



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUÍS GUSTAVO COSTA OLIVEIRA

**MODELAGEM E ANÁLISE MECÂNICA DE RODOVIAS COM DIFERENTES
SUBLEITOS UTILIZANDO O AEMC**

RECIFE

2023

LUÍS GUSTAVO COSTA OLIVEIRA

**MODELAGEM E ANÁLISE MECÂNICA DE RODOVIAS COM DIFERENTES
SUBLEITOS UTILIZANDO O AEMC**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 E. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.
Orientador: Prof. Dr. Reuber Arrais Freire.

RECIFE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira, Luís Gustavo Costa.

Modelagem e análise mecânica de rodovias com diferentes subleitos
utilizando o AEMC / Luís Gustavo Costa Oliveira. - Recife, 2023.

68 p. : il., tab.

Orientador(a): Reuber Arrais Freire

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2023.

9,20.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Análise mecanicista. 2. AEMC. 3. MeDiNa. 4. subleito. 5. Pavimento
asfáltico; módulo de resiliência. I. Arrais Freire, Reuber . (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

LUÍS GUSTAVO COSTA OLIVEIRA

**MODELAGEM E ANÁLISE MECÂNICA DE RODOVIAS COM DIFERENTES
SUBLEITOS UTILIZANDO O AEMC**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 15 de maio de 2023.

Prof. Dr. Reuber Arrais Freire (Orientador) – UFPE

Prof. Dr. Maurício Andrade (Examinador interno) – UFPE

Eng. Marina Myszak Biedacha (Examinadora externa) – UTFPR

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus. Pois sem Ele, eu não estaria aqui. Nos momentos difíceis, Ele estava lá, mesmo que eu não merecesse. Obrigado por tudo, Deus.

Agradecer aos meus pais e à minha irmã por terem sido a minha base durante essa jornada, e por sempre incentivarem a melhoria com apoio, amor, fé, perseverança e pensamentos positivos.

À toda minha família, tios, tias, avós, avôs, primos e primas, por todo o apoio e cuidado que sempre tiveram. Em especial, cinco pessoas que já não se encontram entre nós, mas que com certeza estão muito felizes com esse momento: meus avós maternos (Hilda e Severino), meu tio e tia (Sérgio e Luisiana) e, meu avô paterno (José Maria).

Ao professor e orientador Reuber por toda dedicação, apoio e esforço demonstrado na orientação deste trabalho e, também, ao longo das disciplinas cursadas com ele.

À Universidade Federal de Pernambuco pela grande oportunidade que tive e que estou tendo de estudar numa instituição pública de qualidade. Muita gratidão por essa oportunidade.

Aos meus amigos e amigas que estiveram comigo nessa caminhada longa para comemorar os sucessos, incentivar a melhoria e a perseverança nos momentos de erros com as broncas.

RESUMO

A mecânica dos pavimentos tem sido o foco de muitas pesquisas e estudos nos últimos anos no Brasil, um contexto motivado por uma quebra de paradigmas no que se refere ao modelo de dimensionamento de pavimentos e análise mecanicista destes. Dessa maneira, o presente trabalho utilizou a estrutura obtida por Biedacha (2020) e realizou, entre outros, a modelagem e análise mecânica da estrutura citada a partir alteração da rigidez dos subleitos, sendo considerados três tipos de solos e, assim, obtendo um trio de estruturas diferentes. Foi possível verificar e comprovar a utilidade e aplicabilidade do novo método de dimensionamento (MeDiNa) e de seus *softwares* integrantes. Um destes *softwares* é o Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) que se baseia em elementos finitos e calcula, precisamente, tensões, deformações e deslocamentos em diversos pontos escolhidos na estrutura. Por meio da análise mecânica da estrutura foi observado que o aumento da rigidez do subleito causa o prolongamento da vida útil do pavimento somente para o critério de fadiga da mistura asfáltica. As demais camadas intermediárias foram mais solicitadas e, com isso, a deformação permanente poderá ocorrer mais rapidamente nessas camadas.

Palavras-chave: análise mecanicista; AEMC; MeDiNa; subleito; pavimento asfáltico; módulo de resiliência.

ABSTRACT

Pavement mechanics has been the focus of much research and studies in recent years in Brazil, a context motivated by a break in paradigms regarding the pavement design model and their mechanistic analysis. In this way, the present work used the structure obtained by Biedacha (2020) and carried out, among others, the modeling and mechanical analysis of the mentioned structure based on changes in the stiffness of the subgrades, considering three types of soil and, thus, obtaining a trio of different structures. It was possible to verify and prove the usefulness and applicability of the new sizing method (MeDiNa) and its component software. One of these software is Elastic Analysis of Multiple Layers (AEMC) which is based on finite elements and precisely calculates stresses, deformations and displacements at several chosen points in the structure. Through the mechanical analysis of the structure, it was observed that the increase in the stiffness of the subgrade causes the extension of the useful life of the pavement only for the fatigue criterion of the asphalt mixture. The other intermediate layers were more stressed and, as a result, permanent deformation could occur more quickly in these layers.

Keywords: Mechanistic Analysis; AEMC; MediNa; Subgrade. Bituminous Pavement; Resilience Modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de Classificação SUCS	16
Figura 2 – Classificação HRB.....	18
Figura 3 – Ábaco da Classificação MCT, 2020	19
Figura 4 – Distribuição de Tensões nos pavimentos.....	20
Figura 5 – Camadas de pavimento rígido.....	21
Figura 6 – Camadas de pavimento flexível.....	21
Figura 7 - Detalhe da armadura de pavimento rígido antes da concretagem	21
Figura 8 – Fluxograma do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos (SisPav) ..	23
Figura 9 – Carga aplicada na estrutura e solicitações correspondentes nas camadas	24
Figura 10 – Estrutura de múltiplas camadas consideradas no estudo	26
Figura 11 – Sistema de Coordenadas adotadas pelo AEMC.....	28
Figura 12 – Pontos de carregamento no AEMC	28
Figura 13 – Posição em relação à profundidade dos pontos analisados da estrutura.....	29
Figura 14 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no primeiro ponto	30
Figura 15 – Exemplo de bacia de deflexão causada pela carga de uma roda	30
Figura 16 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo no primeiro ponto.....	31
Figura 17 – Ilustração da posição utilizadas para o terceiro cálculo no primeiro ponto.....	32
Figura 18 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no segundo ponto.....	33
Figura 19 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo no segundo ponto	33
Figura 20 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no terceiro ponto.....	34
Figura 21 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no terceiro ponto.....	35
Figura 22 – Trincas “Couro de Jacaré” associada à fadiga da mistura asfáltica	35
Figura 23 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo do terceiro ponto	36
Figura 24 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo do quarto ponto.....	36
Figura 25 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo no quarto ponto	37
Figura 26 – Ilustração da posição utilizadas para terceiro cálculo do quarto ponto	38
Figura 27 – Detalhamento das cotas para o primeiro cálculo do quinto ponto	39
Figura 28 – Detalhamento das cotas para o segundo cálculo do quinto ponto	39
Figura 29 – Detalhamento das cotas para o terceiro cálculo do quinto ponto.....	40
Figura 30 – Estruturas 1, 2 e 3 com diferentes composições de subleito.....	41
Figura 31 - Propriedades do Subleito da primeira estrutura.....	42
Figura 32 - Propriedades do Subleito da segunda estrutura	43

Figura 33 - Deslocamento em Z no topo do Revestimento	44
Figura 34 - Tensão em Z no topo na superfície	45
Figura 35 - Deformação em Z no topo do revestimento	46
Figura 36 - Deslocamento em Z no topo da base	47
Figura 37 - Tensão em Z no topo da base.....	48
Figura 38 - Curva da deformação de compressão	48
Figura 39 - Curva de tensão de tração em X	49
Figura 40 - Deformação de Tração em X no topo da base	50
Figura 41 - Deslocamento no topo da sub-base.....	51
Figura 42 - Tensão de Compressão em z na no topo da sub-base	52
Figura 43 - Deformação em z na no topo da sub-base	52
Figura 44 - Curva referente ao deslocamento em Z no topo do subleito.....	53
Figura 45 - Deformação em Z no topo do subleito	54
Figura 46 - Tensão no subleito	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento das características da via dotadas.....	26
Tabela 2 - Características do eixo adotado	27
Tabela 3 - Coordenadas dos parâmetros analisados	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Society of State Highway of Transportation Official
AEMC	Análise Elástica de Múltiplos Pavimentos
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
BGS	Brita Graduada Simples
CA	Concreto Asfáltico
CBR	California Beating Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estrada de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
HRB	Highway Research Board
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado e Tropical
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
PBT	Peso bruto total
PIB	Produto Interno Bruto
SUCS	Sistema Unificado
U	Umidade natural do solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	CLASSIFICAÇÕES DOS SOLOS	15
2.1.1	Classificação SUCS.....	15
2.1.1.1	<i>Limites de Atteberg.....</i>	16
2.1.1.2	<i>Granulometria.....</i>	17
2.1.2	Classificação HRB ou AASHTO	17
2.1.3	Classificação MCT.....	18
2.2	PAVIMENTAÇÃO	19
2.2.1	Camadas do Pavimento.....	20
2.3	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	21
2.3.1	Método do DNER	22
2.3.2	Método de Dimensionamento SisPav.....	22
2.3.3	Método do Dimensionamento Nacional.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	ESTRUTURA DE PAVIMENTAÇÃO EM ESTUDO.....	25
3.2	CONVENÇÕES DO AEMC	27
3.3	COORDENADAS E PROPRIEDADES ANALISADAS USANDO O AEMC	28
3.4	DESLOCAMENTOS EM Z NO TOPO DO REVESTIMENTO	30
3.5	DEFORMAÇÃO DE COMPRESSÃO EM Z NO TOPO DO REVESTIMENTO	31
3.6	TENSÃO EM Z NO TOPO DO REVESTIMENTO	31
3.7	DESLOCAMENTO EM Z NO TOPO DA BASE.....	32
3.8	DEFORMAÇÃO EM Z NO TOPO DA BASE	33
3.9	TENSÃO EM Z NO TOPO DA BASE.....	34
3.10	DEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO EM X NA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO.....	34
3.11	TENSÃO DE TRAÇÃO EM X NA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO	35
3.12	DESLOCAMENTO EM Z NO TOPO DA SUB-BASE.....	36
3.13	DEFORMAÇÃO EM Z NO TOPO DA SUB-BASE	37
3.14	TENSÃO DE COMPRESSÃO EM Z NO TOPO DA SUB-BASE.....	37

3.15	DESLOCAMENTO EM Z NO TOPO DO SUBLEITO.....	38
3.16	DEFORMAÇÃO EM Z NO TOPO DO SUBLEITO	39
3.17	TENSÃO DE COMPRESSÃO EM Z NO TOPO DO SUBLEITO.....	40
4	RESULTADOS	41
4.1	MODELO DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	41
4.2	PARÂMETROS ANALISADOS NO TOPO DO REVESTIMENTO	43
4.2.1	Deslocamento em Z na superfície.....	43
4.2.2	Tensão em Z no topo do revestimento.....	44
4.2.3	Deformação em Z no topo do revestimento.....	45
4.3	ANÁLISE DE PONTOS NO TOPO DA BASE	46
4.3.1	Deslocamento em Z.....	46
4.3.2	Tensão em z no topo da base.....	47
4.3.3	Deformação em Z no topo da base.....	48
4.4	ANÁLISE DE PARÂMETROS NA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO	49
4.4.1	Tensão de tração em X	49
4.4.2	Deformação de Tração em X na fibra inferior do revestimento.....	50
4.5	PARÂMETROS ANALISADOS NO TOPO DA SUB-BASE	50
4.5.1	Deslocamento em Z no topo da sub-base.....	51
4.5.2	Tensão de compressão em Z no topo da sub-base.....	51
4.5.3	Deformação de compressão em Z no topo da sub-base.....	52
4.6	PARÂMETROS ANALISADOS NO TOPO DO SUBLEITO	53
4.6.1	Deslocamento em Z no topo do subleito	53
4.6.2	Deformação de compressão no topo do subleito	53
4.6.3	Tensão em Z no topo do subleito	54
5	CONCLUSÃO.....	56
	ANEXO A – INFORMAÇÕES DO MUNICÍPIO ITAPEJARA D'OESTE,	
	PARANÁ, BRASIL.....	59
	ANEXO B – PLANILHAS DE CÁLCULO	61

1 INTRODUÇÃO

No que diz respeito ao dimensionamento das rodovias, o método baseado no California Bearing Ratio (CBR) foi utilizado para dimensionar as camadas dos pavimentos flexíveis brasileiros até o ano de 2016 e, em 2015 o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) iniciou os esforços para a criação de um novo método. Decisão motivada pelo fato de que o dimensionamento, quando realizado de maneira anterior, possuir restrições e generalizações (principalmente, com relação às características climáticas e do solo do local onde foi proposto) conforme afirmam Coutinho (2011) e Portela (2011), o que leva a análises e dimensionamentos pouco rigorosos e com excessos. Em outras palavras, conforme afirma o filósofo Felipe Kuhn, no livro *Estrutura das Revoluções Científicas*, as revoluções marcantes no campo da pesquisa científica foram iniciadas através de rupturas com a tradição, com o modo antigo de pensar e com velhos paradigmas.

O método de dimensionamento do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT, é baseado no CBR ou Índice de Suporte Califórnia, um ensaio cuja realização iniciou em 1935, 31 anos antes de se tornar base para o método mencionado. Essa forma de dimensionar fundamenta-se na carga de roda máxima, em função do peso bruto dos veículos, e despreza as deformações nas camadas superiores do pavimento. Em 1981, o método CBR passou por atualizações: o Ábaco de Murilo Lopes de Souza começou a ser utilizado de modo a ser válido, também, para subleitos e sub-bases (Souza, 1981). Embora seja uma maneira efetiva e funcional de dimensionar as camadas das rodovias, com utilização recorrente nos projetos rodoviários brasileiros, o dimensionamento baseado no CBR visa o subleito e as deformações permanentes (Motta; Medina, 2006).

Além disso, o mercado rodoviário não permaneceu como estava na década de 1980: os veículos de pequeno e médio porte com pesos brutos pouco importantes (se comparados aos veículos atuais) saíram de linha, exigindo mudanças no dimensionamento. Segundo Motta e Medina (2006), essa mudança no padrão dos veículos acendeu a luz de alerta para a necessidade de melhoria da resposta do pavimento in loco, a partir do esclarecimento do comportamento do solo e das camadas do pavimento quando submetidos a cargas repetidas.

A evolução da tecnologia causou alterações no tráfego e na velocidade deste, nos veículos e no peso bruto total destes e, nos materiais utilizados na execução das vias. Ademais e ainda com relação ao peso dos veículos, o tráfego de caminhões e carretas com cargas em excesso nas estradas brasileiras se tornou corriqueiro pela falta de fiscalização e, também pelo capitalismo; cenário esse originou o surgimento constante de patologias nas rodovias

brasileiras. Desse modo, os métodos de dimensionamento, incentivados ou justificados pelas constantes pesquisas realizadas nos últimos 40 anos, seguiram a mesma trajetória: aprimoramentos, tecnologia, controle e precisão.

Essas alterações exigiram a consideração de outros critérios no dimensionamento e na análise mecanicista de pavimentos flexíveis. O método de dimensionamento atual, em uso, desde 2021 é o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) com aprovação do DNIT (DNIT - ME 134/2018). Esse método toma como base ensaios de carga repetida e determina as espessuras das camadas do pavimento, subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico, baseado na mecânica dos pavimentos. A maneira citada de aprimorar o dimensionamento e a análise é validada através de ensaios de maior representatividade permitindo a compatibilização de deformações por meio do *software* Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). Esse *software* leva em consideração o Módulo de Resiliência (MR) e o Coeficiente de Poisson para interpretar a rigidez das camadas, e os coeficientes de modelagem fenomenológica dos parâmetros de fadiga para revestimentos asfálticos e de deformação permanente para as camadas granulares e solos (Biedacha, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O modal mais utilizado para promover o trânsito de pessoas e materiais é o sistema rodoviário que recebeu bastantes investimentos na década de 1960, quando a cada ano, mais rodovias ou vias urbanas eram executadas. Conforme citado anteriormente, o dimensionamento das estradas brasileiras era realizado segundo o método empírico baseado no CBR.

Entretanto, houve um perceptível crescimento da quantidade de manifestações patológicas nas estradas brasileiras, dentre elas as panelas, trincas e afundamentos de trilha de roda. Boa parte desses danos é causada pelo excesso de carga nos veículos, uma vez que o referido método não considera a propriedade mecânica dos materiais *in loco*.

A partir da adoção do novo método para dimensionar e analisar os pavimentos flexíveis é possível realizar a compatibilização das camadas levando em conta o desempenho e o comportamento dos materiais em campo. Outro ponto positivo é que, em caso de reforço do pavimento, o *software* AEMC permite a escolha da técnica mais indicada, considerando a capacidade resistente do pavimento. Esse trabalho se justifica pela aplicação da nova filosofia de análise de estruturas de pavimentação trazida pelo novo método MeDiNa, oficializado nacionalmente apenas em 2021. O AEMC foi utilizado para a realização da análise elástica do comportamento da estrutura pavimento considerando diferentes tipos de subleito.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar estruturas de pavimento compostas por três materiais de subleito diferentes, usando o *software* Análise AEMC, que é parte do MeDiNa. Como objetivos específicos, tem-se:

- a) investigar a aplicabilidade do novo método de dimensionamento para a modelagem mecânica de uma estrutura de pavimento;
- b) avaliar o surgimento de defeitos no pavimento em pontos críticos da estrutura;
- c) avaliar o efeito do enrijecimento do subleito nos pontos críticos da estrutura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura é um tipo de pesquisa comum na comunidade acadêmica que consiste em buscar, analisar e descrever o conhecimento existente sobre um determinado tema. Nessa perspectiva, a presente seção contextualiza a área de estudo deste trabalho e as áreas correlatas, analisa as possibilidades presentes na literatura para a construção de um referencial teórico e contribui para o entendimento aprofundado do tema em questão. Alguns dos temas abordados são: classificação e ensaios de solos, métodos de dimensionamento de pavimentos, tipos de pavimentação e camadas de pavimentos.

2.1 CLASSIFICAÇÕES DOS SOLOS

Estudar, analisar e conhecer as características dos solos que irão receber as cargas das estruturas é de fundamental importância para o comportamento esperado das estruturas. Analogamente ao que acontece quando o projeto e a execução de edificações são iniciados, na pavimentação também são imprescindíveis as propriedades do local onde as estruturas serão materializadas. Dessa maneira, os solos são classificados de acordo com Sistema Unificado (SUCS), Highway Research Board (HRB), American Society of State Highway of Transportation Official (AASHTO) e Miniatura, Compactado e Tropical (MCT), sendo essas duas últimas as mais indicadas para obras rodoviárias.

2.1.1 Classificação SUCS

Em 1942, o engenheiro Arthur Casagrande, sob responsabilidade do Army Corps of Engineers, desenvolveu o Sistema Unificado de Classificação de Solos na época da Segunda Guerra Mundial (Silva, 2017), com a finalidade de construir aeroportos, mas a posteriori essa classificação passou a ser utilizada na construção de barragens. Nesse sistema os solos são classificados com duas letras: a primeira se trata do tipo principal do solo e a segunda letra caracteriza o solo indicado pela primeira letra (Quadro 1).

Quadro 1 - Significado das Letras da Classificação SUCS

(continua)

Letra (1ª ou 2ª)	Significado das Letras
G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte

Quadro 1 - Significado das Letras da Classificação SUCS

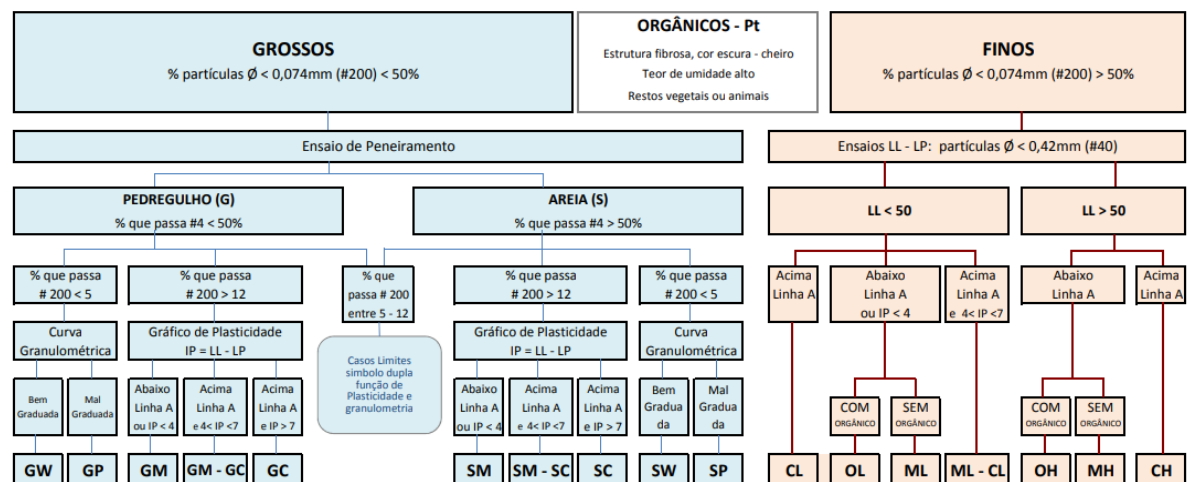
(conclusão)

Letra (1ª ou 2ª)	Significado das Letras
C	Argila
O	Solo Orgânico
W	Bem graduado
P	Mal Graduado
H	Alta Compressibilidade
L	Baixa Compressibilidade
Pt	Turfas

Fonte: Marinho (2020).

O sistema SUCS de classificação separa os solos em grosso e fino, sendo os solos grossos aqueles em que as mais de 50% das amostras não passam na peneira N° 200 (#0,075 mm) e, os solos são finos quando mais de 50% das amostras passam pela referida peneira. (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma de Classificação SUCS



Fonte: UDESC (2017).

2.1.1.1 Limites de Atteberg

Os limites de Atteberg dizem respeito à consistência dos solos e possuem dependência do teor de umidade do solo e, referem-se ao limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) que são iguais aos valores de umidades que separam um estado de consistência do solo de outro. Conhecendo-se os valores dos limites de Atterberg, é possível saber, em função da umidade natural do solo (U), se o solo se encontra no estado sólido ($U <$

LC), no estado friável ($LC < U < LP$), no estado plástico ($LP < U < LL$) ou no estado viscoso ($U > LL$) (Ribeiro; Souza, 2018).

Conhecer as relações entre os limites de Atterberg, granulometria e matéria orgânica permite uma caracterização dos solos que pode servir de subsídio para o planejamento do manejo mecanizado do solo para fins de prevenção dos efeitos adversos da compactação (Ribeiro; Souza, 2018).

2.1.1.2 Granulometria

Trata do diâmetro nominal das partículas do solo. O ensaio de Granulometria determina o tamanho das partículas e seus percentuais relativos ao total com a finalidade de elaborar uma curva granulométrica e, assim colaborar para a classificação da amostra do solo.

2.1.2 Classificação HRB ou AASHTO

Apresenta maior relação com a pavimentação de modo que classifica solos como indicados ou não para a camada de fundação dos pavimentos. Ou seja, é baseado na experiência rodoviária no que tange ao desempenho dos subleitos. A classificação é realizada através dos ensaios granulométricos, limites de Atteberg e índices de grupo. Índice de Grupo (IG) é calculado por meio da Equação 1:

$$IG = a * (0,2 + 0,005 * c) + 0,01 * b * d \quad (1)$$

Os coeficientes a, b, c e d são definidos de acordo com as Equações 2, 3, 4 e 5:

$$a = P_{200} - 35 \quad (2)$$

$$b = P_{200} - 15 \quad (3)$$

$$c = LL - 40 \quad (4)$$

$$d = IP - 10 \quad (5)$$

Onde P_{200} é o percentual de material que passa na peneira #200; LL é o limite de Limite de liquidez (%); e IP é o índice de plasticidade (%). A Figura 2 apresenta a forma de

classificação de um solo de acordo com a metodologia da HRB e recomenda que ela inicie da esquerda para a direita, e, por eliminação.

Figura 2 – Classificação HRB

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

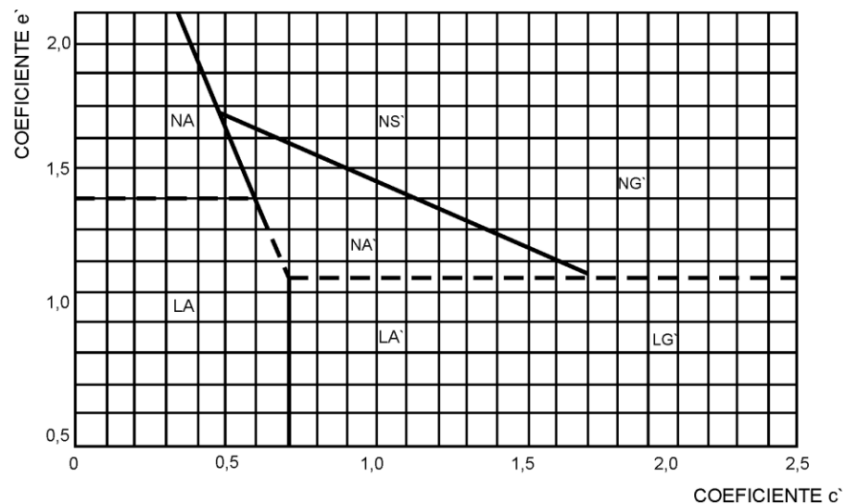
Fonte: Brasil (2006).

2.1.3 Classificação MCT

Esse sistema foi desenvolvido por Nogami e Villibor (1995) com a finalidade de aperfeiçoar a classificação dos solos tropicais lateríticos. Para isso, analisa propriedades importantes dos solos associadas à contração, coesão, permeabilidade, expansão, suporte e compactação.

A metodologia MCT permite retratar as peculiaridades dos solos quanto ao comportamento laterítico ou saprolítico, quantificando propriedades importantes para uso em serviços rodoviários (Brasil, 2006). O coeficiente c' indica a quantidade de areia no solo enquanto o coeficiente e' apresenta o comportamento laterítico ou não do solo. O ábaco referente a essa metodologia é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Ábaco da Classificação MCT, 2020



Fonte: Brasil (2006).

Onde:

N: letra que indica solos não lateríticos; L: letra que indica solos lateríticos;

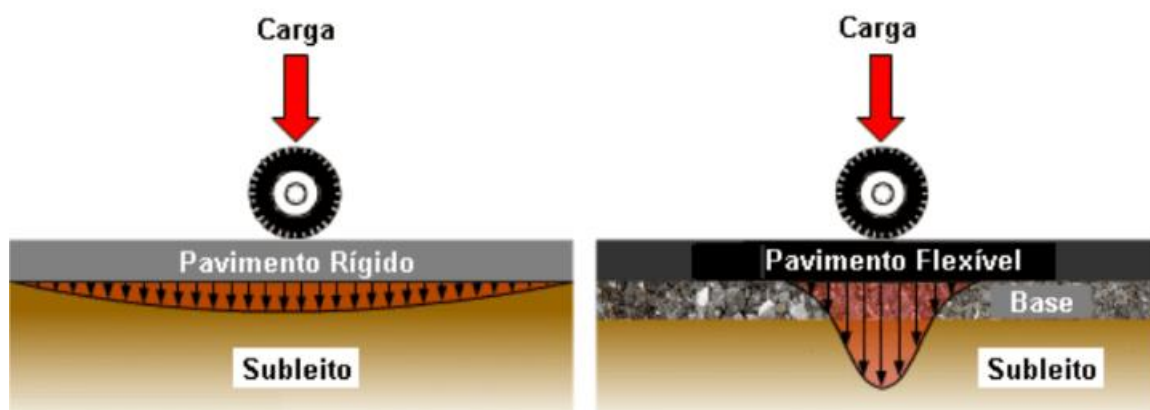
A: areias; A': solos arenosos; S': solos siltosos; G': solos argilosos.

2.2 PAVIMENTAÇÃO

As vias que permitem o trânsito de pessoas, veículos e insumos, de maneira segura e confortável, precisam ser pavimentadas. Essa obra pode ser executada, principalmente, a partir dos seguintes materiais: Concreto Simples, Paralelepípedo, Intertravados, Concreto Armado e Asfalto.

Pavimentos são estruturas compostas por várias camadas que possuem espessuras definidas em projeto e, são executadas para suportar a carga de pessoas, veículos, máquinas e equipamentos de modo eficiente e técnico. Os dois últimos materiais citados acima têm uso bastante recorrente na pavimentação rodoviária possuindo denominações distintas: Pavimentos Rígidos e Pavimentos Flexíveis, os quais apresentam também diferentes distribuições de tensões, conforme podemos verificar na Figura 4.

Figura 4 – Distribuição de Tensões nos pavimentos



Fonte: Araújo *et al.* (2016).

O Pavimento Rígido se caracteriza pela utilização de concreto de cimento Portland, barras de aço na camada de revestimento e por uma quantidade menor de camadas, uma vez que a camada de concreto funciona como revestimento e base ao mesmo tempo. A Figura 5 ilustra um pavimento rígido. A última camada é executada a partir do lançamento de concreto, de alta capacidade de suporte e da colocação das barras de transferência cuja função é transmitir esforços verticais entre placas vizinhas (Figura 7).

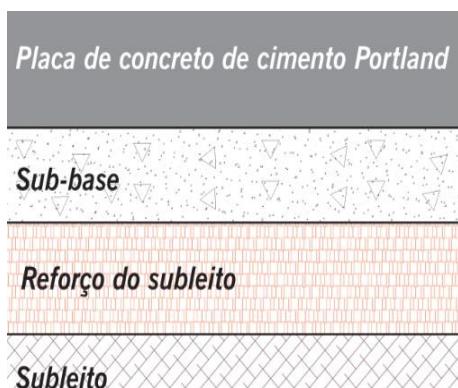
Por outro lado, a pavimentação executada com Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) ou Concreto Asfáltico (CA) começou a ser realizada na década de 1960, ano em que o Brasil foi governado pelo presidente Juscelino Kubistech, o que foi uma exigência das montadoras de veículos e de empreiteiras para que elas se instalassem no nosso país. Esse cenário foi apoiado pela classe política nos três níveis de governo que investiu praticamente todos os recursos financeiros nas rodovias brasileiras (Barros; Castro Junior, 2015). Desde então, o CBUQ tem sido o material mais utilizado para pavimentar rodovias e algumas vias nos municípios e estados do Brasil, atingindo um percentual de 95% de utilização do asfalto na pavimentação das estradas do maior país da América do Sul. Esse panorama é motivado, principalmente, pela coesão dos agregados que promove flexibilidade controlada, impermeabilidade e durabilidade e resistência a ácidos, álcalis e sais (Bernucci *et al.*, 2006).

2.2.1 Camadas do Pavimento

Pavimentos asfálticos e rígidos são compostos por camadas de espessuras definidas e, em quantidades diferentes (Figuras 5 e 6). São elas:

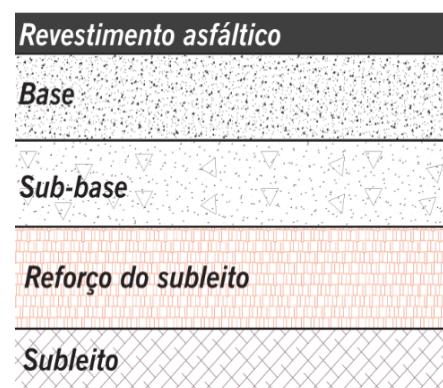
- a) subleito: é o solo natural e representa a fundação de toda a estrutura do pavimento e recebe a carga do tráfego e das demais camadas;
- b) reforço do subleito: camada de execução não obrigatória utilizada em casos em que o subleito é pouco resistente;
- c) sub-base e base: são as camadas granulares intermediárias;
- d) revestimento: camada superficial da estrutura dos pavimentos que recebe diretamente as cargas do tráfego, as influências do clima e temperatura; fatores que devem ser considerados no dimensionamento e modelagem das estruturas rodoviárias.

Figura 5 – Camadas de pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Figura 6 – Camadas de pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Figura 7 - Detalhe da armadura de pavimento rígido antes da concretagem



Fonte: Portela (2014).

2.3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

A maneira de dimensionar pavimentos asfálticos passou por alterações ao longo dos anos, de modo que apresentou uma evolução motivada por pesquisas científicas (Bernucci *et*

al., 2006; Franco, 2007; Souza, 1981). A partir desse cenário, novos métodos começaram a ser desenvolvidos.

2.3.1 Método do DNER

Métodos Empíricos são baseados em resultados de campo e possuem critérios pouco definidos de modo a considerar apenas um modelo de ruptura. Um modelo de dimensionamento de utilização recorrente em décadas passadas é o Método Empírico com base no CBR, também chamado de método Murillo Lopes. Esse autor apresentou o método em 1961, que era baseado na ruptura da estrutura devido à carga de roda máxima. Após cinco anos, esse modelo passou por atualizações de modo que passou a considerar dois métodos norte-americanos. Murillo Lopes desenvolveu um ábaco para auxiliar no dimensionamento e considerou que os pavimentos asfálticos sofrem apenas Afundamentos de Trilha de Roda (ATR). No primeiro ano da década de 1980, esse método passou por novas atualizações, mas que não possuem tamanha importância como as atualizações da década de 1960. Como foi citado anteriormente, o método do DNER é baseado em ensaios empíricos como Limite de consistência ou Atterberg e, sobretudo no Índice de Suporte Califórnia (ISC), no qual a resistência à penetração é medida com o corpo de prova imerso na água e o resultado é fruto de uma analogia com as características do material proveniente do local de desenvolvimento referido ensaio.

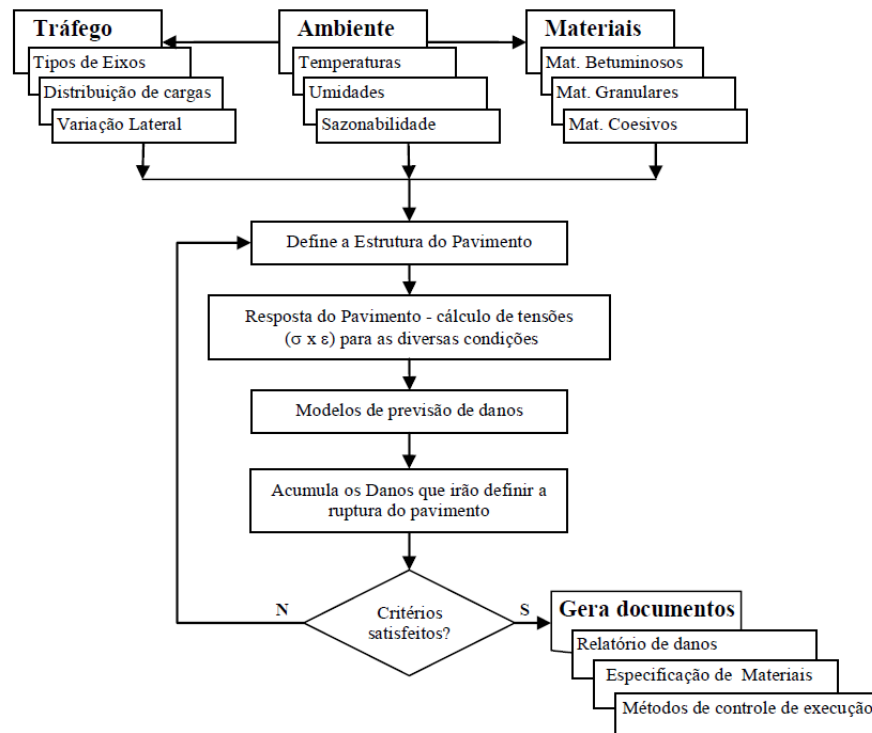
2.3.2 Método de Dimensionamento SisPav

Desenvolvido por Franco (2007) em sua tese de doutorado, esse método uniu as metodologias do PAVE (um modelo de dosagem de misturas asfálticas de uso constante no Brasil) com o Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) implementando um programa computacional denominado de SisPav.

O SisPav considerou as características brasileiras de ensaios, do clima, dos materiais disponíveis para pavimentação com comportamento elástico linear e não linear; do tráfego para eixos com variação lateral e, variação sazonal; e modelos de previsão de danos e parâmetros dos materiais e das bacias de deformação.

O fluxograma apresentado abaixo apresenta a metodologia do SisPav (Figura 8):

Figura 8 – Fluxograma do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos (SisPav)



Fonte: Franco (2007).

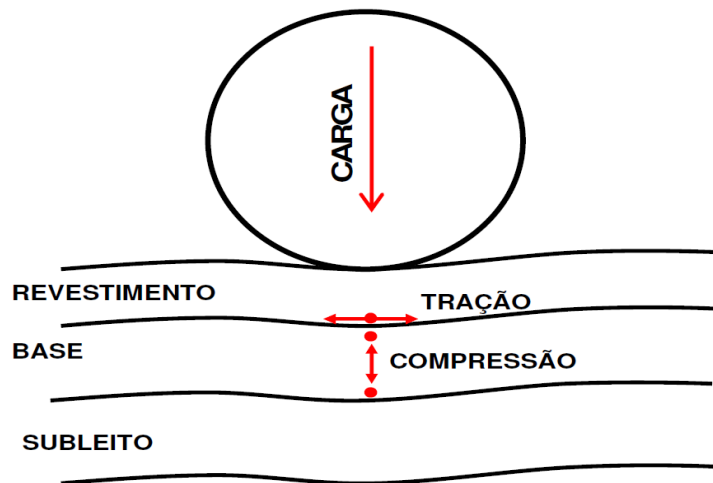
2.3.3 Método do Dimensionamento Nacional

O MeDiNa foi desenvolvido por Franco (2007) em sua tese de doutorado e, nomeado em homenagem ao professor e incentivador da mecânica dos pavimentos: Jacques de Medina. (Araújo *et al.*, 2016). Conforme foi citado anteriormente, a mudança ocorrida no padrão dos veículos que trafegam nas rodovias acendeu uma luz de alerta para a maneira como os dimensionamentos eram realizados. Foi o momento de iniciar pesquisas e estudos para tornar compatível o dimensionamento das camadas do pavimento com as importantes alterações no trânsito como o aumento do peso bruto total dos veículos para além da sobrecarga frequente.

O MeDiNa utiliza os princípios da mecânica dos pavimentos no dimensionamento destes; calcula tensões e deformações (Figura 9) e aplica critérios de ruptura para definir a espessura das camadas e caracteriza os materiais, sendo essa uma etapa de muita importância para esse tipo de método de dimensionamento. Nesse método, ao contrário do anterior, o ensaio que o norteia é o MR, realizado com um equipamento triaxial de cargas repetidas, e caracteriza a rigidez de diferentes tipos de solo em função das tensões confinantes e desvio. O Ensaio do MR possui maior precisão frente ao CBR e fornece uma propriedade física do material o que possibilita a utilização desse resultado em análises mecanicista.

Esse tipo de análise tem como objetivo a avaliação das tensões, deformações e deslocamentos originados pelo carregamento da estrutura devido ao tráfego dos veículos, de modo que avalia a deformação das camadas e danos decorridos da fadiga e, considera a influência das condições climáticas (Barbosa; Silva; Aguiar, 2021). A mecânica dos pavimentos trata essas estruturas como sendo formadas por camadas esbeltas que precisam resistir aos carregamentos repetidos, utiliza ensaios de maior representatividade e materiais constituintes das camadas que devem ser compatibilizados de modo a ter deformabilidade gradativa com o passar do tempo. O dimensionamento mecanístico considera importante: os fatores ambientais do local onde a via será executada, o tráfego existente e os materiais e técnicas construtivas disponíveis no período do dimensionamento.

Figura 9 – Carga aplicada na estrutura e solicitações correspondentes nas camadas



Fonte: adaptado de Huang (2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

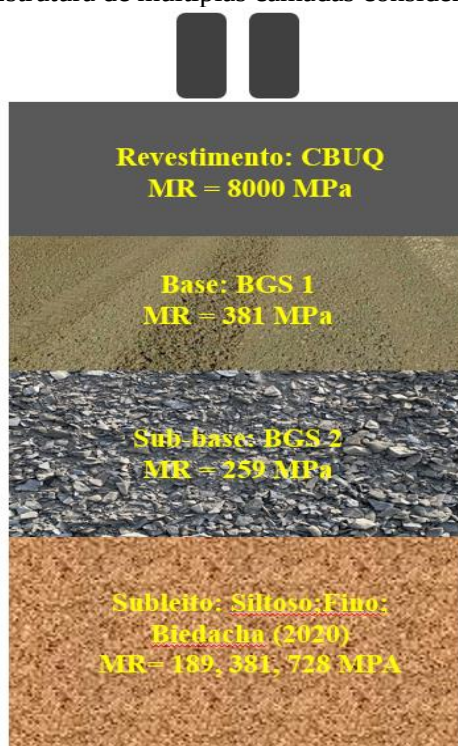
Essa seção trata dos materiais utilizados e da maneira como foi elaborado o presente trabalho. A partir de dados obtidos em Biedacha (2020), foram desenvolvidos análises, gráficos e planilhas por meio do *software* AEMC que realiza a análise mecânica das camadas de pavimentos em diversos pontos da estrutura rodoviária.

3.1 ESTRUTURA DE PAVIMENTAÇÃO EM ESTUDO

A via adotada para estudo é um contorno rodoviário da PR - 493 com quatro quilômetros que transpassa o município de Itapejara D'Oeste, o qual possui uma área de 254,014 m² (IBGE, 2023), localizado no Sudoeste do Estado do Paraná (Anexo A). A via não foi executada, porém grande parte dos ensaios e projetos necessários para tal foram realizados: desde a determinação dos Parâmetros do Solo a partir de amostras de três pontos do perímetro urbano, obtenção do Número N até o Projeto Geométrico. Biedacha (2020) comparou estruturas com camadas de diferentes espessuras e materiais e, calculou através do MeDiNa a área trincada. Neste trabalho foi adotada a estrutura com percentual de 29,10% de área trincada no final do período de projeto sendo igual a 10 anos (Biedacha, 2020).

A estrutura em questão possui 15 cm de revestimento utilizando o CBUQ, sendo essa a camada principal que receberá diretamente as cargas dos veículos; 15 cm e 23 cm de base e sub-base (respectivamente), ambas de Brita Graduada Simples (BGS) (com valores de MR) e o subleito de solo natural, conforme podemos observar na Figura 10. O eixo padrão foi adotado possuindo um peso bruto total (PBT) de 8,20 toneladas, possuindo assim, dois pontos de aplicação de cargas.

Figura 10 – Estrutura de múltiplas camadas consideradas no estudo



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

As características dessas camadas estão descritas na Tabela 1 e a fonte delas é o próprio MeDiNa, uma vez que foram adotados materiais disponíveis no referido *software*. Temos a espessura das camadas em centímetros, a descrição do material, o módulo de resiliência em MPa, a massa específica em g/cm^3 e o coeficiente de Poisson que define a relação entre as deformações específicas radiais e verticais dos materiais, sendo imprescindível para análises de camadas elásticas.

Tabela 1 - Detalhamento das características da via dotadas

Camadas	Espessura (cm)	Material	MR (MPa)	Massa Específica (g/cm^3)	Coef. De Poisson (v)
Revestimento	15,00	CBUQ	8.000	2,400	0,30
Base	15,00	BGS 1	381	2,223	0,35
Sub-base	23,00	BGS 2	259	2,268	0,35
Subleito 1 (Solo Siltoso)	0,00	Solo Variável	189	1,880	0,45
Subleito 2 (Solo Fino)	0,00	Solo Variável	381	1,820	0,45
Subleito 3 (Solo) (Biedacha, 2020)	0,00	Solo Variável	728	1,880	0,45

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Conforme citado acima, a referida autora realizou os ensaios para a obtenção dos parâmetros do solo tais como: granulometria, limites de Atterberg, Índice de Grupo, Umidade, Ensaio de Proctor, Índice de Suporte e CBR. A realização do Ensaio do MR não foi possível à época, dessa maneira o valor foi obtido por meio de correlações bibliográficas baseadas no CBR; uma saída não recomendada pelo DNIT. O valor resultante da correlação referente ao subleito foi utilizado e comparado a simulação com valores do módulo de resiliência constituintes no *software* MeDiNa.

3.2 CONVENÇÕES DO AEMC

O comportamento da estrutura apresentada foi testado através da utilização de subleitos com diferentes materiais, sendo assim realizadas uma modelagem no AEMC e a elaboração de curvas e planilhas no Microsoft Excel para aprimorar a visualização. Esse comportamento será apresentado na seção dos Resultados.

O AEMC possui convenções importantes para o entendimento, análise e modelagem, são elas:

- a) as deformações (ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z) são dadas em [$\mu\text{m}/\text{m}$], os deslocamentos (U_x , U_y e U_z) em [μm], as tensões (σ_x , σ_y e σ_z) em [MPa] e, as distâncias e espessuras (x,y e z) em centímetros;
- b) o eixo Y é longitudinal à via e refere-se ao sentido do tráfego dos veículos, já o eixo X é transversal a via;
- c) os valores positivos de tensão e deformação indicam um ponto de compressão, enquanto os valores negativos, um de tração.

O veículo de projeto que foi adotado neste trabalho é portador do eixo padrão rodoviário que possui uma carga total de eixo com valor igual a 8,20 T. As demais características deste eixo estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do eixo adotado

(continua)

Eixo Adotado	Eixo Padrão Rodoviário
Número de Rodas	4
Análise	Semi-eixo
Carga de Eixo (ton)	8,20
Carga de Rodas (ton)	2,05
Pressão de Pneus (MPa)	0,56
Ty (cm)	0,00

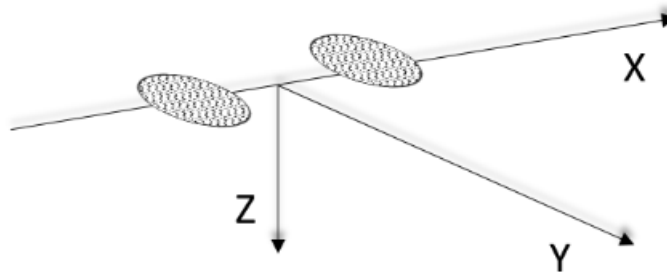
Tabela 2 - Características do eixo adotado

(conclusão)

Tx (cm)	32,40
Lx (cm)	181,00
Área (cm ²)	366,07
Raio (cm)	10,79

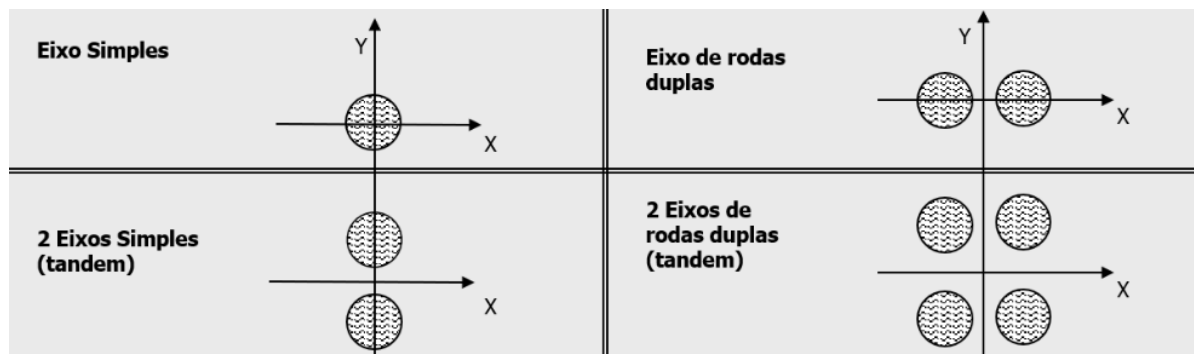
Fonte: AEMC (2020).

Figura 11 – Sistema de Coordenadas adotadas pelo AEMC



Fonte: AEMC (2020).

Figura 12 – Pontos de carregamento no AEMC



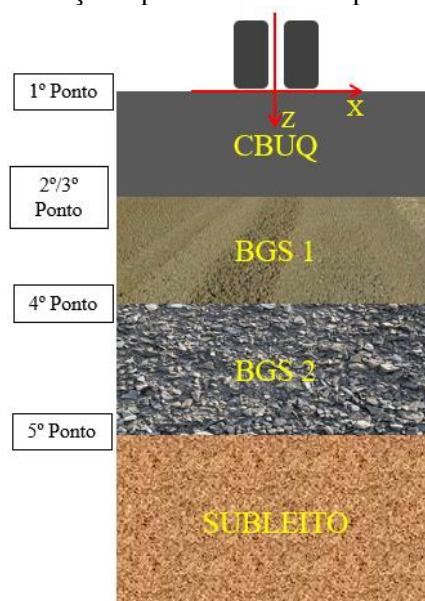
Fonte: AEMC (2020).

As Figuras 11 e 12 apresentam as convenções do AEMC no que se refere aos sistemas de coordenadas (x, y e z) e aos carregamentos de modo que o eixo principal do dimensionamento coincide com o eixo de simetria das áreas carregadas. Fatores importantes para a compreensão dos resultados.

3.3 COORDENADAS E PROPRIEDADES ANALISADAS USANDO O AEMC

A estrutura apresentada na Figura 10 foi modelada no AEMC, um dos *softwares* integrantes do MeDiNa, que analisa as camadas do pavimento de modo elástico a partir do lançamento das coordenadas cartesianas (x, y e z) dos pontos definidos para estudo e, considerando dois pontos de aplicação de cargas na via, conforme é observado na Figura 13.

Figura 13 – Posição em relação à profundidade dos pontos analisados da estrutura



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

As profundidades de cada ponto apresentado acima estão citadas a seguir, elas são os referenciais para o cálculo de cada parâmetro, são eles: Deslocamento, deformação de compressão e tensão em Z no topo do revestimento (1º ponto); deformação de compressão e tensão em Z na parte inferior do revestimento (2º ponto) deformação de tração e tensão de tração em X na fibra inferior do revestimento (3º ponto); deformação de compressão e tensão em Z na parte inferior da base (4º ponto); deformação de compressão e tensão em Z no topo do subleito (5º ponto) (Tabela 3).

Tabela 3 - Coordenadas dos parâmetros analisados

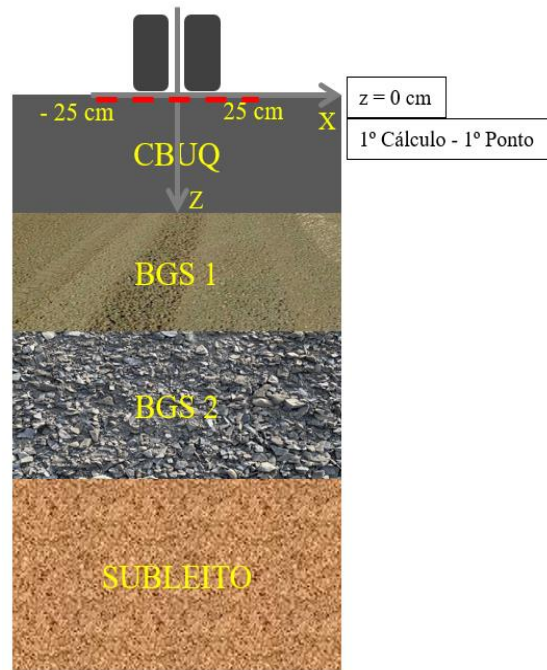
Ponto de Cálculo	Resultado (seção)	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Parâmetro Analisado
1º Ponto	4.2.	$x = [-25 \text{ cm}; +25 \text{ cm}]$	$y = 0 \text{ cm}$	$z = 0 \text{ cm}$	$U_z, \epsilon_z, \sigma_z$
2º Ponto	4.3.	$x = [-25 \text{ cm}; +25 \text{ cm}]$	$y = 0 \text{ cm}$	$z = -15 \text{ cm}$	$U_z, \epsilon_z, \sigma_z$
3º Ponto	4.4.	$x = [-25 \text{ cm}; +25 \text{ cm}]$	$y = 0 \text{ cm}$	$z = -15 \text{ cm}$	ϵ_x, σ_x
4º Ponto	4.5.	$x = [-25 \text{ cm}; +25 \text{ cm}]$	$y = 0 \text{ cm}$	$z = -30 \text{ cm}$	$U_z, \epsilon_z, \sigma_z$
5º Ponto	4.6.	$x = [-25 \text{ cm}; +25 \text{ cm}]$	$y = 0 \text{ cm}$	$z = -53 \text{ cm}$	$U_z, \epsilon_z, \sigma_z$

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.4 DESLOCAMENTOS EM Z NO TOPO DO REVESTIMENTO

Esse cálculo possibilitou a visualização e a obtenção das bacias de deflexão (Figura 15) da estrutura a partir da alteração dos módulos de resiliência dos subleitos (Tabela 1). Essas bacias permitem a verificação da qualidade da execução dos serviços e a compatibilidade com o projeto executivo da via; uma forma de fazer essa verificação é a aplicação das Vigas *Benkelman* (NORMA DNIT 133/2010 – ME).

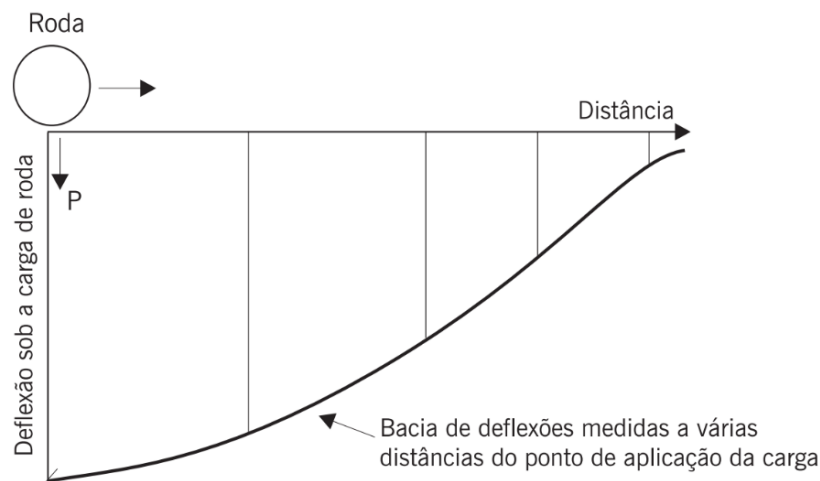
Figura 14 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no primeiro ponto



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

As coordenadas y e z permaneceram nulas, e a coordenada x foi considerada no intervalo $[-25 \text{ cm}; +25 \text{ cm}]$ para o primeiro ponto ($z = 0 \text{ cm}$) conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 15 – Exemplo de bacia de deflexão causada pela carga de uma roda



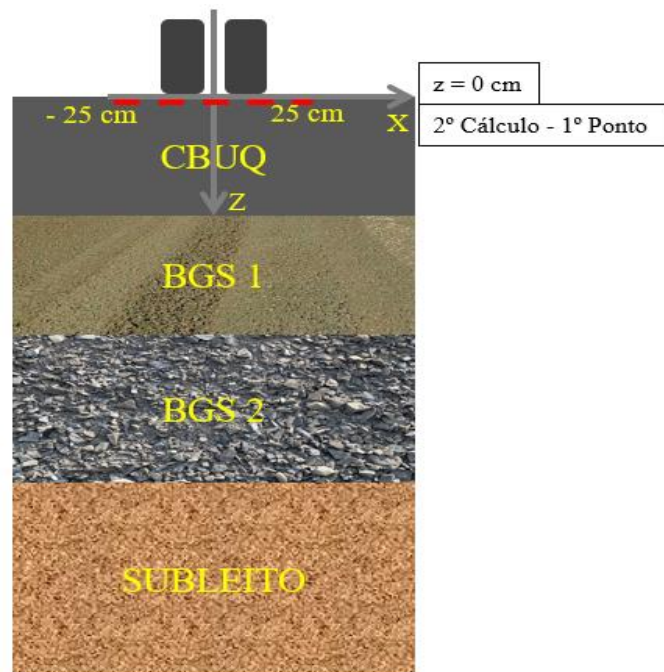
Fonte: Nóbrega (2003).

A medição de deflexões é de vital importância na Mecânica dos Pavimentos, onde a deformabilidade elástica pode ser associada ao trincamento dos revestimentos. Caso o dimensionamento da estrutura tenha sido feito, o controle de construção da camada pode indicar eventuais deficiências ou não concordâncias entre o comportamento previsto dos materiais e o comportamento obtido no campo, permitindo eventuais ajustes (Soares; Motta; Soares, 2000).

3.5 DEFORMAÇÃO DE COMPRESSÃO EM Z NO TOPO DO REVESTIMENTO

Neste ponto, foi calculado a deformação de compressão na direção z. As coordenadas y e z foram nulas e o eixo x variando de $-25,00$ cm a $+25,00$ cm para o primeiro ponto, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo no primeiro ponto

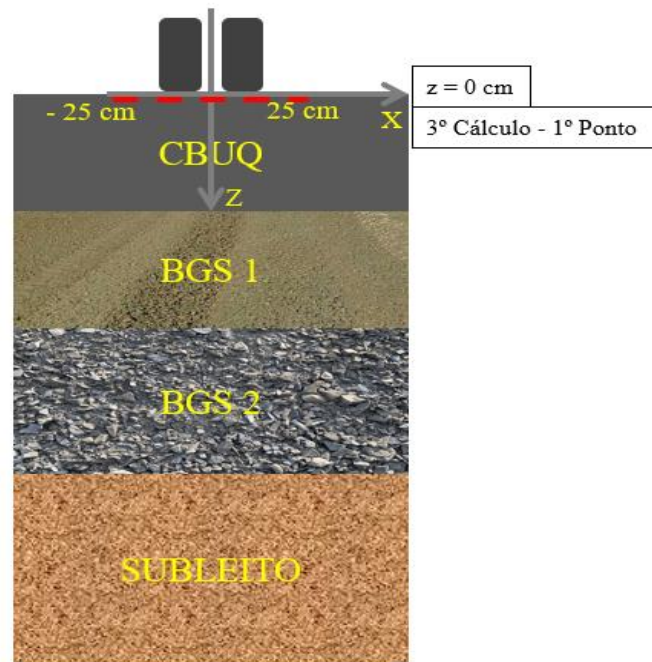


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.6 TENSÃO EM Z NO TOPO DO REVESTIMENTO

Nesta etapa, foi calculada a tensão na direção z, para as coordenadas y nula, o eixo x variando de $-25,00$ cm a $+25,00$ cm para o primeiro ponto, e $z = 0$ cm (Figura 17).

Figura 17 – Ilustração da posição utilizadas para o terceiro cálculo no primeiro ponto

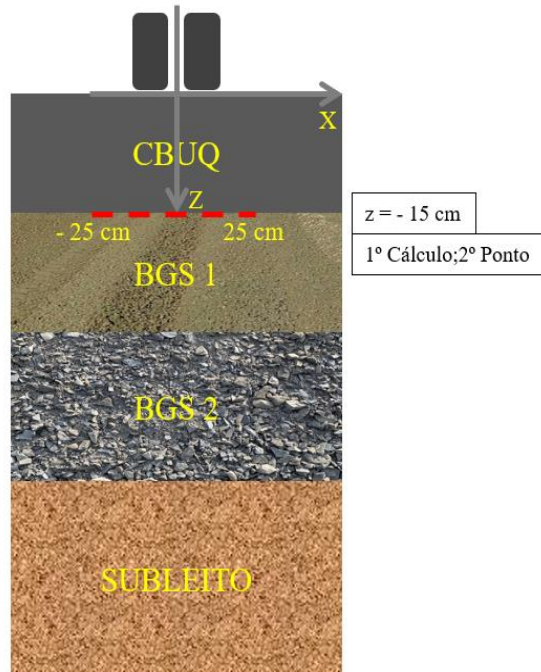


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.7 DESLOCAMENTO EM Z NO TOPO DA BASE

Nesta etapa, foi calculada a deslocamento na direção z, para a coordenada y nula, com a coordenada x variando de $[-25,00 \text{ cm a } +25,00 \text{ cm}]$, e para a coordenada z atribuída o valor de -15 cm , correspondente ao ponto 2 (Figura 18). Esse ponto de coordenada z representa o topo da base que é comporta por BGS.

Figura 18 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no segundo ponto

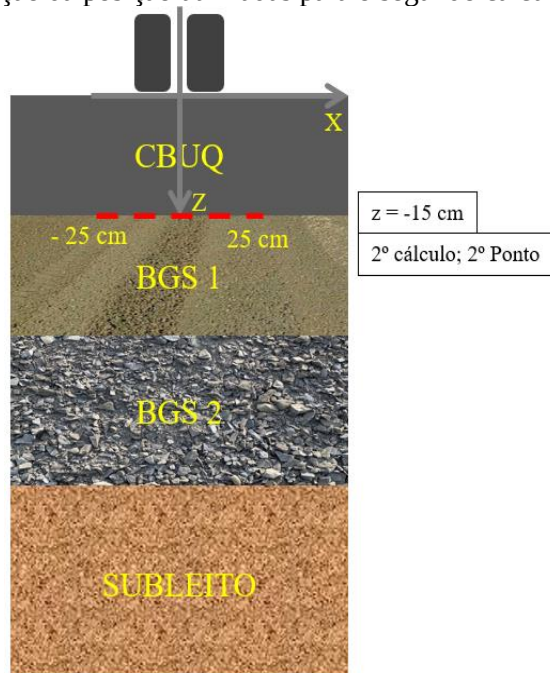


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.8 DEFORMAÇÃO EM Z NO TOPO DA BASE

Em seguida, foi calculada a deformação de compressão na direção z para o mesmo ponto: coordenada y nula, coordenada x variando de $[-25,00 \text{ cm a } +25,00 \text{ cm}]$ e z igual a -15 cm , correspondente ao ponto 2 (Figura 19).

Figura 19 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo no segundo ponto

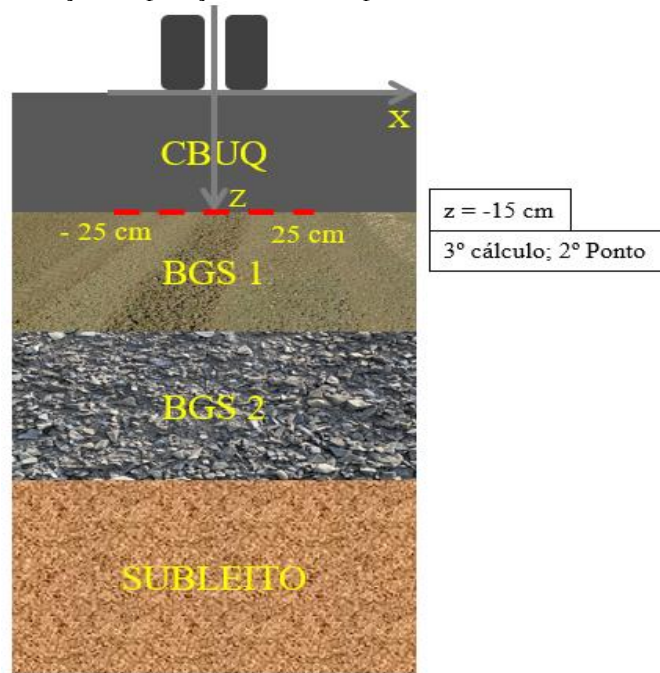


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.9 TENSÃO EM Z NO TOPO DA BASE

Na sequência, foi calculada a tensão de compressão na direção z , no ponto referente ao topo da base ($z = -15,00$ cm), com o eixo x variando no intervalo $[-25,00$ cm; $+25,00$ cm] e a coordenada y nula. Esse foi o terceiro cálculo do segundo ponto da estrutura, conforme ilustrado pela Figura 20.

Figura 20 – Ilustração da posição utilizadas para o terceiro cálculo no segundo ponto

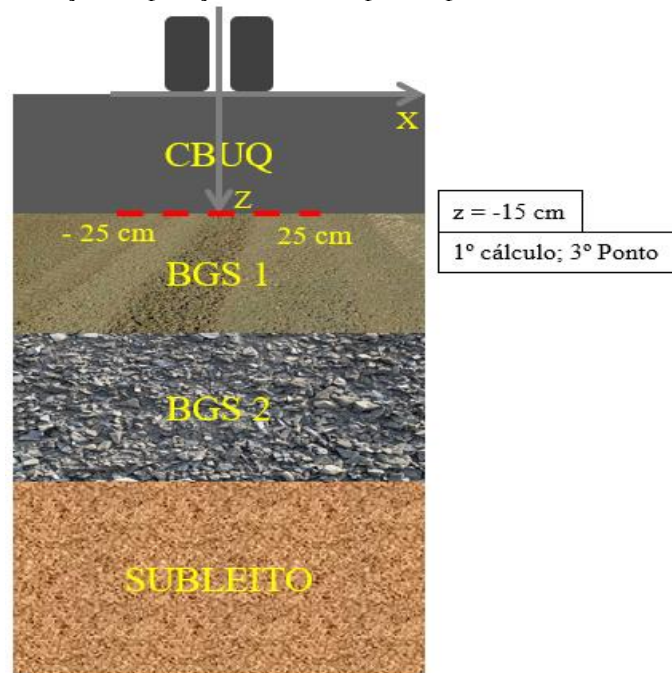


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.10 DEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO EM X NA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO

As deformações na direção x foram calculadas na fibra inferior do revestimento ($z = -15,00$ cm), com o eixo x variando no intervalo $[-25,00$; $+25,00$] e a coordenada y nula (Figura 21). Essas características calculadas possuem importância uma vez que estão bastante relacionadas à fadiga, a qual ocasiona uma das patologias mais presentes nas rodovias brasileiras executadas em pavimentos asfálticos causada pela passagem repetida de cargas ao longo dos anos: o trincamento (Figura 22). Na Figura 9, pode-se observar a representação da Tensão de Tração em X (σ_x).

Figura 21 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo no terceiro ponto



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Figura 22 – Trincas “Couro de Jacaré” associada à fadiga da mistura asfáltica

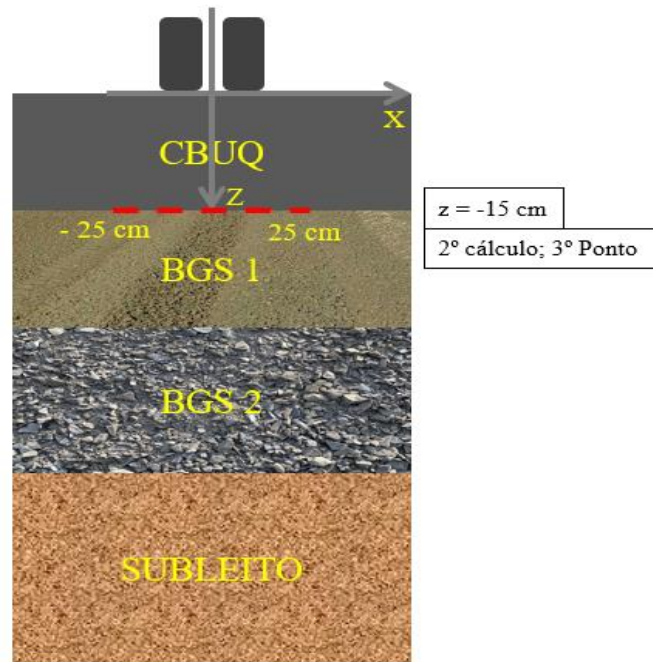


Fonte: Cava (2018).

3.11 TENSÃO DE TRAÇÃO EM X NA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO

Para o cálculo da tensão de tração em X na coordenada $z = -15,00$ cm, o eixo x novamente foi variado no intervalo $[-25,00$ cm; $+25,00$ cm] e coordenada y nula para o segundo cálculo do terceiro ponto (Figura 23).

Figura 23 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo do terceiro ponto

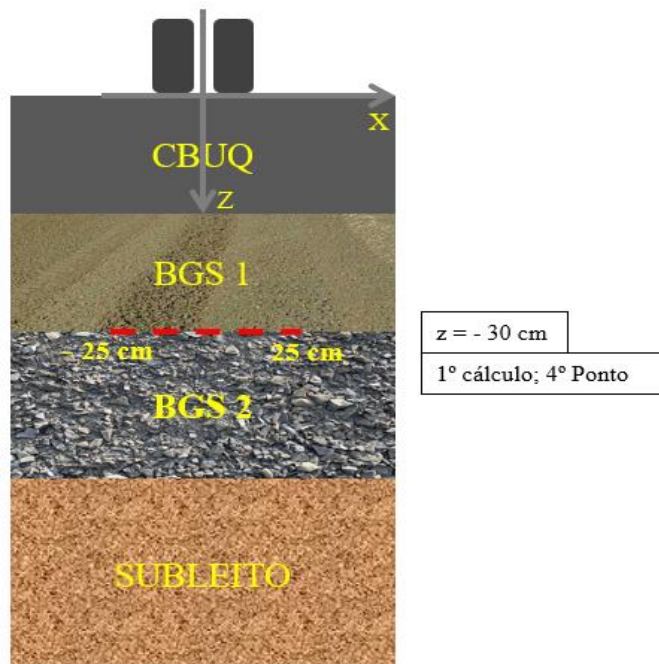


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.12 DESLOCAMENTO EM Z NO TOPO DA SUB-BASE

Para o cálculo do deslocamento em z no topo do sub-base ($z = -30,00 \text{ cm}$), o eixo x novamente foi variado no intervalo $[-25,00 \text{ cm}; +25,00 \text{ cm}]$ e coordenada y nula para o quarto ponto (Figura 24).

Figura 24 – Ilustração da posição utilizadas para o primeiro cálculo do quarto ponto

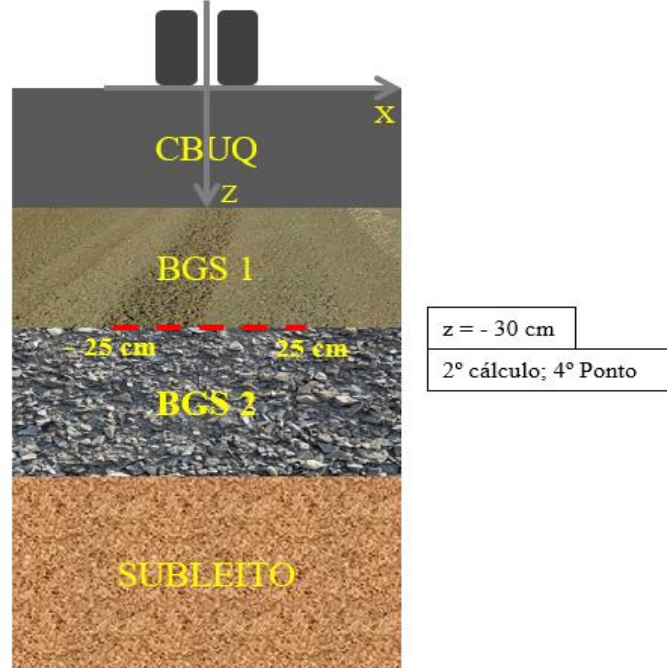


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.13 DEFORMAÇÃO EM Z NO TOPO DA SUB-BASE

Para o cálculo da deformação em z no topo do sub-base ($z = -30,00$ cm), o eixo x novamente foi variado no intervalo $[-25,00$ cm; $+25,00$ cm] e coordenada y nula para o segundo cálculo do quarto ponto (Figura 25).

Figura 25 – Ilustração da posição utilizadas para o segundo cálculo no quarto ponto

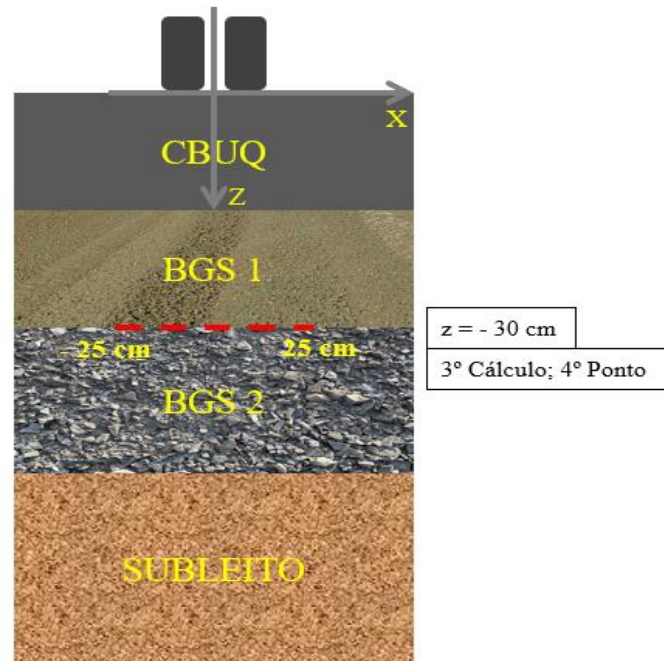


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.14 TENSÃO DE COMPRESSÃO EM Z NO TOPO DA SUB-BASE

Analogamente, foi calculada a tensão de compressão em z no topo da sub-base ($z = -30,00$ cm) e com o eixo x variando no intervalo $[-25,00$; $+25,00$] em centímetros, e coordenada y nula (Figura 26).

Figura 26 – Ilustração da posição utilizadas para terceiro cálculo do quarto ponto

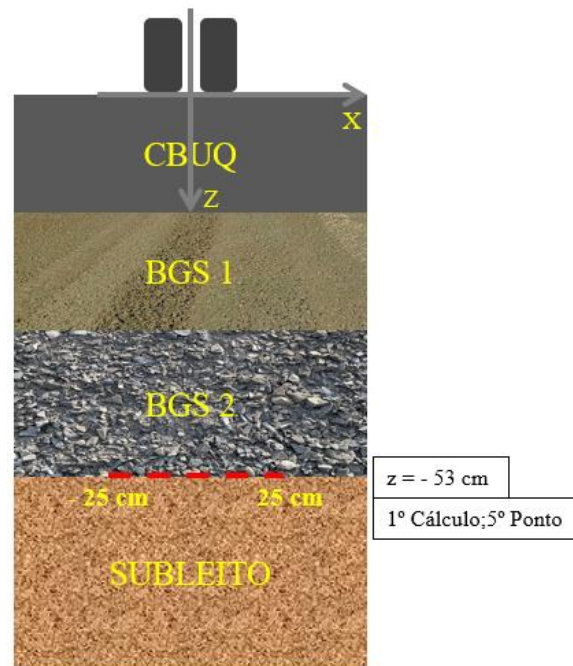


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.15 DESLOCAMENTO EM Z NO TOPO DO SUBLEITO

O deslocamento em z no topo do subleito ($z = -53,00$ cm) foi calculado com o eixo x variando no intervalo $[-25,00; +25,00]$ em centímetros para e coordenada y nula (Figura 27).

Figura 27 – Detalhamento das cotas para o primeiro cálculo do quinto ponto

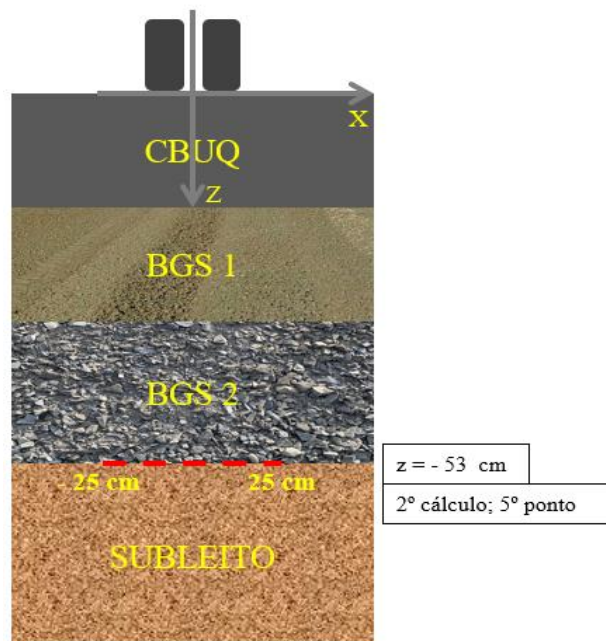


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.16 DEFORMAÇÃO EM Z NO TOPO DO SUBLEITO

A deformação em z no topo do subleito ($z = -53,00 \text{ cm}$) foi calculado com o eixo x variando no intervalo $[-25,00; +25,00]$ em centímetros para e, para a coordenada y nula (Figura 28).

Figura 28 – Detalhamento das cotas para o segundo cálculo do quinto ponto

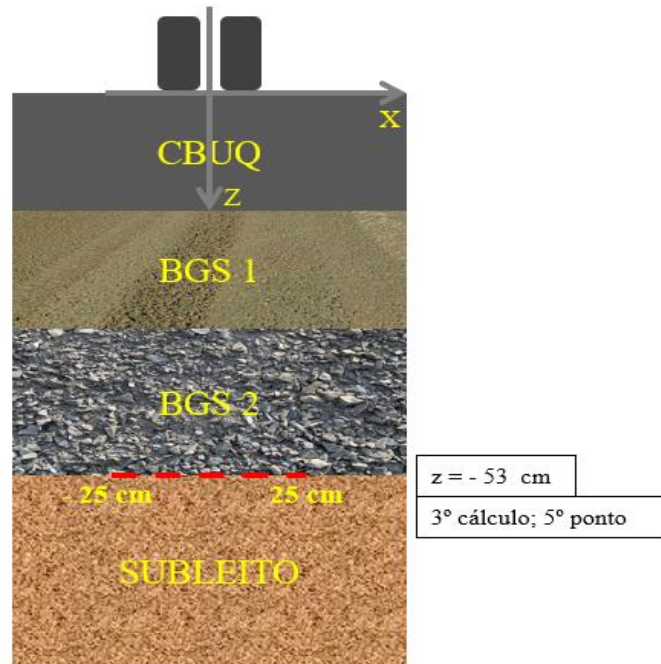


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

3.17 TENSÃO DE COMPRESSÃO EM Z NO TOPO DO SUBLEITO

A tensão de compressão em z no topo do subleito ($z = -53,00$ cm) foi calculada com o eixo x variando no intervalo $[-25,00; +25,00]$ em centímetros e, também, com a coordenada y nula (Figura 29).

Figura 29 – Detalhamento das cotas para o terceiro cálculo do quinto ponto



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados e analisados os resultados da análise realizada pelo AEMC.

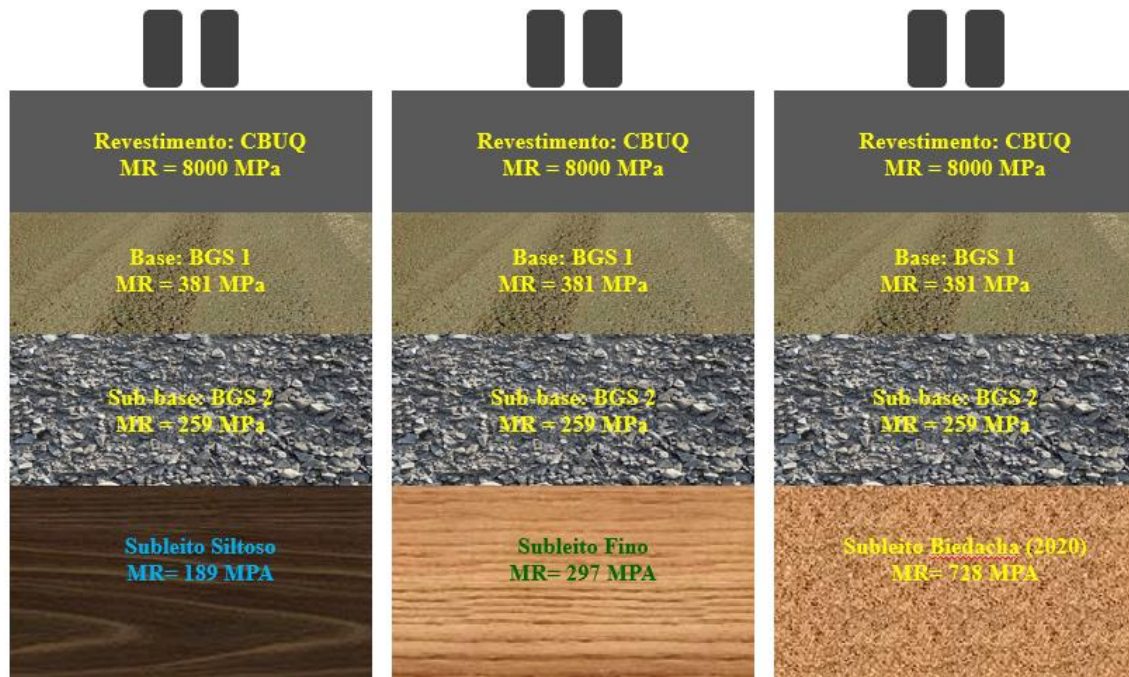
4.1 MODELO DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Conforme a metodologia, os resultados serão apresentados de acordo com o ponto da estrutura em estudo e do parâmetro estrutural analisado. A estrutura possui cinco pontos (Figura 13) e quatorze parâmetros analisados (Seção 3.3). Para cada conjunto [Ponto; Cálculo do Parâmetro] foram elaborados gráficos e planilhas que serão apresentados em seguida. Na parte intermediária dos gráficos estão expostas as cotas de cada ponto em estudo.

Essa estrutura adotada foi analisada para três tipos de materiais no subleito, conforme é apresentado na Tabela 2. Dessa maneira, a estrutura foi classificada em (Figura 30):

- a) Estrutura 1: Com a utilização do Subleito Siltoso representado pela cor azul;
- b) Estrutura 2: Com a utilização do Subleito Fino representado pela cor verde;
- c) Estrutura 3: Com a utilização do Subleito Biedacha (2020) representado pela cor amarela.

Figura 30 – Estruturas 1, 2 e 3 com diferentes composições de subleito



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Os materiais utilizados para a execução do subleito das duas primeiras estruturas estão disponíveis no MeDiNa juntamente com suas nomenclaturas, características e parâmetros, tais

Figura 32 - Propriedades do Subleito da segunda estrutura

Propriedades do Subleito

BASE DE DADOS

Projeto

Solo Siltoso NS'

Solo Fino NA

SUBLEITO

Material: Solo Fino NA

Parâmetros

Espessura (cm): 0.0

Coefficiente de Poisson: 0.45

Contato: -

Módulo (MPa)

Modelo Constituinte: **Resiliente Linear**

Módulo (MPa): 297

Características

Descrição do Material: Areia Fina de Campo Azul - MG

Grupo MCT: NA

MCT - Coeficiente c': 0.25

MCT - Índice e': 1.67

Massa específica (g/cm³): 1.820

Umidade Ótima (%): 10.0

Energia Compactação: Internormal

Norma ou Especificação: DNIT ES 137

Deformação Permanente

Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$

Coeficiente de Regressão (k1 ou p...): 0.097

Coeficiente de Regressão (k2 ou p...): -1.600

Coeficiente de Regressão (k3 ou p...): 1.900

Coeficiente de Regressão (k4 ou p...): 0.063

Modelo Constituinte

Módulo de resiliência constante.

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Fonte: retirado do *software* MeDiNa (2023).

A análise e o cálculo das três estruturas por meio do AEMC possibilitaram o traçado de curvas, a realização de análises e a obtenção de quantidades importantes para a compreensão do comportamento mecânico das estruturas em campo. Ademais, essas informações elevam a importância da mecânica dos pavimentos no que tange ao dimensionamento, projeto, vida útil e durabilidade dos pavimentos asfálticos brasileiros. As coordenadas x, y e z foram escolhidas visando o cálculo das propriedades da estrutura.

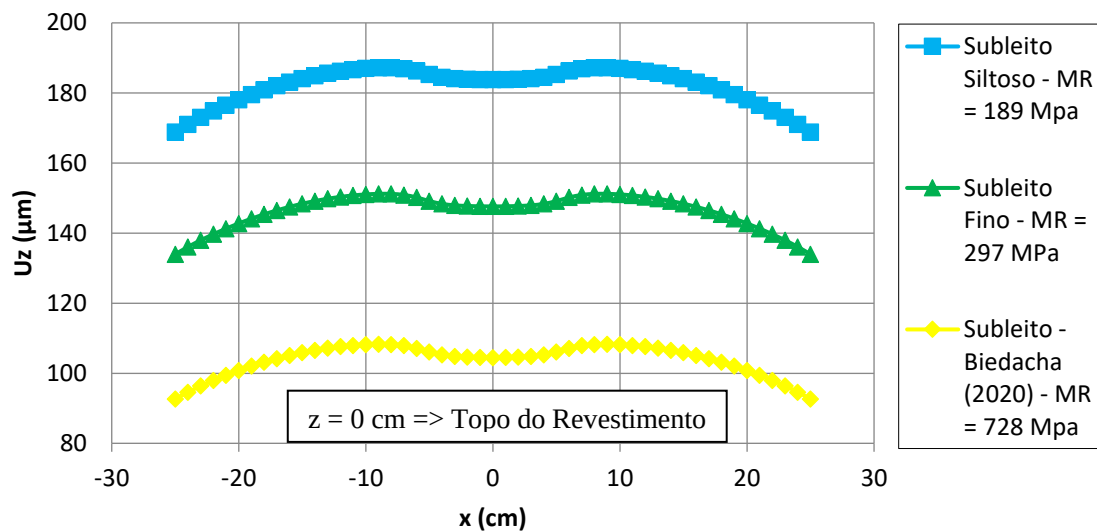
4.2 PARÂMETROS ANALISADOS NO TOPO DO REVESTIMENTO

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos parâmetros analisados pelo *software* para o primeiro ponto.

4.2.1 Deslocamento em Z na superfície

A Figura 33 apresenta o resultado do deslocamento vertical para $z = 0$ cm na superfície do pavimento, de modo a detalhar as bacias de deflexão das três estruturas.

Figura 33 - Deslocamento em Z no topo do Revestimento



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

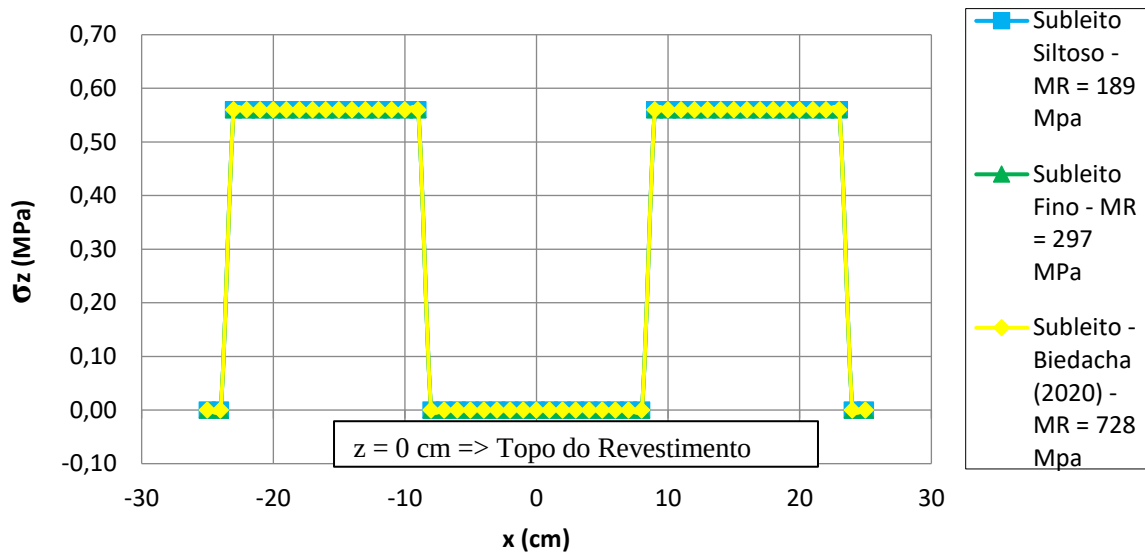
O deslocamento nesse ponto foi calculado considerando os valores nulos das coordenadas y e z , e a coordenada x foi considerada no intervalo -25 cm; $+25$ cm (Figura 13) e se trata do primeiro cálculo do ponto 1.

Os deslocamentos verticais na superfície com a utilização do Solo Siltoso apresentaram valores maiores que quando da utilização dos demais subleitos, uma vez que o MR do subleito siltoso é o menor. Ou seja, para subleitos mais rígidos, os deslocamentos na superfície apresentam menor ordem de grandeza. Quantitativamente temos que o deslocamento da estrutura 1 é 1,24 vezes maior que da estrutura 2, e 1,73 vezes maior que a estrutura 3 (Biedacha, 2020).

4.2.2 Tensão em Z no topo do revestimento

A Figura 34 apresenta a curva da tensão em Z (σ_z) na superfície das estruturas com diferentes subleitos. Esse parâmetro foi calculado considerando $z = 0$ cm, é o segundo cálculo do primeiro ponto.

Figura 34 - Tensão em Z no topo na superfície



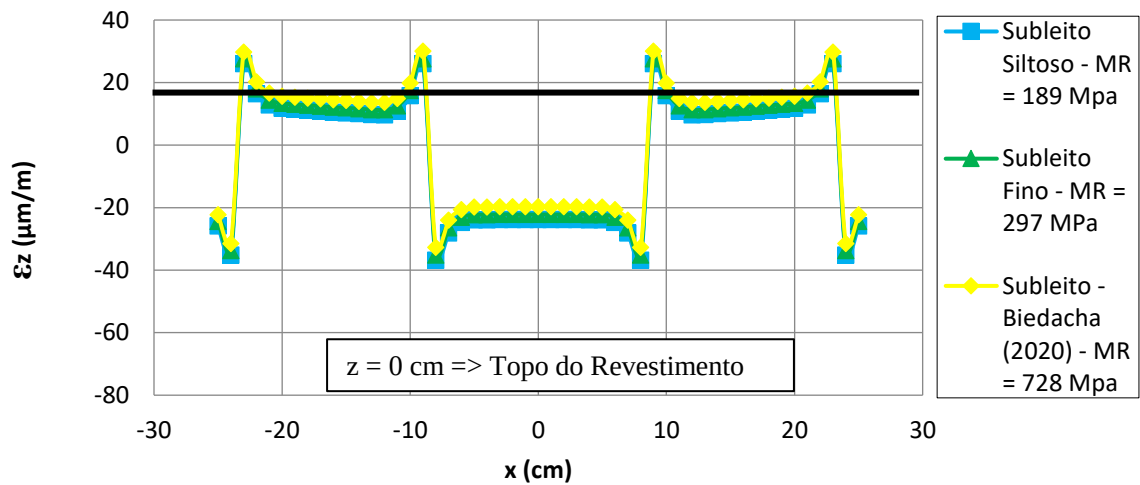
Fonte: elaborada pelo autor (2023).

A tensão em Z não apresentou variações quantitativas na adoção das três estruturas, ambas possuindo os seguintes valores: 0,00 MPa e 0,56 MPa. Esse valor de tensão diferente de zero MPa é decorrente da carga do eixo padrão rodoviário em toneladas (Tabela 2). O local de tensão máxima apontado na curva acima, para a coordenada x entre os valores, em módulo, 9 cm e 23 cm, é exatamente os pontos de aplicação de cargas máximas provenientes das rodas dos veículos. O intervalo citado para a coordenada x representam a espessura dos pneus e o ponto onde a tensão é nula representa a ausência de rodas.

4.2.3 Deformação em Z no topo do revestimento

A Figura 35 apresenta a curva da deformação de compressão no ponto 1 ($z = 0$ cm). Esse deslocamento foi calculado considerando a coordenada y nula, e a coordenada x no intervalo $[-25$ cm; $+25$ cm] (Figura 14).

Figura 35 - Deformação em Z no topo do revestimento



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

A deformação vertical na superfície apresentou um comportamento peculiar no qual a estrutura que utilizou o subleito (Biedacha, 2020) se mostrou mais deformável. A deformação em Z no topo da base com o subleito siltoso foi 1,05 vezes menor e 1,12 vezes menor que as deformações das estruturas com os demais subleitos (respectivamente, Subleito Fino e Biedacha (2020)).

Nos pontos de aplicação de cargas máximas (Figura 34) há uma deformação motivada pela compressão que o pavimento sofre devido ao movimento dos veículos. Apesar da predominância de tensões de tração, na curva, também fica perceptível a ocorrência de tensões de compressão (de sinal positivo). Nos pontos da via onde a tensão de compressão é maior, há maior deformação em Z pela relação direta entre esses parâmetros (Figura 35). Na parte central da curva fica perceptível a intensa tração (de sinal negativo) onde não há aplicação de carregamentos. O formato dessa curva possui intensa relação com a curva referente a tensão de compressão (Figura 34).

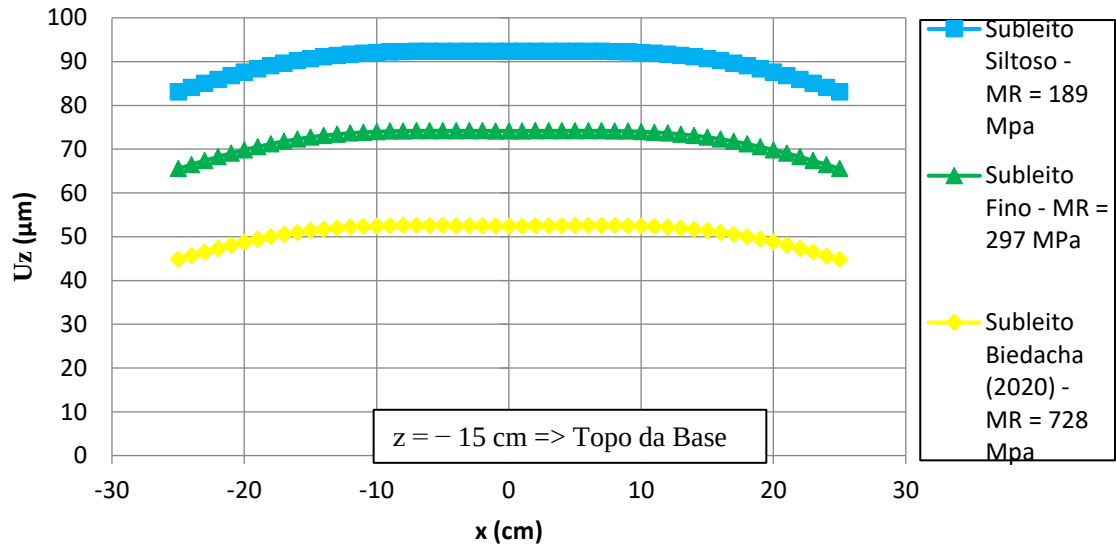
4.3 ANÁLISE DE PONTOS NO TOPO DA BASE

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos parâmetros analisados pelo *software* para o segundo ponto.

4.3.1 Deslocamento em Z

O deslocamento nesse ponto foi calculado considerando a coordenadas y nula, a profundidade $z = -15$ cm e a coordenada x foi considerada no intervalo -25 cm; $+25$ cm (Figura 13) e se trata do primeiro cálculo do ponto 2.

Figura 36 - Deslocamento em Z no topo da base



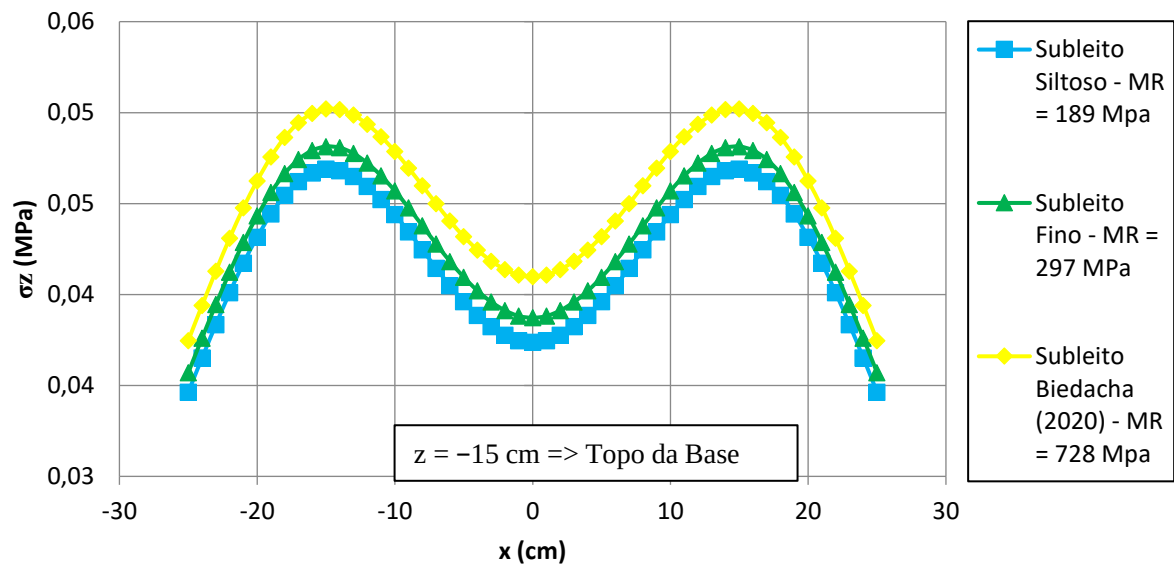
Fonte: elaborada pelo autor (2023).

O contexto desse parâmetro na superfície se repetiu nessa no topo da base: nesse ponto há deslocamentos de menor intensidade quando o subleito é mais rígido

4.3.2 Tensão em z no topo da base

A Figura 37 apresenta o segundo cálculo do segundo ponto referente a tensão em Z na cota igual -15 cm mantendo o intervalo de valores negativos e positivos para a coordenada x.

Figura 37 - Tensão em Z no topo da base

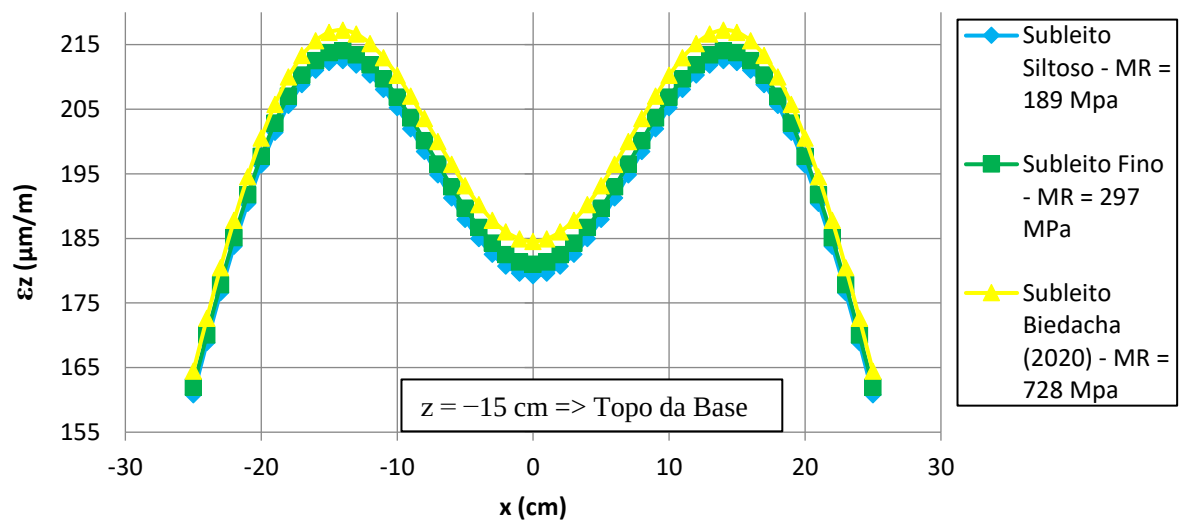


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

A tensão de compressão nesse segundo ponto apresentou maiores intensidades nos locais onde há predominância de aplicação de cargas das rodas dos veículos. Estruturas com subleitos que possuem maiores valores de MR são mais tensionadas no topo da base.

4.3.3 Deformação em Z no topo da base

Figura 38 - Curva da deformação de compressão



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

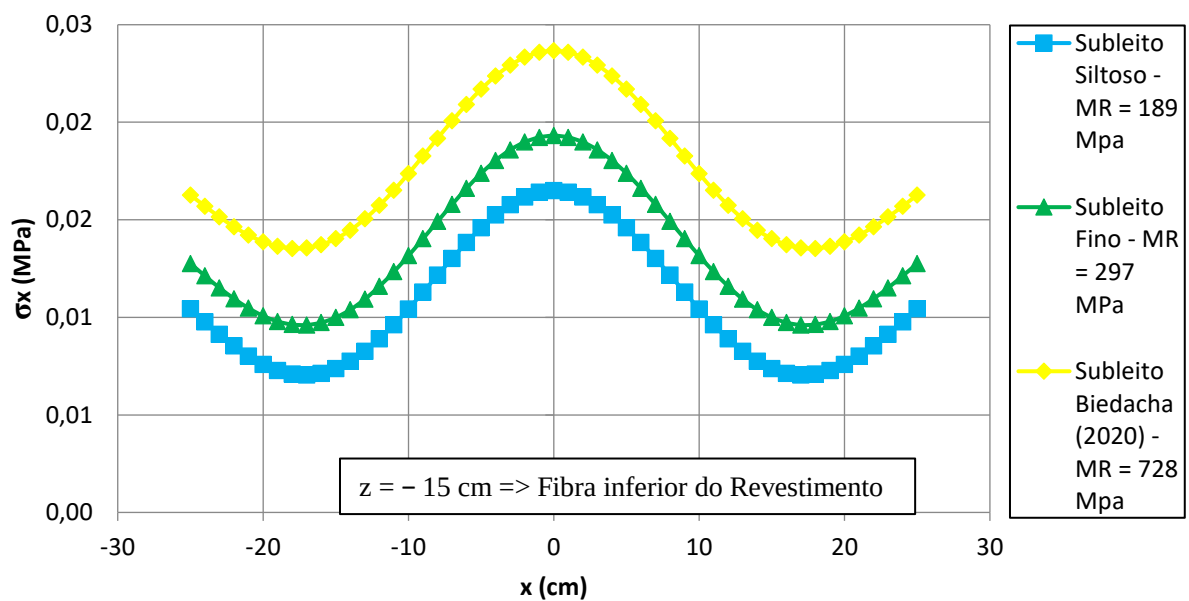
Essa deformação em $z = -15$ cm condiz com o efeito da utilização de subleitos mais rígidos uma vez que materiais de módulos de resiliência elevados no subleito provocam maiores deformações nas camadas intermediárias, tal como a base nessa estrutura.

4.4 ANÁLISE DE PARÂMETROS NA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos parâmetros analisados pelo *software* para o terceiro ponto.

4.4.1 Tensão de tração em X

Figura 39 - Curva de tensão de tração em X



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

A tensão de tração na direção x para a estrutura com o subleito Biedacha (2020) foi 1,04 vezes maior que a tensão de compressão do subleito fino e, 1,10 vezes maior que o subleito fino. Isso deriva do fato que a tensão é compatível com a deformação: solos mais rígidos deformam menos, mas apresentam maior tensão. O subleito de Biedacha (2020) possui uma alta rigidez quando comparada ao MR das camadas granulares intermediárias. Isso causa um efeito de aumento de tensões nessas camadas, causando maiores deformações. Portanto, a base terá a tendência de sofrer deformação permanente de maneira mais rápida na estrutura com o

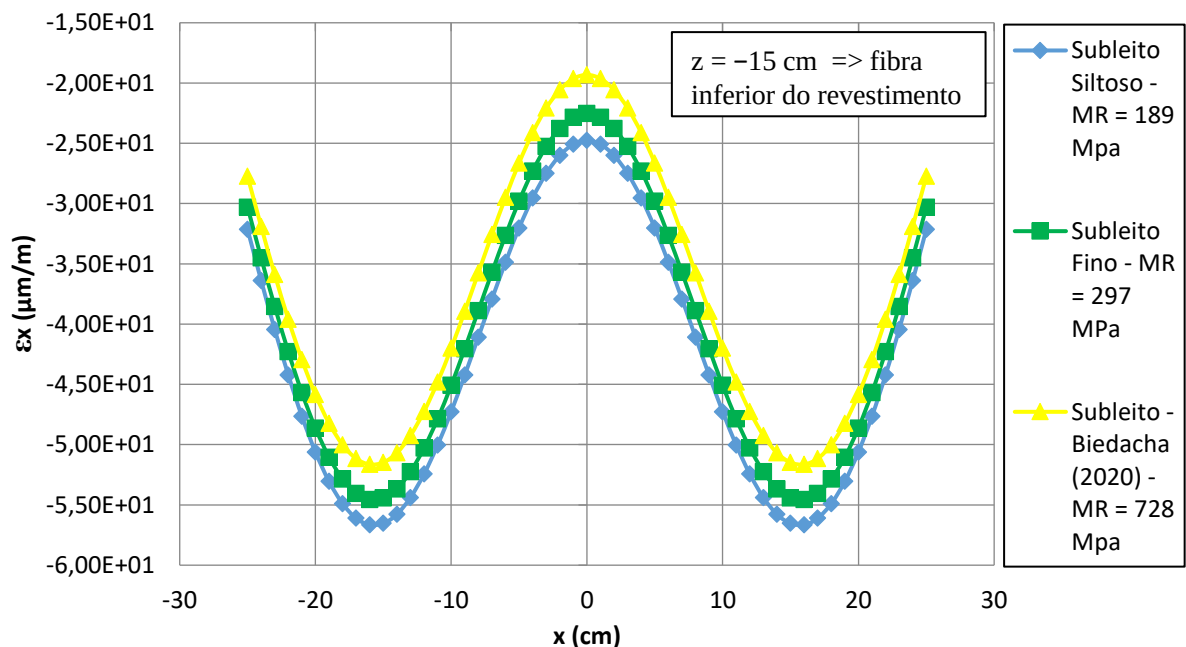
subleito mais rígido. Esse resultado indica que o material da base está sofrendo mais tensão para as estruturas com subleito mais rígidos.

A Figura 39 apresenta as curvas referentes a tensão de tração na direção x de cada estrutura na coordenada $z = -15$ cm sendo esse primeiro cálculo do terceiro ponto.

4.4.2 Deformação de Tração em X na fibra inferior do revestimento

A Figura 40 apresenta as curvas referentes a deformação de tração na direção x da estrutura na cota $z = -15$ cm, referente ao segundo cálculo do terceiro ponto.

Figura 40 - Deformação de Tração em X no topo da base



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

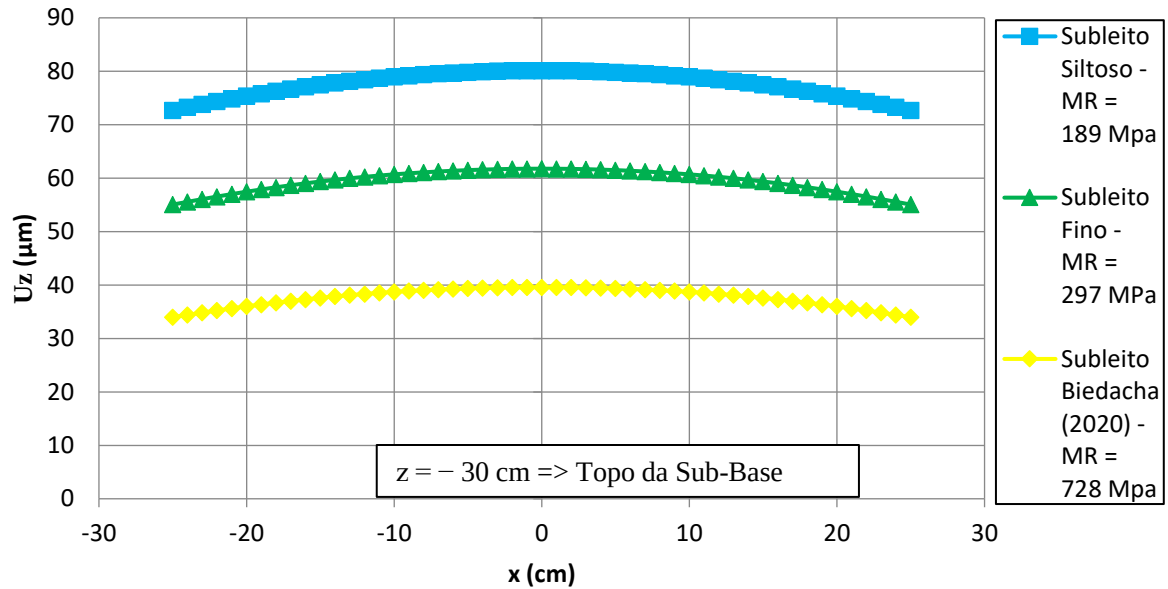
Essa curva segue o efeito em que a rigidez é inversamente proporcional à deformação, ou seja, subleitos com maiores valores de MR apresentam menor deformação. A deformação do subleito siltoso foi 1,04 vezes maior que o subleito fino e, 1,10 vezes maior que o subleito (Biedacha, 2020). O resultado é um prolongamento na vida de fadiga do revestimento na estrutura com subleito mais rígido (Biedacha, 2020).

4.5 PARÂMETROS ANALISADOS NO TOPO DA SUB-BASE

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos parâmetros analisados pelo *software* para o quarto ponto.

4.5.1 Deslocamento em Z no topo da sub-base

Figura 41 - Deslocamento no topo da sub-base



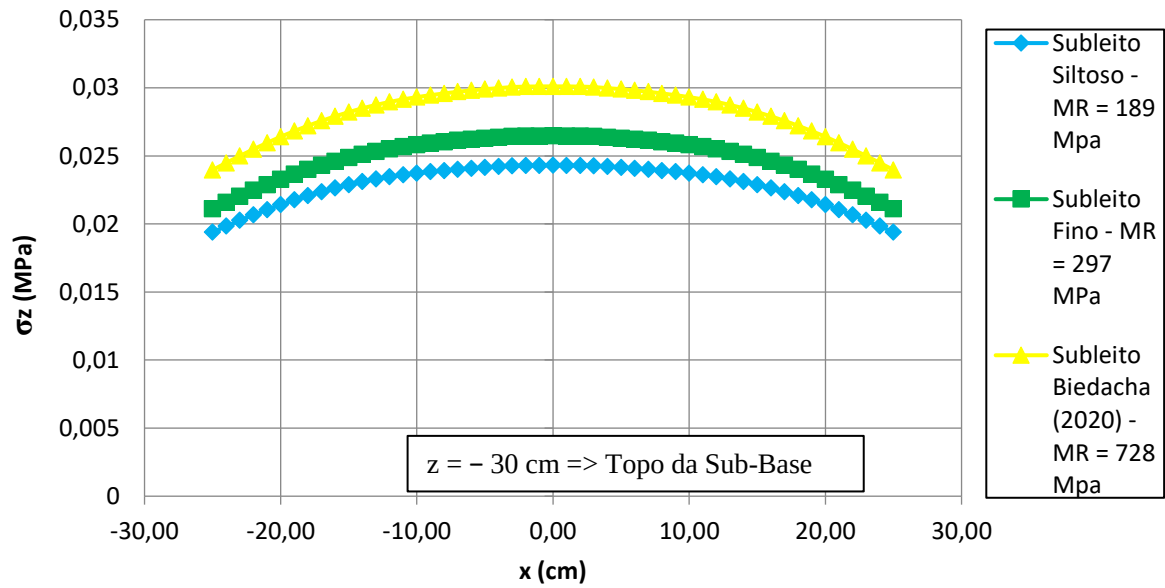
Fonte: elaborada pelo autor (2023).

O deslocamento nesse ponto foi calculado considerando a coordenada y nula, a profundidade $z = -30 \text{ cm}$ e a coordenada x foi considerada no intervalo -25 cm ; $+25 \text{ cm}$ (Figura 13) e se trata do primeiro cálculo do ponto 4. O comportamento desse parâmetro na estrutura na cota $z = -30 \text{ cm}$ se repetiu no ponto 1 ($z = 0 \text{ cm}$) e no ponto 2 ($z = -15 \text{ cm}$): o deslocamento é menos intenso, nesse ponto, quando o subleito é mais rígido. O motivo desse cenário é a alta rigidez do subleito Biedacha (2020).

4.5.2 Tensão de compressão em Z no topo da sub-base

A Figura 42 apresenta as curvas referentes a tensão de compressão em Z na cota $z = -30 \text{ cm}$.

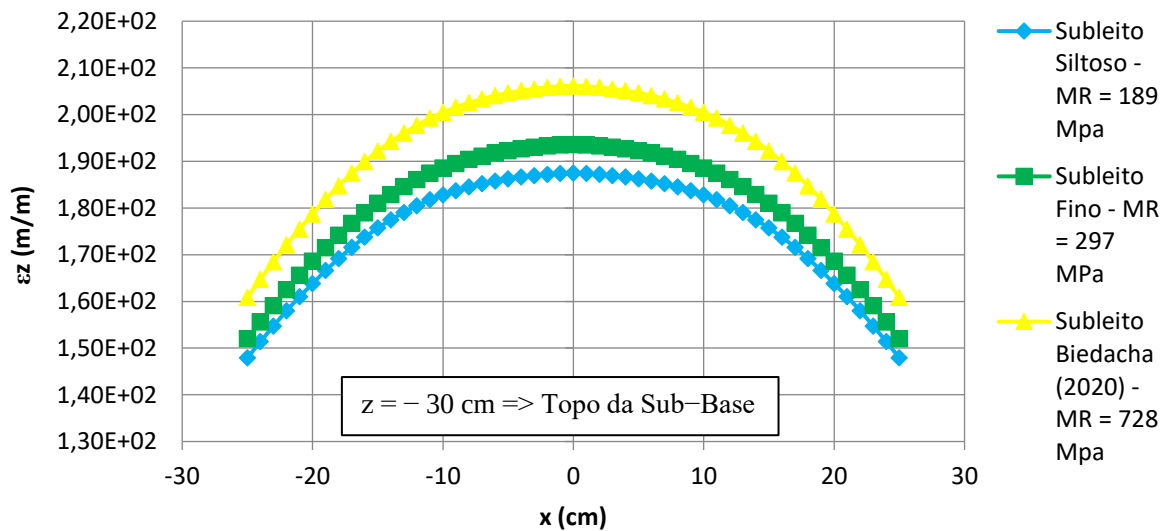
Figura 42 - Tensão de Compressão em z na no topo da sub-base



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

4.5.3 Deformação de compressão em Z no topo da sub-base

Figura 43 - Deformação em z na no topo da sub-base



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

No ponto central em que há as maiores tensões de compressão (sinal positivo, seguindo a convecção do AEMC) é, também, onde há as maiores intensidades de deformações. Em outras palavras, essa curva segue o efeito da alta rigidez do subleito que ocasionará, o rompimento antecipado das camadas granulares intermediárias (base e sub-base) motivado pelo elevado valor das solicitações nessas duas camadas.

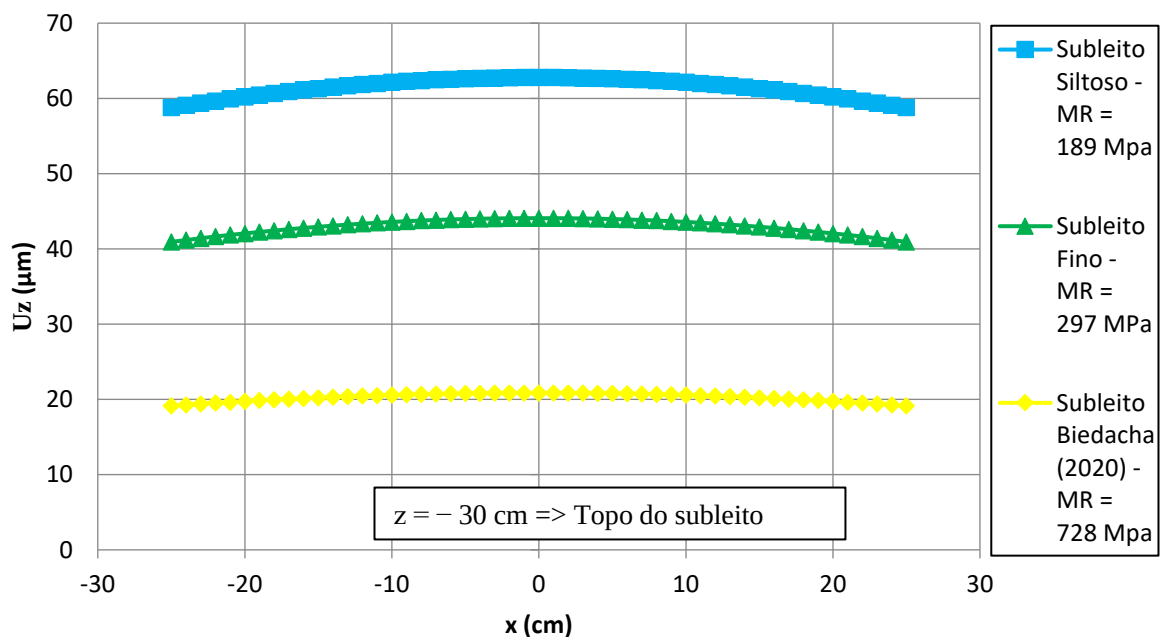
4.6 PARÂMETROS ANALISADOS NO TOPO DO SUBLEITO

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos parâmetros analisados pelo *software* para o quinto ponto.

4.6.1 Deslocamento em Z no topo do subleito

O deslocamento nesse ponto foi calculado considerando a coordenadas y nula, a profundidade $z = -30$ cm e a coordenada x foi considerada no intervalo -25 cm; $+25$ cm (Figura 13) e se trata do primeiro cálculo do ponto 5. O comportamento desse parâmetro na estrutura na cota $z = -53$ cm se repetiu no ponto 1 ($z = 0$ cm), ponto 2 ($z = -15$ cm) e ponto 4: o deslocamento é menos intenso, nesse ponto, quando o subleito é mais rígido. O motivo desse cenário é a alta rigidez do subleito Biedacha (2020).

Figura 44 - Curva referente ao deslocamento em Z no topo do subleito

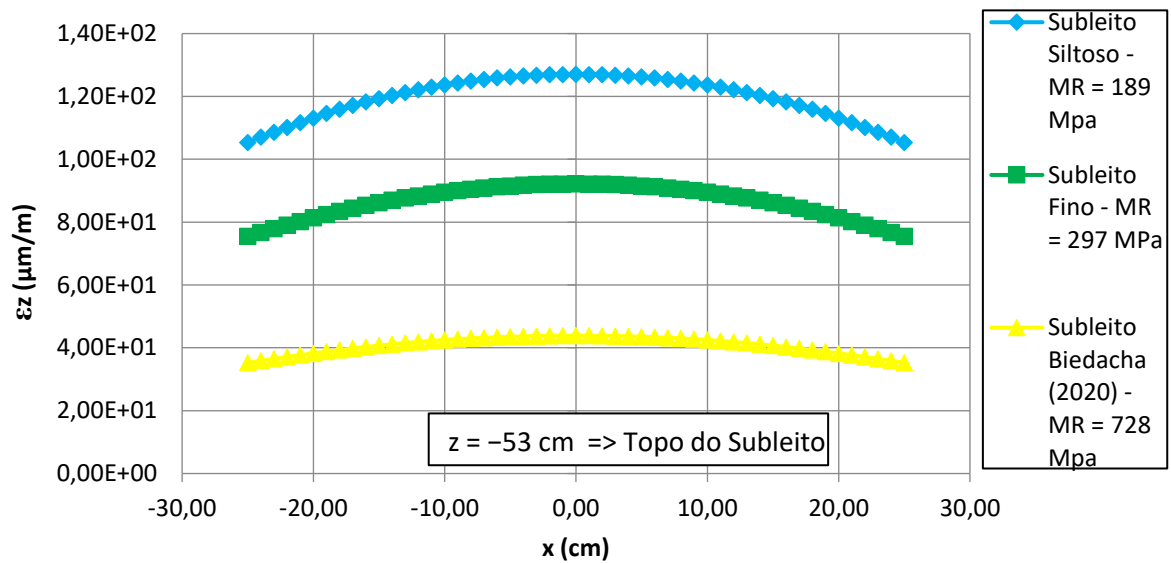


Fonte: elaborada pelo autor (2023).

4.6.2 Deformação de compressão no topo do subleito

Esse parâmetro é o primeiro cálculo do quarto ponto com $z = -53$ cm e a coordenada x variando dentro do intervalo $[-25$ cm; $+25$ cm].

Figura 45 - Deformação em Z no topo do subleito



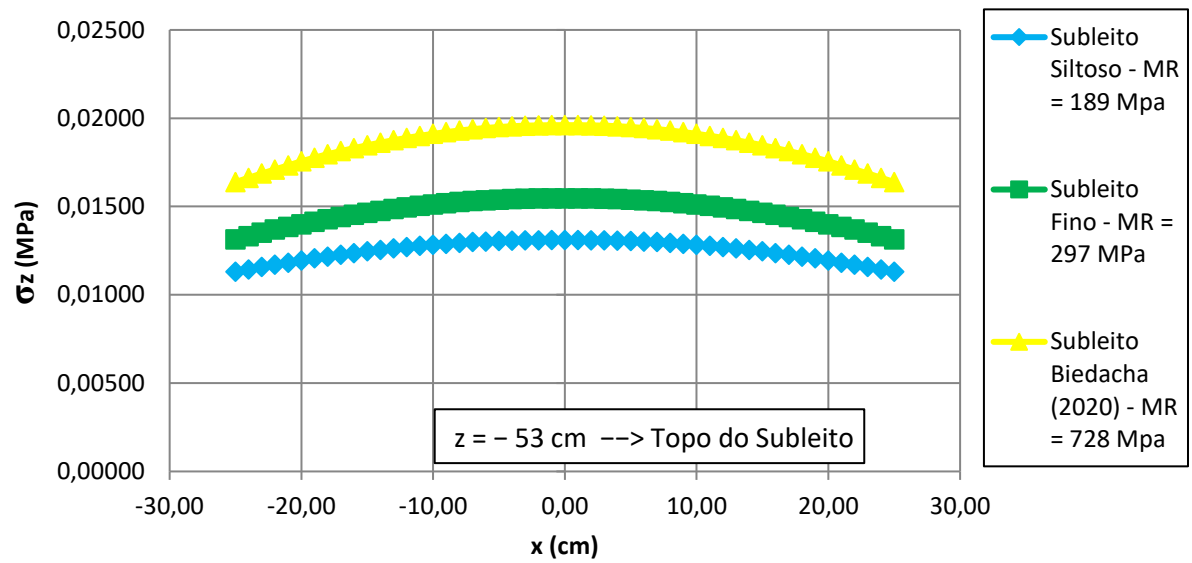
Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Essa curva segue o efeito da alta rigidez do subleito em que a rigidez é inversamente proporcional a deformação, ou seja, subleitos com maiores valores de MR apresentam menor deformação. Em termos quantitativos, temos que a deformação em z no subleito com solo siltoso é 1,38 vezes maior que a deformação do subleito fino e, 2,89 vezes maior que a deformação com subleito (Biedacha, 2020). É válido salientar que as cargas nesse ponto apresentam intensidade inferior em relação a superfície e demais pontos acima.

4.6.3 Tensão em Z no topo do subleito

Esse parâmetro é o segundo cálculo do quarto ponto com $z = -53$ cm e a coordenada x variando dentro do intervalo $[-25$ cm; $+25$ cm]. Na Figura 35 as curvas de tensão de compressão em Z são apresentadas.

Figura 46 - Tensão no subleito



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

O cenário apresentado nesta curva é muito semelhante ao apresentado na Figura 43 em que as tensões no Subleito (Biedacha, 2020) possuem valores maiores que as deformações (Equação 6).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral a análise de estruturas de pavimentos compostas por três materiais de subleitos diferentes com a utilização do AEMC, *software* integrante do MeDiNa.

O trabalho comprovou a aplicabilidade do novo método de dimensionamento para a modelagem de pavimentos, uma vez que ele possibilita o cálculo preciso de parâmetros importantes para o comportamento da estrutura *in loco* através do AEMC: um *software* cuja metodologia é baseada em elementos finitos e é parte do MeDiNa. Os cálculos dos pontos críticos das três estruturas permitiram prever o surgimento de defeitos nos pavimentos ao longo da vida útil deste, tais como as deformações permanentes.

Para terminar, foi possível perceber através de cálculos, curvas e planilhas que o enrijecimento dos subleitos nos pontos críticos das estruturas não é vantajoso para toda a estrutura do pavimento. Esse aumento beneficia somente o desempenho do próprio subleito, de modo que as demais camadas, principalmente base e sub-base, são mais solicitadas. O contexto descrito viabiliza o aumento das tensões nessas camadas e, propicia dessa forma, deformações permanentes e o rompimento precoce destas. Esse resultado foi observado, principalmente, na análise das deformações e tensões das camadas intermediárias das três estruturas estudadas e analisadas.

REFERÊNCIAS

- AEMC. **Manual de Ajuda**: Programa AEMC: versão 2.4.2. [S. l.]: AEMC, 2020.
- ARAÚJO, M. A. *et al.* Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento**, [s. l.], ano 1, v. 10, p. 187-196, nov. 2016.
- BARBOSA, D. S.; SILVA, D. C. da; AGUIAR, M. F. M. Análise comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos – Medina e o Método do DNIT. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 35., 2021, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.]: Anpet, 2021.
- BARROS, A. C. C.; CASTRO JUNIOR, O. A. Cabotagem Brasileira: aspectos jurídicos destacados. *In*: CASTRO JUNIOR, O. A. **Marinha Mercante Brasileira**: longo curso, cabotagem e bandeira de (in)conveniência. 1. ed. São Paulo: Aduaneiras, 2015.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2006.
- BIEDACHA, M. M. **Dimensionamento de pavimento asfáltico pelo Método DNER e comparativo com o atual Método Mecanístico** – Empírico MeDiNa. 2020. 132 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27496/1/PB_COECI_2020_1_09.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao-versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 12 abr. 2023.
- CAVA, Felipe. Os 15 defeitos em pavimentos flexíveis. **Além da Inércia**, [s. l.], 16 maio 2018. Disponível em: <https://alemdainercia.com/2018/05/16/os-15-defeitos-em-pavimentos-flexiveis/>. Acesso em: 11 abr. 2023.
- COUTINHO, P. C. J. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico**: Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico – Empírico aplicado a um trecho. 2011. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2328>. Acesso em: 10 abr. 2023.
- FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecanístico empírico de pavimentos asfálticos** – SisPav. Rio de Janeiro: Coppe, 2007.
- HUANG, Y. H. **Análise e Projeto de Pavimentos**. Kentucky: Pearson, 2004.
- IBGE. Cidades e Estados: Itapejara D'Oeste. **IBGE**, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/itapejara-doeste.html>. Acesso em: 12 abr. 2023.

MARINHO, F. Classificação dos solos. **Guia da Engenharia**, [s. l.], 19 maio 2020. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/classificacao-solos/>. Acesso em: 5 abr. 2023.

MOTTA, L. M. G da; MEDINA, J. de. **Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE**: Brasil. Rio de Janeiro: Coppe, 2006.

NCHRP. **Guia para Projeto Mecânico Empírico de Estruturas de Pavimento Novas e Reabilitadas**: Relatório 1-47A do Programa Cooperativo Nacional de Pesquisa Rodoviária. Washington, DC: Conselho de Pesquisa em Transporte, 2004.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Editora Villibor, 1995.

PORTELA, E. de L. **Análise viscoelástica de materiais asfálticos considerando os efeitos da temperatura e do dano**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3682/1/2011_dis_elportela.pdf. Acesso em: 5 abr. 2023.

PORTELA, H.C. **A utilização da protensão nas placas de concreto de pavimentos rígidos**. 2014. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2014.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K.; Limites de Atterberg e sua Correlação com a Granulométrica e Matéria Orgânica dos Solos. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 185-196, 2018.

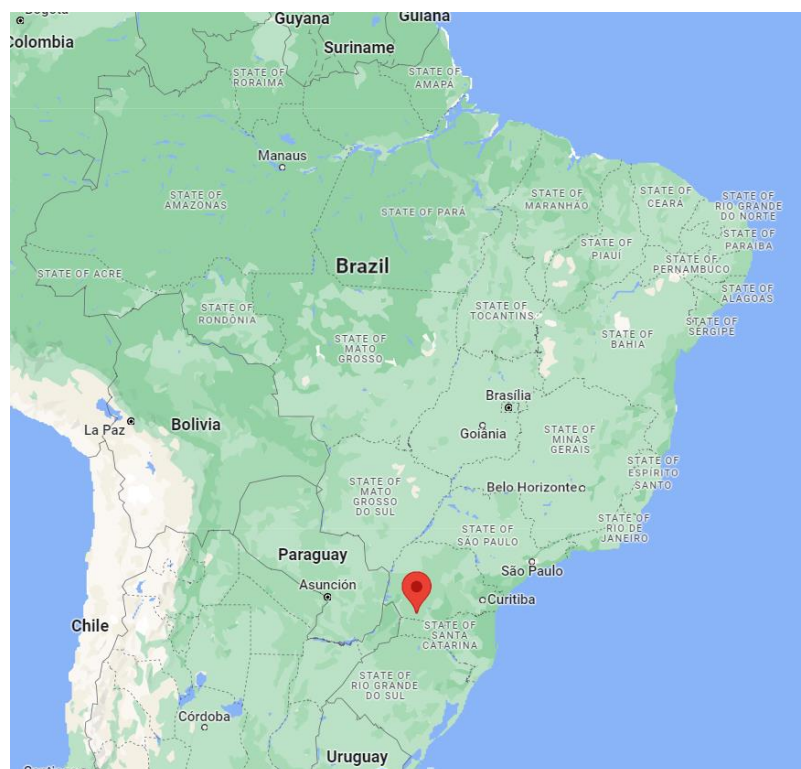
SILVA, A. C. S. **Caracterização geotécnica por meio das metodologias SUCS e TRB para os principais solos encontrados em Palmas - TO**. 2017. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. da; SOARES, R. F. Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos asfálticos. **Repositório UFC**, [s. l.], 2000. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/69472/1/2000_eve_jbsoares.pdf. Acesso em: 11 abr. 2023.

SOUZA, M. L. de. Método de projeto de pavimentos flexíveis. **IPR Publ**, [s. l.], v. 667, n. 3, 1981.

UDESC. Classificação de solos – Sucs. **UDESC**, Santa Catarina, mar. 2017. Disponível em: https://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao_sucs_2017.pdf. Acesso em: 7 abr. 2023.

ANEXO A – INFORMAÇÕES DO MUNICÍPIO ITAPEJARA D'OESTE, PARANÁ, BRASIL



Informações por Cidades e Estados – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	
Itapejara d'Oeste	
Prefeito	VILMAR SCHMOLLER [2021]
Gentílico	itapejarense
Área Territorial	254,014 km² [2022]
População estimada	12.220 pessoas [2021]
Densidade demográfica	41,46 hab/km² [2010]
Escolarização 6 a 14 anos	100 % [2010]
IDHM Índice de desenvolvimento humano municipal	0,731 [2010]
Mortalidade infantil	18,87 óbitos por mil nascidos vivos [2020]
Receitas realizadas	41.943,68 R\$ (×1000) [2017]
Despesas empenhadas	33.048,45 R\$ (×1000) [2017]
PIB per capita	57.811,89 R\$ [2020]

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 3	15,0	Resiliente Linear MR = 8000 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaiss C5	15,0	Resiliente Linear MR = 381 MPa	0,35
3	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaiss C1	23,0	Resiliente Linear MR = 259 MPa	0,35
4	SUBLEITO Projeto Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 728 MPa	0,45

ANEXO B – PLANILHAS DE CÁLCULO

Coordenadas			Solo Siltoso – MR = 189 MPa			Solo Fino – MR = 297 MPa			Solo – Biedacha – MR = 728 MPa		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	U _x (μm)	U _y (μm)	U _z (μm)	U _x (μm)	U _y (μm)	U _z (μm)	U _x (μm)	U _y (μm)	U _z (μm)
-25,00	0,00	0,00	12,209	0,000	168,88	11,33	0,00	133,97	10,04	0,00	92,66
-24,00	0,00	0,00	11,847	0,000	171,07	11,00	0,00	136,06	9,75	0,00	94,61
-23,00	0,00	0,00	11,382	0,000	173,05	10,57	0,00	137,95	9,36	0,00	96,36
-22,00	0,00	0,00	10,846	0,000	174,86	10,06	0,00	139,67	8,91	0,00	97,95
-21,00	0,00	0,00	10,287	0,000	176,55	9,54	0,00	141,27	8,43	0,00	99,43
-20,00	0,00	0,00	9,722	0,000	178,11	9,00	0,00	142,75	7,94	0,00	100,79
-19,00	0,00	0,00	9,145	0,000	179,55	8,46	0,00	144,11	7,45	0,00	102,03
-18,00	0,00	0,00	8,550	0,000	180,87	7,90	0,00	145,36	6,94	0,00	103,17
-17,00	0,00	0,00	7,949	0,000	182,07	7,33	0,00	146,49	6,42	0,00	104,19
-16,00	0,00	0,00	7,344	0,000	183,15	6,76	0,00	147,49	5,90	0,00	105,10
-15,00	0,00	0,00	6,735	0,000	184,10	6,19	0,00	148,38	5,38	0,00	105,89
-14,00	0,00	0,00	6,121	0,000	184,93	5,61	0,00	149,15	4,85	0,00	106,58
-13,00	0,00	0,00	5,507	0,000	185,64	5,03	0,00	149,81	4,32	0,00	107,15
-12,00	0,00	0,00	4,894	0,000	186,22	4,45	0,00	150,34	3,80	0,00	107,60
-11,00	0,00	0,00	4,279	0,000	186,68	3,87	0,00	150,75	3,27	0,00	107,95
-10,00	0,00	0,00	3,666	0,000	187,01	3,30	0,00	151,04	2,75	0,00	108,17
-9,00	0,00	0,00	3,084	0,000	187,22	2,75	0,00	151,20	2,26	0,00	108,28
-8,00	0,00	0,00	2,568	0,000	187,24	2,27	0,00	151,19	1,83	0,00	108,21
-7,00	0,00	0,00	2,171	0,000	186,97	1,91	0,00	150,89	1,53	0,00	107,87
-6,00	0,00	0,00	1,883	0,000	186,29	1,66	0,00	150,18	1,33	0,00	107,12
-5,00	0,00	0,00	1,513	0,000	185,27	1,33	0,00	149,13	1,05	0,00	106,03
-4,00	0,00	0,00	1,041	0,000	184,49	0,89	0,00	148,34	0,67	0,00	105,21
-3,00	0,00	0,00	0,672	0,000	184,09	0,56	0,00	147,93	0,39	0,00	104,78
-2,00	0,00	0,00	0,415	0,000	183,92	0,34	0,00	147,75	0,23	0,00	104,58
-1,00	0,00	0,00	0,197	0,000	183,84	0,16	0,00	147,65	0,10	0,00	104,48
0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	183,81	0,00	0,00	147,62	0,00	0,00	104,45
1,00	0,00	0,00	-0,197	0,000	183,84	-0,16	0,00	147,65	-0,10	0,00	104,48
2,00	0,00	0,00	-0,415	0,000	183,92	-0,34	0,00	147,75	-0,23	0,00	104,58
3,00	0,00	0,00	-0,672	0,000	184,09	-0,56	0,00	147,93	-0,39	0,00	104,78
4,00	0,00	0,00	-1,041	0,000	184,49	-0,89	0,00	148,34	-0,67	0,00	105,21
5,00	0,00	0,00	-1,513	0,000	185,27	-1,33	0,00	149,13	-1,05	0,00	106,03
6,00	0,00	0,00	-1,883	0,000	186,29	-1,66	0,00	150,18	-1,33	0,00	107,12
7,00	0,00	0,00	-2,171	0,000	186,97	-1,91	0,00	150,89	-1,53	0,00	107,87
8,00	0,00	0,00	-2,568	0,000	187,24	-2,27	0,00	151,19	-1,83	0,00	108,21
9,00	0,00	0,00	-3,084	0,000	187,22	-2,75	0,00	151,20	-2,26	0,00	108,28
10,00	0,00	0,00	-3,666	0,000	187,01	-3,30	0,00	151,04	-2,75	0,00	108,17
11,00	0,00	0,00	-4,279	0,000	186,68	-3,87	0,00	150,75	-3,27	0,00	107,95

12,00	0,00	0,00	-4,894	0,000	186,22	-4,45	0,00	150,34	-3,80	0,00	107,60
13,00	0,00	0,00	-5,507	0,000	185,64	-5,03	0,00	149,81	-4,32	0,00	107,15
14,00	0,00	0,00	-6,121	0,000	184,93	-5,61	0,00	149,15	-4,85	0,00	106,58
15,00	0,00	0,00	-6,735	0,000	184,10	-6,19	0,00	148,38	-5,38	0,00	105,89
16,00	0,00	0,00	-7,344	0,000	183,15	-6,76	0,00	147,49	-5,90	0,00	105,10
17,00	0,00	0,00	-7,949	0,000	182,07	-7,33	0,00	146,49	-6,42	0,00	104,19
18,00	0,00	0,00	-8,550	0,000	180,87	-7,90	0,00	145,36	-6,94	0,00	103,17
19,00	0,00	0,00	-9,145	0,000	179,55	-8,46	0,00	144,11	-7,45	0,00	102,03
20,00	0,00	0,00	-9,722	0,000	178,11	-9,00	0,00	142,75	-7,94	0,00	100,79
21,00	0,00	0,00	-10,287	0,000	176,55	-9,54	0,00	141,27	-8,43	0,00	99,43
22,00	0,00	0,00	-10,846	0,000	174,86	-10,06	0,00	139,67	-8,91	0,00	97,95
23,00	0,00	0,00	-11,382	0,000	173,05	-10,57	0,00	137,95	-9,36	0,00	96,36
24,00	0,00	0,00	-11,847	0,000	171,07	-11,00	0,00	136,06	-9,75	0,00	94,61
25,00	0,00	0,00	-12,209	0,000	168,88	,33	0,00	133,97	-10,04	0,00	92,66

Coordenadas			Solo Siltoso - MR = 189 MPa			Solo Fino - MR = 297 MPa			Solo - Biedacha - MR = 728 MPa		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	ϵ_x ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_y ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_z ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_x ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_y ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_z ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_x ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_y ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_z ($\mu\text{m/m}$)
-25,00	0,00	0,00	1,88E+01	4,15E+01	-2,59E+01	1,73E+01	3,97E+01	-2,44E+01	1,50E+01	3,69E+01	-2,22E+01
-24,00	0,00	0,00	3,00E+01	5,21E+01	-3,52E+01	2,84E+01	5,02E+01	-3,37E+01	2,61E+01	4,74E+01	-3,15E+01
-23,00	0,00	0,00	9,97E+00	5,06E+01	2,61E+01	8,36E+00	4,87E+01	2,76E+01	6,02E+00	4,59E+01	2,98E+01
-22,00	0,00	0,00	2,91E+01	5,38E+01	1,65E+01	2,75E+01	5,20E+01	1,80E+01	2,51E+01	4,91E+01	2,02E+01
-21,00	0,00	0,00	3,77E+01	5,37E+01	1,28E+01	3,60E+01	5,18E+01	1,44E+01	3,36E+01	4,90E+01	1,66E+01
-20,00	0,00	0,00	4,00E+01	5,37E+01	1,19E+01	3,83E+01	5,18E+01	1,34E+01	3,59E+01	4,90E+01	1,56E+01
-19,00	0,00	0,00	4,05E+01	5,41E+01	1,15E+01	3,88E+01	5,22E+01	1,30E+01	3,63E+01	4,94E+01	1,53E+01
-18,00	0,00	0,00	4,08E+01	5,45E+01	1,12E+01	3,91E+01	5,25E+01	1,27E+01	3,66E+01	4,97E+01	1,50E+01
-17,00	0,00	0,00	4,09E+01	5,50E+01	1,09E+01	3,92E+01	5,30E+01	1,25E+01	3,67E+01	5,02E+01	1,48E+01
-16,00	0,00	0,00	4,13E+01	5,55E+01	1,05E+01	3,95E+01	5,36E+01	1,21E+01	3,70E+01	5,07E+01	1,44E+01
-15,00	0,00	0,00	4,15E+01	5,58E+01	1,03E+01	3,97E+01	5,39E+01	1,19E+01	3,72E+01	5,10E+01	1,42E+01
-14,00	0,00	0,00	4,16E+01	5,63E+01	1,00E+01	3,98E+01	5,44E+01	1,16E+01	3,72E+01	5,15E+01	1,40E+01
-13,00	0,00	0,00	4,21E+01	5,66E+01	9,72E+00	4,03E+01	5,46E+01	1,13E+01	3,77E+01	5,17E+01	1,37E+01
-12,00	0,00	0,00	4,15E+01	5,73E+01	9,64E+00	3,97E+01	5,54E+01	1,13E+01	3,71E+01	5,24E+01	1,36E+01
-11,00	0,00	0,00	3,74E+01	5,86E+01	1,09E+01	3,56E+01	5,66E+01	1,25E+01	3,30E+01	5,37E+01	1,49E+01
-10,00	0,00	0,00	2,57E+01	5,88E+01	1,58E+01	2,39E+01	5,68E+01	1,74E+01	2,12E+01	5,39E+01	1,98E+01
-9,00	0,00	0,00	9,67E+00	5,10E+01	2,60E+01	7,83E+00	4,90E+01	2,76E+01	5,13E+00	4,61E+01	3,00E+01
-8,00	0,00	0,00	3,34E+01	5,25E+01	-3,68E+01	3,16E+01	5,06E+01	-3,52E+01	2,89E+01	4,76E+01	-3,28E+01
-7,00	0,00	0,00	1,60E+01	4,96E+01	-2,81E+01	1,41E+01	4,76E+01	-2,65E+01	1,14E+01	4,47E+01	-2,40E+01

-6,00	0,00	0,00	8,33E+00	4,94E+01	- 2,47E+01	6,47E+00	4,74E+01	- 2,31E+01	3,72E+00	4,44E+01	-2,06E+01
-5,00	0,00	0,00	7,44E+00	4,84E+01	- 2,40E+01	5,58E+00	4,65E+01	- 2,23E+01	2,82E+00	4,35E+01	-1,99E+01
-4,00	0,00	0,00	8,56E+00	4,72E+01	- 2,39E+01	6,69E+00	4,52E+01	- 2,23E+01	3,92E+00	4,23E+01	-1,98E+01
-3,00	0,00	0,00	9,06E+00	4,65E+01	- 2,38E+01	7,19E+00	4,45E+01	- 2,22E+01	4,42E+00	4,15E+01	-1,97E+01
-2,00	0,00	0,00	9,90E+00	4,58E+01	- 2,39E+01	8,03E+00	4,38E+01	- 2,22E+01	5,25E+00	4,08E+01	-1,97E+01
-1,00	0,00	0,00	1,03E+01	4,54E+01	- 2,39E+01	8,43E+00	4,34E+01	- 2,22E+01	5,65E+00	4,04E+01	-1,98E+01
0,00	0,00	0,00	1,04E+01	4,53E+01	- 2,39E+01	8,50E+00	4,33E+01	- 2,22E+01	5,72E+00	4,03E+01	-1,97E+01
1,00	0,00	0,00	1,03E+01	4,54E+01	- 2,39E+01	8,43E+00	4,34E+01	- 2,22E+01	5,65E+00	4,04E+01	-1,98E+01
2,00	0,00	0,00	9,90E+00	4,58E+01	- 2,39E+01	8,03E+00	4,38E+01	- 2,22E+01	5,25E+00	4,08E+01	-1,97E+01
3,00	0,00	0,00	9,06E+00	4,65E+01	- 2,38E+01	7,19E+00	4,45E+01	- 2,22E+01	4,42E+00	4,15E+01	-1,97E+01
4,00	0,00	0,00	8,56E+00	4,72E+01	- 2,39E+01	6,69E+00	4,52E+01	- 2,23E+01	3,92E+00	4,23E+01	-1,98E+01
5,00	0,00	0,00	7,44E+00	4,84E+01	- 2,40E+01	5,58E+00	4,65E+01	- 2,23E+01	2,82E+00	4,35E+01	-1,99E+01
6,00	0,00	0,00	8,33E+00	4,94E+01	- 2,47E+01	6,47E+00	4,74E+01	- 2,31E+01	3,72E+00	4,44E+01	-2,06E+01
7,00	0,00	0,00	1,60E+01	4,96E+01	- 2,81E+01	1,41E+01	4,76E+01	- 2,65E+01	1,14E+01	4,47E+01	-2,40E+01
8,00	0,00	0,00	3,34E+01	5,25E+01	- 3,68E+01	3,16E+01	5,06E+01	- 3,52E+01	2,89E+01	4,76E+01	-3,28E+01
9,00	0,00	0,00	9,67E+00	5,10E+01	2,60E+01	7,83E+00	4,90E+01	2,76E+01	5,13E+00	4,61E+01	3,00E+01
10,00	0,00	0,00	2,57E+01	5,88E+01	1,58E+01	2,39E+01	5,68E+01	1,74E+01	2,12E+01	5,39E+01	1,98E+01
11,00	0,00	0,00	3,74E+01	5,86E+01	1,09E+01	3,56E+01	5,66E+01	1,25E+01	3,30E+01	5,37E+01	1,49E+01
12,00	0,00	0,00	4,15E+01	5,73E+01	9,64E+00	3,97E+01	5,54E+01	1,13E+01	3,71E+01	5,24E+01	1,36E+01
13,00	0,00	0,00	4,21E+01	5,66E+01	9,72E+00	4,03E+01	5,46E+01	1,13E+01	3,77E+01	5,17E+01	1,37E+01
14,00	0,00	0,00	4,16E+01	5,63E+01	1,00E+01	3,98E+01	5,44E+01	1,16E+01	3,72E+01	5,15E+01	1,40E+01
15,00	0,00	0,00	4,15E+01	5,58E+01	1,03E+01	3,97E+01	5,39E+01	1,19E+01	3,72E+01	5,10E+01	1,42E+01
16,00	0,00	0,00	4,13E+01	5,55E+01	1,05E+01	3,95E+01	5,36E+01	1,21E+01	3,70E+01	5,07E+01	1,44E+01
17,00	0,00	0,00	4,09E+01	5,50E+01	1,09E+01	3,92E+01	5,30E+01	1,25E+01	3,67E+01	5,02E+01	1,48E+01
18,00	0,00	0,00	4,08E+01	5,45E+01	1,12E+01	3,91E+01	5,25E+01	1,27E+01	3,66E+01	4,97E+01	1,50E+01
19,00	0,00	0,00	4,05E+01	5,41E+01	1,15E+01	3,88E+01	5,22E+01	1,30E+01	3,63E+01	4,94E+01	1,53E+01
20,00	0,00	0,00	4,00E+01	5,37E+01	1,19E+01	3,83E+01	5,18E+01	1,34E+01	3,59E+01	4,90E+01	1,56E+01
21,00	0,00	0,00	3,77E+01	5,37E+01	1,28E+01	3,60E+01	5,18E+01	1,44E+01	3,36E+01	4,90E+01	1,66E+01
22,00	0,00	0,00	2,91E+01	5,38E+01	1,65E+01	2,75E+01	5,20E+01	1,80E+01	2,51E+01	4,91E+01	2,02E+01
23,00	0,00	0,00	9,97E+00	5,06E+01	2,61E+01	8,36E+00	4,87E+01	2,76E+01	6,02E+00	4,59E+01	2,98E+01
24,00	0,00	0,00	3,00E+01	5,21E+01	- 3,52E+01	2,84E+01	5,02E+01	- 3,37E+01	2,61E+01	4,74E+01	-3,15E+01
25,00	0,00	0,00	1,88E+01	4,15E+01	- 2,59E+01	1,73E+01	3,97E+01	- 2,44E+01	1,50E+01	3,69E+01	-2,22E+01
Máximos			7,444	41,535	-36,837	5,583	39,666	-35,202	2,825	36,894	-32,772

Coordenadas			Solo Siltoso – MR = 189 MPa			Solo Fino – MR = 297 MPa			Solo – Biedacha – MR = 728 MPa		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)
-25,00	0,00	0,00	0,2751	0,4148	0,0000	0,2565	0,3943	0,0000	0,2293	0,3639	0,0000
-24,00	0,00	0,00	0,4014	0,5373	0,0000	0,3825	0,5166	0,0000	0,3550	0,4860	0,0000
-23,00	0,00	0,00	0,4609	0,7107	0,5600	0,4419	0,6899	0,5600	0,4139	0,6591	0,5600
-22,00	0,00	0,00	0,6377	0,7901	0,5600	0,6184	0,7691	0,5600	0,5901	0,7381	0,5600
-21,00	0,00	0,00	0,7128	0,8116	0,5600	0,6933	0,7906	0,5600	0,6647	0,7594	0,5600
-20,00	0,00	0,00	0,7330	0,8176	0,5600	0,7133	0,7964	0,5600	0,6844	0,7650	0,5600
-19,00	0,00	0,00	0,7385	0,8226	0,5600	0,7186	0,8013	0,5600	0,6894	0,7697	0,5600
-18,00	0,00	0,00	0,7423	0,8264	0,5600	0,7222	0,8050	0,5600	0,6927	0,7732	0,5600
-17,00	0,00	0,00	0,7447	0,8311	0,5600	0,7245	0,8096	0,5600	0,6947	0,7777	0,5600
-16,00	0,00	0,00	0,7492	0,8368	0,5600	0,7288	0,8152	0,5600	0,6987	0,7831	0,5600
-15,00	0,00	0,00	0,7520	0,8400	0,5600	0,7314	0,8183	0,5600	0,7011	0,7860	0,5600
-14,00	0,00	0,00	0,7542	0,8448	0,5600	0,7335	0,8230	0,5600	0,7029	0,7906	0,5600
-13,00	0,00	0,00	0,7592	0,8482	0,5600	0,7384	0,8263	0,5600	0,7075	0,7938	0,5600
-12,00	0,00	0,00	0,7562	0,8533	0,5600	0,7352	0,8314	0,5600	0,7041	0,7987	0,5600
-11,00	0,00	0,00	0,7236	0,8535	0,5600	0,7025	0,8315	0,5600	0,6712	0,7987	0,5600
-10,00	0,00	0,00	0,6213	0,8244	0,5600	0,6001	0,8023	0,5600	0,5687	0,7694	0,5600
-9,00	0,00	0,00	0,4595	0,7140	0,5600	0,4382	0,6919	0,5600	0,4067	0,6589	0,5600
-8,00	0,00	0,00	0,4324	0,5500	0,0000	0,4110	0,5277	0,0000	0,3793	0,4947	0,0000
-7,00	0,00	0,00	0,2713	0,4781	0,0000	0,2499	0,4559	0,0000	0,2180	0,4227	0,0000
-6,00	0,00	0,00	0,2034	0,4561	0,0000	0,1819	0,4338	0,0000	0,1500	0,4006	0,0000
-5,00	0,00	0,00	0,1932	0,4455	0,0000	0,1716	0,4232	0,0000	0,1396	0,3899	0,0000
-4,00	0,00	0,00	0,1998	0,4378	0,0000	0,1781	0,4154	0,0000	0,1460	0,3821	0,0000
-3,00	0,00	0,00	0,2022	0,4326	0,0000	0,1806	0,4103	0,0000	0,1484	0,3769	0,0000
-2,00	0,00	0,00	0,2078	0,4286	0,0000	0,1861	0,4062	0,0000	0,1538	0,3728	0,0000
-1,00	0,00	0,00	0,2103	0,4263	0,0000	0,1886	0,4039	0,0000	0,1563	0,3705	0,0000
0,00	0,00	0,00	0,2107	0,4256	0,0000	0,1890	0,4032	0,0000	0,1567	0,3698	0,0000
1,00	0,00	0,00	0,2103	0,4263	0,0000	0,1886	0,4039	0,0000	0,1563	0,3705	0,0000
2,00	0,00	0,00	0,2078	0,4286	0,0000	0,1861	0,4062	0,0000	0,1538	0,3728	0,0000
3,00	0,00	0,00	0,2022	0,4326	0,0000	0,1806	0,4103	0,0000	0,1484	0,3769	0,0000
4,00	0,00	0,00	0,1998	0,4378	0,0000	0,1781	0,4154	0,0000	0,1460	0,3821	0,0000
5,00	0,00	0,00	0,1932	0,4455	0,0000	0,1716	0,4232	0,0000	0,1396	0,3899	0,0000
6,00	0,00	0,00	0,2034	0,4561	0,0000	0,1819	0,4338	0,0000	0,1500	0,4006	0,0000
7,00	0,00	0,00	0,2713	0,4781	0,0000	0,2499	0,4559	0,0000	0,2180	0,4227	0,0000
8,00	0,00	0,00	0,4324	0,5500	0,0000	0,4110	0,5277	0,0000	0,3793	0,4947	0,0000
9,00	0,00	0,00	0,4595	0,7140	0,5600	0,4382	0,6919	0,5600	0,4067	0,6589	0,5600
10,00	0,00	0,00	0,6213	0,8244	0,5600	0,6001	0,8023	0,5600	0,5687	0,7694	0,5600
11,00	0,00	0,00	0,7236	0,8535	0,5600	0,7025	0,8315	0,5600	0,6712	0,7987	0,5600
12,00	0,00	0,00	0,7562	0,8533	0,5600	0,7352	0,8314	0,5600	0,7041	0,7987	0,5600
13,00	0,00	0,00	0,7592	0,8482	0,5600	0,7384	0,8263	0,5600	0,7075	0,7938	0,5600
14,00	0,00	0,00	0,7542	0,8448	0,5600	0,7335	0,8230	0,5600	0,7029	0,7906	0,5600

15,00	0,00	0,00	0,7520	0,8400	0,5600	0,7314	0,8183	0,5600	0,7011	0,7860	0,5600
16,00	0,00	0,00	0,7492	0,8368	0,5600	0,7288	0,8152	0,5600	0,6987	0,7831	0,5600
17,00	0,00	0,00	0,7447	0,8311	0,5600	0,7245	0,8096	0,5600	0,6947	0,7777	0,5600
18,00	0,00	0,00	0,7423	0,8264	0,5600	0,7222	0,8050	0,5600	0,6927	0,7732	0,5600
19,00	0,00	0,00	0,7385	0,8226	0,5600	0,7186	0,8013	0,5600	0,6894	0,7697	0,5600
20,00	0,00	0,00	0,7330	0,8176	0,5600	0,7133	0,7964	0,5600	0,6844	0,7650	0,5600
21,00	0,00	0,00	0,7128	0,8116	0,5600	0,6933	0,7906	0,5600	0,6647	0,7594	0,5600
22,00	0,00	0,00	0,6377	0,7901	0,5600	0,6184	0,7691	0,5600	0,5901	0,7381	0,5600
23,00	0,00	0,00	0,4609	0,7107	0,5600	0,4419	0,6899	0,5600	0,4139	0,6591	0,5600
24,00	0,00	0,00	0,4014	0,5373	0,0000	0,3825	0,5166	0,0000	0,3550	0,4860	0,0000
25,00	0,00	0,00	0,2751	0,4148	0,0000	0,2565	0,3943	0,0000	0,2293	0,3639	0,0000

Coordenadas			Solo Siltoso - MR = 189 Mpa			Solo Fino - MR = 297 MPa			Solo - Biedacha - MR = 728 Mpa		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)
-25,00	0,00	-53,00	0,00177	0,00088	0,01130	0,00257	0,00144	0,01314	0,00452	0,00308	0,01639
-24,00	0,00	-53,00	0,00174	0,00088	0,01144	0,00254	0,00145	0,01333	0,00450	0,00311	0,01663
-23,00	0,00	-53,00	0,00171	0,00089	0,01157	0,00248	0,00147	0,01352	0,00447	0,00315	0,01687
-22,00	0,00	-53,00	0,00168	0,00089	0,01170	0,00245	0,00149	0,01370	0,00445	0,00318	0,01710
-21,00	0,00	-53,00	0,00166	0,00090	0,01183	0,00242	0,00150	0,01385	0,00442	0,00321	0,01733
-20,00	0,00	-53,00	0,00163	0,00090	0,01195	0,00240	0,00151	0,01400	0,00439	0,00325	0,01756
-19,00	0,00	-53,00	0,00161	0,00091	0,01206	0,00238	0,00152	0,01414	0,00437	0,00328	0,01777
-18,00	0,00	-53,00	0,00159	0,00091	0,01217	0,00236	0,00153	0,01428	0,00435	0,00331	0,01796
-17,00	0,00	-53,00	0,00157	0,00092	0,01227	0,00233	0,00154	0,01442	0,00433	0,00333	0,01814
-16,00	0,00	-53,00	0,00155	0,00092	0,01237	0,00231	0,00155	0,01454	0,00432	0,00336	0,01831
-15,00	0,00	-53,00	0,00152	0,00092	0,01246	0,00229	0,00156	0,01465	0,00431	0,00338	0,01847
-14,00	0,00	-53,00	0,00151	0,00093	0,01255	0,00228	0,00157	0,01476	0,00430	0,00340	0,01862
-13,00	0,00	-53,00	0,00149	0,00093	0,01263	0,00226	0,00158	0,01486	0,00429	0,00342	0,01875
-12,00	0,00	-53,00	0,00147	0,00094	0,01271	0,00224	0,00158	0,01496	0,00428	0,00344	0,01889
-11,00	0,00	-53,00	0,00146	0,00094	0,01278	0,00223	0,00159	0,01504	0,00427	0,00346	0,01900
-10,00	0,00	-53,00	0,00144	0,00094	0,01284	0,00221	0,00160	0,01513	0,00427	0,00348	0,01912
-9,00	0,00	-53,00	0,00143	0,00095	0,01289	0,00220	0,00161	0,01519	0,00426	0,00349	0,01921
-8,00	0,00	-53,00	0,00142	0,00095	0,01294	0,00219	0,00161	0,01526	0,00425	0,00351	0,01931
-7,00	0,00	-53,00	0,00141	0,00095	0,01299	0,00218	0,00162	0,01531	0,00425	0,00352	0,01938
-6,00	0,00	-53,00	0,00141	0,00096	0,01302	0,00217	0,00162	0,01536	0,00424	0,00353	0,01945
-5,00	0,00	-53,00	0,00140	0,00096	0,01305	0,00217	0,00163	0,01540	0,00424	0,00354	0,01950
-4,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01307	0,00216	0,00164	0,01543	0,00423	0,00355	0,01955

-3,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01308	0,00216	0,00164	0,01545	0,00423	0,00356	0,01958
-2,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00098	0,01309	0,00216	0,00164	0,01546	0,00423	0,00357	0,01959
-1,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01311	0,00216	0,00165	0,01547	0,00423	0,00357	0,01961
0,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01311	0,00216	0,00165	0,01546	0,00423	0,00358	0,01961
1,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01311	0,00216	0,00165	0,01547	0,00423	0,00357	0,01961
2,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00098	0,01309	0,00216	0,00164	0,01546	0,00423	0,00357	0,01959
3,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01308	0,00216	0,00164	0,01545	0,00423	0,00356	0,01958
4,00	0,00	-53,00	0,00139	0,00097	0,01307	0,00216	0,00164	0,01543	0,00423	0,00355	0,01955
5,00	0,00	-53,00	0,00140	0,00096	0,01305	0,00217	0,00163	0,01540	0,00424	0,00354	0,01950
6,00	0,00	-53,00	0,00141	0,00096	0,01302	0,00217	0,00162	0,01536	0,00424	0,00353	0,01945
7,00	0,00	-53,00	0,00141	0,00095	0,01299	0,00218	0,00162	0,01531	0,00425	0,00352	0,01938
8,00	0,00	-53,00	0,00142	0,00095	0,01294	0,00219	0,00161	0,01526	0,00425	0,00351	0,01931
9,00	0,00	-53,00	0,00143	0,00095	0,01289	0,00220	0,00161	0,01519	0,00426	0,00349	0,01921
10,00	0,00	-53,00	0,00144	0,00094	0,01284	0,00221	0,00160	0,01513	0,00427	0,00348	0,01912
11,00	0,00	-53,00	0,00146	0,00094	0,01278	0,00223	0,00159	0,01504	0,00427	0,00346	0,01900
12,00	0,00	-53,00	0,00147	0,00094	0,01271	0,00224	0,00158	0,01496	0,00428	0,00344	0,01889
13,00	0,00	-53,00	0,00149	0,00093	0,01263	0,00226	0,00158	0,01486	0,00429	0,00342	0,01875
14,00	0,00	-53,00	0,00151	0,00093	0,01255	0,00228	0,00157	0,01476	0,00430	0,00340	0,01862
15,00	0,00	-53,00	0,00152	0,00092	0,01246	0,00229	0,00156	0,01465	0,00431	0,00338	0,01847
16,00	0,00	-53,00	0,00155	0,00092	0,01237	0,00231	0,00155	0,01454	0,00432	0,00336	0,01831
17,00	0,00	-53,00	0,00157	0,00092	0,01227	0,00233	0,00154	0,01442	0,00433	0,00333	0,01814
18,00	0,00	-53,00	0,00159	0,00091	0,01217	0,00236	0,00153	0,01428	0,00435	0,00331	0,01796
19,00	0,00	-53,00	0,00161	0,00091	0,01206	0,00238	0,00152	0,01414	0,00437	0,00328	0,01777
20,00	0,00	-53,00	0,00163	0,00090	0,01195	0,00240	0,00151	0,01400	0,00439	0,00325	0,01756
21,00	0,00	-53,00	0,00166	0,00090	0,01183	0,00242	0,00150	0,01385	0,00442	0,00321	0,01733
22,00	0,00	-53,00	0,00168	0,00089	0,01170	0,00245	0,00149	0,01370	0,00445	0,00318	0,01710
23,00	0,00	-53,00	0,00171	0,00089	0,01157	0,00248	0,00147	0,01352	0,00447	0,00315	0,01687
24,00	0,00	-53,00	0,00174	0,00088	0,01144	0,00254	0,00145	0,01333	0,00450	0,00311	0,01663
25,00	0,00	-53,00	0,00177	0,00088	0,01130	0,00257	0,00144	0,01314	0,00452	0,00308	0,01639
Máximos			1,77E-03	9,76E-04	1,31E-02	2,57E-03	1,65E-03	1,55E-02	4,52E-03	3,58E-03	1,96E-02

Coordenadas			Solo Siltoso – MR = 189 Mpa			Solo Fino – MR = 297 MPa			Solo – Biedacha – MR = 728 Mpa		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ex (µm/m)	Ey (µm/m)	Ez (µm/m)	Ex (µm/m)	Ey (µm/m)	Ez (µm/m)	Ex (µm/m)	Ey (µm/m)	Ez (µm/m)
-25,00	0,00	-15,00	-3,22E+01	-7,02E+01	1,61E+02	-3,03E+01	-6,79E+01	1,62E+02	-2,77E+01	-6,48E+01	1,64E+02
-24,00	0,00	-15,00	-3,64E+01	-7,24E+01	1,69E+02	-3,45E+01	-7,01E+01	1,70E+02	-3,19E+01	-6,69E+01	1,73E+02
-23,00	0,00	-15,00	-4,04E+01	-7,45E+01	1,77E+02	-3,85E+01	-7,22E+01	1,78E+02	-3,59E+01	-6,90E+01	1,80E+02
-22,00	0,00	-15,00	-4,42E+01	-7,64E+01	1,84E+02	-4,23E+01	-7,41E+01	1,85E+02	-3,96E+01	-7,09E+01	1,88E+02
-21,00	0,00	-15,00	-4,76E+01	-7,82E+01	1,90E+02	-4,57E+01	-7,60E+01	1,92E+02	-4,29E+01	-7,27E+01	1,95E+02

-20,00	0,00	-15,00	-5,06E+01	-7,99E+01	1,96E+02	-4,86E+01	-7,76E+01	1,98E+02	-4,58E+01	-7,43E+01	2,01E+02
-19,00	0,00	-15,00	-5,31E+01	-8,14E+01	2,01E+02	-5,10E+01	-7,91E+01	2,03E+02	-4,82E+01	-7,58E+01	2,06E+02
-18,00	0,00	-15,00	-5,49E+01	-8,27E+01	2,06E+02	-5,29E+01	-8,04E+01	2,07E+02	-5,00E+01	-7,71E+01	2,10E+02
-17,00	0,00	-15,00	-5,61E+01	-8,38E+01	2,09E+02	-5,40E+01	-8,15E+01	2,10E+02	-5,12E+01	-7,82E+01	2,13E+02
-16,00	0,00	-15,00	-5,66E+01	-8,47E+01	2,11E+02	-5,46E+01	-8,24E+01	2,13E+02	-5,16E+01	-7,91E+01	2,16E+02
-15,00	0,00	-15,00	-5,65E+01	-8,55E+01	2,12E+02	-5,44E+01	-8,31E+01	2,14E+02	-5,15E+01	-7,98E+01	2,17E+02
-14,00	0,00	-15,00	-5,58E+01	-8,60E+01	2,13E+02	-5,37E+01	-8,37E+01	2,14E+02	-5,07E+01	-8,03E+01	2,17E+02
-13,00	0,00	-15,00	-5,44E+01	-8,64E+01	2,12E+02	-5,22E+01	-8,40E+01	2,13E+02	-4,92E+01	-8,07E+01	2,17E+02
-12,00	0,00	-15,00	-5,24E+01	-8,66E+01	2,10E+02	-5,03E+01	-8,42E+01	2,12E+02	-4,72E+01	-8,09E+01	2,15E+02
-11,00	0,00	-15,00	-5,00E+01	-8,66E+01	2,08E+02	-4,79E+01	-8,43E+01	2,10E+02	-4,48E+01	-8,09E+01	2,13E+02
-10,00	0,00	-15,00	-4,73E+01	-8,66E+01	2,05E+02	-4,51E+01	-8,42E+01	2,07E+02	-4,20E+01	-8,08E+01	2,10E+02
-9,00	0,00	-15,00	-4,42E+01	-8,64E+01	2,02E+02	-4,20E+01	-8,40E+01	2,04E+02	-3,89E+01	-8,07E+01	2,07E+02
-8,00	0,00	-15,00	-4,11E+01	-8,62E+01	1,98E+02	-3,89E+01	-8,38E+01	2,00E+02	-3,57E+01	-8,04E+01	2,04E+02
-7,00	0,00	-15,00	-3,79E+01	-8,59E+01	1,95E+02	-3,57E+01	-8,35E+01	1,97E+02	-3,26E+01	-8,01E+01	2,00E+02
-6,00	0,00	-15,00	-3,49E+01	-8,56E+01	1,91E+02	-3,26E+01	-8,32E+01	1,93E+02	-2,95E+01	-7,98E+01	1,96E+02
-5,00	0,00	-15,00	-3,20E+01	-8,53E+01	1,88E+02	-2,98E+01	-8,29E+01	1,90E+02	-2,66E+01	-7,95E+01	1,93E+02
-4,00	0,00	-15,00	-2,95E+01	-8,50E+01	1,85E+02	-2,73E+01	-8,26E+01	1,87E+02	-2,41E+01	-7,92E+01	1,90E+02
-3,00	0,00	-15,00	-2,75E+01	-8,48E+01	1,83E+02	-2,53E+01	-8,24E+01	1,84E+02	-2,21E+01	-7,90E+01	1,88E+02
-2,00	0,00	-15,00	-2,60E+01	-8,46E+01	1,81E+02	-2,38E+01	-8,22E+01	1,82E+02	-2,06E+01	-7,88E+01	1,86E+02
-1,00	0,00	-15,00	-2,51E+01	-8,45E+01	1,80E+02	-2,28E+01	-8,21E+01	1,81E+02	-1,96E+01	-7,87E+01	1,85E+02
0,00	0,00	-15,00	-2,48E+01	-8,44E+01	1,79E+02	-2,25E+01	-8,20E+01	1,81E+02	-1,93E+01	-7,86E+01	1,85E+02
1,00	0,00	-15,00	-2,51E+01	-8,45E+01	1,80E+02	-2,28E+01	-8,21E+01	1,81E+02	-1,96E+01	-7,87E+01	1,85E+02
2,00	0,00	-15,00	-2,60E+01	-8,46E+01	1,81E+02	-2,38E+01	-8,22E+01	1,82E+02	-2,06E+01	-7,88E+01	1,86E+02
3,00	0,00	-15,00	-2,75E+01	-8,48E+01	1,83E+02	-2,53E+01	-8,24E+01	1,84E+02	-2,21E+01	-7,90E+01	1,88E+02
4,00	0,00	-15,00	-2,95E+01	-8,50E+01	1,85E+02	-2,73E+01	-8,26E+01	1,87E+02	-2,41E+01	-7,92E+01	1,90E+02
5,00	0,00	-15,00	-3,20E+01	-8,53E+01	1,88E+02	-2,98E+01	-8,29E+01	1,90E+02	-2,66E+01	-7,95E+01	1,93E+02
6,00	0,00	-15,00	-3,49E+01	-8,56E+01	1,91E+02	-3,26E+01	-8,32E+01	1,93E+02	-2,95E+01	-7,98E+01	1,96E+02
7,00	0,00	-15,00	-3,79E+01	-8,59E+01	1,95E+02	-3,57E+01	-8,35E+01	1,97E+02	-3,26E+01	-8,01E+01	2,00E+02
8,00	0,00	-15,00	-4,11E+01	-8,62E+01	1,98E+02	-3,89E+01	-8,38E+01	2,00E+02	-3,57E+01	-8,04E+01	2,04E+02
9,00	0,00	-15,00	-4,42E+01	-8,64E+01	2,02E+02	-4,20E+01	-8,40E+01	2,04E+02	-3,89E+01	-8,07E+01	2,07E+02
10,00	0,00	-15,00	-4,73E+01	-8,66E+01	2,05E+02	-4,51E+01	-8,42E+01	2,07E+02	-4,20E+01	-8,08E+01	2,10E+02
11,00	0,00	-15,00	-5,00E+01	-8,66E+01	2,08E+02	-4,79E+01	-8,43E+01	2,10E+02	-4,48E+01	-8,09E+01	2,13E+02
12,00	0,00	-15,00	-5,24E+01	-8,66E+01	2,10E+02	-5,03E+01	-8,42E+01	2,12E+02	-4,72E+01	-8,09E+01	2,15E+02
13,00	0,00	-15,00	-5,44E+01	-8,64E+01	2,12E+02	-5,22E+01	-8,40E+01	2,13E+02	-4,92E+01	-8,07E+01	2,17E+02
14,00	0,00	-15,00	-5,58E+01	-8,60E+01	2,13E+02	-5,37E+01	-8,37E+01	2,14E+02	-5,07E+01	-8,03E+01	2,17E+02
15,00	0,00	-15,00	-5,65E+01	-8,55E+01	2,12E+02	-5,44E+01	-8,31E+01	2,14E+02	-5,15E+01	-7,98E+01	2,17E+02
16,00	0,00	-15,00	-5,66E+01	-8,47E+01	2,11E+02	-5,46E+01	-8,24E+01	2,13E+02	-5,16E+01	-7,91E+01	2,16E+02
17,00	0,00	-15,00	-5,61E+01	-8,38E+01	2,09E+02	-5,40E+01	-8,15E+01	2,10E+02	-5,12E+01	-7,82E+01	2,13E+02
18,00	0,00	-15,00	-5,49E+01	-8,27E+01	2,06E+02	-5,29E+01	-8,04E+01	2,07E+02	-5,00E+01	-7,71E+01	2,10E+02
19,00	0,00	-15,00	-5,31E+01	-8,14E+01	2,01E+02	-5,10E+01	-7,91E+01	2,03E+02	-4,82E+01	-7,58E+01	2,06E+02
20,00	0,00	-15,00	-5,06E+01	-7,99E+01	1,96E+02	-4,86E+01	-7,76E+01	1,98E+02	-4,58E+01	-7,43E+01	2,01E+02
21,00	0,00	-15,00	-4,76E+01	-7,82E+01	1,90E+02	-4,57E+01	-7,60E+01	1,92E+02	-4,29E+01	-7,27E+01	1,95E+02
22,00	0,00	-15,00	-4,42E+01	-7,64E+01	1,84E+02	-4,23E+01	-7,41E+01	1,85E+02	-3,96E+01	-7,09E+01	1,88E+02
23,00	0,00	-15,00	-4,04E+01	-7,45E+01	1,77E+02	-3,85E+01	-7,22E+01	1,78E+02	-3,59E+01	-6,90E+01	1,80E+02
24,00	0,00	-15,00	-3,64E+01	-7,24E+01	1,69E+02	-3,45E+01	-7,01E+01	1,70E+02	-3,19E+01	-6,69E+01	1,73E+02
25,00	0,00	-15,00	-3,22E+01	-7,02E+01	1,61E+02	-3,03E+01	-6,79E+01	1,62E+02	-2,77E+01	-6,48E+01	1,64E+02