

MANUFATURA ADITIVA NA FUNDIÇÃO DE CHUMBO: UM ESTUDO DE CASO NA FABRICAÇÃO DE UM MOLDE DE SILICONE

Hernani Valentini¹, Carlos Alfredo Gracioli Aita², Marcelo André Toso³

Resumo: A manufatura aditiva ou impressão 3D produzem peças a partir da adição de material, geralmente camada sobre camada. Este processo difere-se de **métodos tradicionais de fabricação, que consistem** na retirada sucessiva de material. O presente artigo propõe a elaboração de um molde de fundição permanente, de baixo custo, para realizar a fabricação de contrapesos de chumbo do tipo garra baixa. Para isso, foram fabricados dois modelos por meio da manufatura aditiva, um modelo produzido pelo método de modelagem por deposição fundida e o outro pelo método de processamento digital por luz. Posteriormente, a partir destes modelos, foram construídos dois moldes com a utilização de borracha de silicone, que suporta temperaturas de até 360 °C. Após a construção dos moldes, foram realizados testes de fundição de chumbo para analisar o comportamento destes. Utilizando um sistema de aquisição de dados e um termopar, constatou-se que a maior temperatura que o molde é submetido durante a fundição do contrapeso de chumbo, é, em média, 167 °C. Conclui-se que o molde de silicone produzido (classificado como permanente) apresenta resistência adequada durante a fundição de chumbo, tornando-se uma alternativa de baixo custo, frente aos processos convencionais de fabricação frequentemente utilizados.

Palavras-chave: Instrumentação Mecânica, Fundição, Molde, Silicone.

1 INTRODUÇÃO

Considerando as condições atuais do mercado global, é notável a necessidade de economia nos processos de fabricação, visando a competitividade dos negócios e novas metodologias de projeto. A fundição é um processo de

1 Engenheiro Mecânico, Instituto Federal de Santa Catarina. hernani.valentini98@gmail.com

2 Doutorando em Engenharia Mecânica, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina. carlos.aita@ifsc.edu.br.

3 Doutor em Engenharia Mecânica, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina. marcelo.toso@ifsc.edu.br.

fabricação largamente utilizado em peças e objetos com geometria definida pelo seu molde. Chiaverini (1986), descreve a fundição como sendo um processo de fabricação na qual o metal líquido ou fundido, é depositado no interior de um molde, cuja cavidade é conformada de acordo com a peça que se deseja produzir.

Conforme Kennedy e Sutherland (2008), contrapesos são peças utilizadas para realizar o balanceamento de rodas automotivas, a fim de reduzir vibrações e melhorar o rendimento no consumo de combustível de veículos. O chumbo é a principal matéria prima para fabricação destes contrapesos, visto que é um material de alta densidade, ductilidade, com boa resistência à corrosão e também por possuir baixo custo em relação a outras possíveis matérias primas, como o aço. Atualmente, a fundição por injeção e por gravidade em moldes permanentes são os processos de fabricação mais utilizados para confecção de peças/componentes.

Os moldes permanentes comercializados para fundição são fabricados principalmente de material metálico. Dessa forma, a produção de moldes permanentes se torna um processo subtrativo, ou seja, processo onde há retirada e conseqüentemente desperdício de material. Logo, a fabricação de moldes permanentes em materiais metálicos, se torna um processo de alto investimento monetário (BALDAM E VIEIRA, 2014). Já Da Silva (2022), afirma que a utilização de moldes de silicone em conjunto com a manufatura aditiva são processos de fabricação significativamente contemporâneos. Os modelos para concepção de moldes permanentes de silicone, são produzidos principalmente por meio da manufatura aditiva – processo de impressão tridimensional por meio de deposição de material. Segundo Cannon e King (2009), a flexibilidade dos moldes de silicone, permite a fundição de superfícies complexas. Wortmann *et al.* (2021), corrobora afirmando que a fundição em moldes de silicone é um dos métodos mais utilizados para a fabricação de pequenos lotes de protótipos. Este trabalho visa apresentar o projeto e construção de um molde permanente de silicone para fundição de contrapeso de chumbo do tipo garra baixa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fundição: moldes permanentes e temporários

De acordo com Silva (2021), os processos de fundição podem ser classificados conforme os tipos de moldes, sendo permanentes ou temporários. Segundo Chiaverini (1986), os moldes permanentes geralmente são fabricados em aço ou ferro fundido, e em alguns casos, ligas de cobre e bronze também podem ser utilizadas. O uso destes materiais para a fabricação do molde visa possibilitar a produção de inúmeras peças sem a necessidade de fabricar novos moldes a cada fundição. Giuliano (2008), afirma que há processos de fundição por gravidade, por injeção, centrífuga, contínua (lingotamento), em

moldes de silicone entre outros. **Já o método** de fundição que considera moldes temporários, utiliza materiais que resultam em moldes inutilizáveis ao final das fundições. Logo, faz-se necessário produzir novos moldes para cada fundição realizada. Essa classificação engloba processos de fundição em molde de areia, *shell molding*, de precisão por cera perdida, por espuma perdida (*lost foam*), nos quais, todos ocorrem pela ação da força gravitacional (SILVA, 2021).

Considerando moldes permanentes, a fundição por gravidade, **é o principal método utilizado nos processos de fundição, por conta de seu baixo custo e simplicidade em relação** aos demais processos. O processo ocorre de forma que o material a ser fundido, em sua fase líquida, é depositado no molde e sem a presença de forças externas além da gravidade. O material se deposita no fundo do molde preenchendo todo o espaço livre em seu interior (MOURA, *et al.* 2019). Considerando fundição em molde de silicone, Wortmann *et al.* (2021), afirmam que este **é um dos métodos mais difundidos** da prototipagem rápida. Este método é utilizado industrialmente para a fabricação de pequenos lotes de protótipos de peças. A construção destes moldes se dá a partir de um modelo, que pode por exemplo, ser impresso em três dimensões, embutido em uma mistura de borracha de silicone líquida (RTV-2) e polidimetilsiloxano (PDMS), a qual posteriormente deve ser vulcanizada a temperatura ambiente. A fundição em molde de silicone é análoga a fundição em molde metálico, que consiste em vaziar o metal líquido para o interior do molde de silicone, fazendo com que o material líquido preencha todo o seu espaço vazio. Este método possui grande custo benefício se comparado com o método clássico de molde metálico. Entretanto, cabe ressaltar que sua utilização se restringe à materiais com baixo ponto de fusão, já que o silicone pode resistir a temperaturas pouco acima de 300°C sem comprometer o molde (WORTMANN e FRESE, 2021).

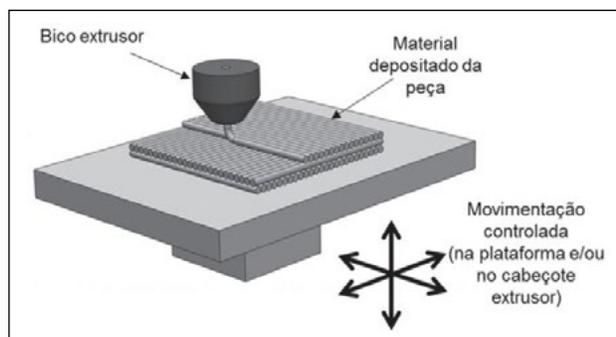
2.2 Manufatura aditiva

Segundo Wiltgen (2019), a manufatura aditiva (MA) consiste em um processo de fabricação onde o objeto é construído por meio da deposição de material, na quantidade e posição pré-determinada por um modelo digital desenhado em um arquivo do tipo CAD (*Computer Aided Design* – Desenho assistido por computador). O autor afirma que este tipo de fabricação se torna mais econômico em relação aos processos de manufatura subtrativa, visto que neste processo evitam-se desperdícios. Lara-Prieto, *et al.* (2015), explica que diferentes materiais como fluídos, ceras, pós e lâminas são utilizados na manufatura aditiva como matéria-prima para construção de peças ou modelos. Entre as técnicas mais comuns de impressão 3D ou manufatura aditiva, está a modelagem por deposição fundida (*fused deposition modeling* - FDM). Corroborando com a autora anterior, Jiao *et al.* (2020), afirma que recentemente tem se destacado na área da manufatura aditiva, a técnica de processamento digital por luz (*digital light processing* – DLP) para a fabricação de peças/componentes.

2.2.1 Modelagem por deposição fundida – FDM

Chicca Junior (2017), afirma que as peças fabricadas pelo método FDM, são construídas pela extrusão e endurecimento de um filamento de material termoplástico, na qual um cabeçote que se move no plano horizontal é responsável pela deposição de material camada por camada sobre uma base que se move no eixo vertical. Existem também modelos de impressoras 3D, na qual a base é fixa e o cabeçote se move ao longo dos três eixos. A construção da peça ou modelo impresso em 3D, ocorre pela deposição de camada sob camada dos filamentos termoplásticos. Rosa *et al.* (2021), comenta que o filamento sofre um aquecimento durante a extrusão pelo cabeçote, o que faz com que o material seja depositado ainda no estado semilíquido e ultrafino. Dentre as matérias-primas mais comuns deste processo de fabricação, estão as resinas termoplásticas Ácido Polilático (PLA), o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o Policarbonato (PC), entre outras. A Figura 1, demonstra alguns elementos e princípios do processo de manufatura aditiva por extrusão de material – FDM.

Figura 1. Princípios do processo de manufatura aditiva por extrusão de material – FDM.



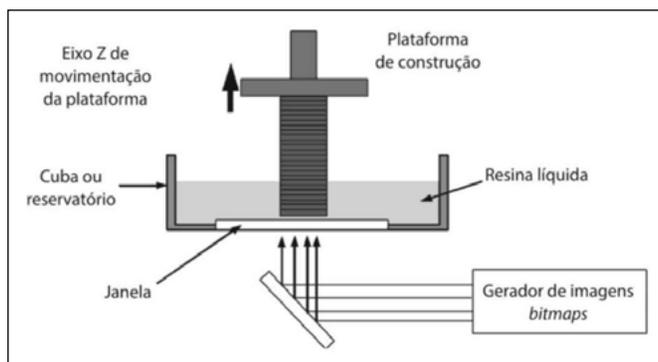
Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

2.2.2 Processamento digital por luz – DLP

De acordo com Beal (2002), no método de impressão 3D por DLP, o objeto 3D é fabricado através da foto-polimerização de uma resina pela incidência de luz ultravioleta (UV). Neste método, camadas bidimensionais do padrão do objeto 3D são projetadas através de um dispositivo de micro espelho que reflete a luz UV sobre a resina foto curável. Jung *et al.* (2021), comenta que analogamente ao método FDM, o método DLP também exige que os objetos digitais 3D sejam convertidos para o formato STL (*Standard Triangle Language*), para que posteriormente sejam seccionados em fatias paralelas entre si e ortogonais ao eixo de construção vertical. A Figura 2 ilustra o princípio de

funcionamento e também demonstra componentes do método de impressão 3D por DLP.

Figura 2. Princípio do processo de impressão 3D por DLP.



Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

De acordo com Fragoso (2019), o início da construção de um objeto 3D ocorre de forma que a plataforma de construção se move em direção ao reservatório que contém a resina líquida, de modo a estabelecer a distância de uma fatia entre a plataforma e a janela de material transparente. A luz UV, que contém o padrão bidimensional da primeira camada do objeto, é então refletida pelo dispositivo de micro espelho em direção a janela, de modo que este padrão é projetado sobre a resina líquida, assim possibilitando a cura da primeira camada e a aderência desta à plataforma de construção. O objeto 3D é construído através da repetição do processo citado anteriormente. Dentre as matérias-primas mais utilizadas no método DLP, destacam-se a resina *Bio Hybrid* e a *Standard* (LOVO *et al.*, 2019).

2.3 Ligas de chumbo

Fontes naturais de chumbo estão presentes em muitos minerais, sendo que os mais importantes são: a Galena (PbS), a Cerusita (PbCO₃) e a Anglesita (PbSO₄). Paquoto (2020), comenta que o chumbo possui condutividade térmica e elétrica, sendo altamente resistente à corrosão e dúctil. Kennedy e Sutherland (2008), relatam que o chumbo pode ser utilizado no balanceamento de rodas automotivas por intermédio de contrapesos, instalados para corrigir desequilíbrios nas rodas de automóveis, desalinhamentos na montagem dos pneus, reduzindo assim as vibrações no automóvel e otimizando o consumo de combustível dos veículos. A Figura 3 apresenta dois tipos de contrapeso de chumbo para balanceamento de rodas automotivas. A parte superior da figura, recebe a denominação de contrapeso tipo garra, enquanto a peça apresentada na parte inferior da figura, é designada como contrapeso adesivo.

Figura 3. Contrapesos de balanceamento de rodas automotivas.



Fonte: Adaptado de Bleiwas (2006).

3 METODOLOGIA

A seguir, são descritos os procedimentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho durante a fase experimental.

3.1 Análise dos moldes de silicone e coleta de dados

Em testes preliminares, o resultado de reprodução dos contrapesos via fundição em molde de silicone que melhor se aproximou das peças comercializadas, foi um contrapeso de chumbo de 35 gramas. Logo, a unidade de análise desta pesquisa tem como objeto de estudo o molde de silicone para fundição de contrapeso de chumbo de 35 gramas. O silicone utilizado para construção do molde deste trabalho é fabricado pela empresa Redelease®, este resiste a temperaturas de até 360 °C sem comprometer o molde e possui dureza A 55 Shore.

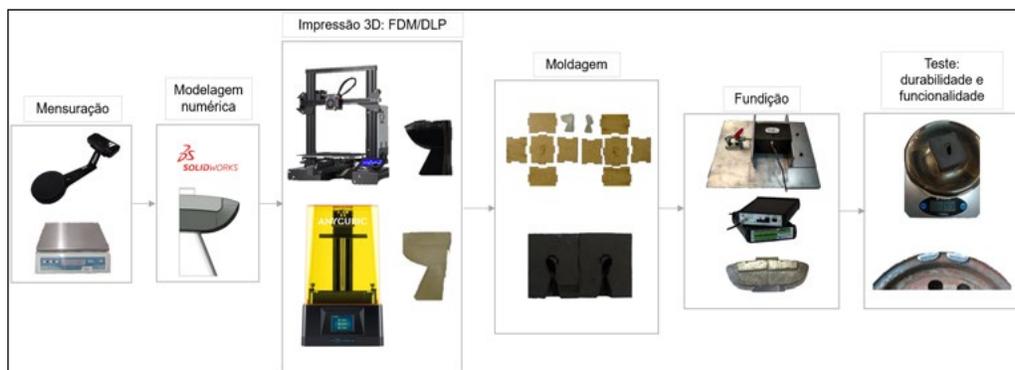
A técnica de pesagem (balança com resolução de 0,1 g da marca BEL *Engineering*) foi utilizada para obter as massas do contrapeso a ser reproduzido e da chapa de aço que é fundida em meio ao chumbo (responsável por proporcionar a estabilização do contrapeso na roda automotiva). As dimensões externas do contrapeso foram obtidas por meio de um *scanner* tridimensional (modelo Einscan SE da marca Shining 3D). A avaliação da credibilidade da reprodução das dimensões do contrapeso foram realizadas por meio da observação. O ponto de fusão do chumbo foi obtido por intermédio de Moreira e Moreira (2004). A durabilidade do molde de silicone foi analisada a partir de sua deterioração sob a condição de uso deste por uma microempresa localizada na Região Oeste de Santa Catarina. Um experimento também foi realizado para analisar a durabilidade do molde de silicone, submetendo-o à quatro variações de temperatura em um forno elétrico para tratamento térmico do tipo mufla

(modelo EQF1100, da marca Equitecs). A maior temperatura que o chumbo atinge ao ser depositado no molde foi mensurada com a utilização de um sistema de aquisição de dados modelo ADS1800, marca Lynx e um termopar modelo WTJ-6-60 da marca OMEGA.

Na etapa seguinte, comparou-se o ponto de fusão do chumbo com a temperatura máxima que a borracha de silicone é capaz de suportar sem comprometer o molde. Visto que o chumbo funde à 327,4 °C e o silicone resiste até 360 °C, observou-se a possibilidade de executar o experimento. Posteriormente, foi realizada a mensuração das dimensões externas do contrapeso de chumbo e da chapa de aço, utilizando-se o scanner tridimensional. Em seguida, foi utilizado o *software SolidWorks* (2018) para realizar o desenho tridimensional digital do modelo de fundição do contrapeso de chumbo. A partir do modelo 3D digital do contrapeso, foram construídos dois modelos de fundição por meio de manufatura aditiva. Um modelo foi fabricado considerando o método de modelagem por deposição fundida (FDM) e o outro por processamento digital de luz (DLP). No método FDM foi utilizada uma impressora 3D modelo Ender 3, da marca Creality e o material ácido polilático (PLA). Para realizar o fatiamento do modelo utilizou-se o *software Cura*. No método DLP foi utilizada uma impressora 3D modelo Photon Mono, da marca Anycubic e um material de resina fotossensível. Para realizar o fatiamento do modelo DLP foi utilizado o *software Chitubox*. Após a fabricação dos modelos, foram construídos gabaritos e caixas de moldagem em MDF, no intuito de facilitar a fabricação dos moldes de silicone. Por conseguinte, a mistura bicomponente do silicone foi depositada nas caixas de moldagem a fim de construir os moldes de silicone para fundição dos contrapesos de chumbo.

Após o período de cura do molde de silicone, estes foram retirados das caixas de moldagem. Por conseguinte, o chumbo na fase líquida foi depositado nos moldes de silicone. Após a fundição, analisou-se a temperatura máxima que o chumbo atinge e foi realizada a pesagem dos contrapesos de chumbo, assim como analisadas as características geométricas dos mesmos. Na etapa seguinte, avaliou-se a acurácia das peças fundidas por meio da montagem destas em rodas automotivas. Por fim, a durabilidade do molde de silicone foi analisada a partir de sua deterioração sob a condição de uso. A durabilidade do molde de silicone também foi avaliada por meio de uma análise da deterioração deste, em função da submissão a quatro ensaios de resistência a diferentes temperaturas: 200 °C, 290 °C, 380 °C e 470 °C, com a utilização do forno do tipo mufla. A Figura 4 apresenta uma síntese da metodologia deste trabalho.

Figura 4. Síntese das etapas metodológicas do trabalho.



Fonte: Elaborado pelos autores.

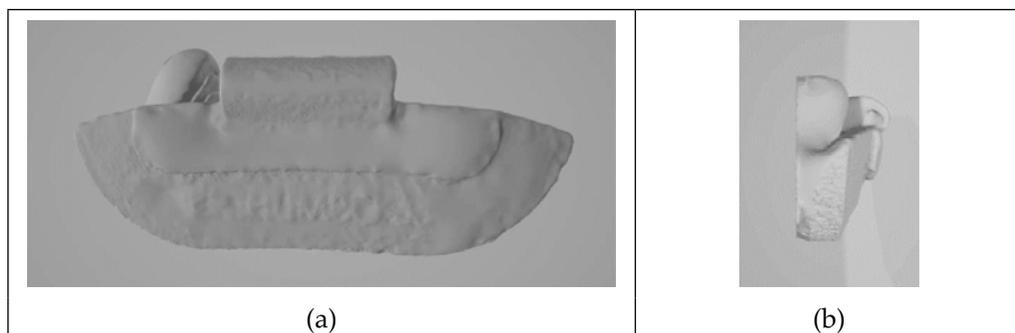
4 RESULTADOS

Nesta sessão são apresentados os resultados dos experimentos realizados para construção dos moldes de silicone para fundição dos contrapesos de chumbo.

4.1 Mensuração do contrapeso de chumbo

Para a mensuração das dimensões externas do contrapeso de chumbo de 35 g, foi utilizado o processo de escaneamento tridimensional. A massa deste foi mensurada com uma balança comercial, resultando em 34,5 g. A Figura 5 (a) ilustra uma vista frontal deste escaneamento, e a vista lateral esquerda é ilustrada pela Figura 4 (b).

Figura 5. Vista (a) frontal e (b) lateral esquerda do escaneamento tridimensional.

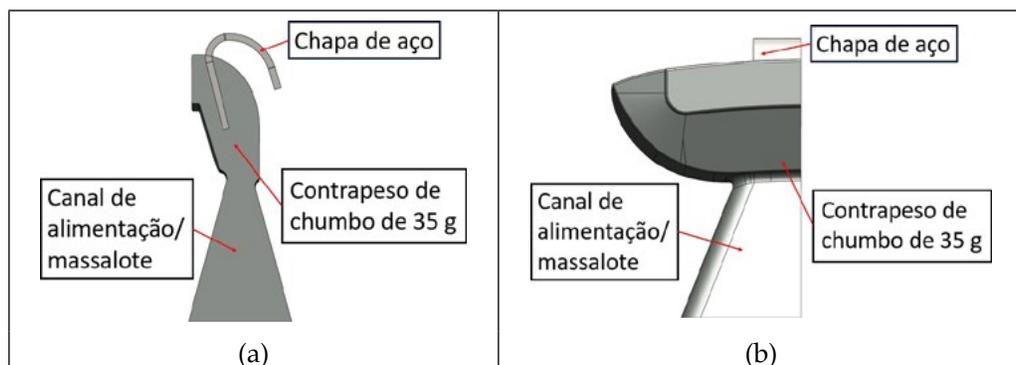


Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 Desenho do modelo tridimensional do contrapeso de chumbo

A partir do arquivo 3D *Object* (.obj) gerado pelo escaneamento 3D e por meio de aproximações deste arquivo, foram construídos dois modelos digitais 3D - um esquerdo e um direito - no *software SolidWorks* (2018). A Figura 6 (a) demonstra a vista lateral direita, enquanto a vista frontal do modelo 3D digital esquerdo é apresentada na Figura 6 (b).

Figura 6. Vista (a) lateral direita e (b) frontal do modelo esquerdo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 Produção dos modelos e moldes de fundição do contrapeso de chumbo

Para a construção dos modelos de fundição, foram gerados arquivos 3D *Object* (.STL) dos modelos digitais esquerdo e direito, a partir dos respectivos arquivos *SOLIDWORKS Part Document* (.SLDPRT). Estes modelos de fundição foram produzidos pelos métodos de impressão 3D modelagem por deposição fundida (FDM) e processamento digital por luz (DLP). No método FDM, a impressão levou 47 minutos para ser concluída e o material utilizado foi ácido polilático (PLA). Já no método DLP, a impressão levou 90 minutos para ser concluída e o material utilizado foi a resina standard. A Figura 7 (a) demonstra o modelo de fundição produzido pelo método FDM enquanto a Figura 7 (b) apresenta o modelo de fundição produzido pelo método DLP.

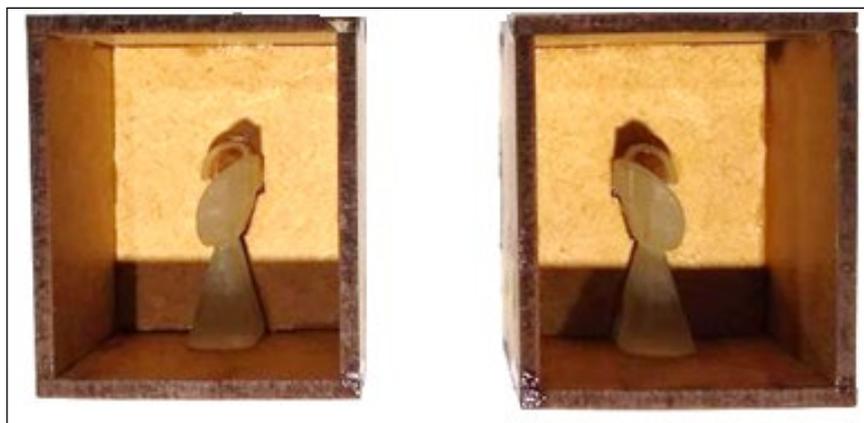
Figura 7. Modelo de fundição produzido pelo método (a) FDM e (b) DLP.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando a construção dos moldes, estes foram executados a partir dos arquivos .SLDPRT dos modelos 3D digitais esquerdo e direito, gerados arquivos binários de intercâmbio de desenhos do AutoCAD (.dxf), para corte e gravação a laser das caixas de moldagem e gabaritos para fixação dos modelos de fundição nestas caixas. Em seguida ao corte e gravação a laser das caixas e dos gabaritos, foi realizada a fixação dos modelos de fundição nos gabaritos e a montagem das caixas, com a utilização de uma cola adesiva a base de cianoacrilato. A Figura 8 apresenta a caixa de moldagem montada com os modelos de fundição DLP fixados nestas.

Figura 8. Vista superior da caixa de moldagem com modelos de fundição DLP.

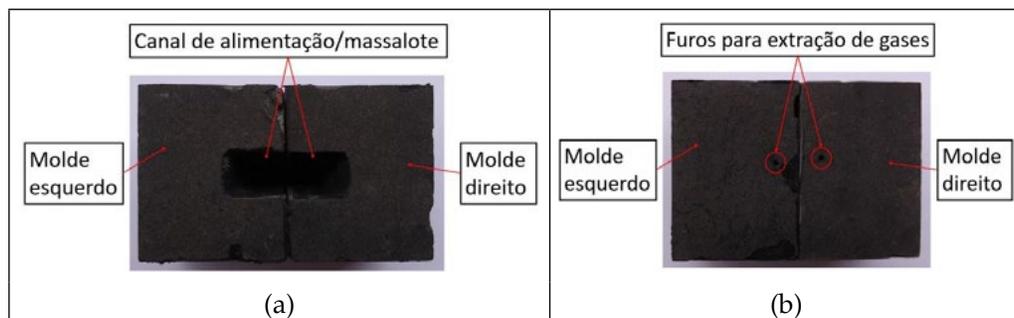


Fonte: Elaborado pelos autores.

Após aguardar um período de 5 minutos para cura da cola, foi aplicado o spray desmoldante em todo o interior das caixas de moldagem. Posteriormente a aplicação do spray desmoldante, foi realizada a mistura de 350 g de silicone com 17,5 g de catalisador (5% da massa de silicone), e em seguida, esta mistura

foi depositada sobre as caixas de moldagem. Subsequentemente, as caixas foram armazenadas em um ambiente em condições normais de temperatura e pressão, longe da luminosidade solar. Após aguardar um período de 24 horas para cura da mistura silicone e catalisador, as caixas de moldagem foram desmontadas para que os moldes de silicone fossem retirados. A Figura 9 demonstra uma vista superior e frontal do molde de silicone do modelo DLP posterior a sua retirada das caixas de moldagem.

Figura 9. Vista (a) superior e (b) frontal do molde de silicone modelo DLP.



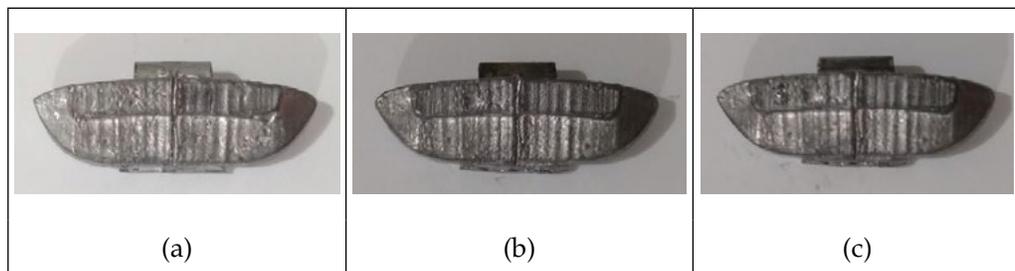
Fonte: Elaborado pelos autores.

Por conseguinte, um furo passante da extremidade frontal até a cavidade do molde foi realizado em cada um destes, visando a extração de gases produzidos pela deposição do chumbo líquido nestes. Em seguida, uma cavidade no molde esquerdo foi aberta para posicionar o termopar previamente a deposição do chumbo líquido nos moldes. Todos os procedimentos descritos anteriormente para a construção do molde de silicone modelo DLP, foram realizados analogamente para construção do molde de silicone modelo FDM.

4.4 Produção do contrapeso de chumbo a partir do molde de silicone

A barra de chumbo foi seccionada em partes com o intuito de introduzi-la em um cadinho, para que este fosse levado ao forno. O forno foi programado para temperatura de 430 °C para realizar a fusão do chumbo. Posteriormente a condução do cadinho até o forno, a chapa de aço do contrapeso e o termopar, foram posicionados no molde de silicone. O conjunto foi fixado por meio de uma prensa. Em seguida à fusão do chumbo, este foi depositado no molde de silicone. Todos os procedimentos descritos anteriormente foram realizados analogamente para os moldes de silicone modelo FDM e DLP. Para cada molde de silicone foram realizados 3 experimentos de fundição. A Figura 10 (a), (b) e (c) apresenta os contrapesos fundidos em molde de silicone modelo FDM posteriormente ao seccionamento do seu canal de alimentação.

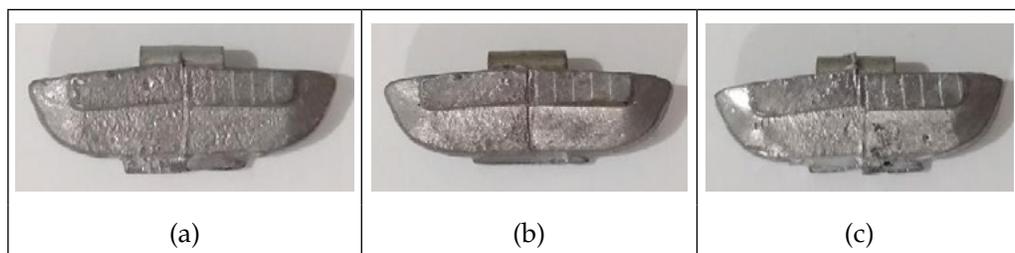
Figura 10. Contrapeso de chumbo fundido em molde de silicone modelo FDM (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os contrapesos fundidos em molde de silicone modelo DLP posteriormente ao seccionamento do seu canal de alimentação são demonstrados na Figura 11 (a), (b) e (c).

Figura 11. Contrapeso de chumbo fundido em molde de silicone modelo DLP (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.

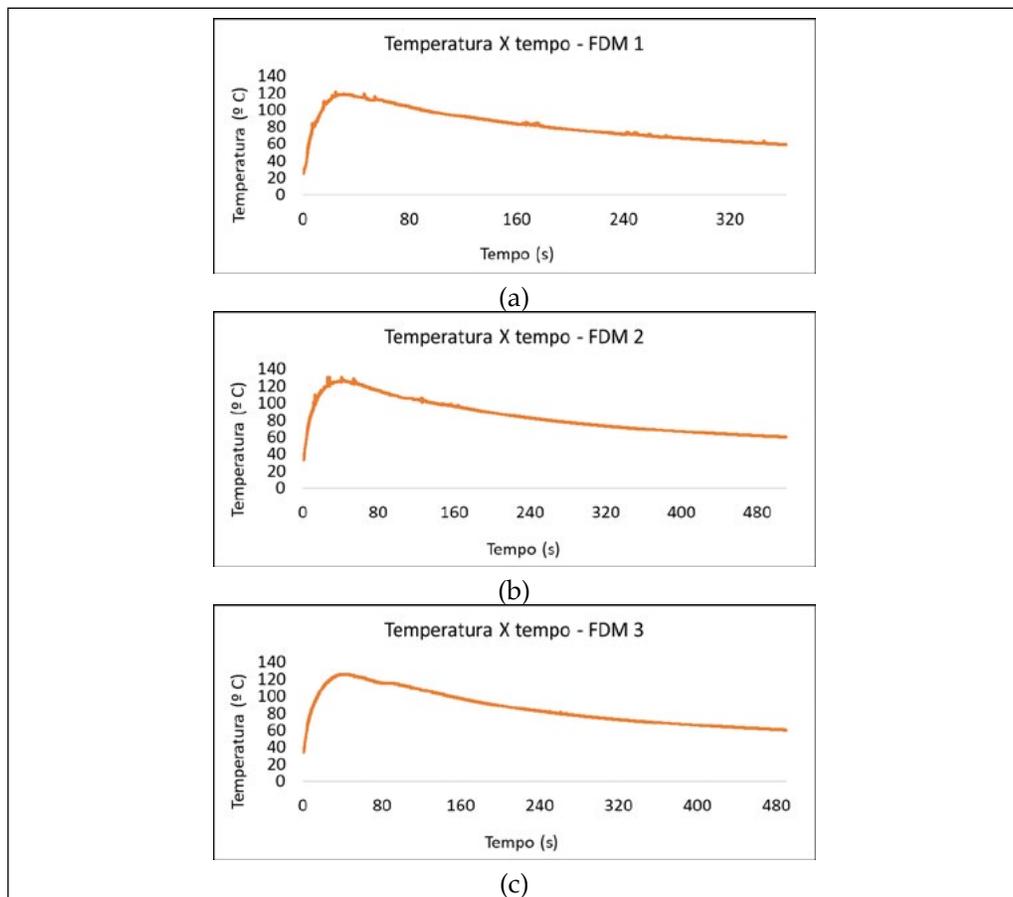


Fonte: Elaborado pelos autores.

Cada amostra teve sua massa mensurada com a utilização de uma balança. Para o molde de silicone modelo FDM obtiveram-se: amostra 1 com 35,2 g, amostra 2 com 35,9 g e a amostra 3 com 35,8 g. Já para o molde de silicone modelo DLP obtiveram-se os seguintes valores de massa: amostra 1 com 36,7 g, amostra 2 com 36,6 g e amostra 3 com 36,3 g.

A mensuração da maior temperatura atingida pelo chumbo nos moldes de silicone foi realizada com a utilização de um termopar e um sistema de aquisição de dados. Cada coleta da mensuração de temperatura foi programada para 50 Hz de frequência. Na Figura 12 (a), (b) e (c), são apresentadas as mensurações realizadas pelo termopar para os moldes de silicone das amostras 1, 2 e 3, respectivamente, do modelo FDM.

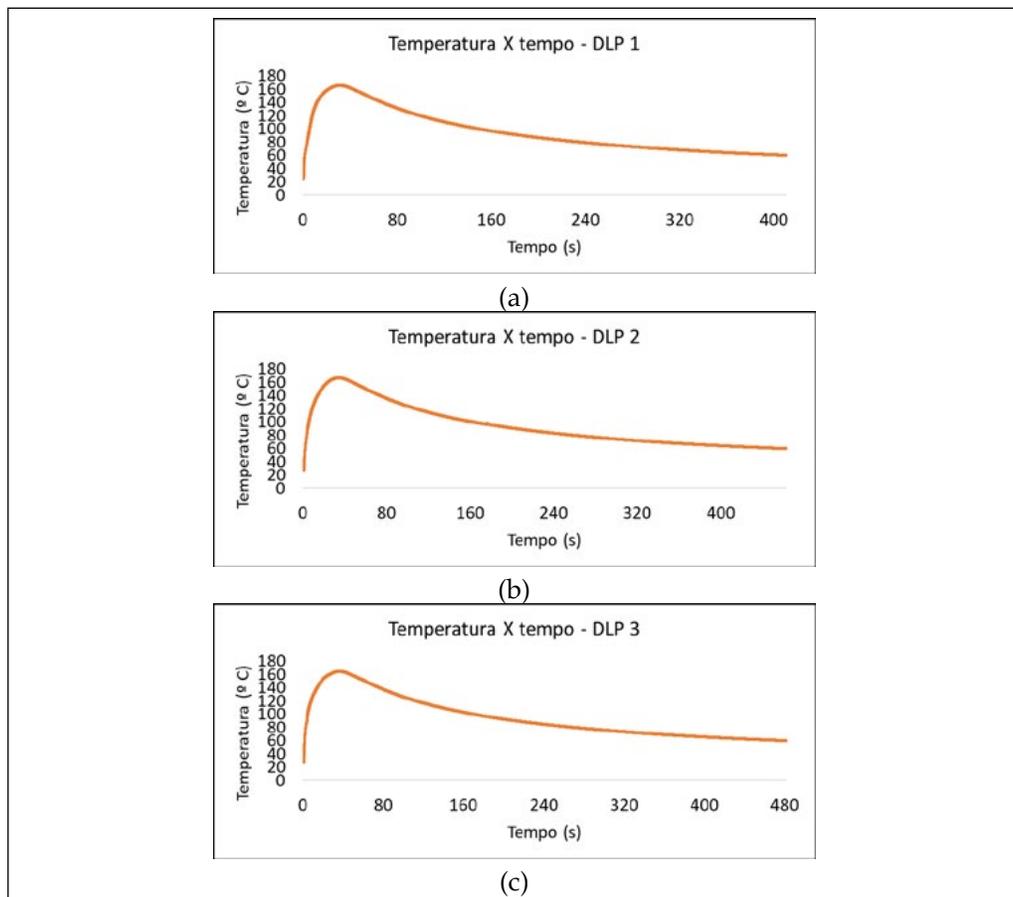
Figura 12. Mensuração da temperatura para o chumbo fundido em molde de silicone modelo FDM da amostra (a) 1, (b) 2 e 3 (c).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as análises dos moldes de silicone modelo FDM amostra 1, a maior temperatura que o chumbo atingiu foi 121° C, enquanto para a amostra 2 a maior temperatura atingida pelo chumbo foi 130° C e por fim, para a amostra 3, a maior temperatura que o chumbo atingiu foi 125° C. Na Figura 13 (a), (b) e (c), são demonstradas as mensurações realizadas pelo termopar para os moldes de silicone das amostras 1, 2 e 3, respetivamente, do modelo DLP.

Figura 13. Mensuração da temperatura para o chumbo fundido em molde de silicone modelo DLP da amostra (a) 1, (b) 2 e 3 (c).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as análises dos moldes de silicone modelo DLP amostra 1, a maior temperatura que o chumbo atingiu foi 165,8° C, enquanto para a amostra 2 a maior temperatura atingida pelo chumbo foi 167° C e por fim, para a amostra 3, a maior temperatura que o chumbo atingiu foi 164,7° C.

4.5 Análise das características geométricas dos contrapesos de chumbo produzidos via fundição em moldes de silicone

As análises das características geométricas dos contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone foram realizadas por meio da observação do encaixe destes em uma roda automotiva. Na Figura 14 é demonstrada a montagem das amostras 1 dos contrapesos fundidos em molde de silicone modelo FDM e modelo DLP em uma roda automotiva.

Figura 14. Montagem dos contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone modelo FDM e DLP em uma roda automotiva.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.6 Durabilidade dos moldes de silicone para fundição de contrapeso de chumbo

Uma das formas de análise da durabilidade dos moldes de silicone foi submetê-lo à quatro variações de temperatura no forno, as quais, cada uma ficou 5 minutos no interior do forno. Posteriormente ao aquecimento, estes tiveram suas massas mensuradas para avaliar a dissipação da massa em função da temperatura submetida, com a utilização de uma balança (Cadence, modelo BAL 153 Utilità, com resolução de 1 g). As temperaturas programadas no forno para o experimento de análise da durabilidade do molde foram 200° C, 290° C, 380° C e 470° C. As variações das temperaturas iniciam em 200° C e decorrem em 90° C em virtude do forno trabalhar com resistências internas à câmara de aquecimento e um sensor de temperatura. Anteriormente à submissão do molde de silicone às variações de temperatura, este teve sua massa mensurada, resultando em 108g. O recipiente que foi utilizado para condução do molde até o forno também teve sua massa mensurada, resultando em 42 g.

As mensurações das massas do molde de silicone submetido às temperaturas de 200° C, 290° C, 380° C e 470° C resultaram nos seguintes valores, respectivamente: 150 g, 149 g, 149 g e 149 g. Outra maneira de analisar a durabilidade dos moldes de silicone foi a partir da deterioração destes sob a condição de seu uso pelo período de 8 meses, no qual foram fabricadas aproximadamente 8000 peças. Na Figura 15 é apresentado o molde de silicone

para fundição de contrapesos de chumbo, após ser utilizado por um período de 8 meses.

Figura 15. Molde de silicone para fundição de contrapeso utilizado pela microempresa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 5 (ilustrações do escaneamento tridimensional) é possível observar algumas imperfeições do processo nas partes lateral e posterior do contrapeso escaneado. Em virtude destas imperfeições, aproximações da geometria do contrapeso fizeram-se necessárias no desenho do modelo 3D digital. Tais fatores podem ter influenciado na diferença de massa entre o contrapeso escaneado (34,5 g) e os contrapesos fundidos em molde de silicone (FDM: 35,2 g; 35,9 g; 35,8 g; DLP: 36,7 g; 36,6 g; 36,3 g). Na Figura 16 (a) e (b) - contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone - nota-se imperfeições na região inferior das peças, referentes aos massalotes. Estas, são decorrentes das dimensões, as quais os massalotes foram desenhados nos modelos 3D digitais apresentados na Figura 5.

Figura 16. Vista aproximada dos contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone modelo (a) FDM e (b) DLP.



Fonte: Elaborado pelos autores.

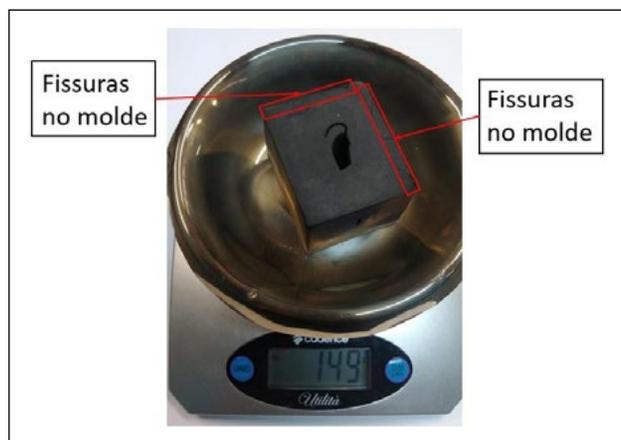
Pode-se observar a diferença de acabamento superficial, em relação a rugosidade dos contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone na Figura 16 (a) e (b). Houve também diferença entre as massas dos contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone, pelos métodos de impressão dos modelos de fundição FDM e DLP. Também podem-se observar (Figura 9) algumas imperfeições no molde de silicone preliminarmente à sua utilização na fundição. As bolhas na cavidade e imperfeições nas extremidades do molde, são provenientes da dificuldade da extração de gases das caixas de moldagem, posterior a deposição da mistura silicone e catalisador. O excesso de cola nas caixas de moldagem também pode ser um fator que pode ter agravado as imperfeições nas extremidades do molde.

Os resultados das Figuras 12 e Figura 13 apresentaram diferenças significativas entre as máximas temperaturas atingidas pelo chumbo fundido em moldes de silicone dos modelos FDM e DLP. Para as amostras do molde de silicone produzido a partir do modelo FDM, a média aritmética das máximas temperaturas atingidas pelo chumbo, foi de $125,33^{\circ}\text{C}$. Enquanto que para o molde produzido em DLP foi de $165,83^{\circ}\text{C}$. Considerando que o molde de silicone resiste até 360°C sem ser comprometido (informação fornecida pelo fabricante Redelease®) pode-se observar que este resiste a fundição do chumbo porque existe um gradiente de temperatura considerável entre o molde (temperatura ambiente) e o chumbo em sua fase líquida (temperatura que é retirado do forno: 430°C). Tal gradiente implica em um choque térmico, fazendo com que o chumbo líquido dissipe grande quantidade de calor para o ambiente. A rugosidade dos modelos de fundição é um fator que pode ter influenciado nas diferentes máximas temperaturas atingidas pelo chumbo nos moldes de silicone. Considerando que o molde produzido a partir do modelo de fundição FDM possui maior rugosidade, este dispõe de uma área maior para dissipação de calor em comparação com o molde produzido a partir do modelo DLP.

Apesar das massas dos contrapesos fundidos em molde de silicone extrapolarem a massa nominal do contrapeso comercializado, estes atenderam ao propósito das peças (estabilizar o balanceamento das rodas automotivas). Por meio da Figura 14, foi possível observar que os contrapesos fundidos em molde de silicone também atendem aos requisitos geométricos das peças comercializadas, uma vez que estes foram montados e atenderam perfeitamente ao encaixe em uma roda automotiva.

O experimento realizado para a avaliação da durabilidade do molde de silicone, demonstrou que este passa a dissipar massa quando submetido a temperaturas entre 200° C e 290° C. A partir da soma das massas (molde de silicone e recipiente) foi possível observar que à temperatura ambiente estes possuem massa de 150 g. Após a submissão deste conjunto à 200° C, este permaneceu com massa de 150 g. A massa do conjunto mudou a partir da submissão deste à 290° C, a qual mensurou 149 g. A variação de massa em 1 g permaneceu até a última tomada do experimento, na qual o molde foi submetido à temperatura de 470° C. O molde passou a apresentar deteriorações em função da alta temperatura, quando foi submetido a temperaturas entre 380°C e 470° C, conforme indicado na Figura 17.

Figura 17. Deteriorações no molde de silicone em função da alta temperatura (470° C).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a análise da durabilidade dos moldes de silicone, estes também foram submetidos à utilização para fabricação de peças a serem comercializadas, por uma microempresa do Oeste de Santa Catarina. A Figura 15 apresenta um molde de silicone para fundição de contrapesos de chumbo que foi utilizado durante o período de 8 meses, na qual fabricaram-se aproximadamente 8000 peças. Visto a quantidade de peças fabricadas, foi possível notar que o molde permanece em condições análogas as iniciais (anterior a primeira fundição).

Por se tratar de um trabalho inovador, não se encontrou na bibliografia trabalhos científicos para realizar uma comparação de resultados. Diante do exposto, verificou-se que é possível garantir as características necessárias para os contrapesos de chumbo (massa e dimensões externas) por meio da fundição destes em moldes de silicone. Também foi possível verificar que a durabilidade do molde é significativa, sendo possível sua fabricação e implementação no âmbito industrial em empresas de médio e pequeno porte.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os experimentos realizados para construção, testes e análises dos moldes de silicone para fundição de contrapesos de chumbo de 35 g, conclui-se que:

- O modelo e os contrapesos fundidos a partir do molde de silicone do modelo DLP possuem melhor acabamento superficial (menor rugosidade) em relação ao modelo FDM;
- Para o caso dos moldes de silicone, quanto maior a rugosidade da sua cavidade, maior é a área de transferência de calor entre este e o ambiente externo, o que resulta na submissão do molde à menores temperaturas;
- Visto que a máxima temperatura a qual o chumbo atinge ao ser depositado no molde é 167° C, e o silicone resiste até 360° C sem ser comprometido, é possível caracterizar os moldes de silicone como permanentes para fundição de chumbo;
- Os moldes apresentam resistência adequada a um período de utilização de 8 meses para fabricação de aproximadamente 8000 peças (dados coletados até o final dos experimentos deste trabalho);
- Os moldes de silicone passam a apresentar deteriorações e variações de comportamento (dureza e resistência à esforços em geral) quando submetidos a temperaturas entre 380°C e 470°C.

REFERÊNCIAS

BALDAM, Roquemar de L.; VIEIRA, Estéfano A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

BEAL, Valter Estevão. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção**. 2002. (Mestrado/Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BLEIWAS, Donald I. Stocks and flows of lead-based wheel weights in the United States. **US Geological Survey**, Estados Unidos, v. 1111, n. 6, 2006.

CANNON, Andrew H.; KING, William P. Casting metal microstructures from a flexible and reusable mold. **Journal of Micromechanics and Microengineering**. Estados Unidos, v. 19, n. 9, 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica. Processos de Fabricação e Tratamento**. 2ª ed. Volume II. São Paulo: Editora Afiliada, 1986.

CHICCA JÚNIOR, N. A. **A integração da impressora 3D FDM no processo ensino-aprendizagem da prática projetual de design**. 2017. (Pós- graduação/Design) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

DA SILVA, Cibele Oliveira *et al.* Uso das fibras do caroço do açaí como fase dispersa em compósitos de matriz termoplástica: uma revisão bibliográfica. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 28654-28679, 2022.

FRAGOSO, Michael Douglas Lima. **Desenvolvimento de impressora 3D com tecnologia Digital Light Processing (DLP)**. 2019.

GIULIANO, Jose Antonio Schenini. **Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal**. 2008.

JIAO, Chen *et al.* Preparation of Al₂O₃-ZrO₂ scaffolds with controllable multi-level pores via digital light processing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 40, n. 15, p. 6087-6094, 2020.

JUNG, Myung-Hwi; KONG, Jeong-Ri; KIM, Hae-Ji. Dimensional Characteristics of 3D Printing by FDM and DLP Output Methods. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**, v. 20, n. 1, p. 66-73, 2021.

KENNEDY, P.; SUTHERLAND, S. Urban Sources of Copper, Lead and Zinc. **Prepared by Organisation for Auckland Regional Council**. Auckland Regional Council Technical Report, 2008.

LARA-PRIETO, Vianney *et al.* An innovative self-learning approach to 3D printing using multimedia and augmented reality on mobile devices. **Procedia computer science**, v. 75, p. 59-65, 2015.

LOVO, João Fiore Parreira *et al.* Análise de resinas para manufatura aditiva por DLP. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Rio de Janeiro: ABCM, 2019.

MOREIRA, Fátima R.; MOREIRA, Josino C. A importância da análise de especificação do chumbo em plasma para a avaliação dos riscos à saúde. **Química nova**, v. 27, p. 251-260, 2004.

MOURA, Bianca Nunes *et al.* MELHORIA DO DESGASTE NO CANAL DE ALIMENTAÇÃO DOS MOLDES DE FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE. **ITEGAM-JETIA**, v. 5, n. 19, p. 131-135, 2019.

PAQUOTO, Caio G. **Estudo das interações de bário, chumbo e zinco com solos de áreas urbanas do estado de São Paulo**. Dissertação Mestrado. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2020.

ROSA, Júlia Almeida *et al.* **Equipamentos de proteção individual por impressão 3D na prevenção à COVID-19: uma revisão sistemática**. 2021.

SILVA, Laís Nara Machado da. **Estudo de técnicas de fundição por cera perdida com ligas de prata aplicada à joalheria**. (2021).

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Editora Blucher, 2017. 9788521211518.

WILTGEN, Filipe. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, São Carlos-SP. 2019.

WORTMANN, Martin; FRESE, Natalie. Industrial-Scale Vacuum Casting with Silicone Molds : A Review. **Applied Research**. 2021.