

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS

Paulo Henrique Barbosa Schubert

**REAPROVEITAMENTO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO PARA
FABRICAÇÃO DE FILTROS VIA *ROBOCASTING***

Florianópolis

2023

Paulo Henrique Barbosa Schubert

REAPROVEITAMENTO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO PARA
FABRICAÇÃO DE FILTROS VIA *ROBOCASTING*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Campus Florianópolis da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Prof.(a) Antonio Pedro Novaes Oliveira,
Dr.(a). Ing.

Florianópolis

2023

Schubert, Paulo Henrique Barbosa

Reaproveitamento de areia descartada de fundição para fabricação de filtros pela técnica de robocasting / Paulo Henrique Barbosa Schubert ; orientador, Antonio Pedro Novaes Oliveira, 2023.

97 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. I. Oliveira, Antonio Pedro Novaes. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Paulo Henrique Barbosa Schubert

**REAPROVEITAMENTO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO PARA FABRICAÇÃO
DE FILTROS VIA *ROBOCASTING***

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 22 de fevereiro de 2023.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



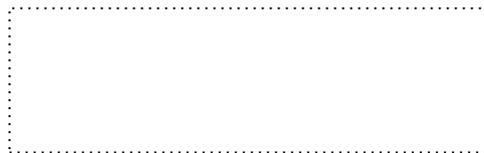
Prof.(a) Antonio Pedro Novaes Oliveira, Dr.(a)

Orientador(a)



Elisângela Guzi de Moraes, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Guilherme Pante Leme de Campos

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2023.

*Dedico este trabalho à minha falecida avó,
Maria Chiarelli Barbosa,
mulher guerreira e de bom coração.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina pelos aprendizados e conhecimentos teóricos e práticos adquiridos ao longo desses anos de graduação.

À empresa Schulz, por ceder a areia descartada de fundição para realizar o meu trabalho de conclusão de curso.

À empresa Torrecid, pela oportunidade de estágio concedida e por realizar o ensaio de FRX para análise de amostras.

Ao orientador, Prof. Antonio Pedro Novaes de Oliveira, pela oportunidade para participar deste projeto incrível, assim como os ensinamentos transmitidos ao longo dos meses.

Aos colegas do Laboratório de Materiais Vitrocerâmicos (Vitrocer) do EMC da UFSC, os quais prestaram apoio e assistência sempre que possível.

Aos meus familiares e amigos, por estarem ao meu lado e apoiarem incondicionalmente minha trajetória.

A Deus, por iluminar meu caminho e estar comigo em todos os momentos.

*“Aquele que habita no esconderijo do Altíssimo, à sombra no Onipotente
descansará. Direi ao Senhor: Ele é o meu Deus, o meu refúgio, a minha fortaleza, e nele
confiarei.” (SALMO 91)*

RESUMO

A partir do desenvolvimento do processamento de materiais por meio da manufatura aditiva, diversos segmentos tem apresentado uma perspectiva de elevado retorno tecnológico, seja em torno da área médica, industrial, residencial, entre outros. Em relação a indústria de fundição, há uma mudança acentuada para adoção de métodos/materiais inovadores, de forma a ainda considerar processos convencionais relevantes ao mercado. Dentre eles, pode-se ressaltar o reaproveitamento da areia de fundição, uma vez que apresenta um tempo de ciclo limite para sua função. As tratativas atuais envolvem possíveis passivos ambientais, no qual influenciam no meio-ambiente. Conseqüentemente, existem pesquisas relacionadas ao desenvolvimento dessa matéria-prima. Assim, buscou-se neste trabalho o reaproveitamento da areia descartada visando atribuir uma economia circular a esta matéria-prima por meio da manufatura aditiva para a produção de um filtro poroso via *robocasting*, partindo-se de uma matéria-prima bastante abundante. A partir dos resultados, foram atribuídos testes envolvendo a etapa de moagem para diminuição do tamanho de partícula, garantindo uma eficiência de 10% de areia descartada de fundição, com uma redução aproximada a 96% de tamanho menor que em seu estado bruto, já que o resultado de impressão obtido para a areia em estado peneirado a 500 μm não apresentou resolução suficiente para impressão do filtro poroso. Além disso, apesar da secagem dos filtros revestidos e sinterizados à temperatura ambiente, as dimensões mantiveram-se aproximadas, em torno de 17 mm de diâmetro por 17 mm de altura, visto que suas dimensões iniciais eram 3 mm superiores. Por conclusão, obtiveram-se valores consideráveis de porosidade e resistência à compressão para os filtros revestidos e sinterizados, próximos de 50MPa e 5 MPa (acima dos resultados da literatura para espumas cerâmicas), respectivamente, com uma variação da presença de vazios de 42 a 58%.

Palavras-chave: fundição; manufatura aditiva; filtro de fundição.

ABSTRACT

Since the development of material processing through additive manufacturing, various sectors have presented a perspective of high technological return, whether in the medical, industrial, residential, among others. In relation to the casting industry, there is a marked shift towards the adoption of innovative methods/materials, in order to still consider conventional processes relevant to the market. Among them, the reuse of casting sand can be highlighted, since it has a limit cycle time for its function. Current discussions involve possible environmental liabilities, which influence the environment. Consequently, there are researches related to the development of this raw material. Thus, this work aimed at reusing discarded sand to attribute a circular economy to this raw material through additive manufacturing for the production of a porous filter via robocasting, starting from a very abundant raw material. From the results, tests were attributed involving the grinding stage to decrease the particle size, ensuring an efficiency of 10% of discarded casting sand, with an approximate reduction of 96% in size smaller than in its raw state, since the printing result obtained for the sand sieved at 500 μm did not show sufficient resolution for printing the porous filter. In addition, despite the drying of the coated and sintered filters at room temperature, the dimensions remained approximate, around 17 mm in diameter by 17 mm in height, since their initial dimensions were 3 mm higher. In conclusion, considerable values of porosity and compressive strength were obtained for the coated and sintered filters, close to 50 MPa and 5 MPa (above the results in the literature for ceramic foams), respectively, with a variation in the presence of voids from 42 to 58%.

Keywords: foundry; additive manufacturing; robocasting; foundry filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do processo de fundição.	19
Figura 2: Formação da massa argilosa.	24
Figura 3: Fundição por areia verde.	24
Figura 4: Fotografia mostrando uma cerâmica para filtro de fundição.	25
Figura 5: Escoamento laminar e turbulento.	26
Figura 6: Etapas de Filtragem.	26
Figura 7: Processo de reaproveitamento da areia.	28
Figura 8: PPC por número de passes.	29
Figura 9: Processos para manufatura aditiva.	30
Figura 10: Passos para fabricação 3D.	31
Figura 11: Submissão de artigos ao longo dos anos.	32
Figura 12: Curva de nível de uma montanha.	34
Figura 13: Classificação dos fluídos.	35
Figura 14: Fluídos dependentes do tempo.	36
Figura 15: Fluídos independentes do tempo.	37
Figura 16: Equipamento de <i>robocasting</i>	40
Figura 17: Variáveis dos filamentos.	40
Figura 18: Esquema comparativo entre estados de partículas para fabricação: a) aleatórios; b) aglomerados.	42
Figura 19: Extrusão da pasta.	42
Figura 20: Fotografias mostrando o aspecto geral das matérias primas utilizadas: a) areia descartada de fundição; b) bentonita; c) metassilicato de sódio.	44
Figura 21: Processo de peneiramento: a) pesagem; b) areia e peneira 500 μ ; c) peneiramento.	45
Figura 22: Concentração de retidos: a) partículas aglomeradas; b) pesagem do fundo da peneira.	46
Figura 23: Fotografia mostrando o granulômetro utilizado.	50
Figura 24: Cilindro em arquivo CAD.	51
Figura 25: Filtro stars em CAD.	52
Figura 26: Filtro com porosidade de geometria circular.	52
Figura 27: a) Equipamento de DIW; b) Regulador de pressão.	53
Figura 28: Fotografia mostrando o reômetro utilizado.	54

Figura 29: Etapas do ensaio de reologia.	54
Figura 30: Fotografia do dilatômetro ótico utilizado.	56
Figura 31: Fotografia do picnômetro utilizado.	57
Figura 32: Fotografia mostrando a prensa uniaxial (hidráulica) utilizada.....	57
Figura 33: Fotografia mostrando o aparato para medidas de densidade utilizando o princípio de Arquimedes.	58
Figura 34: Análise granulométrica da partícula peneirada.	60
Figura 35: Areia de fundição após o processo de perda ao fogo.	61
Figura 36: Curvas de comportamento reológico I.....	62
Figura 37: Corpos de prova com variação de água.	63
Figura 38: Corpos de prova com variação de bentonita.	64
Figura 39: Corpos de prova com adição de metassilicato de sódio.	65
Figura 40: Pasta com separação de fases.	65
Figura 41: Corpos de prova com pressões distintas e composições iguais.	66
Figura 42: a) seringa com inclusão de ar; b) cilindro à verde.....	67
Figura 43: Análise microestrutural da seringa.	68
Figura 44: Análise microestrutural das partículas de areia de fundição.....	68
Figura 45: Aspecto visual da areia de fundição de acordo com os testes realizados.	69
Figura 46: Análise granulométrica dos testes realizados.....	70
Figura 47: Dilatação térmica do teste III.	71
Figura 48: Comportamento de expansão do corpo de prova: a) estado inicial; b) expansão térmica; c) retorno ao ponto inicial.....	72
Figura 49: aspectos distintos para mesma composição: a) ADF com partícula grossa; b) ADF com partícula fina.....	73
Figura 50: Aspectos visuais de três amostras: a) Amostra A; b) Amostra B; c) Amostra C.....	74
Figura 51: Curvas de comportamento reológico II.	75
Figura 52: Filtros à verde.....	76
Figura 53: Corpos de prova: a) à verde; b) sinterizados.....	77
Figura 54: Corpos de prova revestidos, à esquerda, e sinterizados, à direita.	79
Figura 55: Análise de poros por polegadas: a) linhas I e II; b) linhas III e IV.	79
Figura 56: Protótipo de filtro de fundição à verde: a) vista lateral superior; b) vista lateral inferior; c) vista superior; d) vista inferior.	83

Figura 57: Microestrutura ótica do filtro de fundição: a) vista superior; b) vista inferior.....	84
Figura 58: Porosidade por polegada linear do filtro: a) linhas a, b, c, d; b) linhas e, f, g, h.....	85
Figura 59: Ensaio de compressão.....	85
Figura 60: Ensaio de compressão: a) amostra sinterizada; b) amostra revestida.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção nacional no setor de fundição.....	21
Tabela 2: Tipos de processos de fundição.	21
Tabela 3: Comparativo entre os processos de fundição.	22
Tabela 4: Composição e propriedades típicas da areia verde para moldes de fundição.	23
Tabela 5: Etapas de reaproveitamento da areia.....	29
Tabela 6: Vantagens e desvantagens da MA.	33
Tabela 7: Técnicas de manufatura aditiva.	38
Tabela 8: Variáveis de manufatura aditiva por extrusão.	41
Tabela 9: Composições das pastas I.	46
Tabela 10: Composições das pastas II.....	47
Tabela 11: Composições das pastas III.	47
Tabela 12: Testes para redução do tamanho de partícula.	48
Tabela 13: Composições da pasta para caracterização II.	49
Tabela 14: Composições para testes reológicos.....	55
Tabela 15: Composição para teste reológico II.....	55
Tabela 16: Retrações linear e diametral.	56
Tabela 17: Dados reológicos I.	62
Tabela 18: Faixa de pressão de acordo com a porcentagem de metassilicato de sódio.	66
Tabela 19: FRX da ADF.....	72
Tabela 20: Reprodução de composição de pasta da caracterização I.....	73
Tabela 21: Dados reológicos II.	75
Tabela 22: Porosidade dos corpos de prova.....	77
Tabela 23: Densidades teórica e real.	80
Tabela 24: Retrações dos corpos de prova à verde.	80
Tabela 25: Retrações dos corpos de prova sinterizados.	81
Tabela 26: Retrações dos corpos de prova revestidos.	81
Tabela 27: Porosidades das três análises do filtro.....	82
Tabela 28: Retrações do protótipo à verde.	84
Tabela 29: Resultados de resistência à compressão dos corpos de prova.	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ADF	Areia Descartada de Fundição
ASTM	Association Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
DIW	Direct Ink Writting
FRX	Fluorescência por RaioX
ISO	International Organization of Standardization
MA	Manufatura Aditiva
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PPC	Perda Por Calcinação
PPI	Pores Per Inch
STL	Standard Tessellation Language
3D	Tridimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	19
2.1.1	Indústrias de Fundição	20
2.1.2	Tipos de Fundição.....	21
2.1.2.1	<i>Fundição em areia verde</i>	22
2.1.3	Filtros de Fundição	25
2.1.4	Areias Descartadas de Fundição	27
2.1.5	Reutilização das Areias de Fundição	28
2.2	MANUFATURA ADITIVA.....	30
2.2.1	Deposição de camadas	33
2.2.2	Comportamento Reológico.....	34
2.2.3	Técnicas de Manufatura Aditiva.....	37
2.2.3.1	<i>Robocasting.....</i>	39
2.3	SILICATO DE SÓDIO.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1	MATERIAIS	44
3.2	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	44
3.2.1	Caracterização da pasta I.....	45
3.2.1.1	<i>Preparação da matéria-prima I.....</i>	45
3.2.1.2	<i>Preparação das composições I</i>	46
3.2.2	Caracterização da pasta II	48
3.2.2.1	<i>Preparação da matéria-prima II.....</i>	48
3.2.2.2	<i>Preparação das composições II.....</i>	49
3.2.3	Distribuição granulométrica	49
3.2.4	Processo de perda ao fogo	50
3.2.5	Modelagem e manufatura aditiva	51
3.2.6	Ensaio de reologia	53
3.2.6.1	<i>Composição reológica I.....</i>	55
3.2.6.2	<i>Composição reológica II</i>	55

3.2.7	Retração	55
3.2.8	Dilatação térmica	56
3.2.9	Picnometria	56
3.2.10	Prensagem	57
3.2.11	Medidas de densidade (Princípio de Arquimedes)	57
3.2.12	Porosidade.....	58
3.2.13	Análise microestrutural.....	59
3.2.14	Ensaio de compressão.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	RESULTADOS DA PASTA I.....	60
4.1.1	Análise granulométrica	60
4.1.2	Perda ao fogo da ADF	61
4.1.3	Aspecto reológico I.....	61
4.1.4	Resultado das impressões I.....	62
4.1.5	Vida útil da seringa.....	67
4.2	RESULTADOS DA PASTA II.....	69
4.2.1	Moagem da matéria-prima	69
4.2.2	Análise granulométrica	70
4.2.3	Dilatação térmica.....	71
4.2.4	Análise Química.....	72
4.2.5	Composição da pasta para o filtro de fundição	73
4.2.6	Aspecto reológico II	74
4.2.7	Resultado das impressões II	75
4.2.8	Temperatura de sinterização.....	76
4.2.9	Sinterização e Revestimento.....	78
4.2.10	Porosidade.....	80
4.2.11	Protótipo de filtro	83
4.2.12	Resultados de resistência à compressão	85
5	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, houve um crescimento significativo na otimização das tecnologias do mercado, de maneira a aumentar a competitividade entre as organizações. No século atual, este fator faz parte de um dos pontos chave para manter uma empresa ativa diante de seus concorrentes. Por isso, o investimento interno que visa uma lucratividade a longo período é baseado no desenvolvimento de processos, produtos e dos colaboradores. Para Rosenfeld *et al.* (2006), o desenvolvimento de produto tem se tornado cada vez mais um divisor de águas para sobrevivência das empresas, visto que houve um aumento na internacionalização de mercado, crescente variabilidade de produtos e uma diminuição do seu tempo de vida útil.

Dentre os processos produtivos, tendo-se alguns existentes há séculos, houve tanto um aperfeiçoamento quanto o surgimento de novas técnicas. Neste ínterim, exemplifica-se o caso da manufatura aditiva, vindo à tona apenas na década de 80 por meio do processo de estereolitografia, segundo Charles W. Hull (ALCALDE; WILTGEN, 2018). Para os autores, era possível transmitir os códigos computacionais que geravam o desenho tridimensional para o estado físico da matéria, construindo um protótipo real.

O crescimento tecnológico influenciou diretamente as tecnológicas de prototipagem rápida, havendo o desenvolvimento do processo de manufatura aditiva. As organizações transformaram a criação de um protótipo, considerado como uma etapa anterior ao seu lançamento e que serviria como modelo avaliativo, para um produto final. Atualmente, de acordo com as técnicas de impressão 3D (tridimensional), é possível realizar a produção de diferentes classes de materiais para distintas aplicações. Pode-se exemplificar a aplicabilidade em dispositivos médicos, peças para aplicações aeronáuticas, partes de motores automotivos, peças especiais para indústrias, entre outros (GUO; LEU, 2013).

A manufatura aditiva se tornou vantajosa, tanto para aplicá-la como um processo substituível, como complementar. Em algumas circunstâncias, ainda não apresenta capacidade técnica para substituir um processo convencional, uma vez que depende do material que será fabricado. Desta forma, a manufatura aditiva atua como uma técnica adicional dentro de outro processo, viabilizando a fabricação de componentes que atuarão industrialmente. Para alguns casos, ocorre que ainda há uma dependência das técnicas convencionais, mesmo apresentando diversos pontos desvantajosos para a manufatura, como por exemplo: descartes inapropriados de rebarbas, passivos ambientais, emissão de dióxido de carbono na atmosfera, etc.

A fundição, processo convencional utilizado há séculos, é uma das únicas técnicas capazes de produzir peças de grandes dimensões e com geometrias complexas, sendo um ponto positivo em relação aos outros processos. Porém, ainda há uma problemática dentro deste segmento da indústria: o descarte das areias de fundição. Utilizadas na etapa de moldagem, as areias servem para suportar e dar forma ao metal líquido vazado. Considerado como o processo mais utilizado do mundo, a fundição por areia é responsável por um significativo impacto ambiental, uma vez que a matéria-prima nem sempre é reaproveitada. Esse fato faz com que grandes quantidades de areia sejam descartadas em aterros sanitários, podendo gerar possíveis passivos ambientais. No Brasil, aproximadamente 3 milhões de toneladas de areia são descartadas anualmente (ABIFA, 2009).

Existem diversas pesquisas científicas voltadas ao reaproveitamento da areia de fundição, como o caso de aplicações para a confecção de blocos de concreto estrutural (MARTINI, 2017) e na formulação de misturas de concreto asfáltico (SIROMA, 2016), porém é considerado um desafio a ser solucionado, já que muitas vezes são utilizadas resinas fenólicas em sua composição para atuar como moldantes. Essa matéria-prima, quando descartada, apresenta propriedades inferiores comparadas as areias em processo, uma vez que atingiram o número máximo de ciclos de trabalho. Esse fator torna seu reuso mais difícil, tanto para o mesmo processo quanto para outras aplicações.

Considerando a problemática, este trabalho de conclusão de curso visa adequar a reutilização da areia de fundição descartada com o processo de manufatura aditiva, de modo a realizar a fabricação de filtros de fundição, com o intuito de gerar uma economia sustentável e circular. Atualmente, os filtros utilizados nas indústrias de fundição são fabricados, em geral, de materiais cerâmicos com base em alumina, zircônia ou de carbetos de silício. Neste trabalho, os filtros de fundição foram produzidos utilizando como matéria-prima principal, areia de fundição descartada, e aditivos, tais como água e bentonita. Além disso, testes reológicos e mecânicos foram realizados, para duas amostras processadas de maneira distinta: a primeira sinterizada em forno mufla e a segunda utilizando silicato de sódio (à verde). As amostras preparadas foram impressas para obtenção de filtros de fundição (verde), e então queimadas (para consolidação dos filtros) ou endurecidas com silicatos de sódio.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar os comportamentos reológico, físico, químico e mecânico de areias descartadas de fundição para a produção de filtros de fundição via *robocasting*, analisando comparativamente amostras sinterizadas e revestidas (endurecidas) por meio de metassilicato de sódio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as diferentes distribuições granulométricas da areia descartada de fundição, de forma a averiguar sua eficiência e adequação para impressão via *robocasting*;
- Realizar testes reológicos, por meio do reômetro, visando a obtenção de pastas com o comportamento adequado a manufatura aditiva;
- Submeter as amostras à verde aos processamentos de sinterização e revestimento, comparando-as por meio dos resultados de porosidade e compressão;
- Analisar e avaliar comparativamente os resultados dos ensaios mecânicos e de caracterização obtidos com a literatura, para filtros de espumas cerâmicas.

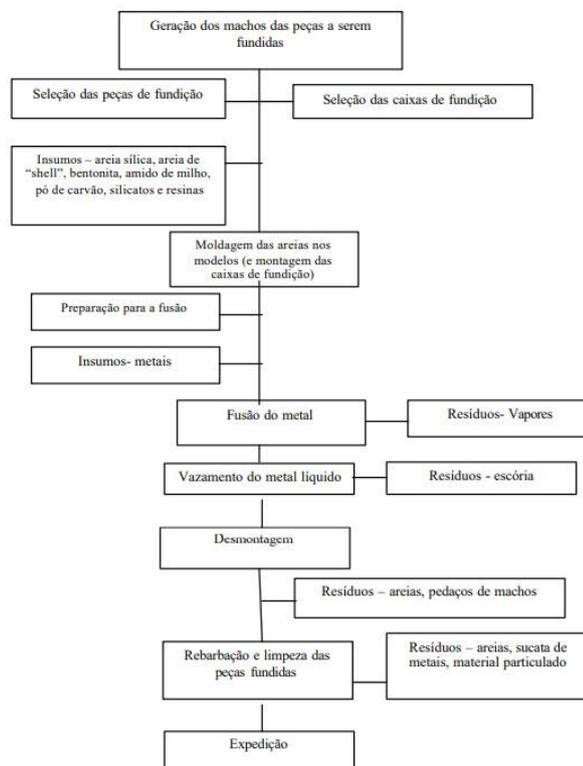
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição (Figura 1) consiste em submeter um metal líquido fundido vertido em um molde específico, no qual sua cavidade gerará a forma da peça desejada, com o intuito de se obter o formato e dimensão desejados após o período de solidificação. A geometria e a propriedade da peça variarão de acordo com as condições expostas ao material fundido, assim como o tipo de processo em que será trabalhado.

Segundo Kondic (1973), o processo de fundição existe há mais de 4.000 anos, tendo-se como objetivo a obtenção dos mais diversos tipos de materiais. Neste ínterim, foram adotadas as etapas de controle e monitoramento dos parâmetros de submissão do processo, assim como a de tratamento ao produto acabado, tendo em vista o retorno de capital financeiro e o cliente, como o fator de maior interesse.

Figura 1: Fluxograma do processo de fundição.



Fonte: FAGUNDES *et al.* (2009).

Com o passar dos anos, o aumento na exigência da qualidade do produto final esteve entrelaçado a outro fator importante na indústria de fundição: sustentabilidade. Este segmento,

assim como outros setores, realizaram uma readequação de seus processos, visando o alinhamento às problemáticas ambientais mediante as normativas *International Organization for Standardization* (ISO).

As políticas verdes, nas quais surgiram ao longo dos anos, tem como intuito fiscalizar e propor cuidados ambientais tanto durante quanto o pós-processo. Por isso, ainda há uma questão recorrente neste setor, o qual ainda não houve uma solução sustentável, que é a areia descartada de fundição (ADF). A problemática das areias descartadas de fundição está diretamente relacionada aos aterros sanitários, locais de descarte. Estes resíduos sólidos, quando não monitorados, podem gerar riscos de contaminação do solo, de maneira a comprometer a fauna e flora vizinha.

Na fundição de peças metálicas, existem diversos tipos de técnicas de fabricação por moldagem: cera perdida, injeção, molde permanente e molde em areia. Este último, segundo Mariotto (2000) *apud* Oliveira (2007), é utilizado em cerca de 80% das indústrias ao redor do mundo, apresentando vantagens significativas em relação aos outros processos. Em contrapartida, a questão do descarte da areia como resíduo continua como pauta da problemática ambiental.

De maneira geral, a fundição é um processo econômico e lucrativo, o qual permite a produção de peças pequenas e grandes e com geometrias complexas em relação aos outros processos existentes no mercado. Para Kondic (1973), as duas características mais valiosas dentro da fundição são a natureza economicamente competitiva do mercado, assim como a simplicidade técnica para produção de formas complexas.

A evolução deste método diante do avanço tecnológico permitiu a otimização dos processos, podendo frisar o fator econômico aliado ao produto final de qualidade. Estes quesitos fizeram com que, mesmo a fundição sendo uma técnica utilizada há milênios, ainda há apresenta um destaque em relação a outros processos convencionais.

2.1.1 Indústrias de Fundição

Conforme a Associação Brasileira de Fundição (2022), houve um crescimento de 20,3% na produção nacional dos fundidos com relação ao balanço dos anos avaliados, havendo uma produção de 2,7 milhões de toneladas. Pode-se dar ênfase na produção de ferro, como na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Produção nacional no setor de fundição.

Metais	2021 (t)	2020 (t)	2021/2020 (%)
Ferro	2.036.521	1.622.153	25,5
Aço	267.065	256.933	3,9
Não ferrosos	402.768	371.088	8,5
Cobre	33.068	21.828	51,5
Zinco	1.176	1.176	-
Alumínio	168.484	166.045	1,5
Magnésio	5.040	5.039	-
Chumbo	195.000	177.000	10,0
Total	2.706.354	2.250.174	20,3

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Fundição (2022).

Para Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), cerca de 44% da produção no ramo da fundição está voltada ao setor automotivo, o qual exige a fabricação de componentes de forma complexa. Este aumento significativo da produção está interligado a oportunidades de contratações, intensificando o mercado nacional. Dentre os anos analisados, houve um crescimento de 12,1% em geração de empregos, contando com aproximadamente 63.000 colaboradores no ramo industrial.

2.1.2 Tipos de Fundição

Existem diversos tipos de processos de fundição (Tabela 2) para obtenção do produto final acabado, onde variarão de acordo com algumas especificidades, sejam elas: complexidade da peça, quantidade de peças produzidas por hora, custo de produção por peça, tipo de liga fundida que pode ser utilizada, entre outros. Estes fatores podem influenciar na aplicabilidade do produto final, seja para o segmento automotivo, siderúrgico, ferroviário, e assim por diante.

Tabela 2: Tipos de processos de fundição.

Tipo de Força	Tipo de Molde
Por gravidade	Areia verde (molde descartável)
	Em casca (<i>shell molding</i>)
	Molde permanente (molde metálico, bipartido)
	Cera perdida (molde e modelo descartáveis)
Por Pressão	Injeção (molde metálico)

Fonte: Adaptado de Moro e Paegle (2007).

Conforme Moro e Paegle (2007), pode-se diferenciar os processos de fundição por meio do tipo de molde e de força aplicada durante o processo (Tabela 3). Para os autores, a escolha do tipo de molde influenciará na qualidade final da peça, pois a taxa de dissipação de

calor irá variar de acordo com a matéria-prima utilizada no molde, de modo a alterar o tamanho final das partículas e a resistência mecânica da peça. Esta taxa estará diretamente relacionada a fatores fundamentais para fundição, como a temperatura e taxa de resfriamento, composição da liga fundida, etc.

Tabela 3: Comparativo entre os processos de fundição.

Fator	Fundição em areia	Fundição em molde permanente	Fundição sob pressão	Fundição por centrifugação
Metal processado	Todos	Ferros fundidos e não-ferrosos	Não-ferrosos de baixo ponto de fusão	Todos
Dimensões comerciais mín.-máx.	As maiores	0,5 a cerca de 150 kg	Diminutas a 35 kg em Al, a 150 kg em Zn	Acima de 25 t
Espessura mín., mm	3,2 - 4,7	3,2	0,8 – 1,6	1,6
Resistência à tração*kgf/mm ²	13	16	19,5	17,5
Quantidade de peças produzidas por hora**	10 – 15	40 – 60	120 – 150	30 – 50
Custo do molde ou modelo***	100	660	1650	500

* Para uma liga de alumínio, por exemplo;
 **Produção estimada para uma peça fundida de alumínio de cerca de 1,5 kg e moderada complexidade;
 ***Tomando como base 100 para fundição em areia.

Fonte: Adaptado de Silveira (2018).

Analisando a Tabela 3, nota-se a tendência da utilização da fundição em areia por questões econômicas, apresentando o menor custo entre os processos. Além disso, fatores como dimensões de parâmetros significativos e aplicabilidade em qualquer tipo de processado, justificam o fato de ser o mais utilizado nas indústrias. Caso seja necessário um produto que apresente maiores resistências à tração, pode-se optar por processos que utilizam pressão, como o caso de injeção. Em contrapartida, o custo do molde será de aproximadamente 16 vezes maior comparado à areia, além da limitante do metal a ser processado. Por isso, deve-se atentar às necessidades das partes interessadas, assim como o fator produtividade, visando a economia energética para o processamento.

2.1.2.1 Fundição em areia verde

Como abordado anteriormente, a fundição em areia verde é a técnica mais utilizada no mundo, por ser de baixo custo e de fácil produção. Além disso, a areia é uma matéria-prima em abundância e de fácil acesso, estando disposta a comercialização em diversos países. A simplicidade do processo faz com que este tipo de fundição seja altamente generalizado, tendo em vista a obtenção de peças de maneira econômica.

O termo “verde” significa que houve a adição de umidade na areia (ligante) sem emprego de calor para a consolidação do molde. Além disso, pode-se considerar o emprego de aditivos, como o uso de argila. A utilização de argila confere maior plasticidade a areia (melhorando a conformabilidade) e maior resistência a verde do molde resultante (SILVA, 2007). O controle das concentrações de outras matérias-primas presentes na areia influenciará, em particular, a permeabilidade do molde no momento do vazamento do metal líquido.

Segundo *Foundry Sand Beneficial Reuse Manual – Special Report* (1996) apud CHEGATTI (2004), os componentes e propriedades da areia de fundição podem tipicamente variar conforme a Tabela 4.

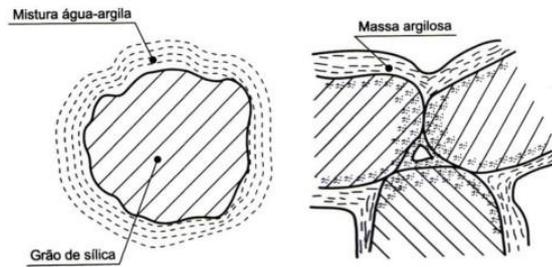
Tabela 4: Composição e propriedades típicas da areia verde para moldes de fundição.

Componente / Propriedade	Limites
Areia	70-80%
Água	2-4%
Argila	5-15%
Aditivos	2-5%
Umidade	0-4%
Perda ao fogo	0,2-8%
pH	3-12
Permeabilidade da Argila AFS	40-150
% Finos (passado pela peneira 200 Mesh)	1-2%
Densidade aparente	1,0-1,6 g/cm ³

Fonte: Adaptado de *Foundry Sand Beneficial Reuse Manual – Special Report* (1996), apud CHEGATTI (2004).

Para o processo de fundição que utiliza areia verde como molde, a fabricação de peças metálicas de maior peso influencia negativamente a possibilidade de defeitos, como por exemplo, a erosão. Este último pode ser causado por conta do desprendimento da areia do molde ou macho ao entrar em contato com a liga metálica fundida. Para isso, há necessidade da utilização de aditivos para suprir a rigidez da areia, onde os teores poderão variar de 2 a 5%. Nestes casos, para melhorar o acabamento superficial da peça, assim como evitar possíveis propagações de defeitos, utilizam-se resinas termofixas sintéticas provenientes da reação do fenol e formol (SILVA, 2007). Em contrapartida, ocorrerá a contaminação da areia com a resina ao realizar a desmoldagem, aumentando a dificuldade de seu reaproveitamento. Por apresentar satisfatórias propriedades reológicas, utilizam-se bentonitas (5 a 15%) como plastificantes, assim como 2 a 4% de água para gerar umidade e consequentemente ligar a areia à argila (Figura 2).

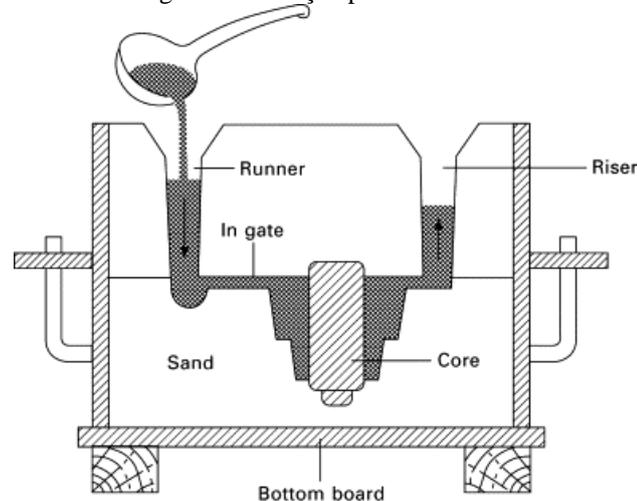
Figura 2: Formação da massa argilosa.



Fonte: Baldam (2013).

O processo consiste no vazamento da liga metálica fundida em um molde de areia (Figura 3), visando o preenchimento da totalidade de suas cavidades. Para realizar a etapa de compactação, utiliza-se uma caixa metálica na qual se insere o modelo da peça (em madeira, plástico ou alumínio), que serve como padrão para formar um negativo, assim como a areia, com intuito de preencher a caixa de moldagem para a formação do molde. Após a compactação da areia, extrai-se o modelo e então procede-se ao vazamento no molde da liga metálica por meio de painelas contendo metal líquido.

Figura 3: Fundição por areia verde.



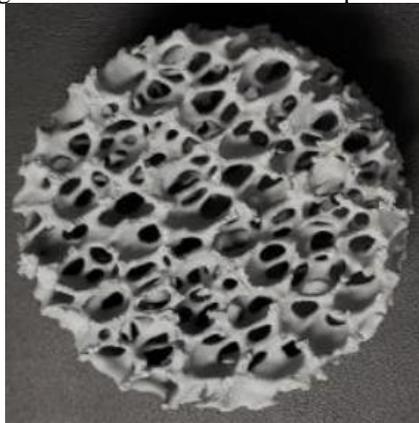
Fonte: Mouritz (2012).

Quando houver a necessidade da fabricação de uma peça ou componente que apresente uma geometria complexa, utilizam-se machos para produção de partes vazadas (sem material metálico). Porém, a composição das matérias-primas que compõe o molde apresenta alguns problemas de impacto ambiental, os quais serão abordados nas seções a seguir.

2.1.3 Filtros de Fundição

Na etapa de vazamento da liga metálica fundida, diversas empresas adotam o uso do filtro de fundição. Conforme a pesquisa realizada pela ABIFA (2019), considerando um filtro de fundição de espuma cerâmica, os resultados apresentaram diversos benefícios para uma melhor obtenção de uma peça metálica, seja na adequação do escoamento do fluido, como na retenção de inclusões não-metálicas. O filtro faz com que ocorra um melhor controle de vazão do fundido no molde, evitando desperdícios expelidos pelo rechupe, e assim melhorando o aspecto de preenchimento das cavidades do molde para a solidificação do produto final.

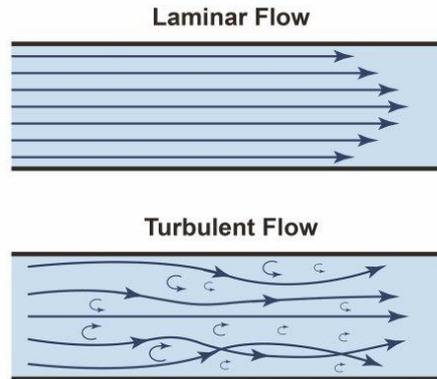
Figura 4: Fotografia mostrando uma cerâmica para filtro de fundição.



Fonte: Annual Fall Technical Conference (2019).

Além do filtro de espuma cerâmica, utilizada no canal de alimentação e distribuição, há filtros com geometrias porosas distintas, os quais influenciam nos parâmetros de escoabilidade do metal fundido (Figura 4). Pode-se citar a primeira geração de filtros, de geometria porosa circular, fabricados por meio de extrusão (ANNUAL FALL TECHNICAL CONFERENCE, 2019). Além disso, é de suma importância definir o percentual de porosidade do filtro, definidos pela variável *pores per inch (ppi)*. A padronização desta unidade variará de acordo a dimensão final da peça, considerando a escala adequada para sua averiguação.

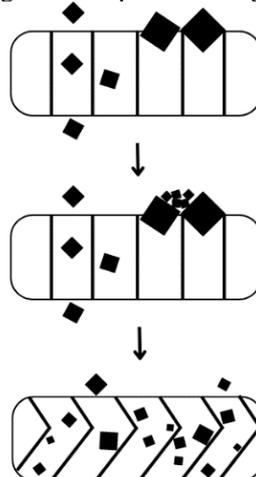
Figura 5: Escoamento laminar e turbulento.



Fonte: Cychoosz (2018).

Nota-se a diferença de fluidez do escoamento laminar ao turbulento (Figura 5), sendo considerada comum a falta de emprego de filtros de fundição para o controle do fluido. Isso faz com ocorra o fenômeno de gradientes de solidificação ao longo do canal de alimentação e de distribuição, apresentando uma heterogeneidade no tempo de secagem da peça metálica. Para este caso, deve-se readequar os parâmetros do processo para reduzir a turbulência da liga fundida entre as paredes do molde. É válido ressaltar que, ao aplicar um filtro de fundição aos canais de passagem da liga metálica fundida, diminui-se a velocidade com que esse fluido esco, fazendo com que ocorra a transição de um comportamento turbulento para laminar.

Figura 6: Etapas de Filtragem.



Fonte: Autor, 2022.

Esquemáticamente, a funcionalidade de um filtro de fundição opera seguindo três etapas (Figura 6). Para *Annual Fall Technical Conference* (2019), partículas de maiores dimensões ocupam as entradas dos filtros, de acordo com o escoamento, dificultando a

passagem de partículas de menores dimensões. Com o passar do período de vazamento, estas partículas maiores atraem as menores para as suas proximidades, fazendo com que ocorra um acúmulo de partículas na região de entrada do filtro. Então, as partículas que apresentam dimensões menores que a do filtro passam para as próximas camadas, porém muitas delas ficam dispostas em suas paredes, evitando a totalidade de sua passagem para o molde. Este fator é fundamental para se obter uma solidificação mais homogênea da liga (ANNUAL FALL TECHNICAL CONFERENCE, 2019). Um controle de processo adequado faz com seja possível garantir uma peça metálica de maior qualidade.

2.1.4 Areias Descartadas de Fundição

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004-2004 – Classificação de Resíduos Sólidos, as areias descartadas de fundição são classificadas como Classe II A – Resíduo Sólido não Perigoso e não Inerte. Mesmo que a classificação da norma não apresente risco, a utilização da areia nas indústrias ocorre em abundância, uma vez que o índice de consumo é cerca de 800 a 1.000 kg de areia para 1.000 kg de peça produzida. Para Dantas (2003), apesar do consumo de sucatas metálicas como matéria-prima, o setor de fundição gera uma elevada quantidade de areias descartadas de fundição como resíduo, visto que o processo em molde de areia é majoritariamente utilizado entre as indústrias.

O volume de resíduos sólidos é diretamente proporcional ao crescimento econômico do setor. Isto fez com que nos últimos anos, houvesse um crescimento na porcentagem destes resíduos. Por consequência, os impactos negativos poderão ser alastrantes, pois para ABIFA (2008a, p.67), ocorrerá uma tendência, ao longo dos anos, a criação de mais aterros sanitários.

Após realizar uma pesquisa e monitoramento de um aterro sanitário no qual não apresentava controle das entradas das areias, foi realizada uma análise do solo com 30 anos de deposição de descarte, onde foi encontrada uma concentração acentuada de Vanádio, Fósforo, Alumina, entre outros elementos, os quais colaboraram para os fenômenos de intemperismo e lixiviação (MONTEIRO, 2013). Segundo o autor, o contínuo reuso da areia de fundição no processo fez com que ocorresse o acúmulo da concentração de inclusões não metálicas, metais e ligantes degradados.

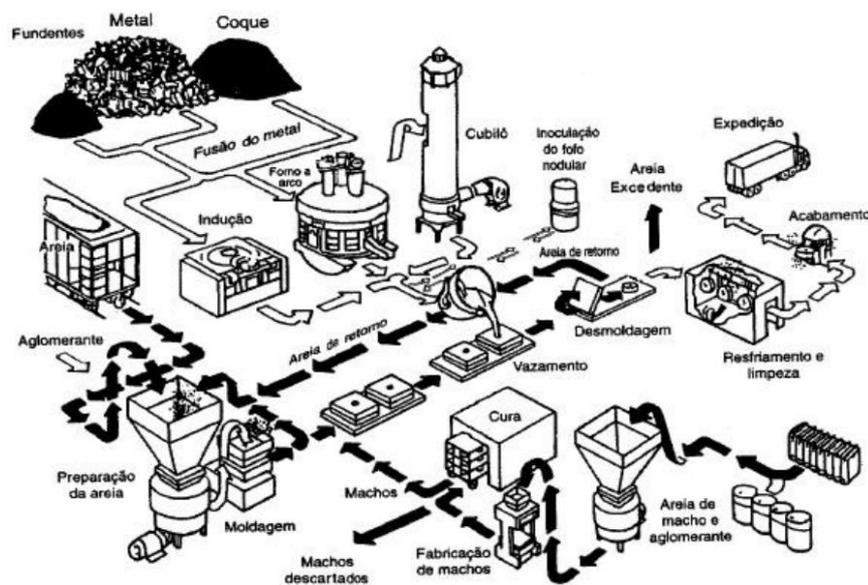
Mesmo classificada como Classe IIA – Não Perigoso, existem controvérsias a respeito do possível impacto ambiental que a ADF pode causar. Para Oliveira (2007), há duas formas possíveis de contaminação que podem classificar a areia descartada de fundição como Classe I – Perigoso. Provenho metais pesados que tiveram origem na etapa de vazamento, e

resinas orgânicas. Este último é utilizado no macho para conferir rigidez a areia de fundição e assim na etapa de desmoldagem. Porém, como apresentam resinas tóxicas e inflamáveis na composição, poderão influenciar negativamente no descarte da matéria-prima.

2.1.5 Reutilização das Areias de Fundição

Dentre a totalidade dos processos utilizados para fundição, cerca de 80% ocorre através da areia, à verde ou resinada, utilizada na etapa de moldagem e macharia (ABIFA, 2008). Diante deste fator, relacionado ao custo elevado do transporte dos resíduos sólidos aos aterros, algumas fundições reutilizam da areia para outros fatores internos aliados ao processo.

Figura 7: Processo de reaproveitamento da areia.



Fonte: Oliveira (2007).

A Figura 7 mostra, esquematicamente, o processo de reaproveitamento da areia de fundição após a etapa de desmoldagem, nas quais se formam os torrões. Aproximadamente 90% da areia de fundição poderá retornar ao ciclo de uso na moldagem. O percentual restante entrará na classificação das ADFs, com as propriedades de moldagem já comprometidas para o processo (CASSOTI et al, 2011). No caso de areias propostas a etapa de macharia, utilizam-se areias novas tanto por conta da presença de resinas orgânicas/inorgânicas, como pelo comprometimento de suas propriedades mecânicas. Com a possibilidade de reaproveitamento, existem três etapas (Tabela 5) possíveis de reinserção em processo produtivo.

Tabela 5: Etapas de reaproveitamento da areia.

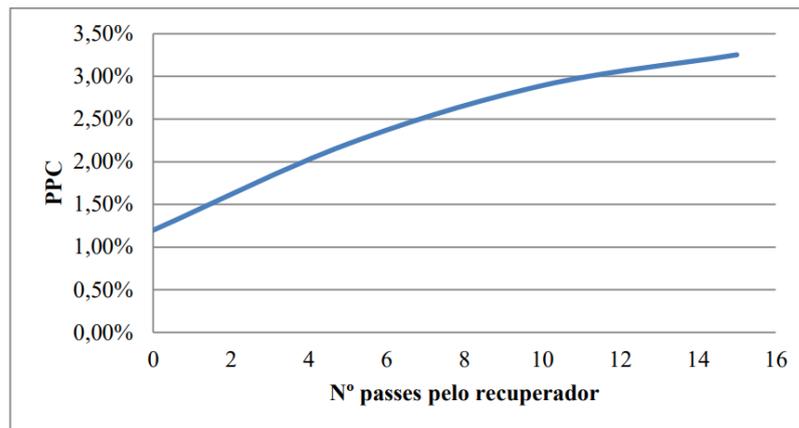
Tipo de reciclagem	Interna		Externa
Tipo de processo	Recuperação	Regeneração	Reutilização
Definição	Atuação de esforços mecânicos para diminuição dos tamanhos de partícula, assim como a remoção das impurezas não-metálicas por meio de um sistema de exaustão	Calcinação da areia por meio de fornos rotativos para remoção dos compostos orgânicos presentes	Utilização da areia mediante sua forma original, classificando-a como ADF.

Fonte: Adaptado de Souza (2011).

Dentre os processos internos (Tabela 5), o sistema de recuperação da areia se destaca devido ao seu baixo custo (SOUZA, 2011). Além disso, os esforços mecânicos contribuem para o aumento do coeficiente de atrito cinético entre as partículas, retirando parte da resina englobada a areia para moldagem das partículas. Conforme o autor, este método pode ser definido como perda por calcinação (PPC), no qual poderá retirar até 70% de resina sintética das partículas, e garantir, em média, 63% de eficiência global do processo.

Para o autor, a PPC é diretamente proporcional ao número de passes realizados pelo recuperador (Figura 8). Como não existem sistemas operantes com 100% de eficiência, aplica-se, em média, 8% de areia nova no processo. Porém, para casos onde se exige menores quantidades de resina na areia de reuso, parte-se para o processo de regeneração.

Figura 8: PPC por número de passes.



Fonte: Souza (2011).

O processo de regeneração ocorrerá através da queima da resina envolta a partícula. O aumento da temperatura contribuirá para reutilização de uma partícula mais uniforme e sem

a presença de inclusões não metálicas, garantindo uma eficácia de aproximadamente 29% de reaproveitamento (SOUZA, 2011). Totalitariamente, somando os processos de recuperação e regeneração, pode-se reaproveitar em torno de 92% da areia descartada de fundição.

No caso das areias descartadas de fundição por reciclagem externa, há um campo no qual pode-se empregar seu uso, como: construção civil, utilizando-a em concreto de cimento Portland (ANDRADE, 2018); artefatos cimentícios, de forma aproveitá-la nos blocos de alvenaria (MASTELLA, 2013). Nota-se que há possíveis aplicabilidades da ADF em diversos segmentos, porém a recorrência a atuação das indústrias em descartá-las em aterros por conta de comodismo ocorre em grande escala (ABIFA, entre 2014 e 2022).

2.2 MANUFATURA ADITIVA

Conforme *American Society for Testing and Materials* e *Internacional Organization for Standardization* (2015), a manufatura aditiva (MA) é definida como uma técnica de fabricação otimizada, no qual visa a produção de modelos tridimensionais. Este processo permite, em umas técnicas, que sejam fabricadas geometrias complexas, além da possibilidade de redução nos desperdícios gerados, nos quais serão obtidos por meio de um maior grau de liberdade para realização do desenho (ARAUJO, 2021). A complexidade geométrica e as dimensões do modelo influenciarão no tempo de fabricação, o qual poderá ser uma vantagem/desvantagem.



Fonte: Mousta Impressoras 3D (2021) *apud* Accorsini (2022).

Para Accorsini (2022), a manufatura aditiva (Figura 9) ocorre a partir da deposição de camadas de material por meio da predefinição de um modelo computadorizado. A partir de sua formação, o software definirá os limites do campo tridimensional para realizar os fatiamentos, e assim iniciar a fabricação do projeto (Figura 10).

Figura 10: Passos para fabricação 3D.



Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015).

De maneira geral, pode-se definir os passos para manufatura aditiva com base em oito etapas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015):

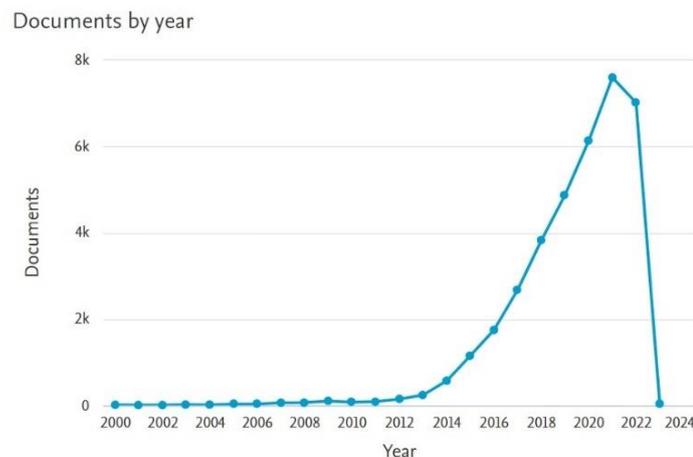
1. Modelagem *Computer Aided-Design* (CAD): A partir de um *software* de construção gráfica, esboça-se o projeto para formalizar um modelo tridimensional, de modo a representar o esboço que será fabricado;
2. Conversão para *Standard Tessellation Language* (STL): Definido como um tipo de arquivo comum para impressão 3D, o modelo CAD será transformado neste formato para realizar os cálculos necessários para o fatiamento;
3. Transferência para a máquina: Nesta etapa, o arquivo STL receberá os ajustes necessários de parametrização, como orientação, posição e tamanho, idealizando o modelo para transferi-lo a máquina de manufatura aditiva;
4. Configuração da máquina: A máquina de MA será configurada previamente à impressão, de acordo com a fonte de alimentação de material, espessura de camada, tipo de material utilizado, entre outros;
5. Manufatura da peça: Ocorre a impressão do objeto modelado por CAD, camada por camada, em determinado período de tempo. Para esta etapa, é

necessário supervisionar a realização da impressão para garantir que não falte material depositado;

6. Remoção dos componentes: Após a finalização da operação, deve-se retirar os componentes com cuidado, para evitar possíveis defeitos na máquina e na peça;
7. Pós-processamento: O objeto formado é submetido a tratamentos de limpeza, assim como a remoção de sua estrutura de sustentação, quando apoiado. Deve-se agir cautelosamente nesta etapa, exigindo experiência e tempo;
8. Aplicação: Ao depender dos requisitos que a peça necessite, podem ser necessários tratamentos superficiais de acabamento, como o caso de uma pintura, por exemplo. A partir disto, o produto estará pronto para sua devida aplicação.

Ao passar dos anos, esta técnica tem sido cada vez mais utilizada em escala global. Este fator é um contribuinte para a otimização dos processos dentro da impressão 3D, podendo ser realizado dentro do campo de materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos e compósitos. Cada processo segmentado dentro da manufatura aditiva apresenta sua particularidade, variando sua aplicabilidade. Isso condiz com sua viabilização no mercado, podendo ser possível efetuar a fabricação em distintos setores.

Figura 11: Submissão de artigos ao longo dos anos.



Fonte: Scopus (2022).

Por meio da análise de pesquisa realizada com a frase “3D Printing” na base de dados de artigos científicos *Scopus*, é possível notar um crescimento exponencial a partir do ano de 2012, chegando a aproximadamente oito mil artigos publicados no ano de 2021 (Figura 11). O crescimento está diretamente associado ao avanço tecnológico, como o caso da indústria 4.0, recentemente aplicada ao mercado.

De maneira geral, pode-se citar na Tabela 6 algumas vantagens e desvantagens do processo de manufatura aditiva em relação aos processos convencionais utilizados em empresas de distintos setores.

Tabela 6: Vantagens e desvantagens da MA.

Vantagens	Desvantagens
Liberdade geométrica de fabricação	Propriedades anisotrópicas
Baixo desperdício de material	Precisão e acabamento superficial inferiores aos processos convencionais
Não requer dispositivos de fixação (para alguns processos)	Custo elevado às tecnologias industriais
Rapidez na obtenção de peças de pequenos lotes	Possíveis distorções e empenamentos de peças
Fabricação em etapa única	Alto custo para produções em escala
Não necessita troca de ferramental durante a fabricação	Limitação do uso de um material específico para cada processo

Fonte: Volpato (2018).

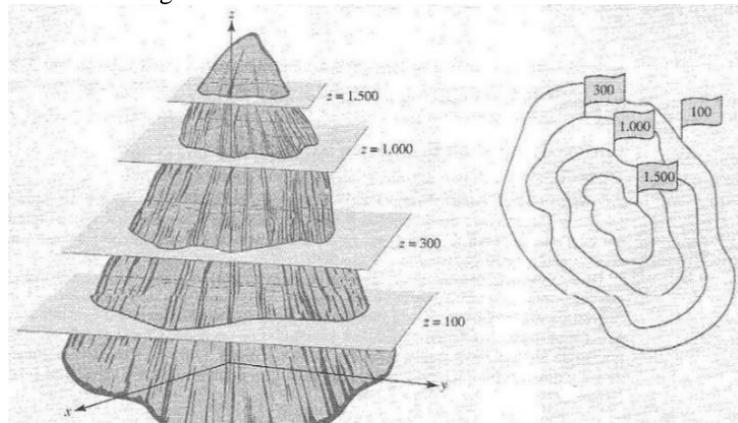
Apesar do crescimento da área nos últimos anos, existe uma resistência a adequação do processo otimizado para substituir o convencional. Isso se dá por meio do alto investimento a longo prazo, além da especialização necessária para modelagem de arquivos CAD. Porém, a facilidade na fabricação de geometrias complexas e o baixo desperdício de material são vantajosos para empresas que visam produção em pequenas quantidades, diante dos fatores velocidade e tempo. Por conta disso, Wohlers e Gornet (2014) expressam que menos de 2% das indústrias mundialmente utilizam essa técnica. Em contrapartida, o McKinsey Global Institute (2013) aponta que até 2025 a manufatura aditiva estará dentre as doze tecnologias que mais impactam globalmente na economia, devido a melhoria da eficiência dos equipamentos e a disposição da produção de distintos materiais por um preço mais baixo.

2.2.1 Deposição de camadas

Como citado anteriormente, o método de *robocasting*, dentre os processos de manufatura aditiva, ocorrerá por meio da deposição de camadas de material, podendo

justificar algumas de suas vantagens, como a fabricação de geometrias complexas, liberdade de produção, etc. Essa deposição ocorrerá por meio de artifício matemático denominado de curvas de nível (Figura 12), camada por camada, em três dimensões. Conforme Guidorizzi (2021), quando existir sobre um plano xy uma curva gerada pela intersecção da superfície $z = f(x,y)$ com o plano horizontal, forma-se uma projeção da função $f(x,y) = c$ então denominada de curva de nível.

Figura 12: Curva de nível de uma montanha.



Fonte: Morettin, Hazzan e Bussab (2012).

As curvas de nível, referenciadas a impressão em três dimensões, são formadas pelas camadas do material submetido, iniciando-se pela base. Através de uma maior complexidade imposta geometricamente na peça para sua fabricação, maior o tempo necessário para ser obtido o produto final, visto que as variações das dimensões (x,y,z) submetidas nos softwares de manufatura aditiva impõem um período mais longo de fabricação. Em contrapartida, o grau de liberdade para qualquer formato define o processo como ponto de singularidade perante aos outros.

2.2.2 Comportamento Reológico

Para muitas das técnicas de manufatura aditiva, o parâmetro reológico é considerado de suma importância, principalmente para os processos que envolvem a extrusão de material. Por definição, a reologia é o estudo do comportamento de fluxo de matéria e deformacional quando há uma sollicitação de tensão, independente do estado físico do material. As características reológicas do composto, seja para qualquer de classe de material, influenciarão

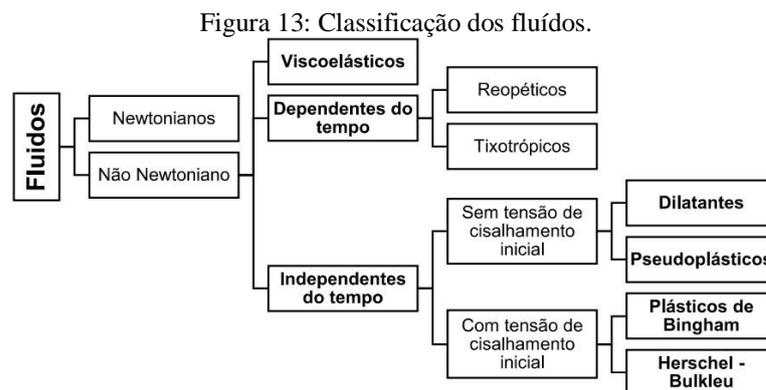
na capacidade de impressão e *printability* (capacidade de deposição camada a camada), estando relacionadas com as condições pós-processamento.

Existem três variáveis fundamentais dentro do escopo reológico dos materiais, nos quais são de suma importância dentro do ramo de manufatura aditiva, e que se relacionam entre si. Segundo a lei de Newton para viscosidade, a tensão de cisalhamento é dada pela força aplicada sobre a unidade de área cisalhante. Já para taxa de cisalhamento, a relação ocorrerá por meio da deformação do material ao longo de um esforço cisalhante. A combinação das duas variáveis resulta na viscosidade, definida (Equação 1) como a capacidade de escoamento quando submetida a esforços (BIRD, 2006).

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dU}{dY} = \eta\gamma \quad (\text{Equação 1})$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento (Pa), F a força aplicada (N), A a área superficial (m^2), η a viscosidade (Pa.s) e γ taxa de cisalhamento (s^{-1}). Nota-se que, quanto maior for a viscosidade, menor será tensão de cisalhamento no material. Da mesma forma, pode-se relacioná-lo a manufatura aditiva, apresentando dificuldades para impressão do material. A partir disso, poderá haver um ajuste tanto na reologia, quanto em outros parâmetros do processo.

De acordo com o comportamento reológico viscoso do fluido, mediante a relação entre a taxa e tensão de cisalhamento, pode-se classificá-lo em dois grupos (Figura 13).

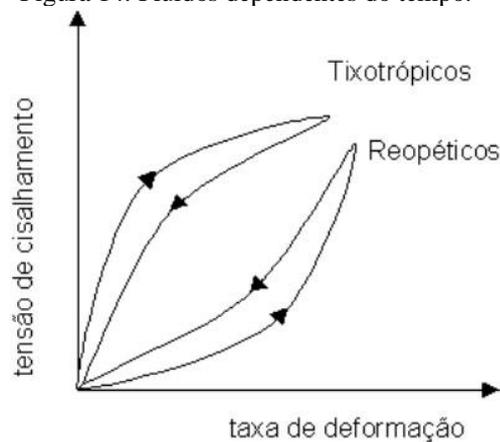


Fonte: Braga (2007), *apud* Martins (2022).

Os fluidos newtonianos obedecem a uma relação de proporcionalidade entre a taxa e tensão aplicada cisalhante, considerando o fluido como ideal. Neste caso, a viscosidade será constante, e medida de acordo com o coeficiente angular da reta (ANDRIANI, 2009). Apenas

poderá ser influenciada por parâmetros, como: temperatura e pressão. Para os classificados como não-newtonianos, não há uma relação linear entre a deformação e taxa de cisalhamento. Ou seja, considera-se a viscosidade como aparente para tal condição de fluxo, podendo ocorrer uma variação quantitativa. Para este caso, existem três distinções presentes na literatura: dependente do tempo, independente do tempo e viscoelásticas. Essa última, conforme Martins (2022), estará elencada com os modelos de Maxwell (princípios elásticos) e Kelvin-Voigt (particularidades viscosas). A dependência do tempo em relação a aplicação de taxas e tensões cisalhantes podem ser segmentadas por fenômenos reopéticos e tixotrópicos (Figura 14).

Figura 14: Flúidos dependentes do tempo.

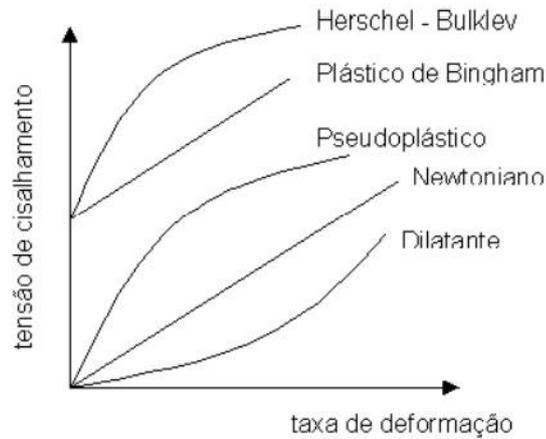


Fonte: Oliveira (2005).

O caráter tixotrópico em um fluido ocorre quando, após o crescimento proporcional da tensão de cisalhamento com relação a taxa de deformação, ocorra a diminuição da viscosidade. E, após cessar a aplicação de tensão, a viscosidade aumente novamente. Segundo Pereira (2001), as suspensões cerâmicas são classificadas como fluidos tixotrópicos pseudoplásticos. Para o caso de fluidos reopéticos, há um aumento na viscosidade quando for submetido a uma tensão cisalhante, e volta ao seu estado inicial quando a força for retirada.

Para os fluidos que são independentes do tempo, atribui-se uma classificação distinta mediante a uma possibilidade de tensão cisalhante inicial (Figura 15).

Figura 15: Fluídos independentes do tempo.



Fonte: Oliveira (2005).

O comportamento newtoniano é graficamente atribuído por meio de uma reta linearizada, onde o coeficiente angular definirá a viscosidade. Esse tipo de fluído é dito como ideal, e a água pode ser citada como exemplo. Outros comportamentos como, pseudoplástico e dilatante, iniciam-se na origem. A pseudoplasticidade é comum em materiais cerâmicos, pois a viscosidade diminui ao decorrer do aumento da taxa de cisalhamento, justificando suas características microestruturais. Para fluídos dilatantes, o comportamento observado é o contrário, tendo-se o aumento da viscosidade (PEREIRA, 2001). Existem fluídos que apresentam uma tensão residual inicial necessária para que haja seu escoamento, como o caso de Bingham e Herchel-Bulkley. No primeiro, há uma similaridade com o comportamento newtoniano devido ao crescimento linear, diferenciando-se apenas por conta da tensão residual. Seguindo a mesma diretriz que Cason, o modelo de Herchel-Burklev apresenta uma tensão aplicada maior que a de cedência, tendo-se uma viscosidade variável (OLIVEIRA, 2018).

2.2.3 Técnicas de Manufatura Aditiva

Na literatura, existem diversas classificações para os processos de manufatura aditiva (Tabela 7), estando de acordo com as normativas estipuladas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) 52900. Segundo Guo e Leu (2013), existem quatro categorias segmentadas pelo estado da matéria-prima utilizada para fabricação, tais como: líquido, filamento, pó e placa sólida. Dentre as citadas, uma breve descrição a respeito do princípio de funcionamento, além das possíveis aplicações.

Tabela 7: Técnicas de manufatura aditiva.

Estado da matéria	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Líquido	<i>Stereolithography (SLA)</i>	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação assistida por laser	Protótipos, moldes
	<i>Multi-jet Modeling (MJM)</i>	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de uma iluminação ultravioleta (UV)	Protótipos, moldes
	<i>Rapid Freezing Prototyping (RFP)</i>	Água	Produção de peças a partir do congelamento das gotículas de água depositadas	Protótipos, moldes
Filamento/Pasta	Modelação por extrusão de plástico (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base	Protótipos, moldes
	<i>Robocasting</i>	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica	Objetos cerâmicos
	<i>Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)</i>	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa	Objetos cerâmicos
Pó	Sinterização seletiva laser (SLS)	Alumide; Carbon Fibre PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Polystyrene	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos; partes aeronáuticas; partes de motores automotivos; peças especiais para indústria; moldes
	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	Stainless steel 316L e 17-4PH; H13 tool steel; Aluminium Al-Si-12 e Al-Si-10; Titanium CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; Cobalt-chrome ASTM75; Inconel 718 e 625	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um laser	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes de motores automotivos; trocadores de calor; moldes; peças especiais para indústria
	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	Cobalt-chrome ASTM F75; Titanium Ti-6Al-4V, Grade 2	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes automotivas
	<i>Laser Metal Deposition (LMD)/Laser Engineered Net Shaping (LENS)/Direct Metal Deposition (DMD)</i>	Aluminium Al-Si-10Mg; Cobalt-chrome MP1 e SP2; Maraging Steel; Inconel 718 e 625; Stainless steel 17-4PH e 15-5PH; Titanium Ti-6Al-4V	Produção de peças através da fusão completa de pó de metal	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes de motores automotivos; trocadores de calor; moldes; peças especiais para indústria
	Impressão Tridimensional (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
Placa sólida	Manufatura de objeto em lâminas (LOM)	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos e moldes

Fonte: Adaptado de Guo e Leu (2013).

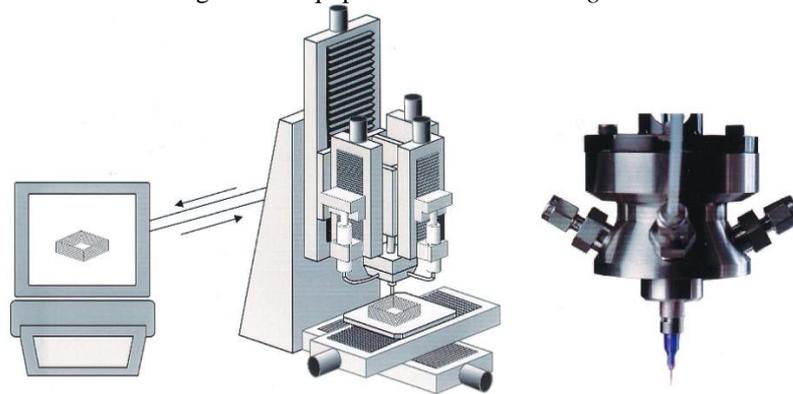
Nota-se (Tabela 7) que, há uma gama de aplicações, para distintos segmentos. Além disso, o princípio do processo se difere um ao outro, justificando sua otimização ao longo dos anos. As inovações tecnológicas do mercado, nos quais visam a entrega do produto com qualidade, rapidez, confiabilidade e custo, estão em crescimento linear juntamente a este ramo, onde a disposição da utilização de distintos materiais para fabricação está cada vez maior. Isso faz com que seja gerada uma perspectiva de mercado a longo prazo nos próximos anos, aquecendo-o perante a outras formas de fabricação.

Para Gibson, Rosen e Stucker (2015), há uma amplitude de tecnologias de manufatura aditiva no mercado, onde as principais distinções ocorrem por meio da forma como acontece a construção de camada por camada, além de como as ligam entre elas. Estes fatores serão determinantes para definir as propriedades mecânicas do produto, assim como a precisão do acabamento. Os parâmetros citados estarão relacionados às classes de materiais para fabricação, onde a maior vertente será no campo dos materiais poliméricos. Dentro do ramo cerâmico, por conta de suas limitações, seu progresso ocorre de maneira mais lenta, seja por conta de seu caráter frágil, como pelo alto ponto de fusão, e a baixa ductilidade (MOURA; FONTA; JORGE, 2021).

Existem outras técnicas de fabricação em três dimensões além das citadas previamente, porém o escopo do trabalho voltou-se para a técnica de *robocasting*, explorada no tópico de metodologia.

2.2.3.1 Robocasting

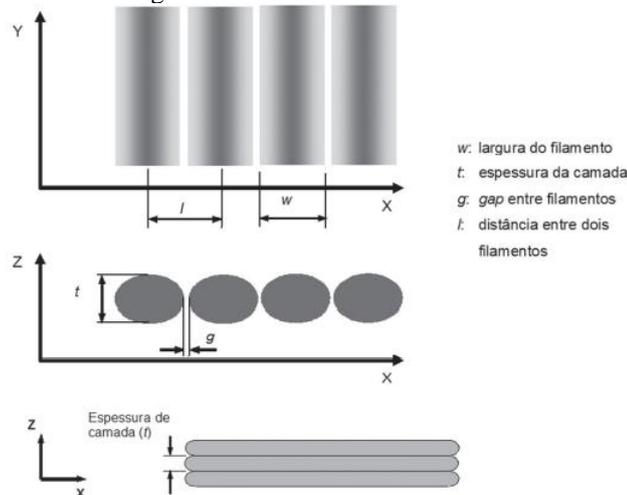
A técnica de *robocasting* (Figura 16), ou também denominada como *Direct Ink Writing* (DIW), é um dos métodos de manufatura aditiva quando se trata da classe de materiais cerâmicos. Utilizando-se uma suspensão à base de água, denominada como pasta ou tinta (*ink*), ocorre a deposição de camada por camada por meio da extrusão de pequenos filamentos em três dimensões. Apesar de conduzir diversos parâmetros de processo para realizar a impressão, o *DIW* é dito como um método rápido e economicamente viável, abrangendo a possibilidade de produzir geometrias complexas e distintos estilos de preenchimento. Assim como em outras técnicas, a manufatura da peça ocorrerá pela conversão de um modelo *CAD* para arquivo *STL*, tendo-se sua transferência para máquina de impressão, no qual realizará a impressão livremente.

Figura 16: Equipamento de *robocasting*.

Fonte: Adaptado de Lewis (2000).

A manufatura iniciará por meio da imposição de pressão, fazendo com que a pasta seja empurrada pelo bico até a base, de modo a ocorrer o fenômeno da extrusão. Após finalizar a deposição da primeira camada, o bico extrusor se move para cima, efetuando a seguinte (FARIA, 2016). Além da pressão (para sistemas de alimentação pneumáticos), a velocidade de impressão deve ser definida previamente, de acordo com a aplicabilidade e as propriedades físicas do material a ser impresso. Altas velocidades de impressão podem alterar o aspecto de homogeneidade da peça. Outro fator que se pode ressaltar é que não há um molde na produção da peça. Por conta disso, a assertividade da reologia da pasta se torna um desafio, uma vez que o corpo impresso terá de suportar o próprio peso. Para Faria (2016), a dimensão desse corpo será definida através do diâmetro do bico extrusor, visto que poderá influenciar na propriedade de resolução das células.

Figura 17: Variáveis dos filamentos.



Fonte: Adaptado de Volpato (2018).

A flexibilidade do diâmetro do bico de extrusão faz com que seja possível a fabricação de peças de distintas dimensões, sendo um fator atrativo quando se trata da versatilidade de produção. Existem diversas variáveis, além da propriedade macroscópica definida anteriormente ao início do processo, como o caso da espessura de camada, largura de filamento (Figura 17), as lacunas entre elas, no qual influenciarão no período total de fabricação (VOLPATO, 2018).

Pode-se notar (Tabela 8) as variáveis das técnicas de manufatura aditiva que utilizam extrusão, como o caso do *robocasting*. Segundo Volpato (2018), as variáveis de técnicas por extrusão podem ser segmentadas em quatro categorias: operação, máquina, material e geometria. Para que seja possível imprimir um protótipo à verde, por meio do *robocasting*, os parâmetros deverão estar adequados o suficiente para a extrusão da pasta cerâmica.

Tabela 8: Variáveis de manufatura aditiva por extrusão.

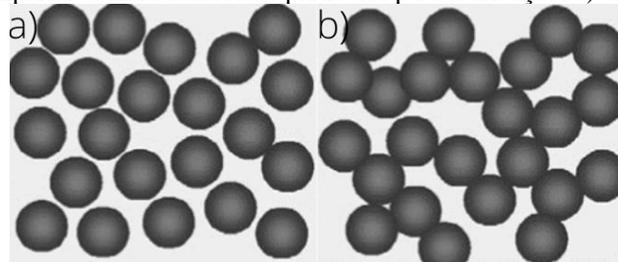
Operação	Máquina	Material	Geometria
Espessura do fatiamento	Diâmetro do bico	Viscosidade	Comprimento do vetor de preenchimento
Largura do filamento depositado	Taxa de alimentação do material (filamento ou granulado)	Rigidez do filamento	Estrutura de suporte
Velocidade do cabeçote	Velocidade dos roletes tracionadores (alimentação com filamento) ou velocidade do parafuso extrusor	Flexibilidade	Tempo entre deposição de camadas
Temperatura de extrusão	Vazão	Condutividade térmica	
Temperatura do envelope	Diâmetro do filamento ou dimensão do granulado	Higroscopia	
Padrão de preenchimento	Convecção no interior do envelope	Características do ligante	
		Características do pó (FDC, FDMet)	

Fonte: Adaptado de Volpato (2018).

As propriedades reológicas, segmentadas como parâmetros do material, influenciarão diretamente na qualidade final do corpo impresso, uma vez que fatores como viscosidade e fluidez deverão estar adequados para o processo. Na Figura 18, é notável a diferença entre a utilização de tintas fluídas (Figura 18a), comparadas com as tintas pastosas (Figura 18b). O comportamento da pasta influenciará diretamente em sua viscosidade, visto que de acordo seu aumento, pode ser um indicativo para a presença de aditivos plastificantes e ligantes. A partir das forças intermoleculares de *Van der Waals*, as moléculas atraem umas às outras (LEWIS, 2002). Para a autora, caso seja submetida a adição de um lubrificante (água) em um plastificante, como a argila bentonítica, pode-se ocorrer o aumento significativo de sua área

superficial. Por isso, essa matéria-prima é diversamente utilizada em estudos científicos. Já em comportamentos de caráter com tendência à fluidez, torna-se indesejável para a técnica descrita, uma vez que o composto não irá suportar a fabricação camada a camada.

Figura 18: Esquema comparativo entre estados de partículas para fabricação: a) aleatórios; b) aglomerados.



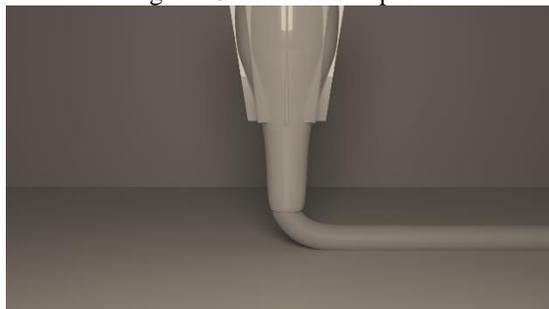
Fonte: Lewis (2002).

A aglomeração das partículas faz com que seja possível a extrusão da pasta cerâmica, possibilitando uma maior garantia da característica de *buildability* (capacidade de construção camada a camada). Por isso, a composição e a característica reológica da pasta deverão estar adequadas para realizar a impressão do protótipo. Conforme Lewis (2002), toma-se como base a Equação 2, que relaciona a deposição das camadas por meio da variação de pressão (ΔP), raio do bocal (r) e o comprimento do filamento (l), gerando uma tensão cisalhante radial (τ_r).

$$\tau_r = \frac{r \cdot \Delta P}{2l} \quad (\text{Equação 2})$$

Considerando que os pontos de maior acúmulo de concentração de tensões estão localizados próximos ao bico extrusor (Figura 19), o controle de parâmetros deverá ocorrer rigorosamente, de maneira a garantir uma pasta reologicamente consistente e adequada para realizar a fabricação.

Figura 19: Extrusão da pasta.

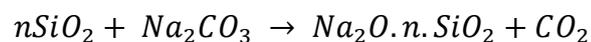


Fonte: Autor, 2022.

A partir do ajuste dos parâmetros de processo, o *robocasting* se destaca como uma das técnicas que apresenta alta precisão dimensional, além da possibilidade de fabricação de geometrias complexas e porosas (ARABI, 2019). Esses fatores contribuem para a flexibilidade de manufatura, dispondo de uma gama de possibilidades a serem fabricadas por essa técnica. Dentre as aplicações, pode-se destacar a produção de *scaffolds*, para o segmento médico (MARZI, 2017). A viabilidade de fabricação de materiais cerâmicos por impressão 3D gerou uma grande contribuição a comunidade científica, notando-se um crescimento da utilização da técnica em relação aos processos convencionais. Porém, para essa classe de materiais, em algumas aplicações, ainda é necessário tratamentos pós-manufatura. O corpo manufaturado estará apenas com suas características à verde, sendo necessária a realização de etapas de sinterização para estabilizá-lo.

2.3 SILICATO DE SÓDIO

Comercialmente denominado como “vidro líquido”, o silicato de sódio apresenta, em sua composição, uma variação de moles entre os óxidos SiO_2 (dióxido de silício) e Na_2O (óxido de sódio). Essa alternância entre as composições se dá de acordo com as características necessárias para o produto final, para que suas propriedades sejam adequadas de acordo com determinado usufruto. Genericamente descrito como $\text{SiO}_2.n.\text{Na}_2\text{O}$, onde n é considerado como o número de moles respectivos entre a razão dos óxidos, é dado pela formulação de fusão abaixo, a 1300°C , envolvendo o óxido de silício e carbonato de sódio (BARBA, 2002), de acordo com a seguinte reação:



Considerando a reação global acima, a variação da razão entre os óxidos, denominada como módulo de sílica, é dada entre 1,6 a 4,9. Quanto maior for o valor da relação, maior a viscosidade. Dessa forma, industrialmente utiliza-se a proporção 3,2, uma vez que ocorre a alteração do valor de pH (GUIMARÃES, 1952).

Dentre as formações possíveis para o produto, pode-se citar o metassilicato de sódio, no qual apresenta o módulo de sílica em 1,0. Em solução aquosa ou em estado sólido, é facilmente dissolvido em água. Com isso, é utilizado como agente aglutinante para formação de machos para as indústrias de fundição (SOUZA, *et al.* 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizadas três matérias-primas (Figura 20) distintas, isto é, areia de fundição, bentonita e metassilicato de sódio. A areia descartada de fundição, proveniente de uma empresa do ramo na região de Joinville - SC, foi o material base de maior concentração para preparação das pastas, sendo rica em sílica em sua composição. Proveniente de diversos ciclos de uso, a areia descartada apresenta, em seu estado bruto, resina, inclusões não metálicas e escórias do processo de fundição. A bentonita, matéria-prima de aproximadamente ~99% de pureza fornecida pela empresa Sigma-Aldrich, é considerada como um aditivo plastificante. O metassilicato de sódio, em estado aquoso (~46-50% de água), foi adquirido no comércio digital, provido pela empresa Auro's Química. Esta matéria-prima tem como objetivo enrijecer o protótipo impresso.

Figura 20: Fotografias mostrando o aspecto geral das matérias primas utilizadas: a) areia descartada de fundição; b) bentonita; c) metassilicato de sódio.



Fonte: Autor, 2022.

Com base no método de impressão de *robocasting*, as pastas foram produzidas com base na presença de água destilada, com intuito de garantir a conformação necessária para que pasta cerâmica fosse extrudada.

3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, foram evidenciados os ensaios realizados no presente estudo, considerando a caracterização física, química, térmica e mecânica da areia descartada de

fundição. Os tópicos foram segmentados a caracterização de pasta I e II, envolvendo seus respectivos subtópicos específicos relacionados a preparação da pasta cerâmica. Após, foram segmentados novamente em tópicos.

3.2.1 Caracterização da pasta I

A primeira caracterização de pasta consistiu apenas na etapa de peneiramento, com intuito de retirar os aglomerados da areia descartada de fundição bruta, assim como na preparação das composições para impressão 3D.

3.2.1.1 Preparação da matéria-prima I

Considerando que o material base apresenta um tamanho de partícula grosseiro e abrasivo, foi realizada uma etapa de peneiramento da areia descartada de fundição para que retenha os aglomerados das escórias e seja possível imprimir a pasta cerâmica. Neste caso, pesou-se e peneirou-se 100 g da matéria-prima principal em uma peneira de abertura 500 μm , possibilitando verificar a porcentagem média de retidos da areia (Figuras 21a, 21b e 21c).

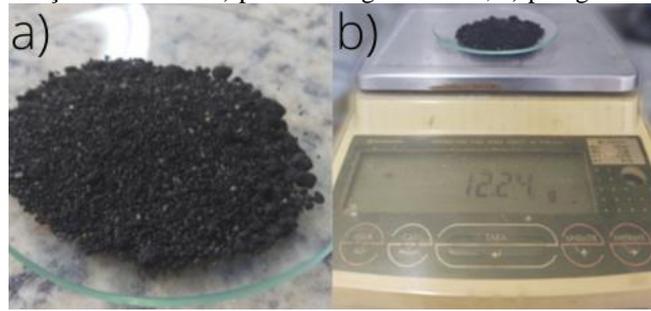
Figura 21: Processo de peneiramento: a) pesagem; b) areia e peneira 500 μ ; c) peneiramento.



Fonte: Autor, 2022.

Após o peneiramento (Figura 22), verificou-se que havia, em média, 12% em massa de retidos diante da abertura utilizada. Concluiu-se que não houve uma perda considerável de material, uma vez que as técnicas de pós-processamento para reutilização da ADF estavam em torno de ~92% em massa. Comparativamente, a diferença entre a etapa de peneiramento e as recuperações mecânica e térmica era de apenas 4% de areia.

Figura 22: Concentração de retidos: a) partículas aglomeradas; b) pesagem do fundo da peneira.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.1.2 Preparação das composições I

Procedendo o peneiramento, seguiu-se para preparação da pasta cerâmica, uma vez que a ADF apresentou quantidade suficiente para realizar a extrusão da pasta utilizando um bico de extrusão de 5 mm. Para isso, a primeira amostragem mássica apresentou areia, água e bentonita em sua composição, de forma a definir os limites de impressão mantendo a concentração de plastificante constante, em 5% em massa (Tabela 9). Isso se deu de acordo com o estudo de Keep (2020), nos quais foram obtidos resultados consideráveis com a mesma concentração em uma pasta cerâmica, já que a argila apresenta uma elevada área superficial e consequentemente uma alta adsorção de água.

Tabela 9: Composições das pastas I.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
ADF (%)	77	75	72	70	67	65
Água (%)	18	20	23	25	28	30
Bentonita (%)	5	5	5	5	5	5
Relação L/S	0,22	0,25	0,30	0,33	0,39	0,43

Fonte: Autor, 2022

Neste caso, a variação foi dada entre as porcentagens de areia e água, dispondo desta última em um intervalo de 18-30% em massa, uma vez que a propriedade de molhabilidade deverá estar adequada o suficiente para extrudar a pasta. Conforme os dois testes avaliados por Keep (2020), foi possível obter impressões com porcentagens de 28% e 26% de água em massa, considerando a utilização de *ball clays* em sua composição, e desta forma justificando a utilização das quantidades mássicas acima. A definição dos limites inferiores e superiores

para realizar a impressão foram concebidos por conta das propriedades de fluidez e viscosidade, além da porcentagem da razão da quantidade de líquido em relação ao sólido.

Outra forma de avaliar o comportamento da pasta cerâmica, envolvendo a tratativa de suas porcentagens mássicas, foi de variar a quantidade de aditivo presente. Este foi fundamental para avaliar o comportamento reológico de maior e/ou menor plasticidade. Como é considerado em pequena escala na composição, houve uma pequena variação de sua quantidade em relação a uma porcentagem constante de água, dada por 25% em massa (concentração média entre os limites avaliados na Tabela 9).

Tabela 10: Composições das pastas II.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
ADF (%)	75	74	72	70	68	66
Água (%)	25	25	25	25	25	25
Bentonita (%)	0	1	3	5	7	9
Relação L/S	0,3	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Fonte: Autor, 2022

É perceptível o aumento do caráter plástico da pasta ao aumentar a quantidade de bentonita na composição (Tabela 10). Esse fator faz com que se apresente uma intensificação da propriedade de conformabilidade. Porém, considerando um valor constante de água, um elevado grau de bentonita presente na composição pode causar uma pasta mais rígida, uma vez que há uma maior quantidade de lamelas de bentonita para serem lubrificadas pelo ligante.

Para a última análise, atuou-se com a implementação do metassilicato de sódio na composição, em solução, em torno de ~46-50% de água. Com o aumento da matéria-prima aglutinante, proporcionalmente ocorre o aumento da quantidade de lubrificante na pasta cerâmica (Tabela 11).

Tabela 11: Composições das pastas III.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
ADF (%)	73	71	69	67	65	63
Água (%)	20	20	20	20	20	20
Bentonita (%)	5	5	5	5	5	5
Solução de Metassilicato de sódio (%)	2	4	6	8	10	12
Relação L/S	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35

Fonte: Autor, 2022

Igualmente a primeira sessão de ensaios, por meio da variação de água, foi notável a alteração crescente da razão de proporção de líquido perante ao sólido. Sabe-se que, mesmo mantendo a concentração de água constante (20% em massa), ocorreu a sua mudança por conta de sua presença na solução aquosa de metassilicato de sódio. As composições englobando esta matéria-prima foram tomadas por meio das quantidades utilizadas em suas aplicações juntamente a areia, de 2 a 5% em massa, denominando-a como “areia quimicamente ligada” (QIU *et al.*, 2022).

3.2.2 Caracterização da pasta II

A segunda caracterização de pasta consistiu na adoção da etapa de moagem, tendo-se em vista a redução do tamanho de partícula, como na preparação das composições para impressão 3D do protótipo do filtro.

3.2.2.1 Preparação da matéria-prima II

Tendo em vista o aumento do grau de homogeneidade da areia e na diminuição do seu tamanho de partícula, foram analisados alguns comportamentos granulométricos que fossem possíveis para realizar a impressão 3D do filtro. Como o diâmetro do bico de extrusão foi limitado a 1,19 mm (redução de, aproximadamente, 80% do bico de extrusão da pasta I), partiu-se do processo de moagem entrelaçado a alguns parâmetros de processo, para que se obtenha o tamanho adequado de partícula para impressão 3D.

Tabela 12: Testes para redução do tamanho de partícula.

Teste	Pré-processamento	Moinho	Peneira (abertura)	Secagem
I	X	X	X	X
II	X	X	500 µm	X
III	X	Planetário Servitech CT242 (15 minutos)	45 µm	X
IV	X	Gira jarro Cienlab CE-500D (24 horas)	X	24 h
V	X	Gira jarro Cienlab CE-500D (48 horas)	X	24 h

Fonte: Autor, 2023.

A segregação dos aglomerados ocorreu através de dois equipamentos distintos, seja pela moagem via planetário em estado seco e gira jarro em estado úmido. Como a primeira teve um tempo de duração de 15 minutos, passou-se, posteriormente, a uma etapa de peneiramento com abertura de 45 μm , garantindo uma quantidade suficiente de partículas mais finas (Tabela 12). Para os testes IV e V, não houve a presença de uma etapa de peneiramento após moagem, visto que foi utilizada a areia retida na malha 500 μm . Em contrapartida, a areia foi seca, em estufa, durante um determinado período de tempo. Além do mais, a duração de 24 horas e 48 horas em processo de quebra das partículas teve como objetivo obter o menor tamanho de partícula possível, considerando a eficiência energética do ciclo.

3.2.2.2 Preparação das composições II

Diferentemente dos testes de caracterização de pasta I, aumentou-se consideravelmente o teor em massa de água na composição, de 34 a 46%, desprezando a presença de metassilicato de sódio na composição. O aumento do teor de plasticidade da pasta foi proporcional ao acréscimo do teor de água, de forma a lubrificar adequadamente as lamelas de bentonita (Tabela 13).

Tabela 13: Composições da pasta para caracterização II.

Amostra	ADF (%)	Água (%)	Bentonita (%)	Metassilicato de sódio (%)	Relação L/S
A	60	34	6	X	0,52
B	54	40	6	X	0,67
C	48	46	6	X	0,81

Fonte: Autor, 2023.

Apenas três amostras de composições foram analisadas por conta da limitação na quantidade de matéria-prima recebida pela empresa de fundição, já que poderia haver uma diferença na composição mássica dos óxidos presentes entre os lotes de ADF.

3.2.3 Distribuição granulométrica

Para se realizar a manufatura aditiva de uma pasta cerâmica, vide pela técnica de *robocasting*, o tamanho das partículas deve estar adequado diante do tamanho do bocal. Por conta disto, utilizou-se a técnica de granulometria à laser pelo equipamento Mastersizer

3000E (Figura 23), de forma a realizar uma análise concisa do tamanho de partícula da areia de fundição.

Figura 23: Fotografia mostrando o granulômetro utilizado.



Fonte: Autor, 2022.

A averiguação ocorreu por meio do despejo da matéria-prima na solução aquosa do becker, a qual deverá apresentar uma quantidade suficiente de água para realizar a medição. Através da incidência de um feixe de raio laser diretamente na amostra, ocorreu a coleta da luz difratada por meio das lentes do equipamento, obtendo-se dessa forma o resultado da distribuição granulométrica.

3.2.4 Processo de perda ao fogo

Processo no qual opera em elevadas temperaturas, a perda ao fogo é definida como uma técnica onde tem como objetivo a retirada de compostos orgânicos e água do material sólido. Para a areia de fundição, que apresentou em sua composição uma quantidade significativa de resina fenólica atuando como um “moldante” para o macho, foi de grande relevância conhecer o percentual de massa de material orgânico. Neste caso, atuou-se fora da faixa de temperatura de sinterização da areia, de acordo com o intervalo médio de temperatura de calcinação para areia de fundição à verde: 1223,16K (950°C). Para ABIFA (1985), seguindo os padrões estipulados pela Comissão de Estudos de Matérias Primas número 120, formula-se a perda ao fogo (Equação 3).

$$PF = \frac{MA-MR}{MA} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

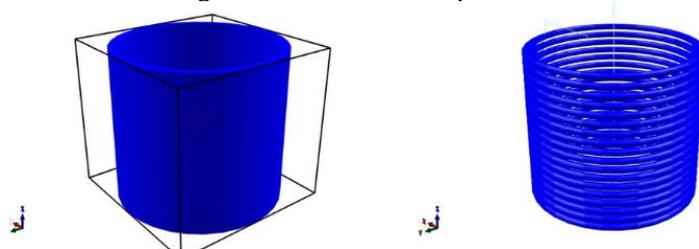
E que PF é a perda ao fogo, em porcentagem; MA a massa da amostra e MR a massa do resíduo após calcinação, em gramas. Para isso, considerou-se inicialmente uma quantidade de 0,02 kg (20 g) de areia de fundição, a qual foi seca na estufa SPLabor® modelo SP-102/100 até manter sua massa constante, em torno de 378,16 a 403,16 K (105 a 130 °C), de forma a eliminar a umidade absorvida por conta do seu manuseio.

Com a amostra seca em dessecador, foi pesado em uma balança analítica uma quantidade de 0,001 a 0,005 kg (1 a 5 g) de matéria-prima em um cadinho de alumina, desprezando seu peso para não influenciar na perda ao fogo. Após, transferiu-se o conteúdo para a mufla, programando-a para atingir a temperatura de 1223,16 K (950 °C) até o instante em que os ligantes orgânicos sejam retirados. Após a secagem no dessecador até a temperatura ambiente (293,15 K), aferiu-se a medição da perda de massa através da formulação embasada, obtendo-se o resultado percentual dos ligantes orgânicos presentes na areia.

3.2.5 Modelagem e manufatura aditiva

Previamente a etapa de manufatura aditiva, os corpos de prova de impressão foram modelados através do software *Blender*, gratuito e similar ao programa *SolidWorks*. Neste caso, foram impressos dois tipos de modelo distintos, transpondo-os de arquivo *CAD* para *STL* (Figura 24).

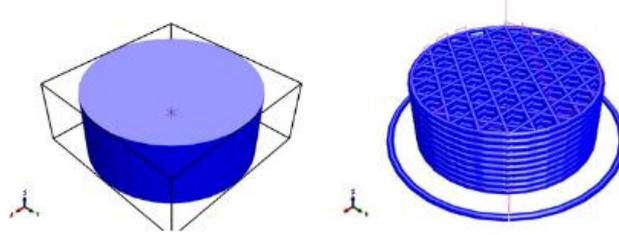
Figura 24: Cilindro em arquivo CAD.



Fonte: Autor, 2022.

De acordo com a Figura 24, o primeiro corpo de prova foi de aspecto cilíndrico vazado, uma vez que os testes práticos eram realizados de acordo essa geometria. Atuou-se com este parâmetro, pois foi necessário avaliar a característica de *buildability* (capacidade de construção), camada por camada, de forma simples e sem que apresente alguma deformação. As dimensões do corpo foram de 20 mm de diâmetro por 20 mm de altura, necessários para avaliações futuras de retração e aspecto visual do produto impresso.

Figura 25: Filtro stars em CAD.



Fonte: Autor, 2022.

O segundo modelo (Figura 25) também foi de geometria cilíndrica, denominado de estrutura porosa *stars*, o qual foi estipulado 40% de vazio. Similarmente aos filtros utilizados no setor de fundição, considerou-se como um protótipo em escala reduzida, com 20 mm de diâmetro por 20 mm de altura, uma vez que as camadas são realizadas de forma cruzada para evitar o fenômeno de escoamento turbulento ao verter o metal líquido no molde. Além do mais, as dimensões consideradas para o modelo tomaram como base a norma da *American Society for Testing and Materials C133* para realizar o ensaio de compressão, tratado em tópico futuro. Para fins de exposição, foi realizada a manufatura aditiva em escala 50 mm de diâmetro por 8 mm de altura de um protótipo de filtro. A medida de preenchimento, de comparativo, tomou-se como base em um filtro industrial (Figura 26) para fundição de aberturas circulares, disponível no Laboratório de Materiais Vitrocerâmicos - VITROCER.

Figura 26: Filtro com porosidade de geometria circular.

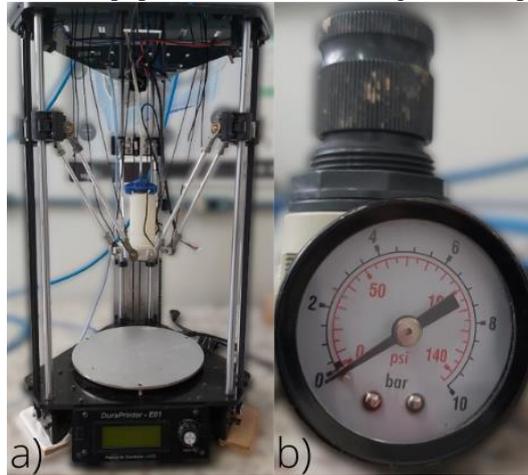


Fonte: Autor, 2022.

As impressões ocorreram por meio da técnica de *robocasting*, através do equipamento Duraprinter-E01, tipo delta (Figura 27). Compoendo a movimentação dos eixos em três direções, apresentou como vantagem a possibilidade de fabricação de geometrias complexas, uma vez que a seringa de armazenamento da pasta pode se locomover livremente.

A extrusão da pasta ocorre a partir da imposição de ar pressurizado no êmbolo da seringa, fazendo com que a saída da pasta ocorresse de forma forçada.

Figura 27: a) Equipamento de DIW; b) Regulador de pressão.



Fonte: Autor, 2022.

Para os testes realizados, alguns parâmetros foram adequados para que se mantivesse a padronização na impressão do produto à verde. Em contrapartida, atuou-se com bocais de diâmetros distintos para seringa, uma vez que a granulometria da areia de fundição foi considerada de aspecto grosseiro. A velocidade utilizada para impressão do produto foi dada no valor de 10 mm/s, uma vez que altas velocidades tendem a diminuir a resolução do produto. Apenas a pressão para a extrusão da pasta cerâmica foi alterada constantemente, entre o intervalo de 0,1 a 4,0 bar. A conversão do arquivo *CAD* para *STL* ocorreu através do *software Repetier Host*, possibilitando a execução da extrusão da pasta cerâmica, a uma pressão específica, de forma manual. Existem outras propriedades para a técnica de *robocasting* que também foram consideradas constantes, como: taxa de deposição, temperatura da base, raio imprimível, entre outros.

3.2.6 Ensaios de reologia

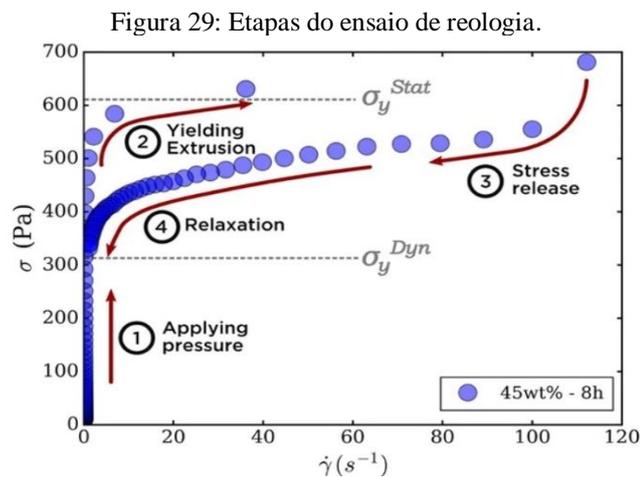
O estudo do comportamento reológico das pastas cerâmicas foi realizado por meio de um viscosímetro (Figura 28), Thermo Scientific™ HAAKE™ Viscotester™ Iq, disponível no VITROCER. Desta forma, ao analisar a maneira com que a pasta reage ao ensaio reológico, pôde-se garantir uma indicação para a impressão 3D.

Figura 28: Fotografia mostrando o reômetro utilizado.



Fonte: Autor, 2022.

Considerando placas paralelas de dimensão de 20 mm para o estudo, M'Barki, Bocquet e Stevenson (2017) simularam condições de manufatura aditiva por meio da técnica de *DIW* para verificar seu comportamento reológico (Figura 29). Segmentado em quatro etapas, pode-se verificar inicialmente a aplicação de uma tensão, em Pascal, até que ocorra a extrusão da pasta. Essa faz com que ocorra a recorrência da taxa de cisalhamento, partindo-se do ponto de tensão estática de extrusão, até o intervalo de 100 a 120 s^{-1} . Desta forma, para a terceira etapa, alivia-se a tensão retirando-a controladamente até que a taxa de cisalhamento atinja o ponto de 1 s^{-1} . A quarta etapa, especificamente denominada como relaxamento, fará com que a pasta retorne ao seu estado inicial, sem que haja aplicação de tensão.



Fonte: M'Barki, Bocquet e Stevenson (2017).

Para este trabalho, realizaram-se os mesmos ensaios, porém com placas de 35 mm, considerando uma distância de 1 mm entre elas. Além do mais, considerou-se a composição da pasta distinta do estudo referenciado.

3.2.6.1 Composição reológica I

Com o intuito de avaliar o comportamento de construção camada por camada, foram analisadas três composições de pastas para averiguar o caráter reológico (Tabela 14). A opção das amostras levou em consideração o aspecto econômico, os parâmetros do processo e a limitante quantidade de ADF disponível. Também, os aspectos reológicos dentre os artigos científicos previamente explícitos no trabalho foram relevantes para atuação deste ensaio.

Tabela 14: Composições para testes reológicos.

	Teste I	Teste II	Teste III
ADF (%)	70%	72%	65%
Água (%)	25%	25%	20%
Bentonita (%)	5%	3%	5%
Solução de metassilicato de sódio (%)	-	-	10%
Relação L/S	0,33	0,33	0,33

Fonte: Autor, 2022.

3.2.6.2 Composição reológica II

Assim como na composição reológica I, foi realizado a análise do comportamento da pasta cerâmica, para a amostra A (Tabela 15). Optou-se apenas por essa análise devido a quantidade limitada de matéria-prima.

Tabela 15: Composição para teste reológico II

	ADF (%)	Água (%)	Bentonita (%)	Metassilicato de sódio (%)	Relação L/S
Amostra A	60	34	6	X	0,52

Fonte: Autor, 2023

3.2.7 Retração

Contendo água em todas as composições para os testes de manufatura, o produto cerâmico apresenta uma retração específica, dependendo de sua quantidade presente no meio. Desta forma, a análise foi realizada de um a três dias de secagem, adequados para obter o material à verde bem solidificado. Por meio de um paquímetro, comparou-se as dimensões de altura e diâmetro inicial e final, obtendo-se a porcentagem linear e diametral de retração das pastas (Tabela 16). A secagem dentro deste período ocorreu a temperatura ambiente, suficientes para obter resultados dos testes de forma concisa.

Tabela 16: Retrações linear e diametral.

Retração	Linear	Diametral
Formulação	$\frac{\Delta L}{L_0} (\%) = \frac{L_0 - L}{L_0} * 100$	$\frac{\Delta D}{D_0} (\%) = \frac{D_0 - D}{D_0} * 100$

Fonte: Autor, 2022.

3.2.8 Dilatação térmica

O ensaio de dilatação térmica, por meio de um Dilatômetro óptico horizontal Misura® ODLT (Figura 30), disponível no VITROCER, permitiu medir a expansão e retração de corpos de prova de areia descartada de fundição. Este fez com que fosse possível entender a faixa de *printability* (capacidade de impressão) do filtro de fundição cerâmico, ao ser submetido à sinterização. Os corpos de prova foram preparados apenas com a matéria-prima principal (ADF), sem a presença de aditivos, respeitando os parâmetros de processos necessários.

Figura 30: Fotografia do dilatômetro óptico utilizado.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.9 Picnometria

Para se obter os dados referentes à densidade real do material (sob a forma de pós), utilizou-se a picnometria. Disponível no VITROCER, o equipamento, ULTRAPYC 1200e (Figura 31), permitiu analisar e medir cinco distintos pontos de densidade, em atmosfera controlada de gás hélio, obtendo-se um valor médio. Para isso, o tamanho de partícula foi considerado mínimo (20 μm) o suficiente para que o grau de compactação do pó estivesse adequado ao ensaio.

Figura 31: Fotografia do picnômetro utilizado.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.10 Prensagem

Visando compactar amostras de areia de fundição, utilizou-se uma Prensa Hidráulica, Bovenau 10ST (Figura 32), disponível no VITROCER. Dispondo de uma gama de matrizes de compactação para pequenas dimensões, pode-se atuar com uma força de até 10 toneladas, variando seu grau de compactação e interstícios. O ensaio foi relevante para definir a modelagem de corpos de prova à verde, fundamentais para processos posteriores.

Figura 32: Fotografia mostrando a prensa uniaxial (hidráulica) utilizada.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.11 Medidas de densidade (Princípio de Arquimedes)

Baseado no princípio de Arquimedes (Figura 33), o ensaio consiste em avaliar o comportamento da amostra mediante a um meio atmosférico e aquoso, obtendo-se a sua

densidade aparente. Mantendo-o em temperatura ambiente, as medições do corpo de prova foram válidas somente em estado sólido, através de uma balança de precisão.

Figura 33: Fotografia mostrando o aparato para medidas de densidade utilizando o princípio de Arquimedes.



Fonte: Autor, 2022.

Inicialmente, a amostra foi disposta sobre suporte superior, garantindo o valor de sua massa, em ar (m_a). Após, colocada na parte inferior, obteve-se o valor da massa imersa, em meio aquoso (m_i). Conhecendo a densidade do líquido disposto no recipiente, seja álcool isopropílico ou água (ρ_l), calculou-se a densidade conforme a Equação 4.

$$\rho_{aparente} = \frac{m_a}{m_a - m_i} * \rho_l \quad (\text{Equação 4})$$

Obtendo-se a densidade do corpo de prova ($\rho_{aparente}$), foi possível calcular a porcentagem de densificação e a porosidade. Para isso, relacionou-se os valores obtidos por meio dos ensaios de picnometria, para densidade real, e a densidade aparente pelo princípio de Arquimedes.

3.2.12 Porosidade

A porosidade é definida como a medida de espaços vazios no interior de um material através de sua porcentagem volumétrica. Para um filtro de fundição, por exemplo, é importante quantificar o valor de interstícios presentes, visto que afeta diretamente em suas propriedades. Segundo Carvalho (2013), deve-se seguir a Equação 5.

$$\varepsilon = \left(1 - \left(\frac{\rho_{geométrica}}{\rho_{real}} \right) \right) * 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que a porosidade (ε) foi calculada fazendo-se a razão entre a densidade geométrica e a real subtraídas por um, respectivamente. A densidade real foi obtida através do equipamento de picnometria, tratando da areia de fundição no estado de pó, já que o picnômetro opera apenas abaixo do tamanho de partícula de 20 μm . A tendência de partículas grossas influencia negativamente no grau de compactação da amostra, visto que pode ocorrer uma discrepância de valores comparado ao valor real.

3.2.13 Análise microestrutural

Para as imagens dos filtros de fundição obtidas por meio de microscópio ótico, propôs-se a averiguação da quantidade de poros por polegada linear (ppi). Através do *software ImageJ*, esboçaram-se linhas paralelas de dimensões definidas para quantificar o número de poros, em polegadas.

3.2.14 Ensaio de compressão

Como o escopo do trabalho foi voltado para materiais cerâmicos, é essencial realizar o ensaio de compressão, uma vez que a classe apresenta alta sensibilidade a ensaios de tração.

Os ensaios foram realizados no do laboratório de engenharia biomecânica - LEBm, por meio do equipamento Shimadzu AGS-X 100 kN, onde foram submetidas as amostragens sinterizadas e revestidas, para comparar o efeito da resistência a esforços compressivos. As dimensões dos corpos de prova seguiram a norma *ASTM C133 - 97*, no qual exige um padrão 1:1 mm para realizar a compressão. A taxa de deslocamento da pinça superior foi de 1,3 mm/min até a fratura abrupta do corpo de prova.

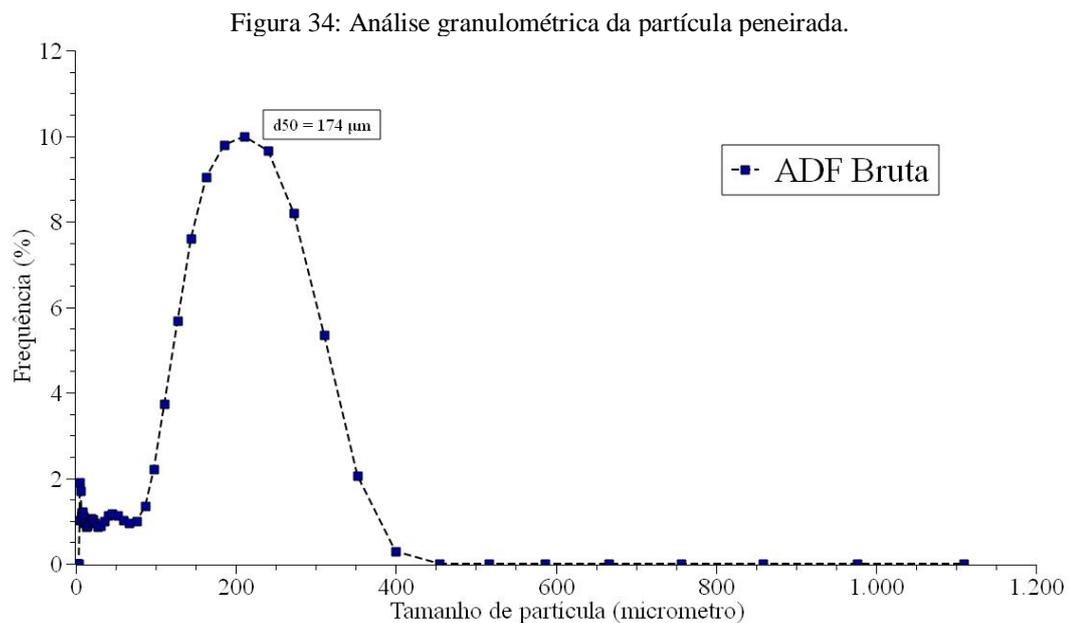
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DA PASTA I

Esta seção abordou os resultados provenientes da primeira preparação de pasta, envolvida pelo processo de peneiramento e preparação das composições.

4.1.1 Análise granulométrica

Sabendo que se deve conhecer o tamanho de partícula da matéria-prima trabalhada para realizar a manufatura aditiva, evidenciou-se o caráter da distribuição granulométrica (Figura 34) ao considerar a areia em estado bruto, com a intervenção da etapa de peneiramento na malha de 500 μm .



Fonte: Autor, 2022.

Considerando que o diâmetro do bico de extrusão para realizar a técnica de *robocasting* para primeira pasta é de 5 mm, notou-se que a distribuição granulométrica da areia de fundição estava de acordo com as especificações do equipamento, apresentando uma preponderância próxima de 200 μm . Além disso, o comportamento da curva gaussiana fez com que apresentasse alta heterogeneidade dos tamanhos das partículas. Porém, haviam diferentes tamanhos de partícula, em pequena escala, menores que 100 μm . A grande

quantidade de partículas grossas na microestrutura influenciou no comportamento do material, e conseqüentemente em suas propriedades. Para Queiroz, Monteiro e Vieira (2010), ao avaliar os efeitos de uma areia em cerâmicas vermelhas, notou-se sua distribuição granulométrica no intervalo de 20 a 2000 μm , estando similar ao intervalo apresentado pela areia de fundição avaliada laboratorialmente.

4.1.2 Perda ao fogo da ADF

Após realizar as etapas de perda ao fogo para areia descartada de fundição, conforme a normativa da Associação Brasileira de Fundição número 120, houve uma redução de 4,53% de ligantes orgânicos da matéria-prima abundante. Este fato pode ser justificado através da alteração de sua coloração (Figura 35), de tonalidade mais clara, uma vez que a resina presente na areia é de coloração escura.

Figura 35: Areia de fundição após o processo de perda ao fogo.

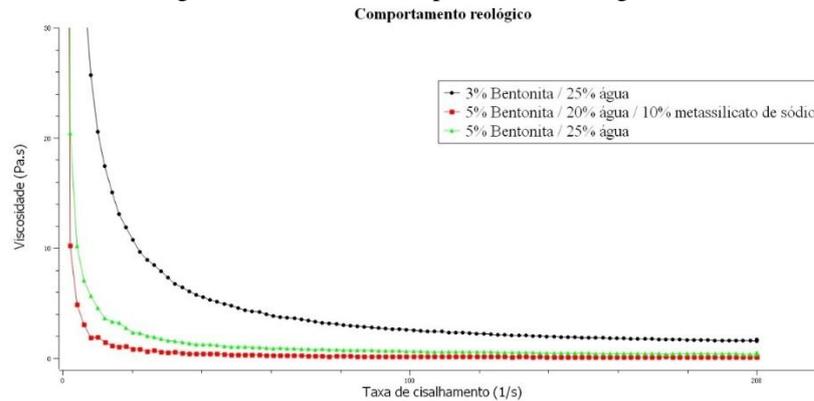


Fonte: Autor, 2022.

4.1.3 Aspecto reológico I

É perceptível que, dentre os três testes realizados (Tabela 13), a relação de líquido sobre sólido se manteve constante. Este fato convém com o comportamento da pasta quando submetida ao reômetro, garantindo uma ótima aproximação por meio do método de Herschel-Bulkley. Teoricamente, quando uma pasta apresenta um caráter de similaridade com o modelo reológico de pseudoplasticidade, sabe-se que é possível realizar a manufatura aditiva. Porém, existem outros fatores que podem influenciar negativamente na impressão da peça.

Figura 36: Curvas de comportamento reológico I.



As três pastas apresentaram elevada proximidade reológica com o modelo descrito (Figura 36), podendo-se destacar a similaridade entre as que contêm 5% em massa de bentonita. Para a composição que apresenta 3% em massa, houve um deslocamento gradual da curva, justificado por apresentar uma preponderância na quantidade de ADF. Dessa forma, concluiu-se que esta pasta se assemelha a um caráter mais viscoso, diferentemente das outras duas analisadas.

Observando o valor do coeficiente angular obtido para as três pastas, houve uma grande similaridade entre suas reologias com o modelo aproximado, estando com valores de coeficiente angular da reta próximos de 1. Já o índice de comportamento do fluido (Tabela 17), o qual define o comportamento da pasta cerâmica, todos os valores estiveram entre zero e um, condizendo com o comportamento de pseudoplasticidade. Dessa forma, a utilização deste modelo esteve de acordo com as características necessárias para realizar a manufatura aditiva, no qual poderá ser verificado tópico de discussão.

Tabela 17: Dados reológicos I.

Pasta cerâmica	Coefficiente angular (r)	Índice de comportamento do fluido (n)
Teste I	1,0000	0,002335
Teste II	0,9996	0,02094
Teste III	0,9998	0,1207

Fonte: Autor, 2022.

4.1.4 Resultado das impressões I

As impressões realizadas pela técnica de *robocasting*, segmentadas em três grupos, variaram as quantidades de matérias-primas presentes na composição. Para os testes abaixo,

foram consideradas apenas geometrias cilíndricas, visando a avaliação da propriedade de *buildability* (capacidade de construção). Partindo-se inicialmente pela constância de 5% em massa de bentonita na composição, de maneira a variar a proporção de ADF em relação a água para seis testes distintos, foram obtidos os produtos à verde (Figura 37).

Figura 37: Corpos de prova com variação de água.



Fonte: Autor, 2022.

Os limites de impressão foram definidos entre o intervalo de 18 a 30% de água em massa, podendo-se evidenciar o aumento gradativo da imposição de pressão para a extrusão da pasta de acordo com a diminuição da quantidade presente de água no meio, já que houve um caráter de menor molhabilidade entre as partículas. Essa propriedade influenciou diretamente na viscosidade aparente, fazendo com que houvesse uma maior resistência das partículas em relação a sua movimentação. Para o caso do primeiro teste (limite inferior, com 18% de água), a baixa quantidade de lubrificante fez com que a extrusão da pasta cerâmica ocorresse com dificuldade, com a impressão de pressão em 4 bar. Para o limite superior, em 30% de água em massa, houve a impressão de um cilindro com baixa característica de *buildability* (capacidade de construção camada a camada), justificado pela alta fluidez da pasta cerâmica. Considerando o aspecto visual e os parâmetros do processo, notou-se uma distribuição mais homogênea das camadas da pasta para o teste que utilizou uma quantidade de 25% de água em massa, no qual foi imposta uma pressão de 0,8 bar. Essas camadas

extrudaram de acordo com o diâmetro do bico extrusor, onde as duas variáveis estiveram de acordo com a espessura do produto impresso.

Partindo-se deste, seguiu-se para os testes de manufatura no qual considera uma constância no valor da água, em 25% em massa, variando as proporções relativas à areia e bentonita, podendo modificar o caráter plastificante da pasta. Mesmo com as variações do limite inferior e superior de bentonita, as impressões obtiveram êxito da mesma forma como abordado o teste anterior (Figura 38).

Figura 38: Corpos de prova com variação de bentonita.

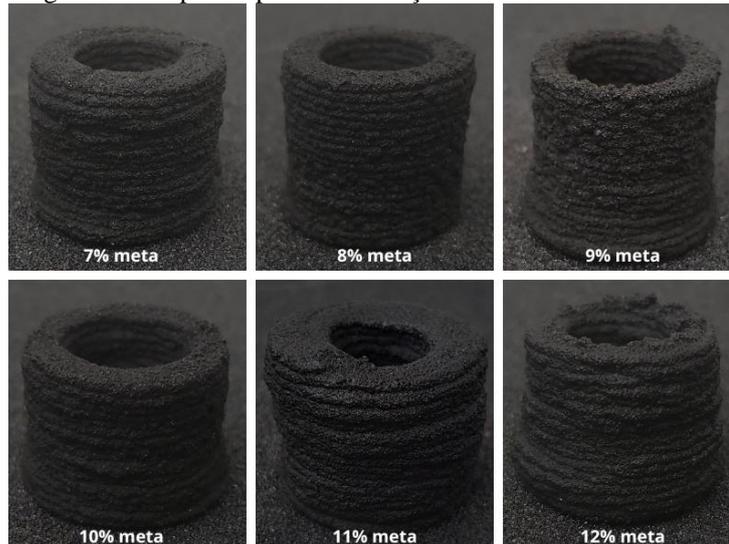


Fonte: Autor, 2022.

Notou-se que havia uma proporcionalidade direta entre o aumento do teor de bentonita de acordo com o aumento da pressão, uma vez que houve a necessidade de lubrificação de uma maior quantidade de lamelas da microestrutura. Isso condiz macroscopicamente em uma pasta mais “seca”, dificultando sua homogeneização para fabricação do produto à verde. Além do mais, um potencial de menor molhabilidade apresentou uma resistência à extrusão, já que a tensão cisalhante aplicada esteve em maior intensidade. Alinhando os parâmetros do processo, a pasta de maior qualidade foi a de composição de 3% de bentonita em massa, uma vez que apresentou, de forma aparente, uma baixa pressão para fabricação. Previamente, foi perceptível a facilidade de homogeneização da pasta, influenciando diretamente na qualidade da manufatura.

Além disso, foram realizados outros seis testes envolvendo a presença do metassilicato de sódio na composição (Figura 39), mantendo a quantidade de bentonita constante, em 5%. Como a matéria-prima é aplicada como agente aglutinante, reduziu-se significativamente o índice de *printability* da pasta, já que sua secagem ocorre em menor tempo para realizar a manufatura.

Figura 39: Corpos de prova com adição de metassilicato de sódio.



Fonte: Autor, 2022.

Houve uma dificuldade para realizar a manufatura aditiva da pasta com a presença de metassilicato de sódio na composição, uma vez que ocorreu o fenômeno da separação de fases na etapa de extrusão da pasta (Figura 40). Para proporções onde a relação de líquido/sólido é menor, foi necessária a imposição de maiores quantidades de pressão para extrusão. Isso fez com que o líquido fosse disperso primeiramente na mesa de impressão, visualmente notável por conta de uma grande quantidade de ar presente.

Figura 40: Pasta com separação de fases.



Fonte: Autor, 2022.

A proposição inicial para porcentagem de composição de metassilicato de sódio na pasta eram de 2%, 4% e 6% em massa, respectivamente. Segundo Zaretskiy (2018), propõe-se de 2 a 5% em massa desta matéria-prima englobada a areia de fundição para formar o macho.

Porém, por conta dessa divisão para baixas porcentagens de líquido, não foi possível realizar a impressão para estas composições. Para isso, as composições analisadas foram alteradas para 7%, 9% e 11% em massa, no qual foi obtido sucesso para realizar a manufatura (Tabela 18).

Tabela 18: Faixa de pressão de acordo com a porcentagem de metassilicato de sódio.

Metassilicato de sódio	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %
Pressão (bar)	1,8-2,2	2,2-2,5	1,0-1,3	1,3-1,5	0,2-0,5	0,6-0,8

Fonte: Autor, 2022.

É notável que, para todas as composições abordadas, trabalhou-se diante de variadas faixas de pressão, uma vez que existe a presença da separação de fases da pasta (Figura 41). Como a sua tendência é que ocorra primeiramente o escoamento do líquido, para a mesma pasta, as primeiras impressões são obtidas com menores valores de pressão. Isso fez com que haja uma certa dificuldade para controlar dimensionalmente as variáveis geométricas, obtendo-se certa imprecisão. Ou seja, não houve uma proporcionalidade diante da adição do metassilicato de sódio na composição.

Figura 41: Corpos de prova com pressões distintas e composições iguais.



Fonte: Autor, 2022.

Para a Figura 41, realizaram-se três impressões de mesma composição, utilizando a mesma pasta. Percebeu-se que não há um valor fixo para a pressão, já que se diminui a *printability* do material. Em contrapartida, o índice de retração se manteve aproximadamente constante, em torno de 7%. Porém, a precisão dimensional para manufatura da geometria cilíndrica apresentou baixa estabilidade, justificando que a impressão do filtro de fundição se torna um desafio, uma vez que deve ser manufaturado de maneira mais robusta. Com isso, os testes com o metassilicato de sódio foram optados por não os englobar na composição para realizar o ensaio mecânico de compressão, e sim apenas “ revesti-los”.

Diante dos resultados obtidos para a geometria cilíndrica, notou-se que o tamanho de partícula da areia de fundição não era considerado ideal para realizar a manufatura aditiva do

filtro de fundição. Isso se deu por conta da qualidade e robustez necessária para imprimir os detalhes da peça, já que se utiliza um bico de 5 mm para realizar a extrusão da pasta em formato cilíndrico. Com isso, foi necessário realizar a etapa de moagem com intuito de adequar o tamanho de partícula para um menor bico de extrusão.

4.1.5 Vida útil da seringa

O equipamento utilizado na manufatura aditiva para atuar como o reservatório da pasta cerâmica, apresenta um determinado tempo de vida útil, seja pela sua utilização, a atmosfera na qual atua, o material que é armazenado, etc. Além disso, outro ponto fundamental para colaborar com seu desgaste é o tamanho das partículas que nelas estão inseridas na pasta, uma vez que ocorre um fenômeno denominado “desgaste abrasivo” com as paredes do equipamento. Este ponto dependerá particularmente das matérias-primas que estarão presentes na pasta, uma vez que cada uma apresentará uma distribuição granulométrica distinta.

Analisando a particularidade da areia de fundição, material base da pasta cerâmica impressa, tem-se que sua distribuição granulométrica é classificada consideravelmente como “areia fina”, já que o grau de compactação do molde de areia deverá ser elevado (MARIA; CANTARELLA, 2020). Porém, observou-se um fenômeno adverso em determinado tempo de uso da seringa, o qual dificultou a manufatura dos produtos à verde (Figura 42).

Figura 42: a) seringa com inclusão de ar; b) cilindro à verde.

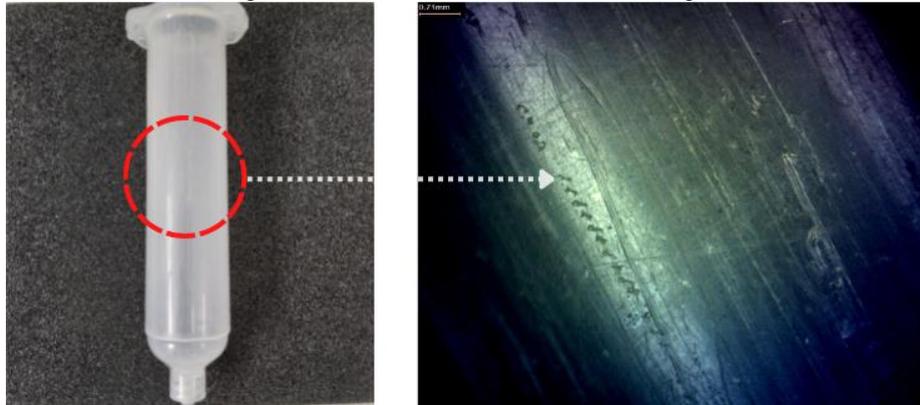


Fonte: Autor, 2022.

Para essa averiguação, foram realizados diversos ensaios de mesma composição, tendo-se como intuito a obtenção de cilindros similares. Ao verificar a seringa utilizada ao longo do ensaio, notou-se a olho nu espaços vazios na região da pasta cerâmica e de riscos na parede do material, justificados por meio da entrada de ar pelas laterais da seringa. Diante

deste fato, analisou-se microscopicamente a parede da seringa (Figura 43), já que as impressões não mantiveram o mesmo parâmetro de produto.

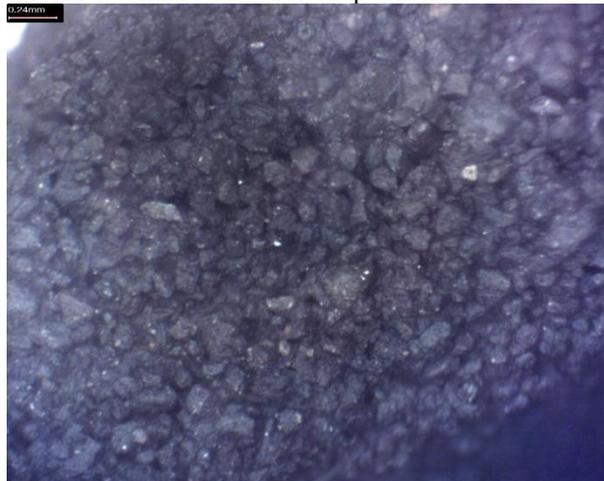
Figura 43: Análise microestrutural da seringa.



Fonte: Autor, 2022.

Pôde-se perceber a presença de um elevado grau de riscos na parede da seringa, tanto para escala macroscópica quanto microscópica (Figura 43), devido ao elevado grau de abrasividade das partículas. Esse caráter fez com que a seringa apresentasse um tempo de vida útil de dez impressões por *robocasting*, em análise laboratorial, o qual poderia influenciar no aumento do custo de produção do filtro.

Figura 44: Análise microestrutural das partículas de areia de fundição.



Fonte: Autor, 2022.

Microscopicamente, notou-se a distribuição das partículas da areia de fundição para uma análise em 0,24 mm de aumento (Figura 44). Os pontos claros presentes na amostra são das escórias de fundição, providas dos ciclos de uso. Houve também uma variabilidade entre os tamanhos das partículas, justificando a análise granulométrica realizada pelo equipamento

Mastersizer 3000E. Influenciando diretamente nas propriedades do material, percebeu-se que houve uma alteração, para cada manufatura, no grau de compactação da amostra. Mesmo considerando-a mínima, foi justificável para a redução da vida útil da seringa.

4.2 RESULTADOS DA PASTA II

Esta seção abordou os resultados providos da segunda preparação de pasta, utilizando a areia descartada de fundição em seu estado moído.

4.2.1 Moagem da matéria-prima

Dentre os produtos obtidos (Figura 45), notou-se uma coloração aproximada nos três primeiros testes, devido a presença da resina na areia. Em contrapartida, o aspecto da partícula apresentou uma tendência a sua diminuição, dessa forma aumentando a área superficial. Entre as amostras dos testes IV e V, a areia de fundição alterou sua coloração mediante a diminuição do tamanho de partícula, além da moagem em estado úmido.

Figura 45: Aspecto visual da areia de fundição de acordo com os testes realizados.



Fonte: Autor, 2023.

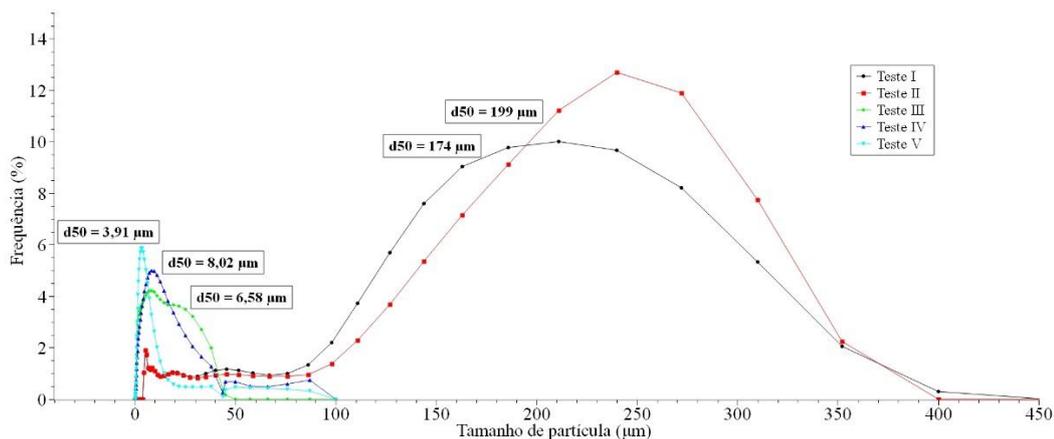
Os testes que passaram pelo processo de moagem apresentaram um aproveitamento baixo do produto final, visto que o intuito estava focalizado em diminuir ao máximo seu tamanho de partícula. Por conta disso, o teste III constou com, aproximadamente, 10% de ADF utilizável para manufatura, visto que os 90% ficaram retidos na peneira de 45 μm . Então, partiu-se para os testes IV e V, utilizando a areia retida do teste III, para viabilizar uma

forma de aproveitamento. Apesar de demonstrarem melhores resultados, estando em torno de 15% de eficiência, o tempo de duração de ensaio para obter o produto final aumentou significativamente, de 48 a 72 h.

4.2.2 Análise granulométrica

Após o processamento da areia através da etapa de moagem, foram analisadas as granulometrias dos cinco testes por meio do equipamento Mastersizer 3000E, visando convergir o aspecto de custo-benefício e gasto energético. A averiguação leva em consideração não somente os pontos citados anteriormente, mas também o comportamento da curva diante do tamanho médio e máximo de partícula obtido (Figura 46).

Figura 46: Análise granulométrica dos testes realizados.



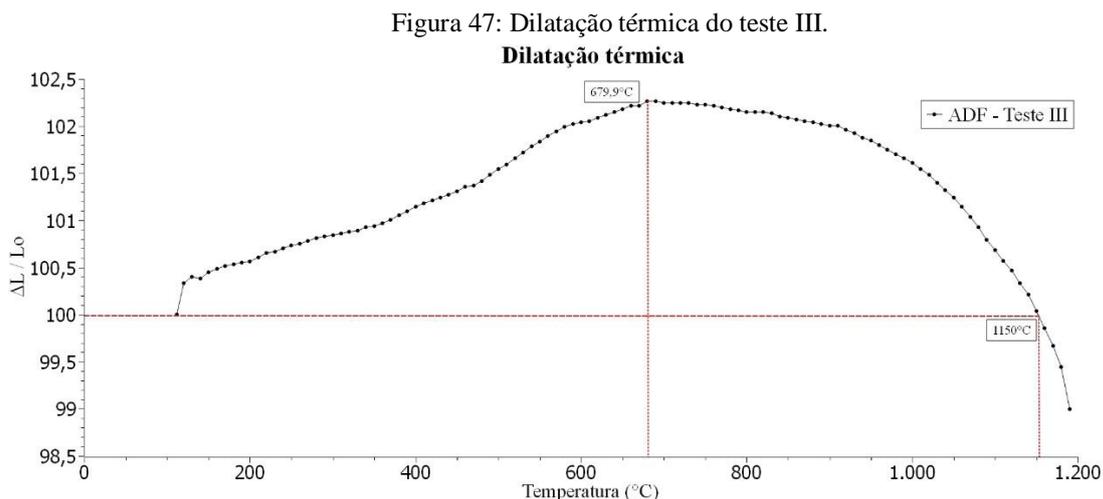
Fonte: Autor, 2023.

Verificando os testes realizados, pôde-se notar uma similaridade entre as curvas I e II, o qual foi considerada apenas em estado bruto e em processo de peneiramento em 500 µm, respectivamente. Foi perceptível que a areia sem processamento apresentou uma curva mais suavizada, homogênea e com menor d50 (tamanho médio de partícula), onde pôde ser justificada pela quebra dos aglomerados na análise granulométrica. Concluiu-se que a diferença entre as duas curvas em si é mínima comparado com os outros três testes realizados, onde envolvem uma etapa de moagem. Para o teste III, utilizando uma moagem em estado seco, mesmo que a distribuição não tenha seguido uma regularidade gaussiana, apresentou tamanho de partícula médio em 6,58 µm e uma faixa de distribuição de partícula até 45 µm. Isto foi um bom indicativo ao comparar com as distribuições dos testes IV e V, realizados por moagem gira-jarro em estado úmido, onde apresentaram uma faixa de

granulometria maior, mas com uma grande proximidade no valor de d50. Notou-se que a quebra das partículas durante a moagem de 24 h não apresentou uma produtividade tão alta comparada ao teste III, com 15 minutos de moagem. Apesar do último teste ter apresentado um aproveitamento melhor e um tamanho médio de partícula menor, ao redor de 15% de areia sólida, comparado ao teste III (10%), a moagem em estado seco apresentou uma faixa de tamanho de partícula menor. Este fator influenciou diretamente nas propriedades finais do produto, visto que houve uma diminuição do tamanho de partícula em aproximadamente 96%. Por isso, as análises seguintes foram consideradas apenas de acordo com o terceiro teste, descartando os outros previamente verificados.

4.2.3 Dilatação térmica

Ao analisar o comportamento da amostra de teste III, de acordo com o ensaio de dilatação térmica (Figura 47), pôde-se obter algumas especificações quantitativas acerca de sua expansão e retração. Para isso, a amostra foi submetida a uma variação de temperatura máxima em 1473,15 K. Já os testes que apresentaram tamanho de partícula majoritariamente próximos de 180 μm (I e II), não foram realizados. Isso se deu pelo fato de que, como as partículas estavam em estado grosseiro, o grau de compactação na matriz é baixo, e assim não havendo sustentação do corpo de prova.



Ao averiguar o gráfico, houve uma expansão térmica linear do corpo de prova até a temperatura de 953,05 K (679,9 °C), com aproximadamente 2,5% de dilatação. O patamar é justificado por conta da queima dos ligantes orgânicos. Após isso, a amostra retornou a sua

dimensão inicial, mesmo com o aumento de temperatura, até 1423,15 K (1150 °C). Entre o retorno ao estado inicial até 1473,15 K (1200 °C), ocorreu o fenômeno da retração do corpo compactado, com aproximadamente 1% de variação.

Figura 48: Comportamento de expansão do corpo de prova: a) estado inicial; b) expansão térmica; c) retorno ao ponto inicial.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 48 faz referência a uma análise comparativa dimensional do corpo de prova com o aumento da temperatura, de 112 °C a 1150 °C. Nota-se sua expansão na Figura 48b, onde em seguida retorna ao seu estado inicial em Figura 48c. Como a dilatação da areia compactada ocorreu em baixos teores, não houve uma variação significativa visual entre as amostras (Figura 48a, 48b e 48c)

4.2.4 Análise Química

A Fluorescência por Raio-X (Tabela 19), FRX, fornece a concentração mássica de óxidos presentes na amostra.

Tabela 19: FRX da ADF.

%	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	Impurezas
Teste III	2,92	0,34	1,73	0,49	0,65	1,62	84,88	0,36	7,01

Fonte: Autor, 2023.

Notou-se que o percentual de óxido presente na amostra não atingiu os 100%. Isso se deu pelo fato da presença de ligantes orgânicos/voláteis, umidade e aditivos que compõem a areia, justificando sua coloração. Através do ensaio de perda ao fogo, realizado anteriormente, notou-se um total de 4,527% de ligantes, onde perceptivelmente a areia apresentou um aspecto claro após a reação química. Outro ponto a se ressaltar foi a presença da sílica em, aproximadamente, 85% na composição. Para Andrade, Carnin e Pinto (2018), uma areia verde de alta qualidade é composta por 85 a 95% de sílica, estando de acordo com as especificações

teóricas padronizadas. Além disso, percebeu-se uma porcentagem razoável de minerais, como: potássio, cálcio, ferro, magnésio e sódio. Este fato é um indicativo que a produção da areia resinada ocorreu englobando a bentonita na composição.

4.2.5 Composição da pasta para o filtro de fundição

As composições para formar a pasta cerâmica seguiram o mesmo padrão estipulado quando utilizada areia de fundição em seu estado peneirado, em malha 500 μm (Tabela 20). Neste caso, foram adotadas as pastas que obtiveram melhor desempenho reológico e de impressão, partindo através dos parâmetros abaixo, por meio do ensaio de replicabilidade.

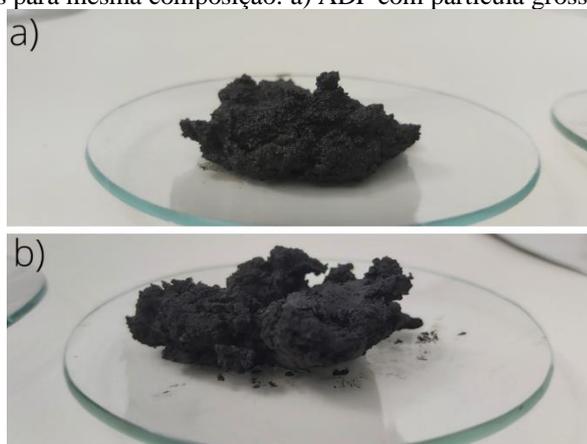
Tabela 20: Reprodução de composição de pasta da caracterização I.

ADF (%)	Água (%)	Bentonita (%)	Metassilicato de sódio (%)	Relação L/S
70	25	5	X	0,333
72	25	3	X	0,333

Fonte: Autor, 2023.

Porém, ao verificar seu aspecto reológico, seguindo o processamento estipulado pelo teste III, foi perceptível um comportamento distinto quando comparado ao seu estado inicial (Figura 49). O aumento da área superficial das partículas de areia, de acordo com a diminuição do seu tamanho pelo processo de moagem, fez com que a pasta apresentasse um aspecto seco e quebradiço, impossibilitando sua extrusão.

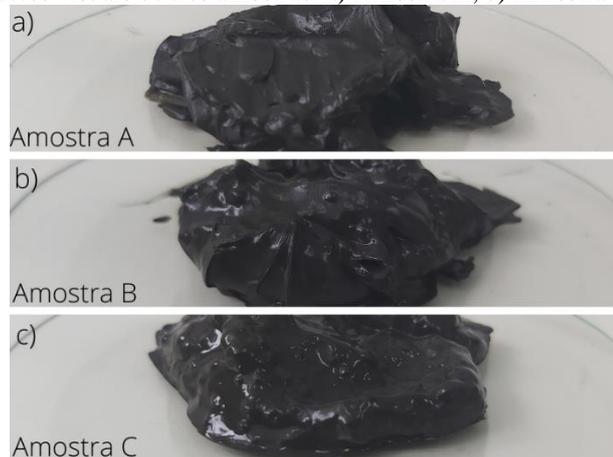
Figura 49: aspectos distintos para mesma composição: a) ADF com partícula grossa; b) ADF com partícula fina.



Fonte: Autor, 2023.

Para a mesma composição, utilizando 5% de bentonita em massa, garantiu-se um aspecto mais viscoso da pasta, em Figura 49a. Esta característica de pasta possibilitou a impressão do protótipo à verde, como discutido no tópico anterior. Já para Figura 49b, percebeu-se que mesmo impondo elevadas pressões, não houve a possibilidade de extrusão da pasta cerâmica, visto que sua rigidez impossibilitou o escoamento. Mesmo mantendo a concentração de líquido/sólido (Relação L/S) igualmente, a diminuição do tamanho de partícula da ADF em 96% influenciou diretamente na possibilidade de realização do processo de extrusão da pasta cerâmica. Com isso, foram adotados testes empíricos com proporções de plastificante e lubrificante distintos (Tabela 13), para que fosse possível produzir o protótipo do filtro de fundição.

Figura 50: Aspectos visuais de três amostras: a) Amostra A; b) Amostra B; c) Amostra C.



Fonte: Autor, 2023.

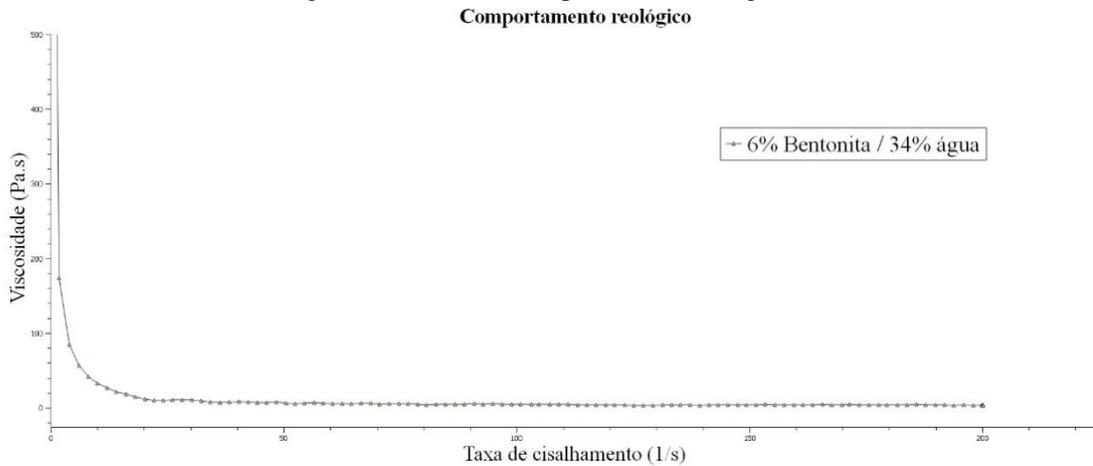
Foi perceptível a diferença de aspecto visual entre as três pastas analisadas (Figura 50), uma vez que se diminuiu a necessidade da imposição de pressão para extrusão da pasta com o aumento do teor de água. Com isso, a pasta de maior consistência foi da amostra A (Figura 50a), de viscosidade mais acentuada. Por causa disto, as manufaturas ocorreram apenas através desta composição.

4.2.6 Aspecto reológico II

Após o ensaio de aspecto da extrudabilidade das amostras, foi realizado o ensaio de reologia, com intuito de averiguar o comportamento reológico da pasta cerâmica, uma vez que deveria estar adequada para manufatura aditiva do filtro de fundição. Por conta da limitada

quantidade de ADF recebida pela empresa de fundição, além do aproveitamento de 10% da areia após a teste III, apenas um único ensaio reológico foi realizado.

Figura 51: Curvas de comportamento reológico II.



Fonte: Autor, 2023.

Analisando graficamente a Figura 51, foi notável um comportamento com a mesma tendência visualizada nas reologias obtidas para caracterização de pasta I, seguindo a pseudoplasticidade por aproximação de Herschel-Bulkley. A curva manteve um caráter suavizado ao decorrer do aumento da taxa de cisalhamento. Segundo a Tabela 21, o coeficiente angular (r) apresentou um valor adequado para o modelo aproximado, além do índice de comportamento do fluido (n) adequado ao caráter pseudoplástico.

Tabela 21: Dados reológicos II.

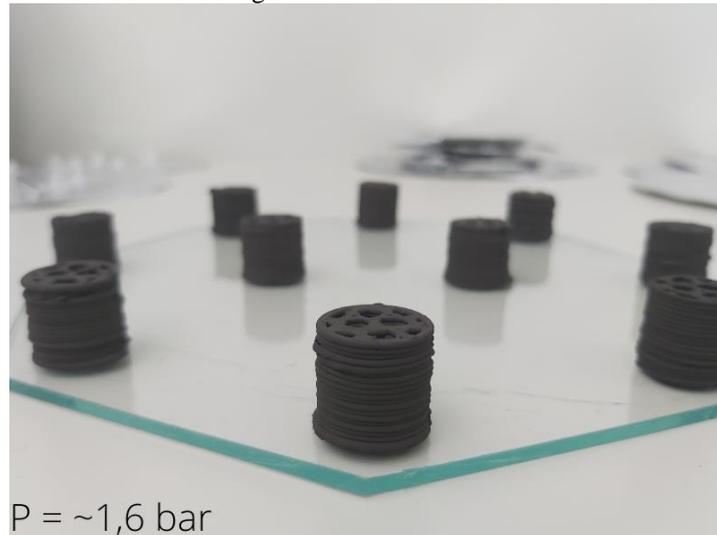
Coefficiente angular (r)	Índice de comportamento do fluido (n)
0,9936	0,009890

Fonte: Autor, 2023.

4.2.7 Resultado das impressões II

A partir da composição de amostra A, foram impressos os corpos de prova (Figura 52) para o ensaio de compressão. Como era necessário realizar uma análise comparativa entre os filtros de fundição revestido com metassilicato de sódio e sinterizado, e a norma *ASTM C133 97* exige, no mínimo, uma amostragem de ensaios consideráveis para garantir a confiabilidade e precisão do processo, dispôs-se de dez filtros de mesma dimensão inicial.

Figura 52: Filtros à verde.



Fonte: Autor, 2023.

Como havia a presença de água na composição, para garantir a lubrificação da pasta e consequentemente sua extrusão, ocorreu naturalmente o fenômeno de retração linear e diametral. Os corpos de prova foram manufaturados através da mesma composição e dimensão, mantendo os parâmetros da impressora 3D, para que se atingisse valores finais similares. Para garantir a secagem do filtro, foi proposto um período de 72 h em temperatura ambiente (20 °C / 293,15 K), para que se obtivesse uma maior homogeneidade. Esse fator fez com ocorresse adequadamente a realização do ensaio de compressão, uma vez que era exigido o padrão de corpo de prova de dimensões 1:1. Em contrapartida, a precisão operacional para realizar a manufatura aditiva apresentou uma dificuldade de controle de pressão para extrusão do filamento. A variação deste parâmetro ocorreu por conta dos distintos tamanhos de partículas analisados pelo ensaio granulométrico, gerando o fenômeno de entupimento no bico, no qual justificou a variação da pressão. Por isso, considerou-se o valor aproximado de 1,6 bar para fabricação dos filtros.

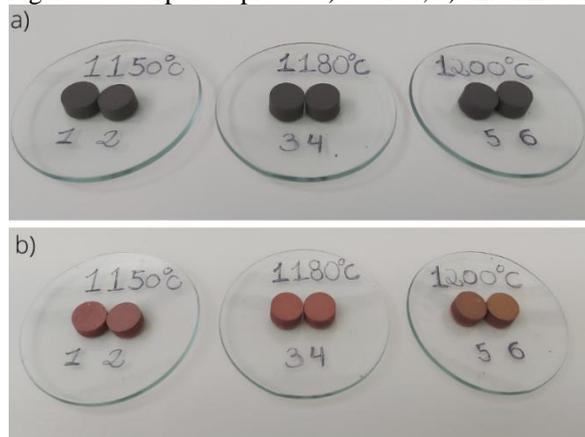
4.2.8 Temperatura de sinterização

Para realizar a sinterização ou “queima” do filtro verde, deve-se conhecer a temperatura de sinterização do material, o qual é considerada entre a faixa de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão. Como a matéria-prima trabalhada era na forma resinada, e não se conhecia sua origem, havia uma grande amplitude de valores possíveis de sinterização a

serem considerados. Segundo Romanus (1991), as areias que apresentam um alto teor de sílica em sua composição têm uma temperatura de fusão de 1728 °C.

Por conta disto, foi realizado um ensaio quantitativo tratando de corpos de prova de 10 mm de diâmetro cada. Baseando-se nos valores de temperatura dentro o período de retração, obtidos por meio do ensaio de dilatação térmica, foram analisadas três temperaturas distintas (1150 °C, 1180 °C e 1200 °C), com duas amostras para cada ponto. Os corpos de prova (Figura 53), compactados através de uma prensa hidráulica, foram submetidas as temperaturas propostas da faixa de retração, e assim medidos e avaliados dimensionalmente após seu resfriamento. Padronizando os parâmetros de queima, as amostras foram aquecidas por uma taxa de 10 °C/min, mantendo a temperatura estipulada constante por duas horas, seguido de um resfriamento lento.

Figura 53: Corpos de prova: a) à verde; b) sinterizados.



Fonte: Autor, 2023.

Não houve uma variação dimensional significativa entre os seis corpos de prova, considerando uma análise das duas dimensões. As diferenças mínimas medidas decorreram de acordo com o erro do equipamento de paquímetro, justificando um valor aproximado linearmente e desprezível diametralmente. Como as amostras apresentaram um aspecto denso e compactado, foi realizado o ensaio de porosidade pelo princípio de Arquimedes, onde se avaliou o caráter de densificação. Medidos em ar e em água, calculou-se a densidade de cada amostra, obtendo a porcentagem de porosidade total referente à densidade teórica de 2,65 g/cm³ da literatura (ROMANUS, 1991).

Tabela 22: Porosidade dos corpos de prova.

Amostra	Retração linear	Densidade aparente	Densidade teórica	Densificação (%)	Porosidade (%)
---------	-----------------	--------------------	-------------------	------------------	----------------

	(%)	(g/cm ³)	(g/cm ³)		
I	2%	2,137	2,65	80,642	19,358
II	2%	2,142		80,820	19,180
III	2%	2,150		81,132	18,868
IV	2%	2,155		81,320	18,680
V	2%	2,083		78,603	21,397
VI	2%	2,099		79,207	20,793

Fonte: Autor, 2023.

Considerando que as máximas densificações obtidas, dentre os corpos de prova compactados, foram das amostras III e IV, garantiu-se que a temperatura de submissão foi a mais próxima da sinterização real da areia de fundição (Tabela 22). Com isso, a aproximação quantitativa foi no valor de 1180 °C para queima do filtro de fundição, mantendo-a no patamar durante duas horas, desprezando o controle de resfriamento do processo.

4.2.9 Sinterização e Revestimento

Neste tópico, os corpos de prova foram segmentados em duas formas de pós-processamento: sinterizados e revestidos. Através da sinterização, as amostras foram queimadas por meio do forno mufla a 10 °C/min até o patamar de máxima densificação, em 1453,15 K (1180 °C), pré-estabelecido anteriormente. Mantendo-os constantes por 2 h nesta temperatura, o patamar seguiu para a etapa de resfriamento, não havendo controle operacional. O ciclo fez com que ocorresse a mudança de coloração dos filtros, providos por conta da queima dos ligantes orgânicos, em 953,15 K (680 °C), com uma dilatação máxima de 2,5% (Figura 47). Além do mais, a sinterização proporcionou o aumento da presença de interstícios microestruturais, uma vez que ocorreu um crescimento de dimensões dos poros. Este fator influenciou no grau de compactação da amostra, já que houve a tendência de densificação da matriz.

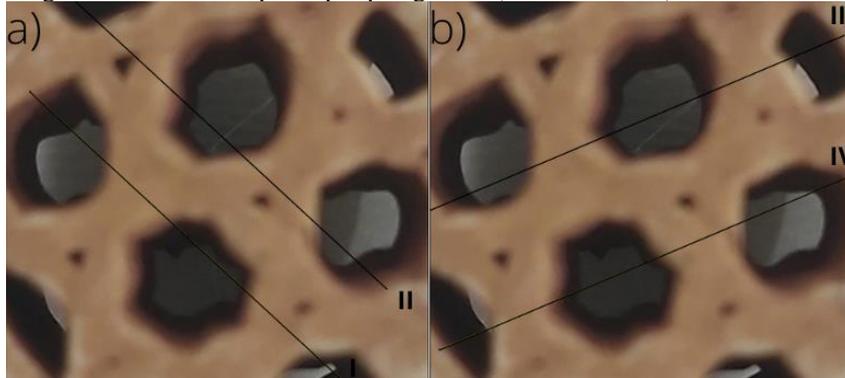
Figura 54: Corpos de prova revestidos, à esquerda, e sinterizados, à direita.



Fonte: Autor, 2023.

Para a outra amostragem, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de revestimento por aspersão (Figura 54), por meio de uma pistola pulverizadora. Através do controle do jato e da pressão do sistema, a superfície do filtro foi revestida pela solução de metassilicato de sódio, endurecendo-a. A partir da diluição da solução aquosa para 59% de água em massa, pôde-se realizar o jateamento. Diferentemente das amostras sinterizadas, os corpos revestidos mantiveram a resina em sua composição, uma vez que não houve sua queima. Outro aspecto importante foi do aumento da quantidade de material presente, influenciando proporcionalmente na massa do filtro. Essa adição de matéria-prima foi significativa para definir a porcentagem de porosidade, já que a densidade aparente apresentou variação.

Figura 55: Análise de poros por polegadas: a) linhas I e II; b) linhas III e IV.



Fonte: Autor, 2023.

Mesmo com as dimensões menores que uma polegada, realizou-se a medição de *pores per inch* proporcionalmente (Figura 55), considerando retas paralelas de mesmo comprimento. Utilizando o *software ImageJ*, concluiu-se que, para 25,4 mm de comprimento, o filtro de fundição apresentou, em média, o total de 5 ± 1 *ppi*. Para dimensões dobradas,

havia possibilidade de se obter o valor de 10 poros por polegada linear, estando condizente com o valor da literatura.

4.2.10 Porosidade

Após a análise do ensaio de picnometria, com relação a areia descartada de fundição do teste III, percebeu-se uma similaridade entre as densidades avaliadas (Tabela 23), havendo uma pequena variação quantitativa desprezível. A convergência de valores solidifica o fato de que a ADF era rica em sílica, justificando sua refratariedade em aplicação industrial.

Tabela 23: Densidades teórica e real.

	Densidade
Areia de sílica teórica (ROMANUS, 1991)	2,65 g/cm ³
Areia descartada de fundição (densidade real)	2,7090 +- 0,0012 g/cm ³

Fonte: Autor, 2023.

Para a densidade geométrica, foram avaliados os produtos à verde, pós-queima e revestido. Através do paquímetro, foram definidas as dimensões dos filtros de fundição, considerando as médias e os desvios padrão, possibilitando encontrar as medidas com maior precisão. Além disto, foram tratadas as variáveis de retração linear e diametral, uma vez que se aproximou como média. Os erros de medição foram considerados de acordo com o erro do equipamento, conforme 0,10 mm para o paquímetro.

Tabela 24: Retrações dos corpos de prova à verde.

CP à verde	Altura (mm)	Retração (%)	Diâmetro (mm)	Retração (%)
1	17,20	14,00	17,70	11,50
2	17,00	15,00	17,20	14,00
3	17,30	13,50	17,50	12,50
4	17,00	15,00	17,00	15,00
5	17,20	14,00	17,30	13,50
6	17,00	15,00	17,10	14,50
7	17,00	15,00	17,20	14,00
8	16,20	19,00	16,80	16,00
9	16,90	15,50	16,80	16,00
10	17,10	14,50	17,10	14,50
Média	16,99	15,05	17,17	14,15
Desvio padrão	0,30	1,52	0,29	1,58

Fonte: Autor, 2023.

Para Tabela 24, houveram algumas divergências milimétricas entre dimensões dos corpos de prova, já que não ocorreu uma secagem em atmosfera controlada. Esse gradiente

influenciou nas retrações de secagem, diferenciando-as por, aproximadamente, 1%. Porém, a diferença não se tornou considerável o suficiente para anular o padrão exigido pela norma *ASTM C133*.

Tabela 25: Retrações dos corpos de prova sinterizados.

CP Sinterizado	Altura (mm)	Retração (%)	Diâmetro (mm)	Retração (%)
1	17,10	14,50	17,50	12,50
2	16,50	17,50	16,60	17,00
3	17,10	14,50	17,20	14,00
4	16,70	16,50	16,90	15,50
5	16,90	15,50	17,10	14,50
Média	16,86	15,70	17,06	14,70
Desvio padrão	0,26	1,30	0,34	1,68

Fonte: Autor, 2023.

Após realizar a etapa de sinterização, não houve uma variação considerável nas médias das dimensões, sendo 0,7% para altura e 0,6% no diâmetro, condizente ao avaliar os resultados individualmente (Tabela 25). Além disso, o desvio padrão de amostragem se manteve praticamente constante, estando próximo do valor de 0,30. Ao avaliar as retrações linear e diametral, notou-se que estavam acima dos valores dos corpos de prova à verde. Este fenômeno foi justificado pela queima dos ligantes orgânicos, gerando vazios microestruturais.

Tabela 26: Retrações dos corpos de prova revestidos.

CP revestido	Altura (mm)	Retração (%)	Diâmetro (mm)	Retração (%)
6	16,90	15,50	17,00	15,00
7	16,80	16,00	17,10	14,50
8	16,10	19,50	16,90	15,50
9	16,70	16,50	16,80	16,00
10	17,10	14,50	17,00	15,00
Média	16,72	16,40	16,96	15,20
Desvio padrão	0,38	1,88	0,11	0,57

Fonte: Autor, 2023.

Para os corpos de prova revestidos (Tabela 26), foi perceptível uma diferença razoável em relação aos filtros à verde, visto que a aplicação do metassilicato de sódio em solução proporcionou um aumento médio das retrações linear e diametral em 1,6 e 1,2%, respectivamente. Os valores de desvio padrão se mantiveram próximos dos previamente medidos, podendo destacar a dimensão diametral do filtro. Apesar de seu baixo tempo de secagem, em razão da característica aglutinante, a água pode influenciar em fenômenos de empenamento das amostras, estando mais propensas a falhas catastróficas. Por conta disto, deve-se realizar um balanceamento adequado da solução, além de seu controle de jateamento.

A partir da utilização da balança analítica, partiu-se para as medições de massa, já que foi necessário para comparar os três padrões estabelecidos. Os corpos de prova foram separados em duas amostragens de cinco, já que a norma *ASTM C133* exige um valor mínimo para obter precisão no ensaio de compressão. Considerou-se a densidade real obtida no ensaio de picnometria, visto que estava adequadamente próximo do valor teórico.

Tabela 27: Porosidades das três análises do filtro.

CP	Massa à verde (g)	Massa sinterizado (g)	Massa revestido (g)	Densidade à verde (g/cm ³)	Densidade de sinterizada (g/cm ³)	Densidade revestido (g/cm ³)	Porosidade à verde (%)	Porosidade sinterizado (%)	Porosidade revestido (%)
1	5,6901	5,1540	X	1,3444	1,2531	X	50,3698	53,7434	X
2	5,5345	5,0449	X	1,4011	1,4127	X	48,2782	49,0844	X
3	5,3267	4,8284	X	1,2801	1,2152	X	52,7462	55,1408	X
4	5,0070	4,5597	X	1,2976	1,2172	X	52,1004	55,0668	X
5	4,8245	4,3910	X	1,1933	1,1313	X	55,9513	58,2376	X
6	5,4799	X	5,4878	1,4036	X	1,4306	48,1877	X	47,1901
7	6,0155	X	6,0404	1,5229	X	1,5656	43,7831	X	42,2083
8	4,8902	X	4,9293	1,3618	X	1,3649	49,7317	X	49,6166
9	5,2904	X	5,3154	1,4122	X	1,4358	47,8704	X	46,9968
10	4,4558	X	4,5107	1,1346	X	1,1621	58,1169	X	57,1006
Média	5,2027	4,7956	5,2567	1,3352	1,2459	1,3918	49,3114	54,2546	48,6225

Fonte: Autor, 2023.

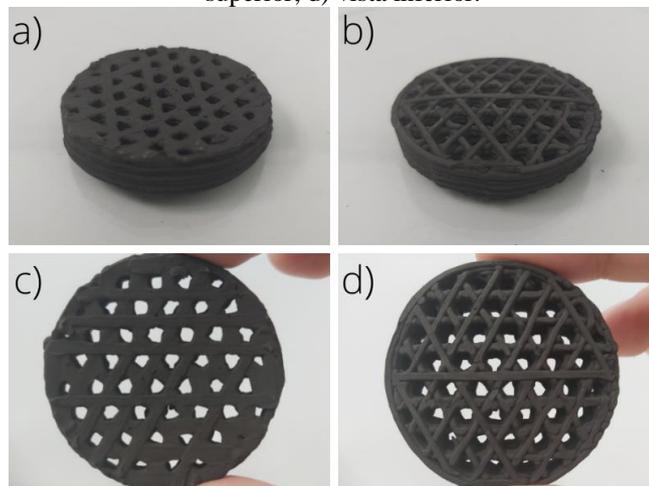
Para os corpos de prova sinterizados (Tabela 27), ocorreu uma redução aproximada de 8% da massa, justificada pela perda de ligantes orgânicos de acordo com a curva de queima. Além do mais, houve um aumento de 5% na porcentagem de porosidade presente, resultado da atuação do sumidouro de vacâncias dos poros grandes em relação aos pequenos. Ao contrário deste, os corpos de prova revestidos atuaram de forma inversa, garantindo um aumento de 1% de massa nas amostras. Essa proporção foi resultado da presença do metassilicato de sódio, onde a adição desta matéria-prima influenciou nos percentuais de porosidade, diminuindo em 0,7%, em média. Este fato ocorreu por conta da densificação do

filtro, apenas externamente, visto que sua presença na composição diminuiria a propriedade de *printability*.

4.2.11 Protótipo de filtro

Considerado como um dos objetivos propostos no trabalho, realizou-se a manufatura aditiva do filtro de fundição utilizando uma escala dimensional próxima da aplicável industrialmente. A partir das dimensões iniciais de 8 mm de altura por 50 mm de diâmetro estipuladas no software *Blender*, foi possível manter sua robustez ao utilizar um bico de 1,6 mm, diferentemente dos filtros de menor escala, onde apenas obtiveram êxito com bico de 1,19 mm. Partindo dos mesmos parâmetros de processo utilizados para os ensaios anteriores, o filtro de fundição apresentou uma boa resolução, porém com um intenso gradiente de secagem. Pôde-se notar na Figura 56a que ocorreu o fenômeno de empenamento na peça à verde, causado pela secagem em ambiente não-controlado atmosféricamente. O filtro aparentou uma geometria côncava, diferentemente da Figura 56b, convexa.

Figura 56: Protótipo de filtro de fundição à verde: a) vista lateral superior; b) vista lateral inferior; c) vista superior; d) vista inferior.



Fonte: Autor, 2023.

Os valores de retração de secagem foram inferiores aos obtidos em menor dimensão, podendo ressaltar a retração linear, próximo de 4% (Tabela 28). Como o diâmetro do bico extrusor era aproximadamente 25% maior, influenciou inversamente na pressão de trabalho, necessitando de menores imposições para extrusão. Esse ponto possibilitou a passagem de partículas de maiores dimensões, e conseqüentemente gerou uma menor probabilidade de

entupimento. Por isso, para este caso, o filtro de fundição foi manufaturado com pressão constante de 1,30 bar.

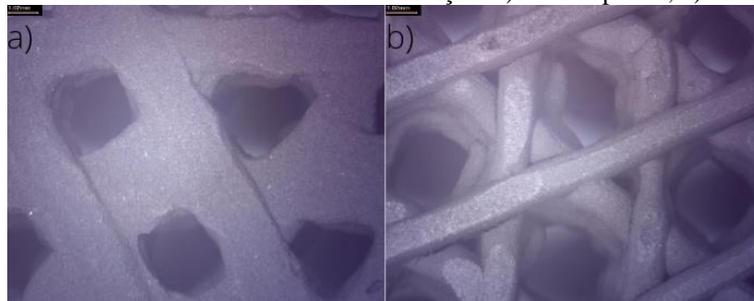
Tabela 28: Retrações do protótipo à verde.

CP	Bocal de extrusão (mm)	Pressão de trabalho (bar)	Diâmetro inicial (mm)	Diâmetro final (mm)	Retração diametral (%)	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Retração linear (%)
Filtro	1,60	1,30	50,00	45,15	9,70	8,00	7,70	3,75

Fonte: Autor, 2023.

Notoriamente, sua microestrutura se diferenciou de forma considerável àquela de partícula mais grossa, no qual influenciava significativamente no tempo de vida útil da seringa. Além disso, pela grande diferença entre o tamanho de partícula e sua respectiva homogeneidade milimétrica, não houve um desgaste abrasivo tão intenso para que ocorresse seu intercâmbio. Foi observado que, na Figura 57a, não havia uma dimensão constante entre os poros da última camada, resultados do controle de processo. Diferentemente ao visualizar a Figura 57b, o qual apresentou a geometria *stars* com maior resolução.

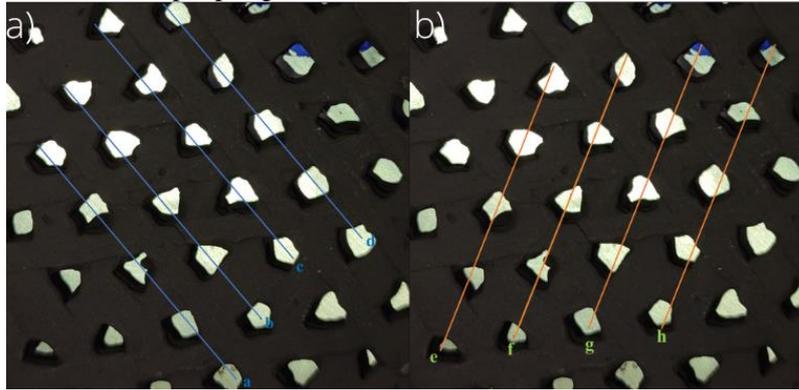
Figura 57: Microestrutura ótica do filtro de fundição: a) vista superior; b) vista inferior.



Fonte: Autor, 2023.

Para realizar a averiguação da quantidade de poros por polegada linear (*ppi*), por meio do *software ImageJ*, traçaram-se quatro retas paralelas, como na Figura 58a e Figura 58b, de mesma dimensão. Cada reta apresentou uma unidade de polegada, convertendo-a a aproximadamente 25,4 mm. Considerando a contagem dos poros somente àqueles envolvidos pelo traçado, teve-se que o filtro de fundição apresentou 5 ± 1 *pores per inch*. O elevado desvio padrão foi justificado pelos poros quase completos pela linha, porém desprezados. Para Zhang *et al.* (2023), considerou-se quantitativamente uma variabilidade de filtros de 10 a 50 *ppi*, por meio do método de estereolitografia 3D, para simulações e análises mecânicas.

Figura 58: Porosidade por polegada linear do filtro: a) linhas a, b, c, d; b) linhas e, f, g, h.

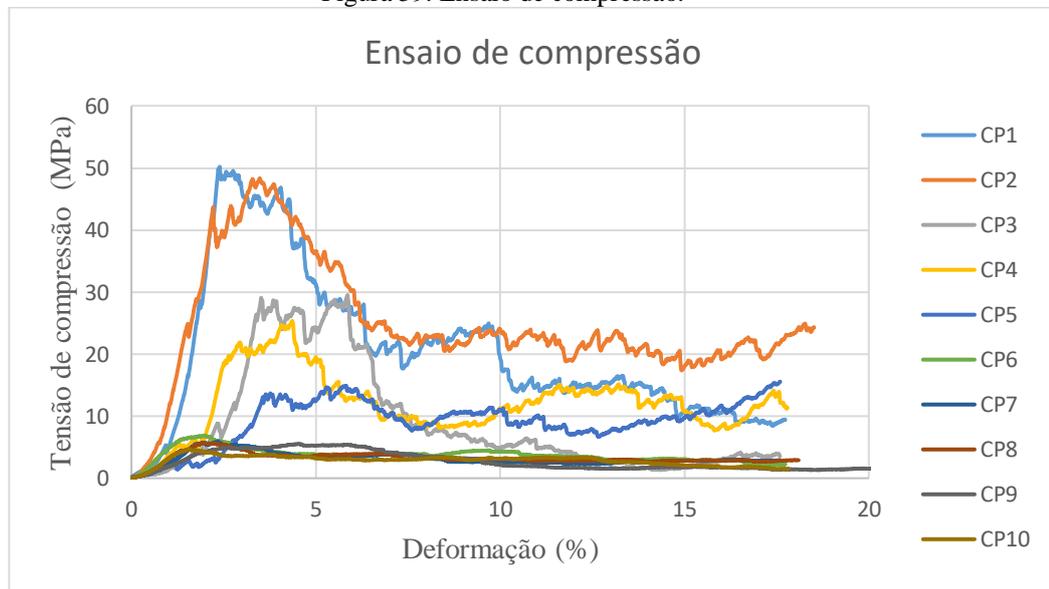


Fonte: Autor, 2023.

4.2.12 Resultados de resistência à compressão

Os corpos de prova revestidos e sinterizados seguiram a parametrização proposta pela *American Society for Testing and Materials*, submetidos a uma taxa de deslocamento de 1,3 mm/min, até sua ruptura catastrófica. As amostras foram analisadas e comparadas com o resultado da literatura para um filtro de fundição, produzido por espuma cerâmica.

Figura 59: Ensaio de compressão.



Fonte: Autor, 2023.

As amostras foram submetidas a uma célula de carga de 10 kN, posteriormente plotadas em *Microsoft excel*. Sequenciadas de acordo com o número do corpo de prova, escolheram-se aleatoriamente as amostras em seu estado à verde. As curvas superiores demonstraram caráter similar a uma análise de comportamento cerâmico, onde seguiram por

três etapas: linearização com imposição de tensão em regime elástico; platô; ruptura dos poros e vazios. Estas foram curvas relacionadas às amostras sinterizadas (Figura 59), no qual passaram por um processo de queima de 1180 °C. A variabilidade foi maior, comparada às amostras revestidas, visto que a imposição de altas temperaturas causaram o fenômeno de concentração de tensão, além de parâmetros de processo variáveis. Porém, houve uma significativa sobreposição de tensão de compressão, podendo atingir valores próximos de 50 MPa, e mantendo uma média de $34,42 \pm 12,24$ MPa (Tabela 29).

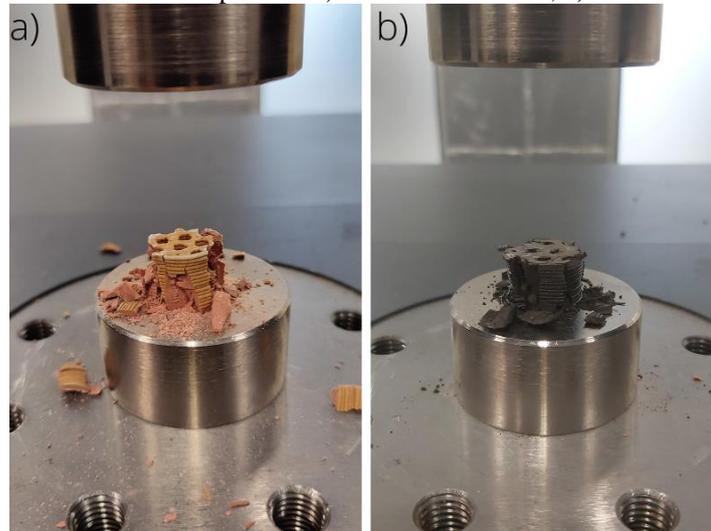
Tabela 29: Resultados de resistência à compressão dos corpos de prova.

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tensão (MPa)	53,22	48,34	29,55	25,36	15,58	6,82	5,93	5,69	5,52	4,69

Fonte: Autor, 2023.

Para as amostras revestidas, pôde-se perceber uma proximidade maior, visto que sua ruptura ocorreu de forma suavizada. Porém, apesar de apresentar um desvio padrão menor, os valores de tensão estiveram, em média, $5,73 \pm 0,73$ MPa. Isso correspondeu a 16% da resistência obtida para corpos de prova sinterizados, porém acima de resultados para espumas cerâmicas fabricadas pelo método de Estereolitografia 3D, de 3,5 MPa (ZHANG *et al.* 2023).

Figura 60: Ensaio de compressão: a) amostra sinterizada; b) amostra revestida.



Fonte: Autor, 2023.

Em função dos resultados comparativos entre os corpos de prova sinterizados e revestidos após cessar a ruptura (Figura 60), percebeu-se que a propagação da trinca, para os dois casos, ocorreu de forma lateral. Esse fato estava diretamente interligado ao parâmetro de manufatura aditiva, visto que a fabricação de modelos complexos decorreu com certa

dificuldade. Apesar das irregularidades apresentadas nas amostras ensaiadas, os resultados foram relativamente bons e dentro das expectativas para a aplicação. Esses fatores são de um indicativo positivo para uma possível aplicabilidade industrial, já que a futura geração de filtros de fundição por meio da impressão 3D se mostrou muito promissora.

5 CONCLUSÃO

Visando convergir os aspectos ambientais e econômicos, buscou-se fabricar um filtro de fundição partindo da matéria-prima industrial principal (areia descartada de fundição), que tem como objetivo a produção de moldes de areia para peças fundidas. Visto que muitas indústrias não apresentam planos de ação adequados para o reaproveitamento da areia de fundição, descartando-as em aterros sanitários, o trabalho de conclusão de curso apresentou como foco a economia circular deste material. Partindo-se de ensaios laboratoriais, encontrou-se uma forma de reaproveitamento parcial com 10% de eficiência, diante dos equipamentos dispostos.

Foi perceptível a influência do tamanho de partícula nas propriedades da pasta cerâmica, assim como para os distintos parâmetros de processo. Após sua redução em 96%, não houve um desgaste abrasivo intenso para o qual ocorresse a troca de seringa para realizar a manufatura aditiva, visto que seu tempo de vida útil para uma partícula grossa era intensamente limitante.

O filtro de fundição apresentou um bom comportamento reológico e mecânico diante dos experimentos realizados, podendo destacar o produto sinterizado, com elevada resistência à compressão, em média, a 34,45 MPa. Essa propriedade sobrepõe as encontradas na literatura em até dez vezes, podendo considerá-lo com grande indicativo para sua futura aplicação, já que deverá suportar elevadas pressões de trabalho. Apesar da necessidade de pós-processamento da areia de fundição, apresentou uma viabilidade em caráter industrial. Além disso, os valores dos produtos revestidos, apresentaram, em média, 5,73 MPa, onde é considerada uma resistência compressiva quase duas vezes maior à espuma cerâmica.

Apesar do elevado desvio padrão obtido para os ensaios, pode-se justificar sua variabilidade por conta da sensibilidade de parâmetros do processo, como: controle de temperatura de secagem, diâmetro do filamento em relação a pressão de trabalho, defeitos internos, porosidade, concentrados de tensão, umidade, tempo de secagem, entre outros. Porém, pôde-se concluir que, com os resultados obtidos, notou-se certa aptidão para empregabilidade do protótipo do filtro no ramo de fundição.

REFERÊNCIAS

ACCORSINI, Amanda. **MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: UMA REVISÃO NA LITERATURA**. 2022. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

ALCALDE, Eduard; WILTGEN, Filipe. **ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA: PASSADO, PRESENTE E FUTURO**. Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, nov. 2018.

A. M'BARKI; L. BOCQUET; A. STEVENSON. **Linking Rheology and Printability for Dense and Strong Ceramics by Direct Ink Writing**. Sci Rep. vol. 7. no 1. dez. 2017. doi: 10.1038/s41598-017-06115-0.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 133 - 97: **Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories**. West Conshohocken: Astm International, 2003.

ANDRADE, Leonardo de Brito; CARNIN, Raquel Luiza Pereira; PINTO, Roberto Caldas de Andrade. **Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento Portland: análise do agregado**. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1-14, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0494>.

ANDRIANI, Karla Furtado. **EFEITO DA ADSORÇÃO DE SURFACTANTES CATIÔNICOS E ANIÔNICOS NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS, REOLÓGICAS E ELETROCINÉTICAS, DE SUSPENSÕES DE BENTONITA**. 2009. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ANNUAL FALL TECHNICAL CONFERENCE, 66., 2019, Fairburn. **Enhanced Investment Casting Quality Using 3D-Printed Ceramic Filters**. [S.I]: Renaissance Services Inc. And Ici, 2019.

ARABI, Thamyres Rollemberg Aboud. **Otimização da injetabilidade de uma pasta de β -TCP para fabricação de scaffolds por robocasting**. 2019. 33 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2019.

ARAUJO, Vinicius Cavalcante. **MANUFATURA ADITIVA E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA: UMA REVISÃO DE LITERATURA**. 2021. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Indústria de fundição cresce +20,3% em 2021**. 2022. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/industria-de-fundicao-cresce-203-em-2021/>. Acesso em: 26 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **CEMP 120: MATERIAIS DIVERSOS E PROCESSO DE AREIA A VERDE PARA FUNDIÇÃO - DETERMINAÇÃO DA PERDA AO FOGO**. Joinville: Comissão de Estudos de Matérias Primas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **REUTILIZAÇÃO**. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/solucoes-adf/reutilizacao/>. Acesso em: 30 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). **A 3ª geração dos depósitos de areias descartadas de fundição - ADF**. 2008b. ABIFA. Disponível em: . Acesso em: 20 out. 2022.

BALDAM, R. L. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. Éd. Érica, 1ª ed. São Paulo, 2013.

BASKERVILLE, R. L.; STAGE, J. **Controlling Prototype Development through Risk Analysis**. MIS Quarterly, Vol. 20, No. 4, p 481-504, 1996.

BORGES, Paulo César. **Resistência à corrosão de aços sinterizados e sinterizados tratados por plasma**. Florianópolis, SC: 1998. 206 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Tecnologia. Programa em PósGraduação em Engenharia Mecânica.

BARBA, A. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas.** [S.l.]: Instituto de Tecnología Cerámica, 2002. Citado na página 69.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte. um estudo sistemático dos fundamentos de transporte de matéria, energia e quantidade de movimento.** 2. ed. São Paulo: Editora LTC, 2006.

BRAGA, Adriano Cesar Calandrini. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TAMANHO DE PARTÍCULAS NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO SUÇO DE ABACAXI “PÉROLA” (Ananas comosus (L.) Merr.).** 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

CASOTTI, Bruna Pretti; BEL FILHO, Egmar Del; CASTRO, Paulo Castor de. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.33 , p. 121-162, mar. 2011

CHEGATTI, Schirlene. **APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA, CERÂMICA VERMELHA E FRITAS CERÂMICAS.** 2004. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **METALURGIA DO PÓ: técnica e produtos.** 3. ed. São Paulo: Abm, 1992.

CYCHOSZ, Dan. **Demystifying Fluid Turbulence, Velocity and Flow Measurement.** 2018. Disponível em: <https://www.automation.com/en-us/articles/2018/demystifying-fluid-turbulence-velocity-and-flow-me>. Acesso em: 28 set. 2022.

DANTAS, J. M. **Montagem, Comissionamento e Operação de um Sistema de Recuperação de Areia de Fundição: Regenerador Térmico - Plano de Trabalho da Fase II.** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – São Paulo. Nov. 2003.

FAGUNDES, A. B. ; VAZ, C. R. ; OLIVEIRA, I. L. **Caminhos para a Sustentabilidade do Setor de Fundição no Brasil**. In: XII SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, 2009, São Paulo.

FARIA, Mónica dos Santos. **Fabrico rápido de produtos em porcelana por robocasting**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2016.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. 2 ed. New York: Springer, 2015.

GUIDORIZZI, Hamilton Luiz. **Um Curso de Cálculo**. Vol. 2 - 5ª Ed. Editora: LTC. 2011.

GUIMARÃES, A., P. **A Tecnologia do Silício**. Instituto de Tecnologia da Bahia .2. Bahia, 1952.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO/ASTM 52900:2015 (E): **Additive manufacturing: General principles: Terminology**. Geneve, Switzerland: ISO, 2015.

J. Keep. **A Guide to Clay 3D Printing**. 2020.

KLEIN, A. N. et al. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, São Paulo, 2009. Acesso em: 17 out. 2022.

KONDIC, V. **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. São Paulo, Polígono,1973.

LEWIS, J.A. **Colloidal Processing of Ceramics**. Journal of the American Ceramic Society, 83: 2341-2359 (2000). <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01560.x>

LEWIS, J.A. **Direct-write assembly of ceramics from colloidal inks**, Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 6 (3) (2002) 245-250.

LIVI, Celso Pohlmann. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte: um texto para cursos básicos**. Rio de Janeiro: Ltc, 2004. 206 p.

MARIA, Isabella Clerici de; CANTARELLA, Heitor. **Frações granulométricas em amostras de solo: classes de tamanho e informações para o Ensaio de Proficiência**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2020.

MARIOTTO, C.L. **Regeneração de Areias: Uma Tentativa de Discussão Sistemática**. Fundação & Matérias – Primas: Caderno Técnico, p. A a T, 2000^a.

MARTINI, Natália Cristina. **REUSO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO PARA A CONFECÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO ESTRUTURAL**. 2017. 72 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Londrina, 2017.

MARTINS, Mateus Melo. **CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICO DE ÓLEOS LUBRIFICANTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE REFRIGERAÇÃO**. 2022. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MARZI, Anna de. **Fabricação aditiva de suportes 3D porosos de um vidro bioativo isento de alcalinos para aplicações médicas**. 2017. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2017.

MASTELLA, M. A. et al. (2014) **Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand**. *Waste Management*, v. 34, 8. ed., p. 1495-1500. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1400052X>>. Acesso em: 29 de outubro de 2022.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy**. 2013.

MEYER, Fabian. **Performing rheological tests in oscillation with the HAAKE Viscotester iQ Rheometer**. Disponível em: <https://assets.thermofisher.com/TFS->

Assets/MSD/Application-Notes/V279-e-Performing-rheological-tests-in-oscillation-with-the-HAAKE-Viscotester-iQ.pdf. Acesso em: 01 dez. 2022.

MORETTIN, Pedro Alberto; HAZZAN, Samuel; BUSSAB, Wilton de Oliveira. **Cálculo – Funções de uma e várias variáveis**. 3. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2012.

MORO, N.; PAEGLE, A. A. **Processos de fabricação – Fundição**. 2007. Disponível em: <http://norbertocefetsc.pro.br/downloads/fundicao.pdf>. Acesso em: 27 set. 2022.

MOURA, Ana; FONTA, Didier; JORGE, Hélio. **Manufatura aditiva de peças cerâmicas por FDM: teste da tecnologia PAM**. *Manufatura Aditiva de Peças Cerâmicas, Coimbra*, v. 9, n. 1, p. 4-9, maio 2021.

MOURITZ, Adrian P.. **Production and casting of aerospace metals**. In: MOURITZ, Adrian P.. *Introduction to Aerospace Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 128-153.

N. Guo e M. C. Leu. “**Additive manufacturing: Technology, applications and research needs**”: *Frontiers of Mechanical Engineering*. vol. 8. no 3. p. 215–243. set. 2013. doi: 10.1007/s11465-013-0248-8.

OLIVEIRA, Gabriela Gil de. **REOLOGIA DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS À BASE DE CARBOXIMETILCELULOSE (CMC)**. 2018. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

OLIVEIRA, J.C.D. **Estudo Experimental da Regeneração Térmica de Areia de Macharia em Leito Fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

OLIVEIRA, Katherine Helena. **Caracterização Reológica de Diferentes Tipos de Sorvete**. 2005. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

PEREIRA, Fabiano Raupp. **INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE SUSPENSÕES CERÂMICAS**. 2001. 64 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

QIU, Yongxiang *et al.* **Carbon dioxide-hardened sodium silicate-bonded sand regeneration using calcium carbide slag: The design and feasibility study: weichao guo.** Journal Of Environmental Chemical Engineering. Qinhuangdao, p. 1-13. jun. 2022.

QUEIROZ, L. F. T.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.. **Efeito da utilização de areia no processamento e nas propriedades de cerâmica vermelha.** Cerâmica, Campos do Goytacazes, v. 56, n. 339, p. 279-284, jul. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132010000300011>.

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações.** GE-PROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, Ano 12, nº 3, jul-set/2017, p. 1-34.

ROSENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel Capaldo; TOLEDO, José Carlos; SILVA, Sergio Luis da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis Kovacs. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos:** uma referência para melhoria de processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

SATO, A.C.K. **Influência do tamanho de partículas no comportamento reológico da polpa de jabuticaba.** 2005, 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2005.

SILVA, Tatiane C. **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição.** TCC apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SILVEIRA, Júlio. **Processo de Fundição.** Lages: Instituto Federal de Santa Catarina, 2018. 35 slides, color. Disponível em: <https://docente.ifsc.edu.br/julio.silveira/MaterialDidatico/Pend%20de%20fabrica%20a%20Introdu%20e%20fundic%20a%20a%20Processo%20de%20Fundicao.pdf>. Acesso em: 04 out. 2022.

SIROMA, Rodrigo Shigueiro. **ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) NA FORMULAÇÃO E NO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**. 2016. 135 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

SOUZA, Luís Renato de. **RECUPERAÇÃO TÉRMICA DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)**. 2011. Disponível em: <https://old.foundrygate.com/upload/artigos/RECUPERA%C3%87%C3%83O%20T%C3%89RMICA%20DE%20AREIA%20DESCARTADA%20DE%20FUNDI%C3%87%C3%83O%20%28ADF%29.pdf>. Acesso em: 03 out. 2022.

SOUZA, J.C; CHINELATTO, A.S.A; CHINELADO, A.L; OLIVEIRA, I.L. **REUTILIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO, A PARTIR DA SUA INTERAÇÃO COM AGENTE LIGANTE SILICATO DE SÓDIO**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 56., 2012, Curitiba. *Anais [...]*. Ponta Grossa: Abceram, 2012. p. 2177-2188.

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D.. **Manufacturing Process Selection Handbook**. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2013. 456 p.

VAZAMI NETO, Raphael. **APLICAÇÃO DOS FILTROS DE ESPUMA CERÂMICA NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO NOS ÚLTIMOS 30 ANOS**. In: CONGRESSO ABIFA DE FUNDIÇÃO, 18., 2019, São Paulo. *Anais [...]*. [S.I]: Associação Brasileira de Fundição, 2019. p. 1-8.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Edgard Blucher, 2018. 400 p.

ZARETSKIY, L. **Hydrous Solid Silicates in New Foundry Binders**. *Inter Metalcast* 12, 275–291 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40962-017-0155-6>

ZHANG, Guangxu; ZOU, Bin; WANG, Xinfeng; YU, Yang; CHEN, Qinghua. **Design, manufacturing and properties of controllable porosity of ceramic filters based on SLA-**

3D printing technology. Ceramics International, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 1009-1019, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.076>.

WOHLERS, T.; GORNET, T. **History of Additive Manufacturing.** Wohlers Report, 2014.

