

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

HERNANI VALENTINI

MOLDE DE SILICONE: USO DA MANUFATURA ADITIVA NA FUNDIÇÃO DE  
CHUMBO

Xanxerê

2022

HERNANI VALENTINI

MOLDE DE SILICONE: USO DA MANUFATURA ADITIVA NA FUNDIÇÃO DE  
CHUMBO

Monografia apresentada à  
Coordenadoria do Curso de  
Engenharia Mecânica do  
Câmpus Xanxerê do  
Instituto Federal de Santa  
Catarina para a obtenção  
do diploma de Engenheiro  
Mecânico.

Orientador: Prof. Me. Carlos  
Alfredo Gracioli Aita

Xanxerê

2022

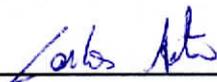


HERNANI VALENTINI

MOLDE DE SILICONE: USO DA MANUFATURA ADITIVA NA FUNDIÇÃO DE  
CHUMBO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico,  
pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e  
aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora  
abaixo indicada.

Xanxerê, 30 de novembro de 2022.



**Prof. Me. Carlos Alfredo Gracioli Aita**

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



**Prof. Me. Filipe Gomes Fagundes**

Instituto Federal de Santa Catarina



**Prof. Me. Vanessa Milhomem Schmitt**

Instituto Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais por não pouparem esforços e sempre me apoiarem. À minha esposa, pelo incentivo e também pelos esforços. Ao meu filho, por ser a maior motivação de crescimento e aprendizado de cada dia. Ao meu orientador, por todos os conselhos, ajuda, oportunidades e paciência com a qual guiou o meu aprendizado. Aos técnicos mecânicos do Instituto Federal de Santa Catarina do Câmpus Xanxerê, pelo auxílio na execução dos experimentos deste trabalho. À microempresa JCS Peças para veículos LTDA, por acreditar e aceitar fazer parte deste trabalho.

*“Os lábios da sabedoria estão fechados,  
exceto aos ouvidos do entendimento.” (Hermes Trismegisto)*

## RESUMO

O presente trabalho propõe a elaboração de um molde de fundição permanente, de baixo custo, para pequenas produções de contrapesos de chumbo tipo garra baixa. Para isso, foram fabricados dois modelos por meio da manufatura aditiva, sendo um 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, a 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:** Fundição. Molde. Silicone.

## ABSTRACT

The present study proposes the elaboration of a permanent casting mold with low cost for low production of lead counterweight. For that two models were fabricated from additive manufacture, being one produced by method fused deposition modeling and other by method digital light processing. Posteriorly, from this models, were built two mold with the utilization of silicone rubber, of that support temperatures up until 360° C. After the built of mold, tests of lead casting were performed to analyse the behavior of this. Utilizing a acquisition system data and a thermocouple, it was found that the larger temperature of the mold is submitted during the lead counterweight casting is in middle 167° C. Concludes that the produced silicone mold (classified as permanent) it presents adequate resistance during the lead casting, becoming a low cost alternative, compared to conventional processes of fabrication often utilized.

**Keywords:** Casting. Mold. Silicone.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escultura de um carneiro fundido em cobre. ....	7
Figura 2 - Câmara de fundição primordial. ....	8
Figura 3 - Vista lateral e superior de um molde de fundição por gravidade. ....	10
Figura 4 - Molde de fundição sob pressão. ....	11
Figura 5 - Equipamento de fundição centrífuga em operação. ....	12
Figura 6 - Principais componentes de um equipamento curvo de fundição contínua. .....	13
Figura 7 - Molde de injeção de cera em silicone. ....	14
Figura 8 - Molde de areia com macho. ....	15
Figura 9 - Etapas do processo de fundição em casca ou shell molding. ....	16
Figura 10 - Etapas do processo de fundição por cera perdida. ....	17
Figura 11 - Componentes de um molde de fundição por espuma perdida. ....	18
Figura 12 - Componentes de um molde de fundição. ....	19
Figura 13 - Princípios da tecnologia AM por extrusão de material. ....	22
Figura 14 - Ciclo de concepção e produção de uma peça impressa em 3D. ....	22
Figura 15 - Princípio do processo de impressão 3D por DLP. ....	24
Figura 16 - Contrapesos de balanceamento de rodas automotivas. ....	27
Figura 17 - Fixação de contrapesos de balanceamento de rodas automotivas. ....	27
Figura 18 - (a) Borracha de silicone preta rígida para pneus miniatura com catalisador (1,050 kg) e (b) Spray desmoldante Redelub (0,250 l). ....	31
Figura 19 - Balança da marca BEL Engineering. ....	32
Figura 20 – (a) Scanner tridimensional da marca Shining 3D e (b) forno elétrico para tratamento térmico tipo mufla, modelo EQF1100, da marca Equitecs. ....	33
Figura 21 - (a) Sistema de aquisição de dados ADS1800 e (b) Interface do software Lynx Assistant. ....	34
Figura 22 - Termopar da marca OMEGA. ....	34
Figura 23 - Fluxograma de métodos. ....	35
Figura 24 - (a) Impressora 3D da marca Creality e (b) Impressora 3D da marca Anycubic. ....	36
Figura 25 - Máquina de corte a laser da marca RickTron. ....	37
Figura 26 - Vista (a) frontal e (b) lateral esquerda do escaneamento tridimensional. ....	41
Figura 27 - Mensuração da massa do contrapeso de 35 g. ....	41

Figura 28 - Vista (a) lateral direita e (b) frontal do modelo esquerdo. ....	42
Figura 29 - Vista (a) frontal e (b) lateral esquerda do modelo direito. ....	42
Figura 30 - Modelo de fundição produzido pelo método (a) FDM e (b) DLP. ....	43
Figura 31 - Caixas de moldagem abertas, gabaritos e modelos de fundição (a) FDM e (b) DLP. ....	44
Figura 32 - Vista (a) superior e (b) perspectiva da caixa de moldagem com modelos de fundição DLP. ....	44
Figura 33 - Vista (a) superior e (b) frontal do molde de silicone modelo DLP para fundição do contrapeso de chumbo de 35 g. ....	45
Figura 34 - Cavidade do molde esquerdo para posicionamento do termopar. ....	45
Figura 35 - (a) Molde de silicone com chapa de aço do contrapeso e termopar prensados e (b) conjunto do molde de silicone com chumbo solidificado. ....	46
Figura 36 - Contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo FDM (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3. ....	47
Figura 37 - Contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo DLP (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3. ....	47
Figura 38 - Massa do contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo FDM (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3. ....	48
Figura 39 - Massa do contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo DLP (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3. ....	48
Figura 40 - Gráfico de mensuração da temperatura em função do tempo para o chumbo fundido em molde de silicone modelo FDM da amostra (a) 1, (b) 2 e 3 (c). ....	49
Figura 41 - Gráfico de mensuração da temperatura em função do tempo para o chumbo fundido em molde de silicone modelo DLP da amostra (a) 1, (b) 2 e 3 (c). ....	50
Figura 42 - Montagem dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo FDM e DLP em uma roda automotiva. ....	51
Figura 43 - Mensuração da massa (a) do molde de silicone anteriormente à submissão deste às variações de temperatura e (b) do recipiente do molde. ....	52
Figura 44 - Mensuração da massa do molde de silicone submetido à (a) 200° C, (b) 290° C, (c) 380° C e (d) 470° C. ....	53
Figura 45 - Molde de silicone para fundição de contrapeso de chumbo utilizado pela microempresa JCS. ....	54
Figura 46 - Vista aproximada dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo (a) FDM e (b) DLP. ....	55

Figura 47 - (a) Imperfeições nas extremidades e (b) bolhas na cavidade do molde de silicone.....	56
Figura 48 - Vista aproximada da montagem dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo FDM e DLP em uma roda automotiva. ....	57
Figura 49 - Deteriorações no molde de silicone em função da alta temperatura (470° C).....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
1.1 Justificativa .....	4
1.2 Problemática de pesquisa .....	4
1.3 Objetivo geral .....	4
1.4 Objetivo específico .....	4
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Fundição</b> .....	<b>6</b>
2.1.1 Histórico .....	6
2.1.2 Principais processos de fundição .....	9
2.1.2.1 Moldes permanentes.....	9
2.1.2.2 Moldes temporários.....	14
2.1.3 Componentes de moldes de fundição .....	18
2.1.4 Processos de solidificação dos metais .....	20
<b>2.2 Manufatura aditiva</b> .....	<b>20</b>
2.2.1 Modelagem por deposição fundida - FDM.....	21
2.2.2 Processamento digital por luz - DLP .....	23
<b>2.3 Ligas de chumbo</b> .....	<b>25</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Delimitação da pesquisa</b> .....	<b>29</b>
3.1.1 Do ponto de vista da natureza.....	29
3.1.2 Do ponto de vista da abordagem do problema .....	29
3.1.3 Do ponto de vista dos objetivos.....	29
3.1.4 Do ponto de vista dos procedimentos técnicos .....	30
<b>3.2 Análise dos moldes de silicone</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3 Coleta de dados</b> .....	<b>31</b>
<b>3.4 Instrumentos/ferramentas de coletas</b> .....	<b>32</b>
<b>3.5 Análise de dados</b> .....	<b>35</b>
<b>4 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES</b> .....	<b>39</b>
<b>5 ORÇAMENTO</b> .....	<b>40</b>
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
<b>6.1 Mensuração do contrapeso de chumbo de 35 g</b> .....	<b>41</b>
<b>6.2 Desenho do modelo tridimensional do contrapeso de chumbo de 35 g</b> .....	<b>42</b>

6.3	Produção dos modelos de fundição do contrapeso de chumbo de 35 g.....	43
6.4	Construção dos moldes de silicone para fundição do contrapeso de chumbo de 35 g.....	43
6.5	Produção do contrapeso de chumbo de 35 g a partir do molde de silicone	46
6.6	Análise das características geométricas dos contrapesos de chumbo de 35 g produzidos via fundição em moldes de silicone .....	51
6.7	Análise da durabilidade dos moldes de silicone para fundição de contrapeso de chumbo de 35 g.....	51
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	55
8	CONCLUSÃO.....	60
9	RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS .....	62

## 1 INTRODUÇÃO

Em meio as condições atuais do mercado global, é notável a necessidade da economia nos processos de fabricação, visando a competitividade nos negócios. Em virtude disto, este trabalho apresenta o projeto de um molde permanente de silicone para fundição de contrapeso de chumbo tipo garra baixa.

A fundição é um processo de fabricação de peças e objetos com geometria definida pelo seu molde. Chiaverini (1986), descreve a fundição como um processo de fabricação, no 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 de consumo de combustível. O chumbo é a principal matéria prima 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 concepção destas peças.

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. Visto os fatos anteriormente citados, a fabricação de moldes permanentes em materiais metálicos, se torna um processo de alto investimento monetário (BALDAM E VIEIRA, 2014).

Da Silva (2022), demonstra 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.

De acordo com Cannon e King (2009), a flexibilidade dos moldes de silicone, permite a fundição de superfícies complexas. Wortmann *et al.* (2021), corrobora com o fato anteriormente citado, comentando que a fundição em moldes de silicone é um dos métodos mais utilizados para a fabricação de pequenos lotes de protótipos.

## **1.1 Justificativa**

O presente trabalho, busca demonstrar uma alternativa para a obtenção de moldes permanentes para fundição de contrapesos de chumbo tipo garra baixa. O molde permanente de silicone, possui um investimento monetário significativamente menor que os moldes permanentes tradicionalmente comercializados.

De acordo com o fabricante do silicone Redelease (Redelease, Joaçaba, SC., Brasil), a borracha de silicone que será utilizada para construção dos moldes, suporta temperaturas de até 360 °C sem comprometer o molde. Segundo Moreira (2004), o ponto de fusão do chumbo é 327,4 °C.

Levando em consideração as informações anteriores, e também o custo do frasco de silicone, nota-se que esta é uma alternativa viável economicamente para a fabricação de contrapeso de chumbo tipo garra baixa para pequenas produções.

## **1.2 Problemática de pesquisa**

No mercado de contrapesos para balanceamento de rodas automotivas, existem muitos moldes permanentes para fundição de contrapesos tipo garra baixa, porém em sua maioria, são de alto investimento monetário.

Como elaborar uma alternativa para a produção de moldes permanentes para fundição de contrapesos para balanceamento de rodas automotivas, com baixo investimento monetário?

## **1.3 Objetivo geral**

Projetar um molde de silicone para fundição de contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 gramas para balanceamento de rodas automotivas por meio da utilização de um modelo produzido através da manufatura aditiva.

## **1.4 Objetivo específico**

- Mensurar um contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 g;
- Desenhar um modelo tridimensional de um contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 g;
- Produzir o modelo tridimensional de um contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 g através da impressão 3D dos tipos modelagem por deposição fundida e processamento digital por luz;
- Construir um molde de silicone para fundição de contrapeso de

chumbo tipo garra baixa de 35 g através de um modelo impresso em 3D;

- Produzir um contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 g a partir do molde de silicone;
- Analisar as características geométricas do contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 g produzido via fundição em molde de silicone;
- Analisar a durabilidade de um molde de silicone para fundição de contrapeso de chumbo tipo garra baixa de 35 g.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e histórico de manufatura aditiva e fundição, assim como aplicações de chumbo e de moldes de silicone no processo de fundição. Os assuntos citados anteriormente são objeto de estudo desta pesquisa, portanto faz-se necessário uma breve introdução destes.

### 2.1 Fundição

De acordo com Nunes (2021), a fundição é um processo de fabricação de peças e objetos com formato determinado pelo seu molde. Este processo consiste no vazamento de um material em sua fase líquida para o interior de um molde, que por sua vez, possui o formato da peça desejada, fazendo com que esse material líquido, se solidifique de acordo com a geometria do molde. A autora ainda comenta que a fundição é aplicação do princípio de Arquimedes “O líquido toma a forma do vaso que o contém”.

#### 2.1.1 Histórico

No presente sub tópico, será apresentado um breve histórico do processo de fundição em geral, assim como será direcionado à fundição de chumbo.

Segundo Tâmega (2017), os primeiros registros dos processos de fundição de metais e ligas da história datam de 4000 a.C. Essa prática se desenvolveu a partir do momento em que as técnicas conhecidas de modelagem de metais se tornaram ineficazes para a obtenção de determinadas geometrias de objetos.

No período de 5.000 a 3.000 a.C., apareceram os primeiros trabalhos com cobre fundido, sendo os moldes feitos de pedra lascada. Na sequência, inicia-se a Era do Bronze. O processo de fundição de ferro tem lugar na China em 600 a.C.; já o de aço se dá bem mais tarde, na Inglaterra, em 1740, atribuído ao inventor inglês, filho de imigrantes alemães, Benjamin Huntsman (BALDAM e VIEIRA, 2014).

Oriundo da antiga Mesopotâmia (atual Iraque), o objeto fundido mais antigo que se conhece, é uma peça que apresenta a geometria de um pequeno sapo, fabricada pelo processo de fundição por cera perdida e data de 3200 a.C. (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Entre as mais antigas conhecidas fundições de cera perdida estão pequenas figuras de animais montadas em alfinetes e cravadas no centro de selos cilíndricos, dispositivos usados anteriormente a invenção da escrita para formar uma característica de impressão na argila úmida como uma indicação de propriedade ou acordo em uma negociação. Este selo, esculpido com figuras de gado, carrega um carneiro inclinado fundido em cobre original do período Uruk na Mesopotâmia, por volta de 3500 a.C. (HUNT, 1980).

Analisando os autores citados anteriormente, é possível notar a dificuldade nas pesquisas históricas que buscam datar o início do processo de fundição. A Figura 1 por exemplo, apresenta uma escultura de um carneiro fundido em cobre, e estima-se que data de 3500 a.C.

Figura 1 - Escultura de um carneiro fundido em cobre.



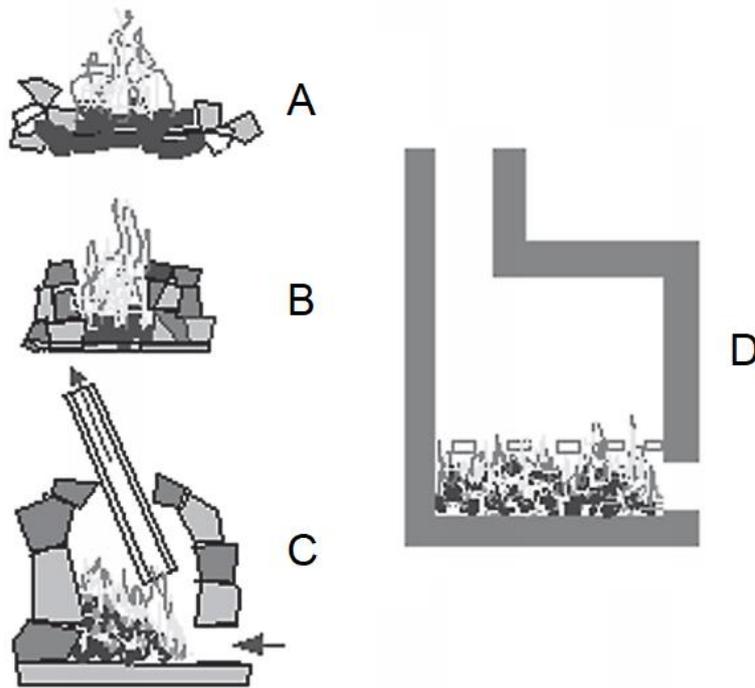
Fonte: Gold bulletin (1980).

Nos primórdios da fundição, o metal era fundido dentro de uma câmara feita de pedra e terra, onde na parte inferior da parede lateral desta câmara, havia um orifício para o escoamento do metal. Ao passo que, com a evolução do processo de fundição, este orifício gradativamente se transformou em moldes, formando objetos e peças como um machado, ponta de flecha, entre outros (GONZÁLEZ, 2002).

A Figura 2, ilustra como eram feitas as câmaras de fundição nos primórdios do processo. De acordo com a Figura 2 - D, é possível notar a cavidade na parte

inferior da lateral direita responsável pelo escoamento do metal.

Figura 2 - Câmara de fundição primordial.



Fonte: González (2002).

De acordo com Branigan (1974), a transição para novos materiais, como prata, ouro, bronze e chumbo que ocorreu ainda no final do período Neolítico, por volta de 3000 a.C., foi um processo demorado. O autor ainda comenta que esses materiais foram utilizados inicialmente na fabricação de pequenos objetos, experimentos sem propósito óbvio, que provavelmente formavam ornamentos cujo significado era bastante simbólico. A partir deste período, o chumbo se tornou uma das matérias-primas do processo de fundição.

Quais são as primeiras evidências da fundição de chumbo? Ao contrário do cobre nativo, o chumbo nativo é raro, portanto, quando o metal de chumbo é encontrado em um sítio arqueológico, quase certamente é um produto de chumbo fundido. Na cidade de Çatal Huyuk, na Ásia menor, miçangas de chumbo foram encontradas e estipula-se que sejam de antes de 6500 a.C. Chumbo encontrado em Yarim Tepe, no Iraque, data do sexto milênio a.C., no sítio arqueológico de Arpachiyeh também no Iraque, foi encontrado chumbo que data do quinto milênio a.C. e, nos sítios de Anau and Hissar III, no Irã, e em Naqada no Egito foi descoberto chumbo que data do quarto milênio a.C. As descobertas sugerem que a fundição de chumbo, provavelmente em pequena escala, iniciou pelo menos tão cedo quanto o sétimo milênio a.C. (GALE, 1981).

Segundo Gale (1981), baseado na existência de evidências descobertas em sítios arqueológicos, é possível que o primeiro metal a ser fundido pelo homem

tenha sido o chumbo, com uma diferença de aproximadamente 3000 anos para a fundição do cobre.

É possível notar a evolução do processo de fundição ao decorrer dos anos. Com o passar do tempo, especificamente a partir do século XVIII, essa evolução se tornou exponencial. Processos de fundição inovadores foram concebidos e tem contribuído significativamente para a expansão tecnológica da indústria.

### 2.1.2 Principais processos de fundição

Neste subtópico serão apresentados os principais processos de fundição existentes e para promover uma melhor organização e leitura desta seção, os métodos serão sublinhados.

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, em algumas ocasiões, o autor afirma que ligas de cobre e bronze também são utilizadas. A utilização destes materiais para a fabricação do molde visa possibilitar a produção de inúmeras peças sem a necessidade de confeccionar novos moldes a cada fundição. Devido às matérias-primas para a fabricação destes moldes, a utilização deste método implica na limitação das dimensões e complexidade dos modelos (SILVA, 2021).

Giuliano (2008), afirma que dentro dessa classificação, encontram-se os processos de fundição por gravidade, por injeção, centrífuga, contínua (lingotamento), em moldes de silicone entre outros.

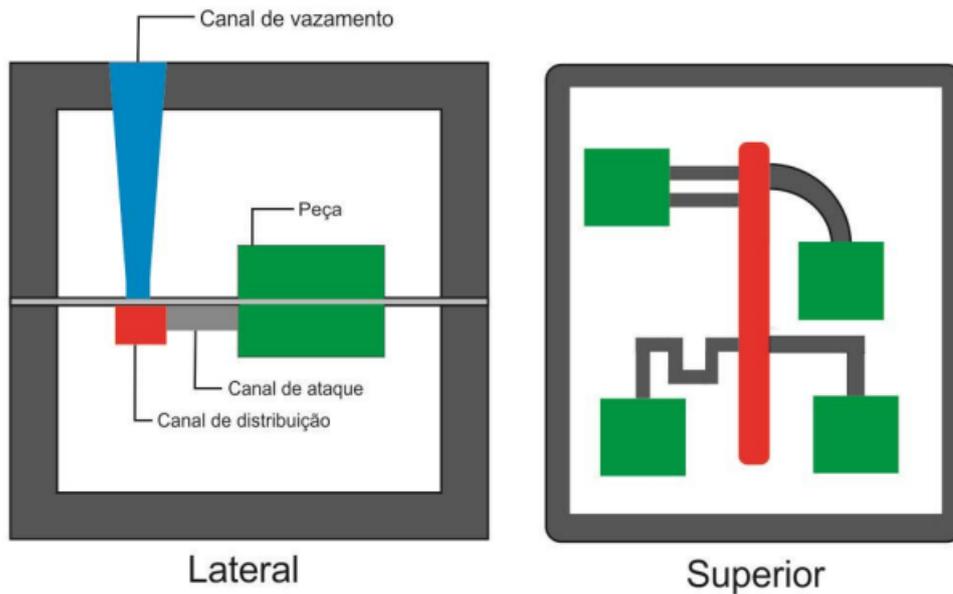
O método dos moldes temporários, utiliza materiais que resultam em moldes inutilizáveis ao final das fundições. Dessa forma, faz-se necessário produzir novos moldes para cada fundição. Essa classificação engloba processos de fundição em molde de areia, *shell molding*, de precisão por cera perdida, por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

#### 2.1.2.1 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 as demais. O procedimento 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 aloja no fundo do molde preenchendo todo o espaço livre em seu interior (MOURA, *et al.* 2019).

Figura 3 - Vista lateral e superior de um molde de fundição por gravidade.



Fonte: Nizer *et al.* (2018).

A Figura 3 ilustra a vista lateral e superior do interior de um molde de fundição por gravidade. É possível notar nesta figura, o trajeto que deve ser percorrido pelo metal líquido, até que este chegue à cavidade do molde para tomar sua forma.

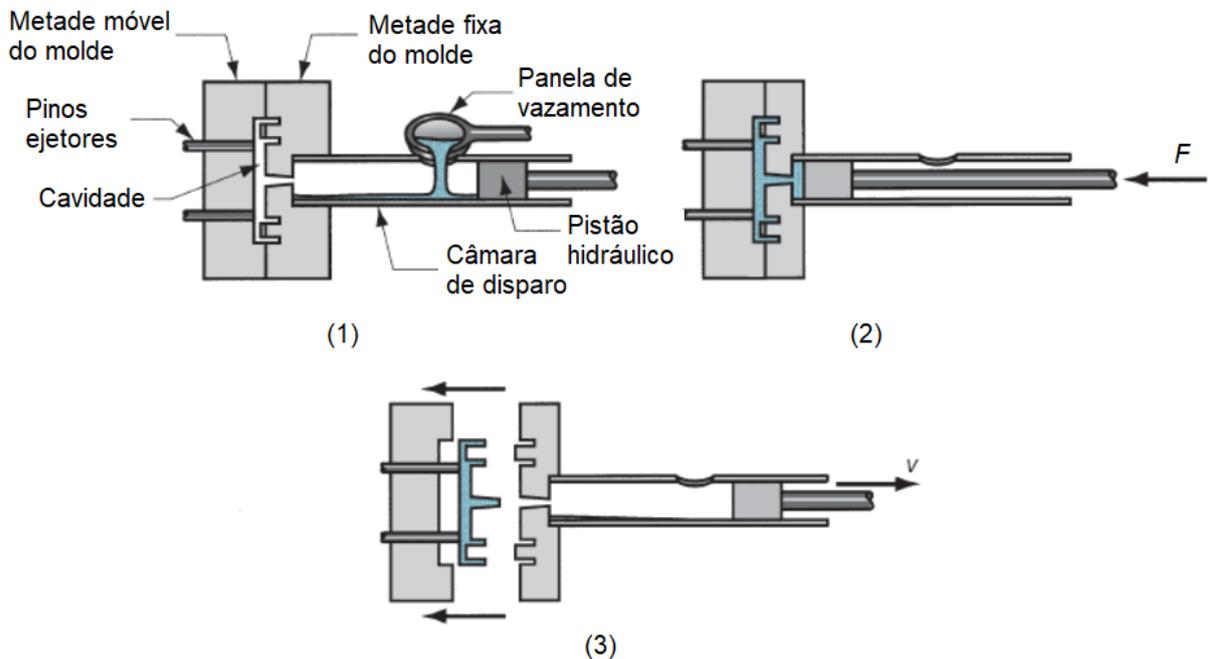
Em virtude de sua alta resistência ao calor, o molde proporciona à massa fundida um resfriamento gradativo. Este fato acarreta na textura densa e de granulação fina com melhores propriedades mecânicas (GREß, *et al.*, 2020).

Segundo Dutra, Rosa e Braun (2021), “A fundição sob pressão consiste na injeção de um metal líquido para o interior de uma cavidade de um molde, submetendo o sistema a altas pressões e posterior resfriamento até sua solidificação.” Com esse processo, é possível atingir um excelente acabamento superficial, geralmente a ponto de descartar a necessidade de processos de finalização.

Na Figura 4, é apresentado um esquema de molde de fundição sob pressão. Esta figura demonstra o pistão hidráulico, panela de vazamento e câmara de disparo – elementos do molde pelo qual o metal líquido é injetado para a cavidade com o formato da peça. Também é possível visualizar na Figura 4, que o molde deve conter uma parte fixa e outra móvel, disposição que visa possibilitar sua abertura e retirada

da peça fundida através dos pinos ejetores.

Figura 4 - Molde de fundição sob pressão.



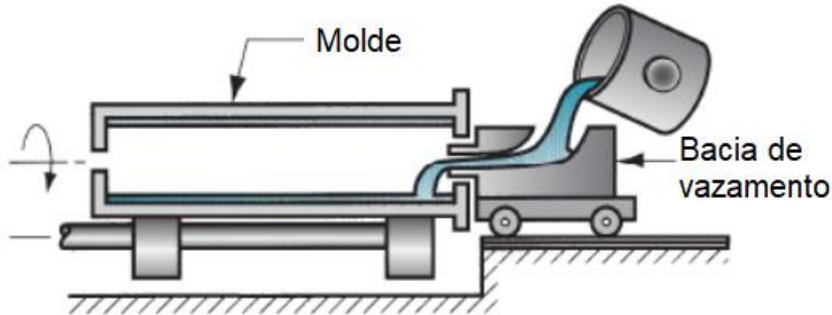
Fonte: Adaptado de Groover (2014).

A injeção de metais é similar à injeção de plástico, porém, em virtude do intenso desgaste dos moldes metálicos, a injeção de metais se reduz aos não ferrosos de baixo ponto de fusão. A aplicação desse método se torna factível a partir da necessidade de produção na casa de milhares de peças, devido ao alto custo de seu molde (SOARES, 2000).

De acordo com Kusnowo e Gunara (2017), o processo de fundição centrífuga é adequado para fabricação de peças que possuem um eixo de revolução, como cilindros e tubos fundidos. Esse método dar-se-á de forma que o metal em sua fase líquida, é despejado no interior de um molde rotativo à uma determinada temperatura, que irá impactar na espessura desejada anterior à solidificação da peça fundida. O volume de metal líquido depositado no molde, influencia diretamente na espessura da peça final.

A Figura 5 apresenta o equipamento de fundição centrífuga durante a sua operação. Por meio da figura, é possível notar que o metal líquido é depositado no interior do molde rotativo. Ao passo que o molde se movimentava na direção radial, o metal líquido toma a forma do molde por intermédio da força centrífuga que age no conjunto.

Figura 5 - Equipamento de fundição centrífuga em operação.



Fonte: Adaptado de Groover (2014).

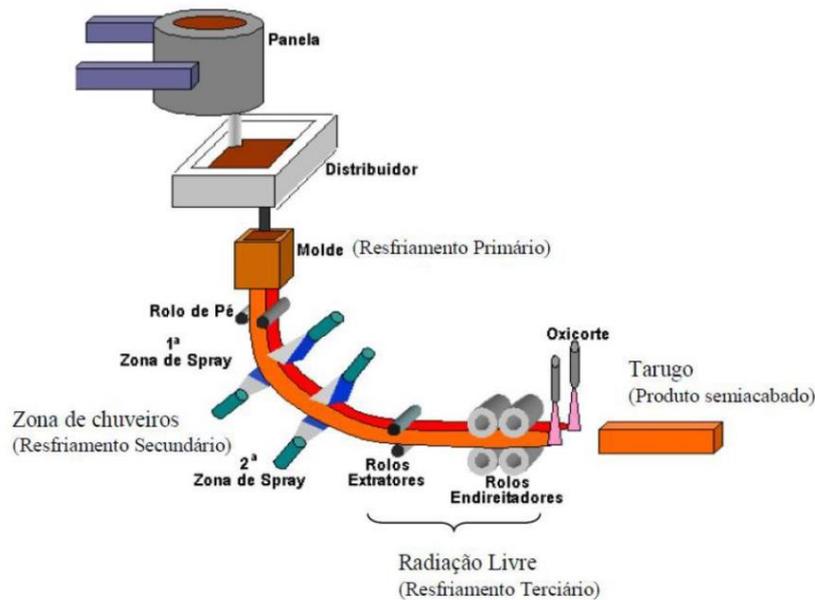
Kusnowo e Gunara (2017), afirmam que a fundição centrífuga é capaz de produzir peças de alta densidade e melhores propriedades mecânicas em relação aos processos de fundição por gravidade. Segundo Velhinho (2003), “Como principais vantagens do método, podem referir-se um preenchimento melhorado do molde e uma incidência reduzida de porosidades, devido à pressão metaloestática desenvolvida durante o processo.”

Baldam e Vieira (2014), afirmam que a fundição contínua, também chamada de lingotamento, possui um índice de superioridade significativo em questão de produção de aço por tonelada, em relação aos demais processos de fundição. Os autores ainda comentam que, embora existam diversas configurações para equipamentos de lingotamento, a mais utilizada modernamente é a mostrada na Figura 6, o equipamento curvo para fundição contínua. Esse processo ocorre de forma que o metal líquido é imprimido para o interior de um molde com extremidades abertas, fato que justifica a nomenclatura – contínua.

A Figura 6 ilustra os principais componentes de um equipamento curvo de fundição contínua. Nota-se que após o metal líquido ser despejado no molde, é necessário que este ainda percorra um trajeto passando por rolos direcionadores, zonas de spray para resfriamento e rolos extratores. Ao final da linha, deve existir um elemento cortante para finalizar o processo de lingotamento.

Os produtos finais desta fundição, são significativamente mais compridos que os moldes, os quais podem possuir formatos para produção de seções quadrada, retangular, hexagonal entre outros (CHIAVERINI, 1986).

Figura 6 - Principais componentes de um equipamento curvo de fundição contínua.



Fonte: Adaptado de Santos (2005).

Conforme Baldam e Vieira (2014), este método apresenta mínima concentração de escória, inclusões, defeitos de estrutura e uniformidade de produção. Quando comparado à fundição em molde de areia e a fundição em molde metálico, o lingotamento apresenta índices expressivamente menores em relação à incidência de defeitos.

Conforme Wortmann *et al.* (2021), a fundição em molde de silicone é um dos métodos mais difundido da prototipagem rápida. Segundo os autores, este método é utilizado industrialmente para a fabricação de pequenos lotes de protótipos. A construção destes moldes se dá a partir de um modelo, que pode por exemplo ser impresso em 3D, 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 vazar 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 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).

Figura 7 - Molde de injeção de cera em silicone.



Fonte: Lino (2002).

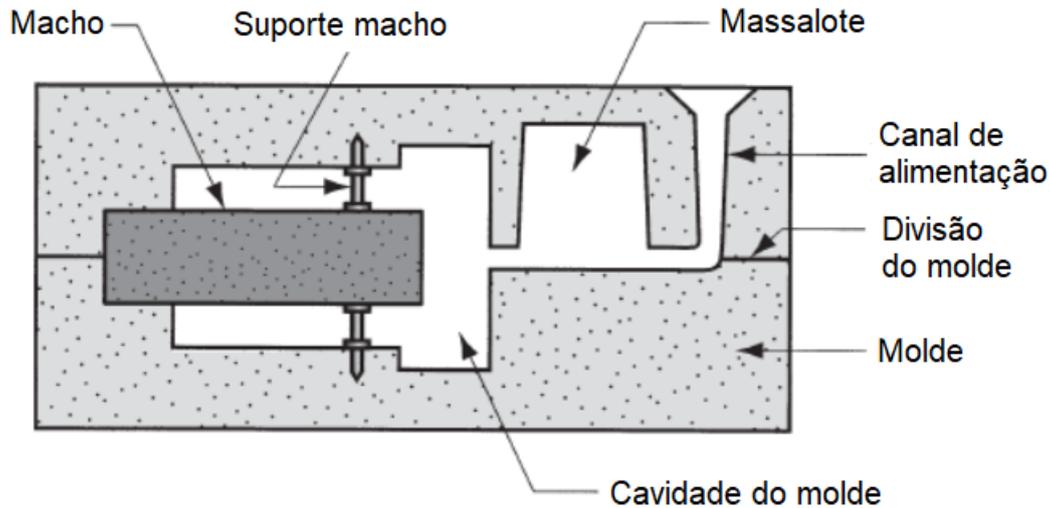
Na Figura 7, é apresentado um molde de silicone para injeção de cera. É possível observar a precisão deste molde em relação às nuances reproduzidas a partir do modelo.

#### 2.1.2.2 Moldes temporários

De acordo com Costa (2019), o método de fundição em molde de areia é o mais utilizado dentro dos processos de fundição por gravidade, já que este é o mais barato e versátil.

A Figura 8 apresenta o esquema de um molde de areia com macho. Segundo Chiaverini (1986), este método tem seu início na confecção do molde que consiste em compactar a mistura do material do molde - composta basicamente por areia siliciosa, argila e água - sob o modelo do objeto a ser fundido e montado em uma caixa de moldar. Em seguida, é necessário realizar a abertura dos canais alimentador e de vazamento, como é apresentado no esquema da Figura 8. Posteriormente, faz-se o vazamento do metal líquido para o interior do molde, que com a ação da força gravitacional, deve preencher as cavidades do molde. Por fim, a peça fundida deve ter as partes referentes ao canal alimentador e de vazamento cortadas e o macho retirado.

Figura 8 - Molde de areia com macho.

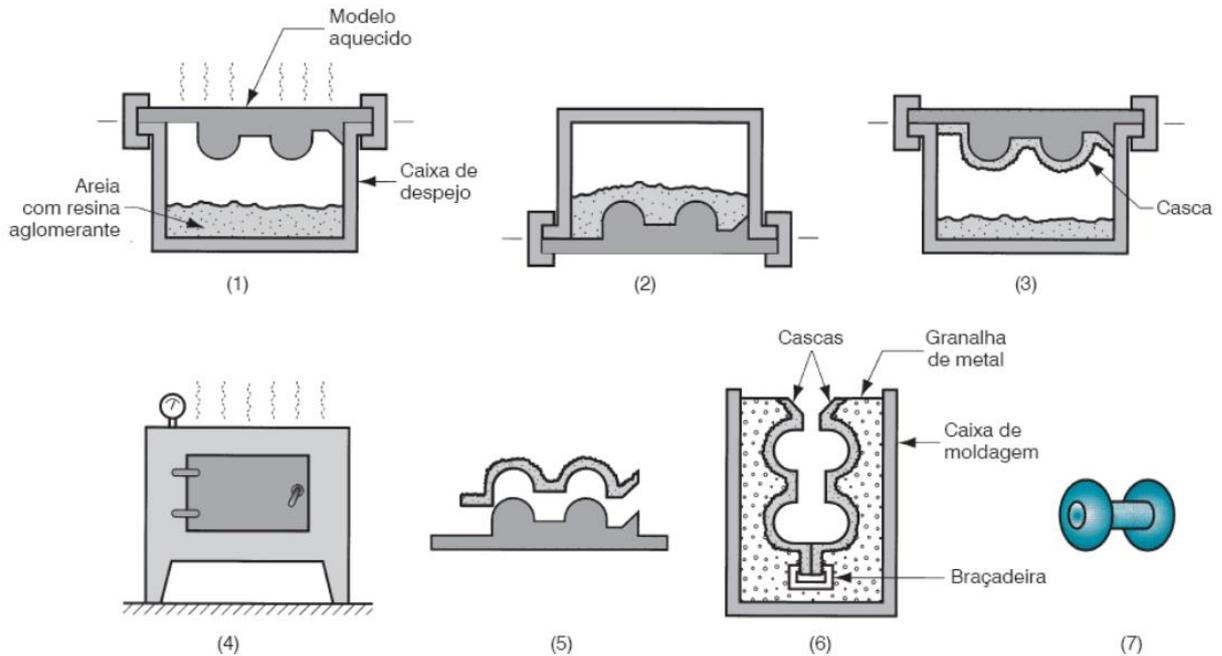


Fonte: Adaptado de Groover (2014).

Segundo Kusnowo e Gunara (2018), o processo de fundição em casca, ou *shell molding*, como é conhecido, possui melhores índices de precisão dimensional, maior taxa de produtividade e envolve menos mão de obra, quando comparado aos demais processos da categoria dos moldes temporários. Conforme Baldam e Vieira (2014), “O processo de fundição em casca é baseado no uso de uma mistura de resina sintética e areia sobre uma placa metálica aquecida, formando uma casca de pequena espessura sobre ela.” Este método se diferencia da fundição em areia apenas pela construção do molde, já que o processo de deposição do metal líquido é similar a ambos os processos.

As etapas do processo de fundição em casca são ilustradas na Figura 9. Observa-se que após a deposição da fina casca de areia e resina sobre o modelo, esta deve ser tratada termicamente para possibilitar o desmolde. Posteriormente, é possível introduzir o molde de casca em uma caixa de moldagem, a fim de melhor assegurar a etapa do vazamento do metal.

Figura 9 - Etapas do processo de fundição em casca ou shell molding.

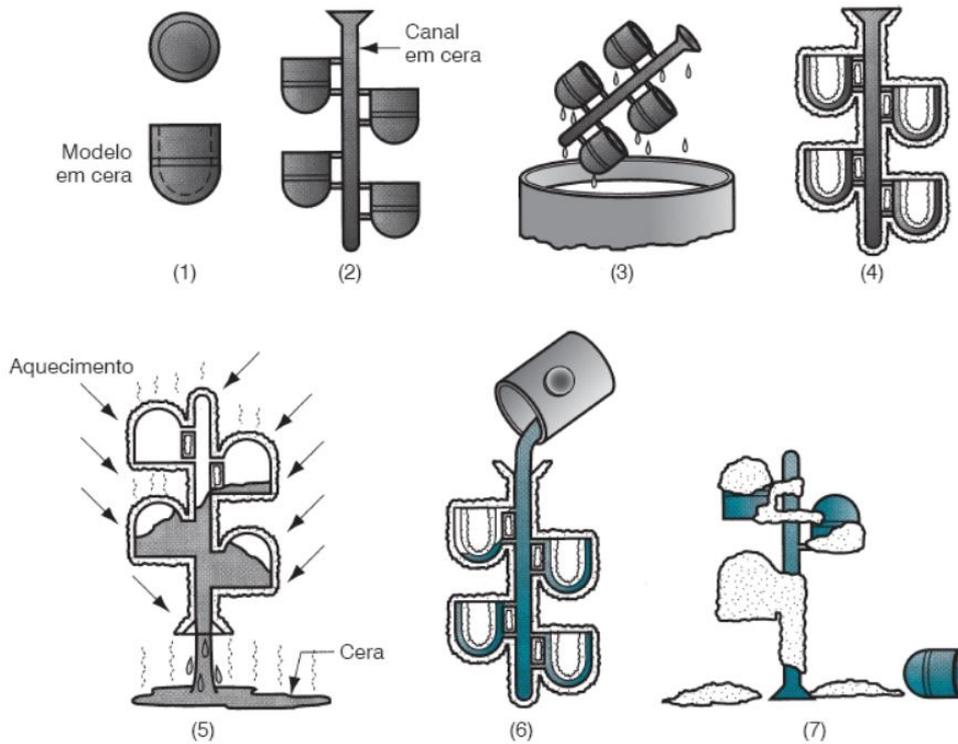


Fonte: Groover (2014).

De acordo com Kanyo *et al.* (2020), o processo de fundição de precisão por cera perdida, tem seu início na construção do molde, que pode ser cerâmico, de borracha entre outros materiais capazes de suportar a temperatura da cera líquida. Posteriormente, a cera líquida é injetada neste molde, a fim de produzir um modelo de cera. Após a solidificação do modelo, este é mergulhado repetidamente em uma pasta cerâmica, a qual necessita de um período de cura para formar o revestimento em torno do modelo de cera. Em seguida, a casca de cerâmica deve ser aquecida para que a cera em seu interior se derreta e proporcione o espaço oco para a fundição do material desejado, como é possível observar na Figura 10. Por fim, o material líquido a ser fundido deve ser depositado no molde e após sua solidificação, é necessário romper a casca cerâmica para a retirada do objeto fundido.

Wang *et al.* (2019), afirma que este método de fundição, é conhecido por sua excelente qualidade de reprodução, por possibilitar a fundição de peças com geometrias altamente complexas e por proporcionar boas tolerâncias. No entanto, seu custo benefício se limita a produções em larga escala, devido ao alto custo ferramental e ao período de cura da cera e do revestimento cerâmico.

Figura 10 - Etapas do processo de fundição por cera perdida.

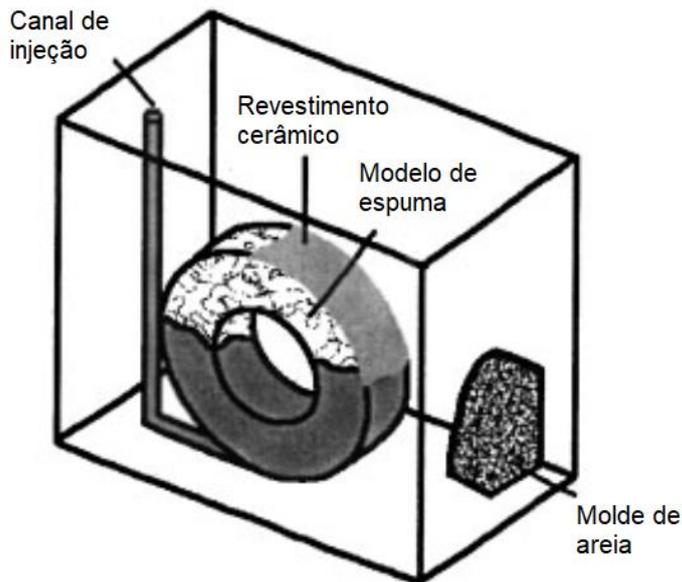


Fonte: Groover (2014).

Conforme Ramesh *et al.* (2022), a fundição por espuma perdida, ou *lost foam casting* como é conhecida, possui características muito similares ao processo de fundição por cera perdida e fundição em molde de areia. A diferença entre estes dois processos se dá pelo material de construção do modelo e na forma de retirá-lo do molde refratário. No caso da *lost foam*, o modelo é produzido em espuma, geralmente poliestireno. Posterior a construção do modelo, o processo de revestimento cerâmico é análogo ao método utilizado na fundição por cera perdida. Após a cura da casca refratária que envolve o modelo de espuma, o molde pode ser compactado em uma caixa de moldar com areia, visando sua imobilização. Por fim, o metal líquido pode ser depositado no molde, visto que assim que o metal líquido entrar em contato com a espuma, esta irá evaporar, propiciando o espaço para o objeto a ser fundido.

A Figura 11 ilustra um molde de fundição por espuma perdida. Pela figura anterior, é possível notar que este processo se diferencia da fundição em areia, pelo preenchimento do molde com o modelo temporário anteriormente a deposição do metal líquido.

Figura 11 - Componentes de um molde de fundição por espuma perdida.



Fonte: Adaptado de Houzeaux (2004).

De acordo com Groover (2014), a utilização deste método de fundição possibilita descartar a previsão de ângulos de extração, a produção de machos separadamente do modelo e linhas de partição, visto que o molde não precisa ser aberto em seções superior e inferior.

O principal fator que distingue os processos de fundição citados anteriormente é a construção de seus moldes. Sendo assim, é notável a importância da compreensão dos componentes de um molde de fundição.

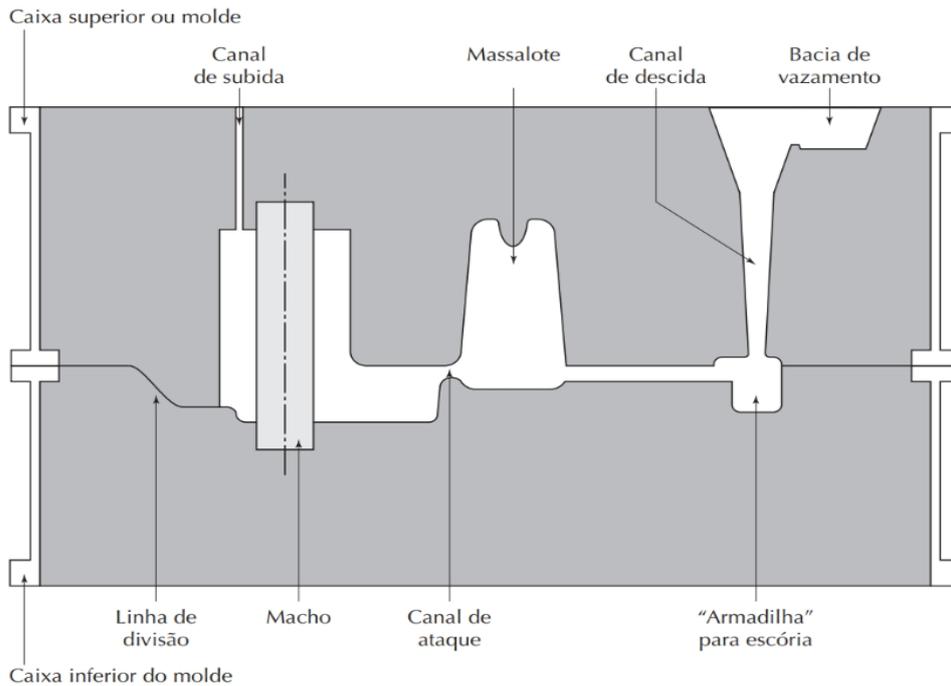
### 2.1.3 Componentes de moldes de fundição

O presente sub tópico, descreve os principais componentes de um molde de fundição.

De acordo com Chiaverini (1986), os moldes de fundição devem ser resistentes mecanicamente a ponto de suportar o peso do metal líquido e também suportar a ação da erosão no momento do vazamento do metal líquido. Outro fator impreterível é a geração da menor quantidade possível de gases, ou a viabilização da evasão destes, de forma a evitar a erosão do molde e contaminação do metal.

A Figura 12, apresenta os componentes de um molde de fundição em areia. A cavidade do molde é o elemento responsável pelo formato do objeto a ser fundido e é formada a partir de um modelo prévio (GROOVER, 2014).

Figura 12 - Componentes de um molde de fundição.



Fonte: Kiminami (2013)

A bacia de vazamento em conjunto com canal de descida, como mostra a Figura 12, são os componentes responsáveis pela condução do metal líquido até a cavidade do molde, que dá origem ao objeto fundido (CHIAVERINI, 1986).

Conforme Kiminami (2013), os machos são utilizados na fundição de objetos que possuem cavidades, como furos, canais entre outros. Este componente tem o intuito de impedir que o metal líquido preencha o espaço onde estão dispostos.

Segundo Baldam e Vieira (2014), o canal alimentador, ou massalote como é apresentado na Figura 12, é o elemento responsável por minimizar o efeito vazio – contração que ocorre no final da solidificação – no objeto fundido. O autor ainda comenta que o massalote deve ser posicionado no molde, de forma que este seja a última parte a se solidificar, com o intuito de fornecer metal líquido para os espaços vazios da cavidade.

Canal de subida, é o elemento responsável por permitir que o metal líquido escoe para fora da cavidade do molde após seu preenchimento. Além do escoamento do metal, este canal tem objetivo de viabilizar a evasão dos gases gerados no processo de fundição (KIMINAMI, 2013).

A seguir serão apresentados os fenômenos mais influentes no processo de solidificação dos metais durante o processo de fundição.

#### 2.1.4 Processos de solidificação dos metais

Alguns fenômenos determinantes para as propriedades dos materiais fundidos, ocorrem durante a solidificação dos metais (MACHADO, 2000).

De acordo com Da Silva Bastos (2013), a cristalização baseia-se no aparecimento das primeiras células cristalinas unitárias. Estas servem como núcleo para o crescimento dos cristais que dão origem aos grãos e estrutura granular típica dos metais. A autora ainda comenta que a maneira com que os cristais crescem, é um fator determinante das propriedades do material fundido.

Machado (2000), afirma que as contrações de volume ocorrem durante a mudança desde a fase líquida até a sólida. Estas contrações podem acarretar em espaços ociosos - conhecidos como rechupe ou vazios - nas peças fundidas. Os vazios podem ser controlados e até eliminados por meio da utilização de massalotes.

Segundo Kolososki (2001), as impurezas se comportam de maneira diferente, conforme a fase em que se encontra o metal. Em geral, são menos solúveis na fase sólida em relação a fase líquida. Quando a impureza é menos solúvel na fase sólida, ela acompanha o metal líquido à medida que a solidificação acontece, acumulando-se na última seção solidificada. A concentração de impurezas denomina-se segregação, e esta pode prejudicar as propriedades mecânicas das peças fundidas caso não seja controlada adequadamente.

A viscosidade da massa líquida aumenta na proporção que a temperatura decresce para a solidificação, dificultando a fuga dos gases. Os gases ficam retidos na forma de bolhas nas proximidades da superfície das peças. Ao passo que o metal se solidifica, na região onde existiam as bolhas, as peças apresentam porosidades, pois o metal líquido não consegue preencher essas regiões. Este fenômeno denomina-se desprendimento de gases, e assim como os fenômenos citados anteriormente, se não for controlado adequadamente, pode prejudicar a integridade da peça fundida (MACHADO, 2000).

## 2.2 Manufatura aditiva

Segundo Wiltgen (2019), 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). Com base no fator característico da manufatura aditiva, o autor afirma que este tipo

de fabricação se torna mais econômico em relação aos processos de manufatura subtrativa, visto que enquanto a MA ocorre pela inserção de material evitando desperdícios, a MS ocorre pela retirada de material.

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. De acordo com a autora, 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).

A seguir, será apresentada uma breve explicação sobre a operação das técnicas descritas anteriormente.

### 2.2.1 Modelagem por deposição fundida - FDM

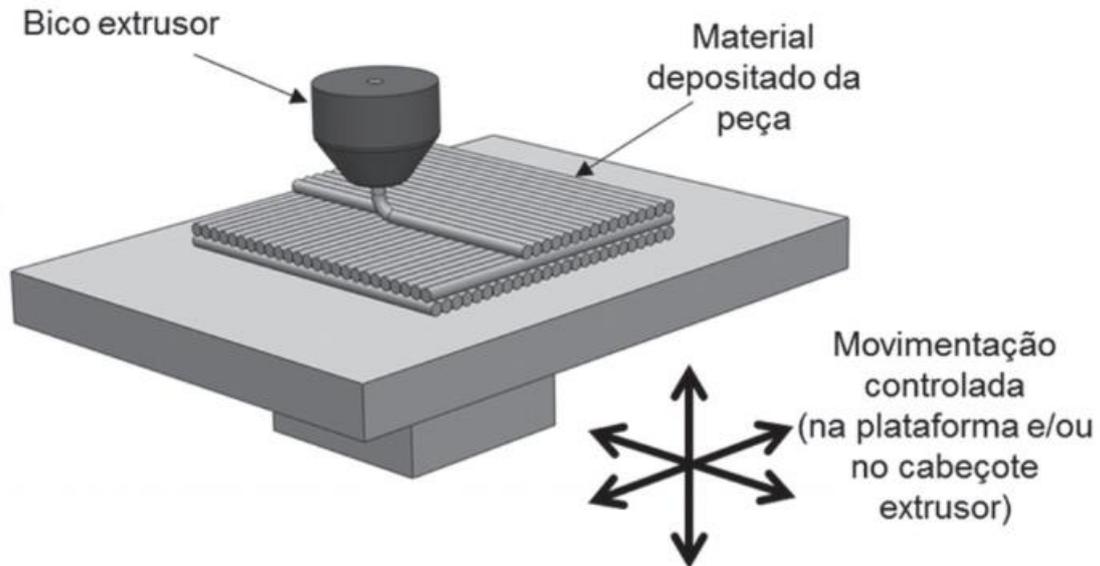
Chicca Junior (2017), comenta que as peças fabricadas pelo método FDM, são construídas pela extrusão e endurecimento de um filamento de material termoplástico. Segundo o autor, um cabeçote que se move no plano horizontal, é responsável pela deposição de material camada por camada sobre uma base que se move no eixo vertical. Existem também modelos de impressora 3D, nos quais a base é fixa e o cabeçote se move ao longo dos três eixos.

Como comentado por Chicca Junior, a figura anterior corrobora com o autor, demonstrando que 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 semilíquido e ultrafino.

De acordo com Groth *et al.* (2014), as matérias-primas possuem formato de fio, e são comercializadas em forma de bobinas ou carretéis, o que facilita a reposição ou alternância destes materiais no processo. Rosa *et al.* (2021), afirma que 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 13 a seguir, demonstra alguns elementos e princípios do processo de manufatura aditiva por extrusão de material – FDM.

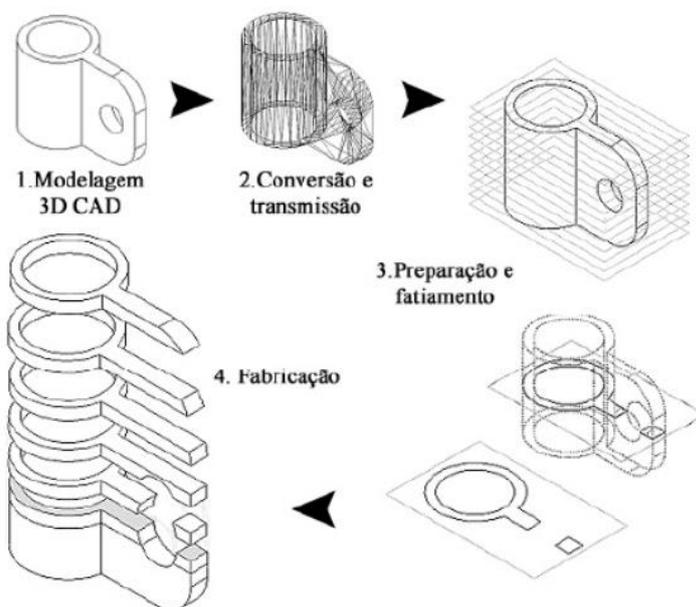
Figura 13 - Princípios da tecnologia AM por extrusão de material.



Fonte: Volpato (2017).

A impressão 3D se embasa na interligação entre *software* e *hardware*. Segundo De Paula e Del Vecchio (2020), os *softwares* mais conhecidos para modelagem 3D são o zBrush, Autodesk Maya, Autodesk 3D Max e o Blender. Morandini (2020), comenta que sistemas CAD também podem conceber modelos 3D.

Figura 14 - Ciclo de concepção e produção de uma peça impressa em 3D.



Fonte: Beal (2002).

Beal (2002), explica que os arquivos de representação tridimensional, devem possuir o formato STL (*Structured Triangle Language*, ou abreviação de *Stereolithography*), o qual gera uma malha triangular do modelo projetado, como mostra o passo 2 da Figura 14. De Paula e Del Vecchio (2020), afirmam que posteriormente a obtenção do arquivo STL, o modelo 3D é seccionado em finas fatias paralelas entre si e ortogonais ao eixo de construção vertical – processo representado pelo passo 3 da Figura 14. Dentre os *softwares* mais utilizados para realizar o fatiamento do modelo 3D estão o Cura 3D e o Slic3r. Beal (2002), também comenta que os aplicativos de fatiamento são responsáveis por gerar o arquivo de comando numérico (NC), o qual processa e codifica a trajetória que o equipamento de impressão 3D deve realizar para a fabricação do modelo previsto.

Após a obtenção do arquivo NC, é possível iniciar a fabricação do modelo em impressão 3D por meio da adição de camadas bidimensionais, como mostra o passo 4 da Figura 14. De acordo com De Paula e Del Vecchio (2020), a qualidade e complexidade da impressão é influenciada diretamente pela quantidade de polígonos gerada pela malha do arquivo STL e também pela precisão do equipamento impressor.

### 2.2.2 Processamento digital por luz - DLP

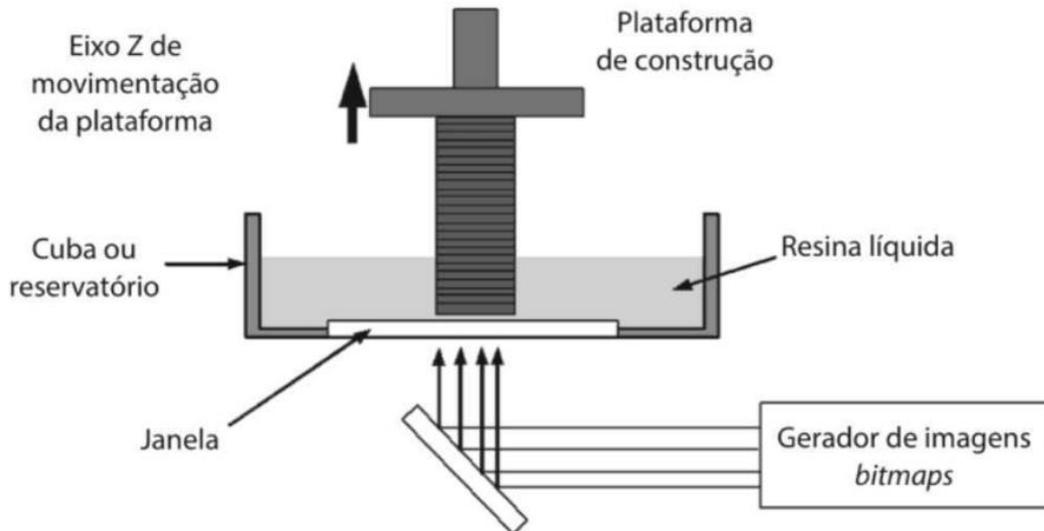
De acordo com Beal (2002), no método de impressão 3D DLP, o objeto 3D é fabricado através da foto-polimerização de uma resina pela incidência de luz ultravioleta (UV). Neste método, camadas bidimensionais do padrão do objeto 3D são projetadas através de um dispositivo de micro espelho que reflete a luz 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, para que posteriormente sejam seccionados em fatias paralelas entre si e ortogonais ao eixo de construção vertical. Segundo Balwan (2022), dentre os *softwares* de fatiamento mais utilizados no método DLP, está o Chitubox. Corroborando com o autor citado anteriormente, Vyas (2022), comenta que o *software* Autodesk NetFabb também pode ser utilizado para realizar o fatiamento de objetos digitais 3D. Além do fatiamento, esses *softwares* também são responsáveis por gerar o código NC do arquivo STL.

A Figura 15, ilustra o princípio de funcionamento e também demonstra

componentes do método de impressão 3D DLP.

Figura 15 - Princípio do processo de impressão 3D por DLP.



Fonte: Volpato (2017).

De acordo com Fragoso (2019), cada fatia é armazenada em forma de *bitmaps* (formato de imagem que contém a descrição dos valores presentes em cada pixel). O autor também comenta que neste método, 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 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. Desta forma, o objeto 3D é construído através da repetição do processo citado anteriormente.

Tumbleston *et al.* (2015), afirma que devido ao fato da utilização de matérias-primas líquidas, os métodos de MA por fotopolimerização em cuba, dentre estes o DLP, permitem a fabricação de objetos 3D com espessuras de camadas micrométricas, ou até mesmo a manufatura sem camadas, de modo contínuo. Dentre as matérias-primas mais utilizadas no método DLP, está a resina *Bio Hybrid* e a *Standard*. A construção de modelos de arcada dentária é uma das aplicações mais recorrentes destas matérias-primas (LOVO *et al.*, 2019).

### 2.3 Ligas de chumbo

De acordo com Pantaroto (2008), fontes naturais de chumbo ocorrem em muitos minerais sendo que os mais importantes são: a Galena (PbS), a Cerusita (PbCO<sub>3</sub>) e a Anglesita (PbSO<sub>4</sub>). O autor ainda comenta que o chumbo ocorre na maioria das vezes associado com o zinco, mas que também está presente junto com outros metais em menores quantidades como: cobre, prata, ouro, bismuto, antimônio, arsênio, cádmio, estanho, gálio, tálio, índio, germânio e telúrio.

Paquoto (2020), comenta que o chumbo em sua forma usual, a metálica, apresenta brilhos característicos de metais, coloração cinza (quando exposto ao ar) e azulada brilhante, possui condutividade térmica e elétrica, é altamente resistente à corrosão e dúctil. A Tabela 1 demonstra as propriedades físicas do chumbo.

Tabela 1 – Propriedades físicas do chumbo.

<b>Propriedades físicas do chumbo</b>	
Coeficiente de Expansão Térmica	29x10 <sup>-6</sup> °C
Ponto de Fusão	327,46 °C
Ponto de Ebulição	1748,85 °C
Dureza	2 – 2,5
Densidade relativa	11,35 kg/dm <sup>3</sup>
Calor Específico	129 J/(kg.K)
Condutividade térmica	35,3 W/(m.K)
Condutividade elétrica	4,81x10 <sup>6</sup> m <sup>-1</sup>

Fonte: Santos (2009).

Segundo Pinheiro (2019), o chumbo e suas ligas têm sido amplamente utilizados em vários setores da indústria, desde bainhas de cabos até blindagem de radiação, além de ser a principal matéria-prima para a fabricação de baterias automotivas. Em contrapartida, gradativamente o chumbo tem sido substituído por alternativas mais baratas e menos prejudiciais à saúde. A Tabela 2 apresenta algumas ligas de chumbo, suas aplicações e compostos químicos.

Tabela 2 - Aplicações do chumbo metálico em ligas e em compostos químicos.

Forma metálica	Ligas	Compostos químicos
Projéteis e munições.	Liga para mancais L50820 0,02 % Al – 0,04 % Li – 0,7 % Ca – 0,2 % Na – 0,4 % Ba – 98,7 % Pb.	Dióxido de chumbo (PbO <sub>2</sub> ): baterias tipo chumbo-ácido.
Revestimento protetor de cabos elétricos para evitar difusão de água no isolante.	Ligas para grade de bateria L50770, L50775, L50780, L50790, 0,10 % Ca – 0 a 1 % Sn – 98,9 a 99,9 % Pb.	Chumbo tetraetila e tetrametila como aditivo a gasolina, atuando como antidetonantes.
Construção civil (folhas de chumbo, tubos).	Liga para revestimento de cabos L50101 99,8 % Pb – 0,2 % Ag.	Monóxido de chumbo (PbO): tipos de vidro, vulcanização da borracha, pigmento para tintas.
Blocos para pesagens.	Liga para eletro-refino L50122 98 % Pb – 1 % Ag – 1 % As.	Tetraóxido de Tri-chumbo (Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ): produção de tinta para proteção contra ferrugem em aços.
Terminais para baterias.	Liga para soldagem mole L50121, L50131 1 a 1,5 % Ag – 1 % Sn, restante Pb.	Arsenato de chumbo [Pb <sub>3</sub> (As O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]: usado como inseticida.
Produtos injetados como: anéis, raspadores, caracteres para a indústria tipográfica, mantas protetoras.	Ligas chumbo-cálcio L50840, L50850, L50880 1 a 6 % Ca – 94 a 99 % Pb.	Carbonato de Chumbo (PbCO <sub>3</sub> ): Foi muito usado como pigmento na produção de tinta de cor branca.
Protetor contra raios X.	Liga para anodo de eletro-refino L50730 0,5 % Ag – 0,05 % Ca 99,4 % Pb.	Cromato de Chumbo (PbCrO <sub>4</sub> ): usado na obtenção de tinta amarelo cromo.
Usinas e laboratórios nucleares contra o raio gama.	Liga chumbo cádmio eutética L50940 17 % Cd – 83 5 Pb.	Nitrato de chumbo [Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]: usado na produção de fogos de artifício e outros produtos para efeitos pirotécnicos.
Dispositivos de proteção contra incêndio denominado “Sistema Sprinkler”.	Chumbo cobreado L51110 0,01 % Cu – 99,9 % Pb.	Silicato de chumbo (PbSiO <sub>3</sub> ): alguns tipos de vidro, na produção de borracha e de tinta e tecidos à prova de fogo.

Fonte: Adaptado de Pantaroto (2008).

Kennedy e Sutherland (2008), comentam que o chumbo é utilizado no balanceamento de rodas automotivas por intermédio de contrapesos. Segundo os autores, estas peças são instaladas com o intuito de corrigir desequilíbrios nas rodas de automóveis, desalinhamentos na montagem dos pneus, reduzir vibrações no automóvel e otimizar o consumo de combustível deste.

Figura 16 - Contrapesos de balanceamento de rodas automotivas.

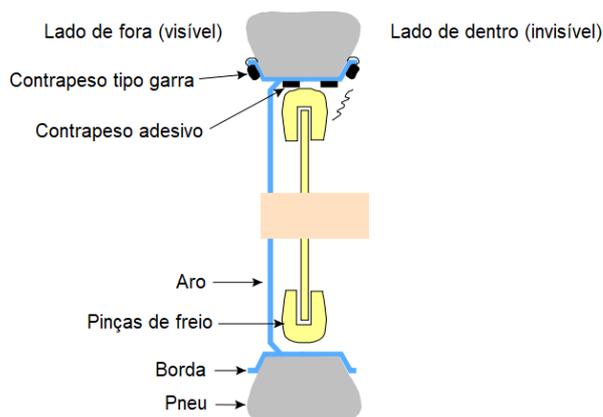


Fonte: Bleiwas (2006).

A Figura 16 apresenta os dois tipos de contrapeso de chumbo para balanceamento de rodas automotivas disponíveis comercialmente. A parte superior da figura, mostra a peça que recebe a denominação de contrapeso tipo garra, enquanto a peça apresentada na parte inferior da figura, é designada como contrapeso adesivo (KENNEDY E SUTHERLAND, 2008).

Os contrapesos tipo garra são utilizados em rodas comuns que possuem bordas e são instalados de acordo com a ilustração da Figura 17 (contrapeso tipo garra). Já os contrapesos adesivos, são utilizados em rodas de alumínio, devido ao fato destas não possuírem bordas e são instalados conforme a demonstração da Figura 17 (contrapeso adesivo) (LOHSE *et al.*, 2001).

Figura 17 - Fixação de contrapesos de balanceamento de rodas automotivas.



Fonte: Adaptado de Lohse *et al.* (2001).

Root (2000), comenta que contrapesos para balanceamento de rodas de automóveis são fabricados através da fundição do chumbo. O autor ainda comenta que a liga mais comum para a fabricação destas peças, é o chumbo antimoniado. A liga é denominada desta forma por conter aproximadamente 5% de antimônio em sua composição, com o intuito de aumentar sua dureza.

O chumbo é a principal matéria-prima para a fabricação de contrapesos em virtude de sua densidade, ductilidade, resistência à corrosão e também por ser um material barato (USEPA, 2005 apud KENNEDY e SUTHERLAND, 2008).

O objeto de estudo deste trabalho é o projeto e a fabricação de um molde de silicone para fundição de contrapesos de chumbo para balanceamento de rodas automotivas utilizando a manufatura aditiva como ferramenta de prototipagem.

### **3 METODOLOGIA**

A seguir, serão descritos os procedimentos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa durante a fase experimental, bem como os fatores que a delimitam.

#### **3.1 Delimitação da pesquisa**

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos que delimitam o presente estudo. A seguir, serão abordados os pontos de vista quanto à natureza da pesquisa, forma de abordagem do problema, os seus objetivos e por fim, procedimentos técnicos.

##### **3.1.1 Do ponto de vista da natureza**

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, visto que, busca solucionar o problema do alto investimento monetário envolvido na produção de contrapeso de chumbo tipo garra baixa. De acordo com Da Silva e Menezes (2005), a pesquisa aplicada “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.”

##### **3.1.2 Do ponto de vista da abordagem do problema**

No que se refere à abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como quantitativa. Será necessária a mensuração de um contrapeso de chumbo existente e a análise da temperatura do chumbo ao longo de sua deposição no molde.

Esta pesquisa também classifica-se como qualitativa, visto que, será analisada a viabilidade de fundição de chumbo em molde de silicone e a durabilidade deste molde.

Da Silva e Menezes (2005), afirmam que a pesquisa quantitativa busca traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Os autores também comentam que a pesquisa qualitativa objetiva a interpretação de fenômenos e a atribuição de significados a estes.

##### **3.1.3 Do ponto de vista dos objetivos**

Do ponto de vista dos objetivos, esta pesquisa classifica-se como explicativa, tendo em vista que um experimento será realizado para analisar a credibilidade de um molde de silicone para fundição de contrapeso chumbo.

Segundo Gil *et al.* (2002), a pesquisa explicativa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Esta, aprofunda o conhecimento da realidade de forma que explica a razão dos fenômenos, e quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental.

#### 3.1.4 Do ponto de vista dos procedimentos técnicos

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, o presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental e um estudo de caso. Para ser realizada esta pesquisa, serão analisadas variáveis como ponto de fusão do chumbo e a temperatura máxima que a borracha de silicone resiste sem comprometer o molde.

Uma pesquisa experimental, determina um objeto de estudo e seleciona as variáveis que podem ser capazes de influenciá-la, uma vez que as formas de controle destas e observação dos seus efeitos também devem ser definidas (GIL *et al.*, 2002).

De acordo com Gil *et al.* (2002), classifica-se como um estudo de caso, aquele que envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, a fim de proporcionar seu amplo e detalhado conhecimento.

### 3.2 Análise dos moldes de silicone

Em testes preliminares, o resultado de reprodução dos contrapesos via fundição em molde de silicone que melhor se aproximou das peças comercializadas, foi o contrapeso de chumbo de 35 gramas. Em virtude disto, a unidade de análise desta pesquisa tem como objeto de estudo o molde de silicone para fundição de contrapeso de chumbo de 35 gramas.

A Figura 18 (a) apresenta o silicone que será utilizado para construção do molde, o qual é um produto bicomponente, obtido a partir da mistura de um elastômero de silicone na forma líquida viscosa e um catalisador. A borracha de silicone, fabricada pela empresa Redelease resiste a temperaturas até 360 °C sem comprometer o molde e possui dureza A 55 Shore.

Os experimentos para análise da credibilidade deste molde, serão realizados no laboratório de soldagem do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) Câmpus Xanxerê.

Figura 18 - (a) Borracha de silicone preta rígida para pneus miniatura com catalisador (1,050 kg) e (b) Spray desmoldante Redelub (0,250 l)<sup>1</sup>.



Fonte: Redecenter Materiais Plásticos e Acessórios LTDA (2022).

### 3.3 Coleta de dados

Para a coleta de dados desta pesquisa, serão utilizadas as técnicas de análise documental, pesagem, mensuração, observação, um sistema de aquisição de dados e registros fotográficos.

Dados como ponto de fusão do chumbo e a temperatura máxima que a borracha de silicone resiste sem comprometer o molde, serão obtidos por meio de análise documental. A técnica de pesagem, será 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 - e também para verificar a massa do contrapeso fundido em molde de silicone.

As dimensões externas do contrapeso – dimensões dos três eixos da peça – serão obtidas por meio do escaneamento tridimensional deste. A avaliação da credibilidade da reprodução das dimensões fundamentais do contrapeso obtido por meio da fundição em molde de silicone - raios que encaixam nas rodas automotivas - e análise da durabilidade deste molde, serão realizadas por meio da observação.

A utilização do sistema de aquisição de dados terá o intuito de mensurar a

<sup>1</sup> <https://www.redelease.com.br/borracha-de-silicone-preta-rigida-para-pneus-miniatura-com-catalisador-1-050-kg.html>

maior temperatura que o chumbo atinge ao ser depositado no molde de silicone. Os registros fotográficos serão necessários para demonstrar os passos do experimento e a coleta dos dados.

### 3.4 Instrumentos/ferramentas de coletas

O ponto de fusão do chumbo, foi obtido por intermédio de Moreira e Moreira (2004). Já a temperatura máxima que a borracha de silicone resiste sem comprometer o molde, foi obtida por meio de uma consulta no site do fabricante Redelease<sup>2</sup>.

A massa do contrapeso a ser reproduzido e também da chapa de aço, que é fundida em meio ao chumbo, serão mensuradas por uma balança com resolução de 0,1 g da marca BEL Engineering (BEL Engineering, Monza, Lombardia, Itália), mostrada na Figura 19, presente no laboratório de leite e derivados do IFSC Câmpus Xanxerê. A verificação da massa do contrapeso fundido em molde de silicone será realizada com esta mesma balança.

Figura 19 - Balança da marca BEL Engineering.



Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Xanxerê (2020).

As dimensões externas do contrapeso e da chapa de aço, serão mensuradas por meio de um *scanner* tridimensional modelo Einscan SE da marca Shining 3D (Shining 3D, Hangzhou, Zhejiang, China), apresentado na Figura 20 (a).

<sup>2</sup> <https://www.redelease.com.br/borracha-de-silicone-preta-rigida-para-pneus-miniatura-com-catalisador-1-050-kg.html>

Figura 20 – (a) Scanner tridimensional da marca Shining 3D e (b) forno elétrico para tratamento térmico tipo mufla, modelo EQF1100, da marca Equitecs.



(a)



(b)

Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Xanxerê (2022).

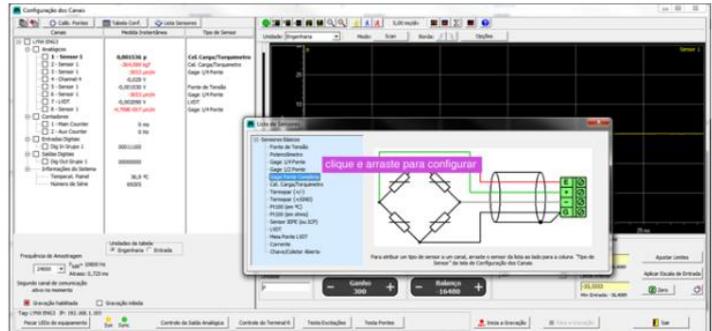
A credibilidade da reprodução das dimensões fundamentais do contrapeso fundido, em molde de silicone, será avaliada por meio da observação do encaixe desta peça em uma roda automotiva. A durabilidade do molde de silicone, será analisada a partir de sua deterioração sob a condição de uso deste por uma microempresa. Um experimento será realizado para também analisar a durabilidade do molde de silicone, submetendo-o à quatro variações de temperatura em um forno elétrico para tratamento térmico tipo mufla, modelo EQF1100, da marca Equitecs (Equitecs – Indústria de equipamentos para laboratórios, São Carlos, SP., Brasil), apresentado na Figura 20 (b), para observar empiricamente qual a temperatura que este suporta sem ser comprometido.

A maior temperatura que o chumbo atinge ao ser depositado no molde, será mensurada com a utilização de um sistema de aquisição de dados modelo ADS1800, marca Lynx (Lynx Tecnologia eletrônica LTDA., São Paulo, SP, Brasil), apresentado na Figura 21 (a), o *software* Lynx Assistant, mostrado na Figura 21 (b), e um termopar modelo WTJ-6-60 da marca OMEGA (OMEGA Engineering inc., Stamford, Connecticut, Estados Unidos), exibido na Figura 22.

Figura 21 - (a) Sistema de aquisição de dados ADS1800 e (b) Interface do software Lynx Assistant<sup>3</sup>.



(a)



(b)

Fonte: Lynx Tecnologia (2020).

Figura 22 - Termopar da marca OMEGA.



Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Xanxerê (2022).

<sup>3</sup> [https://www.lynxtec.com.br/prod\\_ads1800.htm](https://www.lynxtec.com.br/prod_ads1800.htm)

### 3.5 Análise de dados

Figura 23 - Fluxograma de métodos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura 23 demonstra o fluxograma de métodos que deve ser executado para a realização do experimento deste trabalho.

O primeiro passo da análise de dados, foi comparar 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, notou-se a possibilidade de executar o experimento.

Subsequentemente, será realizada a pesagem do contrapeso a ser reproduzido e da chapa de aço, que é fundida em meio ao chumbo, com a utilização de uma balança com resolução de 0,1 g da marca BEL Engineering.

Posteriormente, será realizada a mensuração das dimensões externas do contrapeso de chumbo e da chapa de aço, utilizando-se um *scanner* tridimensional da marca Shining 3D. Em seguida, será 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, serão construídos dois modelos de fundição por meio de manufatura aditiva. Um modelo, será fabricado fazendo o uso do método modelagem por deposição fundida (FDM) e o outro por processamento digital de luz (DLP).

No método FDM será utilizada uma impressora 3D modelo Ender 3, da marca Creality (Creality 3D Technology Co., LTDA., Shenzhen, Guangdong, China), apresentada na Figura 24 (a), e o material ácido polilático (PLA). Para realizar o fatiamento do modelo, será utilizado o *software* Cura.

Figura 24 - (a) Impressora 3D da marca Creality<sup>4</sup> e (b) Impressora 3D da marca Anycubic<sup>5</sup>.



(a)



(b)

Fonte: (a) Creality 3D Technology Co., LTDA. (2022) e (b) Anycubic 3D Printing (2022).

<sup>4</sup><https://www.creality.com/products/ender-3-3d>

[printer?spm=..page\\_1967279.products\\_display\\_1.1&spm\\_prev=..product\\_afeda681-8f05-4062-a3f0-0bb6257f9f1e.header\\_1.1](https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer?spm=..page_1967279.products_display_1.1&spm_prev=..product_afeda681-8f05-4062-a3f0-0bb6257f9f1e.header_1.1)

<sup>5</sup><https://www.anycubic.com/collections/3d-printers/products/photon-mono-4k>

No método DLP será utilizada uma impressora 3D modelo Photon Mono, da marca Anycubic (Anycubic 3D Printing, Shenzhen, Guangdong, China), mostrada na Figura 24 (b), e o material será uma resina fotossensível. Para realizar o fatiamento do modelo, será utilizado o *software* Chitubox.

Após a fabricação dos modelos, serão construídos gabaritos e caixas de moldagem para estes, no intuito de facilitar a fabricação dos moldes de silicone. Os gabaritos e as caixas de moldagem serão feitos a partir de gravação e corte a laser em chapas de madeira de fibra de média densidade (MDF).

Para a fabricação destes gabaritos e das caixas de moldagem, será utilizada uma máquina de corte a laser modelo RK-13090 da marca RickTron (RickTron Tecnologia LTDA., Jaraguá do Sul, SC, Brasil), apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Máquina de corte a laser da marca RickTron<sup>6</sup>.



Fonte: RickTron Tecnologia LTDA (2022).

Em seguida, deverá ser feita a fixação dos modelos nos gabaritos e a montagem das caixas de moldagem. Também deverá ser realizada a fixação do termopar da marca OMEGA, que terá o intuito de analisar a temperatura máxima que o chumbo atinge ao ser depositado no molde.

Após esta etapa, deverá ser aplicado o spray desmoldante Redelub da marca Redelease, apresentado na Figura 18 (b) sobre os modelos e as caixas de moldagem. Por conseguinte, a mistura bicomponente do silicone será depositada nas caixas de moldagem a fim de construir os moldes de silicone para fundição dos

---

<sup>6</sup> <http://www.anterior.ricktron.com.br/rk13090.htm>

contrapesos de chumbo.

Posteriormente ao período de cura do molde de silicone, estes serão retirados das caixas de moldagem. Por conseguinte, o chumbo na fase líquida será depositado nos moldes de silicone.

Após a fundição, será analisada a temperatura máxima que o chumbo atinge e realizada a pesagem dos contrapesos de chumbo para avaliar a credibilidade dos moldes de silicone.

Por conseguinte, serão analisadas as características geométricas dos contrapesos fundidos em moldes de silicone, no intuito de analisar as diferenças entre a utilização de modelos impressos em 3D pelos métodos FDM e DLP.

Também será avaliada a credibilidade das peças fundidas por meio da montagem destas em rodas automotivas.

Por fim, a durabilidade do molde de silicone, será analisada a partir de sua deterioração sob a condição de uso deste pela microempresa JCS (J.C.S. Peças para Veículos LTDA., Xanxerê, SC, Brasil).

A durabilidade do molde de silicone também será avaliada por meio de uma análise da deterioração deste, em função de sua submissão a quatro ensaios de resistência a diferentes temperaturas, sendo estas 200 °C, 290 °C, 380 °C e 470 °C, com a utilização do forno apresentado na Figura 20 (b).

## 4 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Tabela 3 – Cronograma de atividades.

Etapas	Ano-2022								
	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO					
Ajustes na revisão da literatura									
Métodos e materiais (planejamento experimental)									
Coleta e tabulação de dados									
Análise e discussão dos resultados									
Conclusões e recomendações									
Entrega do relatório para avaliação									
Apresentação do relatório									
Entrega do relatório revisado									

Fonte: Próprio autor.

## 5 ORÇAMENTO

Tabela 4 – Orçamento.

<b>Especificação</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço unitário (R\$)</b>	<b>Total (R\$)</b>
Borracha de silicone preta rígida para pneus miniatura com catalisador (1,050 kg)	1	74,90	74,90
Spray de silicone Redelub (0,250 l)	1	18,90	18,90
Barra de chumbo ou lingote de chumbo 330 X 40 X 20 mm com 2,9 kg	1	185,00	185,00
Serviço de impressão 3D método FDM	1	10,00	10,00
Serviço de impressão 3D método DLP	1	50,00	50,00
Serviço de corte a laser	2	20,00	40,00
<b>Total Geral</b>			<b>378,80</b>

Fonte: Próprio autor.

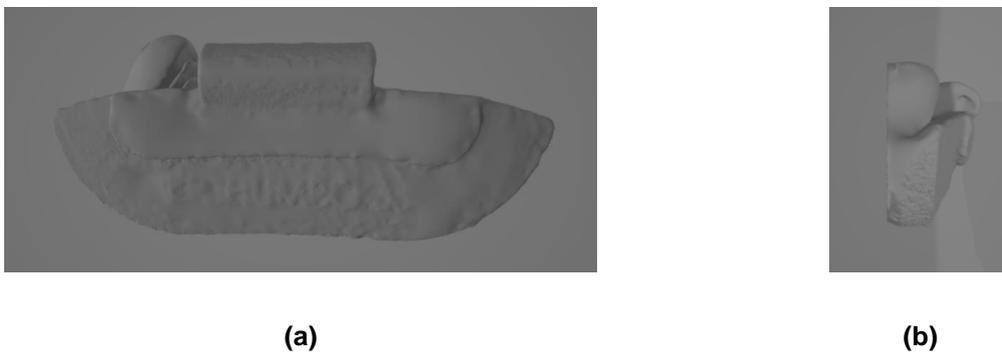
## 6 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos experimentos realizados para construção dos moldes de silicone para fundição de contrapesos de chumbo de 35 g, testes e análises destes.

### 6.1 Mensuração do contrapeso de chumbo de 35 g

Para a mensuração das dimensões externas do contrapeso de chumbo de 35 g, foi utilizado o processo de escaneamento tridimensional. A Figura 26 (a) ilustra uma vista frontal deste escaneamento, e a vista lateral esquerda é ilustrada pela Figura 26 (b).

Figura 26 - Vista (a) frontal e (b) lateral esquerda do escaneamento tridimensional.



Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Xanxerê (2022).

A mensuração da massa deste contrapeso foi realizada com a utilização de uma balança da marca BEL Engineering, apresentada na Figura 19. Esta mensuração, a qual resultou em 34,5 g é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Mensuração da massa do contrapeso de 35 g.

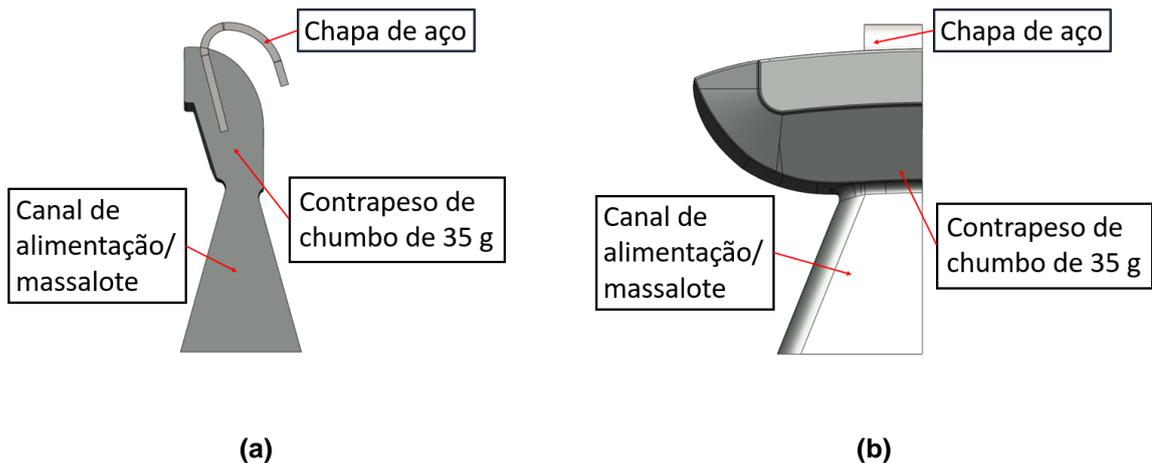


Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Xanxerê (2022).

## 6.2 Desenho do modelo tridimensional do contrapeso de chumbo de 35 g

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 28 (a) demonstra a vista lateral direita, enquanto a vista frontal do modelo 3D digital esquerdo é apresentada pela Figura 28 (b).

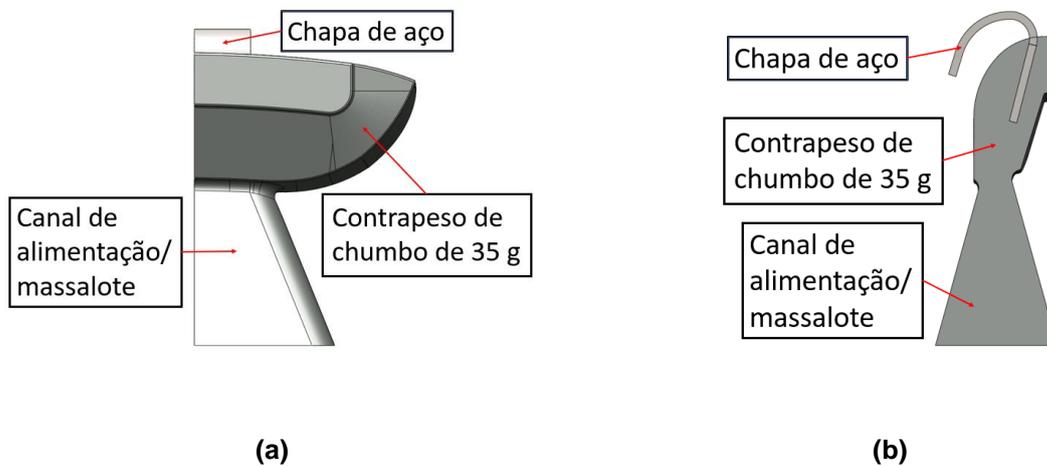
Figura 28 - Vista (a) lateral direita e (b) frontal do modelo esquerdo.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 29 (a) é ilustrada a vista frontal, e a Figura 29 (b) demonstra a vista lateral esquerda do modelo 3D digital direito.

Figura 29 - Vista (a) frontal e (b) lateral esquerda do modelo direito.



Fonte: Próprio autor.

### 6.3 Produção dos modelos de fundição do contrapeso de chumbo de 35 g

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 30 (a) demonstra o modelo de fundição produzido pelo método FDM enquanto a Figura 30 (b) apresenta o modelo de fundição produzido pelo método DLP.

Figura 30 - Modelo de fundição produzido pelo método (a) FDM e (b) DLP.



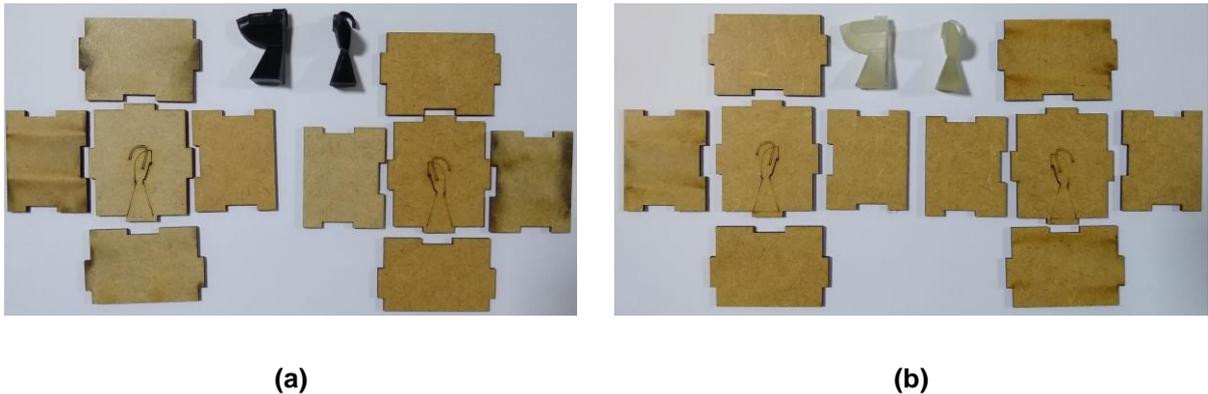
Fonte: Próprio autor.

### 6.4 Construção dos moldes de silicone para fundição do contrapeso de chumbo de 35 g

A partir dos arquivos .SLDPRT dos modelos 3D digitais esquerdo e direito, foram 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.

A Figura 31 (a) apresenta as caixas de moldagem abertas, gabaritos e modelos de fundição FDM. As caixas de moldagem abertas, gabaritos e modelos de fundição DLP são demonstrados na Figura 31 (b).

Figura 31 - Caixas de moldagem abertas, gabaritos e modelos de fundição (a) FDM e (b) DLP.



Fonte: Próprio autor.

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 32 (a) e (b) apresentam duas vistas das caixas de moldagem montadas, com os modelos de fundição DLP fixados nestas.

Figura 32 - Vista (a) superior e (b) perspectiva da caixa de moldagem com modelos de fundição DLP.



Fonte: Próprio autor.

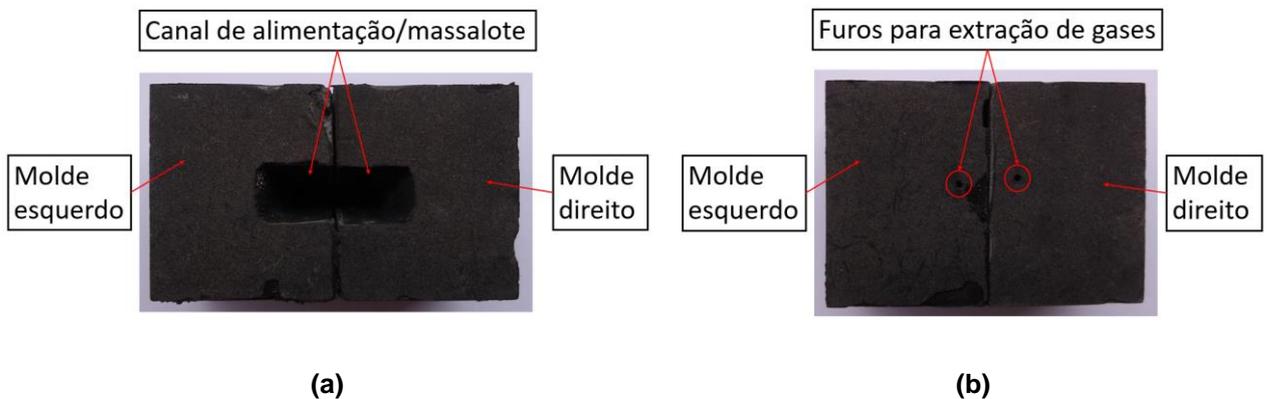
Após aguardar um período de 5 minutos para cura da cola, foi aplicado o spray desmoldante em todo o interior das caixas de moldagem.

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 33 (a) demonstra uma vista superior do molde de silicone do modelo DLP posterior sua retirada das caixas de moldagem.

Figura 33 - Vista (a) superior e (b) frontal do molde de silicone modelo DLP para fundição do contrapeso de chumbo de 35 g.



Fonte: Próprio autor.

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. A Figura 33 (b) apresenta os furos realizados em cada molde.

Em seguida, uma cavidade no molde esquerdo foi aberta para posicionar o termopar previamente a deposição do chumbo líquido nos moldes. Esta cavidade é demonstrada na Figura 34.

Figura 34 - Cavidade do molde esquerdo para posicionamento do termopar.



Fonte: Próprio autor.

Todos os procedimentos descritos anteriormente para a construção do molde de silicone modelo DLP, foram realizados analogamente para construção do molde

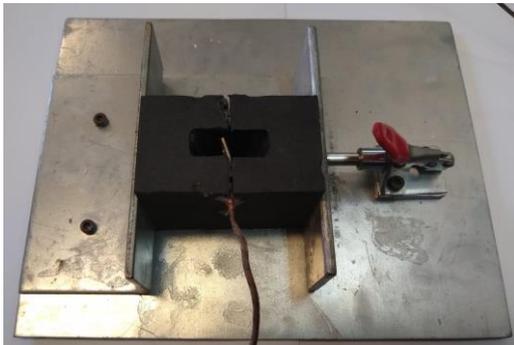
de silicone modelo FDM.

### 6.5 Produção do contrapeso de chumbo de 35 g a partir do molde de silicone

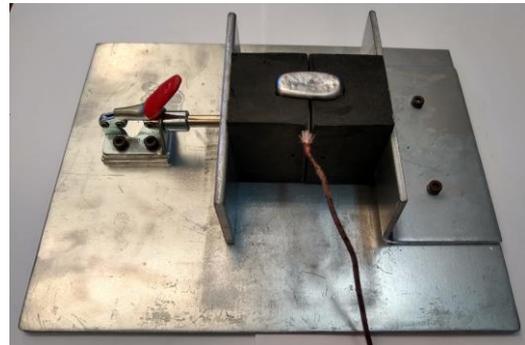
A barra de chumbo foi seccionada em partes com o intuito de introduzi-la em um cadinho, para que este fosse levado ao forno apresentado na Figura 20 (b). O forno foi programado para temperatura de 430 °C para realizar a fusão do chumbo.

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. A Figura 35 (a) ilustra o conjunto descrito acima.

Figura 35 - (a) Molde de silicone com chapa de aço do contrapeso e termopar prensados e (b) conjunto do molde de silicone com chumbo solidificado.



(a)



(b)

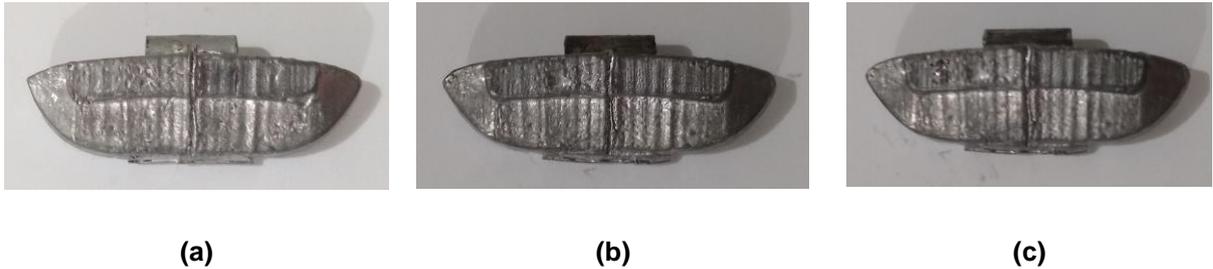
Fonte: Próprio autor.

Em seguida à fusão do chumbo, este foi depositado no molde de silicone, com auxílio de um alicate do tipo tenaz. Na Figura 35 (b) é apresentado o conjunto do molde de silicone com o chumbo solidificado.

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 visando maior credibilidade nos resultados.

A Figura 36 (a), (b) e (c) apresenta os contrapesos fundidos em molde de silicone modelo FDM posteriormente ao seccionamento do seu canal de alimentação - massalote.

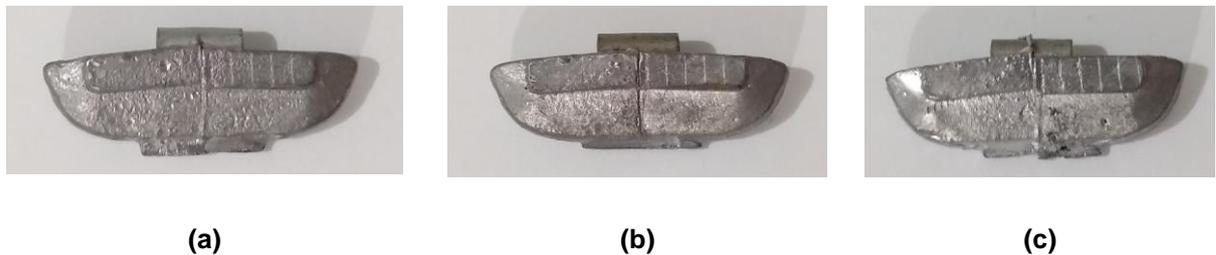
Figura 36 - Contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo FDM (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.



Fonte: Próprio autor.

Os contrapesos fundidos em molde de silicone modelo DLP posteriormente ao seccionamento do seu canal de alimentação - massalote - são demonstrados na Figura 37 (a), (b) e (c).

Figura 37 - Contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo DLP (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.

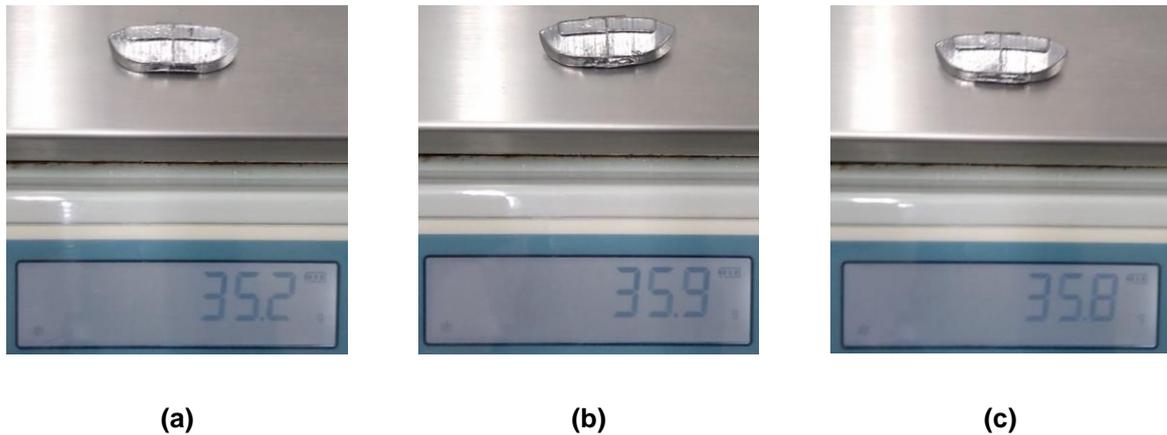


Fonte: Próprio autor.

Cada amostra teve sua massa mensurada, com a utilização de uma balança da marca BEL Engineering, mostrada na Figura 19, com o intuito de avaliar a credibilidade dos modelos e moldes de fundição. Na Figura 38 (a), (b) e (c) são apresentadas as mensurações das massas das amostras 1, 2 e 3 respectivamente dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo FDM.

Para o molde de silicone modelo FDM, a amostra 1 pesou 35,2 g, a amostra 2 pesou 35,9 g e a amostra 3 pesou 35,8 g.

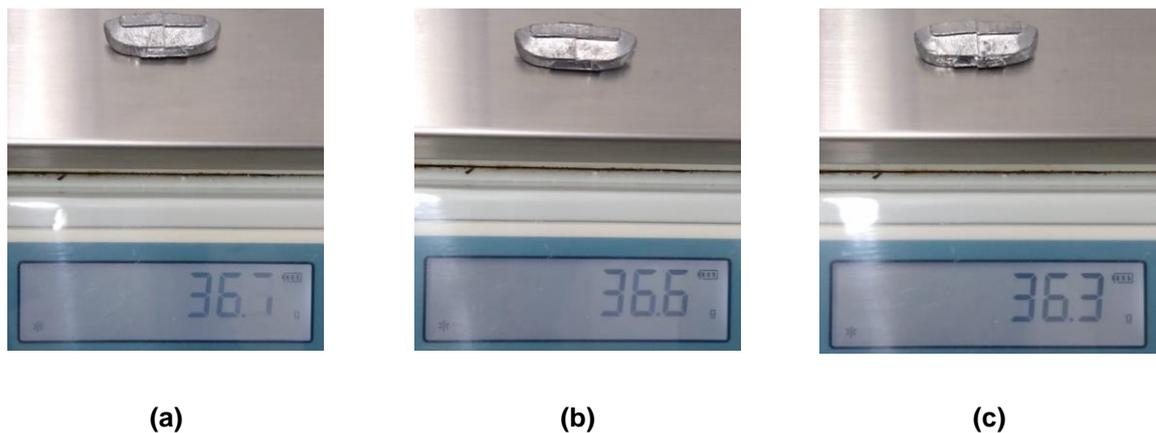
Figura 38 - Massa do contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo FDM (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 39 (a), (b) e (c) demonstra as massas mensuradas dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo DLP.

Figura 39 - Massa do contrapeso de chumbo de 35 g fundido em molde de silicone modelo DLP (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.

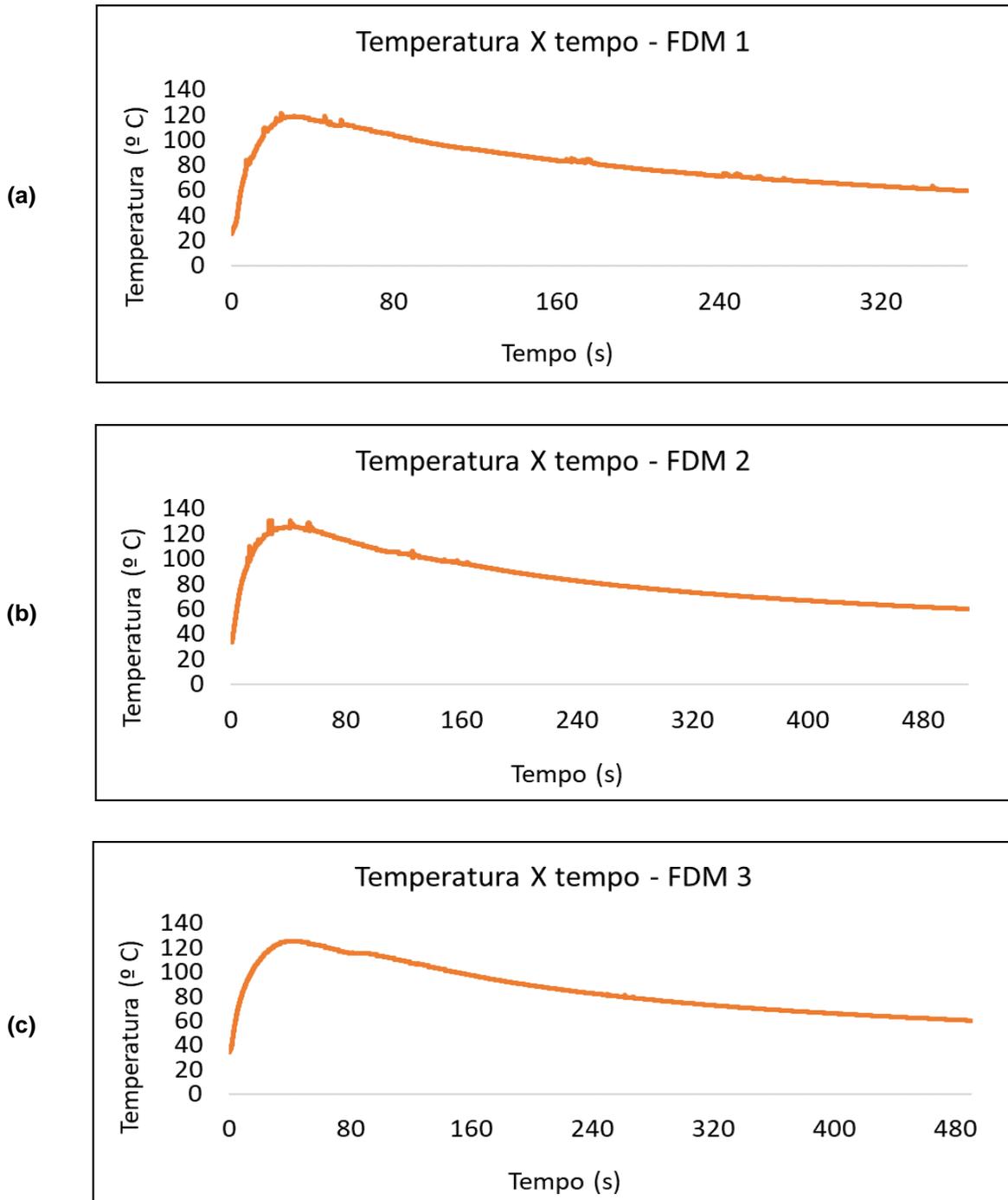


Fonte: Próprio autor.

Para o molde de silicone modelo DLP, a amostra 1 pesou 36,7 g, a amostra 2 pesou 36,6 g e a amostra 3 pesou 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 tomada da mensuração de temperatura foi programada para 50 Hz de frequência. Na Figura 40 (a), (b) e (c), são apresentados os gráficos das mensurações realizadas pelo termopar e sistema de aquisição de dados para os moldes de silicone das amostras 1, 2 e 3, respectivamente, do modelo FDM.

Figura 40 - Gráfico de mensuração da temperatura em função do tempo para o chumbo fundido em molde de silicone modelo FDM da amostra (a) 1, (b) 2 e 3 (c).

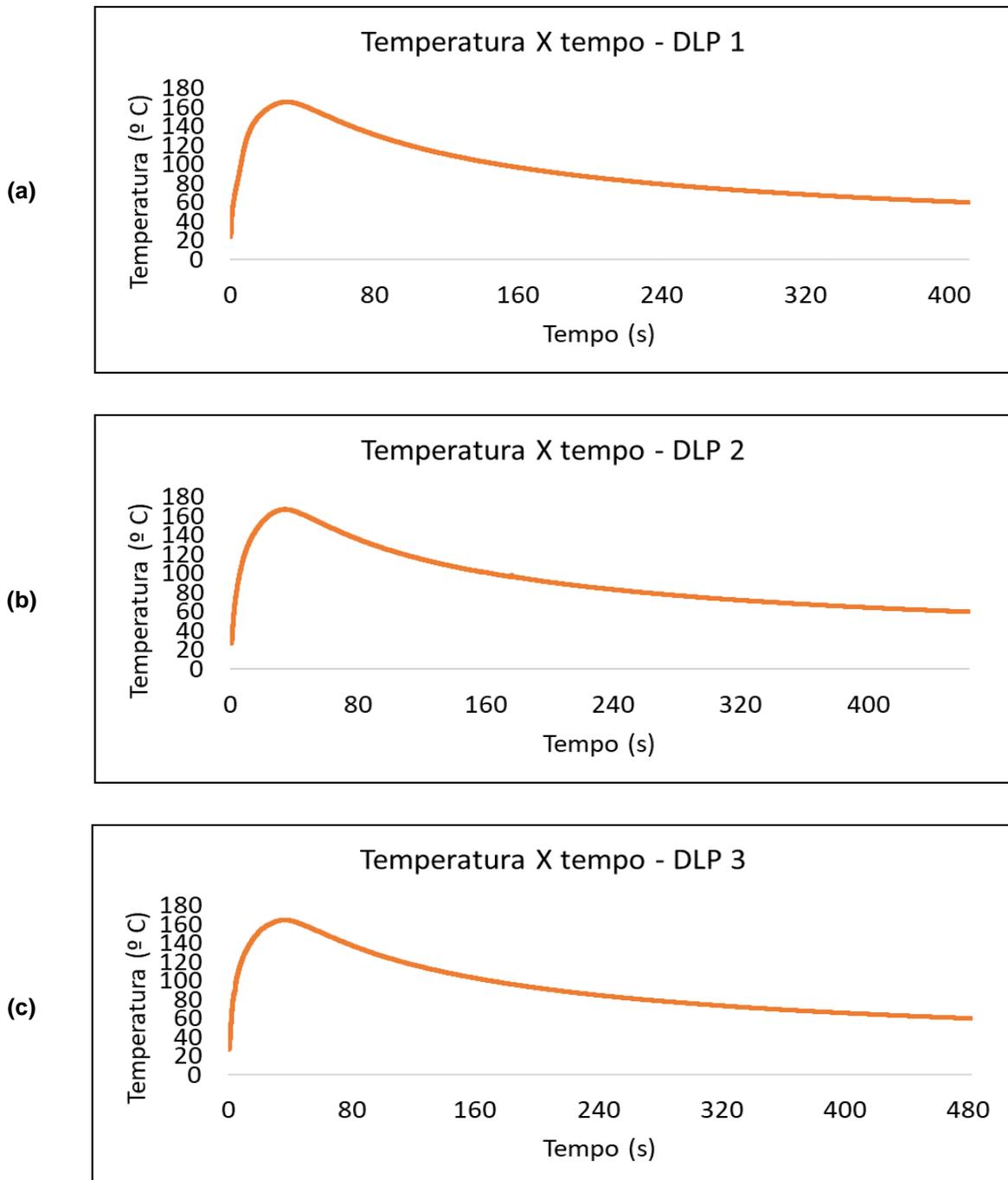


Fonte: Próprio autor.

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 41 (a), (b) e (c), são demonstrados os gráficos das mensurações realizadas pelo termopar e sistema de aquisição de dados para os moldes de silicone das amostras 1, 2 e 3, respectivamente, do modelo DLP.

Figura 41 - Gráfico de mensuração da temperatura em função do tempo para o chumbo fundido em molde de silicone modelo DLP da amostra (a) 1, (b) 2 e 3 (c).



Fonte: Próprio autor.

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.

### **6.6 Análise das características geométricas dos contrapesos de chumbo de 35 g produzidos via fundição em moldes de silicone**

A análise das características geométricas dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone foi realizada por meio da observação do encaixe destes em uma roda automotiva.

Na Figura 42 é demonstrada a montagem das amostras 1 dos contrapesos fundidos em molde de silicone modelo FDM e modelo DLP em uma roda automotiva.

Figura 42 - Montagem dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo FDM e DLP em uma roda automotiva.



Fonte: Próprio autor.

### **6.7 Análise da durabilidade dos moldes de silicone para fundição de contrapeso de chumbo de 35 g**

Uma das formas de análise da durabilidade dos moldes de silicone foi realizada por meio de um experimento. Este, possuía o intuito de submeter um molde preliminar à quatro variações de temperatura no forno apresentado na Figura 20 (b), as quais, cada uma ficou 5 minutos no forno. Posteriormente a cada submissão ao aquecimento, estes tiveram suas massas mensuradas para avaliar a

dissipação da massa em função da temperatura submetida, com a utilização de uma balança da marca Cadence, modelo BAL 153 Utilità (JCS Brasil Eletrodomésticos, Balneário Piçarras, SC., Brasil), 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 de o forno trabalhar com resistências internas à câmara de aquecimento e um sensor de temperatura. Desta forma, quanto menor o gradiente de temperatura entre o forno e o ambiente externo, se torna mais difícil o controle da temperatura.

Anteriormente à submissão do molde de silicone às variações de temperatura, este teve sua massa mensurada. O recipiente que foi utilizado para condução do molde até o forno também teve sua massa mensurada. A Figura 43 (a) demonstra a mensuração da massa do molde de silicone anteriormente à submissão deste às variações de temperatura, a qual resultou em 108 g. Na Figura 43 (b), é apresentada a mensuração do recipiente do molde, o qual pesou 42 g.

Figura 43 - Mensuração da massa (a) do molde de silicone anteriormente à submissão deste às variações de temperatura e (b) do recipiente do molde.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

As mensurações das massas do molde de silicone submetido às temperaturas de 200° C, 290° C, 380° C e 470° C são apresentadas respectivamente na Figura 44 (a), (b), (c) e (d).

Figura 44 - Mensuração da massa do molde de silicone submetido à (a) 200° C, (b) 290° C, (c) 380° C e (d) 470° C.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Próprio autor.

Para as variações de temperatura apresentadas anteriormente, as massas dos conjuntos mensuradas foram respectivamente 150 g, 149 g, 149 g e 149 g.

Outra forma de analisar a durabilidade dos moldes de silicone foi a partir da deterioração destes sob a condição de seu uso pela microempresa JCS, pelo período de 8 meses, no qual foram fabricadas aproximadamente 8000 peças. Na Figura 45 é apresentado o molde de silicone para fundição de contrapesos de chumbo, após ser utilizado pela microempresa JCS durante o período de 8 meses.

Figura 45 - Molde de silicone para fundição de contrapeso de chumbo utilizado pela microempresa JCS.



Fonte: J.C.S. Peças para veículos LTDA (2022).

## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo, será apresentada a análise dos resultados dos experimentos realizados para construção dos moldes de silicone para fundição de contrapesos de chumbo de 35 g, testes e análises destes.

Na Figura 26 - ilustrações do escaneamento tridimensional - é possível notar as 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).

Por meio da Figura 27 - mensuração da massa do contrapeso de 35 g escaneado - nota-se a diferença entre a massa real (34,5 g) e a comercializada (35 g) da peça. Visto isso, é possível observar que existe uma tolerância aceitável para a massa dos contrapesos comercializados.

Na Figura 46 (a) e (b) - contrapesos de chumbo de 35 g 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 nas Figura 28 e Figura 29.

Figura 46 - Vista aproximada dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo (a) FDM e (b) DLP.



(a)



(b)

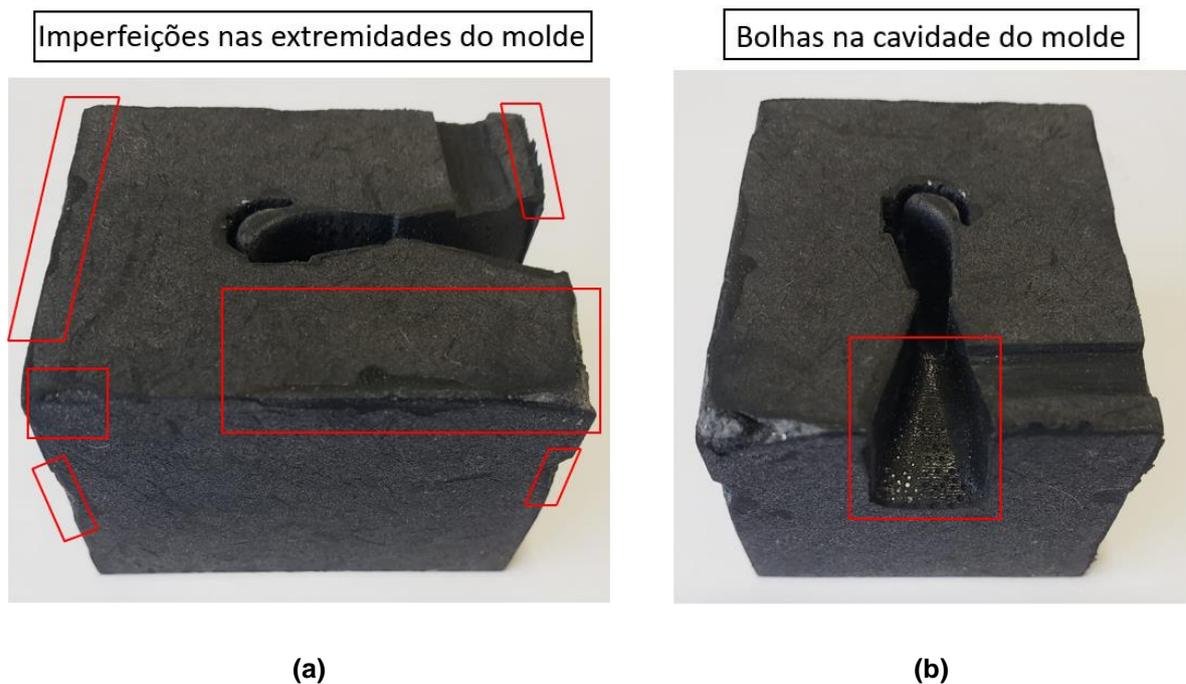
Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar a diferença de acabamentos superficiais, em relação a rugosidade dos contrapesos de chumbo fundidos em molde de silicone na Figura 46 (a) e (b). A 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 pode ser observada por meio da Figura 38 e Figura 39.

A partir da Figura 33 e Figura 34, pode-se notar imperfeições no molde de silicone preliminarmente à sua utilização para 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 é um fator que agravou as imperfeições nas extremidades do molde. A Figura 47 apresenta duas vistas aproximadas, nas quais é possível visualizar (a) as imperfeições nas extremidades e (b) as bolhas na cavidade do molde de silicone.

Figura 47 - (a) Imperfeições nas extremidades e (b) bolhas na cavidade do molde de silicone.



Fonte: Próprio autor.

Os gráficos demonstrados na Figura 40 e Figura 41 apresentam uma diferença considerável 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  $125,33^{\circ}\text{C}$ . Para as amostras do molde de silicone produzido a partir do modelo DLP, a média aritmética das máximas temperaturas atingidas pelo chumbo foi de  $165,83^{\circ}\text{C}$ . Visto que o molde de silicone resiste até  $360^{\circ}\text{C}$  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 e faz 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. Levando em consideração 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 atendem ao propósito das peças - estabilizar o balanceamento das rodas automotivas. Por meio da Figura 42, é 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 ao encaixe de uma roda automotiva.

A Figura 48 demonstra uma vista aproximada da montagem dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone, montados em uma roda automotiva.

Figura 48 - Vista aproximada da montagem dos contrapesos de chumbo de 35 g fundidos em molde de silicone modelo FDM e DLP em uma roda automotiva.

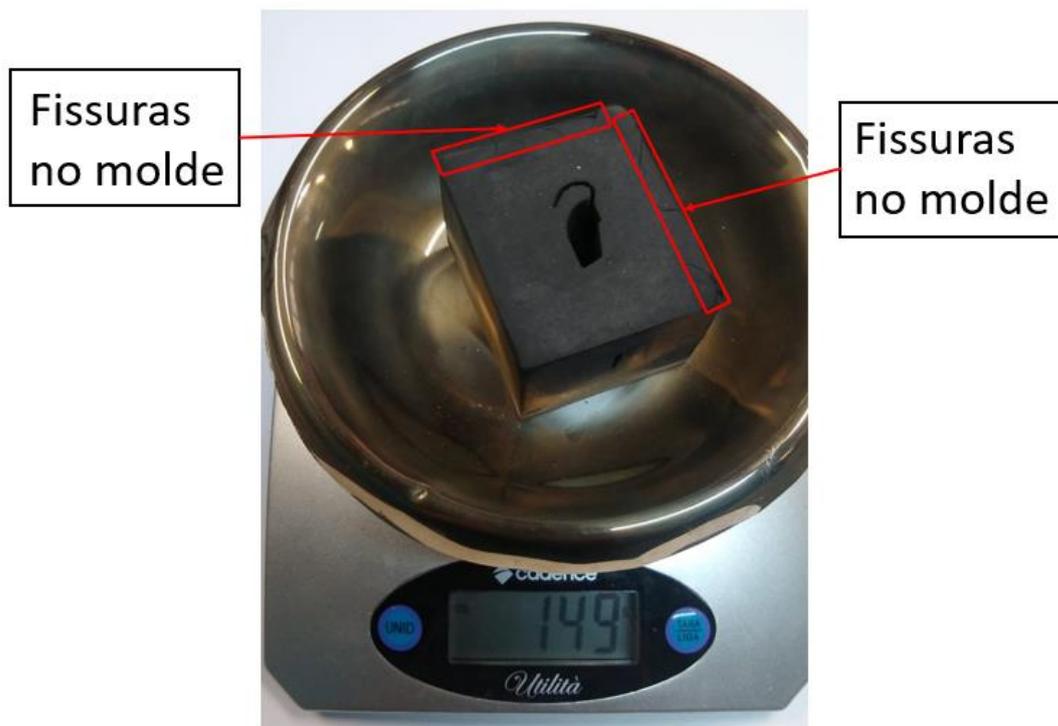


Fonte: Próprio autor.

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 apresentadas na Figura 43, é possível observar que à temperatura ambiente o conjunto do molde e

do recipiente, possui massa de 150 g. Por meio da Figura 44 (a), nota-se que após a submissão deste conjunto à 200° C, este permanece com massa de 150 g. A massa do conjunto varia a partir da submissão deste à 290° C, a qual mensura 149 g, como mostra a Figura 44 (b). A variação de massa em 1 g permanece até a última tomada do experimento, na qual o molde foi submetido à temperatura de 470° C. O molde passa a apresentar deteriorações em função da alta temperatura, quando submetido a temperaturas entre 380°C e 470° C, como mostra a Figura 49.

Figura 49 - Deteriorações no molde de silicone em função da alta temperatura (470° C).



Fonte: Próprio autor.

Para a análise da durabilidade dos moldes de silicone, estes também foram submetidos à utilização para fabricação de peças a serem comercializadas, pela microempresa JCS. A Figura 45 apresenta um molde de silicone para fundição de contrapesos de chumbo que foi utilizado durante o período de 8 meses, no qual fabricou aproximadamente 8000 peças. Visto a quantidade de peças fabricadas, é 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 com este. Diante do exposto, verifica-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 é possível verificar que a durabilidade do molde é significativa, sendo possível sua fabricação e implementação no âmbito industrial de médio e pequeno porte.

## 8 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões dos experimentos realizados para construção, análises e testes dos moldes de silicone para fundição de contrapesos de chumbo de 35 g.

De acordo com os experimentos realizados para construção, testes e análises dos moldes de silicone, 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 colhidos 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.

## 9 RECOMENDAÇÕES FINAIS

Após as conclusões obtidas, recomenda-se para a complementação deste trabalho:

- O cálculo da contração do chumbo após sua solidificação nos moldes, com o objetivo de obter maior precisão na massa das peças fundidas;
- O cálculo do coeficiente de dilatação volumétrica do silicone e sua dilatação após a deposição do chumbo em sua fase líquida nos moldes, visando maior precisão na massa dos contrapesos fundidos;
- Desenhar o modelo 3D digital com um canal de alimentação/massalote com dimensões menores com o intuito de facilitar a retirada deste, de forma que apresente menores imperfeições nas peças fundidas;
- Extrair os gases da mistura silicone e catalisador anterior e posteriormente a deposição desta nas caixas de moldagem, com o objetivo de minimizar as imperfeições nos moldes de silicone após sua cura;
- Retirar o excesso de cola adesiva utilizada para a fixação dos modelos de fundição e montagem das caixas de moldagem, visando também minimizar as imperfeições nos moldes de silicone após sua cura;
- Construir um dispositivo com o objetivo de guiar o encaixe das partes esquerda e direita dos moldes de silicone, com o intuito de minimizar o desalinhamento das peças produzidas;
- Verificar a viabilidade do uso do molde de silicone para fundição de alumínio (ponto de fusão de  $660,3^{\circ}\text{C}$ ), visto que a temperatura máxima atingida pelo chumbo foi de  $167^{\circ}\text{C}$  durante sua deposição no molde e seu ponto de fusão é de  $327,4^{\circ}\text{C}$ .

## REFERÊNCIAS

- BALDAM, Roquemar de L.; VIEIRA, Estéfano A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.
- BALWAN, Ajit R.; SHINDE, Vasudev D.; PATIL, Deepak C. Manufacturability Assessment of Custom Knee Implant Prototype. **Journal of The Institution of Engineers**, India, vol. 103, n.4, p. 857-865, abr. 2022.
- 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.
- BRANIGAN, Keith. Aegean Metalwork of the Early and Middle Bronze Age. **Oxford Monographs on Classical Archaeology**. Estados Unidos, v. 20, n. 8, 1974.
- 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.
- COSTA, Antonia Daniele Souza Bruno. **Projeto de Fundição em Areia**. Encontros de Iniciação Científica UNI7, v. 9, n. 1, 2019.
- 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.
- DA SILVA, Edna Lucia; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. UFSC, Florianópolis, 4a. edição, v. 123, 2005.
- DA SILVA BASTOS, Dayana. **PROJETO DE UM SISTEMA DE CANAIS E MASSALOTES EFICIENTE PARA A FUNDIÇÃO DA PEÇA ATRACADOR–PORCA BORBOLETA**. 2013.
- DE PAULA, Bruno Henrique; DEL VECHIO, Gustavo Henrique. IMPRESSÃO 3D COMO TECNOLOGIA EMERGENTE: estudo de conceitos essenciais, hardwares, softwares e aplicações na área médica. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 107-117, 2020.

DUTRA, Elienai Josias Brum; ROSA, Josimar Souza; BRAUN, Anderson. **Estudo de um sistema de fechamento de unidade de fundição por pressão utilizando ferramentas de CAD e CAE**. 2021.

FACCIO, Maíra; CATAFESTA, Jadna; ZORZI, Janete E. Aditivos para fabricação por manufatura aditiva de pós-cerâmicos pela técnica de filamento fundido: uma breve revisão. **Revista Tecnologia**, v. 42, n. 1, p. 12-12, 2021.

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

GALE, No L. H.; Zofia Stos-Gale. Lead and silver in the ancient Aegean. **Scientific American**, p.176-193, 1981.

GIL, Antonio Carlos *et al.* **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

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

GONZÁLEZ, Juan Carlos Albaladejo. Apuntes para una historia de la escultura. **Revista de Bellas Artes: Revista de Artes Plásticas**, Estética, Diseño e Imágen, p. 51-68, 2002.

GREß, Thomas *et al.* Production of aluminum AA7075/6060 compounds by die casting and hot Extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 280, p. 116594, 2020.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Barueri, SP. Grupo GEN, 2014. 978-85-216-2640-4.

GROTH, C.; GRAHAM, J. W.; REDMOND, W. R. **Three-Dimensional Printing Technology**. v. XLVIII, n. 8, p. 475–485, 2014.

HOUZEAUX, Guillaume; CODINA, Ramon. A finite element model for the simulation of lost foam casting. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 46, n. 2, p. 203-226, 2004.

HUNT, L.B. The long history of lost wax casting. **Gold Bull.** 13, 63-79 (1980). <https://doi.org/10.1007/BF03215456>

JIAO, Chen *et al.* Preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 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.

KANYO, Janos E. *et al.* An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 40, n. 15, p. 4955-4973, 2020.

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

KHODAI, M.; PARVIN, N. Pressure measurement and some observation in lost foam casting. **Journal of materials processing technology**, v. 206, n. 1-3, p. 1-6, 2008.

KIMINAMI, Claudio S.; CASTRO, Walman Benício D.; OLIVEIRA, Marcelo Falcão D. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Editora Blucher, 2013.

KLIAUGA, A. M.; FERRANTE, M. **Metalurgia básica para ourives e designers: Do metal à joia**. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

KOLOSOSKI, Jorge; **Estudo de Sistema de Canais para Fundição de Ligas de Alumínio por Gravidade** – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia; 2001; 49 – 55p.

KUSNOWO, Roni; GUNARA, Sophiadi. Engineering design of centrifugal casting machine. **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2017. p. 030026.

KUSNOWO, Roni; GUNARA, Sophiadi. The engineering design of shell moulding machine. **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2018. p. 030025.

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.

LI, Yang *et al.* Theoretical prediction and experimental validation of the digital light processing (DLP) working curve for photocurable materials. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101716, 2021.

LINO, F. Jorge *et al.* Desenvolvimento de protótipos metálicos para a indústria automóvel por fundição injectada. **Jornadas Politécnicas de Engenharia Mecânica, Automóvel, Organização e Gestão Industrial, Energia e Ambiente**, 2002.

LOHSE, Joachim *et al.* **Heavy metals in vehicles II**. Okopol, 2001.

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.

MACHADO, Izabel; **Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 - Processos de Fundição e Sinterização (Metalurgia do Pó)**. São Paulo, 2000.

MORANDINI, Moisés Miranda; DEL VECHIO, Gustavo Henrique. IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 2, p. 67-77, 2020.

MOREIRA, Fátima R.; MOREIRA, Josino C. A importância da análise de especiação 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.

NIZER, Pedro *et al.* ANÁLISE GEOMÉTRICA DOS CANAIS DE ATAQUE NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 10, n. 2, 2018.

NUNES, Raíra Morais Alcântara. **Fundição de precisão utilizando cinza volante de termoeétrica para a produção de peças de zinco com geometria complexa.** (2021).

PANTAROTO, H. L. **UMA ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO CHUMBO NA PRODUÇÃO DE BATERIAS E SUAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS.** Dissertação de mestrado pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara D'oeste – SP: 2008. 168p.

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.

PENG, Xirui *et al.* Integrating digital light processing with direct ink writing for hybrid 3D printing of functional structures and devices. **Additive Manufacturing**, v. 40, p. 101911, 2021.

PINHEIRO, Inês Moreira Vilanova. **DEPOSIÇÃO QUÍMICA DE POLIPIRROL SOBRE SUPERFÍCIES DE LIGA DE CHUMBO E SEU COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO.** 2019.

RAMESH, R. *et al.* Experimental investigation of lost foam casting process on aluminium. **Materials Today: Proceedings**, v. 50, p. 1134-1137, 2022.

ROOT, Robert A. Lead loading of urban streets by motor vehicle wheel weights. **Environmental health perspectives**, v. 108, n. 10, p. 937-940, 2000.

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

SANTOS C. A, Solidification heat transfer and a neural network based algorithm applied to continuous casting of billets and blooms. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 13, p. 1-17. 2005.

SANTOS, Juarez F. Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral. **Ministério de Minas e Energia – MME**. 2009.

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

DA SILVA, Edna Lucia; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. UFSC, Florianópolis, 4a. edição, v. 123, 2005.

SOARES, Gloria de Almeida. **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2000.

SOUZA, Rubens *et al.* **Análise da influência dos parâmetros de tenacidade em peças obtidas por deposição de material fundido-FDM**. 2019.

TÂMEGA, Fábio. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Educacional SA, 2017.

TUMBLESTON, John R. *et al.* Continuous liquid interface production of 3D objects. **Science**, v. 347, n. 6228, p. 1349-1352, 2015.

VELHINHO, Alexandre. **Fundição centrífuga de compósitos alumínio/sic com gradiente funcional de propriedades: Processamento e caracterização**. 2003.

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

VYAS, Abhijit *et al.* Digital light processing mediated 3D printing of biocomposite bone scaffolds: Physico-chemical interactions and in-vitro biocompatibility. **Polymer Composites**, v. 43, n. 5, p. 3175-3188, 2022.

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.

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 *et al.* Silicone mold accuracy in polyurethane vacuum casting. **Macromolecular Symposia**. 2021. p. 2000242.

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