

Artigo

Projeto de molde para produção de peças fundidas por cera perdida assistidas por impressão 3D.

Antônio Augusto da Silva Mendonça ^[1], Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; aluno; antonioaugstoc29@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; orientador; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Data da defesa: 28/11/2022;

Resumo: A produção de peças de fundição por meio de cera perdida é um processo milenar que está em constante desenvolvimento, no entanto, ainda apresenta uma complexidade bastante elevada quando se trata de produzir formas irregulares. Para contornar o inconveniente de esculpir artesanalmente peças complexas, as indústrias tem buscado soluções no processo de manufatura aditiva (impressão 3D), onde é possível a produção de peças de alta complexidade sem a necessidade de artesãos altamente qualificados. Sendo assim, esse trabalho buscou apresentar as etapas e variáveis para o projeto e construção de um molde para aplicação da fundição prototipada pela impressão 3D. Para alcançar esse objetivo, estudou-se os principais parâmetros do projeto de molde, a exemplo da altura e velocidade crítica, o ciclo térmico para remoção do PLA do molde e as recomendações geométricas pertinentes. Os cálculos e a concepção do molde foram validados a partir de uma simulação computacional e o vazamento da liga metálica foi feito. Ao fim, obteve-se sucesso no projeto do molde, e foi possível copiar, em certa medida, a rugosidade do modelo na peça final. Constatou-se também uma fragilização do molde, o que indica uma necessidade maior de estudos de composição de molde.

Palavras-chave: Fundição; Impressão 3D; Projeto de molde; Simulação computacional.

1. INTRODUÇÃO

A Fundição é um dos grandes processos de fabricação utilizados pela indústria e apresenta uma série de nuances e variações que buscam se adaptar as necessidades do mercado [1,2], em especial o custo benefício. Posto isso, existem diversos esforços por parte da indústria e da comunidade acadêmica para alcançar peças com qualidade cada vez maior e diminuir a quantidade de peças refugadas por projetos de fundição mal sucedidos [3]. Nesse horizonte, a fundição por cera perdida necessita de estudos cada vez mais profundos para transpor as barreiras próprias desse processo de produção. Sendo um dos grandes empecilhos desse meio produtivo as limitações naturais para a produção de modelos em cera [2], dentro destas, são contemplados o alto custo de maquinário e da mão de obra especializada. Por esse motivo algumas empresas começaram a mesclar a fundição com o processo de impressão 3D, em especial com máquinas do tipo FDM (modelagem por deposição fundida) a fim de mitigar os inconvenientes com a prototipagem.

Conforme surgem inovações no processo, é necessário se reinventar, e para os moldes de fundição não é diferente, pois de acordo com [3] um bom projeto de molde é essencial para uma fundição de qualidade, pois a negligência de conceitos basilares do projeto de moldes pode causar grandes transtornos. Dessa forma um dos objetivos desse trabalho é buscar a partir da literatura especializada, conhecer, projetar, simular e produzir moldes de fundição feitos a partir de modelos construído por impressão 3D.

A fundição consiste em vaziar um metal líquido no interior de um molde para que este receba a forma do molde em que é despejado, é considerado um dos processos de fabricação mais antigos e sabe-se que diversos povos utilizaram desse procedimento, tendo peças datadas de cerca de incríveis 10.000 a.C [1]. A fundição de precisão, mais conhecida como fundição por cera perdida permite produzir os mais variados tipos de peças com notória riqueza de detalhes. Estima-se que o seu surgimento remonte à cerca de 4000 a.C [1], e desde então, esse processo evoluiu bastante durante os séculos, variando características como ferramentas, material do molde, método de vazamento, tipos de liga e etc, entretanto, os princípios básicos desse processo não sofreram

alterações [2,4]. Apesar desse longo histórico, esse procedimento ganhou uma particular notoriedade na indústria apenas no século XX, após tentativas bem sucedidas para produção de próteses dentárias [2].

Com o auxílio dos importantes avanços da indústria do século XXI, o processo de cera perdida é amplamente utilizado para a produção de peças com elevada precisão dimensional, muitas vezes reduzindo as etapas da produção e chegando a disputar com peças produzidas por meio de usinagem, conformação ou até mesmo metalurgia do pó [5]. Por essa razão e por apresentar grande versatilidade, economia na produção em série e possibilitar a aplicação de ligas alternativas [1], a fundição de precisão é amplamente utilizada na obtenção de diversos equipamentos, a exemplo dos componentes automotivos e materiais voltados a indústria aeroespacial, ademais, é o processo mais utilizado na produção de joias [2,6].

O procedimento para produção por cera perdida deve seguir etapas bem definidas, sendo sempre a primeira delas, a produção de um modelo que será usado para confecção do molde. Na produção convencional, as peças são feitas de forma artesanal, o que sinaliza um grande limitador do processo, tendo em vista a necessidade de alto investimento de tempo e artesãos qualificados, demorando muitas vezes, semanas ou meses para desenvolver o produto, permitindo apenas poucas mudanças na ferramenta antes da produção [2,6,7,8].

Após a produção do modelo inicial, segue-se a produção da matriz, que pode ser confeccionada a partir de diversos materiais, levando em conta a necessidade da aplicação e alguns parâmetros. Por exemplo: moldes metálicos apresentam uma maior vida útil, em contrapartida ao inconveniente de um alto custo inicial, ao passo que moldes em silicone ou borracha apresentam um menor custo em troca de uma vida útil menor. Deve-se também levar em conta as tolerâncias dimensionais que cada molde fornece a peça em cera, já que por serem materiais diferentes, apresentam diferentes variações dimensionais [1,2].

As demais etapas consistem: na produção do modelo em cera a partir da matriz, aplicação de revestimento refratário, eliminação da cera por aquecimento e finalmente o vazamento do metal. Essas etapas podem ter algumas modificações a depender da necessidade, tais como o tipo de vazamento (por gravidade, gravidade com auxílio de vácuo e centrifuga) [2].

Dois grandes limitadores ao processo de fundição por cera perdida são o seu custo e tempo, que são frequentemente associados à prototipagem, e a produção do ferramental necessário para gerar os padrões de cera [9]. Posto isso, várias empresas começaram a buscar soluções para esses inconvenientes, das quais se destacou o uso da manufatura aditiva (MA), que é um tipo de processo produtivo de adição pelo qual se utiliza deposição de camadas para a produção de peças. O design das peças é feito por meio de softwares computacionais. Apesar de ser considerado inicialmente inviável quando comparado com outros processos de fabricação por tecnologias subtrativas já estabelecidas [10,11], após algumas evoluções a manufatura aditiva, comumente conhecida como impressão 3D, começou a ser utilizada para um novo tipo de produção por cera. Esse método é semelhante ao convencional, com o diferencial da produção do modelo em cera, o que pode chegar a diminuir o tempo de produção em cerca de 89 %, associado à uma diminuição nos custos de produção em cerca de 60 % a depender da quantidade de peças, além disso os defeitos nas peças podem ser diminuídos em até cerca de 99,5% [12], o que se mostra bastante atraente e dá uma noção do panorama geral de expansão da utilização desse método [13].

Existem diversos tipos de tecnologias utilizadas para a impressão 3D, segundo a literatura especializada [9,10,14] as mais comuns são: SLA (Esteriolitografia) , FDM (fused deposition modeling), Jateamento de material, SLS (Selective Laser Sintering), 3DP (Three Dimensional Printing), IJP (Ink Jet Printing), LENS (Laser Engineered Net Shaping) e LOM (Laminated Object Modeling). A maioria dessas tecnologias apresentam uma série de especificidades, que por vezes encarecem bastante o processo, como por exemplo o custo inicial de aquisição de uma impressora profissional por cera pode chegar a 55.000 dólares [15], o que é significativamente alto para médias e pequenas empresas, especialmente no cenário brasileiro. Para mais,[8] reuniu diversos trabalhos que apresentaram as vantagens da utilização da tecnologia FDM para a fundição de precisão num processo conhecido como RIC (Rapid Investment Casting)¹. Os estudos [8,9,16-17] sobre a possibilidade de utilização desse método começaram ainda no século passado e se desenvolveram ao decorrer dos anos, descobrindo uma gama de vantagens se comparados a outros padrões de MA, desde uma queima limpa, robustez e até mesmo certa capacidade de manuseio sem danos. Atrelado a isso, é a tecnologia mais comumente disponível no mercado e apresenta maior simplicidade e menor custo, o que explica porque a maioria das pesquisas sobre fundição a partir de impressão 3D, se concentram na modelagem por fusão e deposição.

¹ RIC é uma sigla que se refere ao processo de utilização da prototipagem 3d na fundição.

A tecnologia FDM permite a utilização de diversos filamentos, sendo o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e ácido polilático (PLA) os mais comuns para fundição de precisão [18]. Apesar do ABS, apresentar melhor acabamento [18], este filamento detém a desvantagem de ser um derivado do petróleo, o que contribui para o aumento da produção de poluentes. Em contrapartida, o PLA apresenta uma composição feita de materiais biodegradáveis, tais como amido de milho, beterraba e entre outros [19], o que está em consonância com as tendências globais de redução de poluentes, já que a produção desse material concede uma redução de 68% de poluentes se comparado a plásticos comuns. Vinculado a isso, existem outras vantagens como um tempo de decomposição drasticamente menor, sendo estimado em apenas doze dias, juntamente a um ponto de fusão também menor, na faixa de 180 a 200 °C [19-21].

Pode-se utilizar a aplicação RIC pra fundição nos dois métodos já conhecidos na fundição por precisão tradicional, o direto e o indireto, a principal diferença entre eles é que no método direto, a peça produzida é utilizada como modelo de cera prontamente para produção do molde em que a liga será vazada, logo, só pode ser utilizada uma única vez. Já para fabricação indireta, ao invés da produção de um modelo de cera, um molde é produzido, e a partir dele são feitos diversos modelos em cera, podendo ser reutilizado várias vezes. Vale lembrar que para a concepção de geometrias mais complexas o método indireto é contraindicado pela alta probabilidade de danificar o molde [17]. Independentemente do método escolhido, esse processo traz uma grande economia de tempo e custo, em especial para uma baixa tiragem de peças [17,22].

O processo de fundição direta utilizando o PLA é denominado de PLA perdido, em referência à nomenclatura utilizada para fundição por cera [23,15]. Apesar de ser utilizado por várias fundições caseiras, existem poucas pesquisas relevantes para esse método, dentre elas está um estudo [24] que comparou a viabilidade do uso de FDM (PLA e ABS) em relação a fundição com cera e descobriu que após polido por lixamento, o PLA apresenta propriedades de rugosidade significativamente superiores, chegando a uma taxa de 83% de melhoria para o acabamento da superfície do modelo e de 65% de melhoria para a rugosidade da superfície interna do molde.

Os parâmetros de impressão e as temperaturas dos processos dos principais trabalhos citados variaram [15,19,21,24-26], e um dos autores [19] desenvolveu um modo de corrigir as dimensões da peça impressa, medida necessária para imprimir com exatidão. Já [25], testou parâmetros de impressão utilizando um filamento de cera (o que ainda é relativamente novo no mercado) em uma máquina FDM, e após várias tentativas e correções, chegou à conclusão de que o PLA apresenta propriedades superiores, necessitando de um maior desenvolvimento e estudo para que a peça produzida pelo filamento em cera alcance as mesmas propriedades do PLA.

Além de toda a engenharia necessária ao desenvolvimento do modelo, o molde também requer especial atenção, e segundo a literatura [3,27,28], os moldes para fundição devem apresentar algumas características, das quais podemos citar resistência mecânica, permeabilidade suficiente para saída dos gases, refratariedade para resistir ao choque térmico e desmoldabilidade. Se tratando de cera perdida, acrescenta-se estabilidade dimensional antes e depois da fundição e boa fluidez para etapa de preenchimento.

Sabendo disso, alguns autores [15,21,23,26] testaram refratários para moldes de fundição por PLA perdido, por exemplo, pesquisadores da Georgia Southern University [23] tiveram problemas para manter a integridade do molde durante a etapa de forno, com a carapaça cerâmica sofrendo várias fissuras pela diferença dos coeficientes de expansão térmica entre o PLA e o gesso.

Algumas peças foram fundidas com sucesso por meio de moldes bipartidos [29], o que permitiu comparar a influência da composição do molde nas propriedades mecânicas da peça. Um outro autor [21] utilizou gesso misturado em água na proporção 2:1 para testes na produção de espumas de alumínio, obtendo sucesso na confecção de moldes de gesso com integridade conservada. Resultado semelhante foi obtido na produção de treliças celulares metálicas [26] utilizando uma mistura feita com um gesso próprio para a fundição. Para além desses exemplos, [15] utilizou uma mistura com três camadas de diferentes composições de sílica e conseguiu sucesso na obtenção de peças por PLA perdido.

O problema de fissuração do molde também foi documentado para peças-modelo feitas por estereolitografia [8], a solução encontrada foi a utilização de um estilo de impressão chamado *quickcast*, que produz uma peça oca altocolapsável, diminuindo tensões no molde. Um procedimento similar é feito para o PLA, com a utilização de diferentes tipos de preenchimento [19]. Para mais, a literatura [2,26,30] sugere o uso de um ciclo térmico com aumento gradativo da temperatura, permitindo a produção de moldes sem fissuração significativa. Além do mais [19] constatou que a quantidade de cinzas residuais no molde a partir da temperatura de 500 °C eram inferiores a 1 % e que essa taxa não tinha uma mudança significativa com um grande aumento desse patamar de temperatura.

Para resolver o problema de muitas peças refugadas e vazamentos frustrantes por parte da indústria, [3] traz um importante trabalho de concepção e projeto do molde, trazendo luzes e diretrizes para um projeto de sucesso. Sua metodologia se traduz em dez regras práticas para construção do molde que visam primordialmente a diminuição da turbulência e o cuidado com inclusões de óxidos, pois segundo estudos do altor, cerca de 80% dos defeitos são causados diretamente pela turbulência ocasionada por uma velocidade de vazamento e da frente do metal acima da velocidade crítica para o escoamento laminar, provocando o efeito de dobramento de onda, que é quando a frente de deslocamento do metal dobra sobre si, causando efeitos de inclusão de óxidos, conhecidos como bifilmes [3].

Tendo em consideração o já exposto, os componentes do molde foram definidos a partir de conceitos defendidos por [3] e nas equações sugeridas por ele, que também foram usadas por [31,32] para o projeto de moldes de fundição.

Dentre os integrantes do molde, a bacia de vazamento é um componente opcional que auxilia na diminuição da velocidade de vazamento e reduz significativamente o arrastamento de ar dentro do molde, isso ocorre pelo controle de fluxo fornecido e pela geometria com degrau [3]. O massalote é uma parte importante dos projetos de molde, ele serve para compensar a contração do material após a solidificação [1-3,31,32] e deve ter material suficiente para suprir a peça (requisito volumétrico) [31,32], além de ser o último componente a se solidificar (requisito térmico).

As Equações 1.1-1.4. fazem parte da regra de *chvorinov* para garantia do requisito térmico.

$$M < M_m \quad (1.1)$$

$$M_m = K \frac{V}{S_c} \quad (1.2)$$

Onde: M = Módulo da peça;

M_m = Módulo do massalote;

K = Coeficiente de proporcionalidade empírico ($K=1,2$ segundo [33]);

V = Volume da peça;

S_c = Superfície de contato da peça com o molde.

$$D_m = \frac{M_m(1 + 4p)}{p} \quad (1.3)$$

$$h_m = D_m p \quad (1.4)$$

Onde: D_m = Diâmetro do massalote;

h_m = Altura do massalote;

p = Coeficiente de proporcionalidade

A Equação 2 garante o requisito térmico a partir da regra de *chvorinov*

$$V_{mv} = \frac{V \cdot \beta}{n - \beta} \quad (2)$$

Onde n é o rendimento do massalote, aproximadamente igual a 14% para massalotes cilíndricos e β é o coeficiente de contração, que para o alumínio foi [31] sugere o valor médio de 0,070.

O canal de descida do molde também deve ser bem dimensionado sendo oportuno que haja um estreitamento progressivo [3] evitando um fluxo desordenado e que o metal se descole da parede do canal, além de mitigar a criação e o arraste de bolhas junto ao fluxo de metal. Esse dimensionamento deve ser feito a partir da equação de Torricelli [3,31,32] apresentada na Equação 3

$$V_1 = \alpha \sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

Onde: V_1 = Velocidade na entrada do Canal;

g = Aceleração da gravidade em cm/s^2 ;

h_1 = Altura da bacia de vazamento.

α = Coeficiente de perdas (geralmente 0,5 para alumínio [28])

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1.Dimensionamento do molde

O design dos modelos de fundição dos corpos de prova foi elaborado levando em conta as normas NBR 7549 [33] e NBR ISO 7438 [34], que especificam os parâmetros dos corpos de ensaio de tração e flexão, respectivamente. Os passos para o desenvolvimento dos canais de alimentação e demais peças seguiu as equações usadas por [3,31,32], e estão descritos a seguir.

A massa dos corpos de prova foi calculada por meio do volume e considerando uma liga de alumínio de densidade 2,7 g/cm³. Seguiu-se com o cálculo da vazão e para isso foi considerado um tempo de enchimento de molde de 1s, apesar de ser difícil sua estimativa, considerou-se a partir de [3] e de [31].

As dimensões da bacia foram calculadas para um esvaziamento de 1 s após a parada do derramamento do metal, sendo assim, arbitrou-se uma altura $h = 3 \text{ cm}$, e um comprimento com o dobro da largura, como sugerido por [3]. A partir da altura da bacia pôde-se calcular uma velocidade na entrada do canal de descida por meio da Equação 3, considerando $\alpha = 1$ pela pequena altura. Também pela Equação 3 foi possível obter a velocidade no fim do canal de descida. De posse dessas duas velocidades foi possível calcular as dimensões do canal de descida. Os cálculos dos massalotes seguiram uma média dos valores obtidos pelas Equações 1 e 2. A Figura 1 mostra o esquemático e as dimensões do modelo projetado.

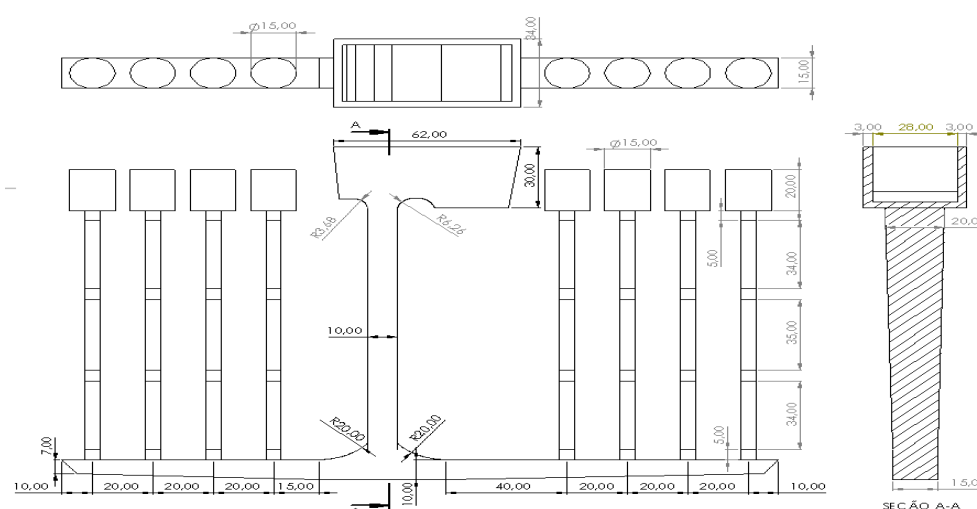


FIGURA 1. Dimensões do modelo de fundição conforme os cálculos de projeto para evitar turbulência excessiva e dobramento de onda.

A qualidade do fundido é um fator essencial para uma boa fundição [3], por isso, a liga escolhida para o projeto foi o alumínio naval de especificação 6351 T6, por ser a liga com maior índice de pureza disponível no comércio local. A densidade considerada será de 2,71 g/cm³ que é a média para alumínio [3,31,32].

TABELA 1. Composição da liga 6351 T6 [35]

Elemento	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
Composição(%)	96,8	0,1	0,5	0,6	0,6	1,0	0,2	0,2

2.2. Simulação computacional

Uma simulação da fundição foi feita a partir do software Inspire Cast ® (com o auxílio de uma licença de estudante) para identificar possíveis falhas como porosidades, rechupes e etc, a fim de validar o modelo e verificar a necessidade de ajustes. Foi utilizado um tempo de 1s de preenchimento pelo pequeno porte das peças e uma malha com tamanho de componente de 2 mm, sugerido pelo software para evitar uma simulação excessivamente longa. Os demais parâmetros da simulação já são fornecidos automaticamente pelo software tais como a condição de não vazamento do molde e o passo de tempo apropriado. A liga utilizada para simulação foi a liga AlSi9MgMn Por ser a liga disponível no software que apresenta componentes e propriedades parecidas as da liga 6351. A temperatura de vazamento simulada foi de 710 °C considerando um sobreaquecimento de 50 °C, já a temperatura do molde foi de 380 °C calculada conforme sugerido por [3].

2.3. Parâmetros de impressão

Tendo validado o modelo, seguiu-se com a análise do tempo de impressão dos arquivos, e posterior impressão em uma máquina *creality Ender 3*, sendo os parâmetros de impressão escolhidos conforme a capacidade da máquina, testes anteriores e a consulta da literatura [15,19,21,24,26]. Para a calibração e ajuste das dimensões dos corpos impressos utilizou-se o método sugerido por [19] com a impressão de blocos padrão para coleta de dados e correção das dimensões após um ciclo de testes.

TABELA 2. Parâmetros de impressão

Material	Altura de camada	Número de filetes	Infill (preenchimento)	Temperatura	Velocidade
PLA (1,75 mm)	0,2 e 0,3 mm	3	32%	198 a 205 °C	40 a 50 mm/s

Para uma otimização da rugosidade, testou-se também uma variação dos parâmetros de impressão, em especial o de altura de camada, e a utilização de um recurso novo chamado *ironing*² para otimização da qualidade superficial dos corpos de prova. Tendo chegado a uma otimização do processo de produção do modelo feito em PLA, os modelos foram impressos. Os canais de alimentação e demais peças necessárias foram impressos separadamente utilizando uma altura de camada de 0,3 mm e com auxílio de ressaltos e encaixes para montagem posterior conforme mostra as setas na Figura 2 (a), esse artifício permitiu um tempo de impressão significativamente menor e sem perda da qualidade dos corpos de prova (impressos com 0,2 mm). O modelo foi montado com o auxílio de cola e está mostrado na Figura 2 (b).



FIGURA 2. Modelos impressos em PLA: (a) Modelo desmontado com setas ressaltando os encaixes; (b) Modelo montado com auxílio de cola nas junções para ficar mais rígido.

2.4. Ciclo térmico

Para a confecção do molde, escolheu-se a mistura refratária sugerida por [29] que foi alocada em uma caixa de moldagem de forma a envolver todo o modelo em PLA.

O ciclo térmico foi gerado a partir dos conceitos de [2] que apresenta um ciclo padrão para a cera de parafina e dos ciclos usados por [21,26,30], que utilizaram o PLA. As etapas foram interpretadas e adaptadas, sendo resumidamente divididas em 3 principais etapas:

1. Secagem e desceração: Geralmente de 1 a 2 horas após a cura do gesso, preferencialmente essa etapa não deve se estender muito mais do que isso, pois maiores tempos geram peças mais frágeis [28]. Sua temperatura usual é de 150 °C[2].
2. Aquecimento lento até 450 °C para acomodação das tensões.
3. Aquecimento lento até 730 °C para eliminação do carbono residual e para calcinação dos resíduos.

Utilizou-se um ciclo análogo para desceração do molde e posteriormente um Segundo ciclo térmico mais curto foi utilizado em busca de preservar a integridade do molde e diminuir o tempo de forno.

² *Ironing* é um recurso disponível no software *ultimaker cura*® que consiste em um ciclo de impressão sem deposição de material, onde o bico da impressora, ainda quente, toca todo o perímetro da última camada da peça, produzindo um aspecto melhor de acabamento superficial.

A rugosidade superficial do modelo, do molde e da peça fundida foi aferida e comparada com o auxílio de um rugosímetro ISR C300 utilizando um cut-off (λ_c) de 0,8 mm e uma faixa de 5L (40 mm) conforme a NBR ISO 4288 [36], para isso mediu-se dez pontos de cada um deles e traçou-se uma média para comparação.

3. RESULTADOS

3.1. Simulação computacional

3.1.1. Análise de velocidades e último ar

A Figura 3 (a) mostra que a velocidade máxima atingida no vazamento ocorreu no final do canal de descida, alcançando uma magnitude maior do que a velocidade crítica (0,5 m/s), o que já era esperado pela utilização de um canal de descida com uma altura maior que a crítica (12,5 mm). Para os corpos de prova também notou-se, em alguns momentos, uma velocidade máxima maior do que a crítica, em especial na seção central, dado o seu estreitamento geométrico, conforme evidencia a escala de cores. Já na Figura 3 (b), Podemos ver que o ar conseguiu ser bem expulso do molde e os corpos de prova não apresentaram retenção de ar (último ar igual a 0,00), sendo esse, concentrado nos massalotes.

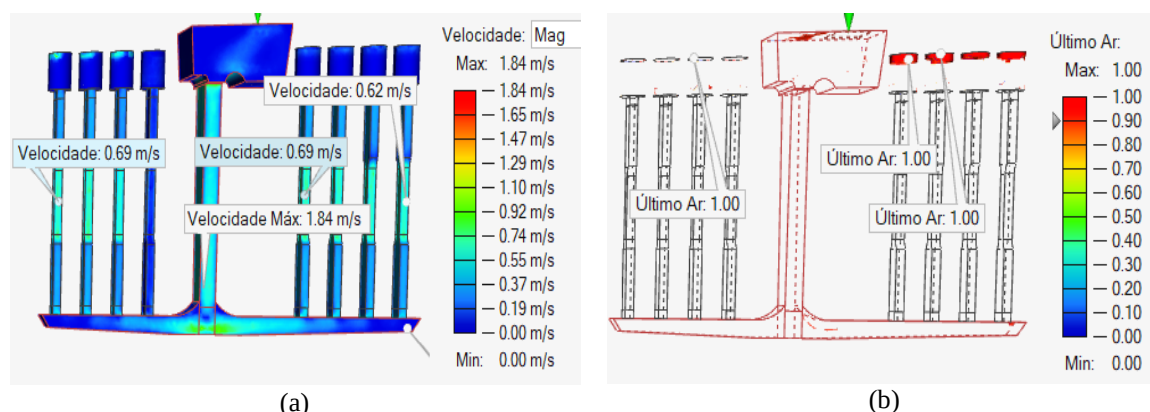


FIGURA 3. Velocidades do escoamento: (a) Velocidades atingidas no preenchimento da peça fundida.

3.1.2. Análise do tempo de preenchimento e tempo de solidificação.

Segundo mostram a Figura 4 (a), o preenchimento dos corpos de prova aconteceu de forma uniforme, sendo os massalotes as últimas peças a serem preenchidas. Já a Figura 4 (b) mostra o tempo de solidificação e evidencia que os massalotes e a bacia de vazamento foram os últimos a solidificarem conforme projetado.

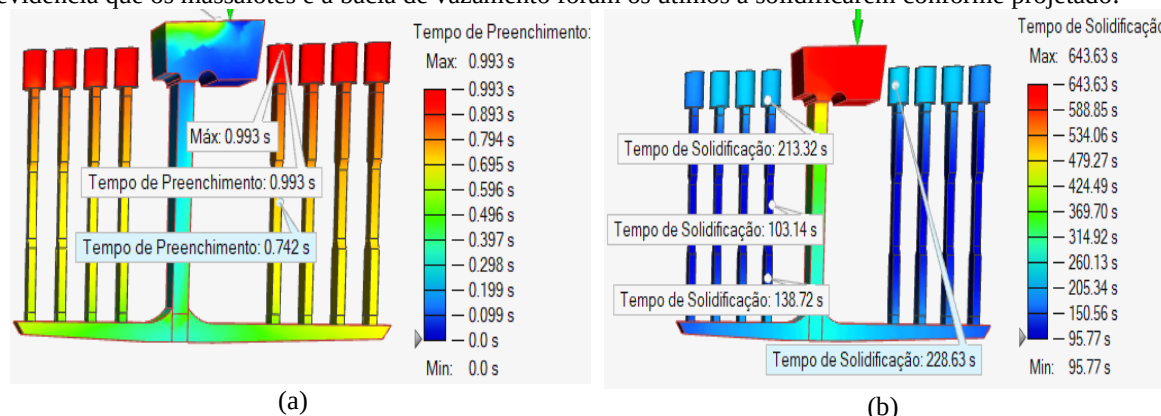


FIGURA 4. Simulação da fundição: (a) Último ar, velocidade média e tempo de enchimento ; (b) Tempo de solidificação.

3.1.3. Análise da porosidade e microporosidade

As regiões em vermelho na Figura 5 (a) demonstram a incidência da porosidade: percebe-se que não há porosidade nos corpos de prova ao passo que há uma chance de 90% de porosidade em cada massalote e 100%

na bacia de vazamento, o que é muito benéfico à peça fundida. Segundo a Figura 5 (b), a microporosidade também tem mais chances nos massalotes sendo uma baixa chance de incidência para os corpos de prova (1,91%).

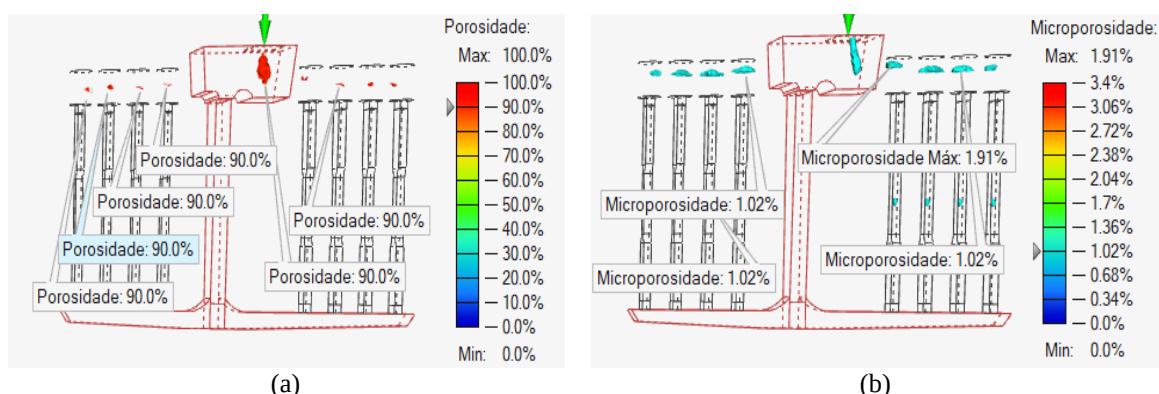


FIGURA 5. Simulação da fundição: (a) Regiões de Porosidade; (b) Regiões de Microporosidade

3.2. Ciclo térmico

A Figura 6 (a) mostra um ciclo térmico modificado a partir do sugerido por [2], o primeiro patamar está a uma temperatura de 210 °C ao invés de 150 °C por causa do ponto de fusão do PLA ser superior ao da cera, os patamares seguintes seguiram a recomendação de [2] e suas temperaturas foram de 450 °C, 730 °C e finalmente a temperatura final do molde de 380 °C.

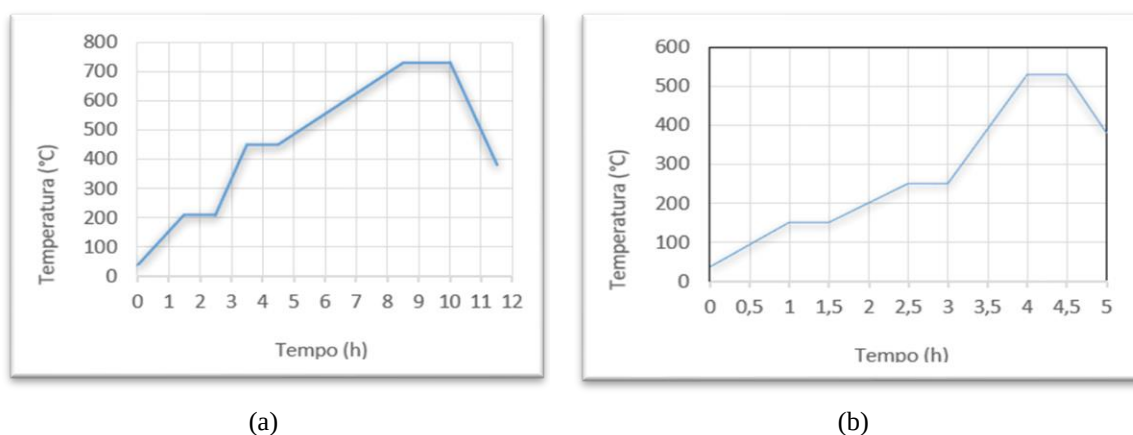


FIGURA 6. Ciclos térmicos: (a) Ciclo inicial ; (b) Ciclo modificado

O PLA foi totalmente eliminado no primeiro ciclo térmico (Figura 6 (a)), no entanto o molde não resistiu bem e apresentou rachaduras significativas, apresentando um aspecto frágil e ressecado com algumas partes tendo esfarelado.

O segundo ciclo térmico (Figura 6 (b)) foi projetado com um menor tempo de permanência e uma ascendência mais suave nas primeiras etapas, com o primeiro patamar na temperatura de 150 °C, afim de evitar a evaporação excessiva [2] e proteger a integridade do molde. Os outros patamares do ciclo foram a temperaturas de 250 e 530 °C. Ao fim do segundo ciclo, foi constatado que os moldes também estavam rachados e fragilizados, embora estivessem mais resistentes que o primeiro molde. Consequentemente, parte dos moldes colapsaram no transporte e não foi possível fazer o vazamento para o primeiro, ao passo que no segundo, foi possível após um reforço no gesso.

A Figura 7 (a) mostra uma seção horizontal do molde, percebe-se que o PLA não foi totalmente eliminado, a Figura 7 (b) também mostra a incompletude da queima do PLA na seção mais central do molde, já a Figura 7

(c) mostra dois corpos de prova lado a lado e que ambos tiveram queima incompleta, o que indica a necessidade de maior tempo de permanência em temperaturas acima dos 500 °C o que está de acordo com [19].

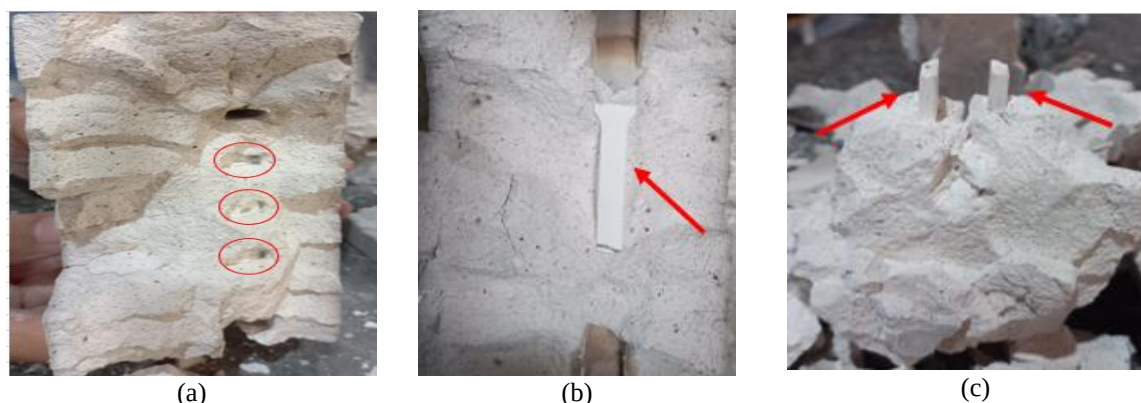


FIGURA 7. Resquícios de PLA no molde : (a) Molde com derretimento incompleto na seção da cabeça dos corpos de prova (em vermelho); (b) Seção central não derretida de um corpo de prova de tração ; (c) Seção central de dois corpos de prova vizinhos.

3.3. Rugosidade

As tabelas abaixo mostram os dados de rugosidade aferidos.

TABELA 3: Aferições de rugosidade do modelo em PLA (μm)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	D.P
0,662	1,112	1,242	1,431	1,522	1,669	4,441	4,956	8,601	10,542	3,618	3,48

TABELA 4: Aferições de rugosidade do molde (μm)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	D.P
1,843	1,867	2,106	2,237	2,404	2,432	2,578	3,899	5,912	7,729	3,301	2,15

TABELA 5: Aferições de rugosidade da peça fundida (μm)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	D.P
2,410	2,609	3,522	4,453	4,594	4,742	5,266	6,599	6,834	9,553	5,058	1,99

Tabela 3 mostra os dados de rugosidade e a média dos corpos de prova feitos em PLA, percebe-se que o valor da rugosidade média é inferior ao encontrado por [24] para o PLA, se aproximando do valor encontrado para cera por esse mesmo autor, o que denota um aprimoramento do processo de fabricação, provavelmente induzido pelo uso do *ironing*.

A Tabela 4 mostra os dados da rugosidade do molde, e mais uma vez o valor encontrado é inferior ao valor relatado por [24] para rugosidade do molde, sendo menor do que o valor que a cera conseguiu imprimir no molde para as pesquisas de [24].

A Tabela 5 mostra os dados de rugosidade da peça fundida e como esperado, o valor da rugosidade é superior ao valor do modelo em PLA, nota-se no entanto que apesar do modelo em PLA conseguir gerar um modelo em gesso com rugosidade mais baixa, essa qualidade não conseguiu ser totalmente copiada para a peça fundida, o que pode ter ocorrido por causa das rachaduras do molde e dos resquícios de PLA no molde, além das limitações de fluidez do metal, o que sugere um próximo vazamento com uma temperatura mais alta. Os dados também mostram que a rugosidade média do molde em gesso foi menor do que o modelo no qual ele foi gerado, isso pode ter ocorrido por causa da consistência e fluidez da pasta de gesso, (que pode ser ajustada para copiar melhor os detalhes em detrimento da resistência mecânica).

3.4. Corpos de prova fundidos

A Figura 8 mostra os corpos de prova (apontados pelas setas vermelhas) ligados ao canal de alimentação numerados da esquerda para direita. Um dos corpos de prova (n° 3) apresentou preenchimento incompleto e

acabou se ligando ao corpo de prova nº 2 por uma possível fissura do molde já que na inspeção visual ficou claro que havia a presença de uma cavidade formada por bolha de ar. Possivelmente, a bolha foi gerada pela retirada incompleta do ar no gesso ainda fluido, causada pela falta de um maquinário adequado para misturar bem o gesso. As setas azuis mostram o preenchimento irregular (porosidades) dos massalotes, o que também foi previsto pela simulação computacional.

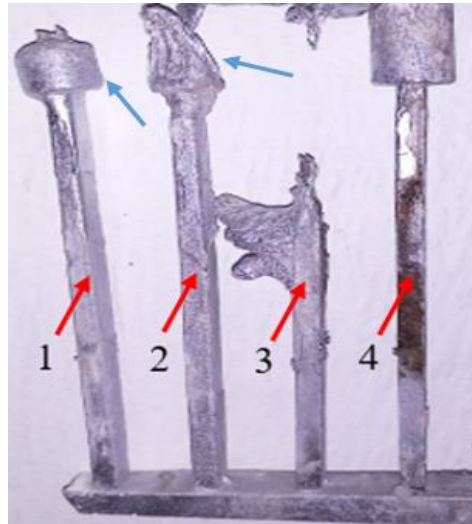


FIGURA 8. Corpos de prova ligados ao canal de distribuição, numerados da esquerda para direita pelas setas vermelhas. As setas azuis mostram as porosidades dos massalotes.

A Figura 9 apresenta o corpo de prova 1: Nota-se a ausência de rechupes e descontinuidades, o que mostra a eficiência do massalote, conforme foi previsto na simulação, além disso a região circundada em vermelho apresenta qualidade superficial excelente, com acabamento superior ao modelo de PLA. Em destaque Podemos ver que uma rebarba saliente está presente no corpo de prova, provavelmente advinda das fissuras que o molde sofreu na etapa de forno. No geral, foi o corpo de prova com melhor aspecto, o que pode ser explicado pela menor espessura de parede relacionada a sua localização na extremidade, garantindo um contato térmico intenso o suficiente para o derretimento completo do PLA no tempo fornecido pelo ciclo 2.



FIGURA 9. Corpo de prova 1, Circundado em vermelho mostrando região de bom aspecto superficial, e rebarba em destaque.

A Figura 10 mostra o corpo de prova 2: circundado em vermelho está a região com descontinuidade que foi afetada pelo caminho deixado pelo corpo de prova 3, percebe-se também possíveis microporosidades pontuais conforme aponta o circundado azul. A seta vermelha mostra uma região que o corpo de prova copiou bem o aspecto das linhas de impressão do seu modelo gerador. No geral, apresentou um bom aspecto e foi totalmente preenchido.



FIGURA 10. Corpo de prova 2: Região de descontinuidade circundada em vermelho, região de possível microporosidade circundada em azul e seta em vermelho apontando região exemplo de copia do modelo gerador.

A Figura 11 mostra o corpo de prova 4. A seta em vermelha aponta a região em que o plástico remanescente no molde afetou diretamente a peça, sendo queimado quando entrou em contato com o metal fundido, em consequência disso, o corpo de prova 4 teve regiões estriadas e com inclusão plástica, no entanto, na parte superior do molde onde o plástico tinha sido totalmente eliminado, a rugosidade é excelente analogamente ao corpo de prova 1. Também não apresenta problemas de preenchimento.

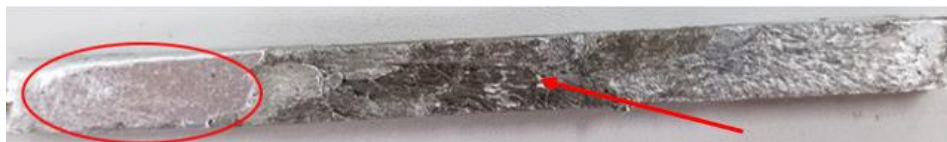


FIGURA 11. Corpo de prova 4. Região de inclusão plástica estriada apontada pela seta em vermelho e região de aspecto superficial excelente circundada em vermelho.

Em relação a porosidade e microporosidade, visualmente infere-se ausência de ambas no corpo de prova 1 e 3, ao passo que o corpo de prova 2 apresentou microporosidades pontuais e não muito significativas, além de ausência de porosidades, no entanto, para uma afirmação exata seriam necessários outros testes, a exemplo de um ensaio com o MEV.

4. CONCLUSÃO

As conclusões desse projeto estão apresentadas a seguir:

- No geral, o projeto do molde foi bem sucedido, tendo em vista que a maioria dos corpos de prova conseguiram ser produzidos sem rechupes e defeitos que os inutilizassem, conseguindo uma rugosidade média menor do que a apresentada na literatura consultada, e algumas áreas com aspecto visual excelente e com baixa rugosidade, validando o processo de concepção do molde e a boa impressão dos corpos de prova.
- A simulação computacional conseguiu prever bem as áreas de maior concentração de defeitos e que os corpos apresentariam pouca microporosidade e nenhuma porosidade significativa, o que realmente se confirmou, mais uma vez validando o projeto do molde.
- A impressão 3D conseguiu ser uma alternativa viável para produção de peças por meio de cera perdida, no entanto a composição do molde e um ajuste no ciclo térmico precisam ser feitos para que a fundição chegue a acontecer sem os problemas relatados de rachaduras excessivas do molde.

5. REFERÊNCIAS

- [1] ALDAM, ROQUEMAR DE LIMA. Fundição-Processos e Tecnologias Correlatas. Saraiva Educação SA, 2014.
- [2] KLIAUGA, André M. Metalurgia básica para ouvidos e designers . Editora Blucher, 2009.
- [3] CAMPBELL, John. Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [4] MATTUSCH, Carol C. Finding Lost Wax: The Disappearance and Recovery of an Ancient Casting Technique and the Experiments of Medardo Rosso. 2022.
- [5] TÂMEGA, Fábio. Fundição de processos siderúrgicos. Londrina: Editora e Distribuidora SA, 2017.
- [6] PATTNAIK, Sarojrani; JHA, Pradeep Kumar; KARUNAKAR, D. Benny. A review of rapid prototyping integrated investment casting processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, v. 228, n. 4, p. 249-277, 2014.
- [7] SIAS, Fred R. Lost-wax casting: old, new, and inexpensive methods. Woodsmere press, 2005.
- [8] CHEAH, Chi Mun et al. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 25, n. 3, p. 308-320, 2005.
- [9] CHHABRA, Munish; SINGH, Rupinder. Rapid casting solutions: a review. Rapid Prototyping Journal, 2011.
- [10] VOLPATO, Neri. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. Editora Blucher, 2017.
- [11] MONTEIRO, Marco Túlio F. A impressão 3D no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias. PPGD-Universidade do estado de Minas Gerais. Brasil-MG, 2015.

- [12] WANG, Jiayi et al. Design and topology optimization of 3D-printed wax patterns for rapid investment casting. *Procedia Manufacturing*, v. 34, p. 683-694, 2019.
- [13] SOUZA, Thaísa Mara Cedano Godoy Patricio de. Inovação na indústria joalheira: o uso da manufatura aditiva e a Revolução 4.0 no Estado de São Paulo. 2021.
- [14] VOLPATO, N. (Ed.). Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: Blucher, 2007
- [15] DÍAZ-ALEMÁN, Manuel Drago et al. Fundición artística de objetos complejos impresos en 3D con PLA (ácido poliláctico) como alternativa al modelo de cera. *Arte, individuo y sociedad*, v. 31, n. 3, p. 543, 2019.
- [16] FRANCO, Denise. Impactos da manufatura aditiva no modelo de negócio. 2019.
- [17] KUMAR, Parlad; AHUJA, I. P. S.; SINGH, Rupinder. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting- a review. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, v. 3, n. 3-4, p. 204-227, 2012.
- [18] MUKHTARKHANOV, Muslim; PERVEEN, Asma; TALAMONA, Didier. Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting. *Micromachines*, v. 11, n. 10, p. 946, 2020.
- [19] MINEV, E.; YANKOV, E.; MINEV, R. The Rep Rap 3D Printers for metal Casting Patternmaking- Capabilities and Application. On Innovative Trends in Engineering and Science (SFITES 2015), Kavala, Greece, Parnas Publishing House, p. 122-127, 2015.
- [20] MONGEON, Bridgette. 3D technology in fine art and craft: Exploring 3D printing, scanning, sculpting and milling. Routledge, 2015.
- [21] COSTANZA, Girolamo; TATA, Maria Elisa; TRILLICOSO, Giuseppe. Al foams manufactured by PLA replication and sacrifice. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, v. 4, n. 1, p. 62-66, 2021.
- [22] LEE, C. W. et al. Rapid investment casting: direct and indirect approaches via fused deposition modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 23, n. 1, p. 93-101, 2004.
- [23] FOWLER IV, Shelton F. Study on the Viability of Preparing Plaster Molds for Rapid Prototyping of Complex Ceramic Parts using the Lost PLA Method. 2020.
- [24] VYAS, Akash et al. Rapid tooling in investment casting: Investigation on surface finish of mould produced with 3D printed patterns. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2021. p. 020033.
- [25] ANDREW, K.; WEAVER, J. M. Using Wax Filament Additive Manufacturing for Low-Volume Investment Casting. In: 2019 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, 2019.
- [26] CARNEIRO, V. H. et al. Additive manufacturing assisted investment casting: A low-cost method to fabricate periodic metallic cellular lattices. *Additive Manufacturing*, v. 33, p. 101085, 2020.
- [27] GIULIANO, Jose Antonio Schenini. Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal. 2008.
- [28] NUNES, João Carlos Oliveira. Fabrico de peças metálicas utilizando moldações cerâmicas e moldações em gesso. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal), 1999.
- [29] MORAIS, Arthur Domingos Mesquita de. Influência da composição dos moldes de fundição à base de gesso sobre as propriedades mecânicas e microestruturais da peça fundida em alumínio. 2021.
- [30] MA, Changliang et al. Manufacturing of Herringbone Gear Model by 3D Printing Assisted Investment Casting. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. p. 042045.
- [31] MARTINS, Francisco Germano et al. Estudo da viabilidade técnica do processo molde cheio para fundições em areia. 2003.
- [32] PRETI, Orlando; RIBEIRO, Alexandre Guilherme; DUARTE, Iberê Roberto. Desenvolvimento comparativo entre sistemas de enchimento na formação e incorporação de defeitos em fundidos de alumínio. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, 2020.
- [33] Associação de Brasileira de Normas Técnicas, 2021, ABNT NBR 7549, "Alumínio e suas ligas - Produtos laminados, extrudados, fundidos, forjados e sinterizados-Ensaio de tração", ABNT, Rio de Janeiro
- [34] Associação de Brasileira de Normas Técnicas, 2022, ABNT NBR ISO 7438, "Materiais metálicos – Ensaio de dobramento", ABNT, Rio de Janeiro
- [35] NELMETAIS TECNOLOGIA E COMERCIO DE METAIS LTDA. Certificado de qualidade N° 080.943. São Paulo, 2022.
- [36] Associação de Brasileira de Normas Técnicas, 2008, ABNT NBR ISO 4288, "Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade", ABNT, Rio de Janeiro