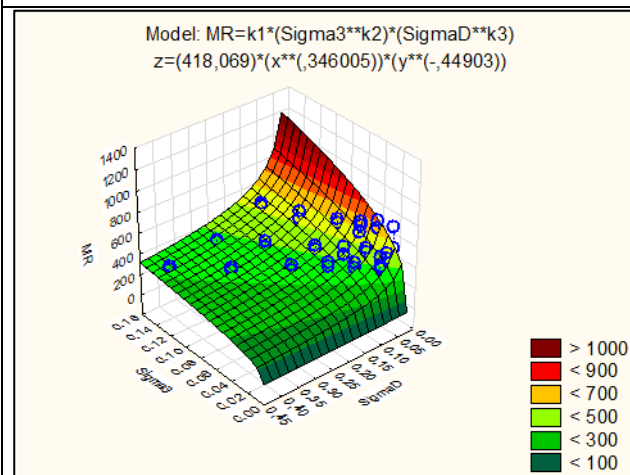
Curva de Compactação – Energia Intermediária



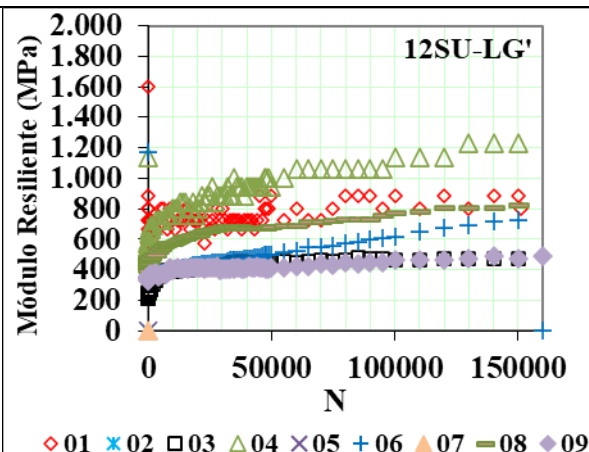
Modelo MR em função da T. Confinante



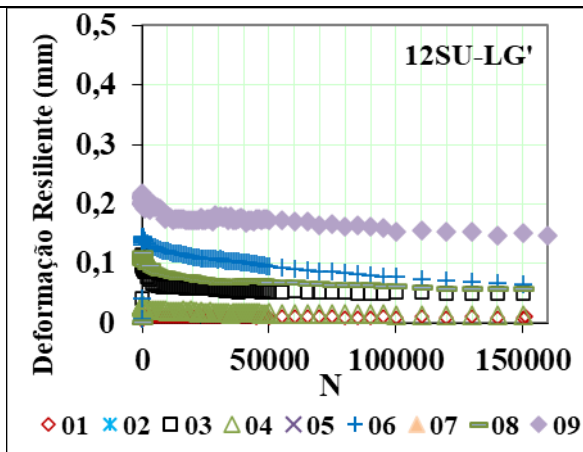
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

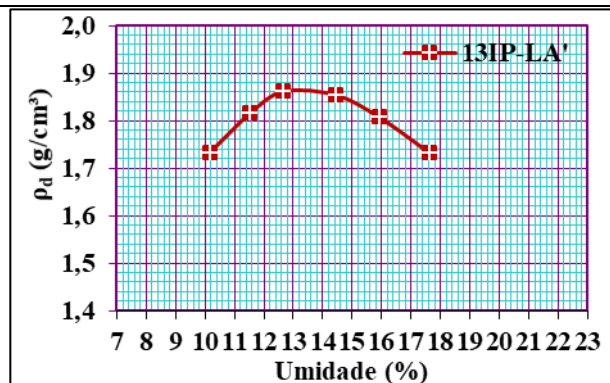


MR obtido através do ensaio de DP

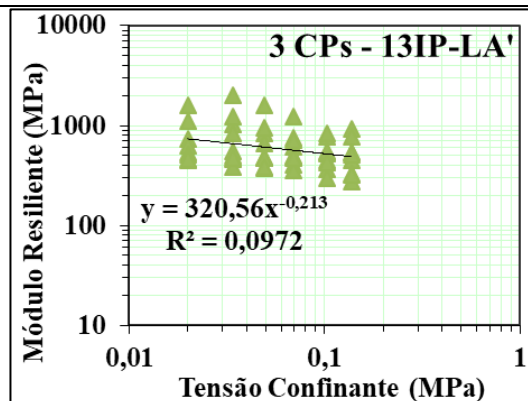


Deformação Resiliente

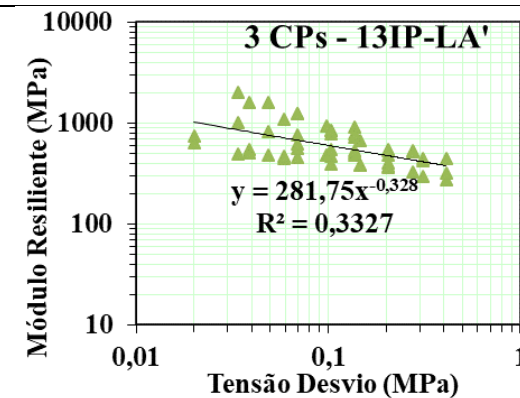
AMOSTRA 13IP-LA'



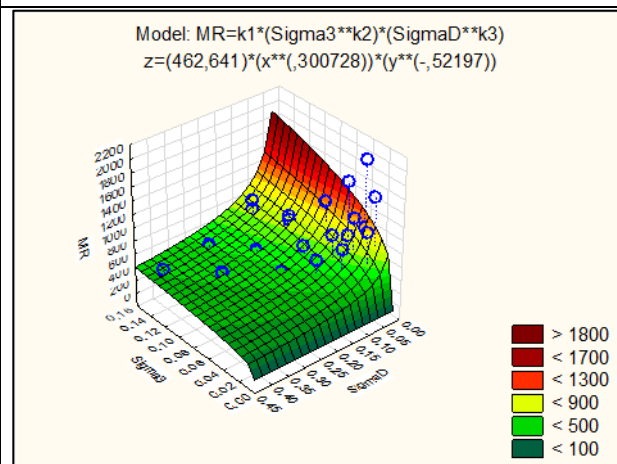
Curva de Compactação – Energia Intermediária



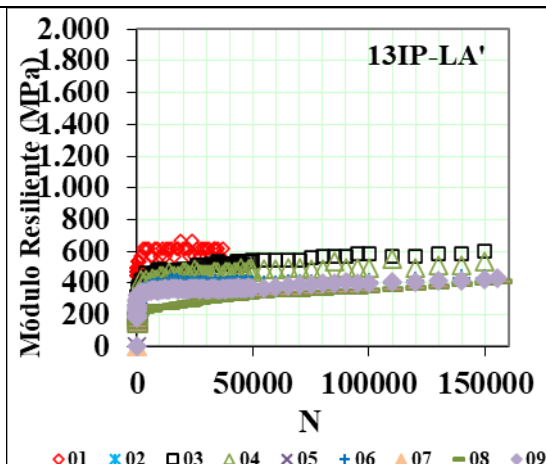
Modelo MR em função da T. Confinante



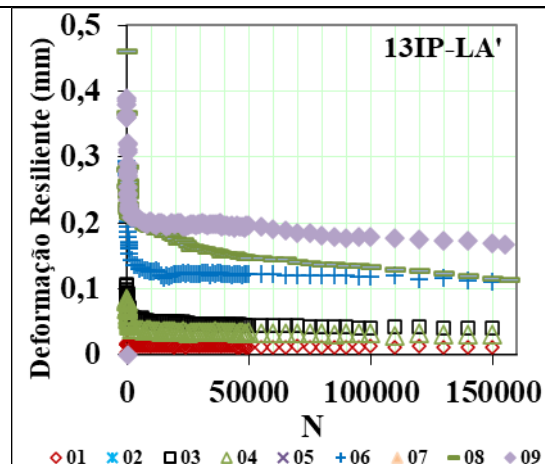
Modelo MR em função da Tensão Desvio



Modelo composto - 3 Corpos de prova

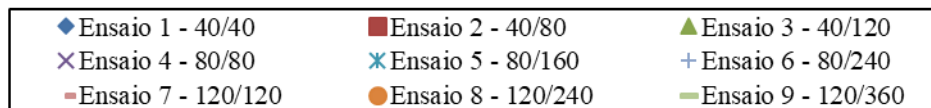
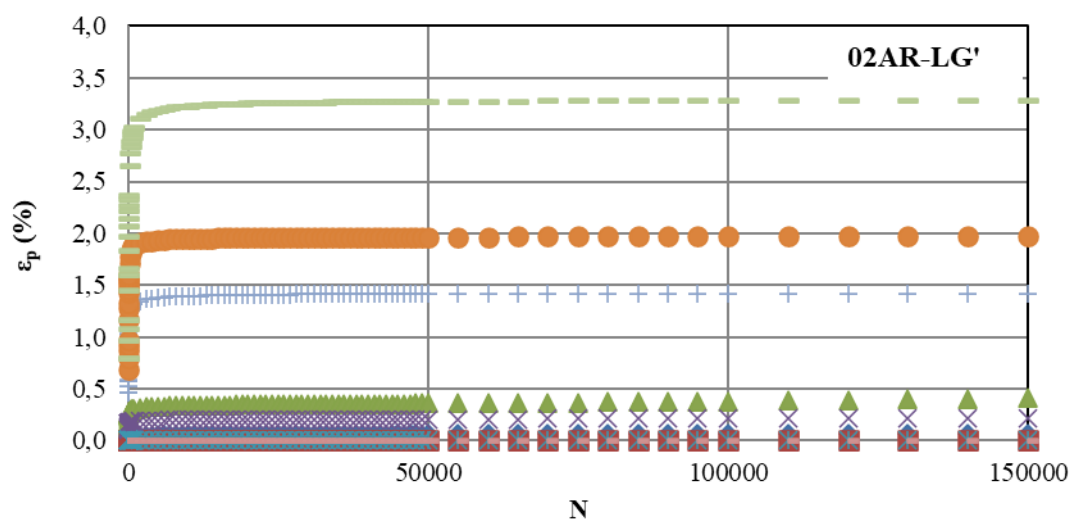
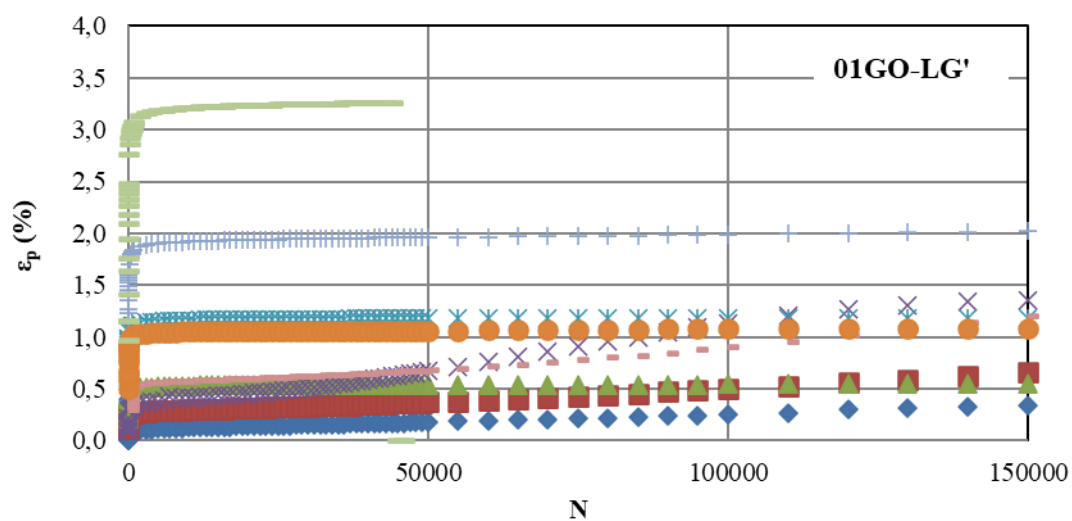


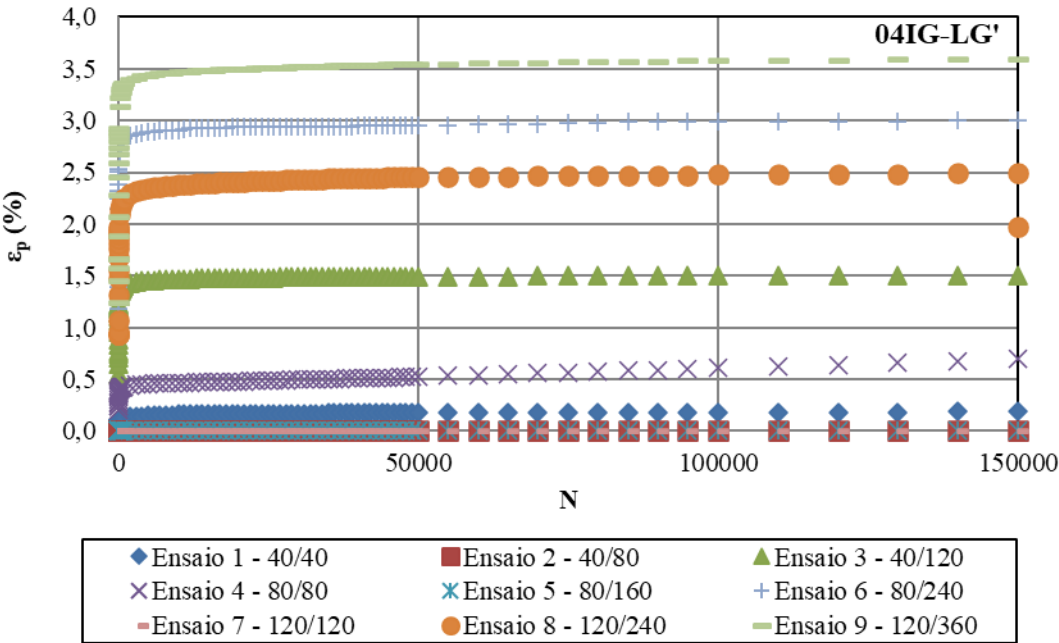
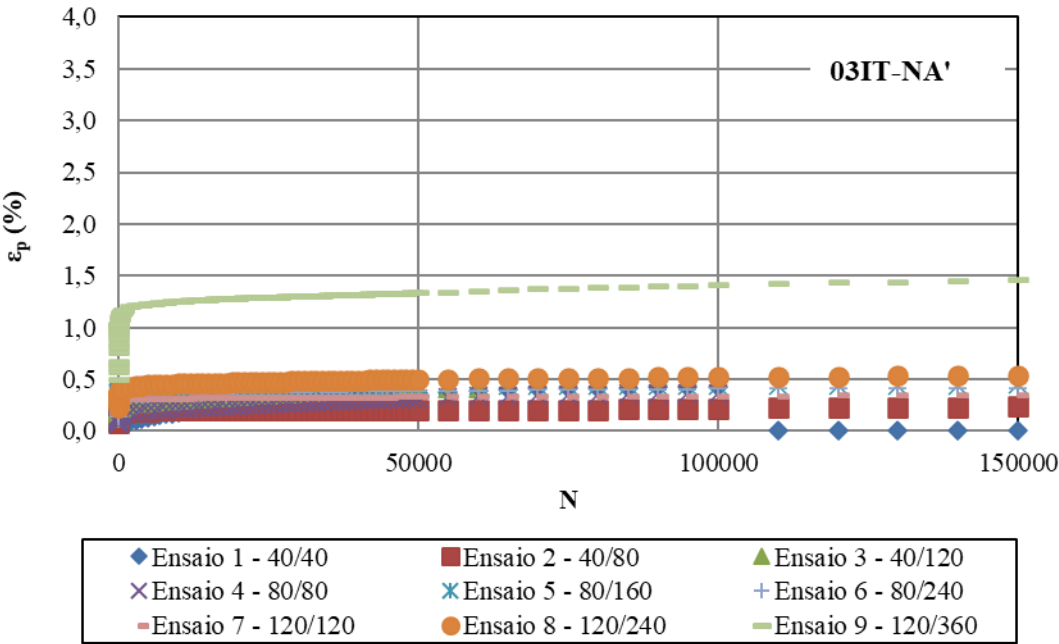
MR obtido através do ensaio de DP

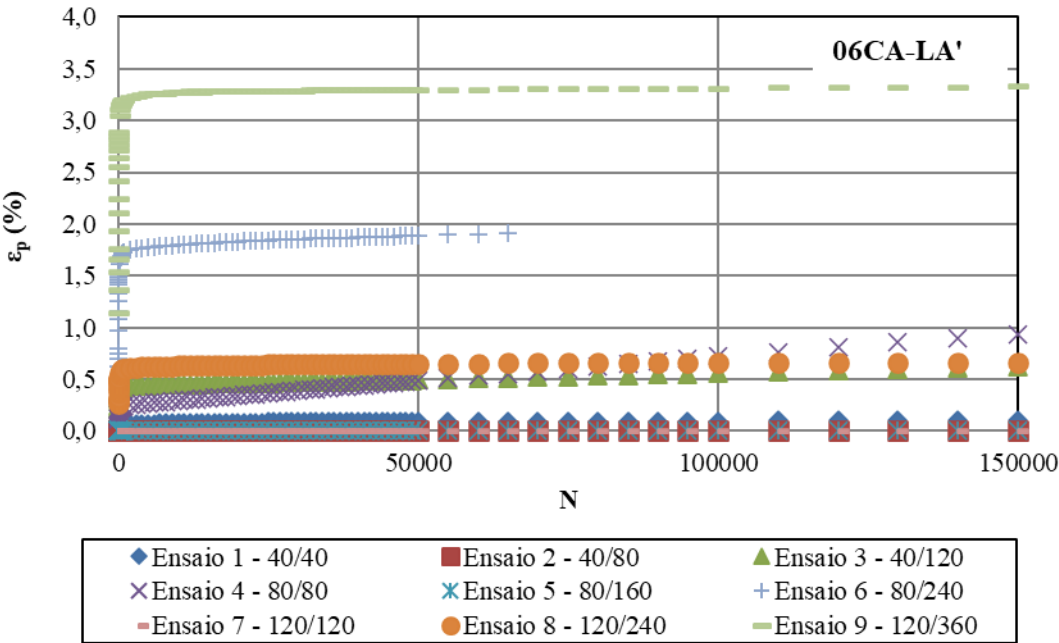
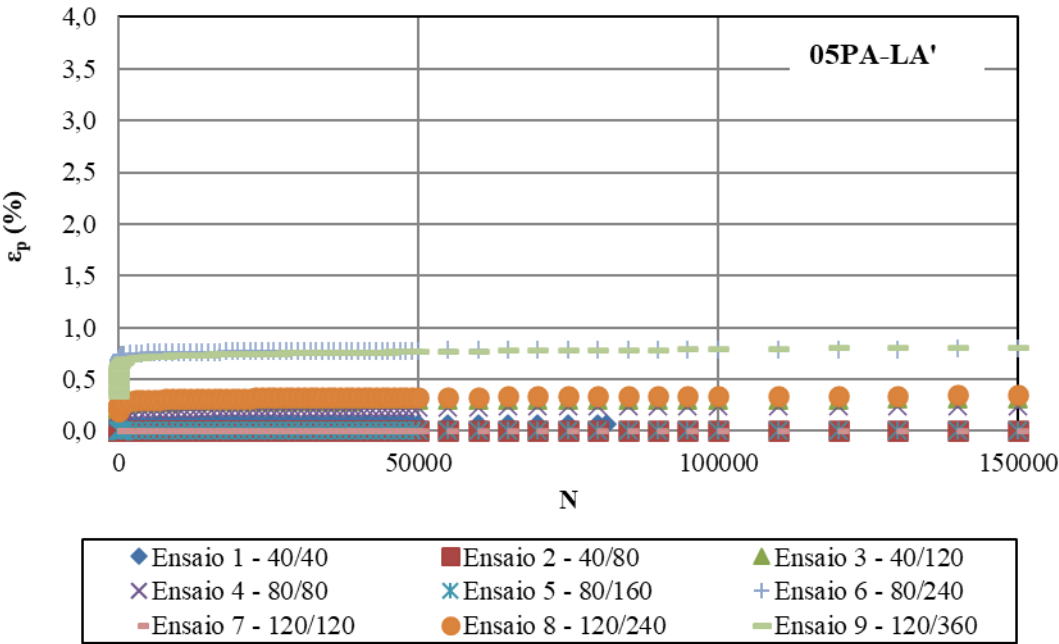


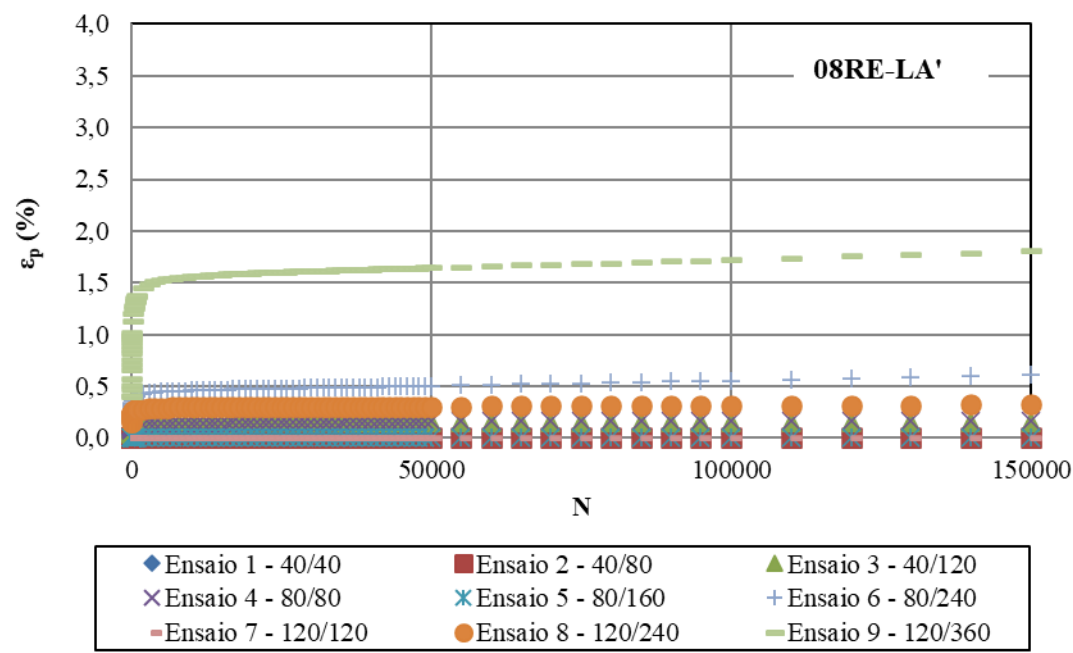
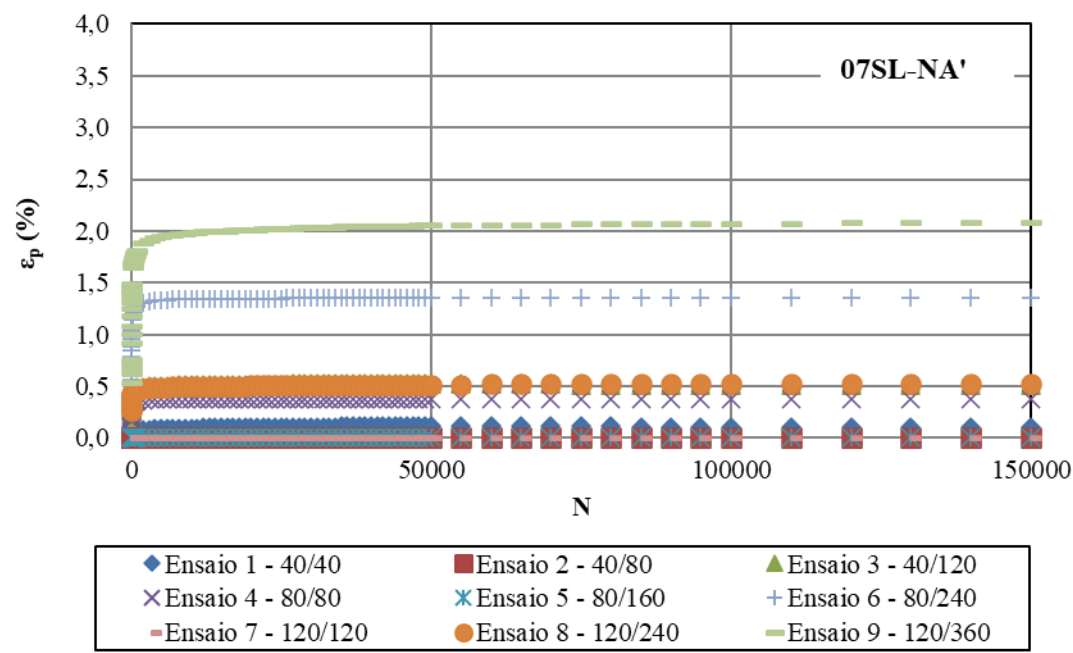
Deformação Resiliente

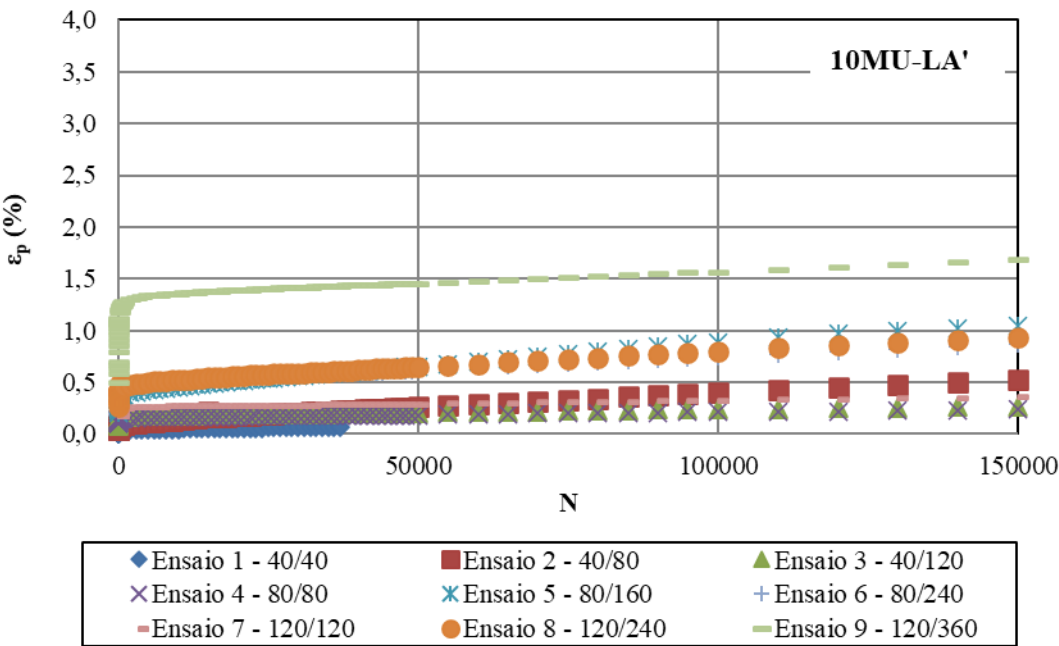
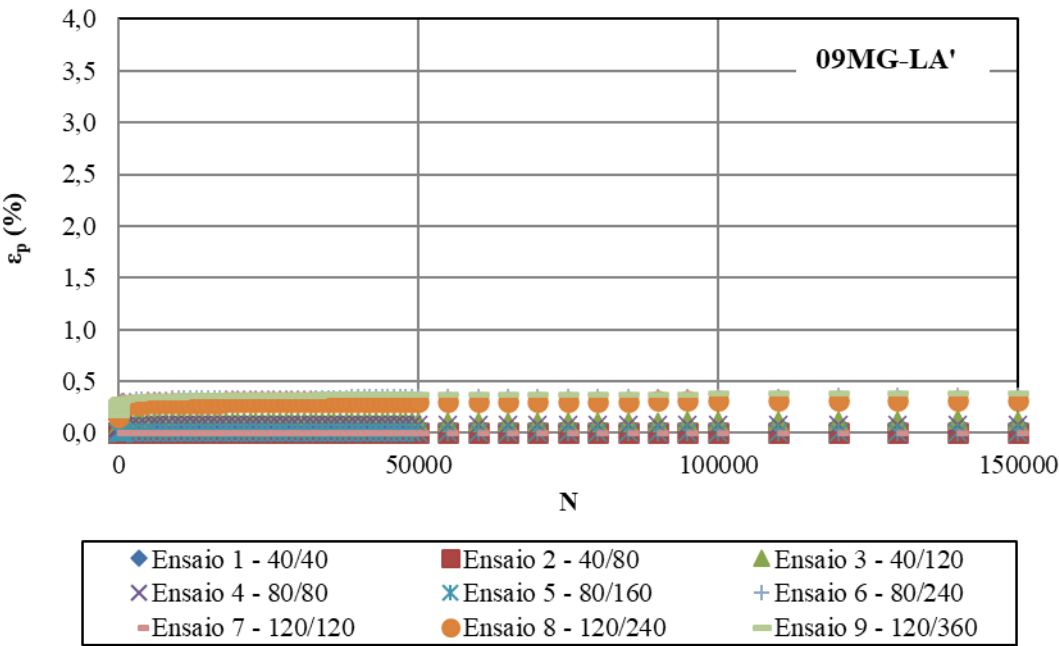
APÊNDICE D – GRÁFICOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE ESPECÍFICA – ε_p
(%)

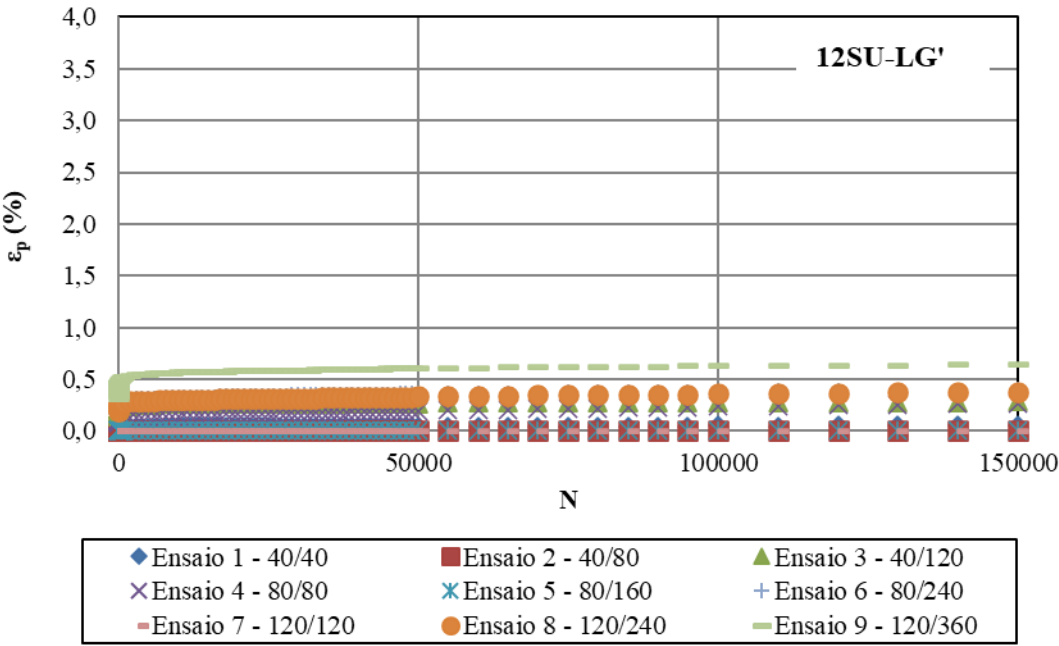
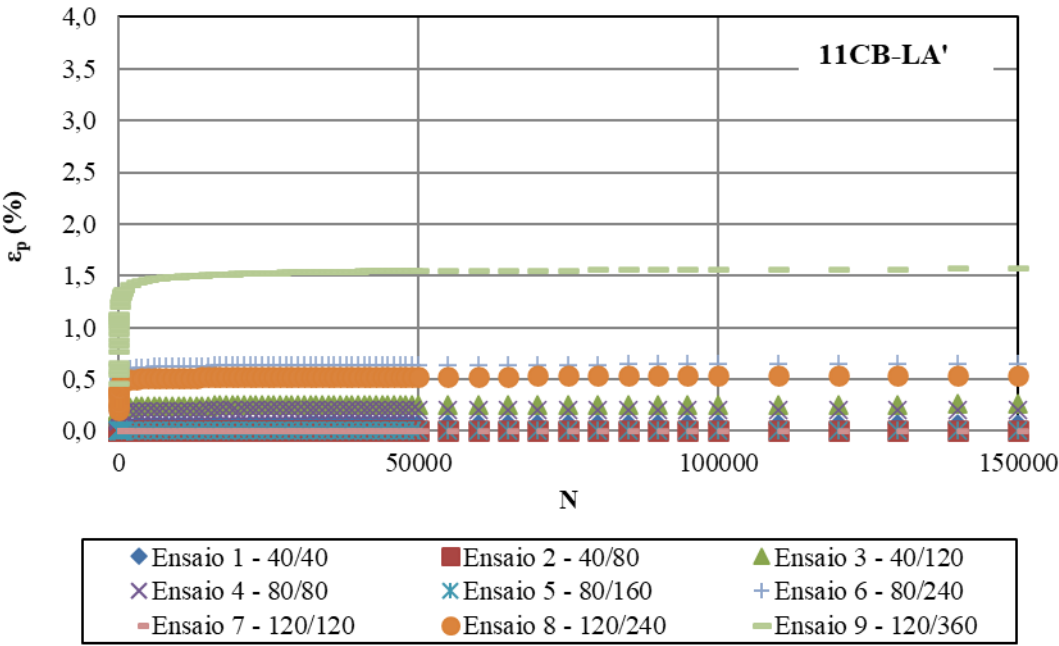


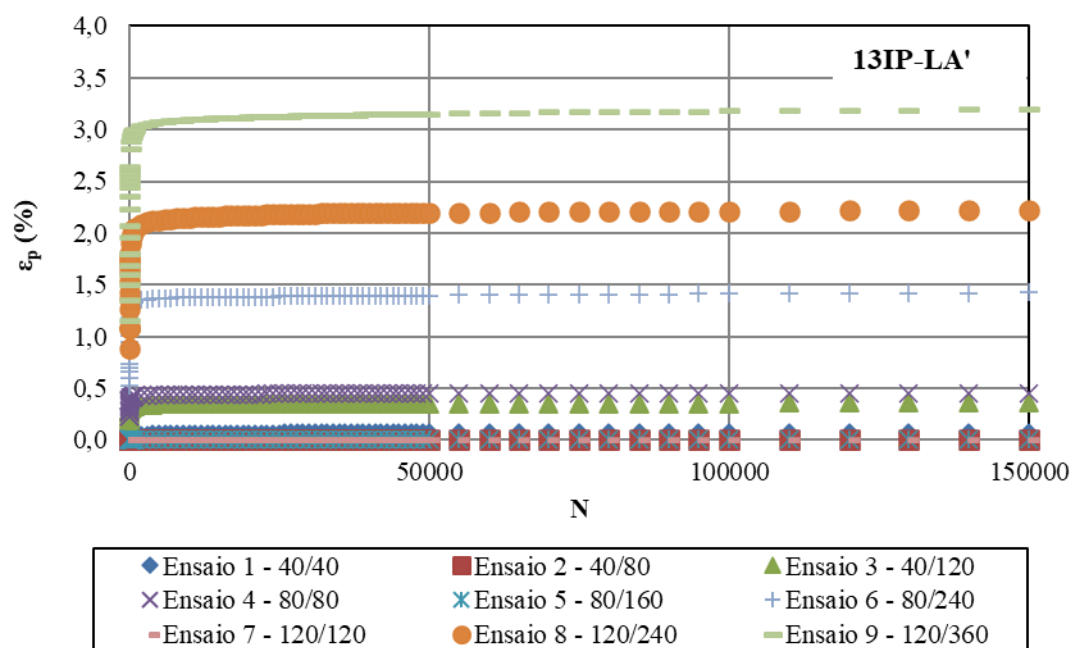












APÊNDICE E – BDSF

Banco de Dados de Solos Finos - BDSF

Tese Mayssa Sousa (UFPE)

Orientadores: Prof. Roberto Coutinho e Prof. Laura Motta

Identificação						Classificações Geotécnicas			
Ref	Inst	Ano	Id Ref	Id BDSF	UF de Origem	TRB	SUCS	MCT	MCT-M
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	01GO-LG'	1	PE	A-6	ML	LG'	TG'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	02AR-LG'	2	PE	A-7-6	ML	LG'	LG'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	03IT-NA'	3	PE	A-4	SM-SC	NA'	TA'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	04IG-LG'	4	PE	A-6	SC	LG'	TA'G'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	05PA-LA'	5	PE	A-6	SC	LA'	LA'G'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	06CA-LA'	6	PE	A-6	SM	LA'	LA'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	07SL-NA'	7	PE	A-6	ML	NA'	TA'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	08RE-LA'	8	PE	A-4	ML	LA'	LA'G'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	09MG-LA'	9	PE	A-4	SM	LA'	LA'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	10MU-LA'	10	PE	A-7-6	SC	LA'	LA'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	11CB-LA'	11	PE	A-7-5	ML	LA'	LA'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	12SU-LG'	12	PE	A-6	SC	LG'	LA'G'
Sousa (Esta Tese)	UFPE	2021	13IP-LA'	13	PE	A-6	CL	LA'	LA'
Pascoal	UFSM	2020	Solo B	14	RS	A-7-6	MH	LG'	LG'
Santos	UFSM	2020	Solo CA	15	RS	A-7-5	MH	LG'	LG'
Santos	UFSM	2020	Solo PE	16	RS	A-7-6	CL	NG'	TG'
Santos	UFSM	2020	Solo SL	17	RS	A-6	SC	NS'	NS'
Lima	UFRJ	2020	LA-02	18	-	-	-	LA	-
Lima	UFRJ	2020	NA-01	19	-	A-2-4	-	NA	-
Lima	UFRJ	2020	NA-02	20	-	-	-	NA	-
Lima	UFRJ	2020	NS'-02	21	-	-	-	NS'	-
Lima	UFRJ	2020	NS'-03	22	-	-	-	NS'	-
Lima	UFRJ	2020	NS'-04	23	-	A-4	-	NS'	-
Lima	UFRJ	2020	NS'-05	24	-	A-7	-	NS'	-
Lima	UFRJ	2020	NS'-06	25	-	A-7	-	NS'	-
Lima	UFRJ	2020	NS'-08	26	-	-	-	NS'	-
Lima	UFRJ	2020	NA'-02	27	-	-	-	NA'	-
Lima	UFRJ	2020	NA'-03	28	-	A-2-6	-	NA'	-
Lima	UFRJ	2020	NA'-04	29	-	-	-	NA'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-01	30	-	-	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-04	31	-	A-7-5	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-05	32	-	-	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-06	33	-	-	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-07	34	-	A-6	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-08	35	-	A-7-6	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-09	36	-	A-7-5	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	NG'-10	37	-	A-7-5	-	NG'	-
Lima	UFRJ	2020	LG'-01	38	-	-	-	LG'	-
Lima	UFRJ	2020	LG'-02	39	-	A-7-5	-	LG'	-
Lima	UFRJ	2020	LG'-03	40	-	A-7-5	-	LG'	-
Lima	UFRJ	2020	LG'-04	41	-	A-7-6	-	LG'	-
Lima	UFRJ	2020	LG'-05	42	-	A-7-6	-	LG'	-
Norback	UFRJ	2018	LG'	43	RJ	-	-	LG'	-
Norback	UFRJ	2018	NA'	44	RJ	-	-	NA'	-
Norback	UFRJ	2018	NG'	45	RJ	-	-	NG'	-
Dalla Roza	UFRJ	2018	Mont Serrat NM	46	MT	-	-	NS'	NS'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Buritis	47	MT	-	-	NG'	NG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Parque dos Poderes	48	MT	-	-	NG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Mont Serrat SR	49	MT	-	-	LG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Supermassa	50	MT	-	-	LG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Villa Verde	51	MT	-	-	NG'	NG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Terra Rica	52	MT	-	-	LG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Curitiba	53	MT	-	-	LG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Aquarela das Artes	54	MT	-	-	LG'	NG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Panambi	55	MT	-	-	LG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Belverde	56	MT	-	-	LG'	TG'
Dalla Roza	UFRJ	2018	Alemeida Prado	57	MT	-	-	NG'	NG'
Budny	UFRJ	2018	Solo	58	RS	A-7-5	MH	LG'	-
Zago	UFSM	2016	CI	59	RS	A-6	SC	NA'	TA'G'
Zago	UFSM	2016	TR	60	RS	A-7-6	CL	LG'	TA'G'
Zago	UFSM	2016	JC	61	RS	A-7-6	CL	LG'	LG'
Osten	IME	2012	Amostra 2	62	MA	-	-	NA'	-
Osten	IME	2012	Amostra 3	63	MA	-	-	LG'	-

Guimarães	UFRJ	2009	Argila de Ribeirão Preto/SP	64	SP	-	-	LG'	-
Guimarães	UFRJ	2009	Areia Argilosa do ES	65	ES	-	-	LG'	-
Guimarães	UFRJ	2009	Solo Papucaia	66	RJ	-	-	NS'	-
Guimarães	UFRJ	2009	Areia Fina de Campo Azul	67	MG	-	-	NA	-

Identificação Id BDSF	Coeficientes da Classificação MCT				Características Físicas							
	c'	d'	e'	PMI	Pargila	Psilte	Pareia	Pped	LL	LP	IP	δ
1	2,00	247,06	0,94	75	50,17	14,19	35,57	0,06	35,6	25	10,6	2,634
2	1,90	138,9	0,62	10	47,83	19,00	31,05	2,12	41,3	27,9	13,4	2,674
3	1,20	133,33	1,19	153	32,28	5,60	62,10	0,02	24,1	17,4	6,7	2,654
4	1,70	86,67	0,93	58	38,81	6,62	54,35	0,22	33,4	21,7	11,7	2,629
5	1,40	130,77	0,62	9	41,69	4,82	51,83	1,65	37,9	23,1	14,8	2,642
6	1,05	140	0,62	10	42,55	5,15	52,23	0,07	39,9	26,5	13,4	2,666
7	1,05	147,4	1,16	143	46,53	13,60	39,87	0,00	39,9	28,5	11,4	2,693
8	1,29	107,14	0,84	40	47,01	19,30	33,61	0,08	39,5	32,36	7,1	2,699
9	0,92	109,09	0,91	58	41,99	5,70	52,30	0,00	34,7	24,9	9,8	2,679
10	1,05	216,67	0,87	56	40,31	8,07	50,86	0,75	40,5	25,4	15,1	2,681
11	1,00	187,5	0,84	49	45,45	6,84	47,67	0,05	46,6	30,1	16,5	2,682
12	1,67	150	0,81	40	34,92	4,44	60,22	0,42	34,8	21,4	13,4	2,674
13	1,10	153,85	0,81	40	44,69	8,40	46,86	0,05	35,9	24,2	11,7	2,681
14	2,35	67	0,69		41,00	26,00	33,00	0,00	55	44	11	2,780
15	1,96	37,73	0,84	3	46,00	24,00	30,00	0,00	61	41	20	2,903
16	1,85	40,8	1,21	124	35,00	19,00	39,00	7,00	47	25	22	2,649
17	0,97	12,78	1,62	258	9,00	36,00	55,00	0,00	28	16	12	2,583
18	0,59	66	1,29	184	7	13	74	6	-	-	-	-
19	0,25	25,33	1,56	300	16	8	76	0	NP	NP	NP	-
20	-	-	-	-	11	5	84	0	-	-	-	-
21	0,95	5,1	1,96	360	5	10	82	3	-	-	-	-
22	1,33	10,2	1,62	317	17	34	44	5	-	-	-	-
23	1,07	10,2	1,72	315	5	31	64	0	42	16	26	-
24	1,4	18,1	1,57	275	12	42	45	1	NP	NP	NP	-
25	1,4	18,1	1,57	275	12	42	45	1	NP	NP	NP	-
26	1,48	12	1,63	270	20	20	54	6	-	-	-	-
27	1,04	27,9	1,36	180	10	20	65	5	-	-	-	-
28	0,88	17,7	1,19	55	10	11	79	0	31	12	19	
29	1,12	61,1	1,36	165	8	24	59	9	-	-	-	-
30	2,66	5	1,62	92	46	26	27	1	-	-	-	-
31	2,15	22,9	1,29	125	48	17	34	1	53	31	22	-
32	2,55	20	1,23	118	54	7	38	1	-	-	-	-
33	2,95	51,3	1,19	130	20	24	53	3	-	-	-	-
34	1,83	45,7	1,25	150	17	23	55	5	32	12	20	-
35	1,64	20,2	1,58	298	10	52	31	7	36	20	16	-
36	2,2	10	1,5	135	10	28	54	8	59	35	24	-
37	2,09	61,1	1,19	135	22	26	49	1	51	32	19	-
38	2,94	89,3	0,61	0	60	4	36	0	-	-	-	-
39	2,84	49,6	0,74	0	53	12	35	0	-	-	-	-
40	2,2	37,2	0,98	40	46	16	36	2	69	40	29	-
41	2,19	54	0,92	40	56	17	27	0	42	19	23	-
42	2,35	38,5	1,1	80	43	23	34	0	58	20	38	-
43	1,91	45,7	1,07	-	48	17	34	1	64	24	40	
44	0,8	75	1,57	-	29	24	40	7	NP	NP	NP	
45	1,67	25,8	1,29	-	1	22	69	8	57	21	36	
46	0,86	7,5	1,83	345	11	2	87	0				2,648
47	2,99	29,5	1,26	130	56	14	30	0				2,64
48	2,66	66,7	1,26	170	55	13	32	0				2,641
49	2,24	60	1,17	125	15	18	66	1				2,722
50	2,18	85,7	1,12	118	31	19	50	0				2,584
51	2,18	28,3	1,5	265	33	12	50	4				2,623
52	2,24	102,5	1,14	130	47	12	41	0				2,154
53	2,2	68,8	1,17	130	63	7	29	1				2,567
54	2,66	291,7	1,02	100	16	16	67	1				2,585
55	2,66	142,9	0,99	82	51	24	24	1				2,571
56	2,31	75	1,07	95	45	20	35	0				2,592
57	1,81	83,3	1,51	323	20	42	34	4				2,659
58	2,8	-	0,9	-	86	10	4	0	55	45,5	9,5	
59					25	21	54	0	36	17	19	
60					40	15	43	2	42	21	21	
61					42	17	40	1	42	23	19	
62	1,35	43,3	1,2		55	25	18	2	57	21	36	2,679
63	1,8	45	0,58		72	12	13	3	68	26	42	2,677
64	1,81		1,08		37	25	38	0				
65	2,05		0,97		38	15	45	2	60,3	22,5	37,8	
66	1		1,68		15	18	64	3				
67	0,25	24,1	1,67	380	9	10	81	0				2,66

Identifi- cação	Características Mecânicas						Modelo Tensão Confinante [Mpa]			Modelo Tensão Desvio [Mpa]		
Id BDSF	ρ _{dmáx}	W _{ót}	Ec	CBR/Mi niCBR	Exp.	MRmédio	K1TC	K2TC	R²TC	K1TD	K2TD	R²TD
1	1,79	17,40	Inter	12,80	0,05	458,58	222,04	-0,24	0,235	204,58	-0,33	0,701
2	1,75	18,40	Inter	15,00	0,00	393,81	143,97	-0,33	0,314	144,49	-0,41	0,741
3	1,97	10,60	Inter	35,00	0,15	865,09	199,81	-0,48	0,502	245,67	-0,52	0,832
4	1,91	13,10	Inter	15,40	0,60	477,21	175,04	-0,32	0,236	171,12	-0,42	0,577
5	1,94	13,70	Inter	25,00	0,00	424,92	153,08	-0,33	0,314	146,05	-0,44	0,822
6	1,88	13,80	Inter	17,00	0,00	667,13	164,13	-0,49	0,465	176,50	-0,60	0,937
7	1,78	16,50	Inter	21,00	0,05	557,17	230,77	-0,28	0,247	227,24	-0,36	0,609
8	1,69	19,00	Inter	15,20	0,10	394,39	213,85	-0,20	0,190	196,63	-0,29	0,595
9	1,90	12,70	Inter	30,00	0,00	507,35	518,79	0,01	0,002	404,54	-0,09	0,150
10	1,87	12,70	Inter	16,00	0,20	611,45	345,20	-0,19	0,214	326,94	-0,26	0,604
11	1,86	15,60	Inter	27,50	0,00	486,50	221,95	-0,25	0,193	201,99	-0,36	0,586
12	1,94	11,20	Inter	29,00	0,20	477,89	358,55	-0,09	0,062	296,80	-0,20	0,439
13	1,86	13,20	Inter	23,00	0,00	689,00	227,13	-0,34	0,197	242,59	-0,41	0,395
14	1,68	25,50	Inter	-	-	246,00	751,38	0,34	0,897	387,90	0,17	0,478
15	1,59	26,00	Inter	25,50	0,80	316	-	-	0,000	-	-	0,360
16	1,78	16,90	Inter	20,70	1,50	372	-	-	0,000	-	-	0,450
17	1,88	12,90	Inter	13,20	1,70	135	-	-	0,020	-	-	0,260
18	1,848	10,2	Normal	-	-	298	-	-	-	-	-	-
19	1,879	10	Normal	-	-	273	-	-	-	-	-	-
20	1,83	8,9	Normal	-	-	301	-	-	-	-	-	-
21	1,875	8,2	Normal	-	-	258	-	-	-	-	-	-
22	1,725	17,5	Normal	-	-	194	-	-	-	-	-	-
23	1,708	16	Normal	-	-	123	-	-	-	-	-	-
24	1,882	12	Intermod	-	-	241	-	-	-	-	-	-
25	1,994	11,9	Inter	-	-	178	-	-	-	-	-	-
26	1,87	13	Normal	-	-	218	-	-	-	-	-	-
27	1,919	11,2	Normal	-	-	243	-	-	-	-	-	-
28	1,957	9,8	Inter	-	-	319	-	-	-	-	-	-
29	1,833	12,7	Inter	-	-	183	-	-	-	-	-	-
30	1,485	27,5	Normal	-	-	211	-	-	-	-	-	-
31	1,675	21,5	Inter	-	-	216	-	-	-	-	-	-
32	1,625	20,7	Normal	-	-	201	-	-	-	-	-	-
33	1,584	17,6	Normal	-	-	236	-	-	-	-	-	-
34	1,723	17	Normal	-	-	289	-	-	-	-	-	-
35	1,6	21,5	Normal	-	-	146	-	-	-	-	-	-
36	1,62	23,6	Inter	-	-	151	-	-	-	-	-	-
37	1,812	16,3	Inter	-	-	294	-	-	-	-	-	-
38	1,775	17,8	Inter	-	-	547	-	-	-	-	-	-
39	1,652	21,5	Inter	-	-	336	-	-	-	-	-	-
40	1,705	21,3	Inter	-	-	351	-	-	-	-	-	-
41	1,665	22,5	Inter	-	-	250	-	-	-	-	-	-
42	1,651	20,5	Inter	-	-	302	-	-	-	-	-	-
43	1,675	20,5	Inter	-	0,02	356	-	-	-	-	-	-
44	1,85	13,5	Inter	-	0,11	353	-	-	-	-	-	-
45	1,68	19,5	Inter	-	0,07	123	-	-	-	-	-	-
46	1,909	7,75	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
47	1,505	25,13	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
48	1,557	23,42	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
49	1,658	19,85	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
50	1,599	20,6	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
51	1,55	23,2	Inter	-	1	-	-	-	-	-	-	-
52	1,625	20,5	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
53	1,565	22,5	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
54	1,534	22,5	Inter	-	2	-	-	-	-	-	-	-
55	1,434	28,7	Inter	-	1	-	-	-	-	-	-	-
56	1,543	23,45	Inter	-	0	-	-	-	-	-	-	-
57	1,571	20,33	Inter	-	14	-	-	-	-	-	-	-
58	1,515	29	Inter				125,54	-2,63	0,376	134,86	-0,30	0,746
59	1,804	15,4	Normal	11	0,33	77	240,17	0,40	0,231	51,70	-0,12	0,032
60	1,699	18,2	Normal	11	0,12	250	121,66	-0,23	0,208	99,83	-0,37	0,750
61	1,676	19,6	Normal	11	0,08	218	183,15	-0,05	0,034	151,30	-0,15	0,357
62	1,65	20	Inter				238,00	-0,19	0,301	230,60	-0,25	0,813
63	1,67	22	Inter				239,40	-0,21	0,321	238,50	-0,27	0,787
64	1,665	24	Normal			258	410,77	0,17	0,606	302,67	0,08	0,187
65		18	Normal				70,72	-0,42	0,510	89,21	-0,42	0,720
66		13	Normal			197	155,41	-0,08	0,052	132,18	-0,17	0,389
67	1,83	9,4	Inter	23,2	0,08	401	921,65	0,40	0,812	-	-	-

Identificação Id BDSF	Modelo Composto [MPa]				Modelo de DP - Guimarães (2009) - $\varepsilon_p(\%)$ [tensões em kgf/cm ²]					
	K1MC	K2MC	K3MC	R ² MC	ε_p (mm)	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R ²
1	354,12	0,33	-0,51	0,811	6,52	0,209	-0,447	1,727	0,056	0,894
2	281,78	0,32	-0,53	0,748	6,59	0,279	0,792	1,299	0,063	0,98
3	289,02	0,03	-0,50	0,698	2,93	0,125	0,246	1,244	0,055	0,778
4	294,55	0,25	-0,52	0,478	7,19	0,462	-0,51	1,300	0,051	0,960
5	262,87	0,35	-0,62	0,906	1,63	0,071	-1,022	1,659	0,047	0,847
6	168,43	0,02	-0,64	0,913	6,66	0,021	-2,314	3,900	0,047	0,961
7	383,65	0,29	-0,51	0,583	4,18	0,032	-1,86	2,977	0,063	0,934
8	341,58	0,30	-0,43	0,642	3,63	0,005	-1,224	3,961	0,084	0,975
9	650,47	0,34	-0,32	0,580	0,78	0,076	0,043	0,912	0,047	0,929
10	461,53	0,21	-0,39	0,588	3,37	0,102	0,165	1,415	0,074	0,914
11	402,73	0,39	-0,55	0,643	3,15	0,042	-0,529	2,386	0,059	0,967
12	483,14	0,35	-0,43	0,702	1,30	0,088	-0,269	1,066	0,05	0,927
13	341,14	0,14	-0,47	0,298	6,40	0,470	1,088	0,950	0,048	0,988
14	739,20	0,34	0,00	0,897	1,22	0,017	0,699	0,517	0,103	0,933
15	355,82	0,16	-0,16	0,710	2,42	0,083	0,529	1,244	0,09	0,97
16	403,47	0,16	-0,16	0,780	2,01	0,029	-0,706	2,005	0,098	0,97
17	162,84	0,24	-0,23	0,710	2,03	0,138	0,239	0,616	0,09	0,95
18	436,90	0,49	-0,34	0,610	-	0,12	0,12	0,156	0,06	0,97
19	560,10	0,47	-0,26	0,770	-	0,049	-1,954	2,823	0,075	0,98
20	832,00	0,45	-0,11	0,960	-	0,073	-0,642	1,914	0,072	0,92
21	179,90	0,35	-0,58	0,320	-	0,13	-0,73	1,5	0,06	0,97
22	62,50	0,37	-0,86	0,880	-	0,37	0,84	0,75	0,08	0,96
23	109,69	0,56	-0,73	0,440	-	0,48	-0,014	1,087	0,037	0,98
24	110,47	0,28	-0,66	0,700	-	0,206	0,761	1,055	0,037	0,96
25	64,38	0,59	-0,98	0,800	-	0,295	0,672	0,938	0,044	0,97
26	216,10	0,49	-0,60	0,710	-	0,52	1,88	1,16	0,07	0,95
27	290,90	0,41	-0,49	0,740	-	0,2	-0,29	1,23	0,05	0,98
28	278,17	0,38	-0,52	0,700	-	0,16	-0,173	1,252	0,047	0,98
29	257,20	0,48	-0,45	0,590	-	0,17	-0,38	1,55	0,05	0,98
30	52,14	0,26	-0,84	0,780	-	0,471	0,017	1,58	0,085	0,95
31	109,40	0,17	-0,68	0,900	-	0,165	-0,09	1,215	0,059	0,92
32	205,80	0,71	-0,85	0,810	-	0,04	-1,83	3,36	0,13	0,87
33	126,60	0,28	-0,60	0,860	-	0,14	-0,26	1,98	0,08	0,89
34	299,30	0,43	-0,51	0,660	-	0,27	-0,01	1,39	0,05	0,98
35	99,20	0,35	-0,59	0,550	-	0,32	0,02	1,19	0,04	0,99
36	66,43	0,37	-0,79	0,780	-	0,277	-0,179	1,317	0,047	0,95
37	62,70	-0,31	-0,26	0,530	-	0,145	0,696	1,523	0,065	0,98
38	424,17	0,23	-0,39	0,950	-	0,093	0,314	0,936	0,045	0,94
39	363,01	0,38	-0,44	0,600	-	0,143	-0,221	0,998	0,066	0,89
40	153,40	0,32	-0,73	0,860	-	0,146	-0,585	1,776	0,046	0,93
41	118,41	0,26	-0,63	0,940	-	0,583	1,022	0,628	0,048	0,96
42	122,05	0,14	-0,55	0,820	-	0,162	0,321	1,318	0,048	0,98
43	109,40	0,17	-0,68	0,900	-	0,32	-0,09	1,21	0,05	0,96
44	51,80	0,36	-0,79	0,790	-	0,57	0,71	0,27	0,05	0,77
45	135,20	0,26	-0,65	0,850	-	0,39	0,84	0,54	0,06	0,81
46	975,26	0,44	-0,05	0,530	-	0,11	-1,15	2,15	0,06	0,99
47	248,88	0,32	-0,54	0,430	-	0,13	1,07	1,21	0,05	0,98
48	149,40	0,30	-0,58	0,520	-	0,17	0,37	1,64	0,08	0,98
49	315,45	0,32	-0,43	0,500	-	0,14	0,54	0,94	0,05	0,93
50	207,60	0,15	-0,40	0,470	-	0,18	-0,57	2,13	0,02	0,92
51	289,00	0,18	-0,32	0,260	-	0,05	-0,27	2,05	0,05	0,93
52	309,97	0,34	-0,46	0,680	-	0,18	-0,6	1,72	0,04	0,98
53	147,52	0,19	-0,56	0,630	-	0,11	0,05	1,76	0,05	0,97
54	370,71	0,30	-0,46	0,560	-	0,08	-0,22	1,9	0,04	0,95
55	123,74	0,36	-0,66	0,630	-	0,21	0,45	1,93	0,04	0,99
56	283,04	0,28	-0,49	0,630	-	0,18	0,00	1,4	0,05	0,96
57	44,04	0,01	-0,52	0,370	-	0,25	0,35	0,87	0,04	1,00
58	224,14	0,22	-0,32	0,860	-	0,2056	0,6093	0,2146	0,0898	0,96
59	239,51	0,98	-0,72	0,853	-	0,593	-0,198	1,332	0,042	0,92
60	181,01	0,32	-0,53	0,923	-	0,385	-0,861	1,523	0,075	0,919
61	215,02	0,23	-0,29	0,756	-	0,869	0,006	1,212	0,042	0,899
62	-	-	-	-	-	0,066	-0,063	1,327	0,094	0,781
63	-	-	-	-	-	0,048	0,033	2,154	0,045	0,825
64	446,50	0,26	-0,09	0,855	3,35	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986
65	102,50	-0,09	-0,26	-	-	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
66	177,00	0,25	-0,36	0,900	7,35	0,244	0,419	1,309	0,069	0,946
67	-	-	-	-	2,27	0,05	-1,579	1,875	0,064	0,868

Identificação Id BDSF	Comportamento <i>Shakedown</i>								
	Cs - CP1	Cs - CP2	Cs - CP3	Cs - CP4	Cs - CP5	Cs - CP6	Cs - CP7	Cs - CP8	Cs - CP9
1	B	B	A	B	AB	AB	B	AB	AB
2	A	-	A	A	-	AB	-	AB	AB
3	A	A	A	A	A	A	A	A	B
4	A	-	AB	B	-	AB	-	AB	AB
5	A	-	A	A	-	A	-	A	A
6	A	-	B	B	-	AB	-	A	AB
7	A	-	A	A	-	AB	-	A	AB
8	A	-	A	A	-	B	-	A	B
9	A	-	A	A	-	A	-	A	A
10	B	B	B	B	B	B	B	B	B
11	A	-	A	A	-	A	-	A	AB
12	A	-	A	B	-	B	-	B	B
13	A	-	A	A	-	AB	-	AB	AB
14	A	-	A	A	-	A	-	A	A
15	A	-	B	B	-	B	-	B	B
16	A	-	B	B	-	B	-	B	B
17	A	-	B	B	-	B	-	B	B
18	A	A	A	A	A	A	A	A	AB
19	A	A	AB	A	A	AB	A	A	AB
20	A	A	B	B	B	B	B	-	-
21	A	A	B	A	B	B	A	B	B
22	A	-	A	A	-	AB	-	AB	B
23	A	A	AB	A	B	B	A	B	B
24	A	-	A	A	A	A	B	AB	AB
25	A	-	A	A	A	B	-	B	-
26	A	A	A	A	A	-	-	AB	-
27	A	-	B	A	-	B	-	B	B
28	A	A	A	A	A	B	A	B	B
29	A	A	A	A	B	-	A	B	B
30	B	A	AB	A	B	B	B	-	-
31	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB
32	A	-	B	-	AB	AB	B	AB	-
33	A	-	A	A	-	AB	-	AB	AB
34	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB
35	A	B	B	A	AB	B	A	B	-
36	A	A	A	A	A	A	A	A	AB
37	A	A	A	A	B	B	B	B	B
38	A	A	A	A	AA	A	A	A	B
39	A	A	B	B	B	B	B	B	B
40	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB
41	A	A	A	A	AB	AB	AB	AB	AB
42	A	A	B	A	B	AB	B	AB	AB
43	A	A	AB	A	A	AB	A	AB	AB
44	A	A	A	A	AB	AB	B	B	B
45	A	A	B	B	B	B	B	B	B
46	A	-	B	A	-	B	A	-	B
47	A	-	A	A	-	A	A	-	AB
48	A	-	A	A	-	AB	A	-	AB
49	A	-	A	A	-	A	A	-	A
50	A	A	AB	A	A	AB	A	A	AB
51	A	A	A	A	A	A	A	A	AB
52	A	A	AB	A	AB	AB	A	AB	AB
53	A	A	A	A	A	A	A	A	AB
54	A	A	AB	A	A	A	A	A	-
55	A	A	-	A	A	AB	A	AB	-
56	A	A	AB	A	A	AB	A	A	AB
57	A	-	A	A	-	A	A	-	A
58									
59	A	A	A	A	AB	AB	A	AB	C
60	A	A	AB	A	AB	AB	A	AB	C
61	A	A	A	A	AB	AB	AB	AB	C
62									
63									
64	A	A	AB	A	AB	AB	A	AB	AB
65	A	A	AB				AB	AB	
66	A	A	A	A	B	B	B		B
67				A	A	B	A	B	B

Identificação		Curva Característica - Sucção Matricial									
Id BDSF	Ψb1	Ψres1	Sres1	Ψb2	Sb	Ψres2	Sres2	a	Ψ _{W01}	Fc	Mod
1	3,5	5,00	0,840	10.000,00	0,82	26.800,00	0,02	0,06	200	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
2	3,0	6,00	0,890	7.500,00	0,85	22.500,00	0,08	0,03	800	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
3	2,5	16,00	0,700	8.000,00	0,62	21.500,00	0,02	0,04	30	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
4	4,0	5,50	0,740	10.000,00	0,59	23.000,00	0,03	0,05	30	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
5	3,4	6,50	0,780	8.700,00	0,72	27.000,00	0,03	0,05	300	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
6	4,8	6,50	0,840	18.000,00	0,77	36.000,00	0,10	0,04	50	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
7	6,0	9,00	0,889	14.000,00	0,83	20.000,00	0,05	0,05	6	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
8	3,8	10,00	0,910	12.000,00	0,87	48.000,00	0,07	0,04	100	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
9	1,2	11,00	0,750	14.000,00	0,72	30.000,00	0,04	0,04	400	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
10	2,1	20,00	0,740	15.000,00	0,66	25.000,00	0,04	0,05	25	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
11	3,8	20,00	0,790	13.500,00	0,71	22.500,00	0,04	0,05	40	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
12	2,0	11,00	0,690	5.500,00	0,66	24.000,00	0,04	0,05	1000	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
13	3,5	6,50	0,730	13.800,00	0,65	30.000,00	0,04	0,05	40	Bimodal	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	6	300	-	13000	-	45000	-	-	335	Bimodal	Duner (1994)
16	150	900	-	8500	-	50000	-	-	600	Bimodal	Duner (1994)
17	600	11000	-	-	-	-	-	-	560	Unimodal	Fredlund e Xing (1994)

Obs.: Os demais solos do BDSF não apresentaram resultados da modelagem de curvas características.

Identificação		Características Químicas										
Id BDSF	pH	ΔpH	CTC	M.O.	S(%)	V (%)	ΔP (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ki	Kr
1	4,7	-0,7	4,63	7,59	36,61	25,05	-	-	-	-	-	-
2	4,9	-0,8	4,55	7,12	28,35	30,55	-	-	-	-	-	-
3	4,9	-0,9	2,8	3,85	43,36	28,93	-	-	-	-	-	-
4	4,8	-0,9	3,55	5,53	61,45	19,44	-	-	-	-	-	-
5	4,6	-0,7	3,75	5,11	79,11	8,80	-	-	-	-	-	-
6	4,6	-0,6	3,85	4,37	54,30	17,92	-	-	-	-	-	-
7	4,4	-0,3	3,84	4,32	41,38	17,71	-	-	-	-	-	-
8	4,6	-0,5	4,4	7,19	53,17	13,41	-	-	-	-	-	-
9	4,6	-0,6	5,42	5,68	73,10	7,20	-	-	-	-	-	-
10	4,5	-0,6	5,74	6,25	68,97	9,41	-	-	-	-	-	-
11	4,4	-0,4	4,46	6,67	56,60	10,31	-	-	-	-	-	-
12	4,8	-0,8	4,07	5,94	86,32	3,93	-	-	-	-	-	-
13	4,7	-0,7	4,64	4,43	55,49	15,73	-	-	-	-	-	-
14	5,8	-	1,8	0,2	55,6	9,2	-	-	-	-	-	-
15	5,2	-	1,3	0,5	-	-	-	25,22	18,3	26,86	2,34	1,21
16	4,8	-	6,5	0,4	-	-	-	21,1	13,88	6,36	2,58	2
17	4,2	-	2	0,1	-	-	-	13,37	9,33	3,01	2,44	2,02
58	4,87	4,01	-	2,7	-	-	9,24	30,1	22,8	26,9	2,24	1,28
59	5	-	3,1	0,4	51,6	-	-	14,3	9,63	2,52	2,52	2,07
60	4,5	-	5,5	0,5	34,5	-	-	16,91	12,11	2,37	2,37	1,83
61	4,7	-	4,7	0,6	29,8	-	-	17,59	11,35	2,63	2,63	2
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	5,52	0,19	-	-	-	-	8,39	13	20,1	25,5	1,1	0,61
65	5,1	-0,07	-	-	-	-	9,74	15,7	22,6	10,1	1,18	0,92
66	-	-	-	-	-	-	-	12,2	10,2	2,5	2,03	1,76
67	5,11	-0,41	-	-	-	-	1,4	6,7	2,4	1,8	4,88	3,3

Obs.: Os solos 18 a 57 não apresentaram resultados de ensaios químicos.

Identificação	Características mineralógicas por DRX					
Id BDSF	K	I	M	Fe	Al	Gib
1	1	1	0	1	1	0
2	1	1	0	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1
4	1	1	0	1	1	1
5	1	1	0	1	1	1
6	1	1	0	1	1	1
7	1	1	0	1	1	1
8	1	1	0	1	1	0
9	1	1	0	1	1	0
10	1	1	0	1	1	0
11	1	1	0	1	1	0
12	1	1	0	1	1	1
13	1	1	0	1	1	0
14	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	1	0	1
16	1	1	0	1	0	0
17	1	1	0	0	0	0
43	1	0	0	1	0	1
44	1	1	0	0	0	0
45	1	1	0	0	0	0
47	1	0	0	0	0	1
48	1	0	0	0	0	1
49	1	0	0	0	0	1
50	1	0	0	0	0	1
51	1	0	0	0	0	1
52	1	0	0	0	0	1
53	1	0	0	0	0	1
54	1	0	0	0	0	1
55	1	0	0	0	0	1
56	1	0	0	0	0	1
57	1	0	0	0	0	1
58	1	0	0	1	1	0

Obs.: Os solos que não apresentaram resultados de ensaios mineralógicos foram suprimidos para otimizar o uso do espaço.

APÊNDICE F – MATRIZES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Dos Solos desta tese (RMRecife)

Correlações	δ	LL1	LP1	IP1	LL2	LP2	IP2	pdmáx	Wo	Pargila	Psilte
δ	1,00										
LL1	0,39	1,00									
LP1	0,38	0,86	1,00								
IP1	-0,01	0,22	-0,30	1,00							
LL2	0,46	0,80	0,74	0,09	1,00						
LP2	0,63	0,89	0,83	0,08	0,84	1,00					
IP2	-0,02	0,26	0,22	0,06	0,68	0,17	1,00				
pdmáx	-0,46	-0,83	-0,70	-0,21	-0,53	-0,84	0,18	1,00			
Wo	0,25	0,90	0,80	0,17	0,58	0,82	-0,05	-0,94	1,00		
Pargila	0,23	0,87	0,68	0,32	0,66	0,79	0,12	-0,84	0,89	1,00	
Psilte	0,33	0,70	0,59	0,18	0,31	0,64	-0,30	-0,94	0,90	0,71	1,00
Pareia	-0,28	-0,85	-0,68	-0,28	-0,53	-0,76	0,07	0,95	-0,96	-0,92	-0,93
Paf	-0,38	-0,89	-0,64	-0,45	-0,82	-0,81	-0,39	0,77	-0,78	-0,86	-0,64
Pam	0,14	-0,05	-0,16	0,21	0,38	0,00	0,69	0,38	-0,41	-0,21	-0,57
Pag	-0,26	0,16	0,01	0,28	0,32	-0,07	0,67	0,24	-0,06	-0,02	-0,22
Pped	-0,15	0,23	0,08	0,28	0,24	0,01	0,43	-0,07	0,20	0,10	0,22
Pp10	0,21	-0,21	-0,05	-0,30	-0,29	0,03	-0,57	-0,07	-0,10	-0,06	-0,03
Pr10	-0,21	0,21	0,05	0,30	0,29	-0,03	0,57	0,07	0,10	0,06	0,03
CBR	0,10	-0,50	-0,29	-0,37	-0,43	-0,49	-0,12	0,66	-0,65	-0,63	-0,61
Exp.	-0,44	-0,44	-0,29	-0,26	-0,36	-0,40	-0,11	0,28	-0,31	-0,47	-0,19
pHagua	-0,46	-0,43	-0,43	0,02	-0,66	-0,61	-0,38	0,23	-0,22	-0,39	0,04
pHKCl	0,61	0,54	0,52	0,02	0,20	0,55	-0,39	-0,72	0,63	0,47	0,72
Δ pH	0,66	0,61	0,60	-0,01	0,69	0,78	0,19	-0,49	0,45	0,54	0,25
M.O.	0,04	0,64	0,55	0,14	0,45	0,50	0,14	-0,57	0,63	0,53	0,57
CTC	0,41	0,32	0,13	0,34	0,48	0,43	0,29	-0,32	0,20	0,42	0,19
S(%)	-0,01	-0,33	-0,44	0,23	-0,04	-0,28	0,31	0,59	-0,61	-0,52	-0,69
V (%)	-0,33	-0,03	0,10	-0,25	-0,30	-0,13	-0,38	-0,27	0,32	0,19	0,46
Mrmédio	0,03	-0,72	-0,51	-0,38	-0,53	-0,52	-0,26	0,51	-0,64	-0,56	-0,46
K1TC	0,33	-0,25	-0,32	0,15	-0,11	-0,09	-0,08	0,22	-0,38	-0,22	-0,29
K2TC	0,32	0,20	0,04	0,29	0,18	0,21	0,04	-0,12	0,03	0,10	0,04
K1TD	0,35	-0,40	-0,43	0,06	-0,24	-0,20	-0,16	0,29	-0,49	-0,33	-0,34
K2TD	0,35	0,14	0,01	0,25	0,10	0,17	-0,04	-0,12	0,00	0,06	0,07
K1MC	0,37	-0,06	-0,09	0,07	0,01	0,03	-0,03	0,08	-0,21	-0,09	-0,14
K2MC	0,08	0,61	0,49	0,20	0,46	0,39	0,30	-0,30	0,41	0,39	0,27
K3MC	0,41	-0,19	-0,23	0,08	-0,21	-0,03	-0,34	-0,04	-0,19	-0,16	0,07
S _{wo}	0,03	0,11	-0,09	0,38	0,00	-0,13	0,17	0,05	-0,02	-0,12	0,07
θ_s	0,22	-0,09	0,26	-0,66	0,03	0,07	-0,04	0,02	-0,05	-0,08	-0,05
θ_r	-0,13	0,18	-0,02	0,38	0,13	0,14	0,04	-0,22	0,23	0,49	0,11
SMR	0,31	-0,16	0,13	-0,55	0,16	-0,03	0,34	0,31	-0,35	-0,40	-0,32
Ψ_{b1}	0,05	0,41	0,42	-0,04	0,35	0,41	0,07	-0,40	0,46	0,44	0,29
Ψ_{res1}	0,39	-0,17	0,15	-0,61	0,12	0,04	0,18	0,23	-0,30	-0,35	-0,27
Sres1	0,30	0,80	0,68	0,20	0,55	0,80	-0,09	-0,89	0,93	0,80	0,81

Correlações	δ	LL1	LP1	IP1	LL2	LP2	IP2	$\rho_{d\max}$	Wo	Pargila	Psilte
Ψ_{b2}	0,39	0,11	0,12	-0,03	0,42	0,46	0,14	-0,19	0,08	0,32	-0,08
Sb	0,36	0,80	0,60	0,35	0,49	0,75	-0,13	-0,86	0,88	0,78	0,79
Ψ_{res2}	0,32	0,28	0,11	0,32	0,14	0,47	-0,37	-0,44	0,34	0,28	0,30
Sres2	0,48	0,43	0,32	0,18	0,52	0,59	0,15	-0,48	0,42	0,34	0,35
d'	-0,05	0,23	0,17	0,11	0,28	0,10	0,36	-0,13	0,14	0,33	0,09
PMIwo	-0,48	-0,49	-0,40	-0,16	-0,78	-0,67	-0,51	0,32	-0,32	-0,35	-0,12
PMI	0,02	-0,35	-0,12	-0,43	-0,51	-0,30	-0,52	0,11	-0,19	-0,26	0,00
e'	0,03	-0,35	-0,12	-0,43	-0,51	-0,27	-0,56	0,09	-0,19	-0,25	0,00
c'	-0,57	0,18	0,03	0,29	-0,15	-0,18	-0,02	-0,18	0,31	0,16	0,37
Pp200	0,30	0,85	0,69	0,27	0,52	0,77	-0,10	-0,96	0,96	0,92	0,93
ep (mm)	-0,29	0,17	0,16	0,02	0,10	0,13	0,01	-0,37	0,38	0,42	0,38
Ψ_1	-0,41	-0,21	-0,23	0,03	-0,27	-0,34	-0,03	0,09	-0,10	0,02	0,03
Ψ_2	-0,14	-0,23	-0,23	0,02	-0,27	-0,40	0,05	0,25	-0,25	-0,17	-0,06
Ψ_3	0,45	0,42	0,49	-0,14	0,39	0,66	-0,19	-0,59	0,50	0,37	0,40
Ψ_4	0,31	0,47	0,42	0,07	0,36	0,50	-0,02	-0,52	0,51	0,29	0,54

Correlações	Pareia	Paf	Pam	Pag	Pped	Pp10	Pr10	CBR	Exp.	pHagua	pHKCl
Pareia	1,00										
Paf	0,81	1,00									
Pam	0,42	-0,18	1,00								
Pag	0,07	-0,25	0,45	1,00							
Pped	-0,25	-0,30	-0,01	0,75	1,00						
Pp10	0,11	0,30	-0,20	-0,92	-0,95	1,00					
Pr10	-0,11	-0,30	0,20	0,92	0,95	-1,00	1,00				
CBR	0,68	0,66	0,11	-0,02	-0,20	0,13	-0,13	1,00			
Exp.	0,36	0,34	0,07	-0,05	-0,14	0,10	-0,10	-0,18	1,00		
pHagua	0,16	0,35	-0,28	0,03	0,29	-0,19	0,19	0,07	0,32	1,00	
pHKCl	-0,63	-0,38	-0,44	-0,43	-0,07	0,25	-0,25	-0,09	-0,46	0,00	1,00
ΔpH	-0,40	-0,47	0,09	-0,20	-0,30	0,27	-0,27	-0,10	-0,47	-0,92	0,39
M.O.	-0,60	-0,61	-0,07	0,05	0,26	-0,18	0,18	-0,49	-0,02	-0,01	0,17
CTC	-0,33	-0,53	0,30	-0,03	0,08	-0,03	0,03	-0,29	-0,26	-0,37	-0,04
S(%)	0,64	0,21	0,75	0,41	-0,02	-0,18	0,18	0,39	0,20	-0,18	-0,60
V (%)	-0,36	0,10	-0,77	-0,28	0,14	0,04	-0,04	-0,28	0,03	0,53	0,34
Mrmédio	0,57	0,69	-0,09	-0,37	-0,40	0,42	-0,42	0,46	-0,01	0,12	-0,14
K1TC	0,30	0,15	0,30	-0,32	-0,31	0,33	-0,33	0,38	-0,05	-0,20	-0,10
K2TC	-0,07	-0,25	0,29	-0,09	-0,09	0,10	-0,10	0,10	0,00	-0,24	0,03
K1TD	0,38	0,30	0,23	-0,42	-0,38	0,42	-0,42	0,44	-0,03	-0,16	-0,12
K2TD	-0,06	-0,19	0,22	-0,15	-0,11	0,13	-0,13	0,14	0,01	-0,20	0,05
K1MC	0,14	0,02	0,23	-0,26	-0,24	0,27	-0,27	0,36	-0,04	-0,25	-0,01
K2MC	-0,37	-0,50	0,14	0,33	0,28	-0,32	0,32	-0,07	-0,06	-0,26	0,09
K3MC	0,07	0,08	0,03	-0,43	-0,26	0,36	-0,36	0,19	0,14	0,01	0,07
S _{wo}	-0,01	-0,17	0,23	0,32	0,52	-0,46	0,46	0,14	-0,10	0,47	0,20
θ_s	0,10	0,22	-0,16	-0,36	-0,37	0,39	-0,39	0,19	-0,19	-0,12	0,19
θ_r	-0,29	-0,23	-0,12	-0,30	-0,32	0,33	-0,33	-0,38	-0,34	-0,36	0,08
SMR	0,38	0,24	0,29	-0,02	0,01	0,00	0,00	0,47	0,04	-0,19	-0,19
Ψ_{b1}	-0,37	-0,31	-0,14	-0,05	-0,18	0,13	-0,13	-0,41	-0,03	-0,39	0,31
Ψ_{res1}	0,34	0,29	0,14	-0,19	-0,20	0,21	-0,21	0,44	-0,02	-0,37	-0,16

Correlações	Pareia	Paf	Pam	Pag	Pped	Pp10	Pr10	CBR	Exp.	pHagua	pHKCl
Sres1	-0,87	-0,67	-0,42	-0,12	0,17	-0,05	0,05	-0,62	-0,37	-0,29	0,67
Ψb2	-0,09	-0,21	0,21	-0,31	-0,44	0,41	-0,41	-0,23	-0,26	-0,69	-0,01
Sb	-0,85	-0,66	-0,40	-0,14	0,19	-0,05	0,05	-0,48	-0,55	-0,25	0,74
Ψres2	-0,29	-0,30	0,00	-0,17	-0,21	0,21	-0,21	-0,31	-0,20	-0,13	0,24
Sres2	-0,38	-0,49	0,14	0,02	0,20	-0,13	0,13	-0,38	-0,34	-0,11	0,52
d'	-0,22	-0,25	0,03	-0,08	-0,04	0,06	-0,06	-0,22	-0,30	-0,28	-0,11
PMIwo	0,27	0,59	-0,46	-0,37	-0,35	0,38	-0,38	0,27	0,24	0,49	-0,05
PMI	0,17	0,56	-0,55	-0,64	-0,50	0,60	-0,60	0,35	0,16	-0,04	0,18
e'	0,18	0,53	-0,49	-0,69	-0,60	0,68	-0,68	0,32	0,28	-0,06	0,13
c'	-0,31	-0,21	-0,23	0,22	0,43	-0,36	0,36	-0,43	0,31	0,64	0,03
Pp200	-1,00	-0,80	-0,43	-0,13	0,18	-0,05	0,05	-0,67	-0,35	-0,19	0,64
εp (mm)	-0,43	-0,33	-0,20	-0,11	0,00	0,05	-0,05	-0,71	0,21	0,25	0,11
Ψ1	-0,03	-0,05	0,01	0,15	0,10	-0,13	0,13	-0,25	0,44	0,53	-0,24
Ψ2	0,09	0,08	-0,01	0,34	0,43	-0,42	0,42	0,26	-0,02	0,48	-0,25
Ψ3	-0,38	-0,30	-0,14	-0,51	-0,43	0,50	-0,50	-0,39	-0,13	-0,41	0,54
Ψ4	-0,47	-0,35	-0,27	0,19	0,36	-0,30	0,30	-0,34	-0,08	-0,31	0,14

Correlações	ΔpH	M.O.	CTC	S(%)	V (%)	Mrmédio	K1TC	K2TC	K1TD	K2TD
ΔpH	1,00									
M.O.	0,07	1,00								
CTC	0,33	0,53	1,00							
S(%)	-0,07	-0,13	0,17	1,00						
V (%)	-0,35	-0,02	-0,40	-0,89	1,00					
Mrmédio	-0,17	-0,77	-0,32	-0,08	0,22	1,00				
K1TC	0,14	0,08	0,61	0,52	-0,59	0,01	1,00			
K2TC	0,23	0,50	0,67	0,48	-0,64	-0,51	0,83	1,00		
K1TD	0,10	-0,08	0,54	0,45	-0,49	0,26	0,96	0,68	1,00	
K2TD	0,20	0,47	0,67	0,44	-0,59	-0,44	0,85	0,99	0,73	1,00
K1MC	0,23	0,23	0,63	0,43	-0,57	-0,16	0,94	0,91	0,88	0,94
K2MC	0,28	0,67	0,38	0,22	-0,40	-0,86	0,26	0,71	0,04	0,67
K3MC	0,02	0,22	0,59	0,28	-0,35	-0,01	0,85	0,77	0,86	0,85
S _{wo}	-0,36	0,34	0,11	0,23	-0,14	-0,44	0,25	0,42	0,12	0,39
θ _s	0,19	-0,29	-0,29	-0,44	0,35	0,66	-0,36	-0,60	-0,17	-0,56
θ _r	0,36	-0,07	0,13	-0,35	0,19	0,10	-0,08	-0,16	-0,05	-0,19
SMR	0,10	0,16	0,31	0,33	-0,37	0,13	0,47	0,36	0,50	0,39
Ψb1	0,48	-0,24	-0,42	-0,45	0,27	-0,03	-0,65	-0,53	-0,64	-0,57
Ψres1	0,28	0,03	0,23	0,21	-0,32	0,33	0,36	0,20	0,46	0,25
Sres1	0,53	0,38	0,07	-0,61	0,33	-0,48	-0,40	-0,11	-0,50	-0,15
Ψb2	0,64	-0,23	0,38	-0,04	-0,20	0,27	0,14	-0,08	0,19	-0,10
Sb	0,52	0,45	0,18	-0,52	0,23	-0,52	-0,20	0,07	-0,31	0,04
Ψres2	0,21	0,21	0,18	0,08	-0,20	-0,18	0,00	0,09	-0,05	0,06
Sres2	0,30	0,03	0,07	-0,22	0,07	-0,13	-0,26	-0,22	-0,31	-0,28
d'	0,21	0,37	0,41	-0,20	0,05	0,00	0,05	0,07	0,10	0,08

Correlações	ΔpH	M.O.	CTC	S(%)	V (%)	Mrmédio	K1TC	K2TC	K1TD	K2TD
PMIwo	-0,47	-0,30	-0,53	-0,28	0,48	0,46	-0,15	-0,31	0,00	-0,23
PMI	0,11	-0,38	-0,35	-0,33	0,31	0,50	0,11	-0,11	0,26	-0,01
e'	0,11	-0,28	-0,25	-0,24	0,21	0,43	0,22	0,04	0,36	0,14
c'	-0,57	0,52	-0,17	-0,26	0,43	-0,52	-0,35	-0,02	-0,45	-0,04
Pp200	0,42	0,59	0,33	-0,65	0,35	-0,55	-0,28	0,07	-0,36	0,07
εp (mm)	-0,18	0,06	-0,12	-0,65	0,66	0,02	-0,61	-0,55	-0,57	-0,56
Ψ1	-0,58	-0,04	-0,03	-0,19	0,37	0,05	-0,23	-0,20	-0,19	-0,16
Ψ2	-0,54	0,13	0,26	0,07	0,09	0,06	0,15	0,14	0,20	0,22
Ψ3	0,59	0,08	-0,08	-0,37	0,10	0,00	-0,23	-0,19	-0,23	-0,23
Ψ4	0,34	0,41	0,17	-0,07	-0,08	-0,37	-0,22	0,08	-0,24	0,10

Correlações	K1MC	K2MC	K3MC	S _{wo}	θ _s	θ _r	SMR	Ψb1	Ψres1	Sres1	Ψb2
K1MC	1,00										
K2MC	0,50	1,00									
K3MC	0,86	0,22	1,00								
S _{wo}	0,27	0,44	0,19	1,00							
θ _s	-0,37	-0,58	-0,30	-0,51	1,00						
θ _r	-0,14	-0,17	-0,25	-0,35	0,11	1,00					
SMR	0,53	0,19	0,39	0,15	0,25	-0,48	1,00				
Ψb1	-0,60	-0,15	-0,64	-0,48	0,30	0,46	-0,54	1,00			
Ψres1	0,41	0,00	0,34	-0,20	0,49	-0,30	0,90	-0,34	1,00		
Sres1	-0,32	0,21	-0,30	-0,09	-0,01	0,32	-0,42	0,60	-0,34	1,00	
Ψb2	0,02	-0,34	-0,01	-0,65	0,32	0,47	-0,02	0,35	0,16	0,24	1,00
Sb	-0,13	0,31	-0,15	0,13	-0,11	0,35	-0,36	0,39	-0,32	0,94	0,13
Ψres2	-0,11	-0,11	0,09	-0,16	-0,07	0,00	-0,33	0,05	-0,20	0,38	0,34
Sres2	-0,36	-0,20	-0,29	0,14	0,13	0,02	-0,18	0,36	-0,23	0,61	0,38
d'	0,10	0,11	-0,02	-0,09	0,26	0,60	0,19	-0,04	0,30	0,02	0,12
PMIwo	-0,14	-0,34	-0,02	-0,12	0,24	0,22	-0,23	-0,01	-0,10	-0,37	-0,44
PMI	0,16	-0,23	0,22	-0,38	0,35	0,19	0,09	0,15	0,30	-0,13	-0,05
e'	0,29	-0,14	0,37	-0,40	0,27	0,13	0,12	0,08	0,32	-0,18	-0,03
c'	-0,26	0,31	-0,18	0,52	-0,40	0,00	-0,34	-0,06	-0,53	0,14	-0,72
Pp200	-0,12	0,35	-0,05	-0,03	-0,07	0,32	-0,39	0,39	-0,33	0,87	0,12
εp (mm)	-0,62	-0,36	-0,43	-0,28	0,23	0,39	-0,56	0,52	-0,52	0,36	0,19
Ψ1	-0,18	-0,14	0,01	-0,02	-0,11	-0,07	-0,34	-0,03	-0,43	-0,28	-0,21
Ψ2	0,24	0,12	0,33	0,32	-0,14	-0,40	0,24	-0,67	0,10	-0,49	-0,46
Ψ3	-0,28	-0,22	-0,19	-0,37	0,42	0,29	-0,17	0,61	0,03	0,66	0,54
Ψ4	-0,10	0,29	0,02	-0,14	-0,07	-0,19	0,07	0,11	0,24	0,48	-0,04

Correlações	Sb	Ψres2	Sres2	d'	PMIwo	PMI	e'	c'	Pp200	εp (mm)	Ψ1
Sb	1,00										
Ψres2	0,40	1,00									
Sres2	0,56	0,48	1,00								
d'	0,13	-0,25	-0,25	1,00							
PMIwo	-0,33	-0,36	-0,62	0,18	1,00						

Correlações	Sb	Ψres2	Sres2	d'	PMIwo	PMI	e'	c'	Pp200	εp (mm)	Ψ1
PMI	-0,14	-0,41	-0,49	0,08	0,68	1,00					
e'	-0,21	-0,33	-0,56	0,05	0,65	0,97	1,00				
c'	0,17	-0,17	-0,13	0,13	0,32	-0,20	-0,20	1,00			
Pp200	0,85	0,31	0,37	0,22	-0,25	-0,14	-0,14	0,29	1,00		
εp (mm)	0,16	0,03	0,30	0,11	0,14	-0,13	-0,14	0,39	0,43	1,00	
Ψ1	-0,41	-0,25	-0,26	-0,10	0,31	-0,10	-0,03	0,41	0,03	0,62	1,00
Ψ2	-0,40	-0,32	-0,45	0,09	0,18	-0,12	-0,10	0,22	-0,12	-0,11	0,55
Ψ3	0,56	0,55	0,64	-0,02	-0,25	0,06	0,05	-0,26	0,42	0,29	-0,45
Ψ4	0,44	0,34	0,12	0,08	-0,34	-0,07	-0,08	0,00	0,45	-0,19	-0,38

Correlações	Ψ2	Ψ3	Ψ4
Ψ2	1,00		
Ψ3	-0,82	1,00	
Ψ4	-0,07	0,24	1,00

Solos do Banco de Dados (BDSF)

Correlações	c'	d'	e'	PMI	Pargila	Psilte	Pareia	Pped	LL	LP	IP
c'	1,00										
d'	0,04	1,00									
e'	-0,35	-0,59	1,00								
PMI	-0,41	-0,51	0,92	1,00							
Pargila	0,52	0,31	-0,68	-0,70	1,00						
Psilte	0,06	-0,36	0,42	0,41	-0,37	1,00					
Pareia	-0,59	-0,07	0,45	0,44	-0,80	-0,24	1,00				
Pped	-0,14	-0,29	0,37	0,31	-0,43	0,37	0,11	1,00			
LL	0,60	-0,40	-0,12	-0,20	0,33	0,14	-0,52	0,24	1,00		
LP	0,50	0,08	-0,37	-0,40	0,49	-0,05	-0,53	-0,07	0,57	1,00	
IP	0,30	-0,55	0,16	0,12	-0,01	0,21	-0,18	0,35	0,73	-0,15	1,00
δ	-0,21	-0,08	-0,22	-0,17	-0,02	0,09	-0,04	0,03	0,60	0,84	0,10
$\rho_{dm\acute{a}x}$	-0,75	0,07	0,07	0,10	-0,41	-0,23	0,58	0,00	-0,67	-0,43	-0,45
W _o	0,80	-0,01	-0,30	-0,33	0,59	0,23	-0,77	-0,07	0,72	0,64	0,33
CBR/MiniCBR	-0,20	-0,04	-0,01	0,00	0,02	-0,52	0,35	-0,10	-0,06	0,15	-0,30
Exp.	0,08	-0,03	0,27	0,40	-0,25	0,61	-0,14	0,26	-0,06	-0,12	0,01
MRmédio	-0,17	0,77	-0,59	-0,49	0,48	-0,64	-0,02	-0,38	-0,34	0,05	-0,49
K1TC	-0,29	-0,45	0,29	0,80	-0,39	0,11	0,33	-0,38	0,03	0,36	-0,23
K2TC	-0,51	-0,47	0,18	0,69	-0,70	0,29	0,52	0,03	-0,20	-0,48	0,14
R ² TC	0,11	-0,10	-0,05	0,45	0,00	-0,02	0,03	-0,25	0,25	0,31	0,04
K1TD	-0,16	-0,11	-0,12	0,26	0,05	-0,07	0,01	-0,35	-0,06	0,25	-0,25
K2TD	0,27	-0,31	0,15	-0,01	-0,14	0,61	-0,15	-0,10	0,26	0,35	0,01
R ² TD	0,15	0,26	-0,39	-0,27	0,49	-0,39	-0,29	0,16	0,23	0,09	0,20
K1MC	-0,24	0,27	-0,26	-0,12	-0,01	-0,51	0,38	-0,29	-0,27	0,22	-0,56
K2MC	-0,18	-0,20	0,26	0,23	-0,23	0,02	0,24	0,09	-0,25	-0,22	-0,11
K3MC	-0,09	0,14	-0,22	-0,05	0,01	-0,27	0,19	-0,20	-0,02	0,30	-0,30
ε_p (mm)	0,02	0,42	-0,03	-0,29	0,16	-0,12	-0,07	0,01	-0,18	-0,14	-0,17
Ψ_1	0,03	-0,20	0,24	0,13	-0,09	0,28	-0,09	0,18	-0,07	-0,35	0,21
Ψ_2	0,27	-0,09	-0,01	-0,04	0,03	0,37	-0,28	0,19	0,14	0,02	0,15
Ψ_3	-0,05	0,17	-0,08	-0,07	0,13	-0,27	0,05	-0,21	0,00	0,09	-0,07
Ψ_4	0,05	-0,17	0,00	-0,03	0,18	-0,10	-0,14	-0,01	0,14	0,44	-0,20

Correlações	δ	$\rho_{dm\acute{a}x}$	W_o	CBR/MiniCBR	Exp.	MRmédio	K1TC	K2TC
δ	1,00							
$\rho_{dm\acute{a}x}$	0,16	1,00						
W_o	-0,03	-0,91	1,00					
CBR/MiniCBR	0,27	0,46	-0,34	1,00				
Exp.	0,04	-0,22	0,13	-0,15	1,00			
MRmédio	-0,16	0,42	-0,27	0,60	-0,34	1,00		
K1TC	0,44	0,05	-0,10	0,32	-0,07	-0,11	1,00	
K2TC	0,51	0,34	-0,40	-0,16	0,18	-0,68	0,47	1,00
R ² TC	0,05	-0,11	0,17	0,12	-0,44	0,13	0,54	0,09
K1TD	0,58	0,16	-0,02	0,62	-0,19	0,35	0,84	0,26
K2TD	0,74	-0,41	0,44	-0,14	0,14	-0,65	0,76	0,40
R ² TD	-0,20	-0,01	0,04	0,07	-0,37	0,57	-0,46	-0,46
K1MC	0,23	0,31	-0,31	0,56	-0,25	0,36	0,93	0,35
K2MC	-0,13	0,14	-0,19	-0,31	-0,29	-0,45	0,22	0,35
K3MC	0,28	0,07	-0,08	0,12	0,03	0,17	0,60	0,05
ε_p (mm)	-0,21	0,01	-0,09	-0,57	-0,27	0,17	-0,59	-0,49
Ψ_1	-0,19	-0,04	0,06	-0,52	0,00	-0,34	-0,37	0,02
Ψ_2	0,14	-0,14	0,24	0,15	0,12	-0,19	-0,10	-0,18
Ψ_3	-0,06	-0,08	-0,02	-0,16	-0,14	0,22	-0,11	0,16
Ψ_4	0,42	-0,05	0,07	-0,07	-0,12	-0,10	0,15	-0,27
Correlações	R ² TC	K1TD	K2TD	R ² TD	K1MC	K2MC	K3MC	
R ² TC	1,00							
K1TD	0,18	1,00						
K2TD	0,17	0,47	1,00					
R ² TD	0,35	-0,22	-0,70	1,00				
K1MC	0,18	0,91	0,63	-0,32	1,00			
K2MC	-0,14	-0,14	0,43	-0,51	0,21	1,00		
K3MC	0,15	0,53	0,71	-0,38	0,70	-0,30	1,00	
ε_p (mm)	-0,06	-0,68	-0,46	0,35	-0,57	-0,26	-0,48	
Ψ_1	-0,14	-0,55	0,00	-0,25	-0,43	0,08	-0,30	
Ψ_2	-0,12	0,13	0,32	-0,25	-0,29	-0,14	-0,09	
Ψ_3	0,01	-0,10	-0,34	0,27	0,14	-0,01	0,01	
Ψ_4	0,00	0,09	0,14	0,15	0,17	0,08	0,17	
Correlações	ε_p (mm)	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4			
ε_p (mm)	1,00							
Ψ_1	0,66	1,00						
Ψ_2	-0,07	0,41	1,00					
Ψ_3	0,30	-0,38	-0,75	1,00				
Ψ_4	-0,38	-0,28	-0,13	0,13	1,00			

APÊNDICE G – EXEMPLO DE RELATÓRIO DO PROGRAMA MeDiNa

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Mayssa Sousa (mayssa.jc_123@hotmail.com), da empresa UFPE..

Análise do pavimento

Empresa: **UFPE**

Nome do Projeto: **Seção 14 - Solo 09MG-LA'**

Responsável pelo projeto: **Mayssa**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **12/07/2021 às 17:45:30** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **17,7%**

> > Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **1,0mm**

ALERTAS

- *Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!*

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, **a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista**, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1	5,0	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	SOLO CIMENTO Ceratti, 1991 (mistura 5)	15,0	Sigmoidal Ei (MPa) = 9230 (1º mês) Ef (MPa) = 9227 (fim período)	0,25
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO solo fino 09MG-LA'	15,0	Resiliente Não Linear MR = 376 MPa (1º mês) k1 = 601,39 k2 = 0,362 k3 = -0,358 k4 = 0,000	0,45
4	SUBLEITO Solo Fino 09MG-LA'	SL	Resiliente Não Linear MR = 470 MPa (1º mês) k1 = 601,39 k2 = 0,362 k3 = -0,358 k4 = 0,000	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 - Modelo: $k_1 \cdot (et \wedge k_2)$
 - Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 - Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 - Classe de Fadiga: ≥ 1
 - FFM (100μ a 250μ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 572 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1486 ciclos

2 - SOLO CIMENTO: Ceratti, 1991 (mistura 5)

Propriedades

Descrição do Material = Solo vermelho - SP
 Grupo MCT = LA'
 Teor ótimo de cimento = 8% (em massa)
 Resistência à tração (MPa) = 0,99
 Massa específica (g/cm³) = 1,809
 Umidade Ótima (%) = 14,5
 Energia Compactação = -
 Norma ou Especificação = DNIT ES 143

Modelos

3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: solo fino 09MG-LA'

Propriedades

Descrição do Material = Solo fino arenoargiloso
 Grupo MCT = LA"
 MCT - Coeficiente c' = ...
 MCT - Índice e' = ...
 Massa específica (g/cm^3) = 1,90
 Umidade Ótima (%) = 12,7
 Energia Compactação = Intermediária
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = \text{psi1} \cdot (s3^{\wedge} \text{psi2}) \cdot (sd^{\wedge} \text{psi3}) \cdot (N^{\wedge} \text{psi4})$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,076**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,043**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,912**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,047**

4 - SUBLEITO: Solo Fino 09MG-LA'

Propriedades

Descrição do Material = Solo fino arenoargiloso
 Grupo MCT = LA"
 MCT - Coeficiente c' = ...
 MCT - Índice e' = ...
 Massa específica (g/cm^3) = 1,90
 Umidade Ótima (%) = 12,7
 Energia Compactação = ...
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = \text{psi1} \cdot (s3^{\wedge} \text{psi2}) \cdot (sd^{\wedge} \text{psi3}) \cdot (N^{\wedge} \text{psi4})$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,076**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,043**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,912**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,047**

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **10900**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **3,98e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **3,98e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **5,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **5,00e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	3,242e+05	1,00%	0,8
6	1,965e+06	1,94%	0,9
12	3,979e+06	2,62%	0,9
18	6,042e+06	3,20%	0,9
24	8,156e+06	3,75%	0,9
30	1,032e+07	4,29%	0,9
36	1,254e+07	4,85%	0,9
42	1,482e+07	5,43%	0,9
48	1,715e+07	6,03%	1,0
54	1,954e+07	6,67%	1,0
60	2,198e+07	7,35%	1,0
66	2,449e+07	8,08%	1,0
72	2,706e+07	8,86%	1,0
78	2,969e+07	9,70%	1,0

78	2,969e+07	9,70%	1,0
84	3,239e+07	10,60%	1,0
90	3,516e+07	11,58%	1,0
96	3,799e+07	12,63%	1,0
102	4,089e+07	13,76%	1,0
108	4,387e+07	14,99%	1,0
114	4,692e+07	16,30%	1,0
120	5,004e+07	17,72%	1,0

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	SOLO CIMENTO	0,00
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,29
4	SUBLEITO	0,71
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		1,0

Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	13	11	10	7	6	4	3	2	2
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	14	11	9	7	5	3	2	1	1

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO CIMENTO - Ceratti, 1991 (mistura 5)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	13	11	10	7	6	4	3	2	2

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - solo fino 09MG-LA'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	25	15	11	8	6	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Fino 09MG-LA'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	24	15	11	8	6	4	4	3	3