



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

EDINALDO FRANÇA DA SILVA JÚNIOR
PAULO CESAR NUNES E MELO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE
ROCHAS CARBONÁTICAS SINTÉTICAS COM PRESENÇA DE
DESCONTINUIDADES**

Recife
2022

EDINALDO FRANÇA DA SILVA JÚNIOR
PAULO CESAR NUNES E MELO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE
ROCHAS CARBONÁTICAS SINTÉTICAS COM PRESENÇA DE
DESCONTINUIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Analice França Lima Amorim.

Recife
2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago CRB-4 / 1267

S586e

Silva Júnior, Edinaldo França da.

Estudo experimental da resistência a compressão simples de rochas carbonáticas sintéticas com presença de descontinuidades / Edinaldo França da Silva Júnior ; Paulo Cesar Nunes e Melo. – 2022.

52 f. : il., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Analice França Lima Amorim.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Recife, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Rocha carbonática sintética. 3. Comportamento mecânico. 4. Geotêxtil. 5. Resistência a compressão simples. 6. Simulação de fratura. I. Melo, Paulo Cesar Nunes e. II. Amorim, Analice França Lima (Orientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-347

EDINALDO FRANÇA DA SILVA JÚNIOR
PAULO CESAR NUNES E MELO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE
ROCHAS CARBONÁTICAS SINTÉTICAS COM PRESENÇA DE
DESCONTINUIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 10 / 06 /2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Analice França Lima Amorim (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MSc. Yago Ryan Pinheiro dos Santos (Examinador Externo)
Faculdade Uninassau

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ser o maior combustível e provedor de nossas vidas, o principal responsável para que pudéssemos chegar até aqui.

À nossa família que sempre esteve presente e torcendo pelo nosso sucesso, nos fazendo ter forças para prosseguir em direção ao alvo, acreditando no nosso potencial e contribuindo com incentivo, carinho e suporte, dando-nos a tranquilidade necessária para alcançarmos os nossos sonhos.

À nossa orientadora Analice França Lima Amorim por todo conhecimento transmitido, pela confiança em nosso trabalho e por nos permitir contribuir nesta linha de pesquisa tão importante e inovadora.

Ao doutorando Yago Ryan Pinheiro dos Santos que nos acompanhou e nos instruiu durante toda produção de nossa pesquisa, nos auxiliando em tudo que foi preciso para que concluíssemos nosso trabalho.

Ao amigo Germano Ramos que nos forneceu às rochas calcárias que foram utilizadas neste estudo.

Ao funcionário Fábio do LMCG, pelos excelentes serviços prestados durante os ensaios, e produção das rochas, nos dando o suporte experimental necessário.

A todos os amigos que à UFPE nos deu, que nos deram leveza e bons momentos para que conseguíssemos passar pela graduação da melhor forma possível.

A todos os professores que tivemos durante o curso, por contribuírem para nossa formação e por nos dar todo o conhecimento necessário para que possamos exercer de forma excelente a nossa profissão.

Aos nossos amigos da célula Luz do Mundo, em especial às nossas namoradas Marcela Mota e Rhafaela Maia que sempre nos impulsionaram para sermos cada dia melhores e nunca nos deixaram sozinhos durante a jornada.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, nossa eterna gratidão.

RESUMO

Os reservatórios localizados no pré sal brasileiro constituem-se predominantemente de rochas carbonáticas e por este motivo buscou-se estudar suas propriedades e comportamentos, mais especificamente o comportamento mecânico deste tipo de rocha, entretanto devido à dificuldade de se obter rochas naturais, esta pesquisa utilizou-se de pó análogo de rocha oriunda de concreções calcárias da Formação Crato, juntamente com resina epóxi para elaboração de rochas sintéticas, moldando-as em diferentes proporções e com a utilização de um material geossintético que visou simular fraturas como as encontradas nas rochas naturais. Com a elaboração da rocha sintética foi possível ensaiar as amostras, realizando-se ensaios de compressão simples a fim de que se obtivesse através dos resultados dos ensaios, parâmetros como o UCS das amostras, tensões máximas de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Os resultados obtidos mostram que houve uma diferença de resistência ao compararmos amostras de proporções diferentes, tendo aquelas com menor quantidade de resina sendo menos resistentes com UCS médio de 49,05 MPa, enquanto as que continham mais resina apresentaram UCS médio de 79,33 MPa, em relação à utilização do geossintético não percebeu-se variação na resistência das amostras onde simulou-se as fraturas.

Palavras-chave: rocha carbonática sintética; comportamento mecânico; geotêxtil; resistência a compressão simples; simulação de fratura.

ABSTRACT

The reservoirs located in the Brazilian pre-salt are predominantly composed of carbonate rocks and for this reason it was sought to study their properties and behaviors, more specifically the mechanical behavior of this type of rock, however due to the difficulty of obtaining natural rocks, this research used rock analogous powder from calcareous concretions of the crato formation, along with epoxy resin for the preparation of synthetic rocks, molding them in different proportions and using a geosynthetic material that aimed to simulate fractures like those found in natural rocks. With the elaboration of the synthetic rock it was possible to test the samples, performing simple compression tests in order to obtain, through the test results, parameters such as the UCS of the samples, maximum rupture stress, modulus of elasticity, and Poisson's ratio. The results show that there was a difference in strength when comparing samples of different proportions, with those with greater porosity being less resistant than the less porous ones, while in relation to the use of geosynthetic material there was no noticeable variation in the strength of the samples where fractures were simulated.

Keywords: synthetic carbonate rock; mechanical behavior; geotextile; unconfined compressive strength; fracture simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de rochas carbonáticas (adaptado de Dunham, 1962).	17
Figura 2 – Classificação de rochas carbonáticas (adaptado de Folk, 1962).....	18
Figura 3 - Classificação de pedras calcárias de acordo com textura deposicional.	19
Figura 4 - Amostra de rochas sintéticas confeccionadas por Vieira (2018), contendo densidades diferentes, sendo (a) densidade média de $1,48\pm 0,04$ g/cm ³ e (b) densidade média de $1,73\pm 0,03$ g/cm ³	21
Figura 5 – Funções associadas ao uso de geossintéticos	22
Figura 6 – Utilização de geotêxtil não tecido como camada filtrante durante o estudo de Leiros (2019).	22
Figura 7 – Uso de geogrelhas para aumentar a capacidade do solo	23
Figura 8 - Mapa da Bacia do Araripe com destaque para a área onde foi retirado o material para confecção da rocha sintética (retângulo vermelho).	24
Figura 9 – Operação do britador de mandíbulas.....	25
Figura 10 – Processo de trituração da rocha: a) Célula com o material antes do processo; b) Preparação do equipamento; c) Moinho de discos; d) Amostra após o processo de trituração.	25
Figura 11 – Processo de peneiramento: a) Colocação do material na peneira; b) Série de peneiras no agitador.....	26
Figura 12 - Aglomerante polimérico formado por dois materiais: a) Resina epóxi; b) Endurecedor epóxi.....	26
Figura 13 – Geotêxtil utilizado nas amostras	27
Figura 14 – Pesagem dos materiais utilizados na amostra: a) Pó análogo; b) Curador; c) Resina epóxi.....	29
Figura 15 – Preparação do material utilizado para fabricação das amostras: a) Mistura da resina com o curador; b) Mistura da resina epóxi com o pó análogo; c) Homogeneização do material; d) Peneiramento da amostra homogeneizada; e) Pesagem do material total para preparação de uma amostra; f) Pesagem de 1/3 do material para primeira parte da amostra.....	30
Figura 16 - Preparação do molde para receber a amostra: a) Aplicação de vaselina no molde; b) Molde pronto para receber a amostra; c) Colocação do material dentro do molde; d) Acomodação do material com o auxílio de uma espátula; e) Colocação do geotêxtil a altura de 1/3 da amostra; f) Fechamento do molde após colocação do	

restante do material; g) Colocação do molde na prensa mecânica; h) Amostras posicionadas na estufa; i) Amostra pronta após 24h na estufa.	32
Figura 17 – Sistema utilizado no processo de compressão contendo a prensa hidráulica, extensômetros e a amostra.	33
Figura 18 – Método utilizado para obtenção do módulo de elasticidade a partir do trecho elástico.	34
Figura 19 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-02.	36
Figura 20 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-03.	36
Figura 21 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-04.	36
Figura 22 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-05.	37
Figura 23 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-06.	37
Figura 24 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-07.	37
Figura 25 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM1-08.	38
Figura 26 – Curva tensão <i>versus</i> deformação para as amostras com proporção 85% de pó análogo e 15% de resina.	38
Figura 27 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2-01.	39
Figura 28 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2-02.	39
Figura 29 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2-03.	40
Figura 30 – Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e sem geotêxtil.	40
Figura 31 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2F-01.	41
Figura 32 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2F-02.	42
Figura 33 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2F-03.	42
Figura 34 - Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e 1 faixa de geotêxtil.	43
Figura 35 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2F2-01.	44
Figura 36 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2F2-02.	44
Figura 37 - Curva tensão <i>versus</i> deformação da amostra AM2F2-03.	44
Figura 38 - Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e 2 faixa de geotêxtil.	45
Figura 39 – Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras de maior resistência a compressão de AM1-04 e AM2-01.	46
Figura 40 – Gráfico dos limites máximos e mínimos das curvas tensão <i>versus</i> deformação das amostras AM1 e AM2.	46

Figura 41 - Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras de maior resistência a compressão de AM2, AMF2 e AM2F2.	47
Figura 42 - Gráfico dos limites máximos e mínimos das curvas tensão <i>versus</i> deformação das amostras de AM2, AM2F e AM2F2.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das rochas carbonáticas com base na porcentagem de óxido de magnésio, MgO, contido na rocha (Pettijohn, 1957).....	15
Tabela 2 – Dados das amostras com a proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina epóxi.	28
Tabela 3 – Dados das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina epóxi.	28
Tabela 4 - Resultados das amostras com a proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina.	35
Tabela 5 - Resultados das amostras com a proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina sem geotêxtil.....	39
Tabela 6 - Resultados das amostras com a proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 1 tira de geotêxtil.....	41
Tabela 7 – Resultados das amostras com a proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 tiras de geotêxtil.	43
Tabela 8 – Comparação entre os parâmetros médios de AM1 e AM2.	47
Tabela 9 - Comparação entre os parâmetros médio de AM2, AM2F e AM2F2.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	ROCHAS CARBONÁTICAS	15
2.1.1	Mineralogia e Formação.....	15
2.1.2	Classificação das rochas carbonáticas	16
2.1.3	Propriedades das rochas carbonáticas.....	19
2.2	ROCHAS SINTÉTICAS	20
2.3	GEOSINTÉTICOS.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA ROCHA SINTÉTICA	24
3.1.1	Pó Análogo	24
3.1.2	Resina Epóxi	26
3.1.3	Geotêxtil.....	27
3.2	FABRICAÇÃO DA ROCHA SINTÉTICA	27
3.3	ANÁLISE MECÂNICA DA ROCHA	32
3.3.1	Ensaio de Compressão Simples.....	33
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	35
4.1	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES	35
4.1.1	Amostras com proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina	35
4.1.2	Amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina sem geotêxtil	38
4.1.3	Amostras com proporção de 90% pó análogo e 10% de resina com 1 faixa de geotêxtil.....	40
4.1.4	Amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 faixas de geotêxtil	43
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS.....	45
4.2.1	Comparação entre amostras sem geotêxtil com proporções diferentes.....	45
4.2.2	Comparação entre amostras com e sem geotêxtil de mesma proporção	47
4.3	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da engenharia é desenvolver técnicas e tecnologias inovadoras para suprir a alta demanda energética de combustíveis fósseis, sendo cada vez mais necessário que haja uma maior produtividade e um maior aproveitamento desses recursos que em sua maioria são não renováveis. A engenharia tem a incumbência de planejar, projetar, gerir e executar a extração desses combustíveis, bem como contribuir com pesquisas a fim de encontrar soluções que tornem essa extração mais eficiente e eficaz.

Por esse motivo busca-se encontrar uma forma de entender e estudar as rochas reservatório, rochas estas que podem ter quaisquer origem ou natureza, mas que para se constituir como reservatório devem apresentar espaços vazios em seu interior (porosidade), e necessitam que estes vazios estejam interconectados, conferindo-lhes a característica local onde ficam armazenados os depósitos de óleo e gás natural. Podem constituir rochas reservatório os arenitos, calcarenitos e todas as rochas sedimentares, dotadas de porosidade intergranular, que sejam permeáveis. Entretanto algumas rochas, como os folhelhos e alguns carbonatos normalmente porosos, porém impermeáveis, podem vir a se constituir reservatórios, quando se apresentam naturalmente fraturados (THOMAS, 2001).

As rochas carbonáticas, objeto de estudo dessa monografia, constituem os reservatórios dos maiores campos petrolíferos do mundo, incluindo os localizados no pré sal brasileiro, salientando a importância de conhecer o comportamento mecânico desse tipo de rocha, já que um dos potenciais crescimento na economia do país é decorrente da melhor exploração do pré sal.

Os carbonatos são constituídos por uma diversa gama de fácies deposicionais, ou seja, uma diversidade de tipos de rochas com camadas distintas que mudam de acordo com o ambiente que estão depositadas e as características do mesmo, além de um complexo meio poroso, no qual é necessária uma ampla compreensão de suas características petrofísicas e geomecânicas. Segundo Pourmohammadi *et al.* (2007), isso é proveniente da heterogeneidade desses tipos de rochas que promove uma variedade das propriedades mecânicas e permoporosas do meio, o que acaba refletindo na produtividade da formação, bem como na operação e manutenção de produção em reservatórios com essas características.

Assim, com a finalidade de determinar as características das rochas carbonáticas fraturadas, os ensaios do presente trabalho foram realizados com amostras sintéticas onde as fraturas foram simuladas através de fitas de geossintético. O interesse por uma fonte alternativa

de amostras (rochas sintéticas) é devido à maior facilidade nas simulações numéricas devido o maior controle dos componentes dessas rochas.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O petróleo tem sido objeto de tantas pesquisas e estudos devido a dois motivos, o primeiro é que atualmente junto com o gás natural e o carvão mineral, os combustíveis fósseis dominam a matriz energética mundial, o segundo ponto é que o petróleo é uma das principais *commodities* (ou matérias-primas) negociadas no mundo. Em 2015, movimentou mais de US\$ 1,7 trilhão na economia global – para efeito de comparação, todo o mercado de metal, somado (incluindo ouro, alumínio, ferro etc.), representa apenas um terço disso. (LAFRATTA, 2020)

Devido a essa grande importância do petróleo, o investimento em pesquisas e tecnologias tem sido cada vez maior, fazendo com que pesquisadores de diversas áreas façam investigações voltadas ao tema, buscando cada vez mais aprimorar os conhecimentos e técnicas de exploração do mesmo, no intuito de prever o comportamento dos depósitos (rochas) bem como o comportamento do óleo de acordo com as características desses depósitos.

Além disso, a indústria do petróleo tem encontrado grandes desafios econômicos e técnicos para a exploração e extração, em função de cenários geológicos complexos, com a necessidade de perfurar em águas profundas, perfurar rochas com diferentes resistências mecânicas, heterogêneas vertical e horizontalmente e com a presença de fraturas e falhas condutivas hidráulicas. Assim, é extremamente importante dispor-se de uma estratégia para evitar ou minimizar potenciais problemas geomecânicos durante as fases de desenvolvimento e exploração de um campo petrolífero, simulando experimentalmente em laboratório o comportamento das rochas que são comumente encontradas in loco.

Desta maneira, esse trabalho estuda o comportamento mecânico de rochas carbonáticas sintéticas com a utilização de geossintéticos usados para simulação de fraturas, utilizando a metodologia adotada por Santos (no prelo), tendo em vista que as fraturas estão presentes essencialmente em todas as rochas e podem ter efeito sobre a estabilidade de poços, sobre as propriedades mecânicas e sobre o transporte de fluidos (KIEWIET, 2015; ZOBACK, 2007)

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento mecânico através de ensaios de compressão simples de uma rocha carbonática sintética com fraturas induzidas artificialmente por geossintéticos em diferentes posições.

Esta pesquisa tem como objetivos específicos:

- Sintetizar a rocha carbonática;
- Representar as discontinuidades das rochas por meio da utilização de geotêxtil em diferentes posições;
- Analisar do comportamento mecânico por meio das propriedades obtidas em ensaios;
- Analisar a influência das discontinuidades no comportamento mecânico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contém uma abordagem teórica dos principais temas necessários para a compreensão deste trabalho. O capítulo apresenta as rochas carbonáticas, no intuito de esclarecer conceitos sobre esse tipo de rocha, destacando a resistência e algumas abordagens experimentais referente ao tema.

2.1 ROCHAS CARBONÁTICAS

Este tópico está dividido em três principais pontos e características acerca das rochas carbonáticas que são sua mineralogia e formação, classificação e propriedades.

2.1.1 Mineralogia e Formação

As rochas carbonáticas têm sua origem química, biológica ou clástica, sendo constituídas predominantemente por Calcita (CaCO_3), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Aragonita (CaCO_3). Quanto à química, as rochas carbonáticas podem ser classificadas com base nos estudos estabelecidos por Pettijohn (1957), que relaciona a porcentagem de óxido de magnésio (MgO) contido na rocha conforme apresentado na Tabela 1 que apresenta a classificação das rochas carbonáticas com base na porcentagem de óxido de ferro.

Tabela 1 - Classificação das rochas carbonáticas com base na porcentagem de óxido de magnésio, MgO, contido na rocha (Pettijohn, 1957).

Denominação	% de MgO
Calcário	0 a 1,1
Calcário magnesiano	1,1 a 2,1
Calcário dolomítico	2,1 a 10,8
Dolomito calcítico	10,8 a 19,5
Dolomito	19,5 a 21,7

Fonte: Pettijohn (1957)

Destes minerais carbonáticos, contidos na tabela 1 que foram classificados por Pettijohn (1957) segundo a porcentagem de óxido de magnésio, os mais comuns e mais estudados são a calcita e a dolomita. Esses minerais formam respectivamente as rochas calcário e dolomito. Juntas essas rochas formam cerca de 90% de todas as rochas carbonáticas. (REEDER, 1983)

Segundo Silva (2017), pela calcita ser o mineral mais comum, seguido pela dolomita, os principais compostos químicos nas rochas carbonáticas são o óxido de cálcio (CaO), o dióxido de carbono (CO_2) e o óxido de magnésio (MgO). Além dos minerais carbonáticos a rocha conterá alguns resíduos insolúveis, sendo a sílica na forma de quartzo a mais comum. Outros resíduos possivelmente presentes são os sulfetos e os sulfatos.

Diversos estudos foram feitos para entender a mineralogia das rochas reservatório que compõe o pré-sal brasileiro visando descobrir como ocorreu o surgimento e o comportamento daquele tipo de rocha. Uma das bacias mais estudadas é a Bacia de Santos devido à sua grande contribuição na exploração do pré sal, sendo a maior dentre as bacias *offshore* brasileiras. Segundo Moreira *et al.* (2007) é composta por diversas formações tendo os primeiros depósitos sedimentares na formação piçarras sendo compostos por sedimentos arenosos e conglomeráticos de leques aluviais nas porções proximais e arenitos, siltitos e folhelhos de composição talco-estevensítica nas porções lacustres.

Além da Formação Piçarras, outras formações já foram objeto de estudo no que diz respeito à composição mineralógica, como podemos exemplificar a Formação Barra Velha bastante estudado por conter os principais reservatórios. A Formação Barra Velha é composta por diversas formações tendo os primeiros depósitos sedimentares na Formação Piçarras sendo compostos por sedimentos arenosos e conglomeráticos (MOREIRA *et al.*, 2007).

A rocha carbonática utilizada para fabricação da rocha sintética deste trabalho encontra-se na Formação Crato, que segundo Viana e Neumann (2002), litologicamente, compõe-se de estratos horizontalizados de calcários, intercalados a folhelhos, siltitos e arenitos, depositados durante o Cretáceo Inferior (cerca de 120 milhões de anos) e é uma importante jazida de calcário, atualmente explorado para a indústria de cimento e de rochas ornamentais.

Diversos estudos já foram feitos nesta mesma Formação como é o caso de Ramos (2020) que fez a análise de concreções como ferramenta para o estudo de taxas de compactação em calcários laminados, uma aplicação à evolução diagenética de rochas reservatórios e Alencar (2018) que fez a caracterização dos estilólitos verticais do nível superior dos calcários laminados da formação.

2.1.2 Classificação das rochas carbonáticas

Terra *et al.* (2010) destacaram que a classificação das rochas carbonáticas para a sedimentologia dos carbonatos sempre foi um grande desafio principalmente devido a sua variabilidade e complexidade, visto que, esses aspectos aliados à forte ação da diagênese dificulta bastante a criação de uma que abrangesse todo o espectro de rochas carbonáticas existente. Existem diversas classificações, desde as clássicas até novas, que visam abranger espectros de ocorrências em locais específicos para atender demandas regionais ou problemas pontuais como por exemplo, no caso de Terra *et al.* (2010), que discorreram acerca de uma

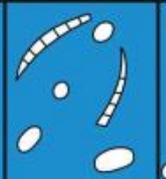
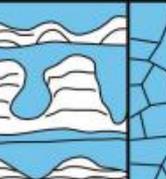
classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras com ênfase naquelas onde ocorrem exploração e produção de petróleo.

A respeito das classificações clássicas tem-se duas Dunham (1962) e Folk (1962) que servem de base para estudos até os tempos atuais e que são consideradas, hoje, clássicos da geologia sedimentar de carbonatos. Ambas foram propostas durante um simpósio denominado Classificação de Rochas Carbonáticas que foi patrocinado pela AAPG (*American Association of Petroleum Geologists*) juntamente com a SEPM (*Society for Sedimentary Geology*) durante sua convenção anual de 1961, tendo os trabalhos apresentados nesta convenção publicados no ano seguinte, em 1962, no primeiro *Memoir* da AAPG, denominado *Classification of Carbonate Rocks*, editado por William E. Ham.

Apesar de serem extremamente populares, Dunham (1962) e Folk (1962) não foram os primeiros a classificarem rochas carbonáticas, já que segundo Domingues (2011) o primeiro a criar um esquema para carbonatos foi Grabau (1904) que tem uma das classificações mais abrangentes, porém bastante confusa e devido a isso nunca foi tão popular.

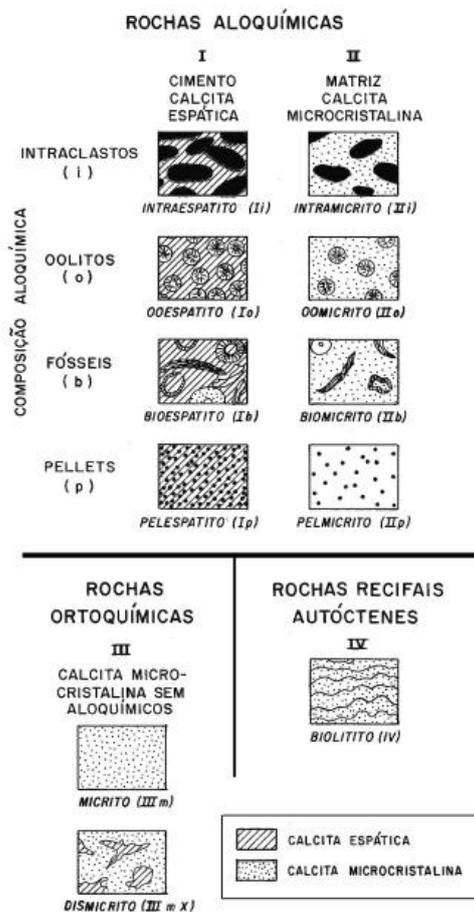
Diversas outras classificações foram propostas após as classificações de Dunham (1962) e Folk (1962), entretanto Terra *et al.* (2010) falam que todas as outras posteriormente propostas utilizaram, em maior ou menor grau, os seus fundamentos. A grande diferença entre Dunham (1962) e Folk (1962) é que enquanto as classificações de Folk (1962) são fundamentalmente composicional, a de Dunham (1962) é baseada na textura deposicional, assim como mostram as Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Classificação de rochas carbonáticas (adaptado de Dunham, 1962).

TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição				Componentes originais ligados durante a deposição	
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)			Sem matriz, grão-suportado		
Suportado pela matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos				
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Boundstone</i>	<i>Crystalline</i>
					

Fonte : Terra et al. (2010).

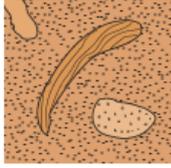
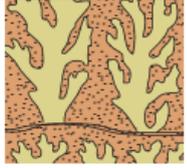
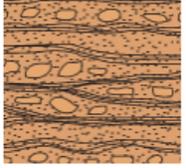
Figura 2 – Classificação de rochas carbonáticas (adaptado de Folk, 1962).



Fonte : Terra et al. (2010).

Embry e Klovan (1971) utilizaram como base as classificações de Dunham para rochas carbonáticas biogênicas criando um esquema mais elaborado que descreve diferentes formas de crescimento orgânico e os carbonatos detríticos associados, como apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Classificação de pedras calcárias de acordo com textura deposicional.

Alóctones		Autóctones		
> 10% dos grãos maiores que 2 mm		Organismos que agem como defletores	Organismos encrustados	Organismos que constroem uma estrutura rígida
Suportada pela matriz (lama)	Suportada por grãos maiores que 2 mm			
				
Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone

Fonte: Modificado de Scholle & Ulmer-Scholle (2003)

2.1.3 Propriedades das rochas carbonáticas

Segundo Oliveira (2019), as rochas carbonáticas são suscetíveis a mudanças rápidas e contínuas como a cimentação, dissolução, e recristalização, durante o processo de formação e quando submetidas a fluidos reativos esses processos afetam a porosidade e a permeabilidade do reservatório composto por determinada rocha carbonática. Compreender a densidade e porosidade das rochas carbonáticas de reservatório, por exemplo é essencial para a estimativa do potencial de hidrocarbonetos.

Segundo Vieira (2018) a porosidade primária é aquela que se desenvolveu durante a deposição do material sedimentar e a porosidade secundária é a resultante de processos geológicos que ocorreram após a conversão dos sedimentos em rochas.

Rosa et al. (2006) afirmam que a porosidade em rochas sedimentares carbonáticas é quase sempre secundária e é devida a processos de dissolução, dolomitização e fraturamento. O mais importante desses processos é a dissolução, em que a calcita ou a dolomita é lixiviada pelas águas subterrâneas, resultando cavidades com dimensões variando desde minúsculos poros até gigantescas cavernas.

A porosidade absoluta é dada pela razão entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da mesma. Já a porosidade efetiva é a relação entre os espaços vazios interconectados de uma rocha e o volume total desta. Do ponto de vista da engenharia de reservatórios esse é o valor que tem que se obter. (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006).

Outra propriedade que é analisada no estudo das rochas é a resistência mecânica da mesma, que é a capacidade que um sólido apresenta de não sofrer ruptura quando é submetido

à ação de forças externas, sendo ela dinâmica ou estática. O início do processo de ruptura de uma rocha segundo mecanismos de cisalhamento, compressão ou tração é dado por um valor absoluto de tração, chamado de tensão de ruptura (ZACARIAS, 2003).

Oliveira (2019) diz que um dos fatores principais no controle da resistência mecânica e deformabilidade é a presença de descontinuidades no maciço rochoso, pois já se sabe que a resistência de um maciço rochoso depende mais das descontinuidades presentes do que propriamente da resistência da rocha intacta.

A resistência e a deformabilidade do maciço rochoso são, em maior parte condicionadas pelo comportamento tangencial das descontinuidades do mesmo. Desta forma, torna-se, indispensável o estudo e avaliação da resistência ao cisalhamento das descontinuidades por meio de ensaios que reflitam o comportamento da rocha de acordo com as descontinuidades que ela possui e com o esforço o qual ela é submetida.

2.2 ROCHAS SINTÉTICAS

As rochas sintéticas vêm como alternativa as rochas naturais de testemunhos extraídas em campo, pois apesar de nos dar os melhores parâmetros das rochas analisadas, vem sendo por diversas vezes inviabilizadas devido aos custos operacionais na extração de plugues dos blocos naturais e também pela dificuldade no acesso aos afloramentos, logo a busca por uma fonte alternativa de amostras (rochas sintéticas) tem sido amplamente incentivada e há uma forte tendência atual sobre o tema.

No processo de fabricação de rochas sintéticas é fundamental que a rocha tenha propriedades físicas que se assemelhem às de uma rocha natural. Por esse motivo, caracterizar as propriedades físicas das amostras sintetizadas se faz importante para tornar possível a comparação entre ambas e avaliar os ensaios laboratoriais realizados.

Neste processo de fabricação das rochas carbonáticas sintéticas, muitos materiais podem ser utilizados. Vieira (2018) e Oliveira (2016) por exemplo, utilizaram areia quartzosa, halimeda e cimento para a fabricação de rochas carbonáticas como pode ser visto na Figura 4. Já no estudo de Hussein e Vanorio (2013), as amostras são criadas a partir da mistura de grãos de calcita grosseiros e muito finos em quantidades diferentes, e então, essa mistura é submetida à prensagem a frio sob pressão para se obter amostras sintéticas sólidas.

Figura 4 - Amostra de rochas sintéticas confeccionadas por Vieira (2018), contendo densidades diferentes, sendo (a) densidade média de $1,48 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ e (b) densidade média de $1,73 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$.



Fonte: Vieira (2018)

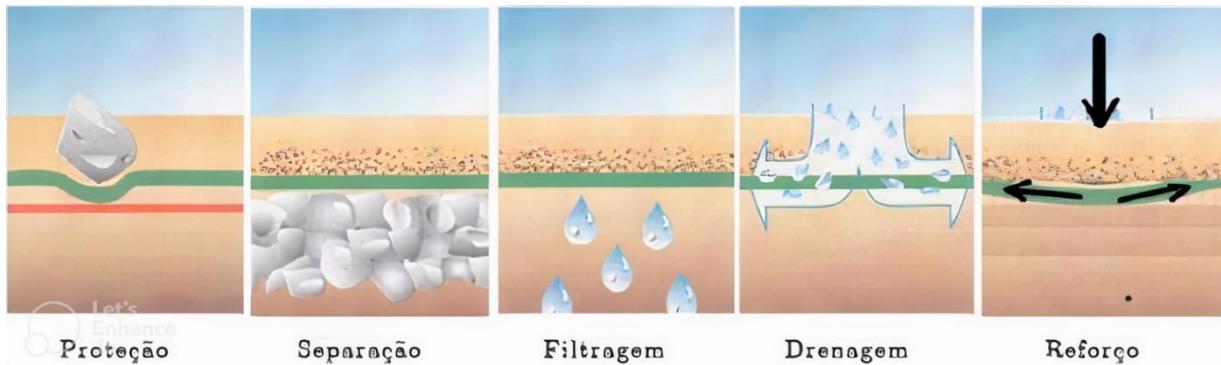
Ass'ad et al. (1992) utilizaram amostras construídas com epóxi e borracha para observar a anisotropia por onda de cisalhamento, mas essas rochas diferiram de rochas naturais. Rathore *et al.* (1995) utilizaram arenito sintético ligado por epóxi e sugeriram que várias amostras deveriam ser testadas para um estudo completo da anisotropia elástica em meios fissurados.

Niraula (2004) fabricou uma rocha sintética utilizando calcário, cimento Portland e água. E a submeteu a testes de resistência à compressão não confinada e de tração de 3 a 5 vezes para conferir repetibilidade. O calcário foi passado por peneira nº 10 (abertura de 2 mm) e as proporções dos constituintes foram variadas de modo a obter três tensões na faixa de 1 a 4 MPa, que foram valores similares aos encontrados para o seu calcário natural.

2.3 GEOSSINTÉTICOS

A utilização dos geossintéticos tem sido bastante comum nas obras de engenharia, especialmente para as obras de engenharia geotécnica, hidráulica, de transportes e ambiental, graças a sua versatilidade, facilidade nos processos de aplicação e controle de qualidade já que é normalmente fabricado conforme a necessidade de seu uso podendo desempenhar diversas funções como pode-se observar na Figura 5 (DUARTE, 2009).

Figura 5 – Funções associadas ao uso de geossintéticos



Fonte: Duarte (2009)

Os geossintéticos são produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), cujas principais propriedades são utilizadas principalmente para desempenhar a função de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, controle de fluxo (impermeabilização) e controle de erosão superficial (PALMEIRA, 2001)

Alguns estudos utilizaram geossintéticos fazendo uso de suas propriedades aplicando-as às necessidades de seus estudos, como foi o caso de Leiros (2019) que utilizou geotêxtil não tecido de gramatura igual a 250g/m² como camada filtrante para o dessecamento dos resíduos provenientes da fabricação de rochas ornamentais como pode observar-se na Figura 6. Com isso foi possível identificar que essa é uma alternativa eficiente para acelerar o processo de dessecamento dos tanques de decantação das marmorarias, gerando assim um menor impacto ambiental com a geração de resíduos.

Figura 6 – Utilização de geotêxtil não tecido como camada filtrante durante o estudo de Leiros (2019).



Fonte: Leiros (2019)

Já Antunes (2008), abordou a utilização de geotêxtil e geogrelha, conforme apresentado na Figura 7, como reforço para pavimentos rodoviários, instalando-os na interface base/subleito do pavimento a fim de melhorar a resistência mecânica e em consequência sua vida útil.

Constatando que os pavimentos reforçados apresentam um comportamento mecânico significativamente melhor que os que não continham reforço.

Figura 7 – Uso de geogrelhas para aumentar a capacidade do solo



Fonte: Diprotec (2019)

Medeiros (2019) fez uma análise da aplicação de geossintéticos no aterro sanitário de Seropédica/RJ, considerado o maior aterro sanitário da América Latina com área de mais de 2 milhões de metros quadrados. O aterro de Seropédica contém diversas tecnologias, sendo a de maior destaque na pesquisa, a tripla camada de impermeabilização feita por mantas geossintéticas.

3 MATERIAL E MÉTODO

Neste capítulo será abordada a descrição dos materiais escolhidos para a preparação das rochas. Também será descrita a metodologia de preparação das rochas carbonáticas sintéticas, desde o início da preparação de todos os materiais, até a moldagem dos corpos de prova, descrevendo cada etapa juntamente com suas normativas e cuidados necessários.

A escolha dos materiais e método utilizados estão de acordo com Santos (no prelo).

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA ROCHA SINTÉTICA

Todo material utilizado foi previamente escolhido baseado em pesquisas e levantamento bibliográfico, buscando embasamento teórico em artigos, dissertações e teses já desenvolvidas na área de rochas carbonáticas mais especificamente, reservatórios petrolíferos no qual se utilizou da pesquisa de rochas carbonáticas, sintéticas, artificiais e naturais, bem como uma busca na literatura acerca dos geossintéticos e suas propriedades.

3.1.1 Pó Análogo

Foram utilizadas rochas calcárias, que se encontram na Formação Crato, Bacia do Araripe conforme destacado na Figura 8, já que este tipo de feição para a análise de taxas tem similaridade física dos laminitos estudados com fácies de *mudstone* laminado que compõem reservatórios do intervalo pré-sal. Essas rochas tinham tamanhos variados e algumas delas precisaram ser quebradas com a marreta afim de que fosse possível passar pelo britador de mandíbulas como se pode observar na Figura 9.

Figura 8 - Mapa da Bacia do Araripe com destaque para a área onde foi retirado o material para confecção da rocha sintética (retângulo vermelho).



Fonte: Modificado de Fabin et al (2017)

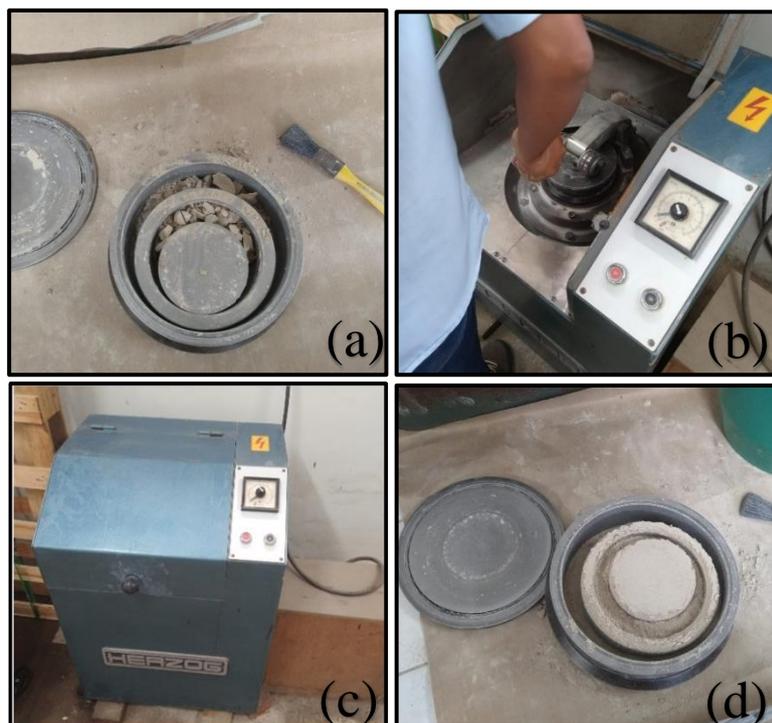
Figura 9 – Operação do britador de mandíbulas



Fonte: O Autor (2022)

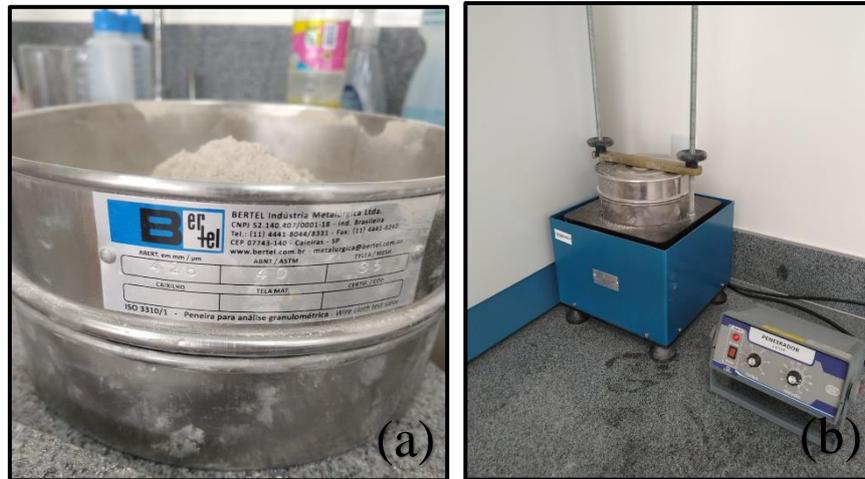
Este material com menor granulometria foi levado para um moinho de discos como apresentado na Figura 10, o qual foi ajustado para um tempo de 40 segundos com objetivo de se obter um material mais fino. Após a moagem os componentes do agregado seguiram para o peneiramento em uma série de peneiras com um agitador que contém um relógio marcador de tempo e variador de velocidade conforme apresentado na Figura 11, a fim de se obter o material passante na peneira de N°40 (abertura 0,42 mm), para a obtenção do pó análogo.

Figura 10 – Processo de trituração da rocha: a) Célula com o material antes do processo; b) Preparação do equipamento; c) Moinho de discos; d) Amostra após o processo de trituração.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 11 – Processo de peneiramento: a) Colocação do material na peneira; b) Série de peneiras no agitador



Fonte: O Autor (2022)

3.1.2 Resina Epóxi

Utilizou-se como aglutinante uma resina 2001 epóxi transparente à base de bisfenol-a epicloridrina com endurecedor 3154 álcool benzílico ambos fabricados pela Redelease conforme apresentado na Figura 12. Este sistema epoxídico é indicado para ser utilizado em formulações isentas de solventes e que necessitem de boa retenção de cores. A resina foi utilizada como aglutinante do material da rocha sintética com a finalidade de alcançar boa resistência mecânica.

Figura 12 - Aglomerante polimérico formado por dois materiais: a) Resina epóxi; b) Endurecedor epóxi.



Fonte: O Autor (2022)

3.1.3 Geotêxtil

O geossintético utilizado neste trabalho foi o geotêxtil não tecido industrial devido a sua função de separação, filtração e drenagem no intuito de fazer uma linha de fluxo, simulando uma fratura na rocha. O geotêxtil tem gramatura de 105g/m², 0,7mm de espessura e foi cortado em pequenas tiras com dimensões de 20mm por 5mm, como pode se observar na Figura 13, e distribuídos ao longo das amostras.

Figura 13 – Geotêxtil utilizado nas amostras



Fonte: O Autor (2022)

3.2 FABRICAÇÃO DA ROCHA SINTÉTICA

Para este estudo foram utilizadas duas proporções de materiais, baseado no estudo de Santos (no prelo), a primeira com 85% de pó análogo e 15% de resina epóxi e a segunda com 90% de pó análogo e 10% de resina epóxi, dentro das amostras com 90% de pó análogo e 10% de resina epóxi utilizou-se em algumas amostras faixas de geossintético com intuito de verificar as propriedades mecânicas dessas rochas sintéticas.

As amostras contendo a primeira proporção foram nomenclaturadas com o pré-fixo AM1 (amostras na primeira proporção), já as amostras onde utilizou-se a segunda proporção foram divididas em três grupos, sendo o primeiro sem a presença de geossintético as quais foram nomenclaturadas com o pré-fixo AM2 (amostras na segunda proporção sem geossintético), o segundo grupo de amostras continham 1 faixa de geossintético e foram nomenclaturadas com o pré-fixo AM2F (amostras na segunda proporção com 1 faixa de geossintético) e por fim o terceiro grupo continham 2 faixas de geossintético e foram nomenclaturadas com o pré-fixo AM2F2 (amostras na segunda proporção com 2 faixas de geossintético)

Os componentes utilizados para confecção das amostras foram: pó análogo de concreções calcárias e resina epóxi composta de uma mistura de resina e endurecedor, onde foram moldados inicialmente 8 corpos de prova como mostra a Tabela 2, em uma proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina epóxi, que correspondem respectivamente a 196,6g e 34,8g aproximadamente;

Tabela 2 – Dados das amostras com a proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina epóxi.

Nº Amostra	Massa (g)	Altura (cm)	Diâmetro			
			D 1 (mm)	D 2 (mm)	D 3 (mm)	Dméd (mm)
AM1-01	224,70	7,95	40,08	40,09	40,10	40,09
AM1-02	224,30	7,92	40,12	40,07	40,14	40,11
AM1-03	224,10	7,93	40,13	40,14	40,14	40,14
AM1-04	225,50	7,94	40,01	40,07	40,04	40,04
AM1-05	224,70	7,94	39,97	40,00	40,02	40,00
AM1-06	223,00	7,82	40,01	40,09	40,06	40,05
AM1-07	225,50	7,87	39,97	39,98	40,07	40,01
AM1-08	224,00	7,94	39,85	40,06	40,02	39,98

Fonte: O Autor (2022)

No segundo conjunto de amostras, utilizou-se uma proporção contendo 194,6g de pó análogo e 21,8g de resina epóxi e foram moldados mais 9 corpos de prova conforme pode-se observar na Tabela 3, sendo 3 sem a presença do geotêxtil, 3 com apenas uma fratura de geotêxtil e 3 com 2 fraturas de geotêxtil.

Tabela 3 – Dados das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina epóxi.

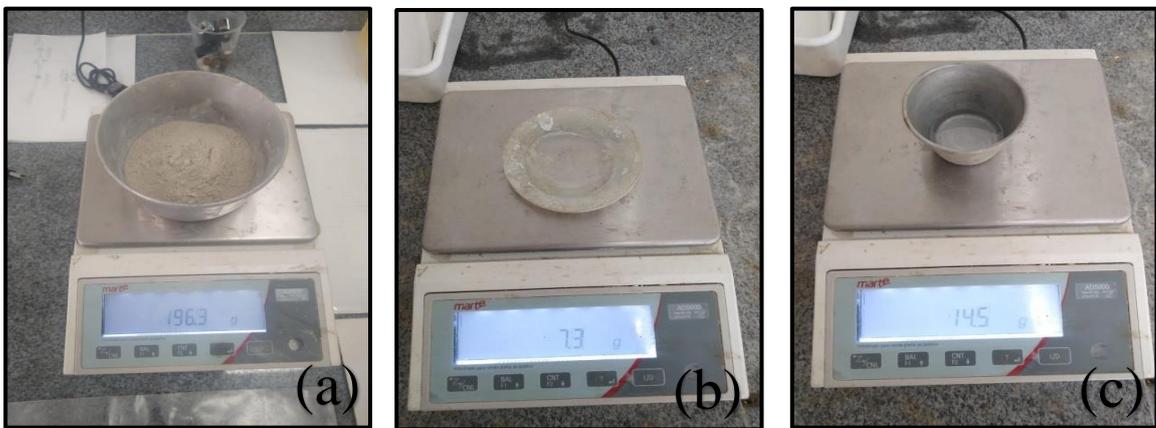
Amostras sem fratura						
Nº Amostra	Massa (g)	Altura (cm)	Diâmetro			
			D 1 (mm)	D 2 (mm)	D 3 (mm)	Dméd (mm)
AM2-01	213,90	7,98	40,08	40,12	40,13	40,11
AM2-02	214,4	8,005	40,12	40,09	40,06	40,09
AM2-03	214,30	7,99	40,10	40,13	40,07	40,10
Amostras com uma fratura						
Nº Amostra	Massa (g)	Altura (cm)	Diâmetro			
			D 1 (mm)	D 2 (mm)	D 3 (mm)	Dméd (mm)
AM2F-01	212,90	7,986	40,14	40,09	40,05	40,09
AM2F-02	214,2	8,000	40,13	40,07	40,14	40,11
AM2F-03	213,40	7,936	40,05	40,15	40,06	40,09
Amostras com duas fraturas						
Nº Amostra	Massa (g)	Altura (cm)	Diâmetro			
			D 1 (mm)	D 2 (mm)	D 3 (mm)	Dméd (mm)
AM2F2-01	214,00	7,979	40,12	40,12	40,05	40,10
AM2F2-02	214	7,969	40,1	40,1	40,07	40,09
AM2F2-03	213,90	7,979	40,08	40,09	40,06	40,08

Fonte: O Autor (2022)

O pó análogo, a resina e o curador foram separados em suas devidas proporções e pesados em uma balança semi-analítica com precisão de 0,1g, conforme mostrado na Figura

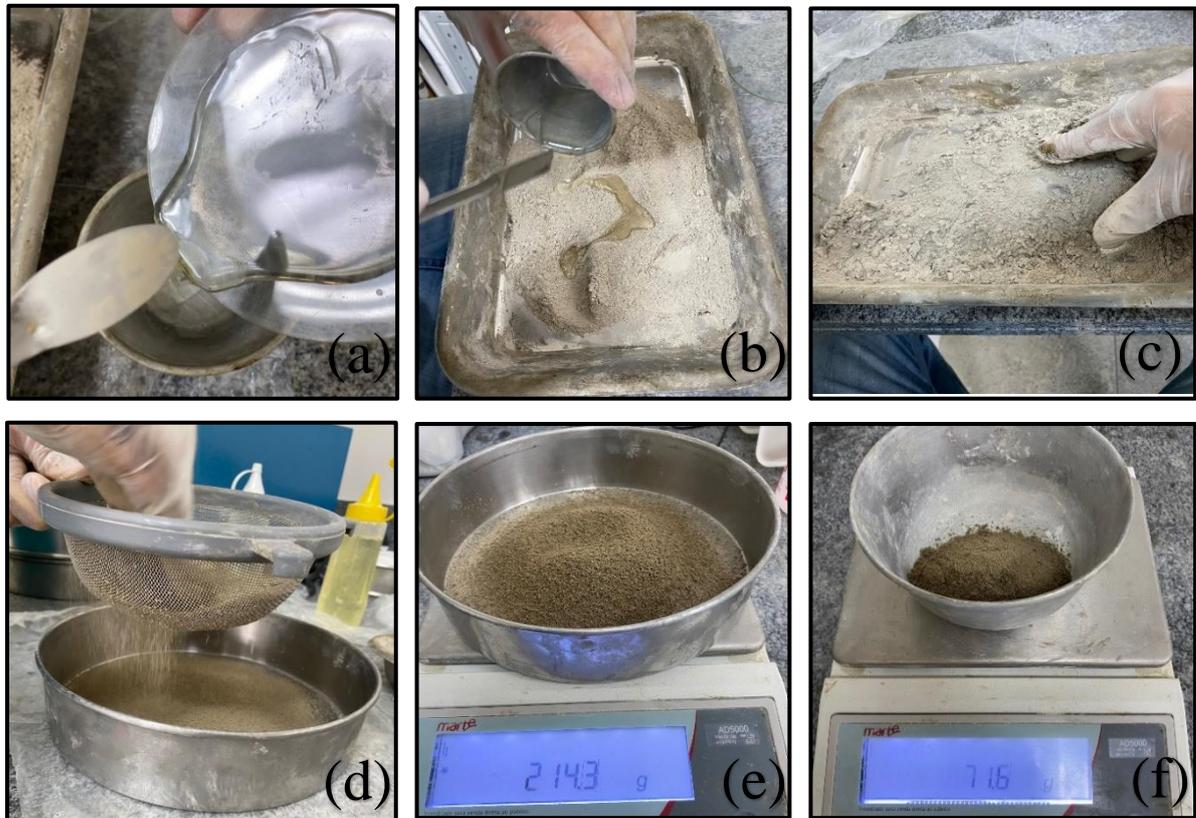
14, logo após a pesagem dos componentes foi realizada a mistura da resina com o curador. Posteriormente em um novo recipiente foi feita a homogeneização do pó análogo com a resina epóxi resultando em um material mais grosso que foi passado em uma peneira convencional para evitar a formação de possíveis grumos de materiais e para torná-lo o mais uniforme possível. A mistura resultante foi separada em partes, sendo colocado 1/3 da mistura na primeira camada e 2/3 na segunda camada, nas amostra onde haviam apenas uma fratura de geotêxtil ou nenhuma, para as amostras que continham 2 fraturas de geotêxtil a mistura era separada em 3 partes iguais. A Figura 15 ilustra todo o procedimento utilizado e descrito.

Figura 14 – Pesagem dos materiais utilizados na amostra: a) Pó análogo; b) Curador; c) Resina epóxi.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 15 – Preparação do material utilizado para fabricação das amostras: a) Mistura da resina com o curador; b) Mistura da resina epóxi com o pó análogo; c) Homogeneização do material; d) Peneiramento da amostra homogeneizada; e) Pesagem do material total para preparação de uma amostra; f) Pesagem de 1/3 do material para primeira parte da amostra.



Fonte: O Autor (2022)

Após a separação das porções, o molde que consiste em uma célula de aço inox composta por um cilindro de 40 mm de diâmetro, 164,3mm de altura aproximadamente e com volume de 206,47cm³ foi preparada, aplicando-se vaselina nas suas paredes internas, como pode-se ver no item (a) da Figura 16, afim de facilitar o processo de desmolde das amostras. O material das amostras foi então inserido no molde já preparado com a vaselina.

Nas amostras sem geotêxtil colocou-se com o apoio de um funil 1/3 do material dentro do molde, sendo esta primeira parte golpeada por 30 vezes com uma espátula para melhor acomodação do material, após isso colocou-se o restante do material (2/3).

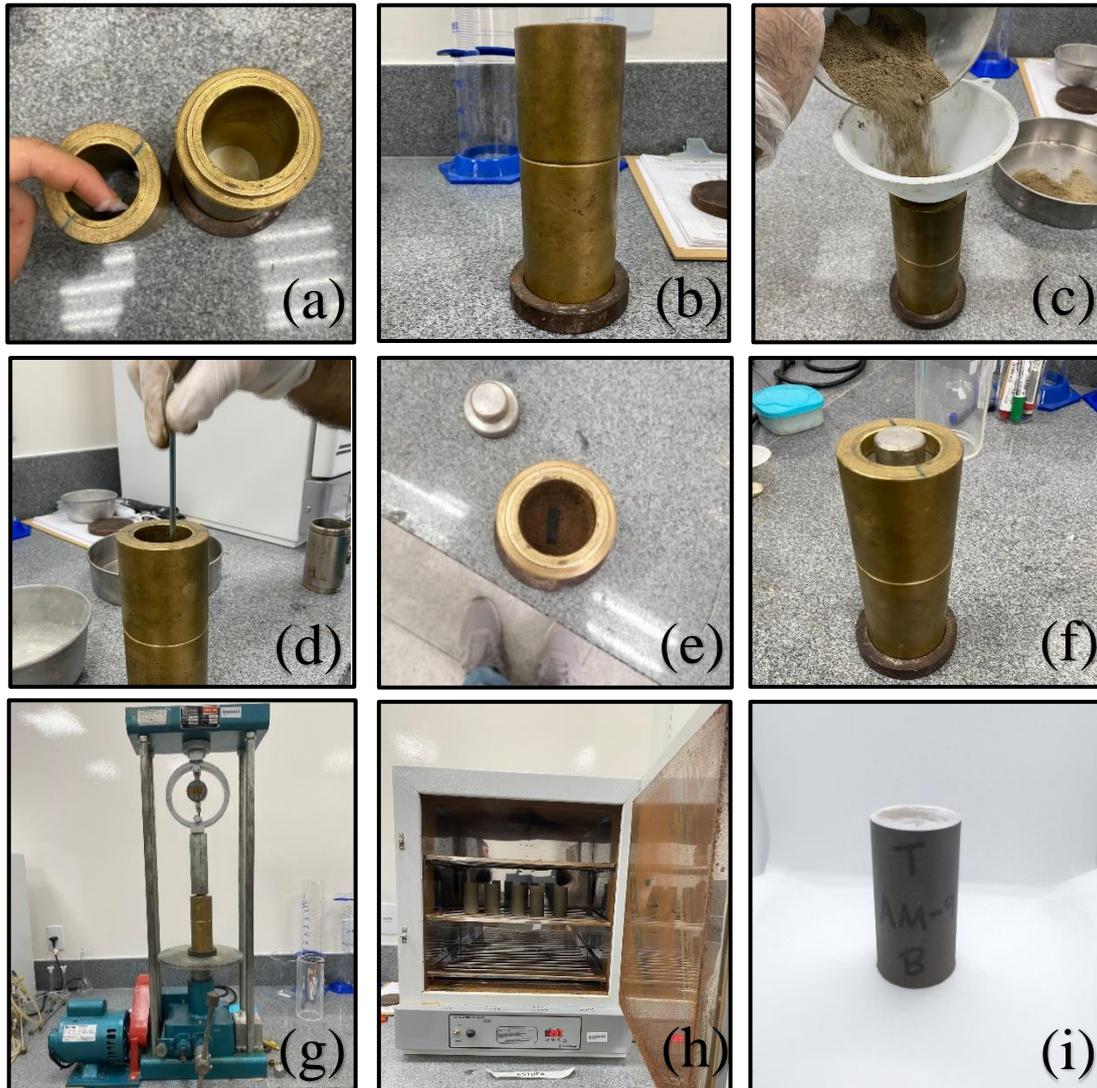
Nas amostras que continham uma fratura de geotêxtil foi colocado novamente com o apoio de um funil 1/3 do material, sendo esta primeira parte golpeada por 30 vezes com uma espátula para melhor acomodação, como pode ser verificado no item (d) da Figura 16, e depois foi posicionado o geotêxtil no eixo do cilindro conforme apresentado no item (e) da Figura 16, colocando-se então o restante do material (2/3)

Nas amostras que continham duas seções de geotêxtil, colocou-se 1/3 do material com o auxílio de um funil, sendo a primeira parte golpeada por 30 vezes com uma espátula para acomodação do material, em seguida colocou-se a primeira faixa de geotêxtil e mais 1/3 do material foi colocado no molde, por fim colocou-se a segunda faixa de geotêxtil e completou-se o preenchimento do molde com o material restante (1/3).

Após a total colocação do material no molde, este molde foi levado para a prensa mecânica, conforme ilustrado no item (g) da Figura 16, para passar por uma compactação estática onde foi aplicada uma força de compactação com velocidade constante. Quando a tensão de aplicação atingiu 20 MPa deixou-se a amostra submetida a esta força por 10 minutos, ao fim dos 10 minutos retirou-se o molde da prensa, obtendo-se as amostras de rochas sintéticas. Para finalizar, as amostras foram levadas a estufa por 24h a uma temperatura de 60°C como se pode ver no item (h) da Figura 16.

A massa das amostras após retirada da estufa foi de aproximadamente 224g, com dimensões de 4 cm de diâmetro e 8 cm de altura, aproximadamente.

Figura 16 - Preparação do molde para receber a amostra: a) Aplicação de vaselina no molde; b) Molde pronto para receber a amostra; c) Colocação do material dentro do molde; d) Acomodação do material com o auxílio de uma espátula; e) Colocação do geotêxtil a altura de 1/3 da amostra; f) Fechamento do molde após colocação do restante do material; g) Colocação do molde na prensa mecânica; h) Amostras posicionadas na estufa; i) Amostra pronta após 24h na estufa.



Fonte: O Autor (2022)

3.3 ANÁLISE MECÂNICA DA ROCHA

A caracterização mecânica da rocha carbonática foi realizada através de um único ensaio, o ensaio de compressão simples, com a finalidade de obter a resistência à compressão simples, usualmente chamada de UCS (Uniaxial Compressive Strength). Este tópico descreve o ensaio que foi realizado e todas as informações necessárias que utiliza-se para executá-lo.

3.3.1 Ensaio de Compressão Simples

Neste ensaio, as amostras foram submetidas a uma tensão vertical (σ_1) crescente, sem tensão confinante ($\sigma_3 = 0$), distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal das amostras até a sua ruptura. O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos descritos pela norma ASTM D2938-95 (2002). As amostras ensaiadas eram cilíndricas com e sem fraturas de dimensões de 8 x 4 cm aproximadamente, que foram moldadas respeitando-se a razão altura:diâmetro mínima recomendada de 2:1. A Figura 17 mostra uma prensa hidráulica de compressão servocontrolada de capacidade de 1000 kN, com um sistema controlado por um motor que sobe uma plataforma à velocidade controlada de 0,122 mm/min, onde os ensaios foram realizados.

A amostra fica posicionada entre a plataforma localizada na base da prensa e um pistão ligado à célula de carga. À medida que a plataforma sobe a amostra vai sendo comprimida pela célula de carga até ocorrer a ruptura. A força é medida através de uma célula de carga, onde os resultados são visualizados em um painel eletrônico e registra-se as medidas de deslocamentos axial e radial das amostras através de instrumentação, utilizando-se dois extensômetros para medir o deslocamento radial e outro acoplado à base da prensa para medir o deslocamento axial.

Figura 17 – Sistema utilizado no processo de compressão contendo a prensa hidráulica, extensômetros e a amostra.



Fonte: O Autor (2022)

Com os dados de carregamento máximo aplicado e da área da seção transversal da amostra é possível determinar a resistência à compressão simples máxima da amostra através da Equação 01.

$$UCS = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Em que:

UCS (MPa) = Resistência à compressão simples;

F (kN) = Força máxima aplicada;

A (cm²) = Área da seção transversal calculada através do diâmetro médio.

Correlacionando as dimensões da amostra com os dados de sua deformação axial e radial, determina-se o Coeficiente de Poisson (ν) da rocha, através da Equação 02:

$$\nu = -\frac{\Delta e / e_0}{\Delta l / l_0} \quad (2)$$

Em que:

ν = Coeficiente de Poisson;

Δe (mm) = Variação de dimensão transversal (deslocamento radial total);

e_0 (mm) = Dimensão transversal inicial (diâmetro inicial);

Δl (mm) = Variação de deslocamento longitudinal (deslocamento longitudinal total);

l_0 (mm) = Dimensão longitudinal inicial (altura inicial).

A partir das curvas do comportamento tensão *versus* deformação, é possível determinar o Módulo de Elasticidade médio (E), conforme ilustrado na Figura 18, correspondente ao trecho elástico da curva (igual à declividade da reta secante entre a origem e ponto onde a deformação passa a ser plástica), de acordo com a Equação 03:

$$E = \frac{\sigma_{axial}}{\varepsilon} \quad (3)$$

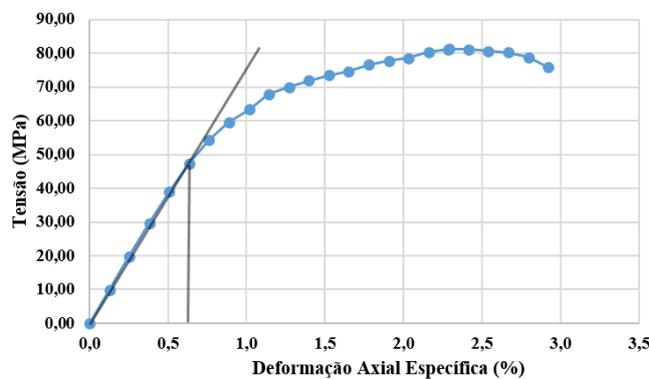
Em que:

E (Pa) = Módulo de Elasticidade;

σ_{axial} (Pa) = Tensão axial aplicada;

ε = Deformação axial sofrida pela amostra.

Figura 18 – Método utilizado para obtenção do módulo de elasticidade a partir do trecho elástico.



Fonte: O Autor (2022)

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Através dos ensaios foram levantados resultados de resistência e estes foram comparados entre rochas de mesma proporção e proporções diferentes.

4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

Neste tópico serão dispostos os valores obtidos de UCS, Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson para todas as amostras ensaiadas.

4.1.1 Amostras com proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina

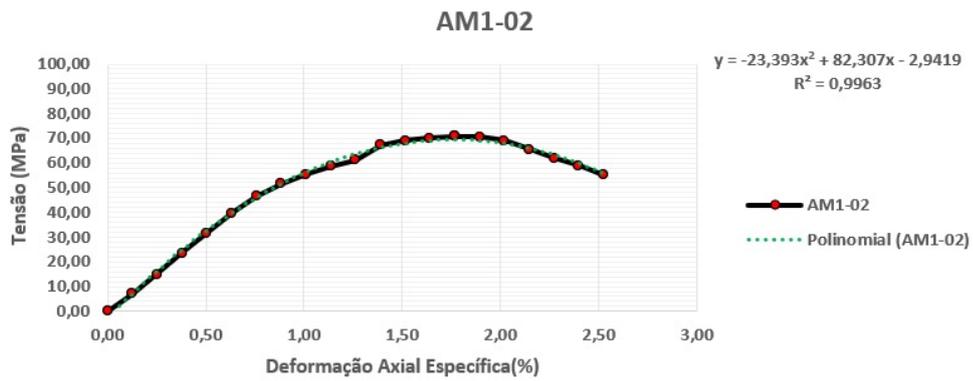
Após os ensaios das amostras com a proporção inicialmente utilizada constatou-se que estas apresentaram uma boa resistência a compressão tendo suas tensões máximas de ruptura entre 70,91 e 86,92 MPa, valores que estão acima do valor máximo médio de ruptura das amostras encontrado por Ramos (2020), que utilizou rochas carbonáticas retiradas da Formação Crato, com valor médio encontrado de 56,34 MPa. Esta primeira proporção apresentou módulos de elasticidade maiores que 6,62 GPa e um coeficiente de Poisson entre 0,28 e 0,42. A Tabela 4 apresenta o resumo dos resultados obtidos com as amostras com a proporção se de 85% de pó análogo e 15% de resina.

Tabela 4 - Resultados das amostras com a proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina.

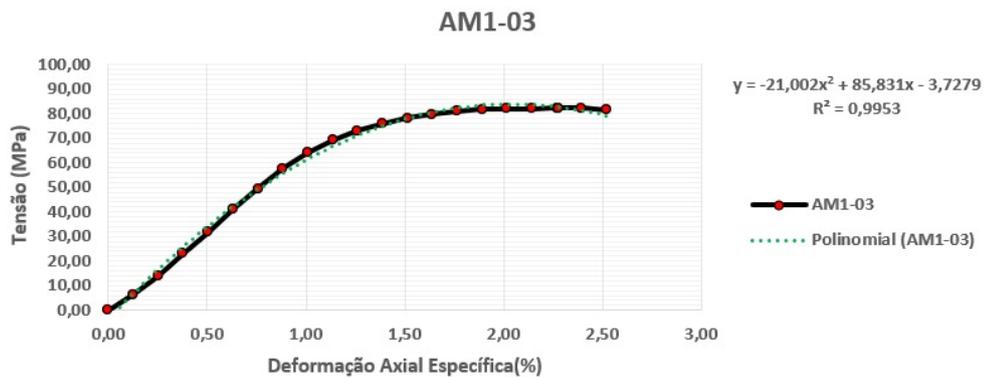
	AM1-01	AM1-02	AM1-03	AM1-04	AM1-05	AM1-06	AM1-07	AM1-08
Força Máxima (kN)	95,38	89,6	104,27	109,45	100,2	106,42	102,13	92,13
Tensão Máxima (MPa)	75,56	70,91	82,41	86,92	79,75	84,46	81,25	73,40
Módulo de Elasticidade (GPa)	6,62	6,66	7,19	7,84	7,24	7,79	7,54	7,34
Coeficiente de Poisson (ν)	0,32	0,28	0,34	0,29	0,34	0,35	0,42	0,37

Fonte: O Autor (2022)

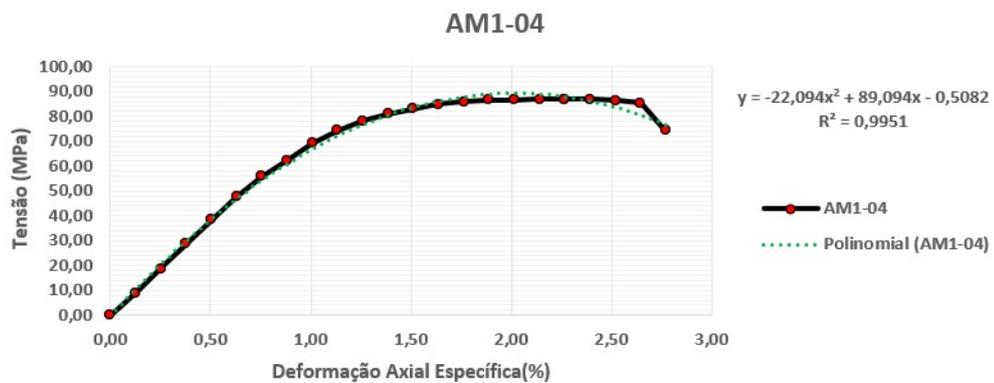
As Figuras de 19 a 26 mostram a curva tensão x deformação axial para cada amostra ensaiada de proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina. Verifica-se que as curvas apresentam deformações aproximadamente de 2% antes de chegar a ruptura, indicando rochas com comportamento dúctil. Esse comportamento pode ser devido ao procedimento de preparação da amostra.

Figura 19 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM1-02.

Fonte: O Autor (2022)

Figura 20 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM1-03.

Fonte: O Autor (2022)

Figura 21 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM1-04.

Fonte: O Autor (2022)

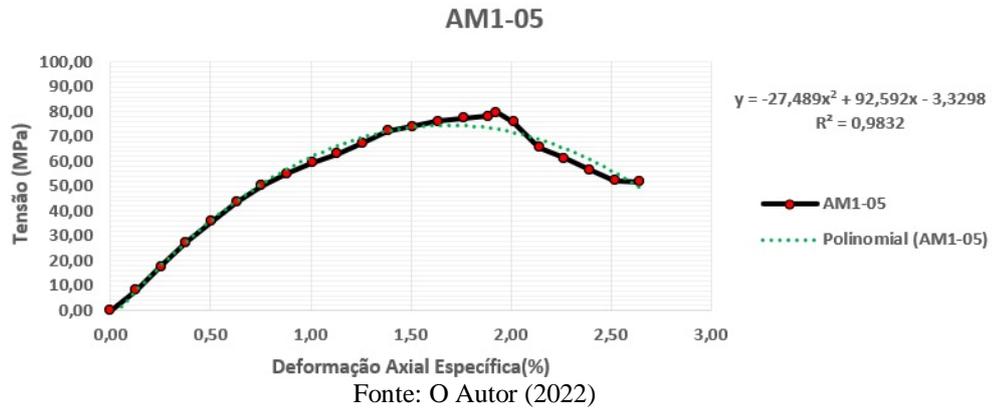
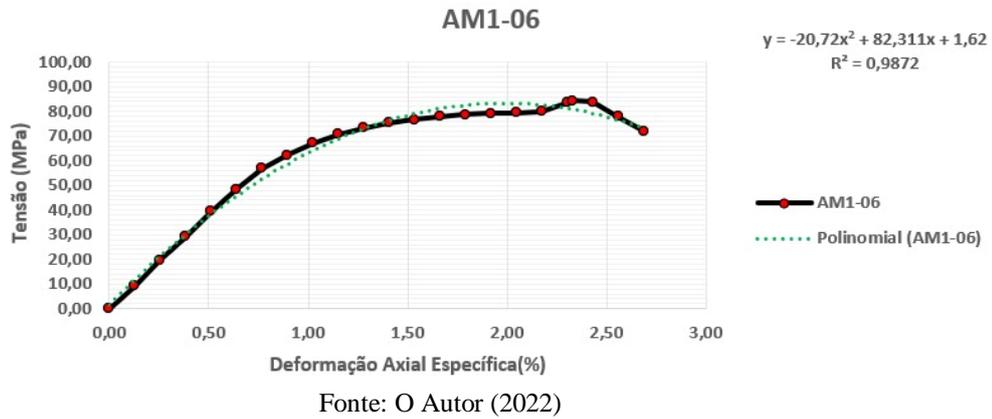
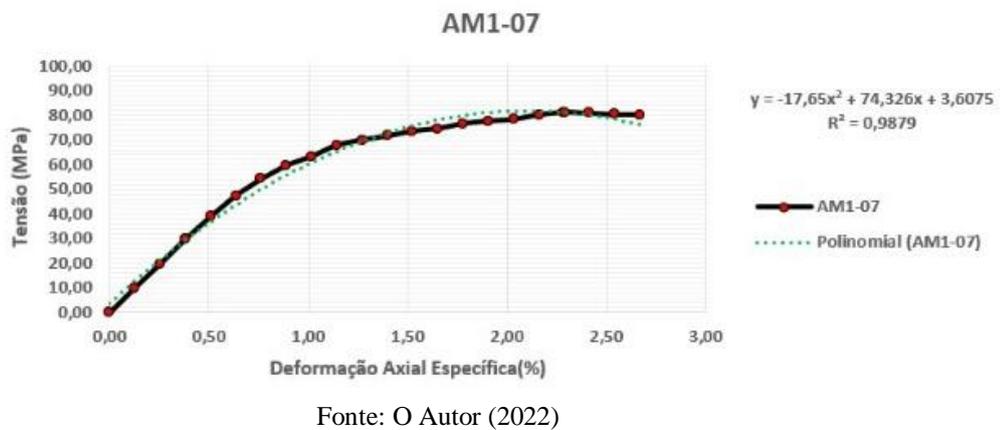
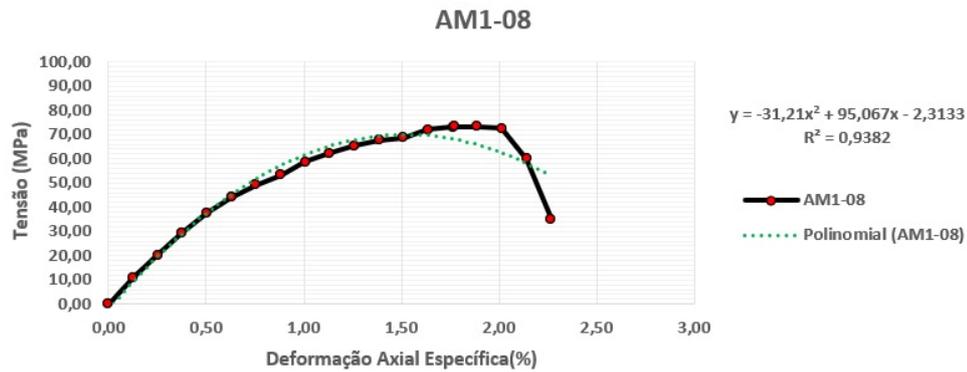
Figura 22 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM1-05.Figura 23 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM1-06.Figura 24 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM1-07.

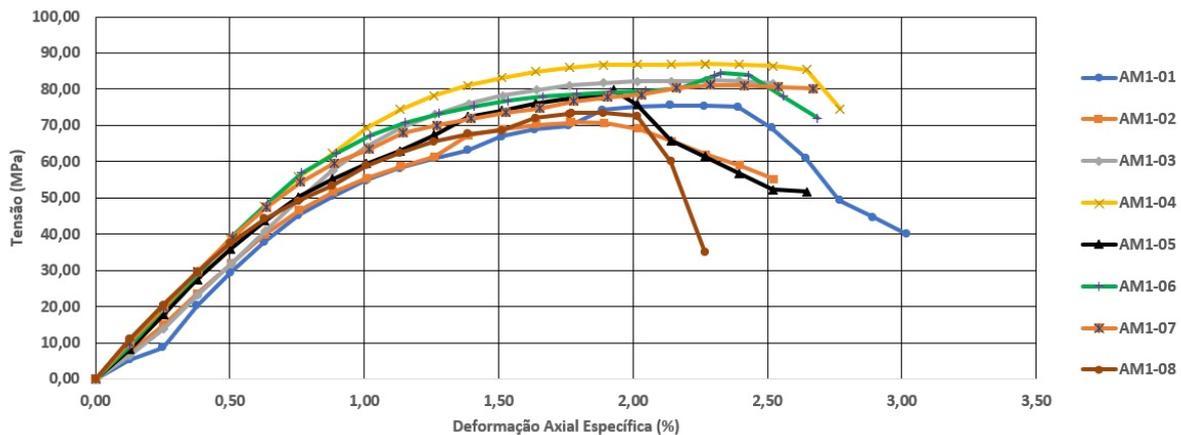
Figura 25 - Curva tensão versus deformação da amostra AM1-08.



Fonte: O Autor (2022)

A Figura 27 mostra a curva tensão x deformação axial para todas as amostras ensaiadas de proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina. Pode-se perceber que todas as amostras tiveram comportamento semelhante, o que comprova que houve um padrão na fabricação das amostras bem como nos ensaios das mesmas, tornando-as assim representativas, mais especificamente na sua parte elástica.

Figura 26 – Curva tensão versus deformação para as amostras com proporção 85% de pó análogo e 15% de resina.



Fonte: O Autor (2022)

4.1.2 Amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina sem geotêxtil

Para o outro conjunto de amostras com a proporção de 90% de pó de análogo e 10% de resina sem geotêxtil foi observado que apresentam também boa resistência a compressão tendo suas tensões máximas de ruptura sempre acima de 47,51 MPa, variando entre 47,51 e 50,80 MPa, apresentando módulo de elasticidade maiores que 6,45 GPa e um coeficiente de Poisson entre 0,25 e 0,50. A Tabela 5 mostra os resultados com as amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina sem geotêxtil. Pode-se observar nessa tabela que não há grandes variações do módulo de elasticidade.

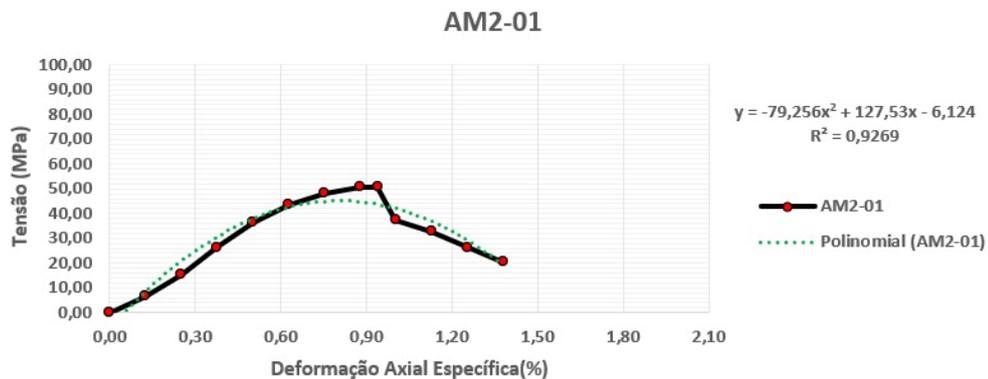
Tabela 5 - Resultados das amostras com a proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina sem geotêxtil.

	AM2-01	AM2-02	AM2-03
Força Máxima (kN)	64,19	61,64	60,00
Tensão Máxima (MPa)	50,80	48,83	47,51
Módulo de Elasticidade (GPa)	6,93	6,45	6,81
Coefficiente de Poisson (ν)	0,25	0,47	0,50

Fonte: O Autor (2022)

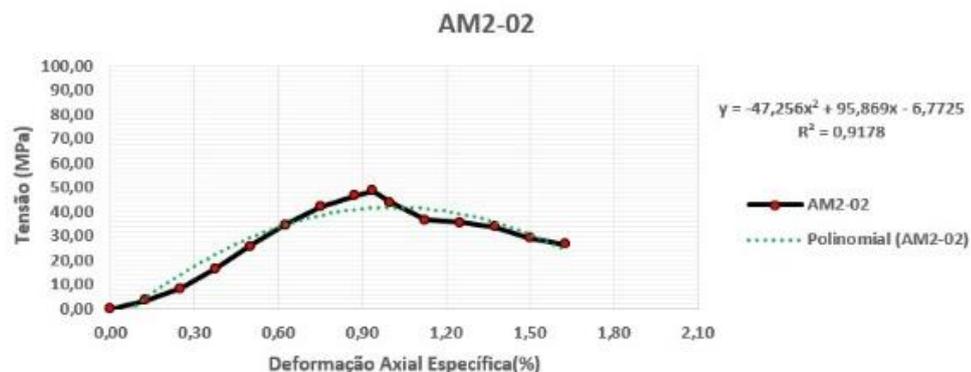
As Figuras de 28 a 30 apresentam a curva tensão x deformação axial para as amostras ensaiadas de proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e sem geotêxtil. Nestes resultados, as deformações alcançadas são em torno de 1%, aproximadamente, antes da ruptura. Indicando um comportamento mais frágil que as amostras com proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina. Por outro lado, a tensão máxima de ruptura das amostras com 90% de pó análogo e 10% de resina foram de 50MPa, aproximadamente. Sendo este valor menor do que as tensões máximas alcançadas com as amostras com 85% de pó análogo e 15% de resina, que foram de 82MPa, aproximadamente. Mostrando o efeito do aglutinante do epóxi que faz com que se tenha um aumento na tensão máxima de ruptura das amostras.

Figura 27 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2-01.

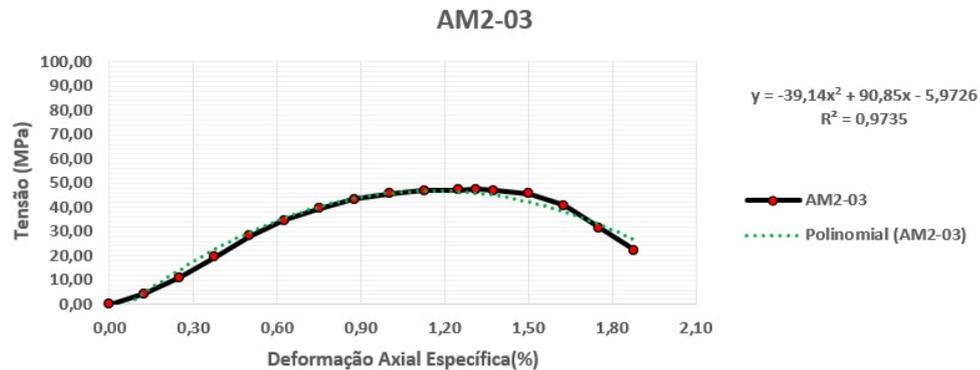


Fonte: O Autor (2022).

Figura 28 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2-02.



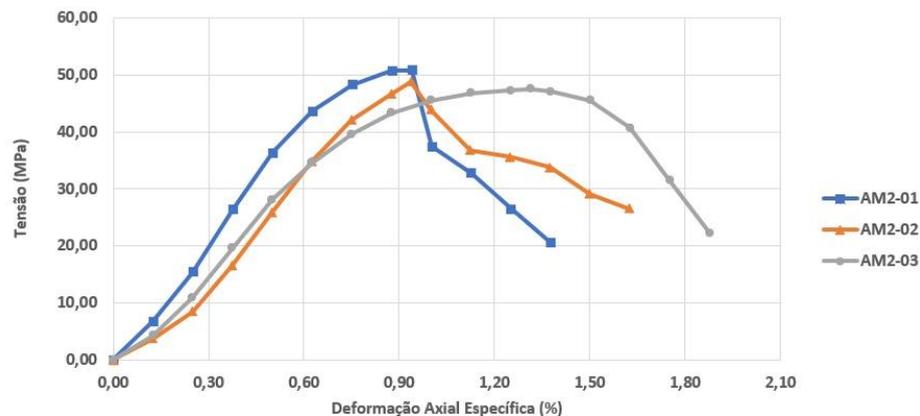
Fonte: O Autor (2022).

Figura 29 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2-03.

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 31 mostra a curva tensão x deformação axial para todas as amostra ensaiada de proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina sem geossintéticos. Percebe-se novamente que todas as amostras tiveram comportamento semelhante até a ruptura, o que nos mostra mais uma vez que houve um padrão na fabricação das amostras bem como nos ensaios das mesmas, tornando-as assim representativas.

Figura 30 – Curva tensão versus deformação das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e sem geotêxtil.



Fonte: O Autor (2022)

4.1.3 Amostras com proporção de 90% pó análogo e 10% de resina com 1 faixa de geotêxtil

Observa-se na Tabela 6 os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras com proporção com 90% de pó análogo e 10% de resina e com 1 faixa de geotêxtil. As amostras apresentam boa resistência a compressão tendo suas tensões máximas de ruptura entre 50,34 e 55,34 MPa, valor muito próximo ao encontrado por Ramos (2020),

de 56,34 MPa. As amostras apresentaram também módulos de elasticidade maiores que 6,56 GPa e um coeficiente de Poisson entre 0,28 e 0,48.

Tabela 6 - Resultados das amostras com a proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 1 tira de geotêxtil.

	AM2F-01	AM2F-02	AM2F-03
Força Máxima (kN)	63,57	68,58	69,85
Tensão Máxima (MPa)	50,34	54,27	55,34
Módulo de Elasticidade (GPa)	6,56	6,69	7,04
Coefficiente de Poisson (ν)	0,28	0,48	0,42

Fonte: O Autor (2022)

As Figuras de 32 a 34 mostram a curva tensão x deformação axial para as amostras ensaiadas de proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 1 faixa de geotêxtil. Nas Figuras 30 e 31, observa-se que as deformações alcançadas são em torno de aproximadamente 1%, antes da ruptura. Da mesma maneira como foi constatado nas análises anteriores sem geotêxtil.

Figura 31 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2F-01.

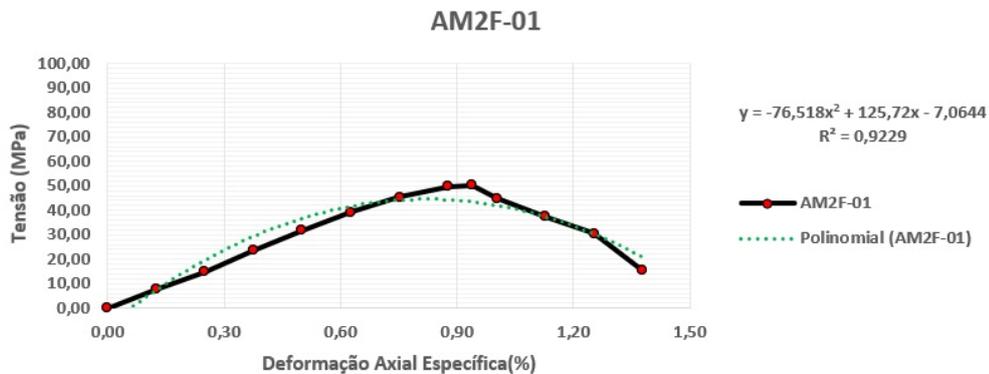
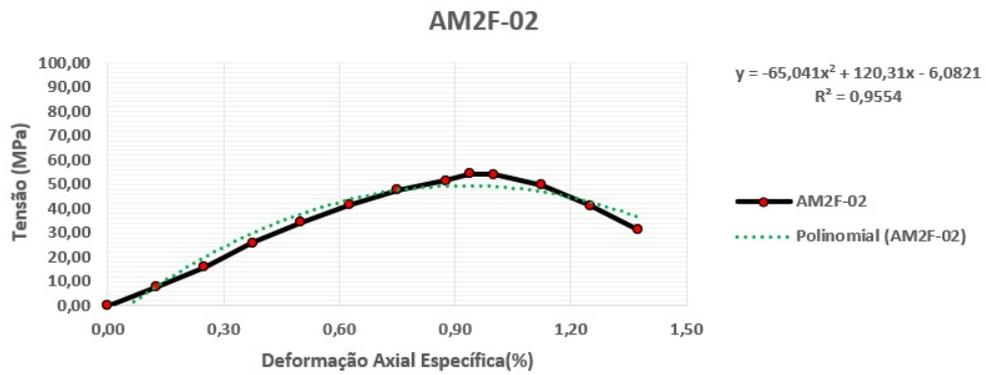
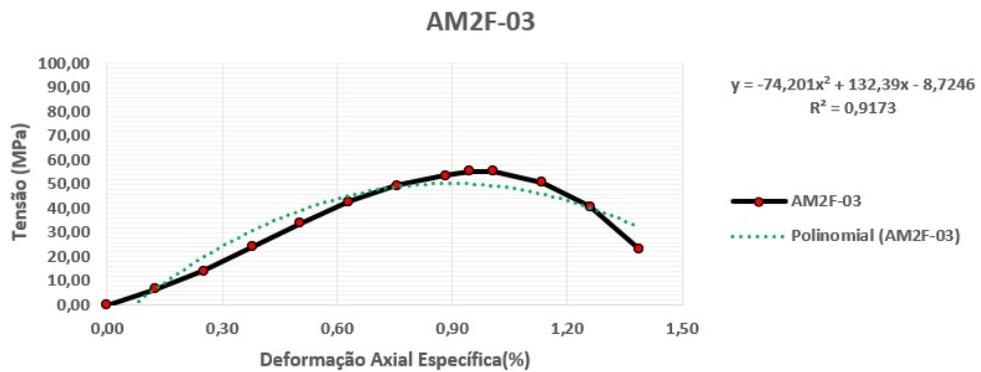


Figura 32 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2F-02.



Fonte: O Autor (2022)

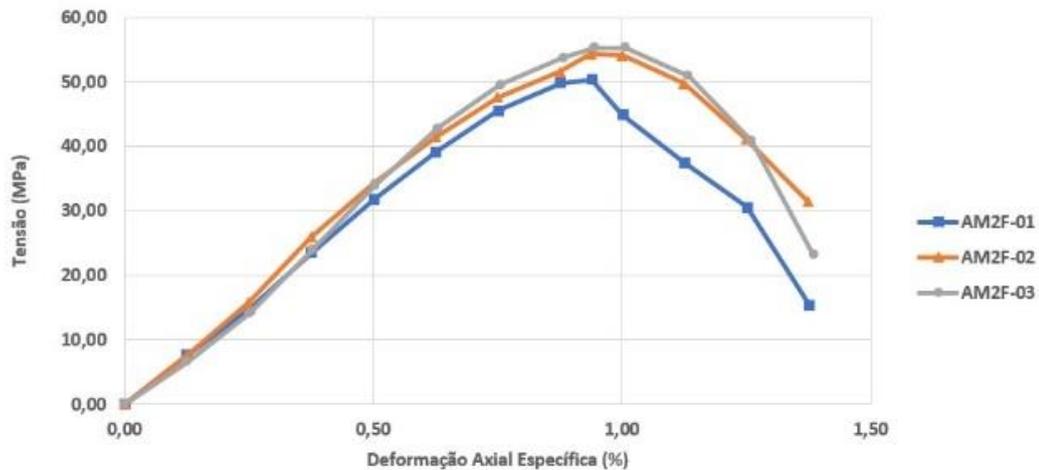
Figura 33 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2F-03.



Fonte: O Autor (2022)

A Figura 35 mostra a curva tensão x deformação axial para todas as amostras ensaiadas de proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 1 faixa de geossintético. Percebe-se novamente que todas as amostras tiveram comportamento semelhante até a ruptura, o que nos mostra mais uma vez que houve um padrão na fabricação das amostras bem como nos ensaios das mesmas, tornando-as assim representativas.

Figura 34 - Curva tensão versus deformação das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e 1 faixa de geotêxtil.



Fonte: O Autor (2022)

4.1.4 Amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 faixas de geotêxtil

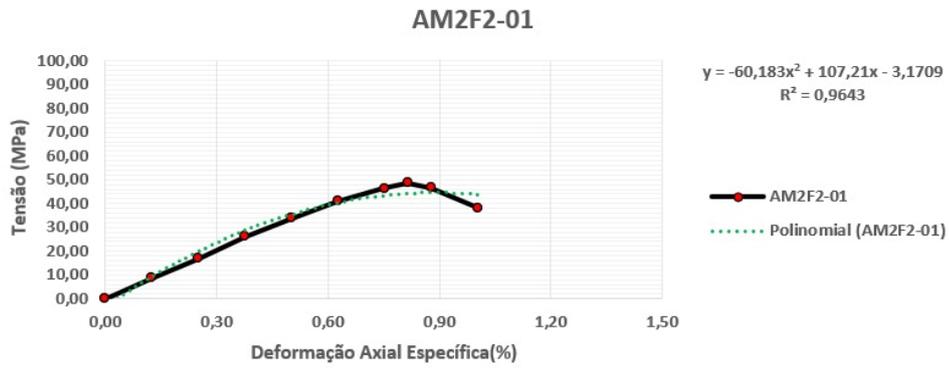
As amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 faixas de geotêxtil apresentaram tensões máximas de ruptura sempre acima de 48,16 MPa, apresentando módulos de elasticidade maiores que 5,62 GPa e um coeficiente de Poisson entre 0,34 e 0,51.

Tabela 7 – Resultados das amostras com a proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 tiras de geotêxtil.

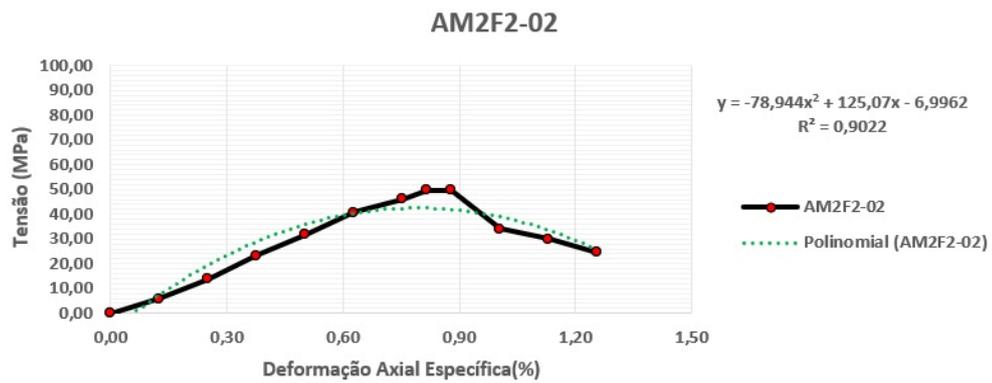
	AM2F2-01	AM2F2-02	AM2F2-03
Força Máxima (kN)	61,46	62,77	60,75
Tensão Máxima (MPa)	48,67	49,73	48,16
Módulo de Elasticidade (GPa)	6,15	6,65	5,62
Coefficiente de Poisson (ν)	0,39	0,34	0,51

Fonte: O Autor (2022)

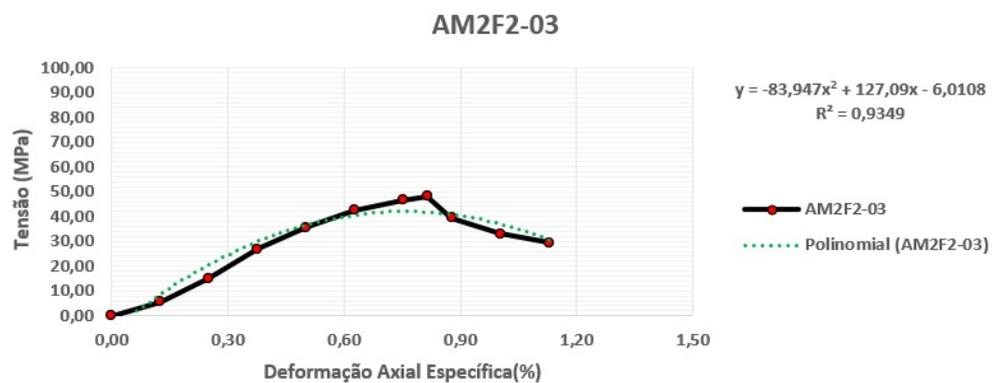
As Figuras de 36 a 38 mostram a curva tensão x deformação axial para as amostras ensaiadas de proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 faixas de geotêxtil. Observa-se que as deformações alcançadas são em torno de aproximadamente 0,8%, antes da ruptura.

Figura 35 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2F2-01.

Fonte: O Autor (2022)

Figura 36 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2F2-02.

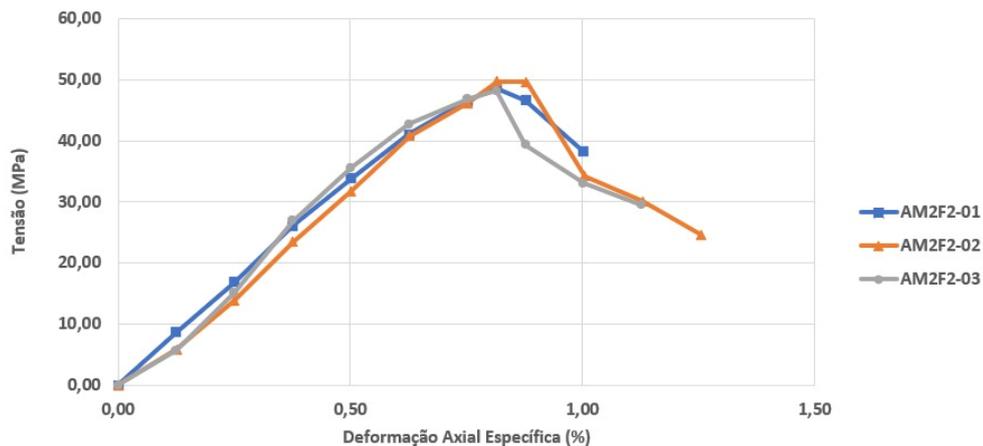
Fonte: O Autor (2022)

Figura 37 - Curva tensão *versus* deformação da amostra AM2F2-03.

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 39 mostra a curva tensão x deformação axial para todas as amostras ensaiadas de proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina com 2 faixas de geossintético. Percebe-se novamente que todas as amostras tiveram comportamento semelhante até a ruptura, o que nos mostra mais uma vez que houve um padrão na fabricação das amostras bem como nos ensaios das mesmas, tornando-as assim representativas.

Figura 38 - Curva tensão versus deformação das amostras com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina e 2 faixa de geotêxtil.



Fonte: O Autor (2022)

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS

Após todos os ensaios foi possível a análise comparativa nos mais diversos cenários de proporções e disposição de descontinuidades.

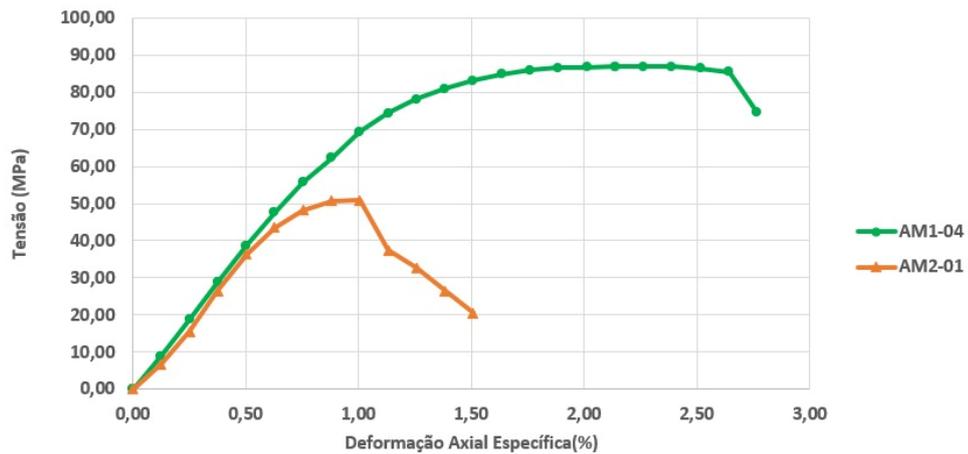
4.2.1 Análise comparativa das amostras sem geotêxtil com proporções diferentes

Comparou-se as amostras com proporção de 85% de pó análogo e 15% de resina (AM1) com as amostras preparadas com proporção de 90% de pó análogo e 10% de resina (AM2), ambas sem a presença do geotêxtil, a fim de se analisar o comportamento da resistência mecânica e a variação dos parâmetros do coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. Na Figura 40 foram comparadas as amostras que atingiram a maior resistência a compressão dentre as amostras AM1 e AM2, que foram AM1-04 e AM2-01, já a Figura 41 apresenta duas faixas referente aos limites máximos e mínimos das amostras que compõe AM1 e AM2, tendo sido criadas estas faixas através do valor da tensão máxima e mínima para cada ponto de deformação analisado, tendo assim uma região onde todas as curvas de AM1 e AM2 estão inseridas.

Verificou-se nas Figuras 40 e 41, uma diminuição nas tensões máximas de ruptura nas amostras com proporção de 90% de pó de análogo e 10% de resina, devido um aumento da

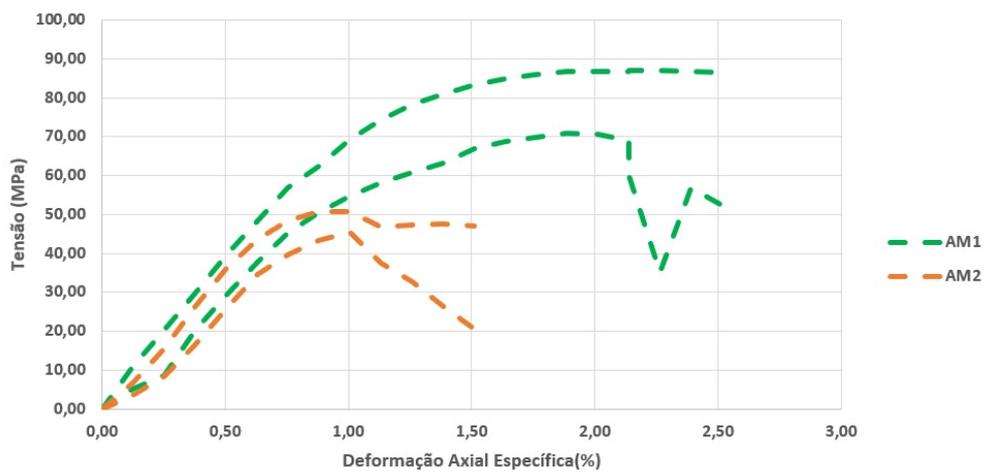
porosidade das amostras devido a maior quantidade de pó análogo e conseqüente diminuição de resina. Com relação ao coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade não se observou uma grande variação nos valores entre as amostras, como apresentados na Tabela 8.

Figura 39 – Curva tensão *versus* deformação das amostras de maior resistência a compressão de AM1-04 e AM2-01.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 40 – Gráfico dos limites máximos e mínimos das curvas tensão *versus* deformação das amostras AM1 e AM2.



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 8 – Comparação entre os parâmetros médios de AM1 e AM2.

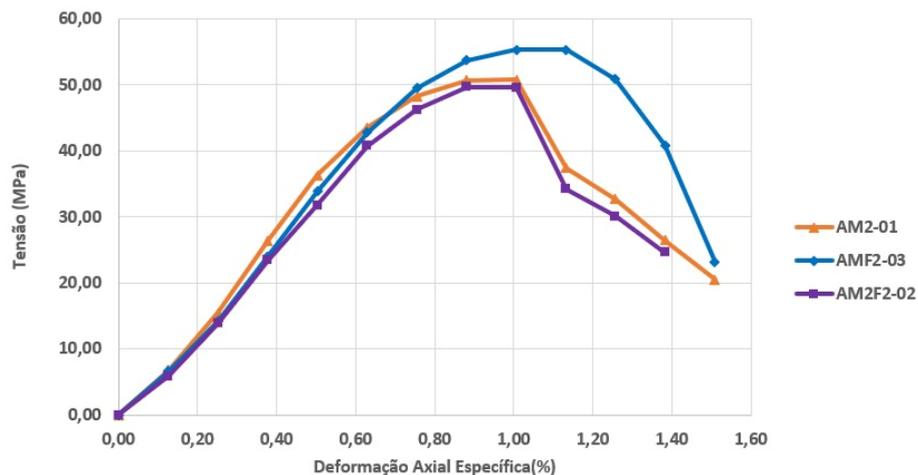
	AM1	AM2
F _{méd}	99,95KN	61,94KN
UCS _{méd}	79,33MPa	49,05MPa
E _{méd}	7,28MPa	6,73MPa
v _{méd}	0,34	0,40

Fonte: O Autor (2022)

4.2.2 Comparação entre amostras com e sem geotêxtil de mesma proporção

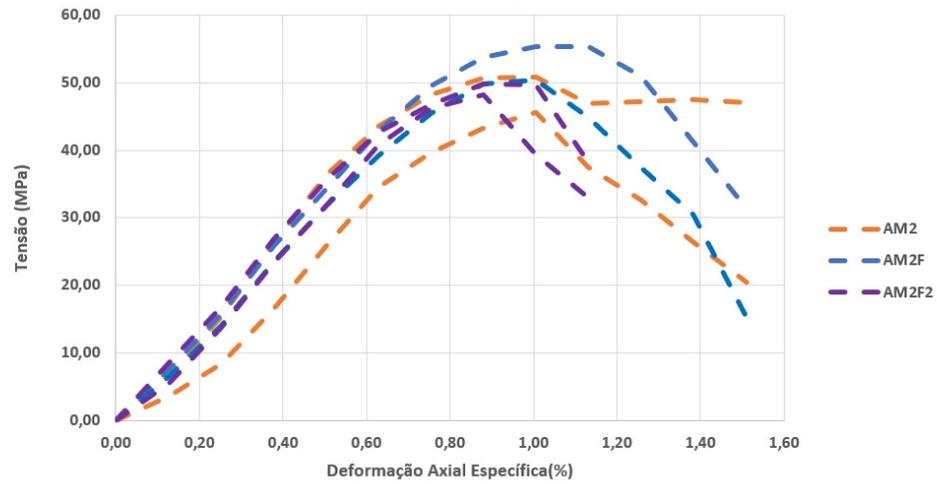
Comparou-se as amostras com proporção de 90% pó análogo e 10% resina, em 3 disposições: uma sem a presença do geotêxtil, uma com a presença de 1 faixa de geotêxtil e outra com a presença de 2 faixas de geotêxtil, a fim de se analisar o comportamento da resistência mecânica e a variação dos parâmetros do coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade, como mostram as Figuras 42 e 43. Verificou-se pouca variação nas tensões máximas de ruptura comparando as 3 disposições, ver Figura 41 e 43. Com relação ao coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade não houve uma grande variação, como apresenta a Tabela 9.

Figura 41 - Curva tensão *versus* deformação das amostras de maior resistência a compressão de AM2, AMF2 e AM2F2.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 42 - Gráfico dos limites máximos e mínimos das curvas tensão *versus* deformação das amostras de AM2, AM2F e AM2F2.



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 9 - Comparação entre os parâmetros médio de AM2, AM2F e AM2F2.

	AM2	AM2F	AM2F2
Fméd	61,94KN	67,33KN	60,00KN
UCSméd	49,05MPa	53,32MPa	47,51MPa
Eméd	6,73MPa	6,77MPa	6,81MPa
v méd	0,40	0,39	0,50

Fonte: O Autor (2022)

5 CONCLUSÃO

Comparando-se os resultados obtidos referente a todas as amostras concluiu-se que houve uma variação considerável na resistência mecânica das rochas apenas quando mudou-se a proporção utilizada no processo de fabricação dos corpos de prova, já que quando analisadas as amostras que continham a mesma proporção com e sem a disposição do geotêxtil não houveram variações significativas na resistência mecânica das rochas, tendo essas, curvas características muito semelhantes e com pequenas variações de resistências máximas de ruptura. No que se diz respeito aos parâmetros de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, não houveram variações significativas devido a mudança de proporção ou aplicação de geotêxtil.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, M. L. **CARACTERIZAÇÃO DOS ESTILÓLITOS VERTICAIS DO NÍVEL SUPERIOR DOS CALCÁRIOS LAMINADOS DA FORMAÇÃO CRATO, BORDA NORTE DA BACIA DO ARARIPE.** [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- ANTUNES, L. Gustavo De Souza E. **REFORÇO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS COM GEOSSINTÉTICOS.** [S.l.]: Universidade de Brasília, 2008.
- ASS'AD, J. M.; TATHAM, R. H.; MCDONALD, J. A. A physical model study of microcrack-induced anisotropy. **GEOPHYSICS**, dez. 1992. v. 57, n. 12, p. 1562–1570. Disponível em: <<https://library.seg.org/doi/10.1190/1.1443224>>.
- DOMINGUES, D. P. Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos . Débora Lopes Pilotto Domingues Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos . 2011.
- DUARTE, A. S. **Aplicação de Geossintéticos na impermeabilização e selagem de aterros.** [S.l.]: Universidade de Aveiro, 2009.
- DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. **Memoir American Association Petroleum Geologists**, 1962. p. 108–221.
- EMBRY & KLOVAN, A. Alate Devonian reef tract on northeastern Banks Island , N . W . T. 1971. n. March.
- FOLK, R. L. Spectral Subdivision of Limestone Types. Tulsa: **American Association of Petroleum Geologists**, 1962.
- HUSSEINY, A. El; VANORIO, T. Synthesis of micritic carbonate analogs: Effect on velocity-pressure sensitivity and dissolution. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2013. p. 2797–2801. Disponível em: <<https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2013-0199.1>>.
- KIEWIET, M. C. D. N. **Comportamento hidromecânico de zonas de falha em Travertino: Estudo Experimental e Numérico sobre o Impacto da Reativação Estrutural na Produção de Reservatórios.** [S.l.]: Tese de doutorado submetida ao Programa em Pós graduação em Geologia, UFRJ, 2015.
- LAFRATTA, C. Por que o preço do petróleo impacta tanto a economia? 2020. Disponível em: <<https://blog.nubank.com.br/petroleo-bolsa/>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- LEIROS, J. Cunha. **AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DE ÁGUA EM APARATO UTILIZADO EM ESTUDOS DO DESSECAMENTO DE RESÍDUOS DE CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS COM GEOTÊXTEIS.** [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.
- MEDEIROS, A. Pereira De. **ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS NO ATERRO SANITÁRIO DE SEROPÉDICA/RJ.** [S.l.]: Universidade Federal da Paraíba, 2019.
- MOREIRA, J. L. P. *et al.* Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 2007. v.

15, n. 2, p. 531–549.

NIRAULA, L. D. **DEVELOPMENT OF MODIFIED T-Z CURVES FOR LARGE DIAMETER PILES/DRILLED SHAFTS IN LIMESTONE FOR FB-PIER.** [S.l.]: UNIVERSITY OF FLORIDA, 2004.

OLIVEIRA, A. D. **Análise das alterações físico-químicas decorrentes de ensaios de dissolução em rochas carbonáticas sintéticas.** [S.l.]: Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

OLIVEIRA, S. M. F. De. **Estudo do comportamento geomecânico e químico das fraturas de rochas carbonáticas.** [S.l.]: Tese (Doutorado em engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

PALMEIRA, E. M. E V. D. M. **Geossintéticos na engenharia civil - Curso básico.** IGS Brasil: [s.n.], 2001.

PETTIJOHN, F. J. **Sedimentary rocks.** 2^a Ed. ed. New York: [s.n.], 1957.

POURMOHAMMADI, S. *et al.* Fluid Flow Properties of Different Carbonate Pore Classes. Abu Dhabi: SPE, 2007.

RAMOS, G. M. S. **ANÁLISE DE CONCREÇÕES COMO FERRAMENTA PARA O ESTUDO DE TAXAS DE COMPACTAÇÃO EM CALCÁRIOS LAMINADOS: APLICAÇÃO A EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA DE ROCHAS RESERVATÓRIOS.** [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

RATHORE, J. S. *et al.* P- and S-wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry11. **Geophysical Prospecting**, ago. 1995. v. 43, n. 6, p. 711–728. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00276.x>>.

REEDER, R. J. **Carbonates : mineralogy and chemistry.** New York: [s.n.], 1983.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo.** Rio de janeiro: [s.n.], 2006.

SANTOS, Y. R. Pinheiros. **No Title.** [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco. No Prelo., [s.d.].

SILVA, H. C. **ACIDIFICAÇÃO EM RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS.** [S.l.]: Universidade Federal Fluminense, 2017.

TERRA, J. G. S. *et al.* Classificações Clássicas De Rochas Carbonáticas. **B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro**, 2010. v. 18, n. 1, p. 9–29.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Rio de janeiro: interciência, 2001.

VIANA, M. S. S.; NEUMANN, V. H. De M. L. Membro Crato da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE: Riquíssimo registro de fauna e flora do Cretáceo. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, 2002. p. 113–120.

VIEIRA, K. Do N. **Estudo experimental e numérico da dissolução ácida em rocha carbonática artificial utilizando cimento.** [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

ZACARIAS, C. M. **Classificação De Maciços Rochosos Da Mina Do Córrego Do Meio Aplicada Às Operações De Perfuração.** 2003.

ZOBACK, M. D. **Reservoir Geomechanics.** Cambridge: Cambridge University Press, 2007.