

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Vitor Ferreira Morales de Oliveira

**Desenvolvimento de medidor de sucção utilizando técnicas de
impressão 3D – Um estudo de viabilidade.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Marina Bellaver Corte

Rio de Janeiro
Abril de 2024



Vitor Ferreira Morales de Oliveira

**Desenvolvimento de medidor de sucção utilizando técnicas de
impressão 3D – Um estudo de viabilidade.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em **Engenharia Civil** da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Marina Bellaver Corte

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2024.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Vitor Ferreira Morales de Oliveira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ – em 2021. No mestrado na PUC-Rio, desenvolveu a dissertação na linha de pesquisa de: ensaios em solos não saturados e impressão 3D.

Ficha Catalográfica

Oliveira, Vitor Ferreira Morales de

Desenvolvimento de medidor de sucção utilizando técnicas de impressão 3D: um estudo de viabilidade / Vitor Ferreira Morales de Oliveira; orientadora: Marina Bellaver Corte. – 2024.

109 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Solos não saturados. 3. Impressão 3D. 4. Medidas de sucção. 5. Curva característica de água no solo. I. Corte, Marina Bellaver. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

À minha orientadora, Marina Bellaver Corte, por todo seu apoio, disponibilidade, incentivo e confiança ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos. Em especial, a professora Raquel Quadros Velloso e o professor Eurípedes do Amaral Vargas Júnior pelos conselhos e sugestões na elaboração dessa pesquisa.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio e do Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Rio pelo apoio e colaboração.

À equipe do LADES-CEFET/RJ pelo auxílio e conhecimento transmitidos.

À PUC-Rio e FAPERJ pelo apoio financeiro na elaboração desse trabalho.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro no primeiro ano da pós-graduação.

Aos meus amigos e familiares, que apesar de não estarem diretamente envolvidos, foram essenciais no desenvolvimento desse trabalho com suas palavras incentivo e afeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Oliveira, Vitor Ferreira Morales; Corte, Marina Bellaver (Orientadora). **Desenvolvimento de medidor de sucção utilizando técnicas de impressão 3D – um estudo de viabilidade.** Rio de Janeiro, 2024. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A curva característica de água no solo é uma ferramenta importante na análise mecânica e hidráulica de solos não saturados, uma vez que expressa a relação entre a saturação e a sucção do solo. O objetivo principal dessa pesquisa foi, através da curva de retenção, analisar a viabilidade da utilização de uma estrutura porosa, criada com impressão 3D, como medidor de sucção. Além da curva de retenção, também se estudou a acurácia e precisão da metodologia de confecção com análise de imagem e pesagem das amostras. Empregou-se duas técnicas de manufatura aditiva. Com a primeira, Fused Deposition Modelling, não foi possível imprimir poros com diâmetro inferior a 1 mm, tendo essa técnica sido descartada. A segunda técnica foi a Vat Photopolymerization, tendo se atingido diâmetro mínimo do furo de 0,6 mm. Foram confeccionados nove corpos de prova (CP) cilíndricos, com furos idênticos de 0,6 mm de diâmetro e mesmo espaçamento entre si. Cinco CPs foram impressos com 30 mm de raio e 20 mm de altura, os demais com 20 mm de raio e 10 mm de altura. O método utilizado para a medição da sucção foi o do papel filtro. Como o objetivo da pesquisa não era obter a curva exata do corpo impresso, mas sim observar uma tendência de comportamento, optou-se por um período de equalização de apenas 7 dias. Posicionando um papel no topo e outro na base do CP foi possível analisar a equalização. A diferença entre topo e base constatada foi aproximadamente constante para todo o intervalo da curva, com exceção apenas no trecho de inflexão, no qual essa diferença foi significativamente maior. Observou-se dois trechos lineares (na escala semi-log) conectados por uma descontinuidade. Assim, um modelo bimodal, como os utilizados no papel filtro, descreveram melhor os resultados obtidos. A curva de calibração obtida resultou em um erro na leitura de sucção de 13,7% no primeiro trecho e 27,5% no segundo. No entanto, considerou-se que o medidor ainda não é adequado devido a região de descontinuidade, que inviabilizou leituras entre 10 e 1500 kPa. Em relação ao método de confecção, entendeu-se que a impressora possui precisão adequada, tendo sido observado comportamento homogêneo entre os diferentes CPs,

mesmo com geometrias distintas. A resolução da impressora utilizada impediu a confecção de CPs com vazios menores para a otimização das curvas. No entanto, o comportamento da curva e a precisão do equipamento sugerem que a manufatura aditiva pode ser capaz de contribuir para a mecânica dos solos com a criação de um novo tipo de medidor de sucção, desde que se utilize uma melhor configuração/geometria de vazios para otimizar o comportamento da curva de retenção.

Palavras-chave

Manufatura aditiva; solos não saturados; curva de retenção.

Abstract

Oliveira, Vitor Ferreira Morales; Corte, Marina Bellaver (Advisor). **Development of a suction meter using 3D printing techniques – a viability study**. Rio de Janeiro, 2024. 111p. Master' degree dissertation – Department of Civil and Environmental Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio).

The soil water characteristic curve is an important tool in the mechanical and hydraulic analysis of unsaturated soils as it expresses the relationship between soil saturation and suction. The main objective of this research was to analyze, through the retention curve, the feasibility of using a porous structure created with 3D printing as a suction meter. In addition to the retention curve, the accuracy and precision of the manufacturing methodology were also studied through image analysis and sample weighing. Two additive manufacturing techniques were employed. With the first, Fused Deposition Modelling, it was not possible to print pores with a diameter smaller than 1 mm, and, because of this, the technique was discarded. The second technique was Vat Photopolymerization, a minimum pore diameter of 0.6 mm was achieved. Nine cylindrical specimens (CPs) were produced, with identical 0.6 mm diameter pores and the same spacing between them. Five CPs were printed with a radius of 30 mm and a height of 20 mm, and the remaining ones with a radius of 20 mm and a height of 10 mm. The suction measurement method used was the filter paper method. Since the research's goal was not to obtain the exact curve of the printed body but to observe a behavioral trend, an equilibration period of only 7 days was chosen. Placing a paper at the top and another at the base of the CP allowed the analysis of the equilibrium. The difference between the top and base was approximately constant throughout the curve interval, except for the inflection section, where this difference was significantly higher. Two linear sections (on a semi-log scale) connected by a discontinuity were observed. Therefore, a bi-modal model, like those used in filter paper experiments, better described the obtained results. The calibration curve resulted in a suction reading error of 13.7% in the first section and 27.5% in the second. However, it was considered that the meter is not yet suitable due to the discontinuity region, which made readings between 10 and 1500 kPa unfeasible. Regarding the manufacturing method, it was understood that the printer has adequate precision, with a homogeneous behavior observed among different CPs, even with distinct geometries. The printer's resolution prevented the production of

CPs with smaller voids to optimize the curves. However, the curve behavior and equipment precision suggest that additive manufacturing may be capable of contributing to soil mechanics with the creation of a new type of suction gauge, provided a better void configuration/geometry is used to optimize the retention curve behavior.

Keywords

Additive manufacturing; unsaturated soils; retention curve.

SUMÁRIO

1 Introdução	19
1.1 Solos não saturados.....	19
1.2 Impressão 3D na geotecnia.....	20
1.3 Objetivo	21
1.4 Estrutura do trabalho.....	21
2 Revisão da literatura	23
2.1 Ensaio de sucção	23
2.1.1 Papel filtro	24
2.1.2 Psicrômetro	25
2.1.3 Tensiômetro	27
2.1.4 Translação de eixos	29
2.1.5 Célula de gesso e sensor de matriz granular	30
2.1.6 Sensor de condutividade térmica	31
2.2 Impressão 3D	32
2.2.1 Conhecimentos básicos	32
2.2.2 Metodologia da Revisão Sistemática.....	38
2.2.3 Análise Bibliométrica	41
2.2.4 Discussão da amostra final	44
2.2.5 Conclusões da revisão sistemática	57

3 Programa experimental	59
3.1 Impressão 3D	59
3.1.1 Pré-processamento	60
3.1.2 Processamento	66
3.1.3 Pós-processamento.....	68
3.2 Obtenção da curva de retenção	71
3.2.1 Materiais.....	71
3.2.2 Controle da saturação	72
3.2.3 Ensaio de sucção	73
4 Resultados e discussões.....	75
4.1 Análise do modelo digital.....	75
4.2 Análise da amostra impressa	76
4.2.1 Processamento de imagem.....	76
4.2.2 Secagem e saturação.....	77
4.3 Curva de retenção de água no solo	82
4.3.1 Análise preliminar da curva de retenção	82
4.3.2 Tratamento dos dados e identificação de outliers	87
4.3.3 Elaboração da equação da curva de retenção.....	90
4.4 Medição da sucção	94
5 Conclusão e trabalhos futuros.....	97

5.1 Conclusão	97
5.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	99
6. Referências bibliográficas	100

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de psicrômetro do tipo Peltier. Marinho (2017).....	26
Figura 2 - Ilustração de um tensiômetro convencional. Strongylis (2021), adaptado de Fredlund & Rahardjo (1993).....	27
Figura 3 - Ilustração de um equipamento utilizado na técnica de translação de eixo. Adaptado de Fredlund (1989).....	29
Figura 4 - Ilustração esquemática de medidores de sucção de condutividade elétrica. Adaptado de Rasheed et al. (2022).....	30
Figura 5 - Ilustração de um tipo de medidor de sucção baseado na leitura da condutividade térmica. Adaptado de Fredlund (1989)	31
Figura 6 - Processo de impressão utilizando a técnica BJT e pó metálico. AMFG (2019)	33
Figura 7 - Técnica de impressão DED. (A) Utilização de pó e laser. (B) Utilização de arame e feixe de elétrons. Xometry (2023)	33
Figura 8 - Processo de impressão FDM. Löffler & Koch (2019).....	34
Figura 9 - Ilustração da impressão MJM. Ferrari et al. (2018)	35
Figura 10 - Procedimento de impressão PBF. Santecchia et al. (2020)	35
Figura 11 - Ilustração do processo de impressão SHL. Moritz & Maleksaeedi (2018)	36
Figura 12 - Impressão VPP. (A) Técnica Top-Down. (B) Técnica Bottom-Up. Bhattacharjee et al. (2016)	37
Figura 13 - Amostra original (a esquerda) e réplicas impressas com diferentes técnicas e materiais. Almetwally et al. (2021).	38
Figura 14 - Diagrama PRISMA.	41
Figura 15 - Evolução da produção anual de artigos.....	42
Figura 16 - Número de artigos publicados por país (a) e por fonte (b)	42
Figura 17 - Rede das palavras-chave mais recorrentes.	43
Figura 18 - Métodos utilizados na elaboração do modelo digital	49
Figura 19 - Técnicas de impressão utilizadas.....	51

Figura 20 - Divisão percentual dos artigos em função do foco de estudo.....	56
Figura 21 - Divisão dos artigos em função do modelo digital e da técnica de impressão	56
Figura 22 - Divisão dos artigos em função da técnica adotada e foco da análise	57
Figura 23 - Impressoras utilizadas. (A) FDM-Ender 5 plus. (B) DLP-Halot One	59
Figura 24 – Conversão do mesmo modelo para o formato .stl utilizando diferentes tamanhos de voxel.	61
Figura 25 – Modelos Digitais A e B.....	62
Figura 26 Ineficácia dos suportes laterais.....	65
Figura 27 - Deformação da face inferior causada pela variação térmica	66
Figura 28 - Menores furos obtidos com a impressora FDM. (A) Topo da peça. (B) Base da peça.	67
Figura 29 - (A) Impressão mal sucedida devido ao descolamento das camadas iniciais. (B) Impressão bem sucedida, com inclinação de 10° para evitar o descolamento.	68
Figura 30 - Equipamento de limpeza e cura da amostra impressa	69
Figura 31 - Fissuras ocorridas, devido à cura insuficiente, durante a secagem na estufa.....	70
Figura 32 - Variação na coloração durante a etapa de cura	70
Figura 33 – Imagem do corpo de prova obtida com microscópio óptico.	76
Figura 34 - Perda de massa das amostras pelo tempo de permanência na estufa com temperatura constante. (a) Amostras mantidas por mais de 15 dias. (b) Amostras mantidas de 4 a 5 dias.....	78
Figura 35 – Aumento da massa de água com o tempo nos corpos de prova saturados por capilaridade.....	80
Figura 36 - Curva característica do solo natural, curva estimada com o modelo digital e curva da amostra impressa. Mahabadi et al. (2018).....	83
Figura 37 - Curva de retenção, diferenciando leituras de topo e base das amostras, contendo todos os dados.	84
Figura 38 - Curva de retenção, apenas das leituras de topo, diferenciando os tipos de corpo de prova.....	85

Figura 39 - Curva de retenção, apenas das leituras de base, diferenciando os tipos de corpo de prova.....	85
Figura 40 - Curva de retenção, apenas das leituras de topo, diferenciando as trajetórias de umedecimento e secagem.	86
Figura 41 - Curva de retenção, apenas das leituras de topo, diferenciando as trajetórias de umedecimento e secagem.	87
Figura 42- Variação da diferença proporcional de umidade gravimétrica entre o papel filtro do topo e o da base pelo teor de umidade volumétrica do corpo de prova.....	88
Figura 43 - Curva de retenção com a identificação de outliers	90
Figura 44 - Curva de retenção elaborada com modelo de van Genuchten (1980)	Erro! Indicador não definido.
Figura 45 – Determinação das equações de cada trecho da curva de calibração dos corpos de prova	91
Figura 46 - Curva de calibração das amostras impressas	92
Figura 47 - Erro relativo entre sucção medida e valor previsto com a curva proposta em função do teor de umidade gravimétrico	93
Figura 48 - Comparação da curva de retenção de água elaborada com modelo de Van Genuchten e com equação própria.....	94

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens do ensaio de papel filtro.....	25
Tabela 2 - Strings de busca usadas em cada banco de dados	40
Tabela 3 – Informações dos artigos de rocha	44
Tabela 4 - Informações dos artigos de solo	47
Tabela 5 - Resumo dos parâmetros utilizados na fase de pré-processamento.	65
Tabela 6 - Parâmetros estimados com base no modelo digital	75
Tabela 7 – Comparação entre o peso seco estimado com base no modelo digital e o medido na amostra impressa.	79
Tabela 8 - Resultados obtidos com saturação por submersão por no mínimo 5 dias.	81
Tabela 9 - Resumo dos resultados da secagem e saturação das amostras impressas.....	82
Tabela 10 - Coeficientes do modelo de van Genuchten e erro padrão da regressão (S)	Erro! Indicador não definido.

Lista de Abreviaturas e Siglas

AAPG – Associação Americana de Geólogos de Petróleo

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

BJT – Binder Jetting

CAD – Computer Aided Design

CPE – Copoliéster

CV – Coeficiente de Variação

DED – Direct Energy Deposition

DI – Imagem Digitalizada

FDM – Fused Deposition Modeling

HIPS – Poliestireno de Alto Impacto

MEX – Material Extrusion

MJM – Material Jetting

PBF – Powder Bed Fusion

PLA – Ácido Poliláctico

PRISMA – Itens de Relatório Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises

SHL – Sheet Lamination

STL – Standard Triangle Language

TDR – Time Domain Reflectometry

VPP – Vat Photopolymerization

WoS – Web of Science

Lista de Símbolos

d_f – Diâmetro dos furos

d_s – Diâmetro dos suportes

e – Índice de vazios

n – Porosidade

s_f – Distância entre os furos

S – Erro padrão da regressão

S_r – Grau de saturação

V_v – Volume de vazios

w – Teor de umidade gravimétrico

W_d – Peso seco

W_s – Peso saturado

θ – Teor de umidade volumétrico

ψ – Sucção

γ_r – Peso específico da resina

“Mentes são como paraquedas. Elas só funcionam quando são abertas”

Desconhecido

1 Introdução

1.1 Solos não saturados

Em solos residuais tropicais não saturados a variação da umidade tem um papel fundamental no comportamento mecânico. Instabilidade de taludes são recorrentes nos períodos de chuvas intensas no Brasil. No estado do Rio de Janeiro, por exemplo, esses deslizamentos foram responsáveis pela perda de milhares de vida, apenas na última década, e graves prejuízos econômicos.

A diminuição da sucção, devido ao umedecimento do solo, é um fator determinante nesses casos de instabilidade. A sucção de um solo pode ser medida no campo diretamente, com o tensiômetro, por exemplo, ou de forma indireta, com um sensor de matriz granular (GMS), dentre outros. Há também a possibilidade da medição da sucção com ensaios de laboratório, como o ensaio de papel filtro.

A curva de retenção de água, ou curva característica de água no solo, relaciona a sucção com o teor de umidade gravimétrico ou grau de saturação. Uma vez que se determine essa curva para um determinado solo, é possível realizar o monitoramento da sucção em campo com o controle da umidade.

Apesar de existirem diversas técnicas distintas para medir a sucção, todas possuem limitações relevantes. Pode-se destacar, por exemplo, que o papel filtro, apesar da simplicidade, demanda elevado período de tempo para a realização do ensaio. Já o tensiômetro, quando utilizado *in situ*, não é capaz de realizar medições superiores a 100 kPa. O bloco de gesso, apresenta vida útil limitada (propriedades se alteram com o tempo) e suas leituras podem ser afetadas pela salinidade local.

Tendo em vista as limitações dos ensaios existentes, a principal motivação da presente pesquisa foi explorar técnicas alternativas para a medição da sucção. Optou-se por empregar a impressão 3D, tecnologia ainda pouco explorada na geotecnia, para confeccionar possíveis medidores de sucção.

1.2 Impressão 3D na geotecnia

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva ou prototipagem rápida, é uma tecnologia relativamente nova, em constante desenvolvimento, e pode-se dizer que revolucionou diferentes áreas do conhecimento. Nas geociências, de acordo com Kong et al. (2021a), a impressão 3D oferece quatro grandes vantagens.

A primeira é a capacidade de recriar amostras. A aquisição de amostras naturais, na maioria das vezes, não é simples e requer uma quantidade significativa de recursos, como tempo e dinheiro. Devido a essas dificuldades, é comum os pesquisadores evitarem testes destrutivos. No entanto, ao combinar a prototipagem rápida com a digitalização de amostras, por tomografia computadorizada ou técnica análoga, é possível adquirir um número teoricamente ilimitado de corpos de prova. Zhang e Li (2022), por exemplo, conseguiram realizar o teste de tração indireta em 12 amostras idênticas criadas com impressoras 3D, submetidas a diferentes ciclos de congelamento e descongelamento. Os autores observaram uma forte correlação entre os ciclos e a degradação das propriedades mecânicas. Além disso, as alterações observadas nos ciclos assemelham-se aos observados em rochas fracas de alta porosidade.

A segunda vantagem da manufatura aditiva é a possibilidade de criar reproduções físicas de modelos digitais. As amostras impressas, com base nesses modelos digitais, permitem que os pesquisadores aprimorem e validem seus modelos numéricos. Dimou et al. (2021) estudaram a viabilidade do uso de micromodelos impressos para fluxo de fase única. Eles concluíram que a prototipagem rápida não só é capaz de criar modelos para estudar o sequestro de CO₂, recuperação aprimorada de petróleo (EOR) e aplicações de energia geotérmica, mas também é mais barata do que os métodos tradicionais.

O terceiro atrativo da prototipagem rápida é a capacidade de adquirir uma amostra com a forma, tamanho e propriedades de material desejadas. A manufatura aditiva permite que o pesquisador, por exemplo, isole e varie uma única propriedade da amostra, resultando em um melhor controle do teste e compreensão dos resultados. Alterando o tamanho do grão do material utilizado e a espessura das camadas, Wang et al. (2022) obtiveram amostras com a mesma geometria, mas com diferentes propriedades mecânicas. Eles observaram que ambos os parâmetros têm grande influência nas propriedades físicas, resistência à compressão e comportamento de falha. Uma

diminuição na espessura da camada resulta em uma diminuição na porosidade, mas um aumento na resistência máxima e na densidade. Enquanto isso, amostras com maior teor de grãos grosseiros mostraram menor porosidade, maior resistência máxima e maior densidade.

A quarta vantagem é especialmente útil para a petrofísica e estudos de fluxo em geral. Os pesquisadores conseguem criar modelos com redes de poros extremamente complexas, sendo limitados apenas pela capacidade da impressora. Um estudo do efeito da microestrutura na permeabilidade de rochas, por exemplo, foi realizado por Head et al. (2016). Os autores simularam compactação e dissolução usando uma lei de potência conhecida que descreve a permeabilidade como função da porosidade. Eles conseguiram obter o coeficiente da lei de potência para cada caso e esperam que, com estudos adicionais, a manufatura aditiva possa permitir uma melhor compreensão do significado físico desse coeficiente.

1.3 Objetivo

Essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade da utilização de impressoras 3D na confecção de medidores de sucção, que eventualmente poderiam contribuir para o desenvolvimento de ensaios ou monitoramento de sucção in situ. Dos objetivos específicos destaca-se:

- Desenvolvimento de revisão sistemática da literatura para compreensão das aplicações e limites da manufatura aditiva na geotecnia e uma avaliação previa de viabilidade.
- Obtenção e otimização da curva característica da estrutura impressa.
- Avaliação da acurácia e precisão das técnicas utilizadas na confecção dos corpos de prova.

1.4 Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. O Capítulo 1 expõe a relevância do tema e os principais objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta uma revisão literatura relacionada as técnicas atuais de medição de sucção e uma revisão sistemática sobre impressão 3D aplicada na geotecnia, contendo também as discussões e

conclusões provenientes dessa revisão. O Capítulo 3 abrange a metodologia empregada em todo o processo de confecção das amostras, execução do ensaio do papel filtro e obtenção das curvas de retenção. O capítulo 4 aborda o resultado dos ensaios realizados e as discussões dos mesmos. Por fim, no Capítulo 5 são expostas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 **Revisão da literatura**

2.1 **Ensaio de sucção**

De acordo com Soares (2008), os primeiros registros de estudo de sucção no solo são de Livingsgton, na primeira década do século XIX. Na década seguinte, Shull associou o fenômeno de absorção com a quantificação da sucção, sendo, provavelmente, o responsável pelo primeiro método de medição indireta de sucção. Gardner (1937) foi o responsável pelo aprimoramento do método de medição indireta, propondo a utilização do papel filtro, metodologia de ensaio e obtenção das curvas de calibração do papel.

Ao longo do século novos ensaios foram desenvolvidos e o conhecimento de solos não saturados foi aprimorado. Usualmente, a sucção é expressa em unidades de pressão, como kPa ou atm. A sucção total pode ser subdivida em diferentes tipos de sucção. Em geral, a sucção total é definida como a soma da sucção mátrica e da sucção osmótica. A sucção mátrica está relacionada a estrutura do solo e as partículas que o compõem, enquanto a sucção osmótica depende da concentração química da água em questão.

Alguns autores, como Aitchison (1965), também consideram componentes gravitacional, pneumático e de adensamento. Essas três parcelas, no entanto, podem ser consideradas desprezíveis caso não haja adensamento e os poros estejam interligados com a atmosfera.

Aitchison (1965) divide os ensaios de sucção em dois grupos. No primeiro, a sucção é a variável controlada, como exemplo de ensaios desse grupo é possível citar a placa de pressão, placa de sucção, membrana de pressão, centrífuga e dessecador. Já no segundo grupo, a sucção é medida, tendo-se como exemplo de ensaio o psicrômetro, papel filtro, tensiômetro e células de gesso.

Devido ao objetivo da pesquisa, o foco da presente revisão da literatura está nos métodos de medição de sucção. Assim, nessa seção serão abordados os principais métodos utilizados atualmente na medição de sucção, expondo as principais vantagens e limitações de cada um.

2.1.1 Papel filtro

No ensaio de papel filtro utiliza-se um material poroso (papel filtro), que possua a relação da umidade com a sucção conhecida, para determinar indiretamente a sucção no solo. Uma vez que se equalize a pressão do papel filtro com o solo, é possível determinar indiretamente a sucção no solo com a umidade do papel filtro.

O material utilizado, normalmente, é o papel filtro quantitativo Whatman N° 42 ou o Schleicher & Schell N° 589. Esse ensaio permite tanto a medição da sucção mátrica quanto da sucção total. No primeiro método o papel fica em contato direto com o solo. Nesse caso, além da transferência de água, também ocorre o transporte dos solutos e por esse motivo a parcela referente a sucção osmótica não pode ser medida. No segundo método utiliza-se um anteparo para evitar o contato. Sem o contato do papel com o solo, a transferência é feita pelo fluxo de vapor, evitando o transporte dos solutos e medindo a sucção total.

Atualmente, a metodologia é normatizada pela ASTM 5298-16 (2016), não havendo norma brasileira para esse ensaio. Essa norma também sugere duas curvas de calibração, uma para o papel Whatman N° 42 e outra para o Schleicher & Schell N° 589. No entanto, há críticas a essas curvas pois elas não diferenciam a sucção mátrica da sucção total. A curva de calibração de um papel filtro pode ser determinada com técnicas específicas, como placa de sucção, placa de pressão ou dessecador, por exemplo. Há também, na literatura, diversas curvas clássicas que podem ser empregadas, como Chandler et al. (1992), Leong et al. (2002) e Al-Khafaf & Hanks (1974).

A ASTM 5298-16 (2016) recomenda que antes do ensaio o papel seja seco em estufa por 16h. Marinho (2005), por outro lado, afirma que esse procedimento pode afetar a curva de calibração e sugere que seja utilizado o papel no estado seco ao ar (diretamente da caixa). Como a umidade inicial e a histerese afetam a curva de calibração é recomendado utilizar sempre a mesma umidade inicial na calibração e na medição da sucção. Há outros fatores que também podem afetar o ensaio de papel filtro como a variação de temperatura e o contato inadequado do papel com o solo. Uma discussão detalhada do ensaio e da metodologia adequada pode ser encontrada em Marinho (1994).

Uma das grandes limitações desse ensaio é o tempo excessivo de equalização. A ASTM 5298-16 (2016) sugere um período de sete dias. Na literatura é possível encontrar diferentes recomendações do tempo mínimo necessário. De acordo com Marinho (1994), sete dias é um período suficiente quando há contato entre o papel e solo. Por outro lado, para a medição da sucção total, o tempo de equalização depende do nível de sucção, segundo Marinho (1997). Para sucções totais superiores a 1000 kPa um período de sete dias é recomendado, já para sucções inferiores a 100 kPa o tempo de equalização pode ultrapassar trinta dias.

Na Tabela 1 está apresentado, de forma resumida, as principais vantagens e desvantagens do ensaio de papel filtro.

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens do ensaio de papel filtro

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio simples • Medição da sucção mátrica e total • Intervalo amplo de leituras (máximo próximo de 30 MPa) 	<ul style="list-style-type: none"> • Não permite medições contínuas • Restrito ao laboratório • Tempo de ensaio excessivamente longo

2.1.2 Psicrômetro

O psicrômetro é um instrumento muito utilizado na meteorologia para a medição da umidade relativa. Um psicrômetro básico é composto por dois termômetros, denominados bulbo seco e bulbo úmido. O medidor do bulbo úmido é envolto com um tecido ou algodão úmido. Ao evaporar, a água diminui a temperatura desse termômetro. Essa diferença de temperatura permite o cálculo da umidade relativa do ar, que pode ser expresso em função da pressão de vapor, que por sua vez se relaciona com a sucção total.

Fredlund et al. (2012) fazem uma discussão extensa sobre os psicrômetros. Eles dividem os psicrômetros em duas categorias, tipo Peltier e circuito molhado (wet-loop). Quando uma corrente passa por um circuito composto por metais distintos é gerada uma diferença de temperatura entre eles. Esse fenômeno, denominado efeito Peltier, pode ser utilizado para resfriar um dos metais (bulbo úmido) até o ponto de orvalho. O ponto de orvalho é a temperatura na qual há a condensação do vapor d'água, ou também pode ser entendido como a temperatura que o ar atinge a saturação. A diferença de temperatura entre os metais distintos gera uma força eletromotriz (efeito Seebeck), que permite a

medição dessa diferença e a determinação da umidade relativa. A Figura 1 apresenta um exemplo de psicrômetro Peltier.

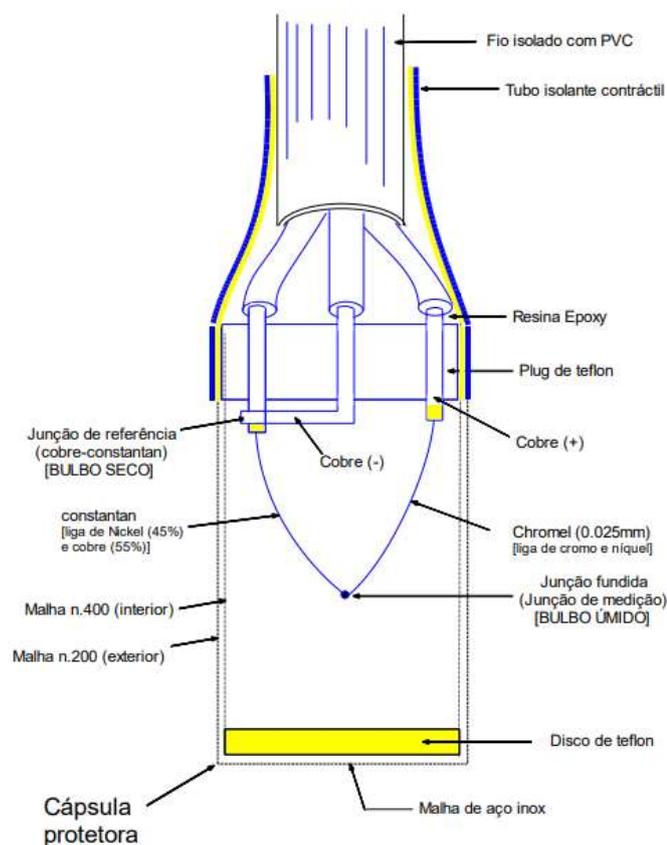


Figura 1 - Exemplo de psicrômetro do tipo Peltier. Marinho (2017)

O psicrômetro de circuito molhado difere do Peltier pois nele há o umedecimento mecânico do bulbo úmido. Essa diferença fornece mais estabilidade para o psicrômetro de circuito molhado e resulta na capacidade de leituras maiores de sucção. De acordo com Fredlund et al. (2012), o psicrômetro de Peltier não é capaz de realizar leituras de sucção total superiores a 8 MPa, enquanto no psicrômetro de circuito molhado a faixa de leitura se estende até 300 MPa.

Uma das grandes desvantagens do psicrômetro é a vulnerabilidade a variações de temperatura. Apesar de ser possível a utilização do equipamento em campo, a variação de temperatura natural no local ao longo das leituras muitas vezes inviabiliza a utilização desse equipamento na determinação da sucção in situ. Fredlund et al. (2012) recomendam que esse ensaio deve ser realizado preferencialmente em laboratório. Marinho (2017) também destaca que esse equipamento pode apresentar custo e tempo de resposta elevados.

2.1.3 Tensiômetro

Um tensiômetro é, basicamente, um tubo com um elemento poroso (como uma pedra porosa) de alta entrada de ar na parte inferior e um medidor de poropressões negativas na parte superior. O tubo é preenchido com água deaerada e o topo do tubo é fechado com uma tampa, na Figura 2 é apresentada uma ilustração de um tensiômetro convencional.

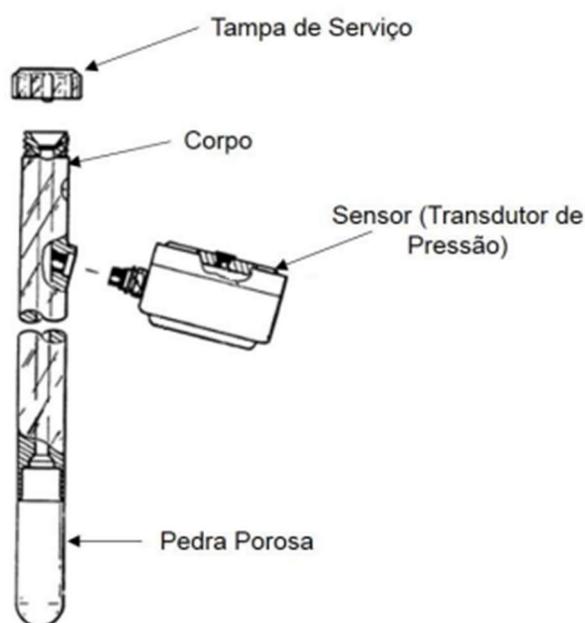


Figura 2 - Ilustração de um tensiômetro convencional. Strongylis (2021), adaptado de Fredlund & Rahardjo (1993)

É necessário garantir que haja contato adequado entre a estrutura porosa e solo, Fredlund et al. (2012) inclusive recomendam que o ensaio não seja realizado em solos com partículas muito grosseiras, uma vez que nesses casos o contanto pode ser insuficiente.

Garantido a saturação do elemento poroso, a água no interior do tubo apresentará a mesma poropressão da água no solo na condição de equilíbrio e com o medidor de poropressão no interior do tensiômetro é possível determinar o valor dessa poropressão. Como a troca de solutos não é impedida, o equipamento mede a sucção mátrica, sendo a sucção numericamente igual à poropressão medida, quando o solo está submetido à pressão atmosférica. O tempo de resposta de um tensiômetro varia em função do sensor

empregado, compressibilidade do sistema e condutividade hidráulica do solo. No entanto, para Fredlund & Rahardjo (1993) esse tempo não deve ultrapassar cinco minutos.

Quando a pressão em um líquido é inferior à sua pressão de vapor há o surgimento de bolhas de ar no interior desse líquido. Esse fenômeno, denominado cavitação, limita a leitura máxima de tensiômetros convencionais à aproximadamente 100 kPa (1 atm.), em ensaios *in situ*. Lu & Likos (2004) recomendam que na prática as leituras máximas com tensiômetros convencionais se limitem de 70 a 80 kPa pois impurezas, gases dissolvidos e bolhas de ar nas paredes do sensor podem facilitar a ocorrência da cavitação. Fabricantes de equipamentos mais modernos, no entanto, afirmam que seus são capazes de retardar a cavitação e superar o limite de 100 kPa. Meter (sd), por exemplo, possui em seu catálogo um tensiômetro (Teros 31) capaz de atingir 150 kPa.

Além dos convencionais, há diversos outros tipos de tensiômetro. Tensiômetros Jet-Fill possuem um reservatório de água no topo e um mecanismo (Jet-Fill) que auxilia na remoção de bolhas de ar. Tensiômetros Small-Tip, devido ao tubo flexível e ponta pequena, podem ser instalados em amostras de pequenas dimensões, como as utilizadas em laboratório. Tensiômetros Quick Draw, que se destacam dos demais em razão do seu baixo tempo de resposta.

Submeter a água a ciclos de altas pressões faz com que a água seja capaz de suportar tensões superiores a 100 kPa (1 atm.) por um certo tempo. O conhecimento desse fenômeno, a utilização de reservatórios menores e com paredes mais lisas e o uso de estruturas porosas com alta pressão de entrada de ar permitiram o desenvolvimento dos tensiômetros de alta sucção. Ridley & Burland (1993), por exemplo, conseguiram atingir leituras de 1500 kPa com um desses tensiômetros, em laboratório. No entanto, o uso desses equipamentos ainda é pouco difundido na prática, estando a sua utilização limitada majoritariamente a pesquisas.

Em resumo, o tensiômetro se destaca por realizar medições diretas, com baixo tempo de resposta e custo relativamente baixo. Por outro lado, o equipamento não é capaz de realizar leituras superiores a 100 kPa, quando utilizado *in situ*. Além disso, como é necessário manter um contato adequado entre o solo e a pedra porosa, o tensiômetro pode não ser adequado para solos que apresentem variação de volume ou grãos muito

grosseiros. Tensiômetros também podem necessitar de manutenção constante, para eliminar possíveis núcleos de cavitação.

2.1.4 Translação de eixos

A técnica de translação de eixos, segundo Fredlund (1989), foi desenvolvida por Hilf na década de 1940, porém não há muitos casos de sua utilização na literatura. Assim como no tensiômetro, essa técnica utiliza um elemento poroso de alta entrada de ar, no estado saturado para separar uma amostra de solo de um recipiente com água, conforme ilustrado na Figura 3. Como a amostra de solo não está totalmente saturada, há a tendência de fluxo do recipiente de água para o solo, resultando em uma pressão negativa no recipiente.

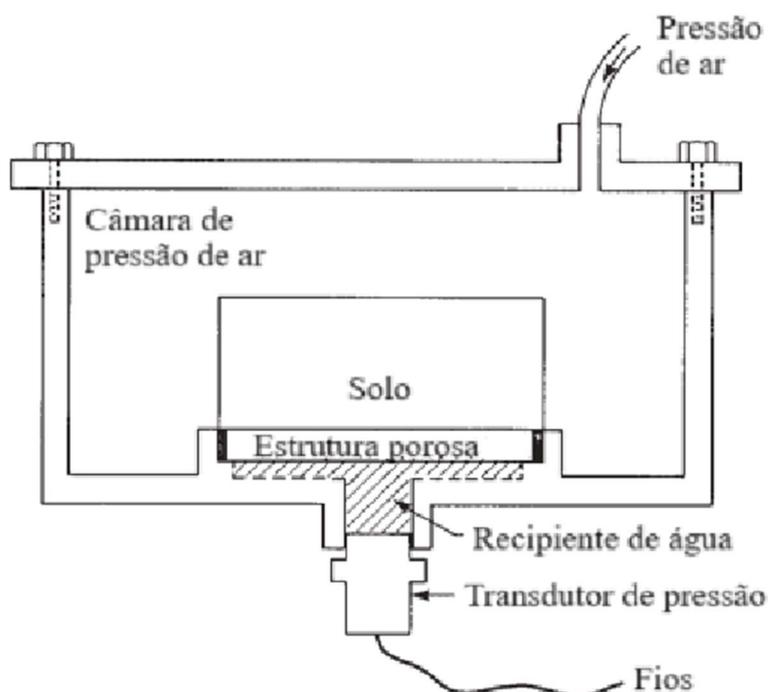


Figura 3 - Ilustração de um equipamento utilizado na técnica de translação de eixo. Adaptado de Fredlund (1989)

No entanto, diferentemente do tensiômetro, na translação de eixos a pressão de ar na amostra de solo é aumentada proporcionalmente a poropressão negativa, de modo a impedir o fluxo. Durante o ensaio a leitura de poropressão é mantida o mais próximo possível de zero e ao fim do ensaio, na condição de equilíbrio, a sucção mátrica é igual à diferença entre a pressão de ar no solo e a poropressão no recipiente de água.

2.1.5 Célula de gesso e sensor de matriz granular

Tanto a célula de gesso quanto o sensor de matriz granular utilizam elementos rígidos porosos para medir a sucção indiretamente, em função do teor de umidade, com uma curva de calibração predeterminada. Como a variação no teor umidade afeta a resistência elétrica dessas estruturas, a sucção mátrica pode ser obtida com leituras da resistência elétrica, na Figura 4 é apresentada uma ilustração de um medidor de sucção de condutividade elétrica.

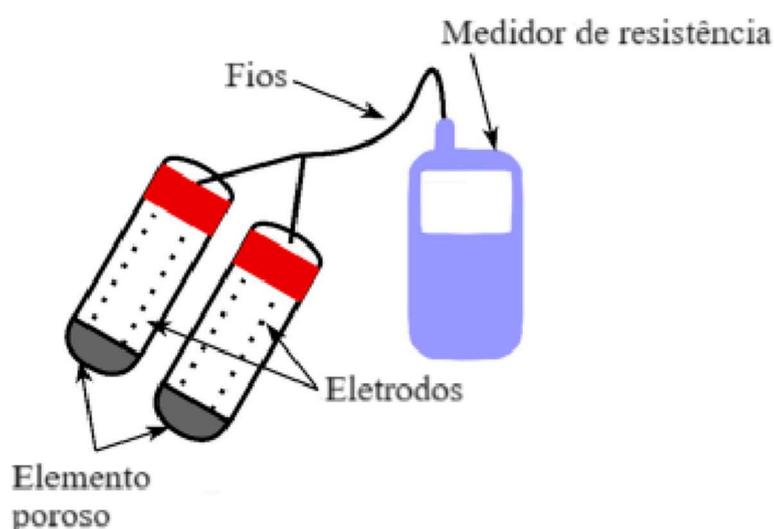


Figura 4 - Ilustração esquemática de medidores de sucção de condutividade elétrica. Adaptado de Rasheed et al. (2022).

Esses medidores são simples, baratos e não necessitam de manutenção. Contudo, as propriedades elétricas, principalmente no bloco de gesso, podem variar com o tempo ou a salinidade local. Garantir o contato adequado do medidor com o solo também pode ser um problema.

O Watermark 200 SS, um exemplo de medidor resistência elétrica moderno, é capaz de compensar a salinidade, de acordo com Irrrometer (sd), e a faixa de leitura, desse medidor, é de 0 a 239 kPa. O tempo de resposta, segundo Vettorello & Marinho (2021), do Watermark 200 SS é de no mínimo duas horas.

Além do alto tempo de resposta, os equipamentos baseados na resistência elétrica costumam apresentar baixa acurácia e histerese significativa. Para Fredlund et al. (2012) esses medidores ainda não são adequados para as práticas geotécnicas.

2.1.6 Sensor de condutividade térmica

Assim como as células de gesso, os sensores de condutividade térmica utilizam elementos rígidos porosos para medir a sucção mátrica indiretamente. A água é um condutor térmico mais eficiente que ar, por isso, é possível medir a variação de umidade do elemento poroso, de forma indireta, medindo a sua condutividade térmica. Também é possível obter a sucção, desde que se conheça previamente a curva de calibração do elemento poroso utilizado. Um medidor de sucção de condutividade térmica é composto, basicamente, por uma estrutura porosa, um sensor de temperatura e uma fonte emissora de calor. A Figura 5 apresenta uma ilustração esquemática de um desses equipamentos.

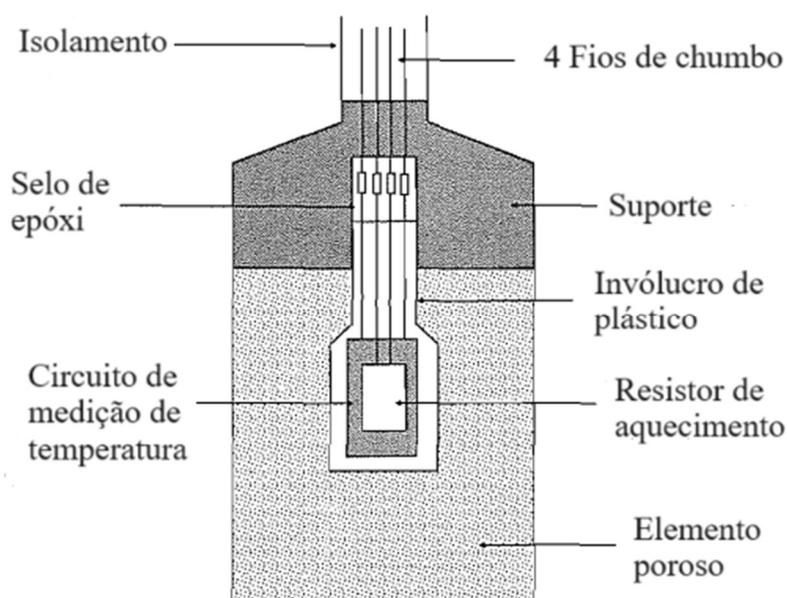


Figura 5 - Ilustração de um tipo de medidor de sucção baseado na leitura da condutividade térmica.
Adaptado de Fredlund (1989)

A leitura de temperatura no equipamento é afetada, majoritariamente, pela condutividade térmica do material cerâmico (que constitui o elemento poroso), do ar e da água. A condutividade térmica da cerâmica e do ar não se alteram significativamente com variações de temperatura, contudo o mesmo não é válido para a água. Por esse motivo, a condutividade térmica do conjunto, e conseqüentemente a sucção, medida com esse equipamento é afetada por variações na temperatura ambiente. Há estudos na literatura que contemplaram essa questão e propuseram metodologias a correção da temperatura em diferentes equipamentos, como Shuai et al. (2002) e Flint et al. (2002).

Para Lu & Likos (2004) as principais vantagens dos medidores de sucção de condutividade térmica são o seu custo relativamente baixo e a facilidade de automação dos sistemas de aquisição de dados. Em relação aos equipamentos comerciais, o CS-229 possui a faixa de leitura de 10 a 2500 kPA, de acordo com Campbell Scientific (sd). Por outro lado, entre as desvantagens, pode-se destacar a necessidade da determinação da curva de calibração para cada medidor e o fato dos efeitos da histerese, devido a ciclos de secagem e umedecimento, nem sempre serem considerados adequadamente.

2.2 Impressão 3D

2.2.1 Conhecimentos básicos

Há diversas técnicas distintas de impressão 3D, cada uma com suas vantagens e limitações. Nesse capítulo essas técnicas foram classificadas em sete categorias, de acordo com a sugestão da ASTM 52900 (2021). Essas categorias são: Binder Jetting/ Jateamento de Ligante (BJT); Direct Energy Deposition/ Deposição Direta de Energia (DED); Material Extrusion/ Extrusão de Material (MEX); Material Jetting Manufacturing/ Manufatura por Jateamento de Material (MJM); Powder Bed Fusion/ Fusão de Cama de Pó (PBF); Sheet Lamination/ Laminação de Folha (SHL); Vat Photopolymerization/ Fotopolimerização em Cuba (VPP).

Binder Jetting é um processo no qual uma camada de pó de material metálico, cerâmico ou plástico, é depositada em um recipiente com um rolo ou lâmina. Em seguida, um agente ligante é aplicado seletivamente para unir as partículas do pó na configuração desejada. Esse processo é repetido sucessivamente nas camadas posteriores, seguindo as informações do modelo digital tridimensional. Essa técnica, normalmente, implica na necessidade de etapas adicionais após a impressão para remover o pó do interior da peça impressa. A Figura 6 ilustra o processo descrito.

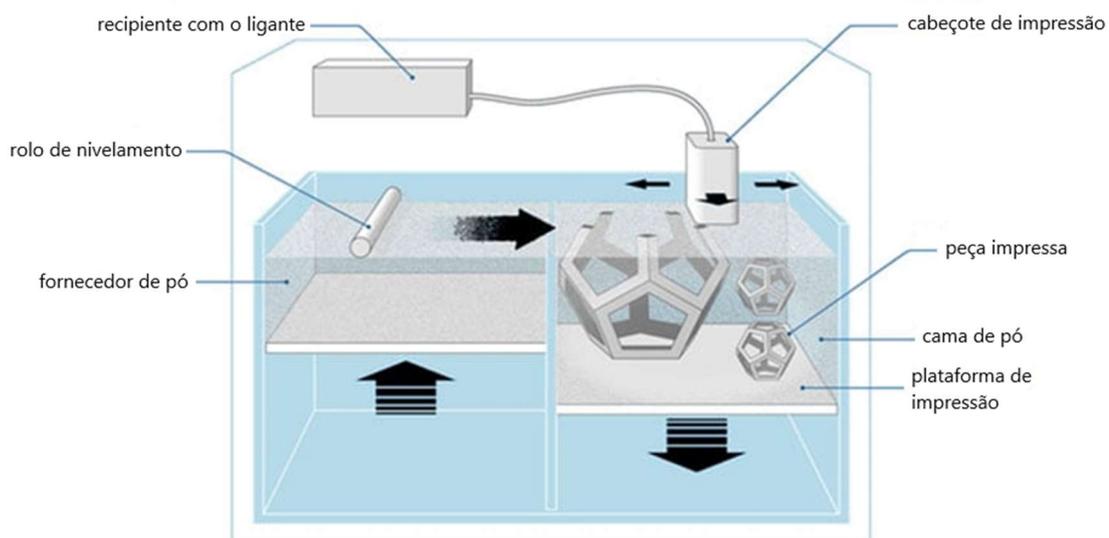


Figura 6 - Processo de impressão utilizando a técnica BJT. Adaptado de Alexandra (2024)

A técnica DED, representada na Figura 7, é um processo no qual material em estado de pó ou na forma de arame é depositado diretamente em uma peça em construção por meio de um bico de deposição. Simultaneamente, uma fonte de energia, como um laser ou feixe de elétrons, é empregada para fundir e solidificar o material recém-depositado, criando camadas sucessivas que compõem a peça final.

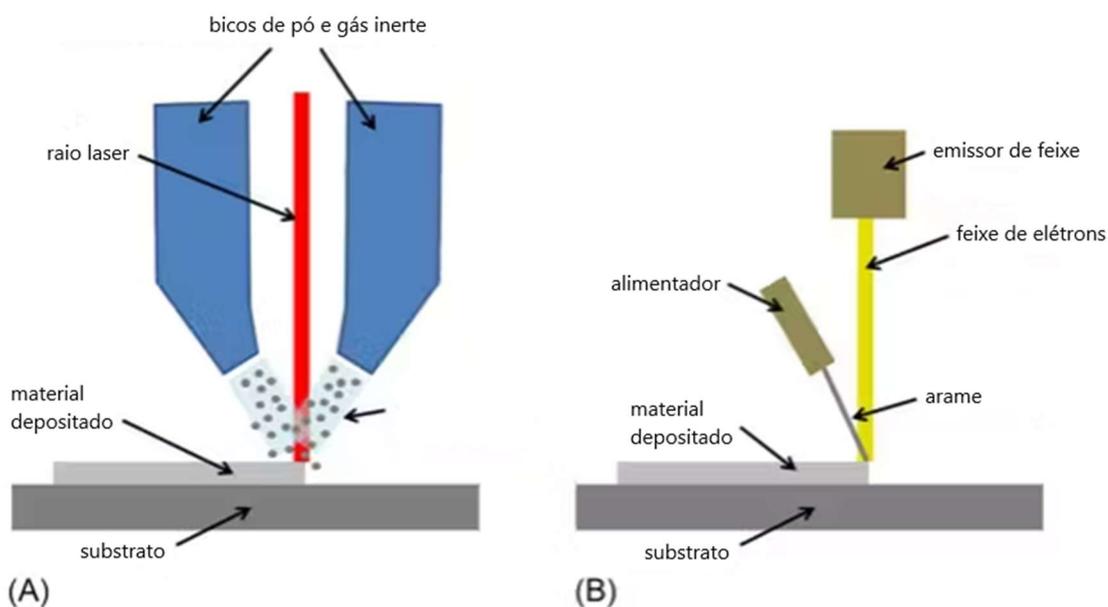


Figura 7 - Técnica de impressão DED. (A) Utilização de pó e laser. (B) Utilização de arame e feixe de elétrons. Adaptado de Xometry (2023)

Usualmente as impressoras MEX são subclassificadas de acordo com o material utilizado, ou a forma de aquecimento empregada. O processo ilustrado na Figura 8, utilizado no Fused Deposition Modeling (FDM), ou Fused Filament Fabrication (FFF)

envolve a deposição de camadas sucessivas de material termoplástico, através de um bico de extrusão. O filamento é aquecido até temperatura de fusão, permitindo que seja depositado de maneira controlada sobre uma plataforma. Ao resfriar, o material volta ao estado sólido, formando a estrutura desejada. Uma outra subclassificação da técnica MEX são as impressoras de cerâmica. O processo de impressão difere do FDM porque o material utilizado é depositado na plataforma sem a utilização de aquecimento.

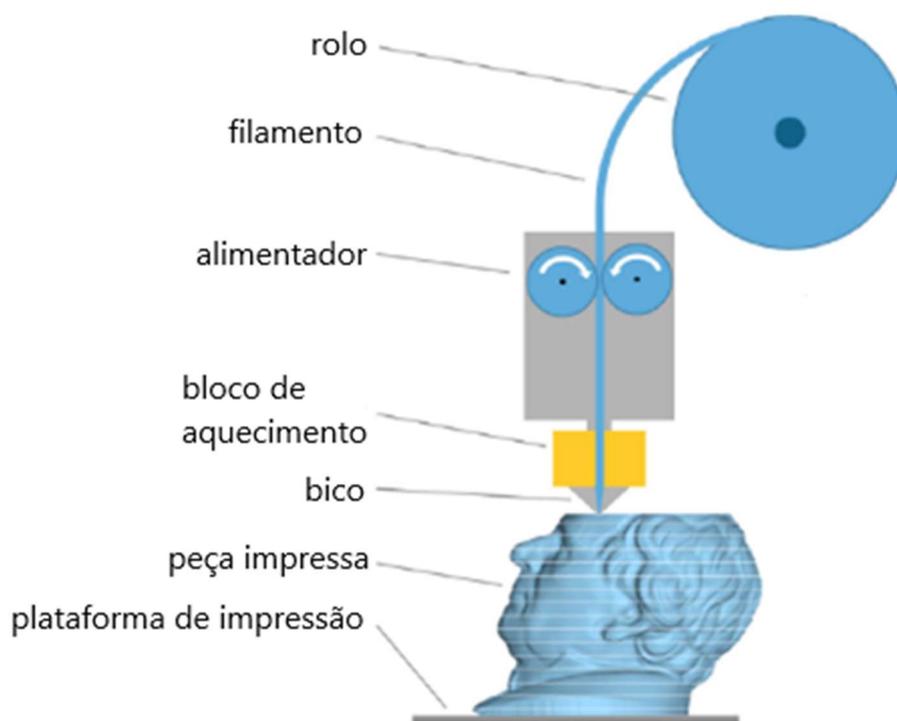


Figura 8 - Processo de impressão FDM. Adaptado de Löffler & Koch (2019)

A impressão MJM consiste na deposição de gotículas de material líquido fotopolimerizável por meio de cabeçotes de impressão em camadas sucessivas. Essas gotículas são solidificadas por exposição à luz ultravioleta. Essa técnica permite a utilização de múltiplos materiais em uma única impressão, possibilitando a criação de objetos com propriedades variadas. Usualmente, conforme representado na Figura 9, utiliza-se material diferente na criação dos suportes para facilitar a sua remoção.

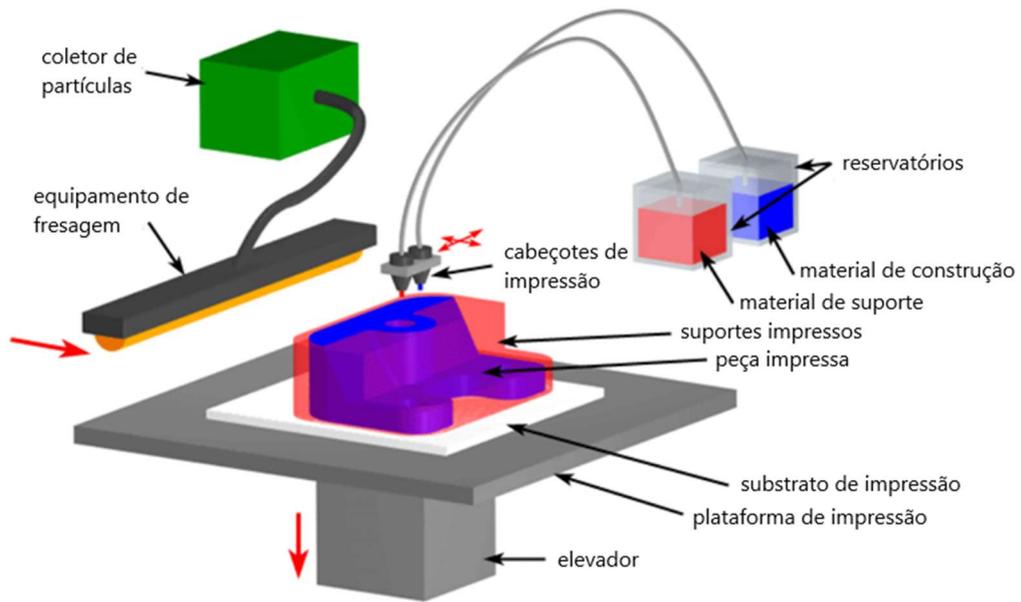


Figura 9 - Ilustração da impressão MJM. Adaptado de Ferrari et al. (2018)

O processo de impressão PBF envolve a fusão seletiva de camadas de pó de material, geralmente metálicos ou poliméricos, por meio de um laser ou feixe de elétrons. Cada camada é depositada sobre a plataforma de construção, de forma análoga ao BJT, com um rolo ou lâmina. O feixe de energia é direcionado para fundir seletivamente as áreas correspondentes ao modelo tridimensional. Esse processo é repetido camada por camada, resultando na formação de uma peça sólida, conforme representado na Figura 10.

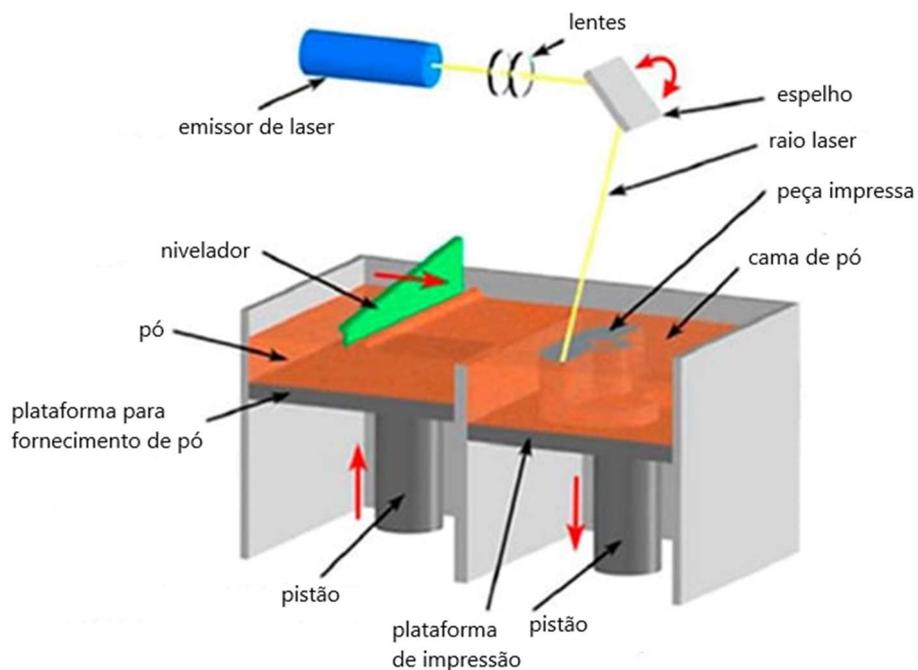


Figura 10 - Procedimento de impressão PBF. Adaptado de Santeccchia et al. (2020)

Na técnica SHL, conforme a Figura 11, a impressão é feita com a sobreposição e união de folhas bidimensionais para a construção de uma peça tridimensional. O material utilizado pode ser papel, plástico ou metais. As folhas são cortadas, por laser ou lâminas, no formato desejado e empilhadas, sendo unidas por meio de adesivos, calor ou pressão. Após a formação de todas as camadas, pode ser necessário o corte ou usinagem da peça final.

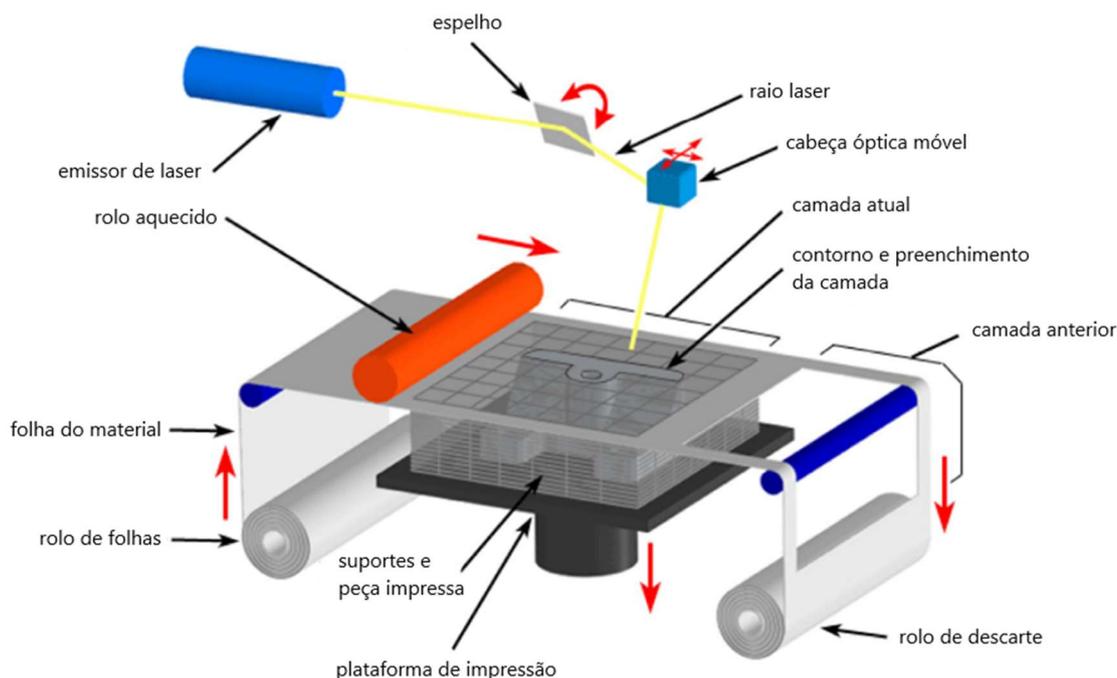


Figura 11 - Ilustração do processo de impressão SHL. Adaptado de Moritz & Maleksaeedi (2018)

A técnica VPP, assim como a MJM, consiste na solidificação de material fotossensível por meio de exposição seletiva a uma fonte de luz. Na impressão VPP a resina é mantida em um reservatório e utiliza-se uma plataforma móvel para limitar a espessura das camadas. As camadas podem ser adicionadas com a ascensão da plataforma, situação conhecida como Bottom-Up, ou descida, conhecida como Top-Down, dependendo da configuração da impressora, conforme representado na Figura 12. Essas impressoras normalmente são subclassificadas de acordo com a fonte luminosa. Stereolithography (SLA) é a técnica mais antiga de impressão 3D e utiliza um laser para solidificar a resina. Digital Light Processing (DLP), que é uma tecnologia desenvolvida após a SLA, utiliza a projeção de luz, o que resulta em uma velocidade de impressão superior a SLA. A Two-Photon Polymerization (2PP) é uma técnica ainda mais recente, nela emprega-se pulsos de laser de femtossegundos, o que faz com que essas impressoras apresentem acurácia extremamente elevada, porém baixa velocidade de impressão.

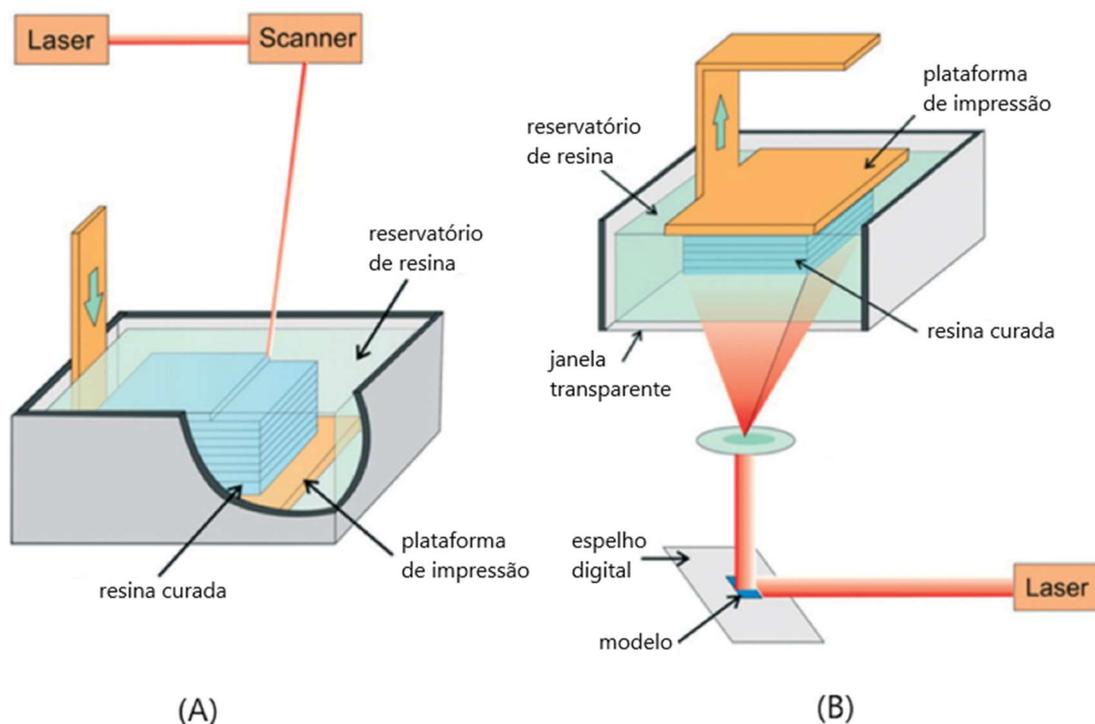


Figura 12 - Impressão VPP. (A) Técnica Top-Down. (B) Técnica Bottom-Up. Adaptado de Bhattacharjee et al. (2016).

Geralmente, o processo de impressão 3D segue quatro etapas: design do modelo digital; fatiamento do modelo digital; impressão da peça; procedimentos pós-impressão. As formas mais comuns de realizar a primeira etapa são por meio de códigos, design auxiliado por computador (CAD) ou a digitalização de imagens (DI) de uma amostra natural (obtida com tomografia eletrônica, microscopia ou técnica semelhante). Para fatiar o modelo, é necessário um software específico. Durante esta etapa, é importante ajustar adequadamente os parâmetros de impressão para obter o resultado desejado. As terceira e quarta etapas são dependentes da tecnologia de impressão e dos materiais utilizados.

Na manufatura aditiva, é possível usar diversos materiais distintos, dependendo da técnica empregada, conforme mencionado anteriormente. O MEX pode utilizar materiais cerâmicos, argamassas e concreto ou, quando há um processo de aquecimento, polímeros, como Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Polilático (PLA), Copoliéster (CPE) ou Poliestireno de Alto Impacto (HIPS). Por outro lado, o VPP, por exemplo, utiliza resinas fotossensíveis, enquanto o BJT utiliza pós cerâmicos, como areia de sílica ou solos naturais, metais ou polímeros e diferentes tipos de ligantes, como os com base furfúrica ou a base de furano, por exemplo.

A escolha adequada do material é essencial para a impressão de um modelo com as características desejadas. A Figura 13 mostra um corpo de prova de arenito de Berea recriada por Almetwally et al. (2021) usando diferentes técnicas e materiais. A amostra criada com a impressora Formlabs foi feita com a técnica VPP, o modelo da impressora ProJet 660 utilizou BJT e as demais amostras foram confeccionadas com impressoras MEX.

Material:	White PLA	White PLA	Transparent PLA	Transparent CPE	ABS	Black PLA	Transparent Resin	Sandstone
3D-printer:	Stratasys	Ultimaker	Ultimaker	Ultimaker	Ultimaker	Prusa I3	Formlabs	ProJet 660



Figura 13 - Amostra original (a esquerda) e réplicas impressas com diferentes técnicas e materiais. Almetwally et al. (2021).

Os pesquisadores não exploraram profundamente os efeitos dos diferentes materiais porque o foco principal era validar o método de pré-processamento proposto. Além disso, o uso de impressoras diferentes dificulta isolar o efeito de cada materiais. Todavia, eles mediram a porosidade e permeabilidade de todos os corpos de prova. Segundo os autores, a amostra original tinha uma porosidade de 20% e uma permeabilidade de 100 md. As impressões mais próximas do original foram os de resina transparente e os de arenito, com 23% de porosidade e 96 md de permeabilidade para o primeiro, e 22% e 110 md para o segundo. Ao comparar apenas os CPs confeccionadas com a impressora Ultimaker, os autores observaram uma diferença de 13% de porosidade e 20 md de permeabilidade entre as amostras impressos. Em ambos os casos, o CPE transparente apresentou os valores mais altos e o ABS os mais baixos.

2.2.2 Metodologia da Revisão Sistemática

A metodologia utilizada neste estudo baseia-se nas diretrizes propostas por Moher et al. (2009), conhecidas como PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). A revisão sistemática da literatura começa com a elaboração da pergunta de pesquisa. Posteriormente, devem ser escolhidos os bancos de

dados que serão utilizados e construída uma string de pesquisa que contemple a pergunta de pesquisa, sendo possível incorporar nesta fase critérios iniciais de eliminação, como idioma, tipo de documento ou ano de publicação.

Ao combinar o resultado dos diferentes bancos de dados e remover os documentos duplicados, obtém-se a amostra inicial. No próximo passo, é necessário definir critérios de seleção e ler os resumos para reduzir a amostra. Por fim, os documentos selecionados no processo anterior são lidos na íntegra; nesta etapa, pode haver tanto a eliminação de artigos, por motivos de acesso, idioma, não relevância ou outras razões, quanto a adição de documentos com base nas referências ou citações dos trabalhos selecionados.

Existem diferentes metodologias para a elaboração da pergunta de pesquisa, como o PICO, introduzido por Richardson et al. (1995), ou o CIMO, proposto por Denyer et al. (2008), por exemplo. Neste estudo optou-se pela primeira. Nessa metodologia o P representa a população (population) ou problema em estudo. O I refere-se à intervenção (intervention) ou exposição considerada. O C é a comparação (comparison), quando considerada relevante, e o O é o resultado (outcome) desejado.

Considerou-se que a população estudada é a tecnologia atual de impressão 3D, a intervenção realizada é a impressão de estruturas porosas, a comparação está sendo feita com solos ou rochas naturais, e o resultado esperado é a presença de poros/vazios similares. Assim, a revisão sistemática da literatura foi baseada na seguinte pergunta: "Qual é a eficácia da tecnologia atual de impressão 3D na criação de protótipos com estruturas porosas semelhantes aos solos e rochas naturais?".

No presente trabalho, a pesquisa foi limitada ao idioma inglês e baseada nos bancos de dados Scopus e Web of Science (WoS). Como a tecnologia de impressão 3D está em constante evolução e o foco está nas técnicas atuais, documentos com data de publicação anterior a 2014 foram descartados. Artigos de conferência também foram excluídos porque os dados relatados tendem a ser limitados.

Em ambos os bancos de dados, foi utilizado um mecanismo de pesquisa avançada para buscar as palavras escolhidas no título, resumo e palavras-chave. Analisando a pergunta de pesquisa, para a construção da string de pesquisa, foram identificados três elementos principais que deveriam estar necessariamente presentes: impressão 3D; Solo/Rocha; Poros. É importante complementar a string com possíveis sinônimos ou

diferenças na grafia. Conectando esses elementos com os operadores booleanos, as strings foram elaboradas conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Strings de busca usadas em cada banco de dados

Base	String
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((3d OR 3-d OR three) AND print*) OR TITLE-ABS-KEY ("additive manufacturing") OR TITLE-ABS-KEY ("rapid prototyping") AND TITLE-ABS-KEY (soil OR soils OR rock OR rocks) AND TITLE-ABS-KEY (pore OR porosity)
Web of Science	TS= (((3d OR 3-d OR three) AND print*) OR ("additive manufacturing") OR ("rapid prototyping")) AND (soil OR soils OR rock OR rocks) AND (pore OR porosity)

A pesquisa foi conduzida em junho de 2023. Na base de dados Scopus, foram obtidos 100 documentos, enquanto na Web of Science foram 115. Esses resultados foram exportados para o Mendeley, e as duplicatas foram removidas. Após essa etapa, o número total de documentos foi de 128. Para a seleção da amostra, foi adotado um único critério de eliminação. Desde que o houvesse a impressão de uma estrutura tridimensional semelhante a uma rocha ou solo, o estudo foi selecionado para ser lido em sua totalidade.

Após o critério de eliminação, a amostra foi reduzida para 71 artigos. Desses, 5 não puderam ser recuperados por questões de acesso. Durante o processo de leitura do texto completo, outros 11 artigos foram excluídos por não serem considerados relevantes, resultando em uma amostra final de 55 documentos. Um fluxograma descrevendo o processo PRISMA foi elaborado com o pacote R de Haddaway et al. (2020) e é apresentado na Figura 14.

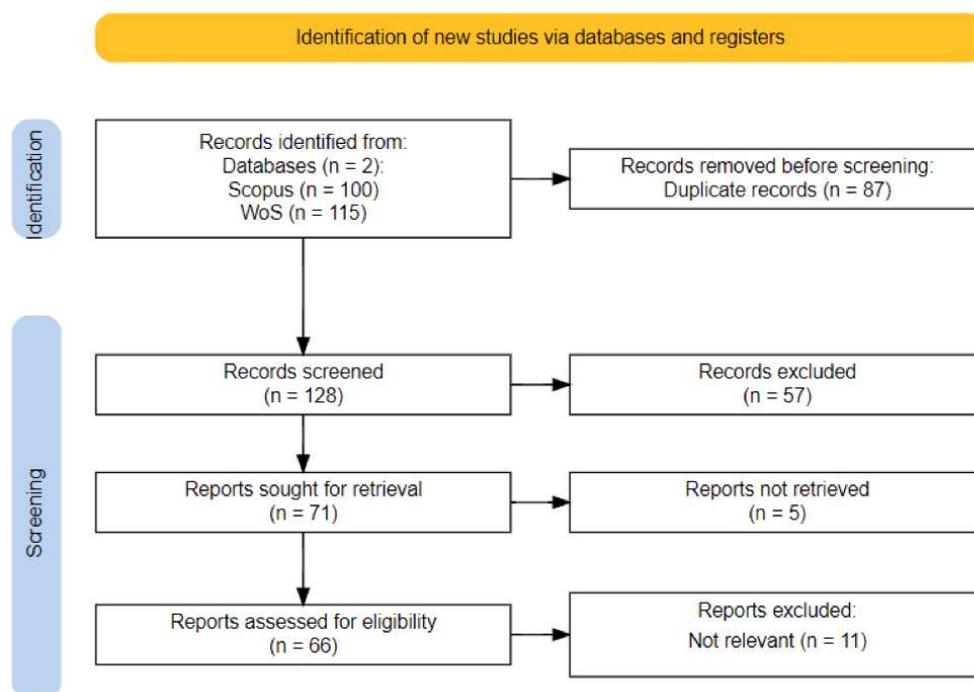


Figura 14 - Diagrama PRISMA.

2.2.3 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica foi realizada na primeira amostra, após a remoção das duplicatas, com o auxílio do bibliometrix, um pacote R desenvolvido por Aria & Cuccurullo (2017), e do software gratuito VOSviewer, de van Eck e Waltman (2010). Esse estudo verificou o número de artigos por ano, os países que os produziram e as principais revistas usando o bibliometrix, já o VOSviewer foi utilizado para a obtenção da rede de palavras-chave.

É possível observar na Figura 15 que há uma tendência de crescimento no número de artigos por ano. Isso indica que há interesse da comunidade internacional no assunto e que o tópico de pesquisa é promissor.

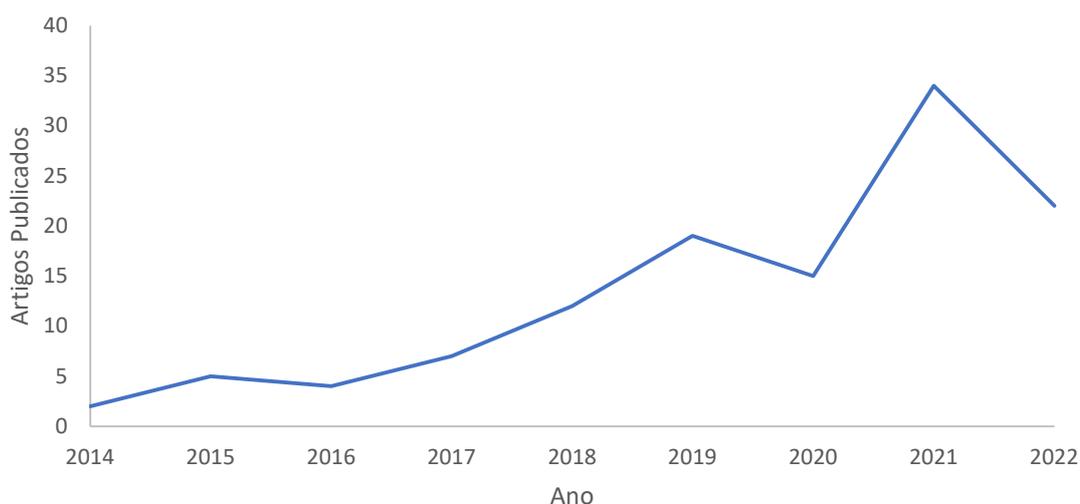


Figura 15 - Evolução da produção anual de artigos

A Figura 16a apresenta a produção científica dos países durante o período analisado. Observa-se que os principais produtores de estudos de impressão 3D de solos e rochas são a China e os Estados Unidos. Em relação à fonte desses documentos, conforme demonstrado na Figura 16b, "Transport in Porous Media" e "Petrophysics" são os principais periódicos na amostra analisada, correspondendo a 7% e 5%, respectivamente, das publicações.

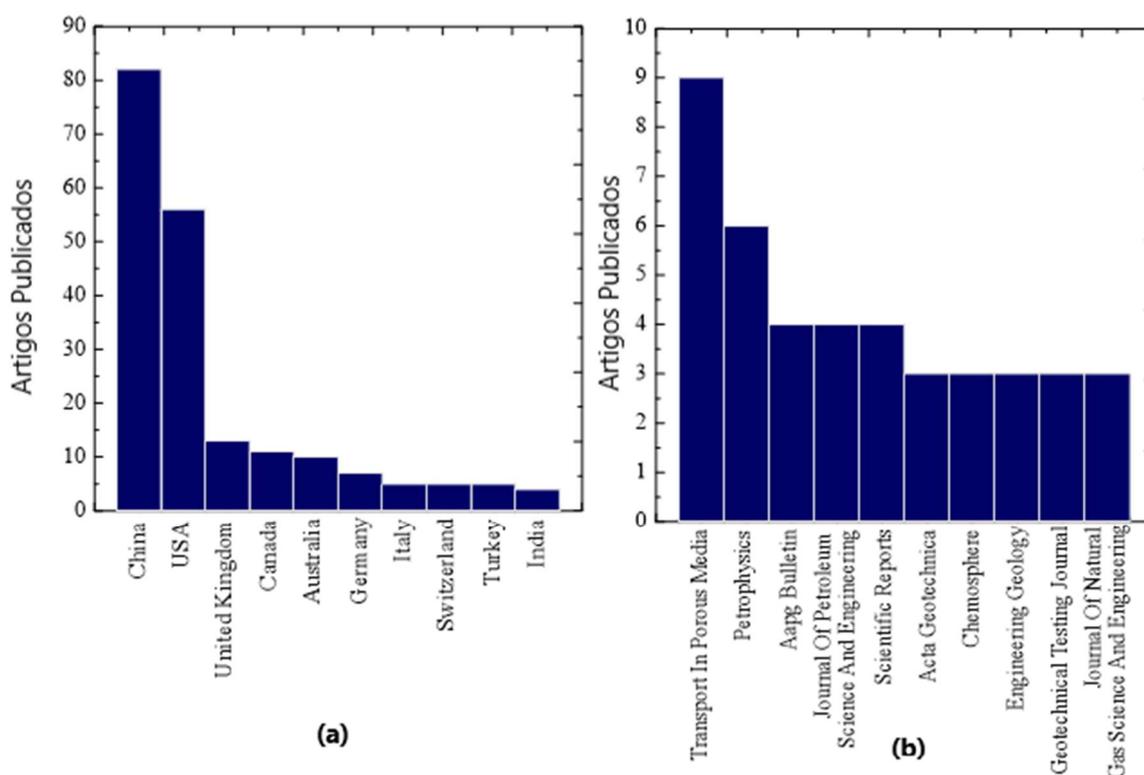


Figura 16 - Número de artigos publicados por país (a) e por fonte (b)

A análise da rede de palavras-chave, apresentada na Figura 17, foi realizada para obter uma compreensão preliminar das aplicações da impressão 3D na área geotécnica. O número mínimo de ocorrências de uma palavra-chave foi definido como cinco, e as palavras utilizadas na string de pesquisa foram excluídas. Das 1447 palavras-chave da amostra, apenas 44 atenderam aos critérios de seleção. O número de ocorrências de uma palavra-chave determina o tamanho dos círculos. A palavra-chave que mais apareceu foi "computerized tomography" (tomografia computadorizada), seguida por "porous materials" (materiais porosos) e "porous structure" (estrutura porosa). Essa rede também auxilia na compreensão das conexões entre as palavras-chave e as pesquisas.

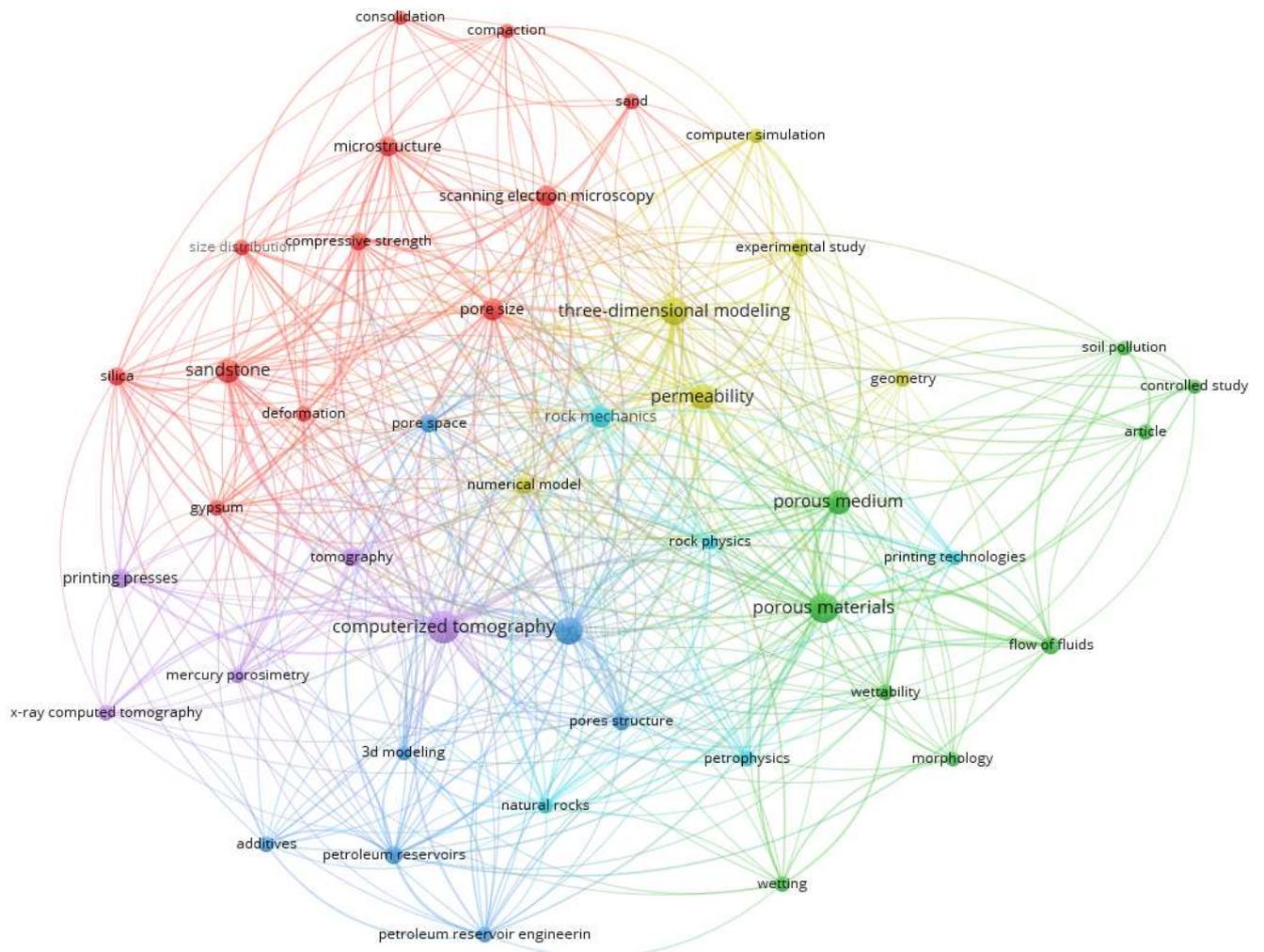


Figura 17 - Rede das palavras-chave mais recorrentes.

2.2.4 Discussão da amostra final

2.2.4.1 Apresentação dos dados extraídos

Após o processo de seleção, a amostra final foi dividida em estudos de rochas ou estudos de solos, e os dados considerados mais relevantes foram extraídos dos artigos. Essas informações foram então resumidas na Tabela 3 para rochas e Tabela 4 para solos.

Tabela 3 – Informações dos artigos de rocha

Autor	Modelo Digital	Tec. (a)	Material	Resolução (μm)		Poros/Vazio (μm)		Porosidade (%)		Estudo (b)
				xy	z	Min.	Médio / Maioria	Original /Digital	Impresso	
Hasiuk et al. (2021)	-	MEX	- Argila Limoges - Argila ISU	-	100	-	< 0,1	0	1-39 10-36	I
Song et al. (2022)	Imagem digitalizada	VPP	- Resina	2	5	4	\approx 12,5	12.9	10	II
Almetwally et al. (2021)	Imagem digitalizada	VPP MEX BJT	- PLA - CPE - ABS - Resina - Arenito	-	-	-	-	20	12-28	I
Kong et al. (2021b)	Imagem digitalizada	BJT VPP	- Pó de gipsita - Areia sílica - Resina	800 1000 140	100 280- 500 25-100	15-20 15-20 15-20	20-25 20-25 20-25	20	-	I
Song et al. (2020)	Imagem digitalizada	BJT PBF	- Areia sílica e ligante furfurílico - Pó de gipsita e ligante furfurílico - Grãos de areia revestidos de sílica e ligante fenólico	-	200 100	0-5 0-10	18,81 40,17	24,6	38,2 47,4	III
Zhang et al. (2022)	-	BJT	- Areia sílica e ligante de furano	-	260- 380	-	-	-	24	III
Dimou et al. (2022)	Código Python (estocástico)	VPP	- Resina	140	25-100	140	-	-	-	II
Hodder et al. (2021)	-	BJT	- Areia sílica e ligante furfurílico	-	-	-	-	-	35-55	I
Kong et al. (2018a)	CAD	BJT	- Pó de gipsita	127 dpi	200	3,2	11,3	0	5,8	III

Almetwally et al. (2021)	Imagem digitalizada	BJT	- Pó de gipsita e ligante acrílico	-	3	-	59,1 digital 36,5 impresso	20	22	II
Perras & Vogler (2019)	Imagem digitalizada	BJT	- Areia com furano e ligante de silicato - Grãos cerâmicos com ligante de silicato	-	-	-	-	-	-	III
Head et al. (2016)	Imagem digitalizada	VPP MJM	- Resina - Polímero	-	25 16	600 200	-	variada	variada	II
Wang et al. (2022)	-	BJT	- Areia sílica (grãos variados) e ligante de furano	300 dpi	200 capaz 200-400 usado	-	-	-	40,6-49,4	III
Almetwally et al. (2020)	Imagem digitalizada	BJT	- Pó de gipsita	-	-	-	-	20	22	II
Santiago (2022)	-	BJT	- Areia sílica com ligante de furano	-	-	-	-	-	44 Não tratado 27 tratado	II III
Gomez et al. (2019)	-	BJT	- Areia sílica e ligante furfurílico	-	-	-	-	-	35,7	II III
Ju et al. (2017)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	600 dpi	16-30	16	-	-	-	III
Hodder et al. (2022)	-	BJT	- Areia sílica ligante orgânico	-	350	-	-	-	44-51 rolo menor 40-45 rolo maior	III
Kong et al. (2019a)	Imagem digitalizada	BJT	- Areia sílica e ligante furfurílico	-	220	-	9-33	-	36-48	I
Kong et al. (2019b)	CAD	BJT	- PXL e diferentes infiltrantes	-	100	< 0,01	≈ 10	-	0,15-21,20	II
Elsayed et al. (2021)	Imagem digitalizada	-	- Resina	-	-	-	-	21,1 16,9-17,7	6.5 5,2-12,2	I
Kong et al. (2018b)	CAD	BJT	- Pó de gipsita	127 dpi	200	-	4-10	-	32,7	I
Lesueur et al. (2021)	Imagem digitalizada	MEX	- PLA	-	-	-	-	-	-	III
Lesueur et al. (2023)	Imagem digitalizada	MEX	- PLA	-	-	-	-	-	-	III
Silva et al. (2023)	Algoritmo e Blender	BJT	- Pó cerâmico	-	-	-	-	-	-	II
Ju et al. (2019)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	100	100	-	-	-	-	III

Ju et al. (2018)	Imagem digitalizada	-	- Polímero	100	100	-	-	-	-	III
Ishutov et al. (2021)	Imagem digitalizada	VPP	- Resina	-	1	5	-	-	-	II
Ibrahim et al. (2021)	Imagem digitalizada	MJM VPP	- Polímero - Resina	30 100	30 25	-	-	3,3-12,1	2,8-12,3	II
Wu et al. (2022)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	-	14	-	-	-	-	III
Ju et al. (2022)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	-	16	-	450-600 ≈ 300 throat	27	24-29	II
Hasiuk (2019)	CAD	PBF BJT	- Pó de alumínio - Pó de aço - Pó cerâmico - Areia sílica - Pó de gipsita	-	-	variado	variado	0	0,7-5,2 1,7-3,2 0,9-1,5 36-51 5-36	II
Cruz-Maya et al. (2022)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	-	16	-	-	-	14 com cimentação 41-43	II
Jouini et al. (2021)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	-	30	-	-	12.4-17.2	11,9-16,7	II
Hasiuk et al. (2018)	CAD	MJM	- Polímero	1600 dpi	16	-	-	0-1,3	0,2-1,9	I
Ishutov et al. (2017)	Imagem digitalizada	MJM	- Polímero	132 (c)	16	180 digital	≈ 100 impressa	21,3	14	I
Li et al. (2021)	Imagem digitalizada	VPP	- Resina	0.5	-	5	≈ 18	20,3	17,8	II
Huang et al. (2016)	-	MEX	- ABS	-	-	-	-	0 -	6 24	III
Dande et al. (2021)	CAD	MEX	- ABS	-	160	nenhum	-	0	6 24	III
Ishutov (2019)	Imagem digitalizada	VPP	- Seis diferentes tipos de resina	-	50	-	30,4	12,7	0,5-12,4	II
Goral et al. (2020)	Imagem digitalizada	VPP	- Resina	-	nano	0,1	≈ 0.5	4,5 efetiva 7,2 total	-	I
Ishutov et al. (2017)	Imagem digitalizada	BJT	- Gipsita calcinada	150	100	150	15,5-15,8	13	28-37	II
Wollner et al. (2018)	Modelo auxético teórico	VPP	- Resina	-	-	-	-	-	53	III
Schafrik et al. (2015)	Distribuição Rosine-Rammler /PFC-3D/CAD	MEX	- ABS	-	254	-	-	46	-	II

Song et al. (2021)	Imagem digitalizada	MJM VPP	- Polímero - Resina	-	30 60 20	-	-	24,8 24,8 25,6 31,8 10,0	18,6 20,2 14,3-18,4 20,6 7,4	II
Ishutov et al. (2018)	Imagem digitalizada	VPP	- Resina	400 (c)	25	40-300 obstruído 400 livre	-	12,7	2-12 antes da limpeza 8,4-12,8	I
Anjekar et al. (2020)	Imagem digitalizada	MEX	- HIPS	-	250	-	-	26	25-33	I
Wu et al. (2022)	CAD	-	-	-	-	-	-	-	8-36	II III

a – Tecnologia da impressora (Tec.) foi classificada de acordo com a ASTM 52900 (2021). Em alguns casos, a classificação pode não ter sido a mesma da utilizada pelos autores.

b – As pesquisas foram classificadas de acordo com o foco na análise estrutural (I), transporte (II) ou mecânica (III)

c – Diâmetro mínimo do poro, determinado pelo autor.

Tabela 4 - Informações dos artigos de solo

Autor	Modelo Digital	Tec. (a)	Material	Resolução (µm)		Poro/Vazio (µm)		Porosidade (%)		Estudo (b)
				xy	z	Min.	Médio/Maioria	Original/Digital	Impresso	
Dal Ferro & Morari (2015)	Imagem digitalizada	MJM	- Resina orgânica	29	80	-	319	11,4 3,6	11,0 2,6	I
Bedell et al. (2021)	Script Lua	MEX	- PLA	-	80-200	-	-	30,4	29,9	I
Lamandé et al. (2021)	Imagem digitalizada	MJM	- Resina	-	29	-	932 1080	-	3,7 1,4	II
Tang et al. (2018)	CAD	-	- Pó de barita	-	-	-	0,1-0,2	-	-	III
Ferrari et al. (2022)	-	MEX	- Solo argiloso	-	-	-	-	-	≈ 50	I
Bacher et al. (2015)	Imagem digitalizada	MEX PBF MJM PBF VPP	- ABS - Alumide - Polímero - Poliamida - Resina	-	300 400 200-300 300 300	1720	480 1350 1480 1780 1670	-	-	II
Kitao et al. (2021)	Modelo numérico (DEM)	VPP	- Resina	-	100	-	-	-	-	II

a – Tecnologia da impressora (Tec.) foi classificada de acordo com a ASTM 52900 (2021). Em alguns casos, a classificação pode não ter sido a mesma da utilizada pelos autores.

b – As pesquisas foram classificadas de acordo com o foco na análise estrutural (I), transporte (II) ou mecânica (III)

2.2.4.2 Objeto de estudo dos artigos

Foi observada uma grande predominância de estudos focados em rochas (87,3%), enquanto apenas 12,7% estudaram solos. Acredita-se que uma das principais razões para essa diferença são os maiores incentivos, especialmente econômicos, para os estudos de rochas. A indústria do petróleo é uma importante contribuinte para esses incentivos, como pode ser visto na análise bibliométrica.

A fonte da maioria dos artigos é a *Transport in Porous Media*, seguida por *Petrophysics*, *AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Bulletin* e *Journal of Petroleum*. Enquanto a primeira está apenas indiretamente relacionada à indústria do petróleo, as outras três estão diretamente ligadas. Ao observar a rede de palavras-chave mais recorrentes, mostrada anteriormente na Figura 17, também é possível notar a ocorrência de palavras-chave associadas a estudos de petróleo, como “petrophysics” (petrofísica), “petroleum reservoirs” (reservatórios de petróleo) e “petroleum reservoirs engineering” (engenharia de reservatórios de petróleo).

Os artigos sobre solo, por outro lado, estavam mais focados no estudo da estrutura impressa, com alguns também analisando seu efeito nas propriedades de transporte. Também foi observado que a função do solo na produção de alimentos desempenha um papel importante no desenvolvimento do campo.

Bedell et al. (2021), por exemplo, projetaram um *toolchain* de código aberto que cria uma estrutura de solo poroso com base em modelos matemáticos. Um de seus objetivos era a capacidade de simular um sistema de raízes no modelo. No entanto, apesar de conseguir atingir esse objetivo, o tamanho dos grãos do modelo acabou sendo limitado a uma faixa entre areia grossa e cascalho fino.

Lamandé et al. (2015) é um outro artigo focado em solos. Eles estudaram a estrutura de vazios de solos regularmente arados (camada superficial) e as camadas não perturbadas abaixo (subsolo) e tentaram recriá-las usando manufatura aditiva. Os autores compararam as estruturas das amostras originais, artificiais (feitas com outras técnicas) e impressas. Foram analisados parâmetros, como permeabilidade de Darcy, permeabilidade efetiva e difusão de oxigênio. Lamandé et al. (2015) concluíram que os corpos de prova

impressos eram capazes de reproduzir adequadamente espécimes com predominância de macroporos contínuos.

Tang et al. (2018) foram os únicos, na amostra final de artigos de solo, com um foco maior no comportamento mecânico. Usando uma pasta de barita à base de cera, os autores tentaram imprimir em 3D um modelo de um talude para simular um deslizamento de terra. Eles conseguiram obter uma faixa ampla de resistência à compressão. Tiveram sucesso também em reproduzir as estruturas de planos de fraqueza, concluindo que a técnica tem um grande potencial para controlar propriedades de modelos 3D, como os campos de tensão e percolação.

2.2.4.3 Elaboração do modelo digital

A primeira informação extraída dos artigos para construir a Tabela 3 e a Tabela 4 foi o método de elaboração do modelo digital. As técnicas empregadas foram divididas nas três categorias principais mencionadas anteriormente: baseadas na digitalização de imagens (DI), criadas com um código ou projetadas com software CAD. Contudo, em nem todos os documentos foi possível identificar a técnica empregada. Pode-se observar na Figura 18 que a maioria optou por projetar seus modelos digitalizando uma amostra natural, enquanto houve uma pequena diferença entre os outros dois métodos.

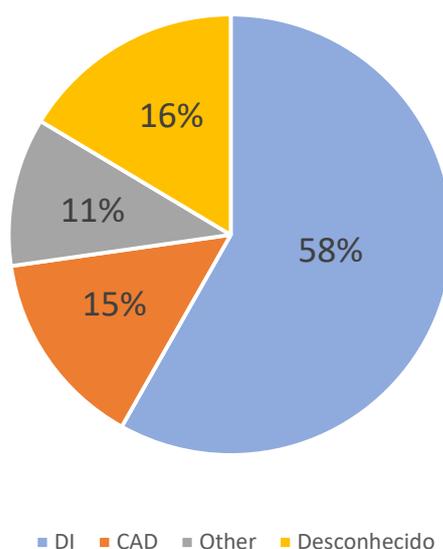


Figura 18 - Métodos utilizados na elaboração do modelo digital

A utilização de um software CAD tende a ser uma maneira fácil e rápida de projetar modelos digitais simples. No entanto, à medida que os modelos se tornam mais complexos, como as estruturas naturais de solos e rochas, torna-se mais desafiador projetá-los com essa técnica. Kong et al. (2019b) e Dande et al. (2021) são exemplos de artigos que optaram pelo projeto com um software CAD. Ambos fabricaram corpos de prova sólidos usando diferentes técnicas de impressão.

Kong et al. (2019b) utilizaram uma impressora BJT. Eles estudaram a estrutura e algumas propriedades das amostras impressas, como porosidade e permeabilidade. Vale mencionar que, como a impressão é feita unindo materiais em pó, as amostras criadas com esses métodos de impressão têm uma porosidade inerente, devido ao próprio método. O estudo variou os infiltrantes utilizados e as condições de revestimento dos grãos. Kong et al. (2019b) observaram que os infiltrantes afetam principalmente os nanoporos e o revestimento não impacta significativamente a estrutura.

Dande et al. (2021) também optaram pelo design CAD. Eles usaram a técnica MEX para imprimir dois tipos de modelos. O primeiro era um cubo sólido, enquanto no segundo adicionaram uma malha simétrica de furos a um cubo semelhante. É interessante destacar que impressoras MEX também têm uma porosidade inerente, principalmente devido ao vazio entre camadas. Apesar do primeiro modelo digital não possuir vazios, os autores observaram uma porosidade de 6% em seu modelo impresso.

Além de modelos complexos, o design numérico também é a técnica mais adequada quando são esperadas modificações significativas no modelo. Dimou et al. (2021) queriam determinar a viabilidade de micromodelos impressos em 3D, como mencionado anteriormente. Para construir diferentes estruturas e testar a viabilidade, os autores desenvolveram um modelo usando Python, sendo possível, com esse algoritmo estocástico, a criação de infinitos micromodelos diferentes, mantendo as propriedades desejadas constantes.

Em outros casos, a tecnologia de impressão 3D é usada apenas para validar um modelo numérico, tornando obrigatório o uso desses modelos. Wollner et al. (2017) propuseram um modelo auxético teórico, com base na configuração do espaço poroso observada em rochas. Para verificar essa estrutura, criaram um modelo físico usando uma impressora 3D e analisaram o coeficiente de Poisson e o efeito de fluidos nessa estrutura.

2.2.4.4 Técnica de impressão utilizada

As técnicas de impressão empregadas foram a segunda informação analisada. Binder Jetting, Vat Photopolymerization, Material Jetting e Material Extrusion, nessa ordem, foram as mais utilizadas. Powder bed fusion também foi utilizada, mas apenas em 5% dos estudos. Não foram encontrados relatos do uso de Direct Energy Deposition ou Sheet Lamination. A Figura 19 mostra em quantos artigos cada uma das técnicas de impressão 3D foi empregada.

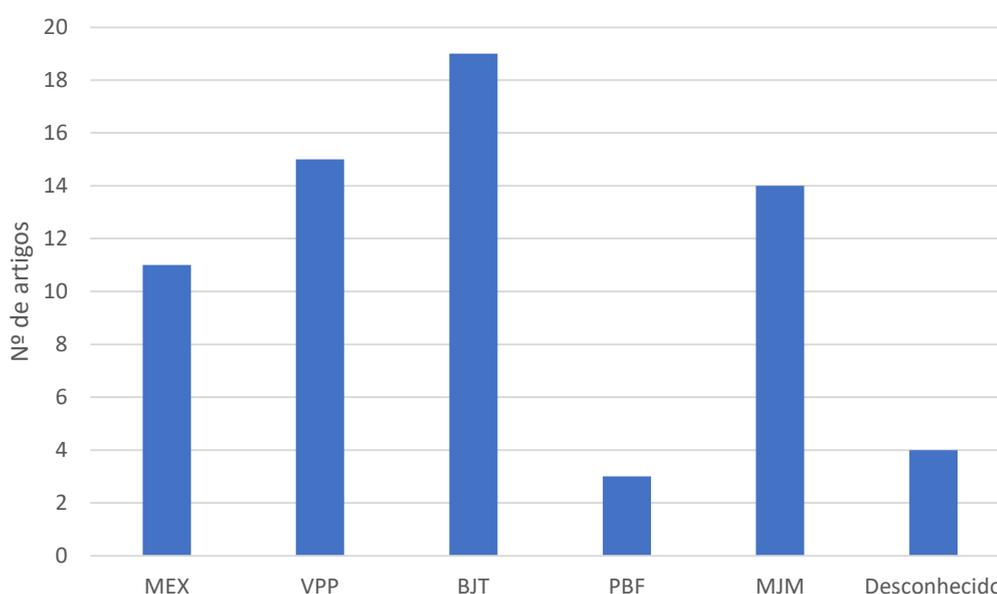


Figura 19 - Técnicas de impressão utilizadas

Kong et al. (2021b) utilizaram impressoras BJT e VPP para replicar rochas naturais e compararam as duas técnicas. De acordo com eles, BJT é adequada para imprimir moldes em grande escala. Algumas de suas vantagens são alta velocidade de impressão e custo relativamente mais baixo. Além disso, essa técnica permite uma variedade maior de materiais, sendo inclusive possível utilizar materiais naturais. Isso resulta em réplicas que são similares aos componentes de constituição da rocha natural, tornando-as adequadas para experimentos geomecânicos. Alguns inconvenientes desse método incluem menor precisão de impressão, etapas pós-processamento mais complexas e a ocorrência de poros oclusos, preenchidos pelo pó. O principal desafio desse método é melhorar a semelhança das propriedades petrofísicas e de transporte da peça impressa com a amostra natural

As principais vantagens do VPP, conforme relatado por Kong et al. (2021b), foram sua melhor resolução e capacidade de fabricar estruturas complexas, tornando essa técnica adequada para estudos de fluxo de fluido em fase única. A desvantagem desse método é a limitação no tipo de material, resultando em barreiras em modelagem de fluxos mais complexos e experimentos relacionados a análises tensão-deformação.

O processo de fabricação utilizado em MJM e VPP possui muitas semelhanças. Basicamente, ambos os métodos consistem na exposição controlada de um material fotossensível a uma fonte de luz que o solidificará. Por essa razão, ambas as técnicas tendem a ter as mesmas vantagens e desvantagens quando comparadas a outros métodos de impressão 3D. A principal vantagem que o MJM tem sobre o VPP é a possibilidade de usar diferentes materiais simultaneamente. Consequentemente, a primeira técnica permite a criação de amostras mais heterogêneas e a simplificação da etapa de remoção de suporte.

2.2.4.5 Materiais empregados

O material utilizado é outro dado importante, pois afeta as características do modelo impresso. Como mencionado, um dos principais fatores para o BJT ser a técnica mais utilizada é sua capacidade de usar pós arenosos e argilosos como material base. Segundo Song et al. (2020), polímeros, usados em outras técnicas, apresentam grande deformação plástica e propriedades superficiais indesejadas, tornando-os inadequados para reproduzir comportamento mecânico usual de solos e rochas. No entanto, algumas dessas propriedades podem não ser relevantes para um estudo específico, e um material capaz de alcançar uma acurácia maior pode ser mais o mais indicado. Para isso, é importante escolher materiais e técnicas de impressão adequados para cada análise.

Hasiuk (2019) usou BJT e PBF para imprimir cilindros sólidos, com dois tamanhos diferentes. Como mencionado anteriormente, corpos de prova criados com BJT têm uma porosidade inerente, em impressoras PBF ocorre fenômeno similar. O estudo se concentrou nas propriedades macroscópicas de amostras impressas com diferentes pós. O autor observou que o material pode ter um grande impacto na porosidade e que o tamanho do corpo de prova também pode afetar a estrutura. Peças feitas com pó de alumínio e pó cerâmico foram os que apresentaram menor porosidade, 0,73% e 0,91%, respectivamente. Vale mencionar que esses foram os únicos criados com PBF. Das

amostras feitas com BJT, o aço mostrou a menor porosidade (1,71%). Nos feitos com gipsita e sílica, obteve-se uma porosidade muito superior aos demais, 33,33% e 41,00%, respectivamente.

Perras & Vogler (2019) exploraram o comportamento de compressão e tração de corpos de prova impressos em 3D e os compararam com arenitos naturais. Eles usaram areia com ligantes de furano, areia com ligante de silicato e grãos cerâmicos com ligante de silicato. Os materiais foram comprados em duas empresas diferentes, totalizando quatro combinações. As impressões de areia-furano se comportaram mais semelhantes aos arenitos naturais menos competentes. Os corpos de prova cerâmicos com ligante de silicato mostraram um desenvolvimento das fraturas não comumente observado em amostras naturais, tanto na compressão quanto na tração. Os outros materiais, de maneira geral, apresentaram um comportamento de fratura semelhante às rochas naturais.

Conforme mencionado, nas técnicas VPP e MJM não há uma grande diversidade de materiais. Ao contrário da PBF, MEX e BJT, nos artigos encontrados o material utilizado não foi reportado em função de sua composição. Na maioria dos casos, mencionou-se que o material era uma resina, ou polímero, e a especificação desse material foi feita com base no nome comercial do produto. No entanto, apesar de auxiliar na identificação, no presente trabalho, optou-se por suprimir da Tabela 3 e da Tabela 4 essa classificação comercial.

2.2.4.6 Resolução, acurácia e capacidade das impressoras

Ao analisar a resolução das impressoras usadas nos artigos, o objetivo principal da revisão sistemática pôde ser alcançado. Todavia, muitos dos estudos não relataram um valor, como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3. Além disso, os valores reportados, em sua maioria, foram os informados pelos fabricantes das impressoras. Ishutov et al. (2017) e Ishutov et al. (2018) foram os únicos que descreveram um processo para determinar o diâmetro mínimo dos poros que as impressoras utilizadas eram capazes de criar. As impressoras do tipo BJT são as únicas que apresentam uma unidade própria de resolução, o dpi, sigla de droplets per inch, que pode ser traduzido para gotas por polegada.

Como majoritariamente se utilizou informações diretamente de fontes comerciais, em alguns casos há o uso, aparentemente, inadequado dos termos exatidão (accuracy),

resolução (resolution) e precisão (precision). Segundo o INMETRO (2012), exatidão consiste na concordância entre um valor medido e o valor exato, resolução é a menor variação perceptível da grandeza medida e precisão refere-se a concordância dos valores obtidos através de repetidas medições. Observou-se recorrentemente a utilização do termo exatidão e resolução para expressar a menor dimensão possível da peça impressa, sendo o primeiro termo utilizado no plano xy e o segundo no eixo z.

Houve relatos de que a utilização de impressoras com melhores resoluções pode resultar na diminuição significativa da velocidade de impressão e eventualmente até inviabilizar o estudo. Li et al. (2021) usaram uma impressora com resolução de 0,5 μm e levaram 2,5 horas para imprimir um cubo de 0,5 mm. Para imprimir um cilindro sólido com 1 mm de diâmetro e 2 mm de altura em uma impressora com resolução de 1 μm , Ishutov et al. (2021) relataram que seriam necessárias cerca de 24 horas. No entanto, ao usar uma técnica específica de simplificação, eles conseguiram reduzir o tempo de impressão de 24 para 5 horas.

Outro dado extraído dos artigos, para entender os limites da tecnologia atual de impressão 3D, foi o tamanho dos poros ou vazios. Vale mencionar que, enquanto alguns relataram o tamanho do poro, outros relataram o tamanho da garganta (throat). Para o propósito deste artigo, uma ideia geral foi suficiente, e a diferença entre esses casos foi considerada como não significativa. Por esse motivo, também se optou por representar o tamanho médio e mais frequente na mesma coluna, de acordo com o que foi apresentado.

Em alguns casos os poros/vazios reportados na Tabela 3 e na Tabela 4 não estavam presentes no modelo digital e ocorreram devido a técnica de impressão utilizada, conforme discutido anteriormente. Hasiuk et al. (2021), por exemplo, imprimiu um modelo digital maciço com uma impressora de cerâmica. Contudo, observaram vazios não intencionais na ordem nanométrica.

A diferença de porosidade entre os modelos digitais e impressos foi escolhida para medir a eficácia do processo. As quatro técnicas mais utilizadas conseguiram pequenas diferenças. Bedell et al. (2021) obteve 0,5% com MEX, Song et al. (2022) 2,9% usando VPP, Almetwally et al. (2021) 2% empregando BJT e Ju et al. (2022) 3% com MJM. É importante observar que como as amostras impressas têm porosidade mínima relacionada

ao processo de impressão, de maneira geral, pesquisas que utilizaram modelos digitais mais porosos observaram menor diferença de porosidade com a peça impressa.

Hasiuk et al. (2021), mencionado anteriormente, utilizaram dois tipos de argila para impressão. Além de analisar os poros impressos, eles também estudaram as porosidades das amostras. Com a argila de Iowa (ISU clay), obtiveram uma porosidade inicial, no modelo impresso, de 36%, e após a etapa de pós-impressão (neste caso, queima), conseguiram reduzir a porosidade para 10%. Com a segunda argila (Limoges clay), os mesmos autores tiveram uma porosidade inicial mais alta (39%), mas obtiveram uma porosidade final (1%) mais próxima do modelo digital (0%).

Enquanto algumas técnicas, como BJT e MEX, tendem a imprimir modelos com porosidade maior do que o modelo digital, outras, como VPP, criam amostras com porosidade menor, como mostrado por Li et al. (2021) e Ishutov (2019). A razão para essa diferença está no processo de impressão. Amostras com pequenos vazios tendem a reter material indesejado dentro delas. Ishutov et al. (2018) relataram que os poros de suas amostras com diâmetros inferiores a 300 μm estavam inicialmente obstruídos, após a lavagem das amostras, a porosidade dos corpos de prova aumentaram em 6%. Por essas razões, é extremamente importante realizar um processo de pós-impressão adequado.

2.2.4.7 **Aplicações na geotecnia**

Por fim, para entender as aplicações da manufatura aditiva em estudos de solos e rochas, os documentos foram classificados em três categorias de acordo com a análise feita na amostra impressa. As categorias adotadas foram estrutura, transporte e mecânica. Considerou-se, inicialmente, que qualquer artigo que estudasse a estrutura da amostra impressa (geometria dos poros, porosidade ou granulometria, por exemplo) se encaixaria na primeira categoria. No entanto, a grande maioria dos documentos seria classificada nessa categoria. Para evitar essa redundância de dados, um artigo foi classificado como análise estrutural apenas se não se enquadrasse nas outras duas categorias. De acordo com a Figura 20, observou-se que não há uma preferência significativa ao comparar os três grupos de análise, exceto por uma leve predominância nos estudos de transporte.

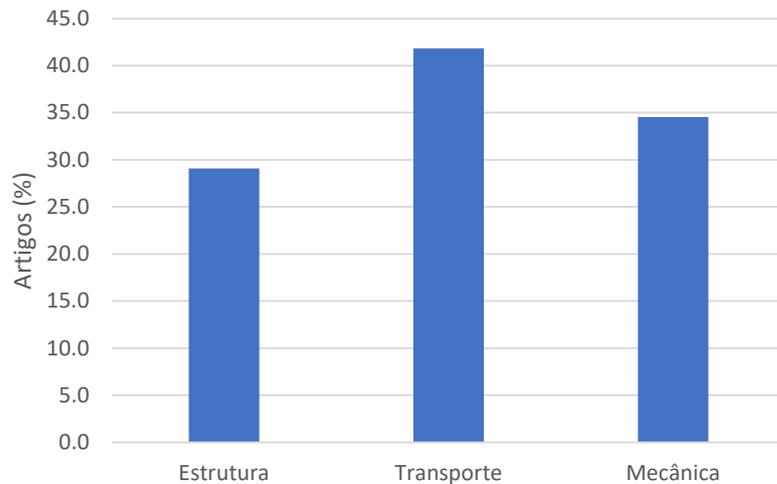


Figura 20 - Divisão percentual dos artigos em função do foco de estudo

A análise da combinação de modelos digitais e técnicas, representada na Figura 21, deixa evidente que os modelos criados com digitalização de imagens favoreceram VPP e MJM, corroborando com o que foi apresentado nesse capítulo. Essa preferência pode ser explicada pela melhor resolução fornecida por essas tecnologias. Em relação às outras duas categorias (CAD e Código), considerou-se o tamanho da amostra insuficiente para observações adequadas. No entanto, os dados parecem concordar que modelos CAD, devido suas estruturas mais simples, tendem a ser menos exigentes em relação a precisão, o que favorece a técnica BJT. Por outro lado, modelos da categoria Código, possuem em sua maioria estruturas complexas, sendo VPP e MEX mais utilizados que o BJT.

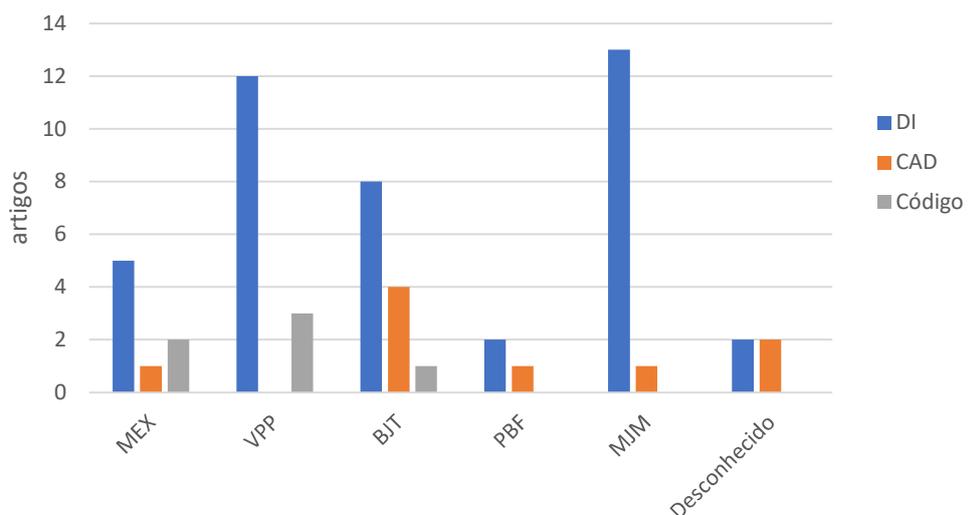


Figura 21 - Divisão dos artigos em função do modelo digital e da técnica de impressão

A Figura 22 divide os artigos em função da técnica de impressão empregada e o foco da análise realizada. Não se notou um padrão claro em relação às análises focadas

na estrutura, tendo a maioria das técnicas sido utilizadas para esse propósito. Na tecnologia VPP e MJM houve uma predominância significativa de estudos de transporte e poucos estudos focados na análise mecânica, o que reforça as afirmações de Kong et al. (2021b). Por outro lado, no caso da BJT não se observou uma predominância de estudos mecânicos e baixo número de estudos de fluxo, conforme esperado, baseando-se nas afirmações desses autores e apresentadas na Seção 2.4.4. Acredita-se que o critério de divisão adotado no presente trabalho sido responsável por isso. Considerou-se que estudos que obtiveram a permeabilidade das amostras impressas como estudos de transporte, mesmo que um estudo de fluxo mais complexo não tenha sido feito.

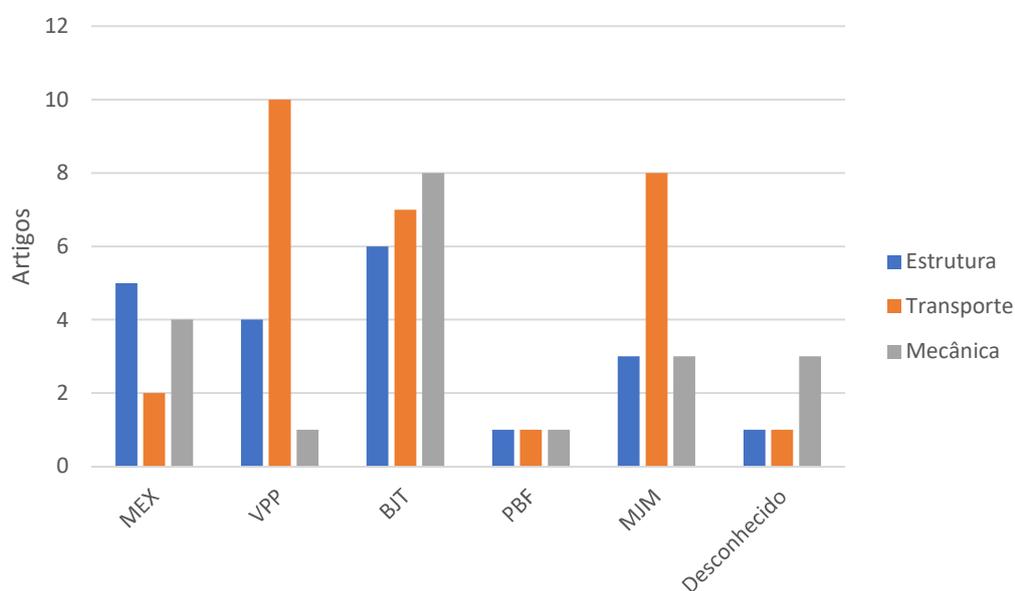


Figura 22 - Divisão dos artigos em função da técnica adotada e foco da análise

2.2.5 Conclusões da revisão sistemática

No presente capítulo fez-se uma revisão sistemática da literatura. A leitura de todos documentos selecionados permitiu as seguintes conclusões:

- A tecnologia atual das impressoras 3D possui a capacidade de reproduzir a macroestrutura de solos e rochas naturais. Equipamentos mais avançados já apresentam resoluções na escala nanométrica, o que permite análises das mesoestruturas e microestruturas.
- Apesar das técnicas atuais já serem capazes de reproduzir poros/vazios naturais, melhorias em algumas áreas (como resolução, velocidade de impressão, pós-processamento e materiais disponíveis, por exemplo)

ainda são necessárias para que a manufatura aditiva alcance todo o seu potencial.

- Não foram encontrados relatos de uso das técnicas DED e SHL. Não sendo possível comentar sobre suas aplicações na geotecnia.
- Há um grande foco em estudos de rochas, restando muito a ser explorado na área de impressão de solos.
- VPP e MJM são as técnicas capazes de alcançar melhor resolução e precisão. A desvantagem delas é que a resina usada como material base possui propriedades mecânicas e químicas distintas dos solos e rochas naturais. Por essas razões, VPP e MJM são adequadas para reprodução da estrutura e certas análises de transporte.
- Para reproduzir as propriedades químicas ou mecânicas de amostras naturais, a tecnologia BJT foi a mais utilizada, pois utiliza pó como material base, permitindo o uso de areias ou argilas na impressão. No entanto, a BJT não possui resolução e precisão tão boas quanto a VPP e MJM.
- A técnica MEX permite o uso de materiais cerâmicos, por essa razão, essa técnica poderia ter o potencial de reproduzir propriedades químicas e mecânicas como a BJT. No entanto, como apenas dois documentos a empregaram, a amostra analisada é muito pequena para tirar conclusões sobre sua eficácia.
- FDM possui versatilidade maior que as demais técnicas. Apesar de ser inferior a VPP e MJM, a sua resolução é superior a BJT e a variedade de materiais base disponíveis permitem estudos de transporte e mecânicos.

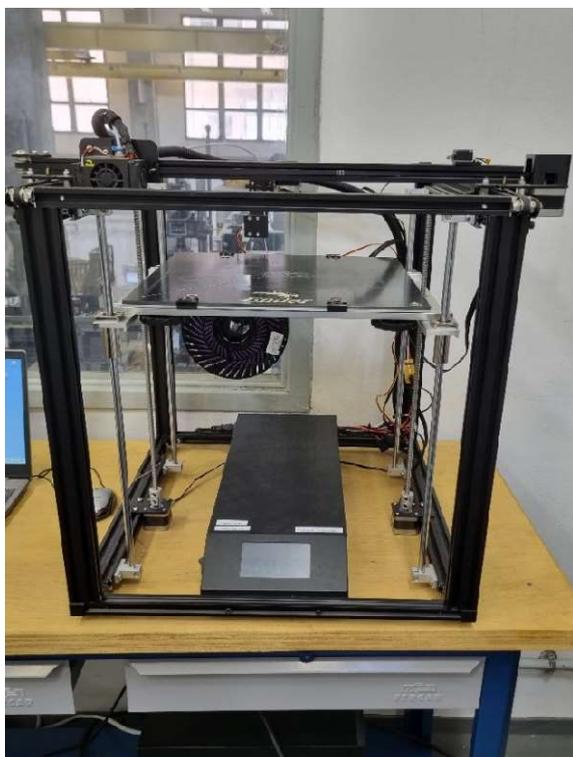
Além dessas conclusões, a revisão da literatura trouxe uma resposta positiva para a pergunta de pesquisa, indicando que a tecnologia atual de impressão 3D é capaz de replicar a estrutura de solos e rochas naturais na escala macro e até mesmo na escala micro. Assim, com os dados extraídos dos artigos selecionados, foi possível concluir, preliminarmente, que a impressão 3D é uma técnica viável para a confecção dos medidores de sucção.

3 Programa experimental

O programa experimental foi dividido em dois subcapítulos. O primeiro apresenta a metodologia utilizada na confecção dos corpos de prova, desde o pré-processamento até pós-processamento. No segundo, é exposto o procedimento empregado durante o ensaio de papel filtro e posteriormente na obtenção da curva de retenção da estrutura impressa.

3.1 Impressão 3D

Para esse trabalho, duas impressoras estavam disponíveis. A primeira era uma Ender 5 plus (Figura 23A), classificada como MEX, pela ASTM 52900 (2021). Como, durante o processo de impressão, ela usa calor para fundir o material polimérico utilizado, essa impressora também pode ser classificada como uma FDM. A segunda impressora utilizada foi uma Halot One (Figura 23B). Segundo a classificação da ASTM 52900 (2021), essa impressora é uma VPP. Devido à fonte de luz digital empregada por esse equipamento para realizar a fotopolimerização, a classificação de DLP também é válida para essa impressora.



(A)



(B)

Figura 23 - Impressoras utilizadas. (A) FDM-Ender 5 plus. (B) DLP-Halot One

De acordo com as especificações do vendedor, 3Dlab (sd), a espessura de camada mínima da Ender 5 é de 0,1 mm e o diâmetro do bico de 0,4 mm. Em relação a outra impressora, segundo a ficha técnica fornecida por Creality (sd), fabricante da impressora, a Halot One possui uma “precisão” de 0,01-0,05 mm no plano xy. Contudo, é questionável se o termo precisão foi usado corretamente nesse documento, uma vez que as fichas técnicas tendem a informar a exatidão ou a resolução e as versões em português e inglês desse mesmo documento apresentam informações diferentes. Adicionalmente, não existe informações sobre exatidão ou resolução do eixo z no documento em inglês, que foi utilizado como fonte de informações.

Durante o processo de impressão dos corpos de prova, foram utilizadas as duas impressoras e realizou-se diversos testes, majoritariamente de caráter tátil-visual, para a obtenção dos parâmetros e metodologia ideais. Julgou-se, no entanto, que a exposição extensiva desses testes não é pertinente para essa pesquisa. Por isso, optou-se por apresentar apenas os parâmetros e metodologia finais, com breves comentários e observações decorrentes desses testes.

3.1.1 Pré-processamento

Para a elaboração do modelo digital utilizou-se o software IceSL. O programa se destaca por ser capaz de construir a estrutura e realizar o fatiamento para diversos tipos de impressoras, sem a necessidade da criação de um arquivo no formato stl. A sigla stl, inicialmente, era uma abreviação de stereolithography, a técnica pioneira de manufatura aditiva, mas com o tempo ganhou novos significados, como Standard Triangular Language, por exemplo, de acordo com Negromonte (2019).

Um arquivo no formato stl descreve o objeto na forma de uma malha triangular. O parâmetro mais importante na conversão de um arquivo para esse formato é o tamanho do voxel (pixel volumétrico), quanto menor esse valor, mais refinada será a malha. Ma et al (2023) reportaram que ao converter o modelo digital para o formato stl houve uma diminuição na porosidade de 30% para 10%, o que significa uma perda de 2/3 da porosidade nessa conversão. Os autores, no entanto, não discutiram os parâmetros da malha utilizada nem se um refinamento da malha minimizaria o problema.

A Figura 24 contém três imagens de arquivos stl que foram gerados com tamanhos de voxel diferentes. Antes da conversão, o modelo original possuía uma malha de furos equidistantes e perfeitamente circulares com 0,6 mm de diâmetro. É possível observar que com 0,4 mm o furo não é circular, estando mais próximo de um quadrilátero, e há uma região de imperfeição ao redor do furo de tamanho significativo. Ao reduzir o voxel para 0,2 mm, o furo passou para um formato octaédrico e houve uma redução na região de imperfeição. Com 0,05 mm o furo é razoavelmente circular e a região de imperfeição é quase imperceptível.

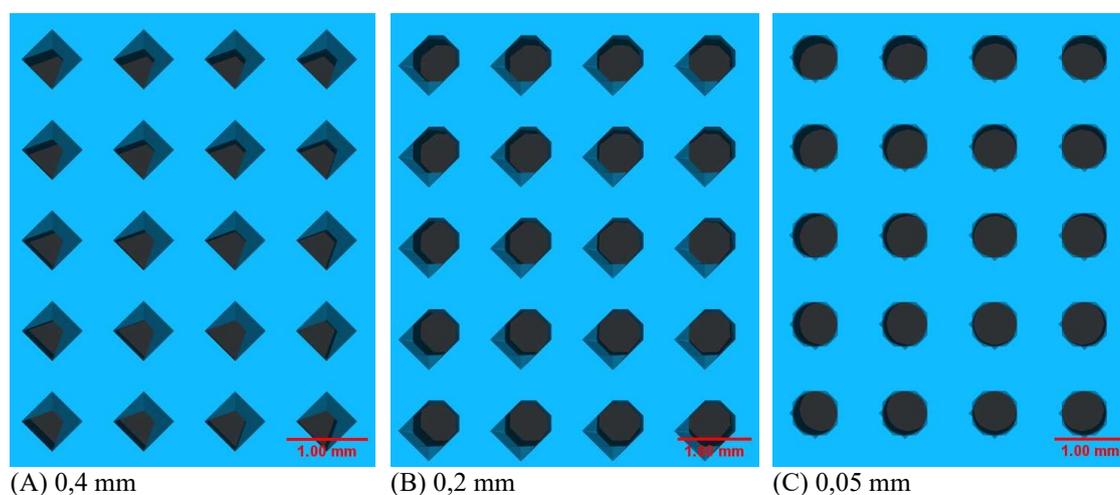


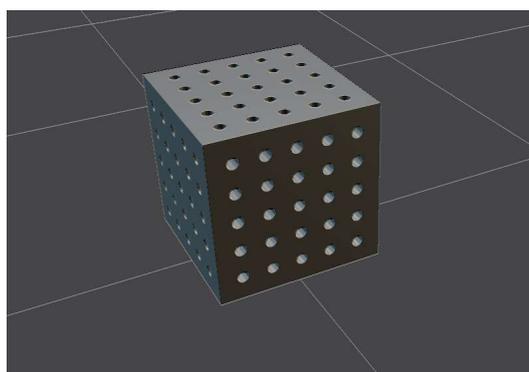
Figura 24 – Conversão do mesmo modelo para o formato .stl utilizando diferentes tamanhos de voxel.

É válido lembrar que quanto mais refinada a malha maior será o custo computacional. Apesar de não ser um indicador direto, é possível compreender a magnitude do custo comparando o tamanho dos arquivos. Nesse modelo, por exemplo, ao reduzir na metade o tamanho do voxel, o tamanho do arquivo stl aumentou em seis vezes. Já a redução em oito vezes, resultou em um arquivo stl quase cem vezes maior que o inicial. Um refinamento do modelo digital superior à resolução da impressora resulta em um gasto computacional desnecessário. Assim, para essa pesquisa, julgou-se 0,05 como um tamanho de voxel suficiente, quando foi necessário a conversão para esse formato

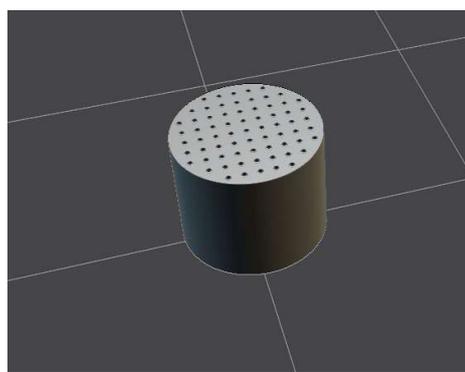
No decorrer desse trabalho foram desenvolvidos dois códigos para a confecção do modelo digital, conforme exposto na Figura 25. O software empregado, IcelSL, utiliza um superset da linguagem Lua como linguagem de script. No primeiro (referido a partir daqui como modelo A), é gerado um cubo com furos transpassantes, de mesmo raio e equidistantes, nos três eixos. Os dados de entrada são o diâmetro dos furos, distância entre

os centros e número de poros por linha/coluna em uma face (no exemplo da Figura 25 esse valor é igual a 5).

O segundo código (referido a partir daqui como modelo B) desenvolvido gera um cilindro com uma malha de furos equidistantes, transpassantes e com o mesmo diâmetro. Para melhorar a resistência mecânica da estrutura foi adicionada uma parede (região sem furos) na extremidade. Cabendo ao usuário, fornecer os seguintes dados: raio e altura do cilindro; diâmetro e espaçamento dos furos; espessura da parede.



Modelo A



Modelo B

Figura 25 – Modelos Digitais A e B.

Os parâmetros utilizados no fatiamento do arquivo dependem da técnica de impressão empregada. O formato de arquivo lido pela Ender 5 é o .gcode, sendo possível gerar esse arquivo diretamente no IceSL, sem a necessidade de um arquivo .stl. Contudo, como a impressão em uma impressora FDM depende de um grande número de parâmetros distintos, julgou-se mais adequado utilizar o software recomendado pelo fabricante (Creality Slicer) para analisar se a impressora é capaz de atender a resolução requerida.

Testou-se a variação de parâmetros como espessura e altura da camada, velocidade de impressão e de movimento, temperatura do bico e da mesa, retração, fluxo e condições de preenchimento para a determinação do menor diâmetro possível. No entanto, concluiu-se que a precisão da impressora não é adequada e o diâmetro mínimo é insuficiente. Assim, a Ender 5 não foi utilizada na confecção dos corpos de prova.

O formato de arquivo lido pela Halot One é o .cxdlp, formato não suportado pelo IceSL. É possível a utilização de um outro software para a conversão do arquivo fatiado pelo IceSL para .cxdlp, contudo optou-se por pela conversão para o formato .stl e o fatiamento no software do fabricante da impressora (Halot Box).

O fatiamento de um modelo para uma impressora DLP não necessita de tantos parâmetros quanto uma FDM. Para a espessura da camada adotou-se 0,05 mm, valor recomendado pelo software para a Halot One. Já o tempo de exposição de cada camada optou-se por 4 segundos. Rashid et al. (2021) realizaram uma revisão da literatura comparando os materiais, parâmetros e seus efeitos em impressões VPP. Dessas informações é possível observar que o aumento da exposição (tanto o tempo quanto a intensidade) tende a melhorar as propriedades mecânicas da estrutura, o que diminui a chance de erros durante a impressão. No entanto, valores maiores de exposição também tendem a aumentar a penetração da luz, o que diminui a acurácia do processo.

De acordo com 3DLab (2021), fabricante da resina utilizada, é recomendado um tempo de exposição entre 5 e 12 segundos. No entanto, adotou-se valor inferior a esse intervalo. Essa escolha foi feita porque o aumento desse parâmetro resultou na obstrução de furos e foi possível compensar a menor resistência com a alteração de outros parâmetros, como a configuração dos suportes.

A velocidade do motor é outro parâmetro importante pois não afeta apenas a velocidade de deslocamento da plataforma e tempo de impressão. Como no processo de impressão todas as camadas ao serem solidificadas aderem na cuba (na técnica Bottom-Up), a velocidade do motor afeta a força de separação e pode ser responsável pelo insucesso de uma impressão. Como adotou-se um tempo de exposição das camadas abaixo do recomendado, utilizou-se a velocidade mínima do motor, 1 mm/s, para compensar.

No caso de impressoras DLP, o modelo não deve ser criado diretamente na plataforma pois, além de dificultar a remoção, há o risco de danificar a amostra e a impressora. Isso é evitado com a adição de base e suportes. Foram realizados teste para avaliar a melhor orientação dos furos e as condições de suporte.

A quantidade de camadas e o tempo de exposição são os dois parâmetros relacionados a base. Eles são importantes para garantir que a base não separe da plataforma durante a impressão. Contudo, valores excessivamente altos podem dificultar a remoção na etapa de pós-processamento. Nessa pesquisa, adotou-se 4 camadas e 45 segundos de exposição para a base.

Quanto a orientação, verificou-se que a sua variação resultava em uma perda substancial de acurácia da impressora. Para uma mesma estrutura, gerada com o modelo B, observou-se que um furo com diâmetro 0,6 mm (diâmetro mínimo que foi alcançado) é transpassante quando vertical ou até uma rotação de 15°. No entanto, quando a rotação ultrapassa esse valor, o poro começa a ser obstruído, ficando totalmente preenchido em furos horizontais.

Essa perda de eficácia ocorre devido a resina, no estado líquido, ficar retida no furo não vertical e ser solidificada, inadvertidamente, junto com as camadas posteriores. Como no modelo A há furos nas três direções, esperava-se uma maior capacidade de dissipação dessa resina retida e, conseqüentemente uma maior acurácia em furos não verticais. Contudo, constatou-se ocorrência do mesmo fenômeno descrito com o modelo anterior. A incapacidade de solucionar essa questão inviabilizou a utilização do modelo A, tendo todos os corpos de prova sido gerados com o modelo B.

Em relação aos suportes, notou-se que as primeiras camadas eram a região crítica do modelo, com propensão ao descolamento. Nesse caso, e conforme pode se observar na Figura 26, suportes laterais não são capazes de impedir o descolamento dessas camadas, sendo recomendável apenas a utilização de suportes na base. Entretanto, há problemas com esse tipo de suporte, como pior acabamento de uma das faces, que estará em contato com o papel filtro e pode afetar o resultado do ensaio. Outra desvantagem é a possibilidade do suporte obstruir o furo, seja devido ao erro durante a impressão, posicionamento indevido durante o pré-processamento ou a um fragmento proveniente da remoção dos suportes no pós-processamento.



Figura 26 Ineficácia dos suportes laterais

Como os furos possuem o mesmo diâmetro (d_f) e a distância entre eles (s_f) é constante em ambas as direções, é possível calcular o diâmetro do suporte (d_s) máximo em contato com a peça. Para evitar a obstrução dos furos a seguinte equação deve ser respeitada $d_s < d_f(\sqrt{2} - 1) + s_f\sqrt{2}$. Para o raio de 0,3 mm e espaçamento de 0,6 mm o diâmetro do suporte máximo é de 1,1 mm. Considerando uma margem de segurança, adotou-se um suporte cônico com diâmetro superior de 0,5 mm e inferior de 1,2 mm. O alargamento da base foi adotado para melhorar a resistência do suporte, todavia, os testes realizados não contemplaram a otimização desse parâmetro.

A Tabela 5 resume os parâmetros utilizados no processo de fatiamento, apresentados nessa seção e traz também os o diâmetro mínimo e o espaçamento dos furos que se conseguiu alcançar.

Tabela 5 - Resumo dos parâmetros utilizados na fase de pré-processamento.

Parâmetro	Valor
Diâmetro dos furos (mm)	0,6
Distância entre os furos (mm)	0,6
voxel (mm)	0,05
Espessura das camadas (mm)	0,05
Tempo de exposição (s)	4

velocidade do motor (mm/s)	1
número de camadas na base	4
Tempo de exposição da base (s)	45
Diâmetro dos suportes (mm)	0,5 (topo) 1,2 (base)

3.1.2 Processamento

Na fase de impressão, no caso de impressoras FDM, sobretudo quando o material utilizado possui ponto de fusão elevado, como o ABS, a diferença dessa temperatura com a temperatura ambiente pode resultar em um gradiente térmico capaz de gerar deformações na face da peça em contato com a mesa. Esse fenômeno é conhecido como warping.

Na Figura 27 é possível observar o efeito do warping em uma peça, além de outros problemas, como a presença de materiais nos furos. Essa deformação pode ser minimizada/eliminada com condições específicas de apoio ou, como feito nessa pesquisa, a adição de uma proteção térmica ao redor da impressora.

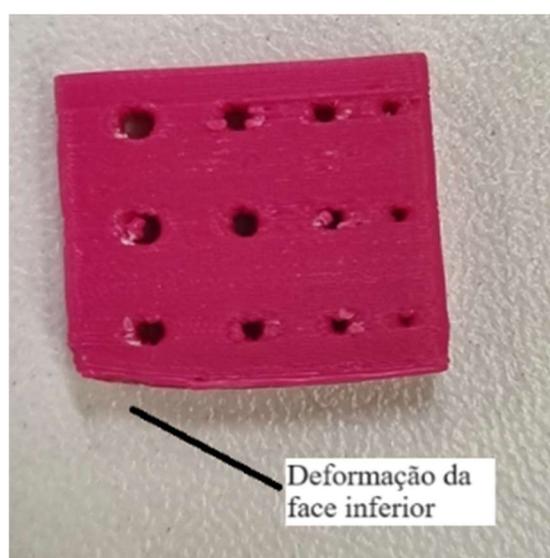


Figura 27 - Deformação da face inferior causada pela variação térmica

A Figura 28 apresenta o melhor resultado obtido com a impressora FDM. No modelo digital havia quatro pares de furo com diâmetros 1,0, 0,8, 0,6 e 0,4 mm. Contudo, na peça impressa apenas três desses pares são visíveis, uma vez que a impressora foi

incapaz de fazer os furos de 0,4 mm. Também é possível observar que há diferença significativa entre os furos do topo e da base.

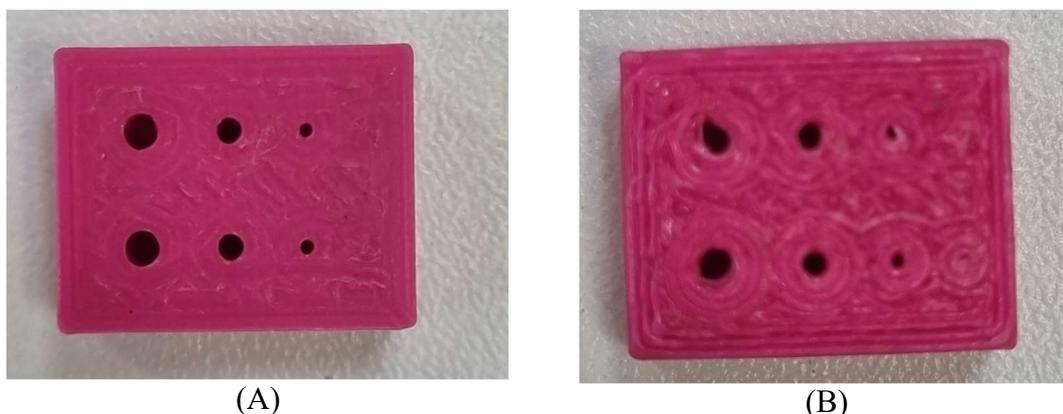


Figura 28 - Menores furos obtidos com a impressora FDM. (A) Topo da peça. (B) Base da peça.

No topo (Figura 28A), os furos são mais regulares. Analisando a imagem, constatou-se que os furos que deveriam ter 0,5 mm ficaram com o diâmetro ligeiramente menores ($< 5\%$) do que o esperado. Já nos furos de 0,4 mm a diferença de diâmetro entre o modelo digital e o impresso foi próxima de 15%, valor considerado excessivo.

A parte que ficou em contato com a mesa de impressão, apresentou um comportamento ainda mais insatisfatório. Na Figura 28B há uma diferença clara entre os furos de 0,5 mm, indicando que a impressora não possui exatidão nem precisão suficientes para executar poros desse tamanho. Por isso, conforme mencionado anteriormente, julgou-se que essa impressora não é capaz de atender as necessidades da pesquisa.

Conforme discutido no Capítulo 2, de maneira geral, as resinas não são identificadas por sua composição química, mas sim por classificação comercial. Segundo Pagac et al. (2021), usualmente, as resinas são divididas em oito categorias: Padrão; Estrutural; Resistente e Durável; Elástica e Flexível; Cerâmica e Cera Moldável; Biocompatível; Bioink; Photoresistente. Na presente pesquisa utilizou-se a resina Standard da empresa 3DLAB, que pertence a primeira categoria.

É importante mencionar que essa resina apresenta um grau de toxicidade, podendo a sua inalação ou contanto direto com a pele resultar em problemas de saúde graves, dependendo da intensidade da exposição. Toda impressão utilizando esse material deve ocorrer em ambiente arejado. Além disso, é recomendado que em todo contanto com a resina utilize-se luva e mascara.

Na impressora VPP o diâmetro mínimo alcançado foi 0,6 mm, a análise de imagem desse corpo de prova é apresentada na seção 4.2.1. Nessas amostras, identificou-se uma tendência de descolamento das camadas iniciais, conforme exibido na Figura 29A, decorrente de uma aparente concentração de tensões. Alterações na geometria e disposição dos suportes não produziu nenhuma melhora significativa. Observou-se que o problema era proporcional à área da seção da peça e não ocorria em amostras menores. A situação foi resolvida com a inclinação da peça em 10° , exposta na Figura 29B, para diminuir a área da seção, e um nivelamento mais adequado da impressora.

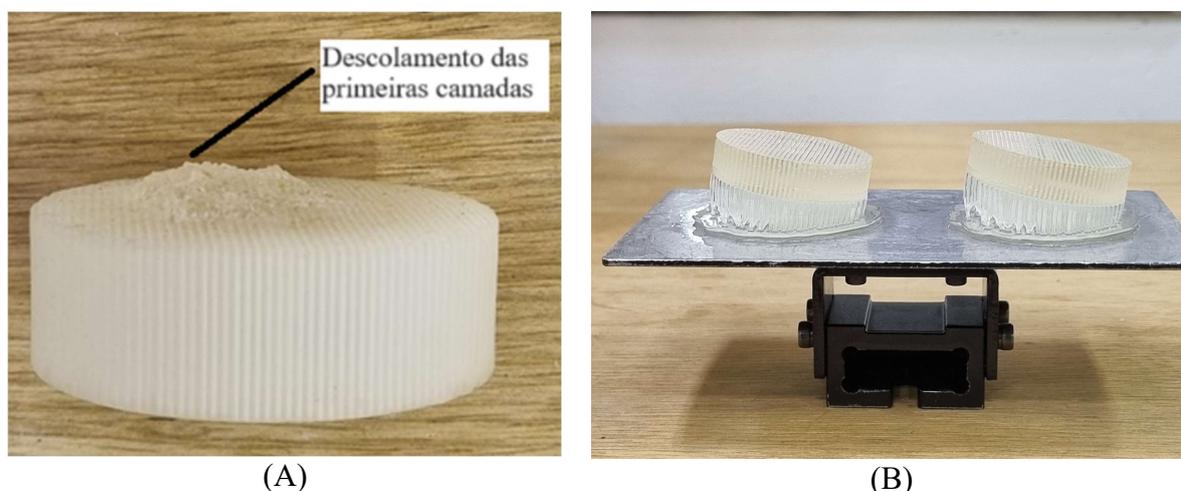


Figura 29 - (A) Impressão mal sucedida devido ao descolamento das camadas iniciais. (B) Impressão bem sucedida, com inclinação de 10° para evitar o descolamento.

3.1.3 Pós-processamento

O pós-processamento da técnica FDM não será mencionado pois não foi possível a obtenção de corpo de prova satisfatório. No caso da peça de resina, há três etapas nessa fase: lavagem; remoção dos suportes; cura.

A lavagem foi realizada com álcool isopropílico, pois a resina líquida é solúvel nesse álcool, em uma máquina de limpeza própria para esse fim. A peça fica submersa no álcool, dentro do equipamento, exposto na Figura 30. Com uma hélice, o equipamento gera um fluxo no álcool, que varia de ascendente para descendente e remove a resina líquida dos vazios da peça. A eficácia da técnica de limpeza não era conhecida inicialmente, mas foi verificada com a utilização de um microscópio óptico.



Figura 30 - Equipamento de limpeza e cura da amostra impressa

A separação da peça da plataforma de impressão foi feita com a utilização de uma espátula. É válido mencionar que esse descolamento foi realizado em cerca de cinco minutos nas peças impressas com os parâmetros mencionados na seção 3.1.1 (4 camadas na base e 45 segundos de exposição). No entanto, quando se testou os parâmetros recomendados por 3DLab (2021), fabricante do material, 5 camadas na base e 60 segundos de exposição, o tempo de remoção foi superior a duas horas. Essa observação reforça a necessidade de estudo e otimização dos parâmetros. Já a remoção dos suportes foi feita com alicate, cuidadosamente para evitar a queda de fragmentos nos poros da estrutura.

A principal função da cura é a melhoria do comportamento mecânico. Inicialmente, como o foco desse trabalho era o comportamento hidráulico, optou-se por omitir essa etapa. No entanto, como observável na Figura 31, houve a ocorrência de fissuras na lateral dos CPs, durante a secagem na estufa, devido a essa escolha. Apesar das fissuras não serem significativas, optou-se por expor os demais CPs, por 20 minutos, à luz UV, tendo sido esse tempo suficiente para garantir a integridade da peça após a estufa.



Figura 31 - Fissuras ocorridas, devido à cura insuficiente, durante a secagem na estufa

Outro efeito da cura é a alteração na coloração do material, conforme Figura 32. Para o presente trabalho, essa alteração é irrelevante. Contudo, como há diminuição na transparência, essa informação pode ser relevante para pesquisas nas quais se deseja visualizar um fluxo, por exemplo.

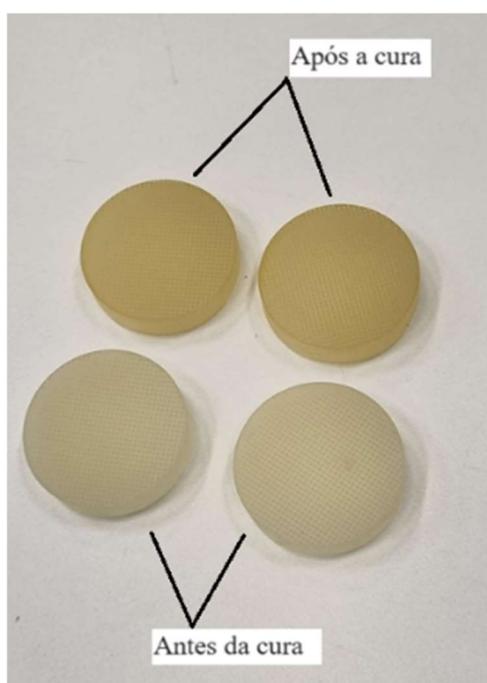


Figura 32 - Variação na coloração durante a etapa de cura

3.2

Obtenção da curva de retenção

O método empregado para a determinação da curva característica foi o do papel filtro. Esse ensaio é normatizado pela ASTM D 5298-16 (2016) e amplamente exposto na literatura, como em Marinho (1994). No entanto, devido ao material ensaiado, algumas alterações na metodologia foram necessárias e simplificações foram possíveis.

Para o ensaio foram confeccionadas nove amostras, com dois tipos de geometria e mesma malha de poros, para a observação de possíveis efeitos na curva característica. Dessas amostras, cinco, denominadas CP-1,2,3,4 e 5, possuíam 6 cm de diâmetro e 2 cm de altura e quatro, denominadas CP-6,7,8 e 9, possuíam 4 cm de diâmetro e 1 cm de altura.

Apesar da possibilidade de impressão de um número maior de corpos de prova, julgou-se que a repetição do ensaio nas mesmas amostras, com diferentes teores de umidade, proporcionaria uma melhor avaliação da precisão da metodologia empregada na confecção das amostras.

3.2.1

Materiais

Durante a realização do ensaio de papel filtro foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Papel filtro Whatman N° 42.
- b) Luvas e pinças metálicas para o manuseio do papel filtro.
- c) Tesoura para o corte do papel.
- d) Pedra porosa, papel filtro qualitativo e bomba de vácuo para a saturação das amostras.
- e) Balança com resolução 0,01g para pesagem das amostras e controle da saturação.
- f) Filme de PVC e papel alumínio para embalar a amostra.
- g) Caixa de isopor para armazenamento dos CPs durante o período de equalização.
- h) Estilete para desembulhar as amostras.
- i) Balança com resolução 0,0001g para a pesagem do papel filtro.
- j) Cronômetro para medir a variação do peso do papel filtro no primeiro minuto.

- k) Capsulas, identificadas, para armazenamento do papel filtro na estufa.
- l) Estufa, mantida a 110°C.

3.2.2 Controle da saturação

Após o processo de impressão, todas as amostras foram mantidas em estufa para a determinação do peso seco. No entanto, de acordo com a ficha técnica da resina, informada por 3DLab (2021), o material utilizado atinge o ponto de transição vítrea em temperaturas inferiores a 100°C. De acordo com Bicerano (2003), a temperatura de transição vítrea pode ser definida como a temperatura na qual as forças que mantêm as moléculas do sólido coeso são superadas, permitindo movimentações moleculares de larga escala. Após essa temperatura o material passa a exibir um comportamento semelhante a um fluido viscoso.

A transição vítrea no material estudado ocorre a 62°C. Para garantir que não haveria mudança na estrutura das amostras, optou-se por manter a estufa em 49°C durante a fase de secagem das amostras. Os corpos de prova permaneceram na estufa até ser observada a constância de massa. É válido mencionar que não é possível garantir que essas amostras estavam totalmente secas.

Inicialmente, foi considerado para o cálculo dos índices físicos, utilizados na determinação da curva de retenção, que essas amostras estavam totalmente secas, após a estufa. Para a determinação do peso seco real e, eventualmente, correção da curva característica, decidiu-se levar parte dos corpos de prova para a estufa e mantê-los a 110°C por 24h, após o término do ensaio de papel filtro.

Para a determinação do peso saturado, as amostras foram mantidas submersas em água, tendo sido utilizado uma bomba de vácuo para acelerar o processo. Os corpos prova foram pesados periodicamente e considerados totalmente saturados quando apresentavam massa constante. Novamente, não é possível garantir que as amostras estavam totalmente saturadas e peso obtido era o peso saturado real.

Durante a execução do ensaio de papel filtro os CPs foram saturados apenas por capilaridade, utilizando pedra porosa e papel filtro qualitativo, para evitar a presença de bolhas de ar. O nível d'água foi mantido abaixo do topo da pedra porosa, o corpo de prova

foi posto sobre a pedra e ambos separados por um papel filtro. Já a secagem foi realizada expondo as amostras ao ar.

3.2.3 Ensaio de sucção

No ensaio de sucção, optou-se por colocar o papel filtro em contato direto com a amostra e medir apenas a sucção mátrica. A ASTM D 5298-16 (2016) recomenda, na medição da sucção mátrica evitar o contato direto do papel filtro com o solo utilizando um pedaço adicional de papel. Como nos corpos de prova empregados não há risco de desagregação de material, julgou-se não ser necessário cumprir essa recomendação da norma.

Na literatura há diferentes recomendações de tempo necessário de equalização. O tipo de sucção que se deseja medir também afeta esse tempo. Caso haja contato do papel com o solo, Al-khafaf (1972) afirmou que a equalização está essencialmente completa após dois dias, Chandler & Gutierrez (1986), por outro lado, usaram cinco dias em sua pesquisa, já para McQueen & Miller (1968) esse período deve ser no mínimo de sete dias.

De maneira geral, há um consenso de que um período de sete dias é suficiente para a medição da sucção mátrica. No entanto, esse tempo pode ser afetado por determinados fatores, por exemplo a flutuação da temperatura. Como amostras analisadas são artificiais e possuem uma estrutura e composição química diferentes de solos naturais, há dúvida se o período de sete dias é adequado para o presente estudo.

Para melhor analisar essa questão, optou-se por colocar um papel filtro no topo da amostra e outro na base. Considerando que após a equalização o valor medido no topo tenderia a ser igual o medido na base, uma eventual diferença significativa desses valores é um indicativo equalização inadequada/não concluída.

O procedimento inicial do ensaio é a secagem ou saturação da amostra até a umidade desejada. Em seguida, adicionou-se um pedaço de papel filtro, com mesmo diâmetro do CP, no topo e outro na base da amostra, vale ressaltar que todo o manuseio do papel foi realizado com pinça ou luva. Então, o conjunto amostra mais papel filtro foi embalado primeiro com filme de PVC, seguido de uma camada de papel alumínio e por fim uma outra camada de filme de PVC. Devidamente embalada, a amostra foi

armazenada em uma caixa de isopor por 7 dias e mantida em uma sala com temperatura controlada de 22° C.

Finalizada a equalização a amostra era desembalada utilizando um estilete. Diferentemente das amostras convencionais, não havia risco de causar alteração significativa da estrutura das amostras com o estilete. Por isso, optou-se por não utilizar o anel metálico. Essa escolha, no entanto, foi prejudicial no momento de desembalar as amostras pois o estilete era capaz de causar ranhuras no CP, o que resultou na necessidade de um cuidado adicional e um maior tempo gasto nessa etapa.

O papel filtro foi pesado imediatamente para a determinação do peso úmido e em seguida levado para uma estufa, com temperatura constante de 110° C, e mantido por 2 horas para a determinação do peso seco.

Villar (2002) descreve o procedimento para a determinação do peso do papel filtro úmido e seco no instante $t = 0$. No presente trabalho adotou-se uma versão simplificada do método proposto. Imediatamente após desembalar a amostra, ou retirar o papel filtro da estufa, um cronômetro era iniciado e o papel levado para uma balança com resolução de 0,0001g. O peso era anotado a cada 10 segundos até atingir 1 minuto. Com esses dados, através de uma regressão linear, estimou-se o peso úmido e seco do papel no instante inicial.

Conhecendo-se os teores de umidade do papel filtro para diferentes saturações das amostras, utilizou-se a curva de calibração proposta por Chandler et al. (1992) para calcular a sucção e determinar a curva de retenção.

4 Resultados e discussões

4.1 Análise do modelo digital

Com o estudo do modelo digital foi possível calcular os índices físicos e propriedades dos corpos de prova e posteriormente realizar a comparação com as amostras impressas para avaliar a eficácia das técnicas utilizadas. Os dados estimados foram o índice de vazios (e), porosidade (n), peso seco (W_d) e saturado (W_s) e o teor de umidade gravimétrico (w) na saturação.

Apesar de todos os corpos de prova possuírem a mesma malha de furos, cabe relatar que a região maciça na extremidade dos CPs, discutida no Capítulo 3, causou uma pequena diferença no índice de vazios/porosidade. Essa diferença, no entanto, foi considerada irrelevante. Dos CPs confeccionados para a realização do ensaio de papel filtro, os com as maiores dimensões (referidos a partir daqui como CP-Tipo A) possuem porosidade de 19,20% e índice de vazios de 0,238, enquanto os menores (a partir daqui referidos como CP-Tipo B) 19,14% e 0,237.

Para estimar o peso no estado seco e saturado dos corpos de prova, utilizou-se a densidade, fornecida por 3DLab (2021), de 1,1 g/cm³. Calculou-se um peso seco de 50,26 g para o CP-Tipo A e 11,18 g para o Tipo B. Já para o peso saturado, estimou-se 61,12 g e 13,58 g, respectivamente, considerando apenas o volume de vazio do modelo digital estaria totalmente preenchido por água. A diferença entre a umidade gravimétrica na saturação do CP-Tipo A e Tipo B também foi pouco significativa. No CP maior estimou-se 21,60% e 21,52% para o menor. A Tabela 6 resume esses parâmetros

Tabela 6 - Parâmetros estimados com base no modelo digital

CP	e	n (%)	W_d (g)	W_s (g)	w (%)
Tipo A	0,238	19,20	50,26	61,12	21,60
Tipo B	0,237	19,14	11,18	13,58	21,52

Todavia, é importante mencionar que há incertezas relacionadas à quantidade calculada de água absorvida na saturação. Não foi encontrada, por exemplo, na literatura informação sobre o ângulo de contato da resina empregada. Al-Dwairi et al. (2023) testaram diferentes resinas e reportaram um comportamento hidrofílico, com o ângulo entre 63,3° e 76,2°. Mahabadi et al. (2018), por outro lado, apesar de não informarem um valor, observaram um comportamento hidrofóbico na resina empregada. Já Bunea et al.

(2023) trabalharam com um material superhidrofóbico, com ângulo de contato ultrapassando 165° .

Outra questão relevante é a eficácia da técnica utilizada. Expôs-se no Capítulo 2 que o processo de impressão e o pós-processamento da peça podem causar vazios e/ou obstruções discordantes da estrutura digital, que eventualmente afetariam o quanto de água seria necessário para saturar uma amostra. Como essas questões não foram amplamente exploradas, uma vez que não coincidiam com o foco da presente pesquisa, era esperado que a diferença entre o peso saturado estimado com o modelo digital e o medido na amostra impressa fosse mais significativa.

4.2 Análise da amostra impressa

4.2.1 Processamento de imagem

Utilizando um microscópio óptico obteve-se a imagem exposta na Figura 33. É possível observar que todos os furos são transpassantes e a malha, aparentemente, é regular e condizente com o modelo digital. No entanto, também pode-se verificar que diversos furos contêm impurezas indesejadas. Isso sugere ser indicado o aperfeiçoamento do processo de confecção, sobretudo o pós-processamento.



Figura 33 – Imagem do corpo de prova obtida com microscópio óptico.

Para avaliar a homogeneidade dos dados, utilizou-se o coeficiente de variação (CV), também conhecido como desvio padrão relativo e abordado em textos clássicos da literatura como Snedecor & Cochran (1967). Esse coeficiente consiste na divisão do desvio padrão pela média. Empiricamente, é comum considerar uma amostra homogênea quando o CV for inferior 15% e heterogênea quando for superior a 30%.

Processando as imagens obtidas com o microscópio, verificou-se que os raios dos furos das peças impressas possuem pouca variação. O coeficiente de variação da amostra composta pelos diâmetros é de 1,7%. O raio médio dos furos foi de 0,306 mm, o que equivale a uma área média do furo de 0,294 mm², área 4,04% maior do que a esperada, de acordo com o modelo digital.

Dispondo das informações provenientes da análise de imagem, considerou-se que as impurezas presentes nos furos e a diferença de geometria entre o modelo digital e o corpo de prova impresso não eram significativas o suficiente para inviabilizar a pesquisa. Assim, concluiu-se que a metodologia de confecção adotada forneceu amostras adequadas para a continuidade do estudo.

4.2.2 Secagem e saturação

O controle do peso seco e saturado dos CPs foi uma das formas adotadas para verificar a precisão da metodologia e analisar a viabilidade do medidor proposto. Conforme mencionado no Capítulo 3, o material utilizado não deve ser exposto a temperaturas superiores a 62° C, segundo 3DLab (2021).

A estufa foi mantida a 49° C durante todo o processo de secagem. Após a impressão as amostras não foram levadas imediatamente para a estufa, isso resultou em uma etapa de secagem ao ar. Como o período de secagem ao ar não foi o mesmo para todas as amostras, as amostras foram para a estufa com teores de umidade iniciais diferentes, o que não causou impacto na presente pesquisa, mas resultou em comportamento ligeiramente diferente dos corpos de prova na estufa.

Durante a secagem na estufa, os corpos de prova foram pesados periodicamente até se observar a constância de massa. Para efeito de controle, decidiu-se por manter o CP-4 e o CP-5 por mais de quinze dias na estufa e observar a variação da massa ao longo do tempo, conforme exposto na Figura 34 (A). É possível observar que após o segundo

dia o CP-5 apresentou variação pouco significativa, já no caso do CP-4 a diminuição da variação foi observada próximo ao dia 5.

A Figura 34 (B) apresenta a variação de massa dos demais corpos de prova, mantidos sob as mesmas condições. No período de quatro dias os CPs 1, 2 e 3 atingiram a massa constante. Por outro lado, os CPs 6, 7, 8 e 9, que são menores, apresentaram variação de massa pouco significativa depois das primeiras 24h.

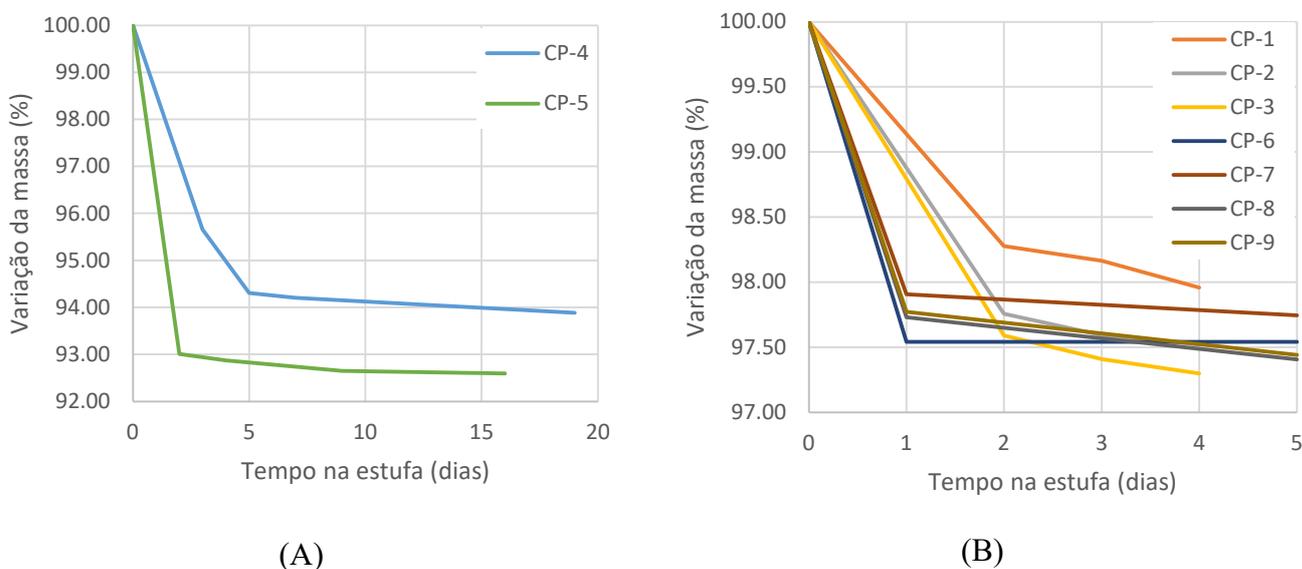


Figura 34 - Perda de massa das amostras pelo tempo de permanência na estufa com temperatura constante. (a) Amostras mantidas por mais de 15 dias. (b) Amostras mantidas de 4 a 5 dias.

Conforme mencionado anteriormente nesse capítulo, foi possível estimar, com base no modelo digital, que o peso seco dos CPs-Tipo A seria de 50,26 g e do Tipo B de 11,18 g. No entanto, o peso medido foi maior do que o esperado em todas as amostras. Além desses valores, a Tabela 7 também apresenta a diferença proporcional entre esses dados e o coeficiente de variação das amostras.

Os CPs menores apresentaram uma diferença proporcional média de 7,09%, ligeiramente maior que os Tipo A, de 6,30%. O peso seco medido dos dois tipos de corpos de prova apresentou CV próximo de 1,0%, podendo as amostras serem consideradas homogêneas. As variações entre os modelos Tipo A e B foram pouco significativas, podendo-se concluir que as duas geometrias se comportaram de forma similar.

A diferença na geometria e a presença de material indesejado são possíveis causas para diferença de peso estimado e medido. No entanto, as imagens obtidas com o

microscópio não corroboram com essa hipótese. Outra possibilidade é que a diferença entre o valor do peso específico da resina utilizado, fornecido pelo fabricante, e o peso específico real é significativo. No caso do CP-1, por exemplo, caso o peso específico utilizado possua um erro de 4,0%, a diferença de peso seco estimado e medido será inferior a 0,1g.

Como não é possível garantir que os corpos de prova estão totalmente secos, a presença de água nas amostras possivelmente também contribui para essa diferença entre os valores estimados e medidos. Essa possibilidade não razoável, todavia, quando se analisa a quantidade de água que os CPs adquiriram ao atingir a saturação, conforme será discutido adiante. Caso essa diferença de peso fosse apenas devido a presença de água, isso significaria que as amostras apresentam um grau de saturação superior a 20%, mesmo após serem mantidas por quatro dias na estufa a 49° C.

Tabela 7 – Comparação entre o peso seco estimado com base no modelo digital e o medido na amostra impressa.

Amostra	Peso seco (g)		Diferença (%)	CV do peso medido (%)
	Esperado	Medido		
CP-1	50,26	52,30	4,06	1,1
CP-2	50,26	53,90	7,24	
CP-3	50,26	53,70	6,85	
CP-4	50,26	53,60	6,65	
CP-5	50,26	53,64	6,73	
CP-6	11,18	11,91	6,55	1,0
CP-7	11,18	12,14	8,61	
CP-8	11,18	12,02	7,54	
CP-9	11,18	11,81	5,66	

Após o término do ensaio do papel filtro, parte dos corpos de prova foram levados para a estufa, mantida a 110° C, para a determinação do peso seco correto. No entanto, depois de duas horas na estufa, observou que a amostra passou a exalar um odor não antes presente, indicando haver a perda de outras substâncias além da água. Por esse motivo, concluiu-se que o peso obtido não seria o desejado, sendo inferior ao peso seco real. Assim, optou-se por utilizar o peso seco obtido anteriormente, informado na Tabela 7.

Para a determinação do peso saturado, os CPs 1, 2 e 3 foram saturados apenas por capilaridade por 29 dias. Analisando a Figura 35, é possível observar que depois dos primeiros 10 dias os corpos de prova 1 e 3 não apresentaram ganho considerável, apesar

das oscilações. A amostra 2, por outro lado, reteve uma quantidade menor de água, quando comparada com os dois outros CPs, e exibiu uma trajetória ainda ascendente.

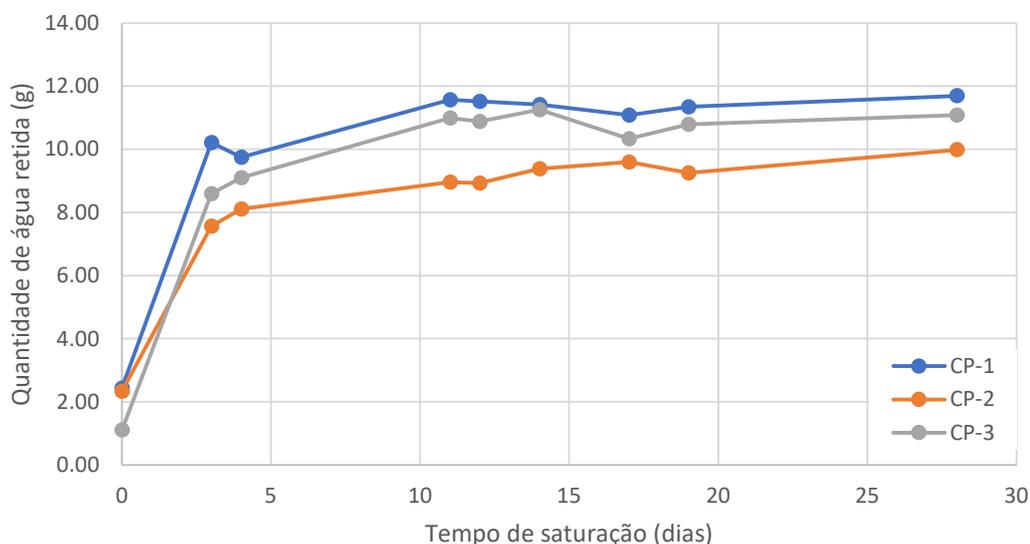


Figura 35 – Aumento da massa de água com o tempo nos corpos de prova saturados por capilaridade.

Além do tempo excessivo gasto na saturação, o material transparente permitiu a visualização do nível d'água nos furos mais próximos da extremidade do corpo de prova. Notou-se que a altura da coluna d'água não era constante e não atingiu o topo do furo na maioria dos casos, indicando que a amostra não estava totalmente saturada. Todavia, um teste rápido com papel filtro qualitativo comprovou a presença de água no topo do corpo de prova.

Considerando a impossibilidade de saturação capilar total nos corpos de prova do Tipo A, surgiu a dúvida se isso teria um impacto relevante na curva de retenção. Um dos principais motivos da confecção das amostras menores, Tipo B, foi analisar melhor essa questão.

Com base no modelo digital, estimou-se que haveria uma diferença de 10,86 g entre o peso saturado e o seco. Contudo, os CPs 1 e 3 ultrapassaram essa diferença antes mesmo de estarem totalmente saturados, indicando uma inconsistência da metodologia empregada na estimativa desse valor.

Para a obtenção de um valor de peso saturado mais próximo da saturação total real recorreu-se à técnica de submersão total da amostra. Quatro amostras foram selecionadas

para isso, duas do Tipo A, CP-4 e CP-5 e duas do Tipo B, CP-8 e CP-9. Os corpos de prova maiores foram saturados por 7 dias enquanto os menores por apenas 5 dias.

Foi observado durante a saturação dos CPs 1, 2 e 3 que havia perda de água considerável no processo de pesagem quando a amostra se aproximava da saturação. Por esse motivo, optou-se por não acompanhar a variação da massa de água com o tempo das amostras submersas, adquirindo apenas o valor final e considerando que este estava razoavelmente próximo da saturação total.

A Tabela 8 traz os resultados obtidos com essa metodologia. As informações presentes nessa tabela corroboram com a observação de que a estimativa, com base no modelo digital, do peso saturado é inadequada. Em média, o ganho de massa de água das amostras impressas foi 20% maior do que o estimado inicialmente. A diferença entre teor de umidade previsto com base no modelo digital (21,6%) e o obtido nas amostras impressas também não foi desprezível, sendo em média 13% menor.

Tabela 8 - Resultados obtidos com saturação por submersão por no mínimo 5 dias.

Amostra	Peso saturado (g)	Água adquirida (g)	w (%)
CP-4	66,92	13,32	24,85
CP-5	66,99	13,35	24,89
CP-8	14,81	2,79	23,21
CP-9	14,76	2,95	24,98

Os demais corpos de prova não passaram por um processo de saturação por submersão. Para estimar o peso saturado e grau de saturação deles considerou-se que a saturação total ocorreria quando o teor de umidade gravimétrico (w) fosse de 24,5%, média dos valores apresentados na Tabela 8. Optou-se por esse índice físico porque julgou-se que houve baixa dispersão entre os corpos de prova, com CV de 3,0%.

Está presente na Tabela 9 os pesos seco e saturado dos nove corpos de prova, resumindo as informações trazidas anteriormente. Essa tabela também contém os teores de umidade gravimétrico e volumétrico na condição de grau de saturação (S_r) máximo. É válido lembrar que, como nem todas as amostras foram totalmente saturadas, a tabela possui valores provenientes de estimativas, conforme indicado na mesma.

Tabela 9 - Resumo dos resultados da secagem e saturação das amostras impressas.

Amostra	Peso seco (g)	S _r = 100 %		
		Peso (g)	w (%)	θ (cm ³ /cm ³)
CP-1	52,30	65,10 *		
CP-2	53,90	67,09 *	24,48 *	0,2693 *
CP-3	53,70	66,85 *		
CP-4	53,60	66,92	24,85	0,2734
CP-5	53,64	66,99	24,89	0,2738
CP-6	11,91	14,83 *	24,48 *	0,2693 *
CP-7	12,14	15,11 *		
CP-8	12,02	14,81	23,21	0,2553
CP-9	11,81	14,76	24,98	0,2748

* Valores estimados com base no resultado das demais amostra

4.3

Curva de retenção de água no solo

4.3.1

Análise preliminar da curva de retenção

Mahabadi et al. (2018) fizeram a única pesquisa que se tem conhecimento que determinou a curva característica de água no solo de uma amostra impressa. Coincidentemente, essa referência não foi encontrada na busca realizada durante a revisão sistemática da literatura, o que comprova a sua incapacidade de esgotar toda a literatura pertinente e reforça a necessidade da complementação da mesma por buscas regressivas, progressivas ou revisões tradicionais.

O modelo digital utilizado por Mahabadi et al. (2018) foi baseado na digitalização de uma areia mal graduada. Para atender as limitações da impressora, o modelo foi ampliado em quatro vezes. Considerando que a sucção mátrica é numericamente igual a pressão capilar, ela pode ser calculada em função da tensão superficial, ângulo de contato e raio do tubo. A ampliação do modelo vai resultar em um raio quatro vezes maior, enquanto as outras duas variáveis permanecem com o mesmo valor. Assim, sucção mátrica do modelo ampliado vai ser quatro vezes menor que a original.

A Figura 36 apresenta as curvas obtidas por Mahabadi et al. (2018). Essa figura contém a curva característica do solo natural, a curva esperada para a amostra impressa (obtida minorando as sucções da curva do solo natural) e a curva medida. Os autores concluíram que, apesar das diferenças, a impressão 3D é uma técnica promissora para reproduzir a curva característica de solos naturais, sendo importante também estudar outros materiais e técnicas de impressão.

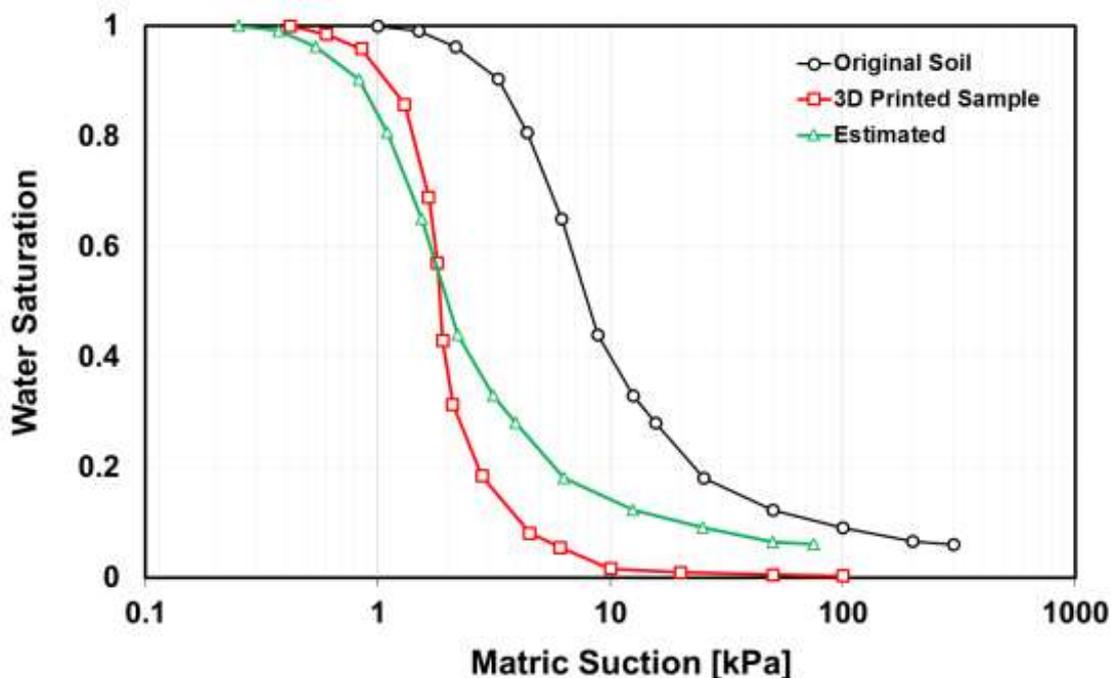


Figura 36 - Curva característica do solo natural, curva estimada com o modelo digital e curva da amostra impressa. Mahabadi et al. (2018).

O resultado do ensaio de papel filtro, do presente estudo, realizado conforme descrito no Capítulo 3, está exposto na Figura 37. Os dados estão divididos em leituras feitas no topo e na base dos corpos de prova. É possível observar um comportamento bimodal, definido por duas retas (na escala semilogarítmica) e uma descontinuidade, quando a umidade volumétrica se aproxima de $0,100 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, cerca de 37 % de grau de saturação. Esse comportamento difere do comportamento reportado por Mahabadi et al. (2018) em sua amostra impressa, conforme Figura 36.

Apesar das retas serem bem definidas nos valores mais extremos da curva de retenção, há uma dispersão maior dos dados na parte central da curva, aproximadamente na região na qual o teor de umidade volumétrica varia de 0,150 a 0,075. Nessa região foi observado também uma diferença maior entre as leituras de topo e base, indicando que a equalização não foi completa.

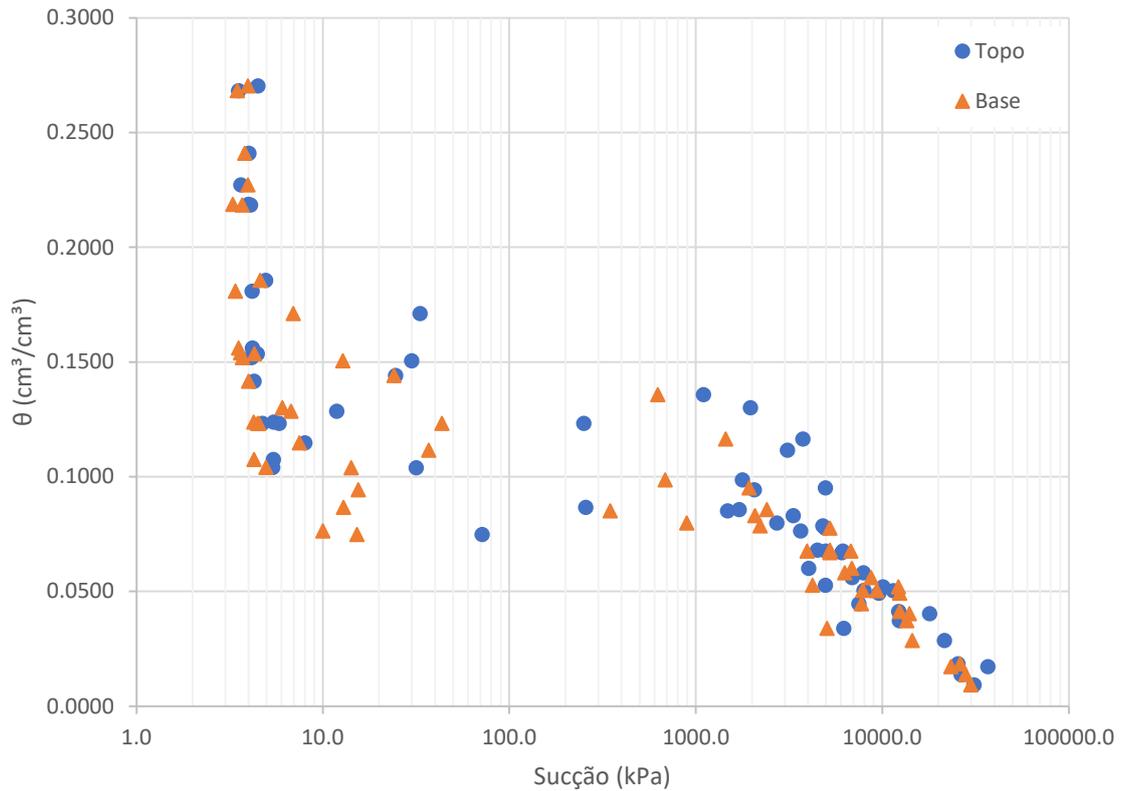


Figura 37 - Curva de retenção, diferenciando leituras de topo e base das amostras, contendo todos os dados.

Para avaliar possíveis efeitos das dimensões das amostras na curva de retenção, o gráfico da Figura 37 foi refeito, diferenciando-se as geometrias dos corpos de prova. A curva foi subdividida de acordo com a posição do papel filtro. A Figura 38 apresenta apenas as informações obtidas no topo dos corpos de prova, enquanto a Figura 39 contém as leituras referentes à base.

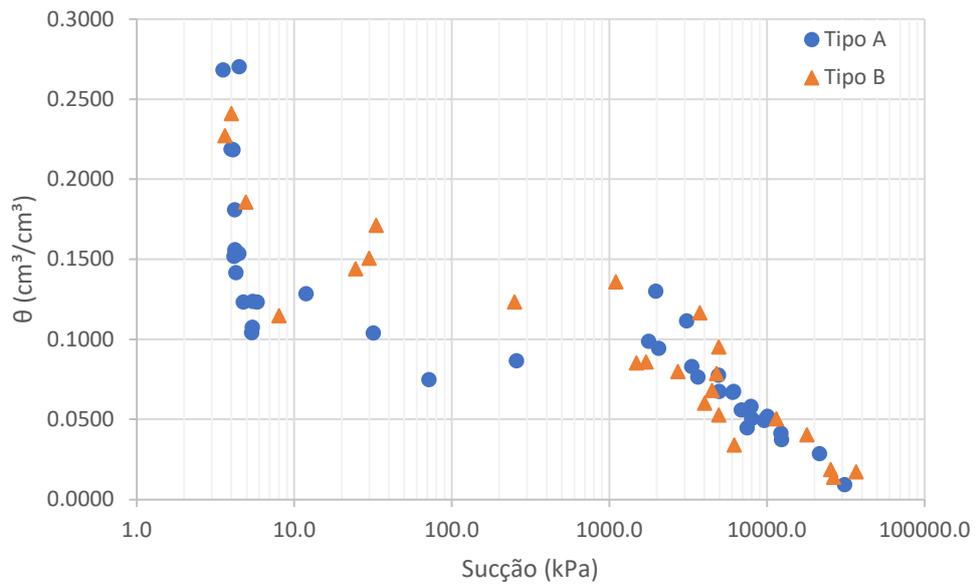


Figura 38 - Curva de retenção, apenas das leituras de topo, diferenciando os tipos de corpo de prova.

Tanto na Figura 38 quanto na Figura 39, verifica-se que os dois tipos de corpo de prova exibem comportamento similar para sucções superiores a 1000 kPa, região que corresponde ao segundo modo de comportamento da curva de retenção. Já no trecho inicial, sucções inferiores a 100 kPa, a Figura 39 mostra tendências diferentes para cada tipo de corpo de prova, indicando que a altura e/ou diâmetro do CP podem afetar a curva.

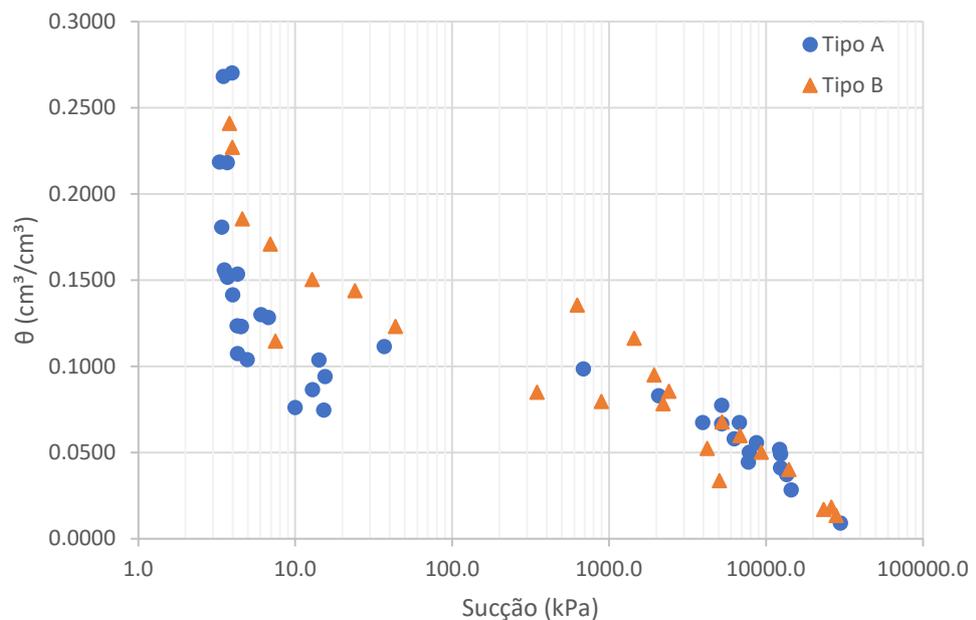


Figura 39 - Curva de retenção, apenas das leituras de base, diferenciando os tipos de corpo de prova.

Por outro lado, essa diferença de comportamento no trecho inicial não foi tão evidente no topo dos corpos de prova, conforme evidenciado na Figura 38. Adicionalmente, é válido lembrar que os CPs-Tipo A não foram capazes de atingir a saturação total apenas por capilaridade e, por isso, considerava-se possível que houvesse diferença de comportamento no trecho inicial.

No entanto, esses CPs atingiram valores de umidade volumétrica superiores a 0,200 e não era esperado diferenças de comportamento, devido à geometria, para valores menores que esse. Acredita-se, assim, que é possível afirmar que a geometria não afetou o segundo trecho da curva. Já para o trecho inicial, entende-se que os resultados não são suficientes para determinar se as dimensões da amostra afetaram ou não a curva, sendo indicado a realização de ensaios adicionais, preferencialmente com uma geometria diferente das utilizadas. É válido lembrar que Hasiuk (2019) notou que a geometria do corpo de prova impressa é capaz de afetar as propriedades macroscópicas.

Outra questão de interesse desse estudo é se o material utilizado apresentaria histerese. Novamente, dividiu-se a curva da Figura 37 em leituras de topo e base, dessa vez, no entanto, diferenciando em trajetórias de umedecimento e secagem. Analisando a Figura 40 e a Figura 41, não foi observada nenhuma tendência de comportamento distinto, podendo-se concluir que nos corpos de prova não há histerese significativa.

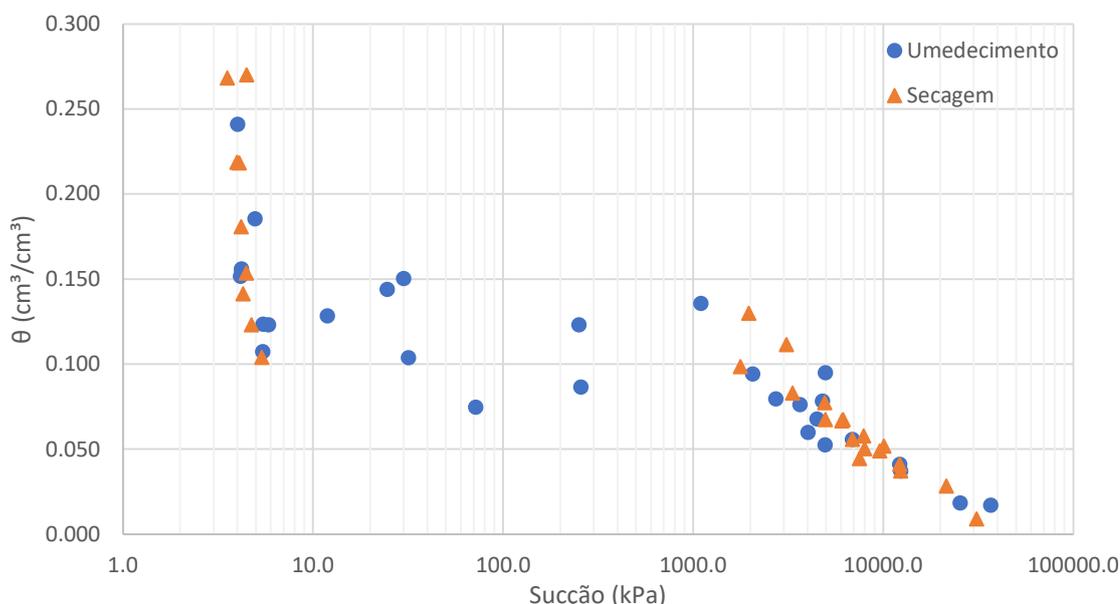


Figura 40 - Curva de retenção, apenas das leituras de topo, diferenciando as trajetórias de umedecimento e secagem.

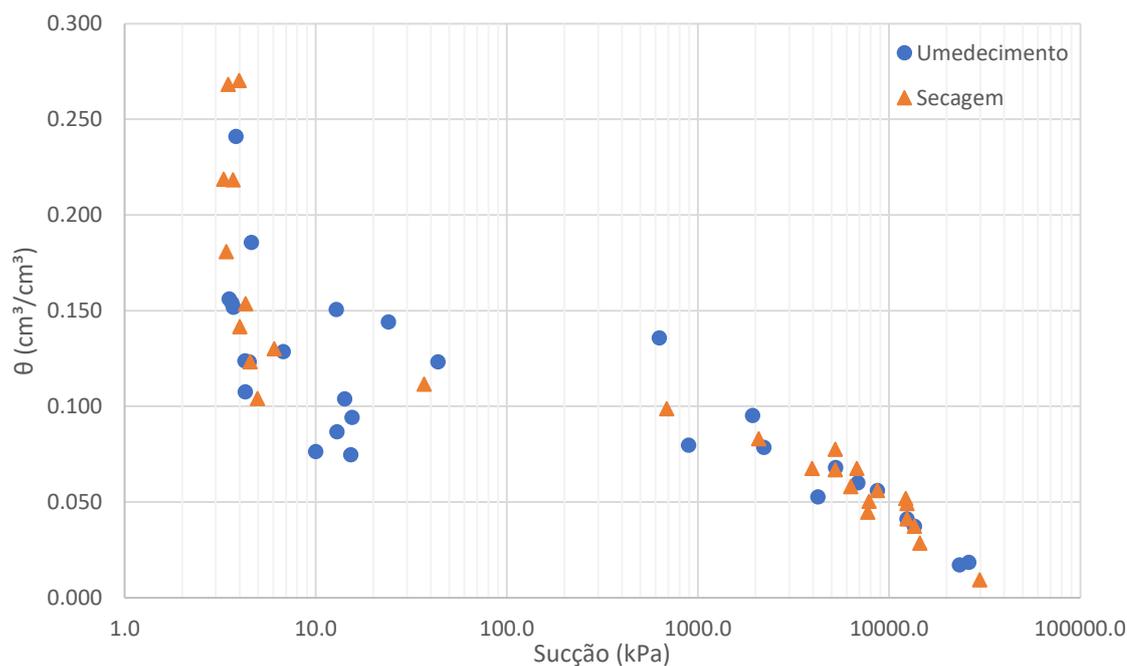


Figura 41 - Curva de retenção, apenas das leituras da base, diferenciando as trajetórias de umedecimento e secagem.

4.3.2 Tratamento dos dados e identificação de outliers

Antes de determinar equações para descrever a curva de retenção obtida, julgou-se necessário a utilização de métodos estatísticos para identificação de possíveis outliers. A informação usada nas identificações foi a diferença de umidade gravimétrica do papel filtro do topo e o papel da base. Os pontos que se desejou identificar não foram os discordantes em relação a curva de retenção, mas pontos que apresentaram diferença excessiva entre topo e base. Essa escolha foi feita pois considerou-se que nesses casos a equalização não foi adequada e o resultado do ensaio possivelmente estava comprometido.

Para uma melhor visualização dessas diferenças, plotou-se o gráfico da Figura 42, que relaciona a diferença de umidade gravimétrica entre o papel filtro do topo e o da base com a umidade volumétrica do corpo de prova. As diferenças de umidade gravimétrica foram divididas pela média de suas respectivas leituras de topo e base, para uma melhor análise e identificação de outliers.

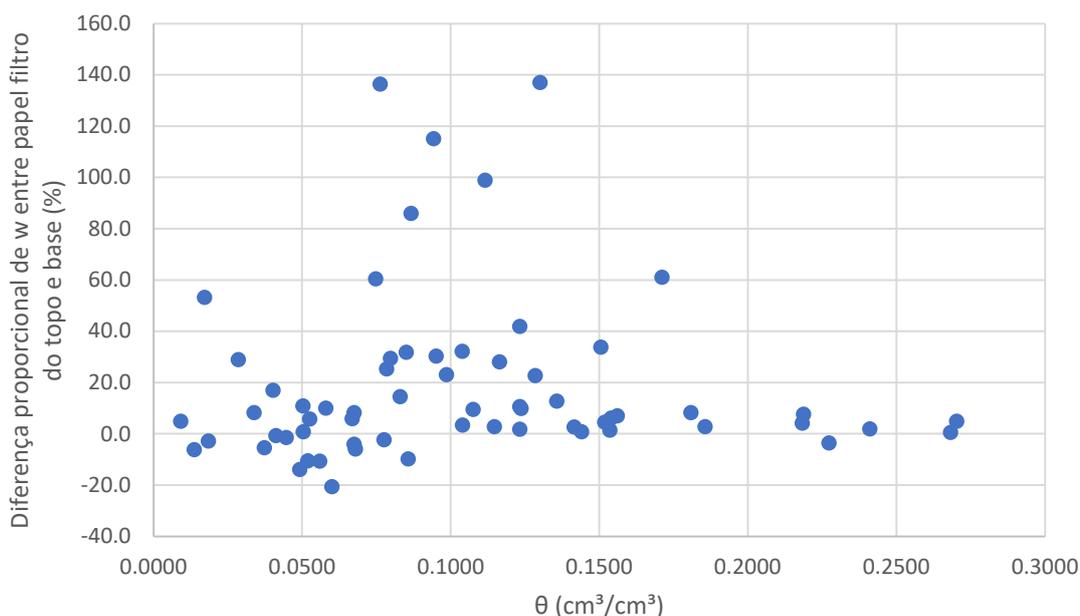


Figura 42- Variação da diferença proporcional de umidade gravimétrica entre o papel filtro do topo e o da base pelo teor de umidade volumétrica do corpo de prova.

Há consenso na literatura de que para maiores graus de saturação é necessário períodos mais longos de equalização. Por esse motivo, esperava-se que caso houvesse diferença significativa entre topo e base (indicando equalização incompleta), essa diferença aumentasse com o aumento da umidade volumétrica, contudo, isso não foi observado. A diferença de umidade gravimétrica, na Figura 42, é razoavelmente constante para os diferentes graus de saturação, com exceção na região de descontinuidade da curva de retenção, na qual a dispersão dos dados é maior.

Outra observação inesperada foi a ocorrência de diferenças negativa, que significam que a sucção da base é superior a sucção do topo. Esperava-se que, com o auxílio da gravidade, o papel filtro da base atingisse o equilíbrio (teor de umidade gravimétrico máximo/sucção mínima) mais rapidamente e que a diferença fosse sempre positiva ou nula (na equalização total).

Os valores negativos de diferença entre topo e base apareceram majoritariamente para sucções maiores, após a descontinuidade. Em ensaios experimentais, como essa diferença é pequena, é razoável que eventualmente ocorra esse comportamento inusitado. No entanto, das amostras ensaiadas, com grau de saturação abaixo de 35%, 40% delas apresentaram esse comportamento anômalo. Não foi encontrada nenhuma explicação razoável para essa observação.

Foram utilizados três métodos para a identificação de outliers, score z, score z modificado e boxplot. O primeiro consiste em atribuir uma pontuação a cada leitura, uma

discussão mais profunda do método pode ser encontrada presente em textos de análise de dados, como Kirch (2008). A pontuação é calculada subtraindo a média da leitura e dividindo pelo desvio padrão. Essa pontuação pode ser entendida como quantos desvios padrões uma leitura está acima ou abaixo da média. Empiricamente, considera-se um outlier quando o score-z é maior que 3 ou menor que -3.

Uma das desvantagens do score z é que outliers com valores muito extremos podem afetar significativamente a média e diminuir a eficácia do método. O score z modificado é análogo ao método anterior, mas, para minimizar esse problema, substitui em sua fórmula o desvio padrão e a média pelo desvio absoluto da mediana (MAD) e a mediana, respectivamente e multiplica o resultado por 0,675. Iglewicz & Hoaglin (1993) discutem com mais profundidade esse método. Os mesmos autores sugerem que um ponto seja considerado um outlier quando o score z modificado for maior que 3,5 ou menor que -3,5.

O terceiro método utilizado foi o gráfico conhecido como boxplot, abordado por diversos autores, como Tukey (1977). O método consiste em dividir a amostra em quartis e plotar uma caixa que contém os valores entre 25% e 75%. Para determinar os outliers, utiliza-se uma constante (1,5 no presente estudo) para multiplicar a amplitude interquartil (altura da caixa), somando ou subtraindo esse produto dos limites da caixa, definindo os limites superior e inferior.

A primeira metodologia indicou a presença de apenas um outlier. Já a segunda, também encontrou apenas um outlier na amostra, no entanto, não foi o mesmo ponto do primeiro método. Por fim, a utilização do boxplot resultou em oito outliers, estando presente nesse conjunto os dois pontos dos métodos anteriores. Julgou-se razoável a exclusão dos oitos pares de leitura para as análises posteriores.

A Figura 43 apresenta a curva de retenção destacando os outliers. É válido lembrar que os outliers não foram identificados em função da curva de retenção e há pontos que aparentemente condizem com a tendência da curva. No entanto, esses pares apresentaram as maiores diferenças de umidade entre topo e base, indicando comprometimento das leituras.

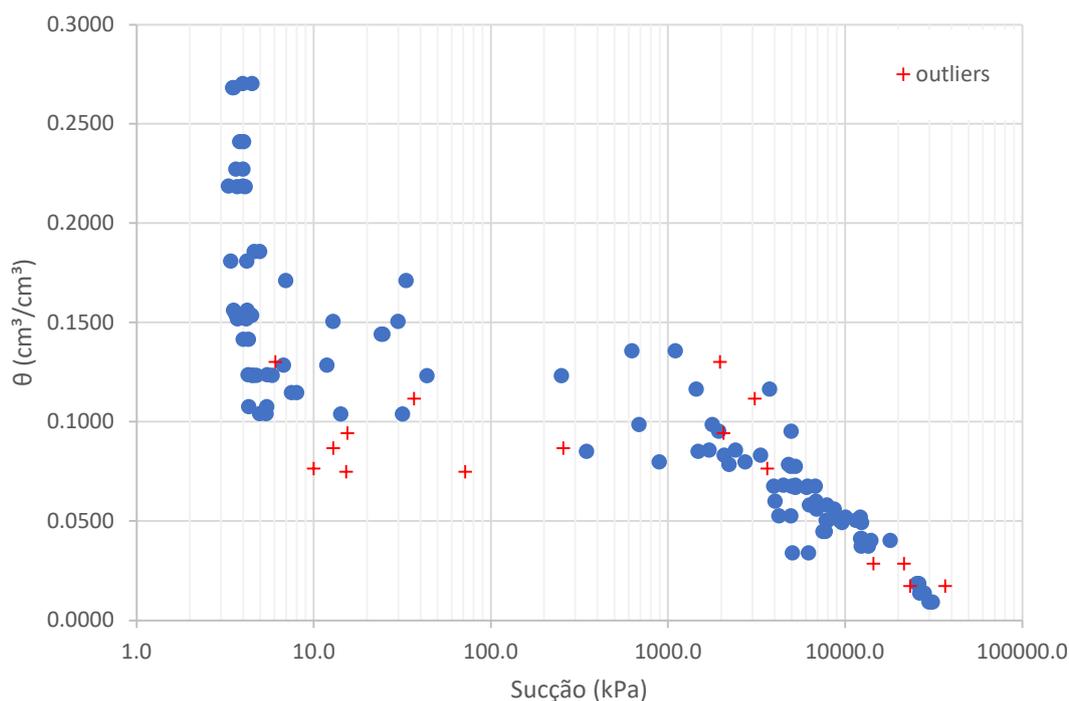


Figura 43 - Curva de retenção com a identificação de outliers

4.3.3 Elaboração da equação da curva de retenção

Para a elaboração de um modelo de maneira adequada, adotou-se a hipótese de que a relação entre o teor de umidade gravimétrico e a sucção é governada por duas equações exponenciais, como em diversas curvas de calibração presentes na literatura, no formato da eq. 4.1. A primeira é válida para sucções abaixo de 10 kPa, a segunda para valores acima de 200 kPa e entre essas equações há uma descontinuidade, não sendo o corpo de prova capaz de realizar leituras nesse intervalo.

$$\psi = 10^{(b+aw)} \quad \text{eq. 4.1}$$

As leituras no intervalo de descontinuidade foram desconsideradas. Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes das equações de cada trecho. A Figura 44 apresenta os dois trechos e as leituras utilizadas na determinação das equações.

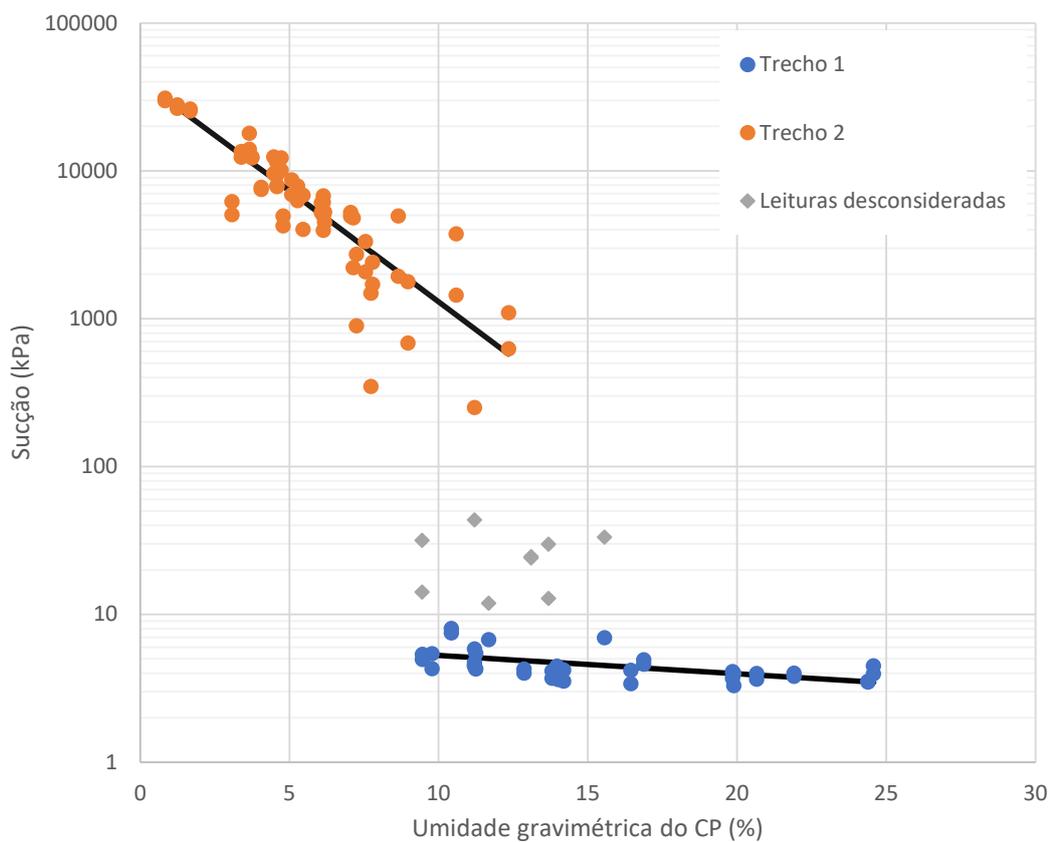


Figura 44 – Determinação das equações de cada trecho da curva de calibração dos corpos de prova

Utilizando-se novamente o método dos mínimos quadrados para determinar o teor de umidade mais adequado para a descontinuidade, chegou-se na eq. 4.2 e eq. 4.3, que estão representadas de forma gráfica na Figura 45.

$$\psi = 10^{(4,617 - 0,15045 w)} \quad w > 9\% \quad \text{eq. 4.2}$$

$$\psi = 10^{(0,8485 - 0,01252 w)} \quad w < 9\% \quad \text{eq. 4.3}$$

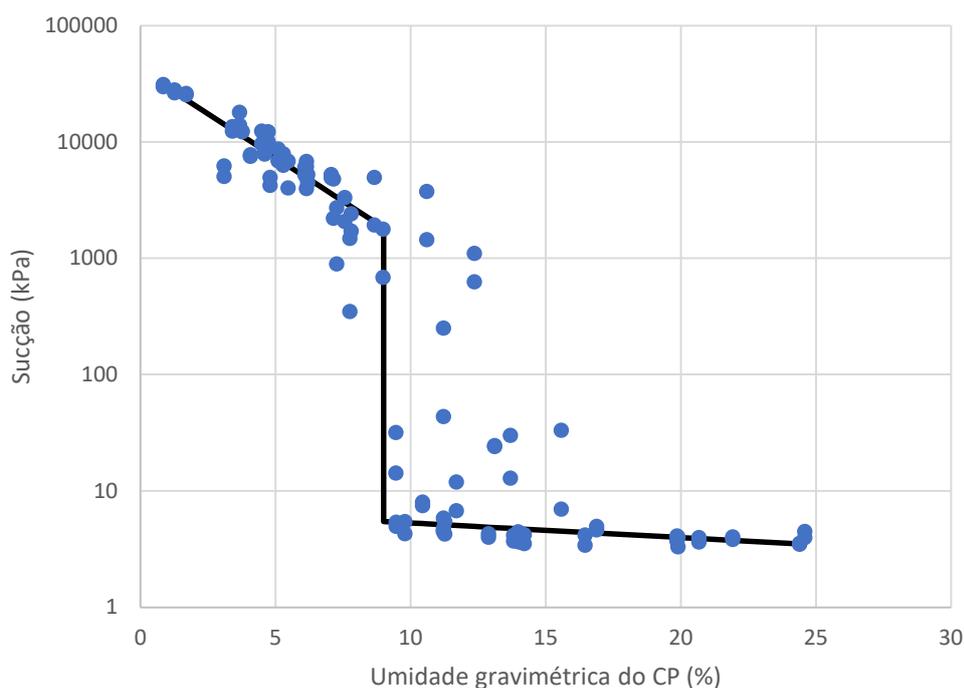


Figura 45 - Curva de calibração das amostras impressas

Comparando a curva de calibração proposta com as curvas de papel filtro presentes na literatura, é possível observar que há proximidade nos coeficientes. O valor do coeficiente a no primeiro trecho ($-0,150$), referente a teores de umidade maiores, é próximo do proposto por Leong et al. (2002) de $-0,191$, para medição de sucção total utilizando o papel filtro Schleicher & Schuell N° 589. Já o coeficiente a de $-0,0125$, referente a teores de umidade menores, é próximo ao valor recomendado pela ASTM D 5298-16 (2016) de $-0,0135$ para o papel Watman N° 42, lembrando que essa norma não faz distinção de curva de sucção mátrica e total.

Os valores do coeficiente b propostos também são compatíveis com os encontrados na literatura. Chandler et al. (1992) sugere $4,89$ para o papel Watman N° 42, em umidades mais elevadas, enquanto a presente pesquisa obteve $4,62$. Para o trecho com umidade menor, o valor proposto de $0,848$ é mais distante das curvas de que se tem conhecimento, ficando mais próximo da sugestão de Al-Khafaf & Hanks (1974), de $4,136$, obtida para o papel filtro Schleicher & Schuell N° 589.

Em um gráfico semilogarítmico, o coeficiente b representa a translação da reta e, por isso, a análise desse coeficiente não contribui com observações importantes. Há uma grande variação no teor de umidade de mudança de comportamento nas equações de papel filtro na literatura. A comparação desses valores com o valor de 9% proposto é ainda

menos relevante quando se considerando o fato que o papel filtro e o material utilizado possuem propriedades físico-químicas distintas.

Por outro lado, a proximidade do coeficiente angular proposto com o de curvas clássicas é extremamente relevante para essa pesquisa. Uma das condições de viabilidade do medidor estudado é a inclinação adequada das retas na curva de calibração. Trechos com inclinações muito elevadas ou muito baixas resultam em sensibilidade inadequada, e podem inviabilizar o medidor. O fato do parâmetro a ser similar aos valores da literatura significa que a curva proposta possui inclinação adequada.

Além da inclinação adequada, a diferença entre a leitura e o valor previsto é outro fator determinante na viabilidade do medidor. Na Figura 46 está apresentada a diferença relativa entre esses dados, relacionando-os com o teor de umidade gravimétrico.

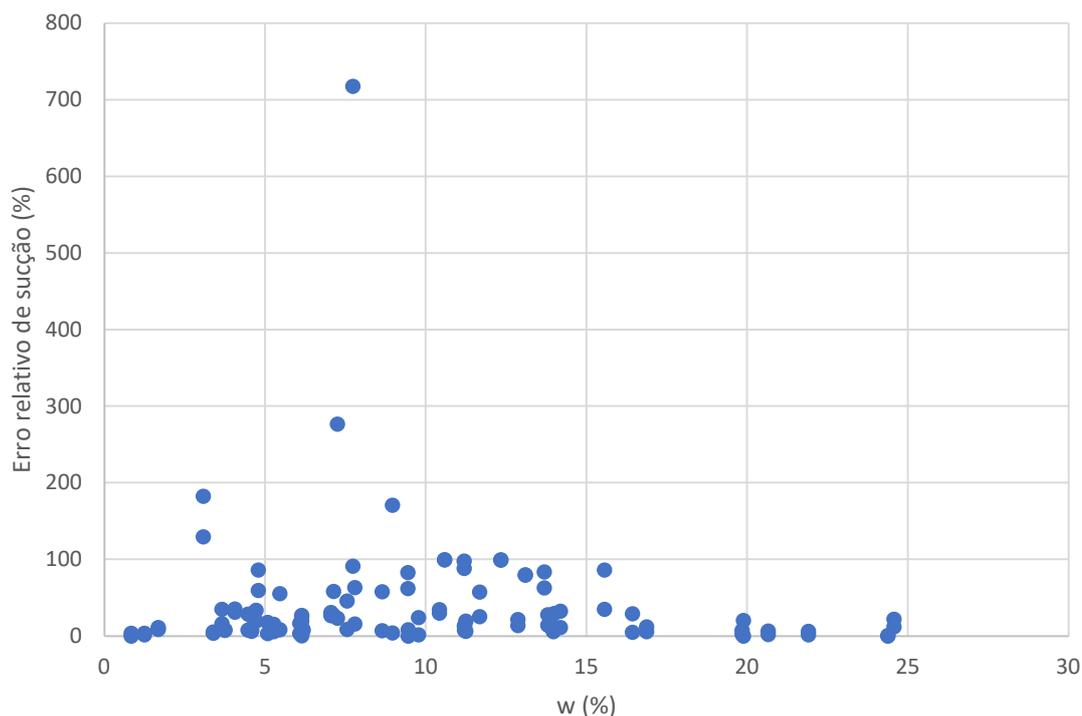


Figura 46 - Erro relativo entre sucção medida e valor previsto com a curva proposta em função do teor de umidade gravimétrico

Próximo a região de discontinuidade o erro foi maior, chegando a 700%. O erro relativo médio, por outro lado, foi significativamente menor, sendo de 39,5%. Limitando-se o intervalo de leitura do medidor obteve-se um resultado mais satisfatório. Para leituras abaixo de 10 kPa o erro relativo médio foi de 13,7%, esse intervalo, todavia, é limitado, compreendendo apenas leituras entre 3 e 10 kPa. No caso de leituras acima de 1500 kPa

o erro médio foi 27,5 %, sendo esse intervalo mais abrangente que o anterior, se estendendo de 1500 kPa até 30000 kPa (limite do papel filtro).

Na Figura 47, a curva de calibração foi reescrita na forma de uma curva de retenção. Observa-se que a curva desenvolvida representa adequadamente o comportamento das amostras nas regiões extremas. Há, no entanto, um erro significativo na região de descontinuidade, conforme já apresentado.

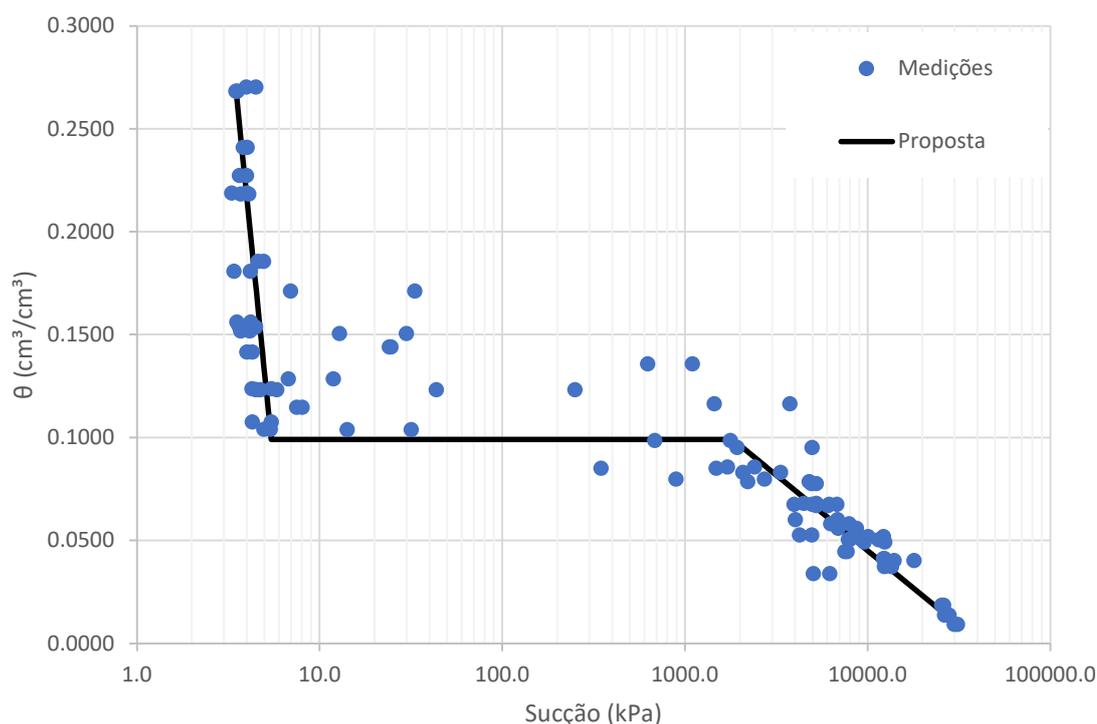


Figura 47 - Comparação da curva de retenção de água elaborada com modelo de Van Genuchten e com equação própria

4.4 Medição da sucção

Conhecendo-se a curva de calibração do medidor, o próximo passo para a construção do equipamento é a elaboração da metodologia de medição da umidade. Apesar da curva de calibração obtida no presente trabalho ainda necessitar de otimização, jugou-se pertinente discutir técnicas de medição de umidade adequadas para o medidor estudado.

Uma possível abordagem é a medição da umidade através da variação da resistência elétrica. Essa é uma metodologia simples e barata de ser implementada, contudo possui suas limitações, conforme discutido no Capítulo 2. As principais

desvantagens dos sensores de resistência elétrica são a baixa resolução e o fato das leituras poderem ser afetadas pelos solutos presentes na água.

Para utilizar essa metodologia com o medidor proposto é necessário estudar a variação das propriedades elétricas do material utilizado na impressão com o tempo e analisar o efeito da salinidade local, sendo, possivelmente, necessário o desenvolvimento de técnicas para compensar a salinidade adequadas para o medidor proposto.

Outra possível metodologia, também discutida na Capítulo 2, são os medidores de condutividade térmica. Ao contrário da metodologia anterior, a salinidade não é um problema significativo. Contudo, há outra questão que devem ser melhor compreendida para o emprego desses sensores. É sabido que a condutividade térmica do ar não varia, significativamente, com mudanças de temperatura, o mesmo, todavia, não é válido para água. Por isso, para a utilização desses sensores é necessário avaliar a sensibilidade do equipamento a variações de temperatura ambiente e desenvolver um método, próprio para o equipamento, para a sua correção.

Métodos radiológicos, como a emissão de nêutrons, também são viáveis, mas essas técnicas muitas vezes acabam sendo inviabilizadas devido aos cuidados adicionais necessários para o manuseio de material radioativo. Julgou-se que a utilização de sensores radiológicos não é uma alternativa promissora, uma vez que há outras metodologias possíveis, limitando-se, apenas, a menção desse método.

A quarta alternativa que se considerou relevante são os sensores baseados na constante dielétrica, como a reflectometria no domínio do tempo (TDR) e os sensores de capacitância. Essas técnicas emitem pulsos eletrônicos e determinam a constante dielétrica com base na velocidade de propagação (TDR) ou amplitude e fase (sensor de capacitância). Em geral, esses métodos não são afetados, significativamente, pela temperatura ou presença de contaminantes. Os sensores de capacitância, normalmente, operam em frequências mais baixas que o TDR e tendem a ser mais baratos.

Das quatro alternativas apresentadas, considera-se que os sensores de condutividade térmica e os sensores de capacitância são as metodologias mais promissoras. Acredita-se que os métodos radiológicos enfrentariam dificuldades excessivas em sua utilização devidos ao risco do material utilizado. Já no caso dos sensores de resistência, é desconhecido se o material utilizado na impressão possui as

propriedades adequadas para esse método e a escolha desses sensores pode resultar, eventualmente, na necessidade da troca do material utilizado na impressão 3D.

5 Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Conclusão

No presente trabalho, analisou-se a viabilidade da utilização de uma peça confeccionada com impressão 3D como um medidor de sucção. O estudo iniciou-se com uma revisão sistemática da literatura pertinente para a compreensão dos limites e aplicabilidade das técnicas de manufatura aditiva na geotecnia. Nessa etapa, concluiu-se que as tecnologias atuais fornecem a acurácia e precisão necessárias e há disponibilidade de materiais adequados.

A fase seguinte da análise foi a confecção das amostras com as impressoras disponíveis. O menor diâmetro que se atingiu sem a obstrução do furo foi de 0,6 mm, valor superior ao desejado, mas considerado suficiente para o prosseguimento da pesquisa. No entanto, a impossibilidade de diminuir esse diâmetro inviabilizou o objetivo de otimização da malha de furos. Apesar do corpo de prova ser considerado adequado, há questões a serem aprimoradas no processo de confecção, conforme exposto no Capítulo 3.

Em primeiro lugar, devido à resina utilizada, a amostra não pode ser submetida a temperaturas superiores a 100° C, o que dificultou a determinação do peso seco. Além disso, a configuração dos suportes facilitou a queda de fragmentos nos furos durante a remoção dos suportes. Adicionalmente, o equipamento utilizado na limpeza dos furos apresentou eficácia abaixo da desejada, resultado na presença de impurezas e obstrução parcial de alguns furos.

Na fase do processamento de imagem, apesar da presença de impurezas, observou-se técnica adotada forneceu boa precisão e concordância com o modelo digital. Medindo os furos impressos, verificou-se que o coeficiente de variação (CV) dos diâmetros foi 1,7%, o que indica homogeneidade dos valores. A geometria da peça impressa foi condizente com o modelo digital, sendo, em média, área dos furos 4% maior que a versão digital.

Na determinação do peso seco, como a amostra foi seca a 49° C, não foi possível garantir a vaporização total da água. O peso seco medido após massa constante (de 4 a 5

dias na estufa) foi 6,6% maior que o estimado com base no modelo digital. No entanto, constatou-se pouca variação do peso seco nos diferentes CPs, com CV de 1%. Essa observação reforça a constatação de que a metodologia possui precisão adequada.

Na fase de saturação, verificou-se que os corpos de prova com a geometria maior (CP-Tipo A) não eram capazes de atingir a saturação total apenas por capilaridade. Todavia, esse fato não resultou em nenhuma diferença notável na curva de retenção, quando comparado com a amostra menor (CP-Tipo B). Nessa mesma etapa, utilizando a saturação por imersão, observou-se que os CPs apresentavam baixa dispersão no teor de umidade gravimétrico (aproximadamente 24,5%) ao atingirem a saturação.

A curva de retenção do amostrador do presente estudo mostrou um comportamento bimodal, definido por duas retas (na escala semilogarítmica) separadas por uma descontinuidade. Esse comportamento difere da outra pesquisa, de que se tem conhecimento, que obteve a curva de retenção de um corpo de prova impresso.

Foi desenvolvido um par de equações exponenciais para modelar a curva de calibração do medidor proposto. Ambas as equações possuem coeficiente angular próximos aos de curvas de calibração de papel filtro encontradas na literatura, o que comprova que a inclinação da curva do medidor é satisfatória.

Apesar da inclinação adequada, a descontinuidade limitou o intervalo no qual o medidor é aplicável e aumentou o erro de medição. O erro relativo médio de sucção foi de 39,5%, contudo no trecho de descontinuidade esse erro foi significativamente maior, chegando a 700%. Por esse motivo, concluiu-se que o medidor não deve ser aplicado na região de descontinuidade.

A primeira região aplicável compreende sucções entre 3 e 10 kPa, tendo sido obtido um erro médio de sucção de 13,7%. Porém, essa região foi considerada insatisfatória devido a variação limitada de sucção. Já a segunda compreende valores entre 1500 e 30000 kPa, possuindo um erro de 27,5%.

Dispondo dessas informações, concluiu-se que a manufatura aditiva é uma tecnologia viável para a confecção de medidores de sucção. Há, no entanto, melhorias a serem feitas na metodologia de impressão e pós-processamento das amostras, é necessário estudar com mais profundidade o efeito da geometria dos furos na curva de

retenção e é necessário otimizar a malha de furos para obter curvas com comportamento mais próximo do desejado.

5.2 **Sugestões para futuros trabalhos**

A impressão 3D é uma técnica extremamente versátil e capaz de contribuir com o avanço de diversas linhas de pesquisa da geotecnia, conforme exposto no Capítulo 2. No desenvolvimento de ensaio in situ utilizando um medidor criado com manufatura aditiva, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros, a fim de ampliar as conclusões desta pesquisa:

- Estudo do efeito da geometria/dimensão do furo na curva de retenção de água
- Otimização da malha de furos para obtenção de curvas de retenção com comportamento desejado, como inclinação adequada, intervalos de leituras expressivos e eliminação de descontinuidades.
- Análise de diferentes tipos de materiais, observando quais propriedades físico-químicas são relevantes e quais são seus efeitos na curva de retenção.
- Elaboração de um ensaio in situ de sucção com o medidor proposto, determinando-se, por exemplo, forma de cravação e metodologia do ensaio.
- Desenvolvimento de instrumentação adequada para a leitura, em campo, do teor de umidade no medidor.

6. Referências bibliográficas

3DLab. (2021). Ficha Técnica Resina Standard 3D Lab. Disponível em: <https://imagens.3dlab.com.br/wp-content/uploads/2021/11/Data-Sheet-Resina-3D-Satandard-Clear-2-1.pdf>. Acesso em: 20 mai. de 2023.

3DLab. (sd). Informações técnicas da Impressora 3D Ender 5 PLUS. Disponível em: <https://3dlab.com.br/produto/ender-5-plus-kit/>. Acesso em: 10 mai. de 2023.

Aitchison, G. D. (1965) Review Panel Statement – Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. In.: Conference on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soil Beneath Covered Areas, 1, 1965, London, England. Proceedings ... London: Butterworths, p. 7-21.

Al-Dwairi, Z. N., Al Haj Ebrahim, A. A., Baba, N. Z. (2023). A Comparison of the Surface and Mechanical Properties of 3D Printable Denture-Base Resin Material and Conventional Polymethylmethacrylate (PMMA). *Journal of Prosthodontics*, 32(1), 40–48. <https://doi.org/10.1111/jopr.13491>

Al Rashid, A., Ahmed, W., Khalid, M. Y., Koç, M. (2021). Vat Photopolymerization of Polymers and Polymer Composites: Processes and Applications. *Additive Manufacturing*, 47, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279>

Al-Khafaf, S., (1972). Evaluation of the Filter Paper Method for Estimating Soil Water Potential. Master Degree Thesis. Department of Soil Science and Biometeorology. *Utah State University*. Logan, Utah.

Al-Khafaf, S., Hanks, R. J. (1974). Evaluation of the Filter Paper Method for Estimating Soil Water Potential. *Soil Science*, 117(4), 194–199. <https://doi.org/10.1097/00010694-197404000-00003>

Alexandrea, P. (2024). The Complete Guide to Binder Jetting in 3D Printing. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/#!> Acesso em: 17 abr. de 2024.

Almetwally, A. G., Jabbari, H. (2020). Experimental investigation of 3D printed rock samples replicas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103192>

Almetwally, A. G., Jabbari, H. (2021). CO2 huff-n-puff experimentation and numerical simulation for 3D printed rock samples. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121798. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121798>

Almetwally, A. G., Jabbari, H. (2021). 3D-Printing Replication of Porous Media for Lab-Scale Characterization Research. *ACS Omega*, 6(4), 2655–2664. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04825>

Anjekar, I. S., Wales, S., Beckingham, L. E. (2020). Fused Filament Fabrication 3-D Printing of Reactive Porous Media. *Geophysical Research Letters*, 47(9). <https://doi.org/10.1029/2020GL087665>

Aria M, Cuccurullo C (2017). “bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis.” *Journal of Informetrics*. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.

Arrieta-Escobar, J. A., Derrien, D., Ouvrard, S., Asadollahi-Yazdi, E., Hassan, A., Boly, V., Tinet, A.-J., & Dignac, M.-F. (2020). 3D printing: An emerging opportunity for soil science. *Geoderma*, 378. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114588>

ASTM 52900 (2021). Additive Manufacturing-General Principles-Terminology. *ASTM International*, West Conshohoken, PA. <https://doi.org/10.1520/F3177-21>

ASTM 5298 (2016). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) using filter paper. *ASTM International*, West Conshohoken, PA. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>

Bacher, M., Schwen, A., Koestel, J. (2015). Three-dimensional printing of macropore networks of an undisturbed soil sample. *Vadose Zone Journal*, 14(2). <https://doi.org/10.2136/vzj2014.08.0111>

Bedell, R., Hassan, A., Tinet, A.-J., Arrieta-Escobar, J., Derrien, D., Dignac, M.-F., Boly, V., Ouvrard, S., Pearce, J. M. (2021). Open-Source Script for Design and 3D Printing of Porous Structures for Soil Science. *Technologies*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/technologies9030067>

Bhattacharjee, N., Urrios, A., Kang, S., Folch, A. (2016). The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics. *Lab on a Chip*, 16(10), 1720–1742. <https://doi.org/10.1039/C6LC00163G>

Bicerano, J. (2003). Glass Transition. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst149>

Bunea, A.-I., Szczotka, N., Navne, J., Taboryski, R. (2023). Single-step fabrication of superhydrophobic surfaces by two-photon polymerization micro 3D printing. *Micro and Nano Engineering*, 19, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100192>

Campbell Scientific (sd). 229 Heat Dissipation Matric Water Potential Sensor – Instruction Manual. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/229.pdf>. Acesso em: 19 fev. de 2024.

Chandler, R., Crilly, M., Smith, M. (1992). A Low-Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-Rise Buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 92(2), 82–89. <https://doi.org/10.1680/icien.1992.18771>

Chandler, R. J., Gutierrez, C. I. (1986). The filter-paper method of suction measurement. *Géotechnique*, 36(2), 265–268. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.265>

Creality (sd). Product Parameters. Disponível em: <https://www.creality.com/products/creality-halot-one-resin-3d-printer>. Acesso em: 20 mai. de 2023.

Cruz-Maya, J. A., Martinez-Mendoza, L. C., Sanchez-Silva, F., Rosas-Flores, J. A., Jan-Roblero, J. (2022). Three-Dimensional Additive Manufacturing of Artificial Oil Reservoir Rock Core Plugs for Core Flooding Experimental Tests. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(4), 233–243. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0149>

Dal Ferro, N., Morari, F. (2015). From real soils to 3D-printed soils: Reproduction of complex pore network at the real size in a silty-loam soil. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4), 1008–1017. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.03.0097>

Dande, S., Stewart, R. R., Dyaur, N. (2021). Effect of Fluids on the Elastic Properties of 3D-Printed Anisotropic Rock Models. *Petrophysics*, 62(5, SI), 537–552. <https://doi.org/10.30632/PJV62N5-2021a7>.

Denyer, D., Tranfield, D., Aken, van, J. E. (2008). Developing design propositions through research synthesis. *Organization Studies*, 29(3), 393-413. <https://doi.org/10.1177/0170840607088020>.

Elsayed, M., El-Husseiny, A., Kwak, H., Hussaini, S. R., Mahmoud, M. (2021). New Technique for Evaluating Fracture Geometry and Preferential Orientation Using Pulsed Field Gradient Nuclear Magnetic Resonance. *SPE Journal*, 26(5), 2880–2893.

Ferrari, A., Frank, D., Hennen, L., Moniz, A., Torgersen, H., Torgersen, J., Bodegom, L., Duijne, F., Geesink, I., Boucher, P., Van der Meulen, B., Mordini, E., Riisgaard, K., Nielsen, R. Ø., Baumann, M., Coenen, C., (2018). Additive bio-manufacturing: 3D printing for medical recovery and human enhancement. European Parliamentary Research Service. *Scientific Foresight Unit (STOA)*. <http://dx.doi.org/10.2861/923327>

Ferrari, A., Rosone, M., La Rosa, S., Sapienza, G. (2022). Microstructural characterization of a 3D-printed soil. *Soils and Rocks*, 45(4). <https://doi.org/10.28927/SR.2022.005422>

Flint, A. L., Campbell, G. S., Ellett, K. M., Calissendorff, C. (2002). Calibration and Temperature Correction of Heat Dissipation Matric Potential Sensors. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1439–1445. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1439>

Fredlund, D. G. (1989). Soil Suction Monitoring for Roads and Airfields. Symposium on the State-of-the-art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields. *U.S Army Corps of Engineers*.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M. D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. *John Wiley & Sons*. <https://doi.org/10.1002/9781118280492>

Gardner, R. (1937). A Method of Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture Over a Wide Moisture Range. *Soil Science*, 43(4), 277–284. <https://doi.org/10.1097/00010694-193704000-00004>

Gomez, J. S., Chalaturnyk, R. J., Zambrano-Narvaez, G. (2019). Experimental Investigation of the Mechanical Behavior and Permeability of 3D Printed Sandstone Analogues Under Triaxial Conditions. *Transport in Porous Media*, 129(2), 541–557. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1177-0>

Goral, J., & Deo, M. (2020). Nanofabrication of synthetic nanoporous geomaterials: from nanoscale-resolution 3D imaging to nano-3D-printed digital (shale) rock. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78467-z>

Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18, e1230. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>

Hasiuk, F., Harding, C. (2021). 3D Printing Mudrocks: Experiments in Validating Clay as a Build Material for 3D Printing Porous Micromodels. *Petrophysics*, 62(5), 486–499. <https://doi.org/10.30632/PJV62N5-2021a4>

Hasiuk, F. J. (2019). Testing Bulk Properties of Powder-Based 3D-Printed Reservoir Rock Proxies. *Transport in Porous Media*, 129(2, SI), 501–520. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1221-0>

Hasiuk, F., Ishutov, S., Pacyga, A. (2018). Validating 3D-printed porous proxies by tomography and porosimetry. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3, SI), 630–636. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2017-0121>

Head, D., Vanorio, T. (2016). Effects of changes in rock microstructures on permeability: 3-D printing investigation. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7494–7502. <https://doi.org/10.1002/2016GL069334>

Hodder, K. J., Craplewe, K., Ishutov, S., Chalaturnyk, R. (2021). Binder Saturation as a Controlling Factor for Porosity Variation in 3D-Printed Sandstone. *Petrophysics*, 62(5), 450–462. <https://doi.org/10.30632/PJV62N5-2021a1>

Hodder, K. J., Sanchez-Barra, A. J., Ishutov, S., Zambrano-Narvaez, G., Chalaturnyk, R. J. (2022). Increasing Density of 3D-Printed Sandstone through Compaction. *Energies*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/en15051813>

Huang, L., Stewart, R. R., Dyaar, N., Baez-Franceschi, J. (2016). 3D-printed rock models: Elastic properties and the effects of penny-shaped inclusions with fluid substitution. *Geophysics*, 81(6), D669–D677. <https://doi.org/10.1190/GEO2015-0655.1>

Ibrahim, E. R., Jouini, M. S., Bouchaala, F., Gomes, J. (2021). Simulation and Validation of Porosity and Permeability of Synthetic and Real Rock Models Using Three-Dimensional Printing and Digital Rock Physics. *ACS Omega*, 6(47), 31775–31781. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04429>

Iglewicz, B., Hoaglin, D. (1993). How to detect and handle outliers. *ASQC Quality Press*.

INMETRO (2012). Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia*. Duque de Caxias, RJ.

Irrrometer (sd). Soil Moisture Sensor. Disponível em: <https://www.irrometer.com/sensors.html#wm>. Acesso em: 20 fev. de 2024.

Ishutov, S. (2019). Establishing Framework for 3D Printing Porous Rock Models in Curable Resins. *Transport in Porous Media*, 129(2), 431–448. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01297-9>

Ishutov, S., Hasiuk, F. J. (2017). 3D Printing Berea Sandstone: Testing a New Tool for Petrophysical Analysis of Reservoirs. *Petrophysics*, 58(6), 592–602.

Ishutov, S., Hasiuk, F. J., Fullmer, S. M., Buono, A. S., Gray, J. N., Harding, C. (2017). Resurrection of a reservoir sandstone from tomographic data using three-dimensional printing. *AAPG Bulletin*, 101(9), 1425–1443. <https://doi.org/10.1306/11111616038>

Ishutov, S., Hasiuk, F. J., Jobe, D., Agar, S. (2018). Using Resin-Based 3D Printing to Build Geometrically Accurate Proxies of Porous Sedimentary Rocks. *Groundwater*, 56(3), 482–490. <https://doi.org/10.1111/gwat.12601>

Ishutov, S., Hodder, K., Chalaturnyk, R., Zambrano-Narvaez, G. (2021). Replication of Carbonate Reservoir Pores at the Original Size Using 3D Printing. *Petrophysics*, 62(5, SI), 477–485. <https://doi.org/10.30632/PJV62N5-2021a3>

Jouini, M. S., Gomes, J. S., Tembely, M., Ibrahim, E. R. (2021). Upscaling Strategy to Simulate Permeability in a Carbonate Sample Using Machine Learning and 3D Printing. *IEEE Access*, 9, 90631–90641. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3091772>

Ju, Y., Xi, C., Zheng, J., Gong, W., Wu, J., Wang, S., Mao, L. (2022). Study on three-dimensional immiscible water–Oil two-phase displacement and trapping in deformed pore structures subjected to varying geostress via in situ computed tomography scanning and additively printed models. *International Journal of Engineering Science*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103615>

Ju, Y., Zheng, Z., Xie, H., Lu, J., Wang, L., He, K. (2017). Experimental Visualisation Methods for Three-Dimensional Stress Fields of Porous Solids. *Experimental Techniques*, 41(4), 331–344. <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0178-1>

Ju, Y., Ren, Z., Li, X., Wang, Y., Mao, L., Chiang, F.-P. (2019). Quantification of Hidden Whole-Field Stress Inside Porous Geomaterials Via Three-Dimensional Printing and Photoelastic Testing Methods. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 124(6), 5408–5426. <https://doi.org/10.1029/2018JB016835>

Ju, Y., Ren, Z., Mao, L., Chiang, F.-P. (2018). Quantitative visualisation of the continuous whole-field stress evolution in complex pore structures using photoelastic testing and 3D printing methods. *Optics Express*, 26(5), 6182–6201. <https://doi.org/10.1364/OE.26.006182>

Kirch, W. (2008). z-Score. *Encyclopedia of Public Health*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5614-7_3826

Kitao, T., Fukumoto, Y., Fujisawa, K., Jewel, A., Murakami, A. (2021). Validation of LBM simulation of saturated seepage flow through 3D-printed homogeneous porous medium for fluid-particle coupled analysis. *ACTA Geotechnica*, 16(8, SI), 2643–2656. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01210-z>

Kong, L., Ishutov, S., Hasiuk, F., Xu, C. (2021a). 3D Printing for Experiments in Petrophysics, Rock Physics, and Rock Mechanics: A Review. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 24(4), 721–732. <https://doi.org/10.2118/206744-PA>

Kong, L., Ostadhassan, M., Li, C., Tamimi, N. (2018a). Can 3-D Printed Gypsum Samples Replicate Natural Rocks? An Experimental Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(10), 3061–3074. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1520-3>

Kong, L., Ostadhassan, M., Liu, B., Eshraghi, M., Li, C., Navarro, M., Zhang, Y., Wei, H. (2021b). A comparison of three-dimensional- printed porous rocks with nano x-ray computed tomography: Silica sand, gypsum powder, and resin. *AAPG Bulletin*, 105(11), 2245–2261. <https://doi.org/10.1306/08142019028>

Kong, L., Ostadhassan, M., Hou, X., Mann, M., Li, C. (2019a). Microstructure characteristics and fractal analysis of 3D-printed sandstone using micro-CT and SEM-EDS. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 1039–1048. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.050>

Kong, L., Ostadhassan, M., Li, C., Tamimi, N. (2018b). Pore characterization of 3D-printed gypsum rocks: a comprehensive approach. *Journal of Materials Science*, 53(7), 5063–5078. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1953-1>

Kong, L., Ostadhassan, M., Liu, B., Li, C., Liu, K. (2019b). Multifractal Characteristics of MIP-Based Pore Size Distribution of 3D-Printed Powder-Based Rocks: A Study of Post-Processing Effect. *Transport in Porous Media*, 129(2, SI), 599–618. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1152-9>

Lamande, M., Schjonning, P., Dal Ferro, N., Morari, F. (2021). Soil pore system evaluated from gas measurements and CT images: A conceptual study using artificial, natural and 3D-printed soil cores. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 769–781. <https://doi.org/10.1111/ejss.12999>

Leong, E. C., He, L., Rahardjo, H. (2002). Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25(3), 8198. <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>

Lesueur, M., Zhang, X., Poulet, T., Veveakis, M. (2023). Predicting the Yield Stress of Geomaterials from Their Microstructure. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 205–211. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22213-9_21

Lesueur, M., Poulet, T., Veveakis, M. (2021). Predicting the yield strength of a 3D printed porous material from its internal geometry. *Additive Manufacturing*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102061>

Li, A., Zhang, S., Xu, C., Zhao, X., Zhang, X. (2021). 3D Printing of True Pore-Scale Berea Sandstone and Digital Rock Verification. *SPE Journal*, 26(6), 3719–3724. <https://doi.org/10.2118/205383-PA>

Löffler, R., Koch, M. (2019). Innovative Extruder Concept for Fast and Efficient Additive Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.071>

Lu, N. Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

Ma, S., Jin, G., Antle, R., Wieneke, B. (2023). 3D Printed Rocks - An Emerging Technology for Systematic Petrophysical Studies. *Paper presented at the Middle East Oil, Gas and Geosciences Show*. <https://doi.org/10.2118/213383-MS>

Mahabadi, N., BeGell, D., Zheng, X., Paassen, L. van, Jang, J. (2018). The Soil Water Characteristic Curve for 3D Printed Soil Samples. *PanAm Unsaturated Soils 2017*, 68–76. <https://doi.org/10.1061/9780784481684.008>

Marinho, F. A. M. (1994). *Shrinkage Behavior of Some Plastic Soils*. PhD. Thesis, Imperial College, University of London.

Marinho, F.A.M. (1997). Medição de Sucção em Solos. In: *III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*. Rio de Janeiro/RJ. pp. 373-397.

Marinho, F.A.M. (2005). *Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados*. Tese de Livre Docência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. *Universidade de São Paulo*. 300p.

Marinho, F.A.M. (2017). Medição de Sucção. Notas de Aula da Disciplina Mecânica de Solos não Saturados. *Universidade de São Paulo*.

McQueen, I. S., Miller, R. F. (1968). Calibration and Evaluation of a Wide-Range Gravimetric Method for Measuring Moisture Stress. *Soil Science*, 106(3), 225–231. <https://doi.org/10.1097/00010694-196809000-00012>

Meter. (sd). Teros 31 – Lab Tensiometer. Meter Group. Disponível em: <https://metergroup.com/products/teros-31/>. Acesso em: 10 fev. de 2024.

3DLab. (2021). Ficha Técnica Resina Standard 3D Lab. Disponível em: <https://imagens.3dlab.com.br/wp-content/uploads/2021/11/Data-Sheet-Resina-3D-Satandard-Clear-2-1.pdf>. Acesso em: 20 mai. de 2023.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., the PRISMA Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA statement. *Annals of Internal Medicine*, 151(4), 264 – 269. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135>

Moritz, T., Maleksaeedi, S. (2018). 4 - Additive Manufacturing of Ceramic Components. *Butterworth-Heinemann*, pp. 105-161. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00004-9>

Negromonte, E. (2019). O que é o formato de arquivo STL? *SempreUpdate*. Disponível em: <https://sempreupdate.com.br/o-que-e-formato-de-arquivo-stl-para-impressoes-em-3d/>. Acesso em: 13 mai. de 2023.

Patsoukis Dimou, A., Menke, H. P., Maes, J. (2022). Benchmarking the Viability of 3D Printed Micromodels for Single Phase Flow Using Particle Image Velocimetry and Direct Numerical Simulations. *Transport in Porous Media*, 141(2), 279–294. <https://doi.org/10.1007/s11242-021-01718-8>

Perras, M. A., Vogler, D. (2019). Compressive and Tensile Behavior of 3D-Printed and Natural Sandstones. *Transport in Porous Media*, 129(2, SI), 559–581. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1153-8>

Rasheed, M. W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Khan, M. U., Imran Khan, M., Nawaz, S., Shamshiri, R. R., Aziz, M., Sultan, M. (2022). Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 14(18), 11538. <https://doi.org/10.3390/su141811538>

Richardson, W.S., Wilson, M.C., Nishikawa, J., Hayward, R.S. (1995). The well-built clinical question: a key to evidence-based decisions. *ACP Journal Club*, 123 3, A12-3.

Ridley, A. M., Burland, J. B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2), 321–324. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.321>

Santecchia, E., Spigarelli, S., Cabibbo, M. (2020). Material Reuse in Laser Powder Bed Fusion: Side Effects of the Laser—Metal Powder Interaction. *Metals*, 10(3), 341. <https://doi.org/10.3390/met10030341>

Santiago, V., Zabala, F. G., Sanchez-Barra, A. J., Deisman, N., Chalaturnyk, R. J., Zhong, R., Hurter, S. (2022). Experimental investigation of the flow properties of layered coal-rock analogues. *Chemical Engineering Research & Design*, 186, 685–700. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.046>

Schafrik, S., Millar, D. L. (2015). Verification of a CFD code use for air flow simulations of fractured and broken rock. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1131–1143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.021>

Shuai, F., Clements, C., Ryland, L., Fredlund, D. G. (2002). Some Factors that Influence Soil Suction Measurements Using a Thermal Conductivity Sensor. *Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002*, Recife, Brasil.

Silva, A. V., Solis, D. M., Innocentini, M. D. M., Foggiatto, J. A. (2023). Preliminary study for permeability adjustment of triaxial porous ceramic media obtained by binder jetting. *Journal of Manufacturing Processes*, 87, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.058>

Snedecor, G.W., Cochran, W.G (1967). *Statistical Methods*. 6th Edition, Iowa State University Press, Ames.

Soares, E. P (2008). Caracterizações geotécnica e mineralógica de um filito dolomítico do Quadrilátero Ferrífero com vistas ao estudo de estabilidade de taludes incorporando a sucção. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Song, R., Wang, Y., Ishutov, S., Zambrano-Narvaez, G., Hodder, K. J., Chalaturnyk, R. J., Sun, S., Liu, J., Gamage, R. P. (2020). A Comprehensive Experimental Study on Mechanical Behavior, Microstructure and Transport Properties of 3D-printed Rock Analogs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(12), 5745–5765. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02239-4>

Song, R., Wang, Y., Sun, S., Liu, J. (2021). Characterization and microfabrication of natural porous rocks: From micro-CT imaging and digital rock modelling to micro-3D-printed rock analogs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108827>

Song, R., Wang, Y., Tang, Y., Peng, J., Liu, J., Yang, C. (2022). 3D Printing of natural sandstone at pore scale and comparative analysis on micro-structure and single/two-phase flow properties. *Energy*, 261(A). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125226>

Strongylis, M. (2019). Relação Chuva vs. Umidade em Solos não Saturados. Dissertação de Mestrado. *Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro*. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.53354>

Tang, D., Hao, L., Li, Y., Xiong, W., Sun, T., Yan, X. (2018). Investigation of wax-based barite slurry and deposition for 3D printing landslide model. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 108, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.007>

Tukey, J. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesely.

van Eck N. J., Waltman L. (2010) ‘Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping’, *Scientometrics*, 84/2: 523–38.

Vettorello, D. L., & Marinho, F. A. M. (2021). Evaluation of time response of GMS for soil suction measurement. *MATEC Web of Conferences*, 337, 01014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133701014>

Villar, L. F. (2022). Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de Doutorado. *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*.

Wang, Y., Li, S., Song, R., Liu, J., Ye, M., Peng, S., Deng, Y. (2022). Effects of Grain Size and Layer Thickness on the Physical and Mechanical Properties of 3D-Printed Rock Analogs. *Energies*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/en15207641>

Wollner, U., Vanorio, T., Kiss, A. M. (2018). The effect of fluid and solid properties on the auxetic behavior of porous materials having rock-like microstructures. *International Journal of Solids and Structures*, 130–131, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.09.033>

Wu, H., Ju, Y., Han, X., Ren, Z., Sun, Y., Zhang, Y., Han, T. (2022). Size effects in the uniaxial compressive properties of 3D printed models of rocks: an experimental investigation. *International Journal of Coal Science and Technology*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00556-3>

Wu, T., Zhao, H., Xu, Q., Zhao, Y. (2022). Optimal analysis of material ratio for artificial rock by 3D printing technique. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), 260–268. <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1739752>

Xometry. (2023). Direct Energy Deposition (DED): Definition, Examples, How Does It Work, Advantages and Disadvantages. Disponível em: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/direct-energy-deposition-ded/>. Acesso em: 08 nov. de 2023.

Zhang, K., Li, N. (2022). A new method to replicate high-porosity weak rocks subjected to cyclic freezing-thawing: Sand 3D printing and digital image correlation explorations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105174>