UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS GERADOS ARTIFICIALMENTE POR IMPRESSÃO 3D

RAFAEL MENDES JORGE

ORIENTADOR: ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE
COORIENTADORA: MARTA PEREIRA DA LUZ

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL II

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS GERADOS ARTIFICIALMENTE POR IMPRESSÃO 3D

RAFAEL MENDES JORGE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

_____

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, PhD (ENC-UnB)
(ORIENTADOR)

_____

MARTA PEREIRA DA LUZ, PhD (FURNAS)
(COORIENTADORA)

_____

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, PhD (ENC-UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)

_____

LUCAS PARREIRA DE FARIA BORGES, DSc. (ENC-UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 22 DE SETEMBRO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

JORGE, RAFAEL MENDES
Análise de fluxo de água em meio poroso gerado artificialmente por impressão 3D.

xi, 54 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2022)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
1. Autômatos Celulares 2. Impressão 3D
3. Meios porosos artificiais 4. Microestrutura do solo
I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JORGE, R.M. (2022). Análise de fluxo de água em meio poroso gerado artificialmente por impressão 3D. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafael Mendes Jorge
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise de fluxo de água em meio poroso gerado artificialmente por impressão 3D
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2022.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Rafael Mendes Jorge
meendes.rafa@gmail.com
Brasília/DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de conhecer, conviver e aprender diariamente com pessoas extraordinárias durante todo o curso de graduação.

À minha família, por todo o suporte e motivação, sem eles nada disso seria possível, em especial ao meu pai pelo apoio em todos os projetos de pesquisa.

Aos meus orientadores, o prof. André Brasil pelo apoio no desenvolvimento no trabalho, pela disponibilidade para resolver os diversos problemas que apareceram no caminho e pela oportunidade de trabalhar junto com um grupo de pesquisa tão rico em profissionais de alta qualidade, e a profª. Marta pelo apoio e disponibilidade durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos alunos do grupo de pesquisa Geofluxo, pelas sugestões e auxílio durante a execução deste trabalho e dos projetos de pesquisa que tive oportunidade de participar. Em especial, Katherin, Manuelle, Patrícia, Ana Paola, Jaqueline e Luan.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental que me ajudaram a trilhar o caminho e a construir o conhecimento para formar o profissional que sou hoje, em especial aos professores Lineu e André Assis.

Aos profissionais do laboratório de Furnas, por toda a ajuda durante o desenvolvimento da pesquisa, pelas sugestões e disponibilidade. Em especial, ao Fernando, Ricardo e Adolfo, do Laboratório de Aerodinâmica e ao Leandro, do Laboratório de Química.

A Tomas Silva Santisteban da Thermo Fisher Scientific por disponibilizar a licença do *software* Avizo, possibilitando o desenvolvimento desta pesquisa. A Jesse, da Stratasys, pela doação do material e ao meu amigo Lucas Alves, e aos profissionais Herlis Gomes e Verônica Guedes do DIMEX, que auxiliaram na importação.

Por fim, a todos que contribuíram para minha formação profissional, muito obrigado!

RESUMO

O conhecimento da microestrutura dos meios porosos é essencial para compreender e estimar as propriedades macroscópicas de fluxo, sendo relevante em diversas áreas do conhecimento na engenharia. Esse conhecimento parte da definição de um domínio no qual é possível conduzir simulações de fluxo computacionalmente. Diversas metodologias têm sido exploradas na literatura para gerar este domínio, como a reconstrução de imagens obtidas por microtomografias, simulações de sedimentação de grãos, autômatos celulares, entre outros. Os autômatos celulares, programas baseados em regras simples que apresentam comportamento complexo têm sido cada vez mais utilizados na literatura para representar meios porosos artificiais e a impressão 3D tem sido utilizada como ferramenta para relacionar os conhecimentos teóricos com os práticos, utilizados usualmente na mecânica dos solos. Utilizando uma metodologia para obtenção de autômatos celulares, foram gerados modelos computacionais de solos e dois parâmetros relacionados às características físicas das amostras foram analisados: a porosidade e a permeabilidade. A permeabilidade das amostras foi avaliada numericamente e experimentalmente. As amostras foram produzidas utilizando o método de impressão 3D denominado *Fused Deposition Modeling* (FDM), sendo proposta uma metodologia para geração das amostras através da análise dos principais parâmetros que influenciam na qualidade das impressões. Foram utilizados modelos auxiliares para calibrar os parâmetros e um filamento solúvel para impressão da rede de poros. Os modelos impressos foram submetidos ao ensaio de permeabilidade à carga constante para avaliação da permeabilidade experimental. A análise visual da estrutura externa dos modelos impressos permitiu observar a semelhança entre os modelos computacionais e os resultados da impressão 3D através do método proposto. A comparação dos valores numéricos de permeabilidade intrínseca, obtidos através de simulações numéricas, e os valores experimentais, permitiu observar diferenças de até 3 ordens de grandeza, o que pode ser um indicativo de ineficiência do método em representar o meio poroso de forma satisfatória.

Palavras-chave: Autômatos celulares, Impressão 3D, Meio poroso artificial, Microestrutura do solo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

2. OBJETIVOS DA PESQUISA 13

2.1. OBJETIVO GERAL 13

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

3.1. MEIOS POROSOS ARTIFICIAIS 14

3.2. O AUTÔMATO CELULAR 16

3.3. VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO 20

3.4. OBTENÇÃO DE MODELOS DE SOLOS ARTIFICIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE IMPRESSÃO 3D 21

3.5. IMPRESSÃO 3D 22

3.5.1. Principais métodos de impressão 3D 23

3.6. MÉTODOS DE ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS 24

4. METODOLOGIA 27

4.1. DEFINIÇÃO DAS REGRAS QUE GERAM OS AUTÔMATOS CELULARES DE INTERESSE 27

4.2. AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE ABSOLUTA NUMÉRICA 28

4.3. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA IMPRESSÃO DE SOLOS ARTIFICIAIS UTILIZANDO O MÉTODO FDM POR MEIO DE ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 29

4.4. IMPRESSÃO DOS MODELOS DE SOLOS ARTIFICIAIS 30

4.5. ADAPTAÇÃO DO PERMEÂMETRO À CARGA CONSTANTE PARA OS MODELOS DE SOLO ARTIFICIAIS 31

5. RESULTADOS 33

5.1. OBTENÇÃO DA PERMEABILIDADE ABSOLUTA NUMÉRICA A PARTIR DAS REGRAS QUE GERAM OS AUTÔMATOS DE INTERESSE. 33

5.2. PROPOSTA DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D QUE AFETAM A QUALIDADE DOS MODELOS OBTIDOS 33

5.3. GERAÇÃO DOS MODELOS DE SOLOS ARTIFICIAIS ATRAVÉS DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO CALIBRADOS 38

5.4. ADAPTAÇÃO DO PERMEÂMETRO À CARGA CONSTANTE PARA OS MODELOS DE SOLO ARTIFICIAL 43

5.5. AVALIAÇÃO EXPERIAMENTAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA À CARGA CONSTANTE..... 46

5.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PERMEABILIDADE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL..... 47

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 49

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Abordagens metodológicas para a obtenção de modelos de solos artificias: (a) e (b) por meio de retângulos (Koponen et al., 1996, 1997; Nabovati et al., 2007); (c) e (d) por meio da simulação do processo de sedimentação (Blöcher & Zimmermann, 2008; Øren & Bakke, 2002); (e) e (f) por meio de autômatos celulares bidimensionais (Bandman, 2011; Zubeldia, 2013); (g) por meio de autômatos celulares tridimensionais (Ozelim, 2014). 16
Figura 2 - Representação visual de autômato, regra 90: (a) desenvolvida por 50 passos; (b) representação da regra que descreve o comportamento do autômato. 18
Figura 3 - Representação do número associado a cada regra nas bases 2 e 10. 18
Figura 4 - Distribuição dos elementos que compõem o autômato em uma, duas e três dimensões. 19
Figura 5 - Vizinhanças de Moore (a) e Von Newman (b) para os autômatos bidimensionais e tridimensionais. 20
Figura 6 - Código a ser utilizado para geração dos autômatos celulares. 27
Figura 7 - Simulação de fluxo por meio da extensão XLab no software Avizo. (Avizo, 2020) 29
Figura 8 - Metodologia desenvolvida para geração dos autômatos utilizando o método de impressão 3D FDM. 30
Figura 9 - Aparato experimental recomendado para o ensaio de permeabilidade à carga constante (ABNT, 2021). 31
Figura 10 - Modelos auxiliares utilizados para calibrar os parâmetros de impressão: (a) retração; (b) bridging; (c) velocidade de impressão, altura da camada e ângulo máximo de inclinação. 34
Figura 11 – Pilares circulares impressos com distância de retração de: (a) 0 mm e; (b) 4 mm. 35
Figura 12 - Resultado de impressão do modelo auxiliar da Figura 10 (c), apresentados na ordem da Tabela 2: (a) Modelo 1; (b) Modelo 2; (c) Modelo 3; (d) Modelo 4 e; (e) Modelo 5. 37
Figura 13 - Modelos auxiliares para análise dos parâmetros relacionados à geração de pontes, com destaque à diferença da qualidade dos modelos da direita e da esquerda. . 38
Figura 14 - Vistas laterais dos modelos impressos através da metodologia proposta. ... 40

Figura 15 - Comparação das amostras impressas com os modelos computacionais: (a) R3; (b) R5; (c) R7; (d) R11; (e) R23; (f) R31; (g) R47; (h) R63 e; (i) R94. 43
Figura 16 - Esquema do permeâmetro construído para avaliar a permeabilidade das amostras impressas. 44
Figura 17 - Detalhe do amostrador de seção retangular. 44
Figura 18 - Detalhe da montagem do amostrador. 45
Figura 19 - Permeâmetro de carga constante montado para a execução dos ensaios..... 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras a serem utilizadas com suas respectivas porosidades iniciais. 28
Tabela 2 - Relação das amostras com seus respectivos valores de porosidade inicial (PI), porosidade final (PF) e permeabilidade intrínseca (K). 33
Tabela 3- Valores numéricos dos principais parâmetros analisados. 36
Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos diferentes modelos para calibrar os parâmetros relacionados às pontes. 37
Tabela 5 - Resultados do experimento de permeabilidade com carga constante. 47
Tabela 6 - Comparação dos resultados de permeabilidade absoluta numérica e experimental das amostras. 48

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Autômato Celular
FDM	*Fused Deposition Modeling*
SI	Sistema Internacional de Unidades
VER	Volume Elementar Representativo

1. INTRODUÇÃO

A microestrutura dos meios porosos e as características do fluido que ocupa os seus poros são responsáveis por determinar diversas propriedades macroscópicas de fluxo no meio (Øren & Bakke, 2002). Compreender a relação entre a microestrutura e o fluxo no meio é, portanto, um aspecto extremamente relevante em diversas áreas do conhecimento. O transporte de contaminantes no solo e a modelagem numérica de meios homogêneos como barragens de terra são alguns exemplos onde o conhecimento da microestrutura do meio é importante.

Dentre as propriedades macroscópicas de fluxo, a previsão da permeabilidade é um problema complicado, principalmente devido à dificuldade de descrever o meio de forma que este se aproxime da realidade (Adler *et al.*, 1990). A definição de um domínio no qual é possível conduzir simulações de fluxo computacionalmente é, portanto, um problema extremamente relevante. Diversas metodologias foram aplicadas na literatura para representação dos meios porosos, através do posicionamento de figuras geométricas, reconstrução de imagens obtidas por microtomografias, simulações de sedimentação dos grãos e, mais recentemente, foram utilizados os autômatos celulares, programas baseados em regras simples que apresentam comportamento complexo e têm alta capacidade de formar padrões.

Em qualquer campo de conhecimento, a relação entre os conhecimentos teóricos e práticos são importantes na busca pelo avanço científico. Esta relação é responsável por tornar os conhecimentos teóricos aplicáveis à realidade. A tecnologia de manufatura aditiva ou impressão 3D vem sendo explorada, principalmente nas ciências da saúde, para permitir a materialização de modelos computacionais, devido à sua capacidade de gerar modelos complexos com custo reduzido (Kim *et al.*, 2018).

A possibilidade da utilização da tecnologia de impressão 3D como meio para representação de meios porosos artificiais, estabelece um elo importante entre os modelos teóricos, obtidos computacionalmente, e resultados experimentais. Correlacionar os parâmetros obtidos para modelos de solo artificiais e reais seria interessante para validar os modelos teóricos, permitindo avançar na compreensão da relação entre a microestrutura e o fluxo nos meios porosos.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a estrutura de meios porosos gerados artificialmente, por meio do desenvolvimento de autômatos celulares tridimensionais, sendo proposta uma metodologia para obtenção destes por meio de um método de impressão 3D de baixo custo, este será validado através da análise da condutividade hidráulica numérica e experimental dos modelos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem desenvolvidos são:

a) Definir as regras que geram os autômatos celulares tridimensionais de interesse;
b) Avaliar a condutividade hidráulica teórica dos modelos obtidos a partir dos autômatos;
c) Propor uma metodologia de análise dos principais parâmetros de impressão 3D para geração de modelos de solos artificiais;
d) Gerar os modelos de solos artificiais através da metodologia proposta;
e) Propor uma adaptação do permeâmetro à carga constante;
f) Avaliar experimentalmente a condutividade hidráulica dos modelos através do ensaio de permeabilidade à carga constante;
g) Comparar os resultados de permeabilidade teórica e experimental.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MEIOS POROSOS ARTIFICIAIS

Reproduzir a estrutura interna de meios porosos é um desafio devido à complexidade associada a estes em seu estado natural. Replicar tal estrutura pode permitir a previsão de parâmetros relacionados ao fluxo em solos, a princípio homogêneos. Um modelo de meio poroso artificial é uma representação simplificada do sistema de poros, constituído pelas partículas, ligadas pelas suas conexões, os poros (Jiang *et al.*, 2007).

Na previsão desses parâmetros, a geometria, a topologia do sistema de poros e a forma como estes se organizam, devem ser conhecidos para alcançar uma previsão mais precisa e condizente com o estado do solo em campo. Apesar da extração de redes de poros ter sido estudada em vários campos da ciência, através de técnicas como representação de formas, reconhecimento de padrões e inteligência artificial, fatores como geometria e topologia devem ser considerados (Jiang *et al.*, 2007).

Há várias maneiras de se obter modelos de solos artificiais, sendo o posicionamento de figuras geométricas a forma mais simples. Nabovati & Sousa (2007) utilizaram meios construídos através do posicionamento de retângulos idênticos, com uma distribuição aleatória, para simular um fluxo bidimensional em escala de poros. Koponen *et al.* (1996) utilizaram meios porosos com a mesma característica para estudar tortuosidade em meios porosos, estabelecendo uma relação entre a tortuosidade média dos caminhos de fluxo e a porosidade. Koponen *et al.* (1997) utilizaram o mesmo tipo de meio poroso gerado artificialmente para estudar a permeabilidade e a porosidade efetiva.

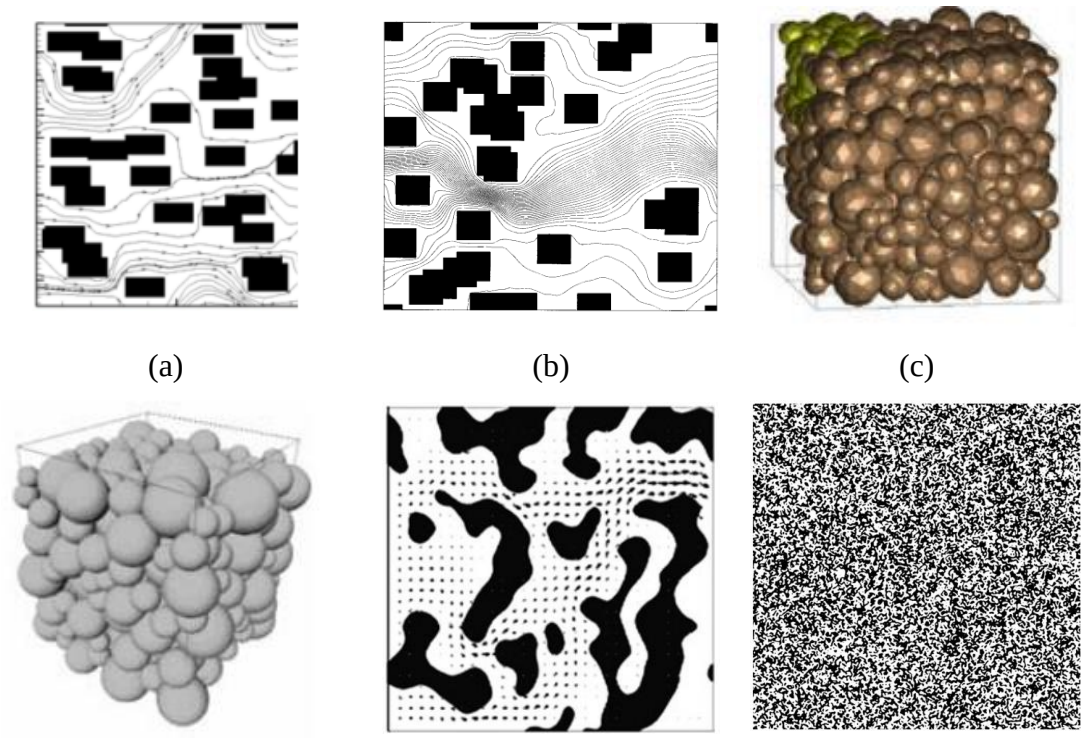
A simulação do processo de sedimentação de partículas também é uma maneira de se obter modelos de solos artificiais, Blöcher & Zimmermann (2008) utilizam uma ferramenta desenvolvida pelos autores, denominada "*Settle3D*", que simula a sedimentação, possibilitando a geração de diferentes tipos de rochas de forma discreta, onde cada grão dentro da rocha pode ser tratado separadamente. Øren & Bakke (2002) utilizam informações petrográficas obtidas de seções bidimensionais para modelar os processos de formação de arenitos, através da simulação do processo de sedimentação.

À medida que os métodos para geração de modelos artificiais de solo avançam, as definições matemáticas utilizadas tornam-se mais complexas. A aplicação de métodos que utilizam autômatos celulares torna-se interessante por fornecer a oportunidade de

obter estes meios explorando a capacidade dos autômatos de formar padrões, permitindo alcançar uma estrutura interessante, dados certos parâmetros (Bandman, 2011). Uma vantagem na utilização dos autômatos é que estes são baseados em regras simples que podem gerar um comportamento complexo.

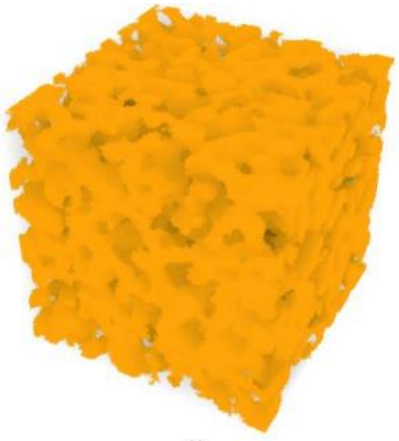
O uso de autômatos celulares para geração de meios porosos artificiais ainda é pouco explorado na literatura. Bandman (2011), pioneira no tema, utiliza autômatos celulares para estudar o fluxo de água em meios porosos. Zubeldia (2013) faz o uso de tomografias computadorizadas de raios-X para caracterizar os modelos obtidos através da evolução de autômatos celulares. Ambas as autoras utilizaram autômatos celulares bidimensionais, que são simplificações dos autômatos tridimensionais, as metodologias propostas podem ser aplicadas para o caso tridimensional.

Os autômatos celulares tridimensionais foram analisados por Ozelim (2014) através de um estudo da relação entre microtomografias, autômatos celulares e impressão 3D, sendo realizado um estudo das propriedades físico-geométricas dos autômatos celulares tridimensionais, avaliando a possibilidade de utilização deste para representação de meios porosos. A Figura 1 apresenta as abordagens mencionadas anteriormente para geração de meios porosos artificiais.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)



(g)

Figura 1 – Abordagens metodológicas para a obtenção de modelos de solos artificias: (a) e (b) por meio de retângulos (Koponen et al., 1996, 1997; Nabovati et al., 2007); (c) e (d) por meio da simulação do processo de sedimentação (Blöcher & Zimmermann, 2008; Øren & Bakke, 2002); (e) e (f) por meio de autômatos celulares bidimensionais (Bandman, 2011; Zubeldia, 2013); (g) por meio de autômatos celulares tridimensionais (Ozelim, 2014).

3.2. **O AUTÔMATO CELULAR**

Evoluções científicas muitas vezes vêm de observações e experimentos, o Autômato Celular (AC) surge a partir da observação do comportamento de programas computacionais simples (Wolfram, 2002). O AC pode ser definido como um modelo matemático para sistemas naturais complexos que contêm uma grande quantidade de componentes simples e idênticos que apresentam interações locais (Wolfram, 1984).

O AC foi inicialmente introduzido por von Newmann e Ulam, com o nome de "espaços celulares", como uma possível idealização de sistemas biológicos com o propósito de simular autorreprodução (Wolfram, 1983). Desde então, estes vêm sendo utilizados para vários propósitos com nomes diversos como "matrizes iterativas", "estruturas homogêneas", estruturas celulares". Sistemas físicos compostos por elementos discretos são frequentemente descritos através de autômatos celulares (Wolfram, 1983).

A estrutura de um AC consiste em uma malha uniforme regular, usualmente de extensão infinita, com uma variável discreta em cada posição, denominada célula. Um AC evolui em intervalos de tempo discretos, com o valor de cada variável em uma célula

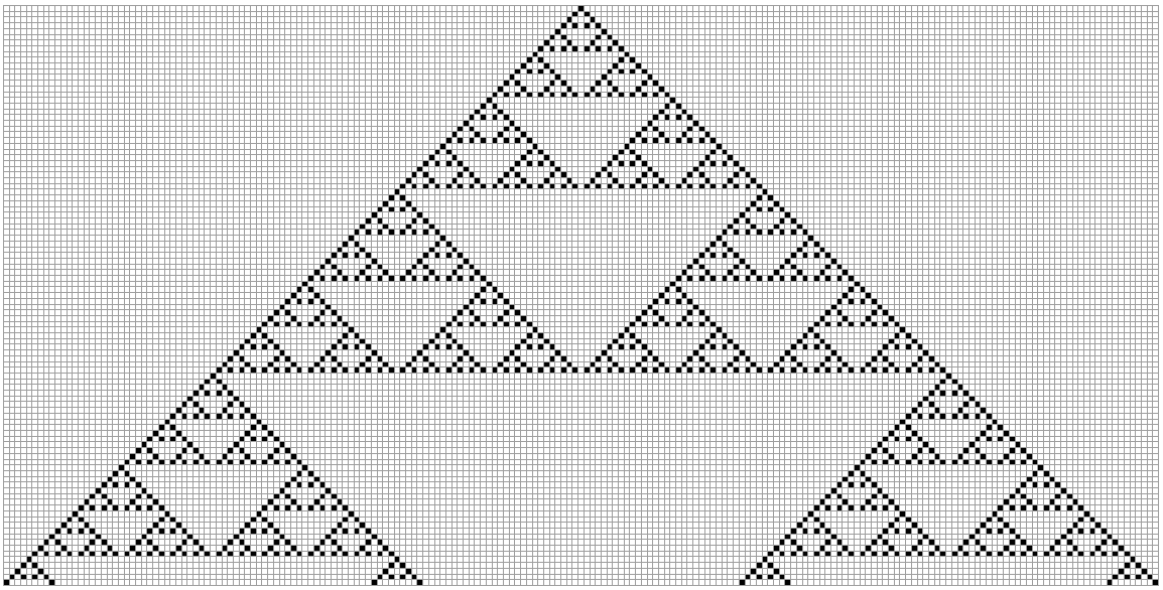
determinado em função do valor das células adjacentes no intervalo de tempo imediatamente anterior, tais células compõem a vizinhança da célula analisada (Wolfram, 1983). A função que descreve o estado de cada célula em função das células vizinhas é denominada regra.

Uma regra pode ser descrita como uma função (f[.]) definida em intervalos de tempo discretos, aplicada a um conjunto de células (C_i), cada uma possuindo, para o presente estudo, dois estados possíveis (0 ou 1), sendo atribuída a cada uma, de forma síncrona, um valor no próximo passo. Essencialmente tal função descreve o estado de uma dada célula (C_i) nos próximos passos (k+1) considerando seu próprio estado e de suas vizinhas à esquerda (C_{i-1}) e à direita (C_{i+1}) no intervalo de tempo anterior (k) (Wolfram, 2002). Conforme apresentado por Ozelim *et al.* (2017), denotando o estado de cada célula C_i no tempo k como $s(C_i, k)$,

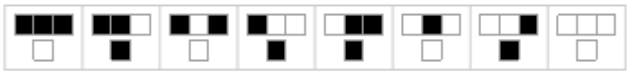
$$s(C_i, k+1) = f[s(C_{i-1}, k), s(C_i, k), s(C_{i+1}, k)] \quad (1)$$

Uma característica importante do AC é que o seu comportamento, para diversas regras, pode ser observado de forma visual. A Figura 2 (a) representa o desenvolvimento de um autômato celular por 50 passos, na Figura 2 (b) é possível observar a regra que descreve o comportamento do autômato desenvolvido. Conforme apresentado anteriormente, um AC é baseado no comportamento de programas computacionais simples, sendo tal simplicidade associada à regra, neste caso a regra faz com que a célula seja preta caso uma ou outra célula da vizinhança, porém não as duas, seja preta no passo anterior.

As regras dos autômatos celulares podem ser representadas visualmente conforme apresentado na Figura 2 (b). Como nos casos apresentados aqui, as células só podem receber dois valores 0 ou 1, visualmente para células brancas e pretas, respectivamente, existem 8 resultados possíveis para cada regra, totalizando 2^8 possíveis resultados, numerados de 0 a 255. O número associado a cada regra é tal que, quando escrito em base 2, fornece uma sequência de 0’s e 1’s que correspondem à sequência de cores apresentadas para cada regra, conforme pode ser observado na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 2 - Representação visual de autômato, regra 90: (a) desenvolvida por 100 passos; (b) representação da regra que descreve o comportamento do autômato.

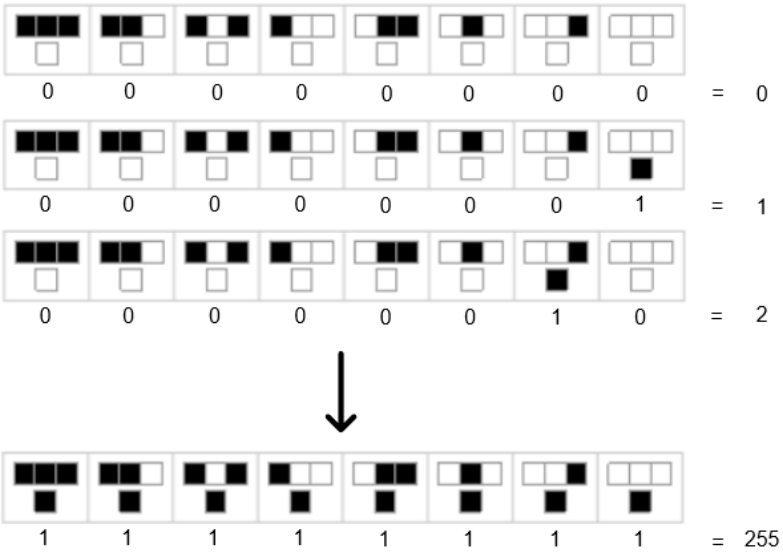


Figura 3 - Representação do número associado a cada regra nas bases 2 e 10.

Os autômatos desenvolvidos até o momento são denominados autômatos celulares elementares, desenvolvidos em somente uma dimensão, porém o mundo em que vivemos envolve as três dimensões do espaço. Em casos mais simples, a ideia básica, conforme

ilustrado na Figura 4, é considerar os elementos que compõem o autômato não só distribuídos em uma única linha, como também em um arranjo bidimensional ou tridimensional.

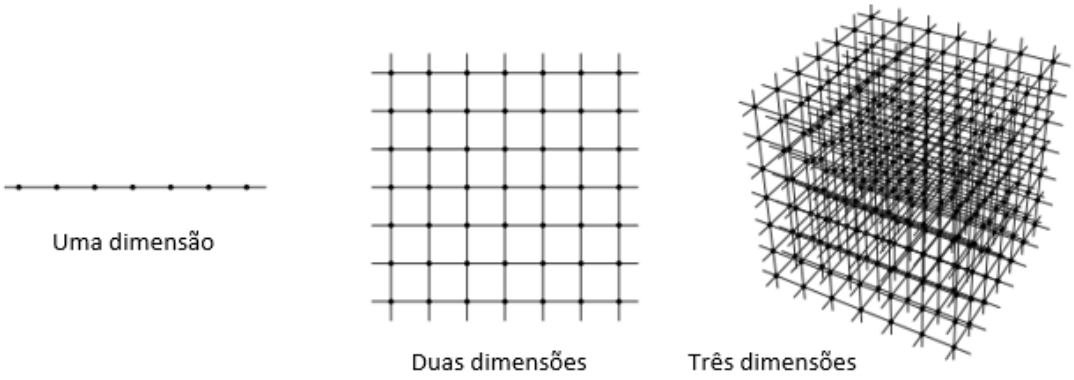


Figura 4 - Distribuição dos elementos que compõem o autômato em uma, duas e três dimensões.

Para os casos em que mais de uma dimensão é considerada, é importante a definição de vizinhança. De forma geral, existem dois tipos de vizinhança, a de Neumann e de Moore, na primeira as células vizinhas são aquelas que compartilham arestas com a célula de referência, na segunda, todas as células que compartilham arestas e vértices são consideradas células vizinhas. A representação dos dois tipos de vizinhança paras os casos 2D e 3D, apresentados na Figura 4, podem ser observados na Figura 5.

A busca por complexidade no comportamento dos autômatos e, portanto, de programas baseados em regras simples é bastante explorado por Wolfram (2002), e por se tratar de um processo baseado na análise visual do comportamento de diversas regras desenvolvidas ao longo do tempo, é comum utilizar uma caracterização específica para limitar o número de regras a ser estudado (Ozelim & Cavalcante, 2018). Aqui serão utilizadas as chamadas regras totalísticas, onde o estado da célula no tempo i+1 depende apenas da somatória dos valores das células vizinhas.

Quando a vizinhança de Neumann é considerada, no caso tridimensional, existem 6 células vizinhas e uma célula de referência, totalizando $2^{2\wedge 7}$ possíveis regras, quando a vizinhança de Moore é considerada, no caso tridimensional, existem 26 células vizinhas e uma célula de referência, totalizando $2^{2\wedge 27}$ possíveis regras. Quando são consideradas

as regras totalísticas, o número de regras a ser explorado é de 2^8 e 2^{28}, respectivamente (Ozelim & Cavalcante, 2018).

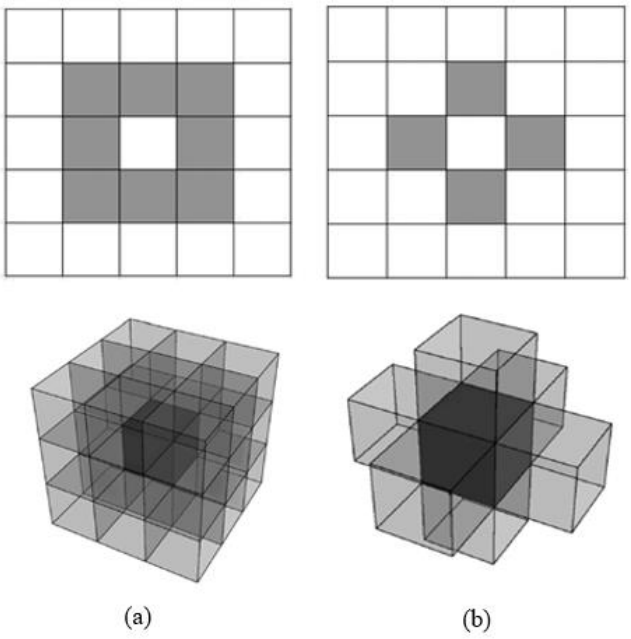


Figura 5 - Vizinhanças de Moore (a) e Von Newman (b) para os autômatos bidimensionais e tridimensionais (Adaptado de Ozelim, 2014 e Zubeldia, 2013).

Através do uso dessa técnica, conforme os estudos de Ozelim (2014) e Zubeldia (2013), é possível comparar os modelos obtidos com solos arenosos devido ao formato mais arredondado das partículas, que tendem a formar padrões semelhantes aos observados pelos autores. Para isso, duas características físicas dos meios são analisadas: a porosidade e a permeabilidade.

A porosidade dos modelos de solos artificiais, obtidos por meio desta técnica, é facilmente calculada através da razão entre a quantidade de células vazias, definidas como zero na matriz que representa o autômato celular em cada passo de tempo durante sua evolução, e a quantidade de células preenchidas, definidas como 1. Os métodos de determinação da permeabilidade das amostras serão discutidos posteriormente.

3.3. **VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO**

Para representar de forma satisfatória os solos reais por meio de modelos de solos artificiais, obtidos através dos autômatos celulares, é importante definir as dimensões do

modelo que permitem estabelecer uma comparação efetiva. Para isso, utiliza-se o conceito de volume elementar representativo (VER).

Conforme a definição de Bear (1972), o VER é o menor volume onde a continuidade é assumida como verdadeira sendo, portanto, o volume de um meio poroso representativo em volta de um ponto P. Este volume é uma fração do domínio que se pretende representar, sendo menor que o domínio completo e grande o suficiente para permitir uma representação estatística satisfatória de determinada propriedade do meio em questão.

O VER pode ser determinado através da avaliação contínua da propriedade de interesse, ao aumentar o volume da amostra até que esta fique constante, e através da análise estatística de medidas de dispersão da propriedade de interesse. Em ambas as formas de determinação define-se uma tolerância onde a propriedade é considerada constante.

Ozelim & Cavalcante (2019) utilizaram a abordagem probabilística para estudar o VER, visto que esta leva em consideração diferentes escalas de heterogeneidade do meio. Os autores levaram em consideração intervalos de confiança considerando uma distribuição empírica dos dados, através da aplicação do método de Bootstrap. As análises conduzidas pelos autores, feitas apenas em relação à permeabilidade das amostras, permitiram concluir que um domínio de 200x200x200 células, com tamanho real de 1 μm, representa o VER.

3.4. OBTENÇÃO DE MODELOS DE SOLOS ARTIFICIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE IMPRESSÃO 3D

Os cientistas das Geociências são os que mais produzem dados tridimensionais e a impressão 3D está transformando a forma eles interagem e entendem os dados produzidos/monitorados, pois os diversos métodos de impressão permitem que estes dados possam ser analisados sob condições reais (Hasiuk, 2014).

A possibilidade de utilização de técnicas de impressão 3D, apesar de se uma tecnologia que data da década de 80, passou a atrair mais a atenção dos pesquisadores recentemente. Ela foi proposta incialmente como uma ferramenta de pesquisa para integrar informações adquiridas através de microtomografias com modelos reais (Dal Ferro & Morari, 2015). Recentemente, com a evolução das diversas técnicas de impressão 3D, a geometria encontrada no solo pode ser replicada em resoluções altas e, apesar das

grandes incertezas ainda associadas à hetereogeneidade microscópica do solo, até o momento alguns cientistas têm tido sucesso ao combinar imagens 3D de alta resolução com a impressão 3D para melhorar os conhecimentos nas geociências (Dal Ferro & Morari, 2015).

Dal Ferro & Morari (2015) combinaram a tecnologia de impressão 3D, utilizando *inkjet printing,* com microtomografias para reconstruir a complexidade da estrutura de um modelo derivado de solo com a mesma escala do original, testando propriedades hidráulicas. As medidas de condutividade hidráulica encontradas pelos autores mostraram uma forte correlação com os dados experimentais e modelados a partir das amostras originais de solo.

Mahabadi *et al.* (2018) também combinaram a tecnologia de impressão 3D, utilizando FDM, com microtomografias para gerar amostras de solo baseadas na geometria do solo original. Os autores avaliaram a curva característica das amostras de solo impressas, comparando com as amostras originais de solo.

Ozelim & Cavalcante (2019a) utilizaram a impressão 3D, através do *powder bed fusion*, para gerar amostras de solo obtidas através de autômatos celulares e compararam com microtomografias para estudar o efeito de escala na permeabilidade de meios porosos.

Arrieta-Escobar *et al.* (2020) fazem um estudo bibliográfico que mostra que se trata de uma tecnologia que vem sendo cada vez mais explorada nas geociências, dentre os trabalhos mencionados pelos autores, 46% destes relacionavam o uso da impressão 3D como uma forma de reprodução da estrutura do solo.

3.5. **IMPRESSÃO 3D**

A impressão 3D é uma técnica de manufatura aditiva utilizada na fabricação de muitas estruturas e geometrias complexas a partir de modelos tridimensionais. É uma tecnologia desenvolvida por Charles Hull em 1986, através de um processo conhecido como estereolitografia (SLA), o primeiro método de impressão 3D, que foi seguido pelo desenvolvimento de outros métodos como o *Fused Deposition Modeling* (FDM), *inkjet printing*, entre outros, todos são caracterizados pelo impressão de sucessivas camadas sobrepostas (Takagishi & Umezu, 2017).

A impressão 3D, que envolve diversos métodos que utilizam diferentes materiais e equipamentos, tem evoluído com o passar dos anos, sendo aplicada nas mais diversas

áreas como construção civil, prototipagem e o biomecânica. Na indústria da construção civil, em especial, ela tem apresentado um crescimento lento no que diz respeito à sua aplicação, apesar das vantagens relacionadas ao menor desperdício de material e maior liberdade no que diz respeito às formas *design*, além da evolução que o uso de tal tecnologia representa para a automação dos processos desenvolvidos durante a execução (Ngo *et al.*, 2018).

Novas aplicações para essa tecnologia vêm surgindo à medida que novos materiais vêm sendo desenvolvidos e, devido a extinção de patentes que surgiram com a tecnologia, a mesma tem se tornado cada vez mais acessível, através do desenvolvimento de equipamentos (Arbabian & Wagner, 2020). Isso torna possível a utilização destas tecnologias em ambientes como escolas, universidades e em residências familiares, não ficando restrito às grandes empresas.

Tal tecnologia tem ganhado atenção especial de profissionais especialmente no campo da medicina, devido à sua habilidade de produzir uma grande variedade de implantes médicos a partir de tomografias. Uma literatura extensa pode ser encontrada neste campo, cita-se os trabalhos de Kim *et al.* (2018), Murphy & Atala (2014) e Rengier *et al.* (2010).

3.5.1. Principais métodos de impressão 3D

Os métodos de impressão 3D vêm sendo desenvolvidos para atender as demandas de representar, com uma boa resolução, geometrias cada vez mais complexas. Alguns dos principais fatores que têm impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias têm sido a prototipagem rápida, a habilidade de imprimir grandes estruturas e a necessidade de reduzir defeitos relacionados ao processo de impressão (Ngo *et al.*, 2018).

O *Fused Deposition Modeling* (FDM) é um método no qual um filamento contínuo de um polímero termoplástico é utilizado para imprimir as camadas de material. O filamento é aquecido por um bico extrusor até atingir um estado semi-líquido, sendo em seguida extrudado sobre uma plataforma, denominada mesa de impressão, ou sobre outras camadas depositadas previamente. A característica termoplástica dos filamentos utilizados é essencial para este tipo de impressão, que tem como principal desvantagem as propriedades mecânicas fracas devido ao contato entre camadas. As principais vantagens do uso deste método estão relacionadas ao baixo custo do material, alta

velocidade de impressão e a simplicidade do processo de impressão. Tal método permite alcançar uma resolução de 50 a 200 μm (Ćwikła *et al.*, 2017).

O *Powder Bed Fusion* é caracterizado pela utilização de um material pulverulento, cuja deposição em camadas extremamente finas dá origem ao modelo tridimensional. Tais camadas são fundidas atrás da passagem de um laser e o excesso de pó é removido após o fim do processo de impressão. A distribuição do tamanho dos grãos de pó e o empacotamento, que definem a densidade das peças impressas, são os principais fatores que influenciam na eficácia deste método, que possui como principais vantagens a possibilidade de alcançar um boa resolução e alta qualidade das peças impressas. As principais desvantagens associadas a tal método estão associadas à baixa velocidade de impressão e ao custo dos materiais utilizados. Tal método permite alcançar uma resolução de 80-250 μm (Ngo *et al.*, 2018).

A estereolitografia (SLA), um dos primeiros métodos de manufatura aditiva desenvolvidos, é caracterizado pela utilização de uma luz UV, que inicia uma reação em uma camada de resina, sendo esta convertida em cadeias de polímeros que dão origem ao padrão desejado. A resina que não sofre reação é então removida após o fim do processo de impressão. As principais vantagens associadas a este método são, assim como o *powder bed fusion*, que ele permite alcançar uma ótima resolução e alta qualidade de impressão. As principais desvantagens associadas a este método são: o número bastante limitado de materiais, a velocidade baixa de impressão e o custo elevado das resinas. Tal método permite alcançar uma resolução de 10 μm (Ngo *et al.*, 2018).

O *polyjet* é caracterizado pela criação de modelos tridimensionais através da adição de camadas de resina fotopolimérica. Assim como o *powder bed fusion* e a estereolitografia, este método é caracterizado pela alta resolução e alta qualidade de impressão, tendo como principal desvantagem o custo das resinas utilizadas (Kechagias *et al.*, 2014). Tal método permite alcançar uma resolução de até 16 μm.

3.6. MÉTODOS DE ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS

Os solos são permeáveis devido à existência de vazios interconectados, através dos quais a água consegue fluir. As equações de Navier-Stokes formulam o comportamento dos fluidos quando em movimento pela matriz porosa, estas podem ser simplificadas para as equações de Stokes ao adotar as seguintes hipóteses simplificadoras:

o fluido percolante é incompressível, newtoniado e o fluxo acontece em regime laminar. A perda de carga do fluido ao passar por uma dada porção do meio é expressa pela Lei de Darcy (2), obtida através da derivação das equações de Stokes:

$$u_d = \frac{K}{\mu_v} \nabla p \tag{2}$$

em que u_d é a velocidade de Darcy, K é a permeabilidade intrínseca do meio, μ_v é a viscosidade do fluido simulado e p é a pressão.

Na maioria dos solos, o fluxo de água através dos poros pode ser considerado laminar, sendo a velocidade de descarga da água proporcional ao gradiente hidráulico. A constante de proporcionalidade entre tais parâmetros é denominada condutividade hidráulica, também conhecida como coeficiente de permeabilidade.

A condutividade hidráulica é expressa em m/s no Sistema Internacional de Unidades (SI) e depende de vários fatores como a distribuição do tamanho de poros, distribuição granulométrica, índice de vazios, rugosidade das partículas minerais e grau de saturação do solo (Das & Sobhan, 2014). Os autores indicam que nas argilas a concentração iônica e as espessuras das camadas de água retida nas partículas argilosas também afetam a permeabilidade. Desta forma, a utilização de modelos de solos artificiais, mencionados no presente trabalho, para representação de solos reais não é adequada no caso de solos argilosos, uma vez que é feita uma representação da estrutura física do solo, sendo desprezada a parcela de contribuição das interações químicas entre as partículas. A condutividade hidráulica de um solo está também relacionada com as propriedades do fluido percolante, no caso da água esta relação é dada por meio da equação (3):

$$k = \frac{\gamma_w}{\mu_v} K \tag{3}$$

em que k é o coeficiente de permeabilidade e γ_w é o peso específico da água.

A permeabilidade intrínseca depende apenas do meio poroso, sendo independente do fluido percolante, desta forma esta será utilizada como parâmetro de análise das amostras. Este parâmetro pode ser obtido numericamente através da aplicação dos campos de velocidade e pressão, resultantes da solução da equação de Stokes.

Experimentalmente é possível obter o coeficiente de condutividade hidráulica da amostra, a equação (3) estabelece uma relação entre o coeficiente de permeabilidade, as propriedades da água e a permeabilidade intrínseca. A determinação experimental da condutividade hidráulica pode ser feita através da utilização do ensaio de carga constante,

recomendado para amostras com permeabilidade maiores ou ensaios com carga variável, recomendado para amostra com permeabilidades menores. No caso do ensaio de carga constante a permeabilidade é calculada através da equação (4):

$$k = \frac{VL}{Aht} \tag{4}$$

em que, V é o volume de água coletado em um tempo t, L é o comprimento da amostra, A é a área da seção transversal da amostra e h é a carga hidráulica.

A natureza não-linear das equações de Navier-Stokes impossibilita a obtenção de estimativas exatas dos campos de velocidade e pressão, sendo necessária a adoção de algumas simplificações. Desta forma, a busca por outros métodos para prever a permeabilidade torna-se interessante. A equação empírica de Hazen (5) foi utilizada com frequência na previsão deste parâmetro em areias saturadas:

$$k = C_H D_{10}^2 \tag{5}$$

em que, C_H é o coeficiente empírico de Hazen e D_{10} é o tamanho das partículas para o qual 10% do solo é mais fino (Carrier III, 2003).

Conforme indica Carrier III (2003) a variação do coeficiente empírico de Hazen é de 1 a 1000, indicando que não se trata de uma previsão confiável da permeabilidade. O autor propõe a utilização da equação (6), denominada equação de Kozeny-Carman, desenvolvida por Kozeny e Carman de forma semi-empírica:

$$k = \frac{1}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} d^2 \tag{6}$$

em que, n é a porosidade e d é o diâmetro médio das partículas.

4. METODOLOGIA

4.1. DEFINIÇÃO DAS REGRAS QUE GERAM OS AUTÔMATOS CELULARES DE INTERESSE

As regras a serem utilizadas foram obtidas através do trabalho de Ozelim & Cavalcante (2019), estas foram analisadas pelos autores e definidas como as regras totalísticas com vizinhança de Von Newmann que apresentaram o melhor comportamento após a evolução por 100 passos. Os autores estabeleceram 5 parâmetros que definem o autômato:

a) Uma condição inicial [*p*,*l*] com porosidade inicial *p* e comprimento lateral *l*;
b) Uma regra *r* com vizinhança de Newmann;
c) Uma semente aleatória *rs*;
d) Um tempo *t*, que define o número de passos desenvolvidos para cada autômato.

O código proposto pelos autores, utilizado na presente pesquisa, está apresentado na Figura 6 e será desenvolvido utilizando o *software* Mathematica. A Tabela 1 apresenta as regras a serem desenvolvidas com suas respectivas porosidades iniciais. Em todos os modelos será utilizado um comprimento lateral de 200, formando um domínio de 200x200x200, e a semente aleatória de número 12, o autômato será evoluído por 100 passos.

```
ic[p_, l_] := RandomChoice[{1 - p/100, p/100} -> {0, 1}, {l, l, l}];
              seleção aleatória
CA3D[r_, l_, p_, t_, rs_] := Block[{},
                             bloqueia
   SeedRandom[rs];
   semente aleatória
   CellularAutomaton[
   autômato celular
    {r, {2, {{{0, 0, 0}, {0, 1, 0}, {0, 0, 0}},
       {{0, 1, 0}, {1, 1, 1}, {0, 1, 0}},
       {{0, 0, 0}, {0, 1, 0}, {0, 0, 0}}}}, {1, 1, 1}}, ic[p, l],
    {{{t}}}]];
```

Figura 6 - Código a ser utilizado para geração dos autômatos celulares.

Tabela 1 - Regras a serem utilizadas com suas respectivas porosidades iniciais.

Amostra	Regra	Porosidade inicial (%)
R3	3	71
R5	5	65
R7	7	60
R11	11	58
R23	23	50
R31	31	40
R47	47	42
R63	63	29
R94	94	35
R127	127	17
R125	125	18

4.2. AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE ABSOLUTA NUMÉRICA

A avaliação da permeabilidade absoluta numérica foi feita através do *software* Avizo, utilizando a extensão XLab, que permite simular o fluxo no meio (Figura 7) através da solução das equações de Navier-Stokes, por meio de um algoritmo de valores finitos, impondo as seguintes condições de contorno:

a) Um plano sólido é adicionado nas faces da imagem não perpendiculares à direção principal do fluxo, permitindo o isolamento da amostra;
b) São adicionados elementos nas faces perpendiculares à direção principal do fluxo na imagem, criando uma região estabilização onde a pressão é quase-estática e o fluido pode se espalhar livremente na região de entrada da amostra;
c) Duas entre três condições de contorno podem ser escolhidas, sendo a terceira estimada pelo programa a partir das outras duas: pressão de entrada, pressão de saída e a vazão.

Uma pressão de entrada é imposta enquanto também há uma pressão de saída. O fluxo permanece constante na entrada e na saída devido ao plano sólido adicionado às faces e a permeabilidade absoluta é obtida através da aplicação da Lei de Darcy.

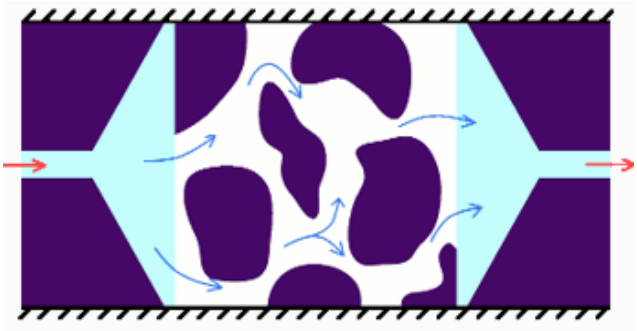


Figura 7 - Simulação de fluxo por meio da extensão XLab no software Avizo. (Avizo, 2020)

4.3. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA IMPRESSÃO DE SOLOS ARTIFICIAIS UTILIZANDO O MÉTODO FDM POR MEIO DE ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Os modelos obtidos através da metodologia proposta por Ozelim & Cavalcante (2019), foram exportados do Avizo no formato *stl*, comumente utilizado nos modelos produzidos por métodos de impressão 3D, no qual a estrutura do modelo é convertida em uma superfície triangulada. A superfície gerada pelo arquivo *stl* é relevante na qualidade da estrutura gerada, neste trabalho foram usados arquivos com tamanhos reduzidos devido à capacidade de processamento necessária para gerar o código de impressão nos fatiadores. Um fatiador é um software intermediário, que cria os comandos de impressão para cada camada. Foi utilizado o *Simplify3D*, que converte as informações do modelo em formato *stl* para um arquivo denominado gcode, que consiste em um sistema de coordenadas que é interpretado pela impressora para gerar o modelo 3D.

Para a impressão dos modelos de solo, foi proposta uma metodologia de análise paramétrica que antecedeu a impressão dos modelos de solo exportados no Avizo. Tal proposta consiste em uma análise dos principais parâmetros que afetam a qualidade do modelo e ajuste deles através da utilização de modelos auxiliares projetados para calibrar parâmetros específicos. Esta metodologia pode ser observada na Figura 8.

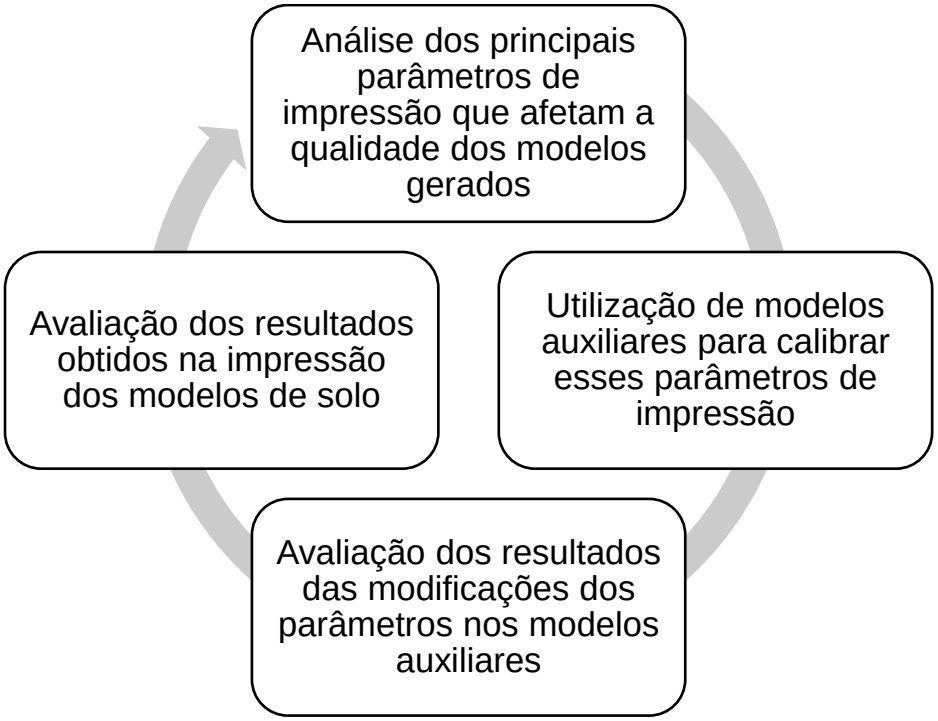


Figura 8 - Metodologia desenvolvida para geração dos autômatos utilizando o método de impressão 3D FDM.

4.4. **IMPRESSÃO DOS MODELOS DE SOLOS ARTIFICIAIS**

Foi utilizada uma impressora *FlashForge Creator 1.0 Dual Extruder*, que utiliza o FDM como método de impressão. A presença dos dois extrusores é importante pois serão utilizados dois materiais distintos para gerar a estrutura do modelo e o suporte, que representa a matriz porosa dos modelos de solo.

A estrutura das amostras foi gerada utilizado o PLA (ácido poliláctico), material mais utilizado para impressões 3D por possuir excelentes propriedades na aplicação do FDM, e por se tratar de um material muito estável, ecológico e reciclável (García Plaza *et al.*, 2019). Foi utilizado PLA de 1,75mm de diâmetro. Os autores indicam que a temperatura de impressão do material deve estar compreendida entre 190 e 220 °C, foi utilizada a temperatura de 210 °C.

A estrutura de suporte foi gerada utilizando o HIPS (poliestireno de alto impacto), material muito utilizado para reduzir defeitos na estrutura interna dos modelos produzidos através do método FDM (Kaveh *et al*., 2015). Foi utilizado HIPS solúvel de 1,75mm de diâmetro. Os autores indicam que a temperatura de impressão do material deve estar

compreendida entre 210 e 230 °C, foi utilizada a temperatura de 230 °C. Para solubilizar o material de suporte após a impressão foi utilizada uma solução de D'Limomeno.

Em ambos os extrusores foram utilizados bicos de 0,4mm de diâmetro. A mesa de impressão foi mantida à temperatura de 70 °C durante todos os testes e impressões executadas.

4.5. ADAPTAÇÃO DO PERMEÂMETRO À CARGA CONSTANTE PARA OS MODELOS DE SOLO ARTIFICIAIS

Por se tratar de amostras que se assemelham com areias, será proposta uma adaptação do ensaio de permeabilidade à carga constante para as amostras obtidas por impressão 3D. O desenho do aparato experimental será feito conforme recomendado pela NBR 13292:2021 (Figura 9), a principal mudança a ser feita está relacionada ao posicionamento do corpo de prova.

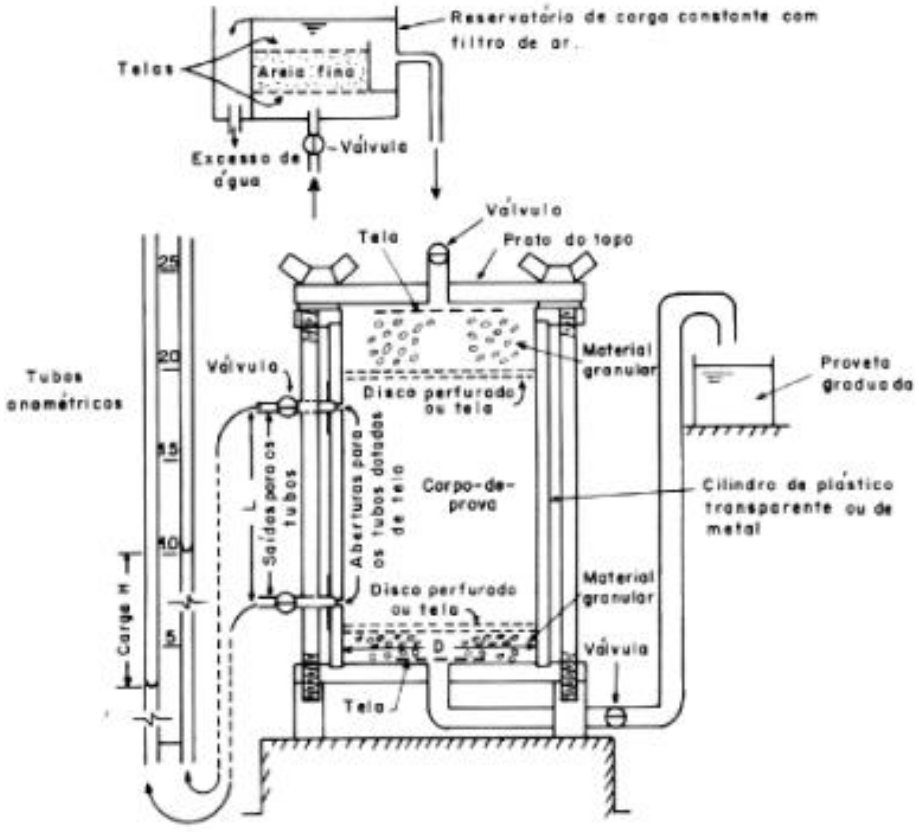


Figura 9 - Aparato experimental recomendado para o ensaio de permeabilidade à carga constante (ABNT, 2021).

É recomendado que o cilindro que comporta o corpo de prova tenha diâmetro mínimo de 80mm, em função da granulometria da amostra, por se tratar de amostras artificiais de solo, optou-se por adaptar o cilindro para um paralelepípedo reto de extremidades vazadas, denominado amostrador, com dimensões que comportem as amostras sem permitir o fluxo preferencial no contato entre a amostra e o vidro.

5. RESULTADOS

5.1. OBTENÇÃO DA PERMEABILIDADE ABSOLUTA NUMÉRICA A PARTIR DAS REGRAS QUE GERAM OS AUTÔMATOS DE INTERESSE

Utilizando as regras foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 2, nela estão apresentadas as porosidades das amostras e a permeabilidade absoluta obtida através da extensão XLab do Avizo.

Tabela 2 - Relação das amostras com seus respectivos valores de porosidade inicial (PI), porosidade final (PF) e permeabilidade intrínseca (K).

Amostra	Regra	PI (%)	PF (%)	K (μm²)
R3	3	71	57,46	0,02369
R5	5	65	61,08	0,08842
R7	7	60	48,97	0,02181
R11	11	58	55,94	0,16505
R23	23	50	49,66	0,07093
R31	31	40	40,17	0,02566
R47	47	42	36,38	0,03977
R63	63	29	39,34	0,01247
R94	94	35	29,64	0,00903
R125	125	17	27,43	0,01075
R127	127	18	24,12	0,01379

5.2. PROPOSTA DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D QUE AFETAM A QUALIDADE DOS MODELOS OBTIDOS

Diversos parâmetros influenciam na qualidade dos modelos obtidos existindo parâmetros para configurar exclusivamente a primeira camada do modelo, uma vez que gerar essa camada da melhor forma possível tem grande influência no sucesso da impressão, já que as camadas seguintes serão sobrepostas à primeira. Cuidados para garantir a boa aderência desta camada são essenciais, foi utilizado um *spray* para auxiliar na fixação das peças à mesa de impressão. Observou-se que, nas impressões em que

nenhum cuidado foi tomado para auxiliar na adesão dos modelos, houve empenamento nas peças em função do resfriamento do filamento de impressão.

Vários outros parâmetros influenciam na qualidade do modelo, nos modelos de teste foi avaliada a influência dos seguintes parâmetros: retração, velocidade de impressão, altura da camada, ângulo de inclinação para geração de suporte e os relacionados diretamente com a geração de pontes.

A retração tem grande influência no acabamento interno dos elementos que compõem a peça, a velocidade de impressão tem grande influência no tempo necessário para gerar cada um dos modelos, o ângulo de inclinação tem influência na geração de poros e, portanto, na geração de suporte no interior do modelo impresso, este é calculado automaticamente no *software* de impressão em função do ângulo em relação a vertical dos elementos que compõem o modelo. Em alguns trechos observou-se que o software não gera automaticamente o suporte das peças, desta forma, fez-se necessário calibrar os parâmetros de geração de pontes (*bridging*). Os modelos auxiliares utilizados para calibrar os parâmetros de impressão são apresentados na Figura 10.

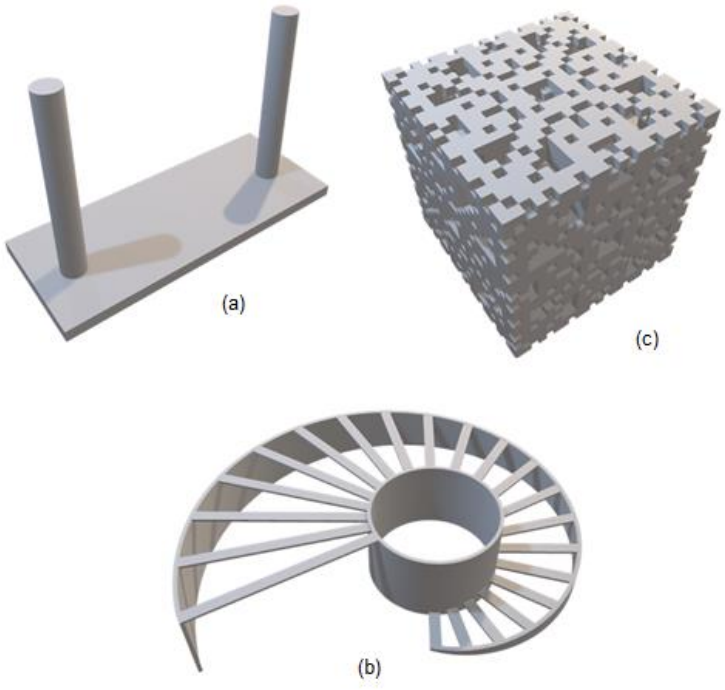


Figura 10 - Modelos auxiliares utilizados para calibrar os parâmetros de impressão: (a) retração; (b) *bridging*; (c) velocidade de impressão, altura da camada e ângulo máximo de inclinação.

Os modelos da Figura 10 (a) e (b) foram utilizados para testar especificamente a retração e a geração de pontes na estrutura do modelo, respectivamente. O modelo da Figura 10 (c) foi utilizado para simular as condições de impressão do modelo artificial de solo, através da avaliação da velocidade de impressão, altura da camada e ângulo máximo de impressão. Não foram utilizados os modelos em si por esta ser uma forma mais rápida e mais econômica de testar as condições de impressão dos modelos finais.

Através do modelo da Figura 10 (a) percebeu-se a importância do parâmetro de retração, pois evita o preenchimento dos poros com resíduos do filamento que compõe a estrutura do modelo e, portanto, não será diluído. É facilmente observado, conforme apresentado na Figura 11, uma qualidade maior dos modelos impressos com pelo menos 4 mm de retração, para valores de retração maiores que este valor não foram observadas diferenças significativas.



(a) (b)

Figura 11 – Pilares circulares impressos com distância de retração de: (a) 0 mm e; (b) 4 mm.

Os valores dos principais parâmetros utilizados para calibrar a impressão do modelo teste da Figura 10 (c) estão apresentados na Tabela 3 e os resultados na Figura 12, onde são apresentadas as vistas superior, inferior e laterais.

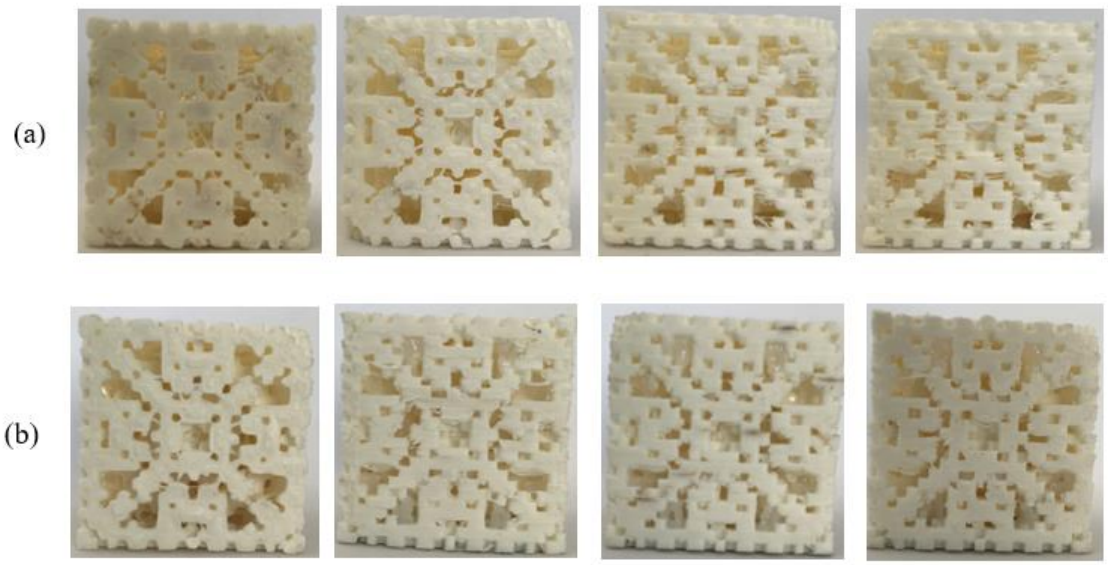
A análise visual dos modelos apresentados na Figura 12, com os parâmetros da Tabela 3, permitiu definir:

1. A retração de 4 mm, uma vez que os modelos impressos com valores menores de retração apresentaram resíduos visíveis de filamento em sua estrutura;

2. A velocidade de 2400 mm/min. Para os modelos auxiliares da Figura 10 (c) não foi observada diferença significativa na qualidade entre os modelos impressos com velocidades maiores, porém na calibração dos parâmetros de geração de pontes foram observadas diferenças, conforme será comentado em seguida;
3. Altura de camada de 0,18 mm. Para valores menores, nos modelos da Figura 10 (c) e (d) ocorre fusão das camadas, o que prejudica a qualidade do modelo, portanto, para o equipamento utilizado, esta é a altura mínima das camadas impressas que permite alcançar a maior precisão no eixo z;
4. O ângulo máximo de inclinação com a vertical de 0°, o que garante que o volume de suporte gerado será maximizado, e todo o material será depositado em uma superfície adequada, minimizando os defeitos.

Tabela 3 - Valores numéricos dos principais parâmetros analisados.

	Retração (mm)	**Velocidade de impressão (mm/min)**	**Altura de camada (mm)**	**Ângulo máximo de inclinação (°)**
Modelo 1	0	3000	0,30	30
Modelo 2	3	3000	0,20	50
Modelo 3	4	3000	0,10	0
Modelo 4	5	2400	0,10	0
Modelo 5	4	3000	0,18	0



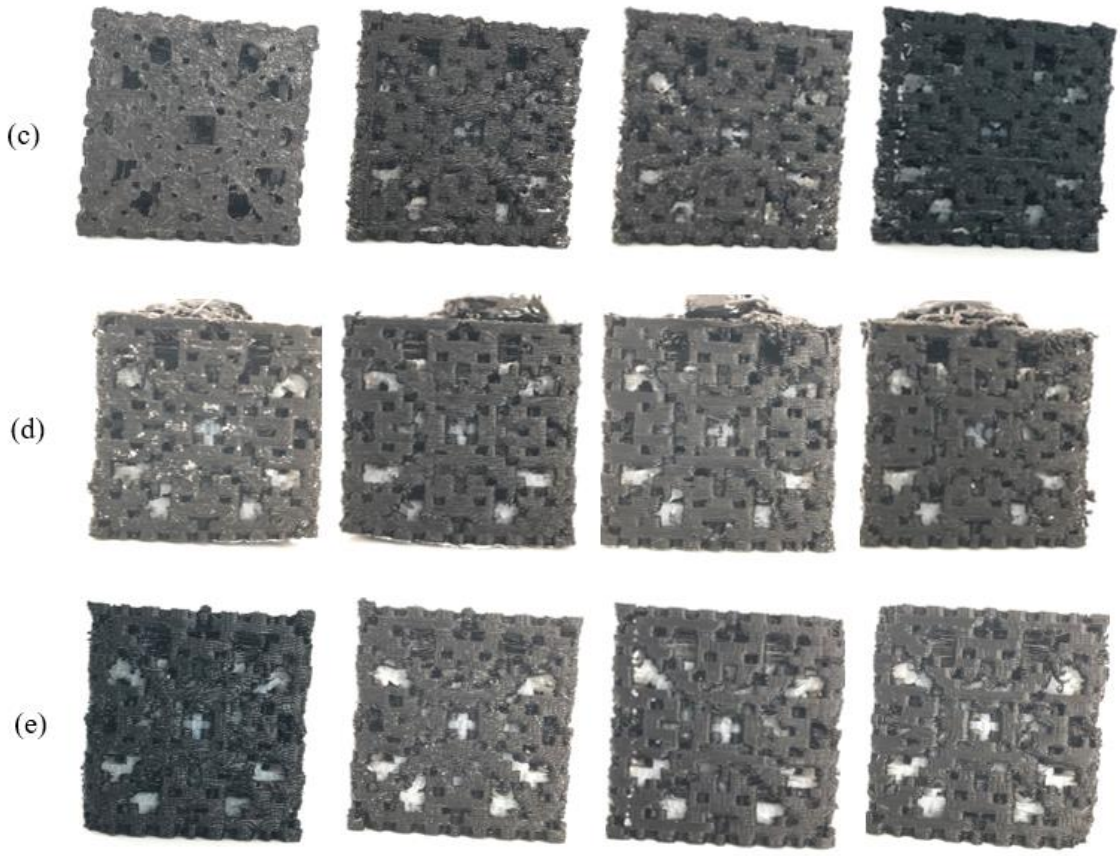


Figura 12 - Resultado de impressão do modelo auxiliar da Figura 10 (c), apresentados na ordem da Tabela 2: (a) Modelo 1; (b) Modelo 2; (c) Modelo 3; (d) Modelo 4 e; (e) Modelo 5.

Nos modelos 1 e 2 (Figura 12 (a) e (b)) observou-se que as pontes geradas com os parâmetros definidos por padrão no software influenciavam negativamente na qualidade das amostras, por este motivo, o modelo auxiliar da Figura 10 (b) foi utilizado para calibrar os parâmetros de geração de pontes no software. A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros para cada uma das amostras.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos diferentes modelos para calibrar os parâmetros relacionados às pontes.

	Modelo				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Multiplicador de extrusão	50%	40%	30%	20%	15%
Multiplicador de velocidade	80%	70%	60%	50%	40%
Velocidade de impressão	3600	3000	3000	3000	2400
Velocidade do ventilador	100%	95%	80%	70%	60%

A Figura 13 apresenta dois dos resultados obtidos com os parâmetros apresentados. Em cada uma das amostras foi analisada a qualidade da ponte gerada. Os parâmetros adotados foram os utilizados para gerar o modelo 5.

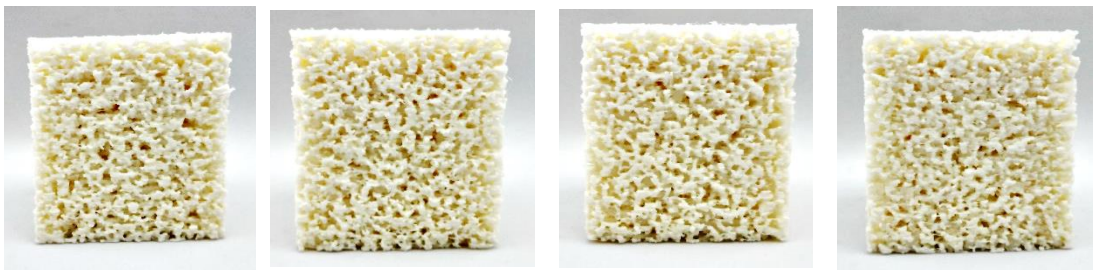


Figura 13 - Modelos auxiliares para análise dos parâmetros relacionados à geração de pontes, com destaque à diferença da qualidade dos modelos da direita e da esquerda.

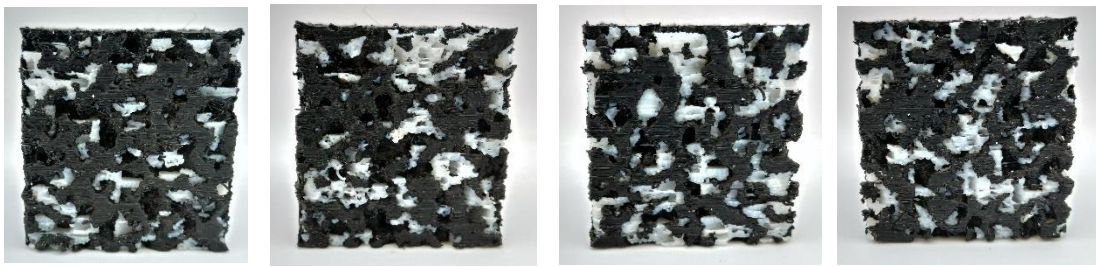
5.3. GERAÇÃO DOS MODELOS DE SOLOS ARTIFICIAIS ATRAVÉS DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO CALIBRADOS

Esses parâmetros foram aplicados para gerar o meio poroso artificial, utilizando as regras e porosidades iniciais apresentadas na Tabela 2. A Figura 14 apresenta os modelos impressos com os dois tipos de filamento. A estrutura dos modelos artificiais de solo está representada em preto, e a estrutura de suporte está representada em branco. Somente na amostra referente à regra 3 a estrutura foi impressa com PLA branco. Devido à baixa porosidade dos modelos gerados através das regras 125 e 127, a precisão no eixo x-y do equipamento utilizado não foi suficiente para reproduzir a estrutura de poros de forma satisfatória, gerando blocos maciços, por este motivo os resultados da impressão destas duas regras não foram apresentados.

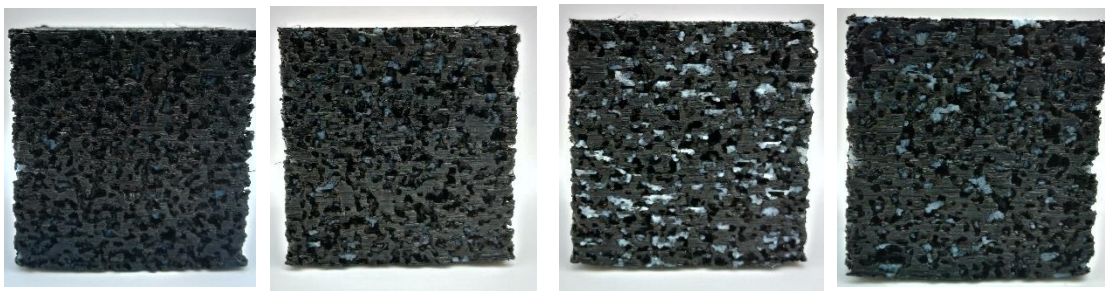
R3



R5



R7



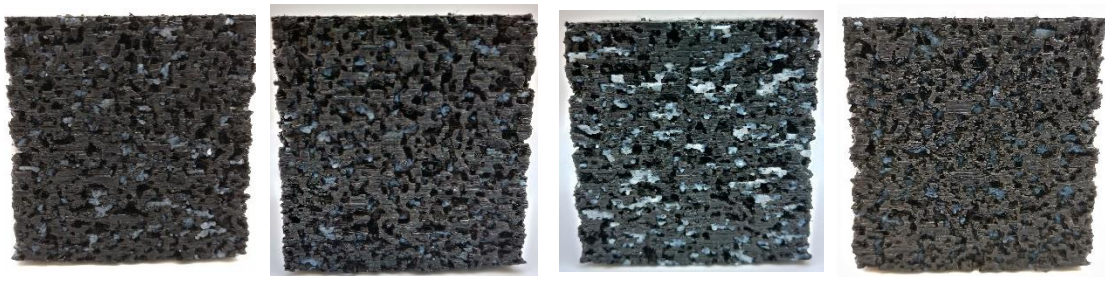
R11



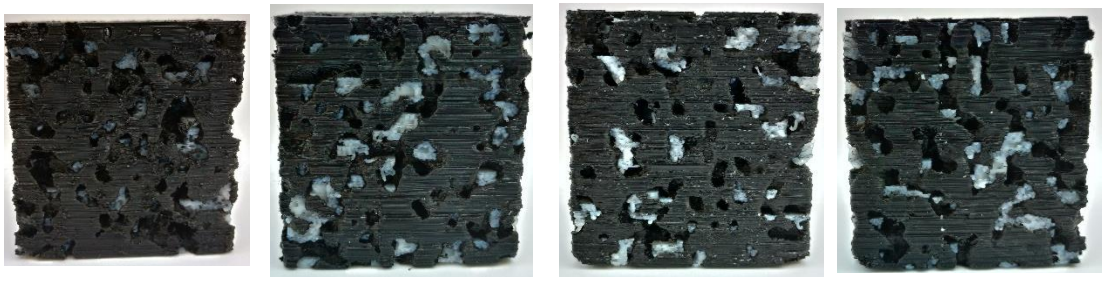
R23



R31



R47



R63

R94

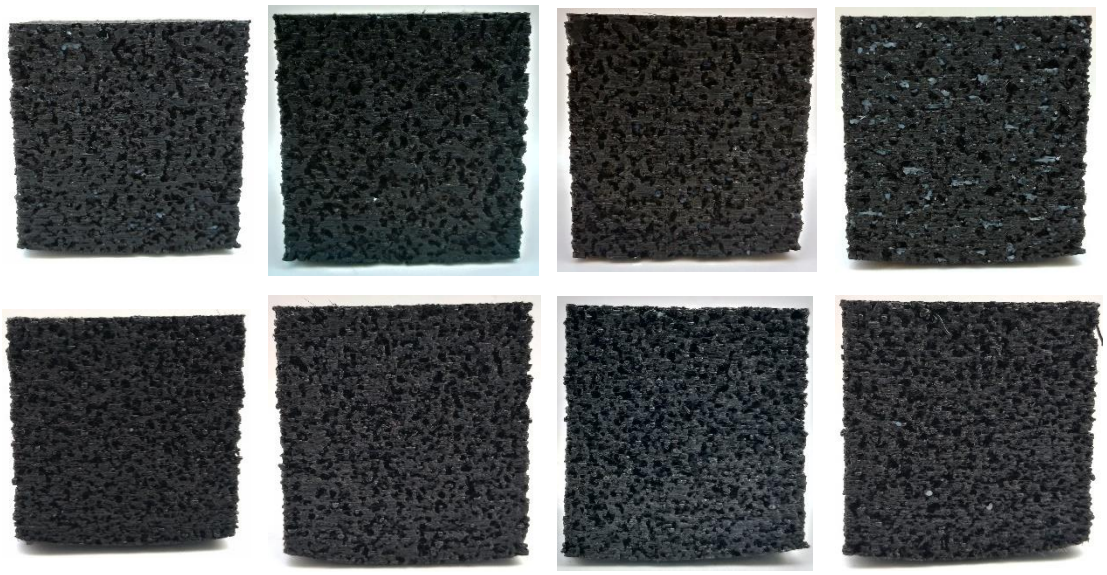
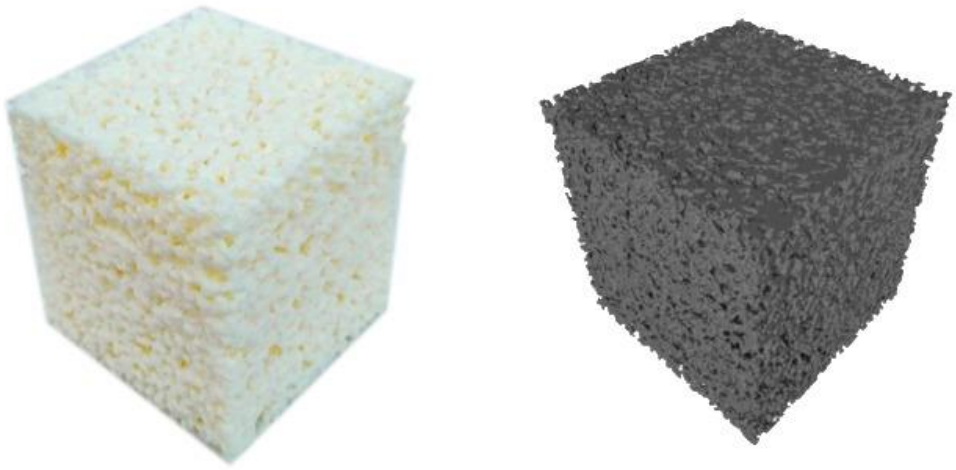


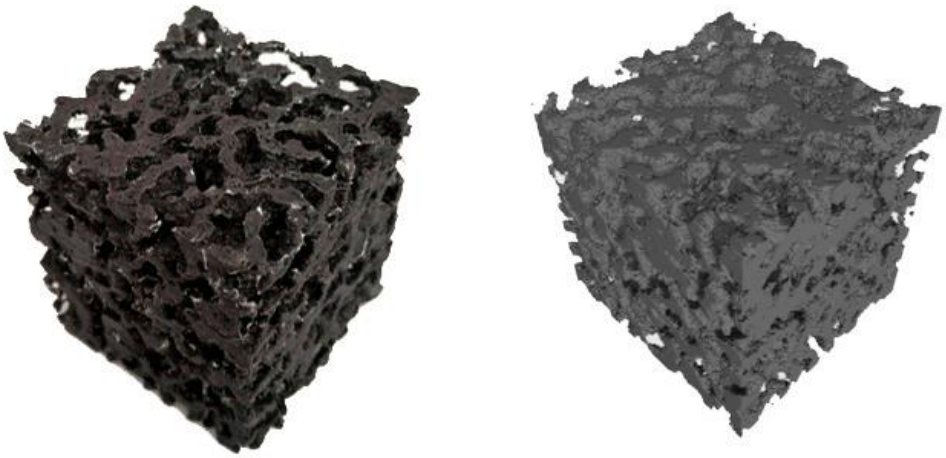
Figura 14 - Vistas laterais dos modelos impressos através da metodologia proposta.

A Figura 15 apresenta a comparação dos modelos impressos, após 72 horas de imersão na solução de D'Limoneno, com seus respectivos modelos computacionais. A análise visual permite observar que o método proposto reproduz de forma satisfatória a estrutura externa dos meios porosos representados nos modelos computacionais. No que tange a remoção do HIPS, em alguns modelos foram observados restos do filamento de suporte na estrutura externa, o que justifica os detalhes em branco nos modelos da Figura 15.

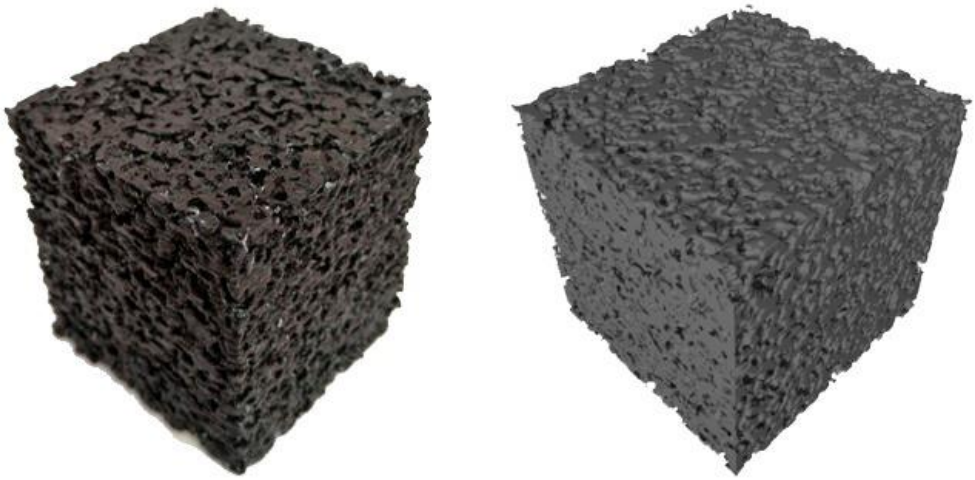
(a)



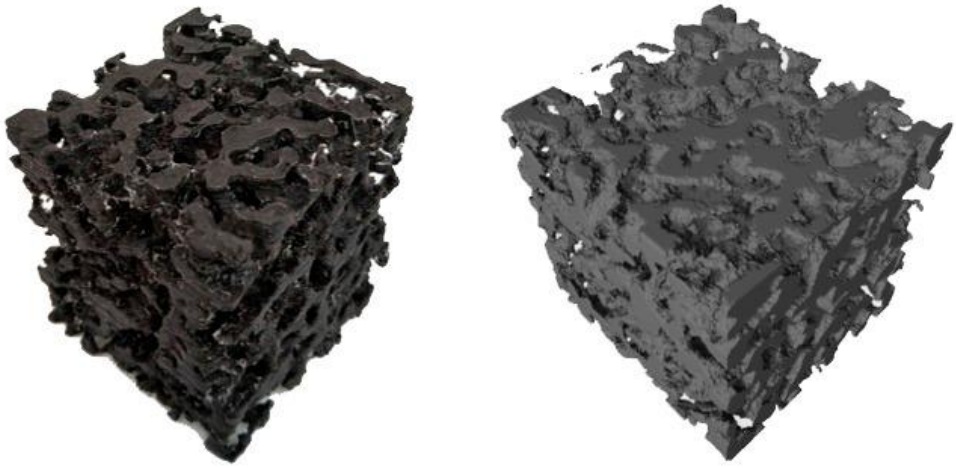
(b)



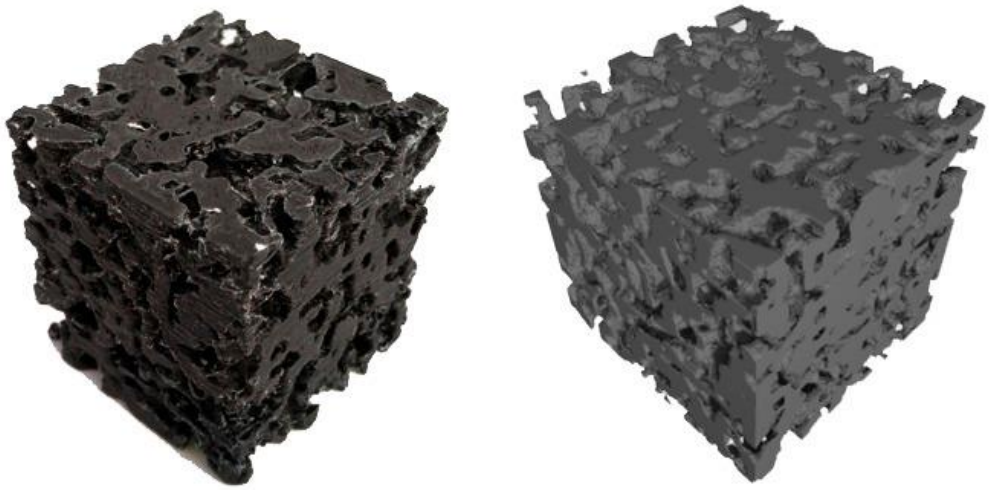
(c)



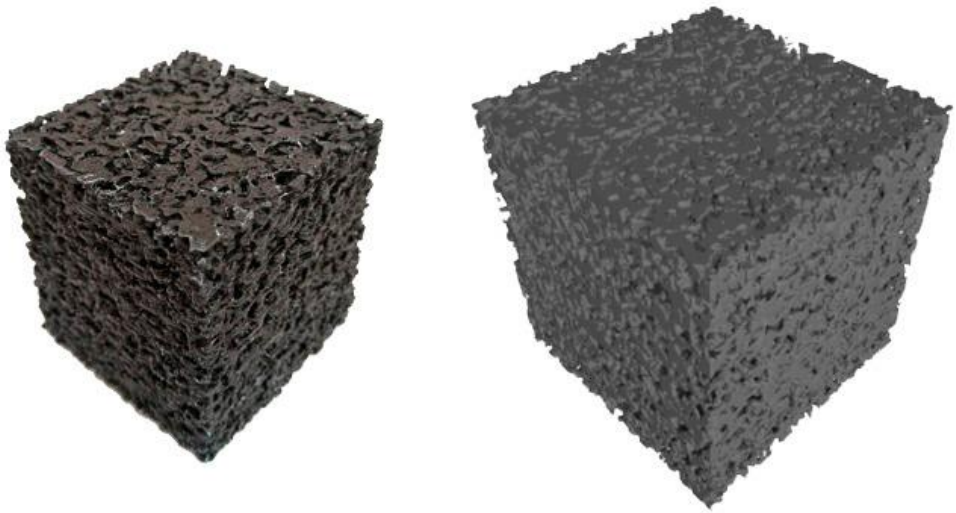
(d)



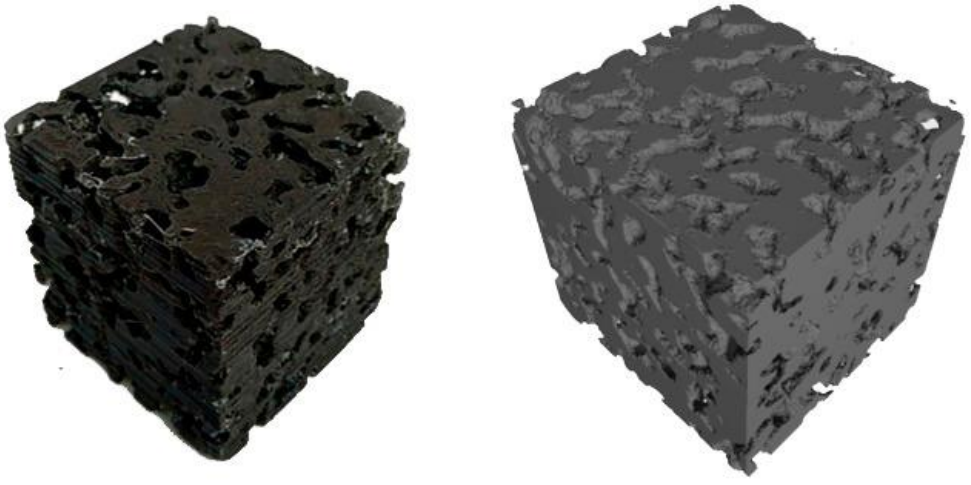
(e)



(f)



(g)



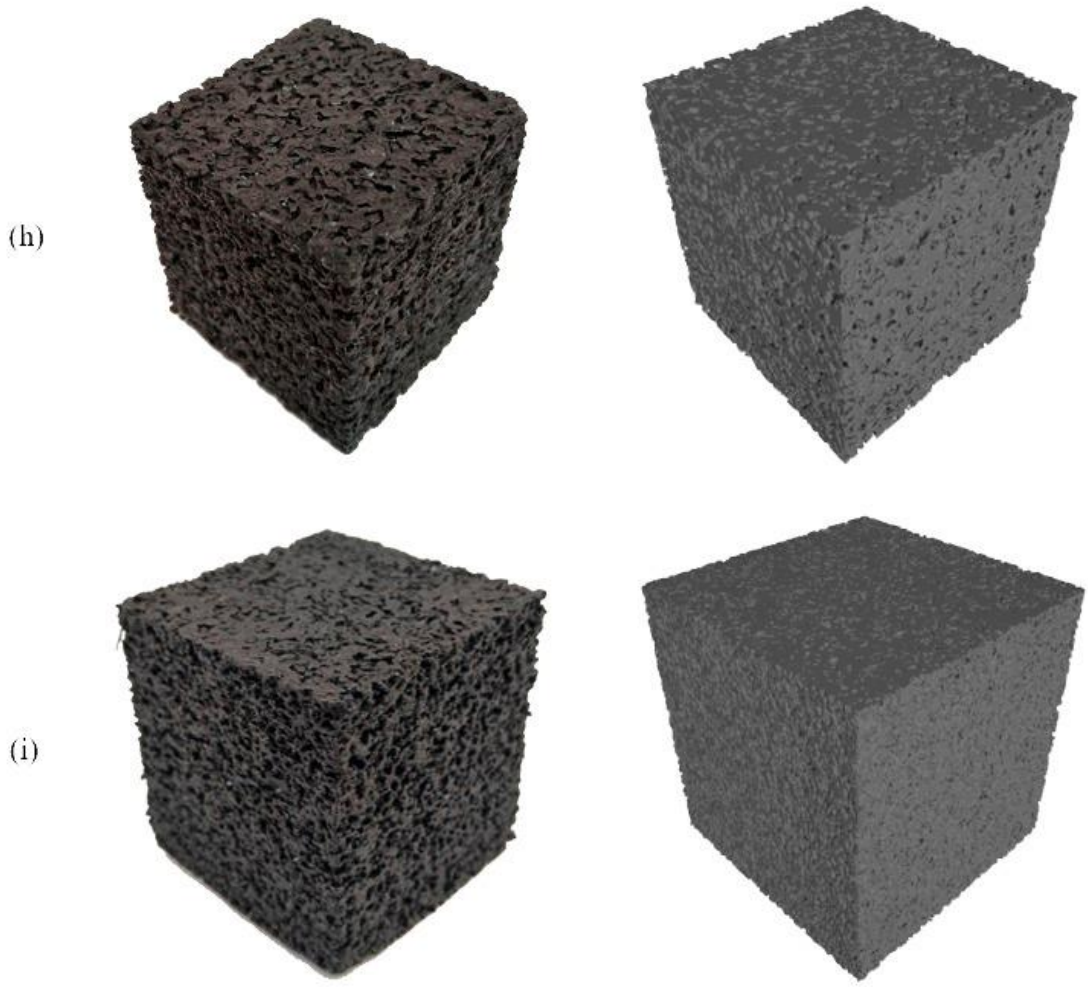


Figura 15 - Comparação das amostras impressas com os modelos computacionais: (a) R3; (b) R5; (c) R7; (d) R11; (e) R23; (f) R31; (g) R47; (h) R63 e; (i) R94.

5.4. **ADAPTAÇÃO DO PERMEÂMETRO À CARGA CONSTANTE PARA OS MODELOS DE SOLO ARTIFICIAL**

A Figura 16 apresenta um desenho esquemático do permeâmetro construído para ensaio das amostras, o amostrador vidro com espessura de 6mm e foi projetado para acomodar os modelos com o mínimo de folga possível, evitando o surgimento de um caminho preferencial para o fluxo entre o modelo e a parede do amostrador. Para melhorar a impermeabilização dessa região, as laterais dos modelos foram revestidas com fita impermeável. A Figura 17 apresenta o tubo de vidro com a amostra revestida por fita.

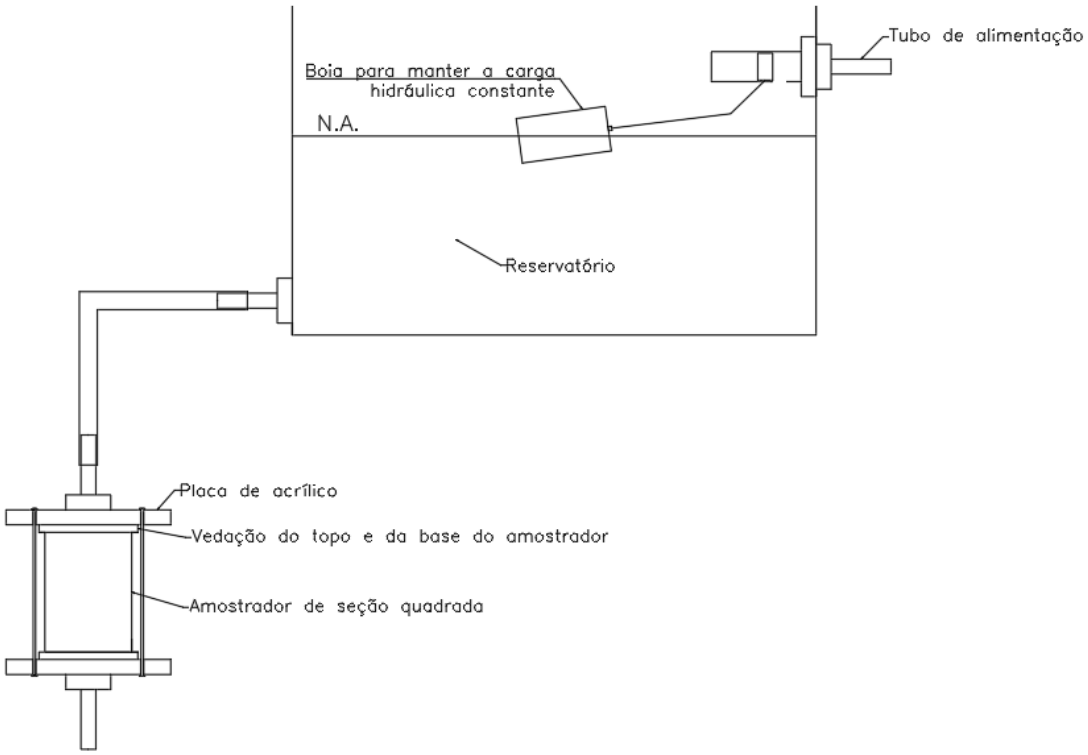


Figura 16 - Esquema do permeâmetro construído para avaliar a permeabilidade das amostras impressas.

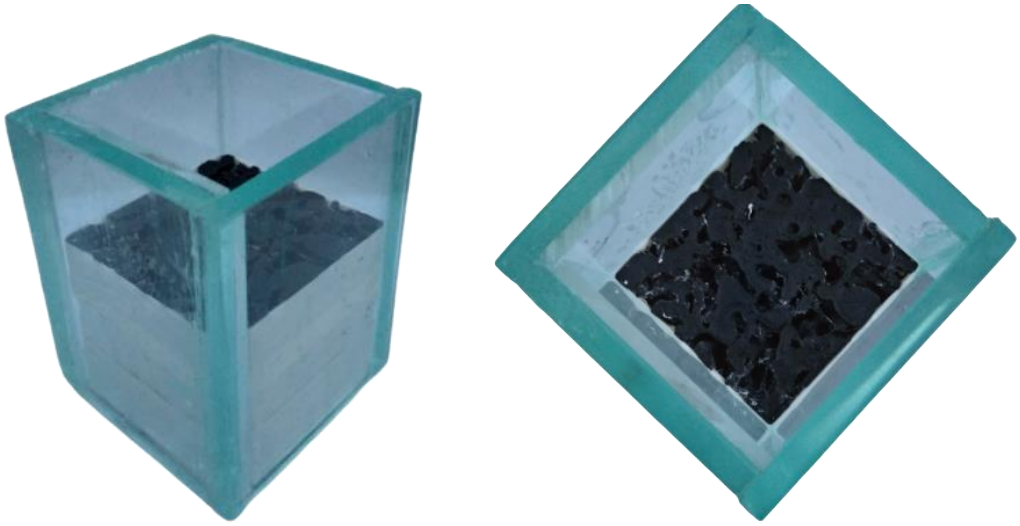


Figura 17 - Detalhe do amostrador de seção retangular.

A montagem do amostrador está representada na Figura 18, nela é possível observar o sistema de vedação montado para evitar vazamentos durante o experimento. Este é composto por uma camada de EVA cujas faces voltadas para a amostra foram

impermeabilizadas para evitar fuga da água no interior do amostrador durante a execução dos ensaios.



Figura 18 - Detalhe da montagem do amostrador.

A montagem do permeâmetro levou em consideração as recomendações da ABNT NBR 13292:1995 no que tange a necessidade de saturação do corpo de prova antes da execução do ensaio. Na execução do ensaio foram tomados os devidos cuidados para que, a maioria das bolhas de ar fossem removidas, sendo também observado a condição de não variação do nível do reservatório, que foi garantida pela presença da boia. Para evitar que houvesse fluxo preferencial de água no contato entre a amostra e o amostrador, o perímetro deste contato, na parte superior da amostra foi preenchido com massa para calafetar. O ensaio foi montado conforme pode ser observado na Figura 19.

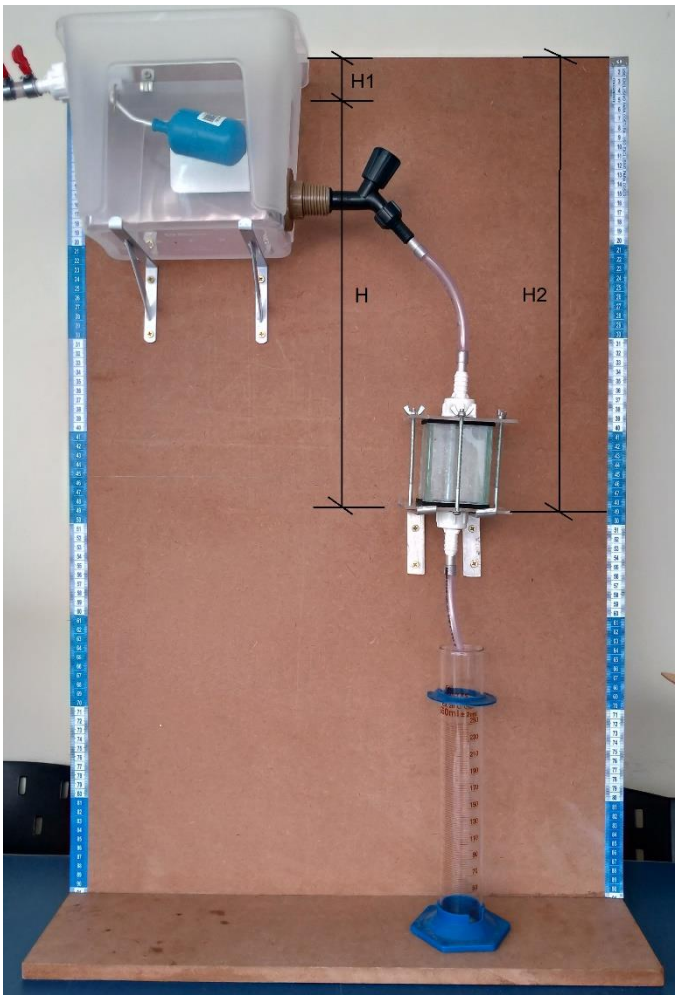


Figura 19 - Permeâmetro de carga constante montado para a execução dos ensaios.

5.5. AVALIAÇÃO EXPERIAMENTAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA À CARGA CONSTANTE

As amostras foram submetidas ao ensaio de permeabilidade com carga constante. Durante o ensaio foi cronometrado o tempo necessário para preencher 600 cm^3, medido com o auxílio de um béquer. Tal volume foi escolhido com o objetivo de promover um tempo de ensaio suficiente para ser representativo do fenômeno. Para cada amostra foram feitas três medidas, o valor de permeabilidade apresentado corresponde à média dos valores obtidos. Os resultados do ensaio estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do experimento de permeabilidade com carga constante.

Amostra	H1 (cm)	H2 (cm)	L (cm)	V (cm^3)	T (s)	A (cm^2)	k (cm/s)	k (m/s)	K (μm^2)
R5	6,60	48,40	4,80	600	17,12	23,04	0,175	1,76E-03	1,80E-04
					17,07		0,175		
					16,70		0,179		
R23	6,60	48,40	4,80	600	17,20	23,04	0,174	1,79E-03	1,83E-04
					16,31		0,183		
					16,67		0,179		
R47	6,60	48,40	4,80	600	19,56	23,04	0,153	1,53E-03	1,56E-04
					19,89		0,150		
					19,32		0,155		
R7	6,60	48,40	4,80	600	38,94	23,04	0,077	7,89E-04	8,06E-05
					37,55		0,080		
					37,21		0,080		
R3	6,60	48,40	4,80	600	17,89	23,04	0,167	1,66E-03	1,70E-04
					18,01		0,166		
					18,01		0,166		
R94	6,60	48,40	4,80	600	31,95	23,04	0,094	9,38E-04	9,59E-05
					31,48		0,095		
					32,17		0,093		
R63	5,00	48,40	4,80	600	103,42	23,04	0,028	2,81E-04	2,87E-05
					103,38		0,028		
					100,92		0,029		
R11	6,60	48,40	4,80	600	16,30	23,04	0,183	1,85E-03	1,89E-04
					15,95		0,187		
					16,16		0,185		
R31	5,50	48,40	4,80	600	39,59	23,04	0,074	7,50E-04	7,66E-05
					38,91		0,075		
					38,02		0,077		

5.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PERMEABILIDADE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

O intervalo de porosidade utilizado para gerar os modelos computacionais indica que os autômatos gerados são referentes a solos arenosos, cuja característica é a predominância de macro poros. Para este tipo de solo, Das & Sobhan (2014) indicam que os valores típicos de condutividade hidráulica variam no intervalo de 1,0 a 0,01 cm/s. A comparação dos resultados obtidos através do ensaio de permeabilidade à carga constante proposto, adaptado para as amostras de solo artificial, permitiu observar que os valores

de condutividade hidráulica foram compatíveis com os valores encontrados na literatura para o tipo de solo representado.

No que diz respeito aos valores da permeabilidade intrínseca obtidos numericamente e experimentalmente, a comparação apresentada na Tabela 6, permite observar diferenças em até três ordens de grandeza nas regras 7, 11, 31, 63. As outras regras apresentaram diferença em duas ordens de grandeza.

Tabela 6 - Comparação dos resultados de permeabilidade absoluta numérica e experimental das amostras.

Amostra	**Porosidade**	**$K_{NUMÉRICO}$ (μm^2)**	**$K_{EXPERIMENTAL}$ (μm^2)**
R3	57,46	2,37E-02	1,70E-04
R5	61,08	8,84E-02	1,80E-04
R7	48,97	2,18E-02	8,06E-05
R11	55,94	1,65E-01	1,89E-04
R23	49,66	7,09E-02	1,83E-04
R31	40,17	2,57E-02	7,66E-05
R47	36,38	3,98E-02	1,56E-04
R63	39,34	1,25E-02	2,87E-05
R94	29,64	9,03E-03	9,59E-05

As diferenças observadas podem estar relacionadas: (1) ao método utilizado pelo *software* Avizo para estimar a permeabilidade absoluta numérica ou; (2) à qualidade dos modelos gerados através do FDM. Para amostras com baixa porosidade, foi possível observar que o método de impressão 3D utilizado não possui precisão suficiente para reproduzir a estrutura dos meios porosos de forma satisfatória. Zhang *et al.* (2019) fazem a comparação das permeabilidades absolutas estimadas pelo Avizo, através da solução das equações de Navier-Stokes, com as estimadas por um modelo de simulação de uma rede de poros e com as estimadas pelo método lattice-Boltzmann. A análise feita pelos autores conclui que a previsão de permeabilidade absoluta feita pelo Avizo é maior em uma ordem de grandeza quando comparada com as previsões feitas pelos outros dois métodos. Apesar desta constatação, os valores obtidos apresentam uma variação que foi relacionada à precisão do método de impressão 3D utilizado.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O uso de autômatos celulares e impressão 3D para estudar a estrutura física de meios porosos demonstra a possibilidade de utilização de novas abordagens na área, baseadas nas tecnologias que vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em outras áreas de estudo. Buscou-se por meio do presente trabalho, utilizar uma metodologia existente para geração de meios porosos artificiais utilizado autômatos celulares, para propor uma metodologia de uso do FDM como método de impressão 3D para gerar estas amostras, e validá-la através da análise da permeabilidade intrínseca numérica e experimental, obtida por meio da adaptação do ensaio de permeabilidade à carga constante.

A escolha de utilização do FDM como método de impressão foi baseada no vasto conhecimento disponível sobre a operação e manutenção das impressoras que utilizam este método, ao fácil acesso a esses equipamentos, que possuem preços acessíveis, e à disponibilidade de materiais de impressão de baixo custo. A análise visual da estrutura externa dos modelos permite observar alguns defeitos de impressão, porém não é possível concluir sobre o nível de semelhança da estrutura interna das amostras impressas.

A metodologia de calibração dos parâmetros de impressão mostrou-se eficaz em avaliar o efeito da variação dos parâmetros em modelos que simulam cenários de impressão semelhantes aos obtidos na geração dos modelos, com um consumo menor de material e um menor tempo de impressão. A proposta de utilização do filamento solúvel permitiu representar externamente de forma satisfatória a estrutura da rede de poros. Uma análise mais precisa da eficácia do método de impressão e do processo de remoção de suporte, poderia ser obtida através de uma análise metrológica das amostras.

A adaptação do ensaio de permeabilidade à carga constante mostrou-se eficaz ao promover uma boa acomodação das amostras no permeâmetro e ao permitir a execução do ensaio nas amostras de pequenas dimensões. O maior cuidado deve ser tomado em relação à acomodação das amostras, visto que pode haver fluxo preferencial da água no contato entre a amostra e as paredes de vidro do amostrador.

Na comparação dos resultados de permeabilidade absoluta numérica e experimental observou-se uma diferença relevante nos valores encontrados, chegando a até 3 ordens de grandeza em 4 dos 9 modelos impressos. Apesar da constatação de que o *software* utilizado para previsão da permeabilidade numérica pode apresentar uma variação de até uma ordem de grandeza em suas análises, os resultados numéricos encontrados apresentaram grande variação em relação aos resultados experimentais. Isso

pode estar relacionado à precisão do equipamento utilizado, os testes conduzidos permitiram perceber uma precisão máxima de 180 μm no eixo vertical, que corresponde a um valor próximo ao limite superior dentro do intervalo de 50 a 200 μm, que pode ser atingido utilizando este método.

Considera-se, portanto, que os objetivos da presente pesquisa foram atingidos ainda que parcialmente, uma que vez que não foi possível analisar a capacidade do método de impressão para reprodução da estrutura interna. A variação dos resultados de permeabilidade intrínseca numérica e experimental são indício de que o método não conseguiu reproduzir de forma satisfatória os modelos.

Há vários pontos que podem ser estudados de maneira mais aprofundada em pesquisas futuras no tema, destacando-se:

- O estudo dos autômatos celulares com outras vizinhanças e regras que não sejam necessariamente totalísticas;
- A utilização de um equipamento de impressão 3D em FDM com uma precisão maior ou, de um outro método de impressão que permita atingir uma maior precisão, como o *polyjet*;
- A análise metrológica das amostras impressas, com o objetivo de verificar com precisão a capacidade que o método de impressão tem de reproduzir os modelos computacionais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (2021). *NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*.

Adler, P. M., Jacquin, C. G., & Quiblier, J. A. (1990). Flow in simulated porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, *16*(4), 691–712. doi: 10.1016/0301-9322(90)90025-E

Arbabian, M. E., & Wagner, M. R. (2020). The impact of 3D printing on manufacturer–retailer supply chains. *European Journal of Operational Research*, *285*(2), 538–552. doi: 10.1016/j.ejor.2020.01.063

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*(May). doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114588

Avizo. (2020). Texas: ThermoFisher Scientific.

Bandman, O. (2011). Using cellular automata for porous media simulation. *Journal of Supercomputing*, *57*(2), 121–131. doi: 10.1007/s11227-010-0391-5

Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Nova Iorque: Dover.

Blöcher, G., & Zimmermann, G. (2008). Settle3D-A numerical generator for artificial porous media. *Computers and Geosciences*, *34*(12), 1827–1842. doi: 10.1016/j.cageo.2007.12.008

Carrier III, W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *129*(11). doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:11(1054)

Ćwikła, G., Grabowik, C., Kalinowski, K., Paprocka, I., & Ociepka, P. (2017). The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *227*(1). doi: 10.1088/1757-899X/227/1/012033

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. doi: 10.2136/sssaj2015.03.0097

Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). Principles of Geotechnical Engineering, SI Version. *Animal Genetics*, *39*(5).

García Plaza, E., Núñez López, P. J., Caminero Torija, M. Á., & Chacón Muñoz, J. M. (2019). Analysis of PLA geometric properties processed by FFF additive

manufacturing: Effects of process parameters and plate-extruder precision motion. *Polymers*, *11*(10). doi: 10.3390/polym11101581

Hasiuk, F. (2014). Making things geological: 3-D printing in the geosciences. *GSA Today*, *24*(8), 28–29. doi: 10.1130/GSATG211GW.1

Jiang, Z., Wu, K., Couples, G., Van Dijke, M. I. J., Sorbie, K. S., & Ma, J. (2007). Efficient extraction of networks from three-dimensional porous media. *Water Resources Research*, *43*(12), 1–17. doi: 10.1029/2006WR005780

Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., & Hemasian Etefagh, A. (2015). Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. *Journal of Materials Processing Technology*, *226*, 280–286. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.012

Kechagias, J., Stavropoulos, P., Koutsomichalis, A., Ntintakis, I., & Vaxevanidis, N. (2014). *Dimensional Accuracy Optimization of Prototypes produced by PolyJet Direct 3D Printing Technology*. 61–65.

Kim, S. Y., Shin, Y. S., Jung, H. D., Hwang, C. J., Baik, H. S., & Cha, J. Y. (2018). Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *153*(1), 144–153. doi: 10.1016/j.ajodo.2017.05.025

Koponen, A., Kataja, M., & Timonen, J. (1996). Tortuous flow in porous media. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, *54*(1), 406–410. doi: 10.1103/PhysRevE.54.406

Koponen, A., Kataja, M., & Timonen, J. (1997). Permeability and effective porosity of porous media. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, *56*(3), 3319–3325. doi: 10.1103/PhysRevE.56.3319

Mahabadi, N., Begell, D., Zheng, X., Paassen, L. Van, & Jang, J. (2018). The Soil Water Characteristic Curve for 3D Printed Soil Samples. *Geotechnical Special Publication*, *2017-Novem*(GSP 301), 68–76. doi: 10.1061/9780784481684.008

Murphy, S. V., & Atala, A. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, *32*(8), 773–785. doi: 10.1038/nbt.2958

Nabovati, A., & Sousa, A. C. M. (2007). Fluid Flow Simulation in Random Porous Media at Pore Level Using Lattice Boltzmann Method. In New Trends in Fluid Mechanics Research. doi: 10.1007/978-3-540-75995-9_172

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive

manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, *143*(February), 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

Øren, P. E., & Bakke, S. (2002). Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties. *Transport in Porous Media*, *46*(2–3), 311–343. doi: 10.1023/A:1015031122338

Ozelim, Luan C.de S.M., & Cavalcante, A. L. B. (2018). 3D cellular automata as a computational tool to generate artificial porous media. *International Journal of Geomechanics*, *18*(9), 1–22. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001242

Ozelim, Luan C.de S.M., & Cavalcante, A. L. B. (2019). Combining microtomography, 3D Printing, and numerical simulations to study scale effects on the permeability of porous media. *International Journal of Geomechanics*, *19*(2), 1–15. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001340

Ozelim, Luan Carlos de S.M. (2014). Concepção e Validação de um Modelo Matemático-Digital para o Meio Poroso por Meio de Microtomografia, Autômatos Celulares e Impressões 3D. In G.TD-096/2014. Universidade de Brasília.

Ozelim, Luan Carlos de S.M., Cavalcante, A. L. B., & Baetens, J. M. (2017). On the iota-delta function: a link between cellular automata and partial differential equations for modeling advection–dispersion from a constant source. *Journal of Supercomputing*, *73*(2), 700–712. doi: 10.1007/s11227-016-1795-7

Rengier, F., Mehndiratta, A., Von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, H. U., & Giesel, F. L. (2010). 3D printing based on imaging data: Review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, *5*(4), 335–341. doi: 10.1007/s11548-010-0476-x

Takagishi, K., & Umezu, S. (2017). Development of the Improving Process for the 3D Printed Structure. *Scientific Reports*, *7*(November 2016), 1–10. doi: 10.1038/srep39852

Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, *55*(3), 601–644. doi: 10.1103/RevModPhys.55.601

Wolfram, S. (1984). *Universality and Complexity in Cellular Automata*. 1–35.

Wolfram, S. (2002). A New Kind of Science, first ed. In Wolfram Media Inc.

Zhang, L., Jing, W., Yang, Y., Yang, H., Guo, Y., Sun, H., Zhao, J., & Yao, J. (2019). The investigation of permeability calculation using digital core simulation technology. *Energies*, *12*(17), 1–9. doi: 10.3390/en12173273

Zubeldia, E. H. (2013). Uso dos Autômatos Celulares Bidimensionais e Imagens Tomográficas na Geração de Meios Porosos Artificiais. In G.DM-231/2013. Universidade de Brasília.