

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME COSTA SENTINGER FERRARI

**FABRICAÇÃO DE FORNO TIPO CADINHO PARA RECICLAGEM DE ALUMÍNIO
ATRAVÉS DE FUNDIÇÃO POR AREIA VERDE**

MACAÉ
2023

GUILHERME COSTA SENTINGER FERRARI

**FABRICAÇÃO DE FORNO TIPO CADINHO PARA RECICLAGEM DE ALUMÍNIO
ATRAVÉS DE FUNDIÇÃO POR AREIA VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.^a Tabatta Regina de Brito Martins

MACAÉ

2023

FABRICAÇÃO DE FORNO TIPO CADINHO PARA RECICLAGEM DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE FUNDIÇÃO POR AREIA VERDE

Guilherme Costa Sentinger Ferrari

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovação da banca examinadora:

Orientadora: Dsc. Tabatta Regina de Brito Martins

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Professor Examinador: Dsc. Marcelo Costa Cardoso
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Professor Examinador: Dsc. Maurício Aguiar
Nepomuceno de Oliveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro

MACAÉ

2023

CIP - Catalogação na Publicação

F375

Ferrari, Guilherme Costa Sentinger

Fabricação de forno tipo cadinho para reciclagem de alumínio através de fundição por areia verde / Guilherme Costa Sentinger Ferrari - Macaé, 2023.
93 f.

Orientador(a): Tabatta Regina de Brito Martins.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Fundição. 2. Forno – Brasil. 3. Alumínio. 4. Reciclagem
I. Martins, Tabatta Regina de Brito, orient. II. Título.

CDD 620

“A ciência prospera com seus erros, eliminando-os um a um.”

Carl Sagan.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, aos meus pais e irmãs, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho. Gostaria de expressar minha gratidão à minha amiga Alicia Gutierrez, seus comentários sempre úteis foram de extrema importância e me ajudaram a tomar decisões cruciais ao longo deste trabalho.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado. Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

À minha orientadora Tabatta Brito, que conduziu o trabalho com paciência e dedicação, sempre disponível a compartilhar todo o seu vasto conhecimento e por orientações e ideias valiosas para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a todos os professores que fizeram parte desta trajetória, pelo amor à profissão e pelo ensino de qualidade.

RESUMO

O presente estudo aborda a fabricação de um forno de fundição tipo cadinho de pequeno porte alimentado por gás GLP, visando a fundição de alumínio através do método de fundição em areia verde e a investigação dos desafios e oportunidades desse processo, destacando sua relevância para a reciclagem do alumínio. O forno fabricado é capaz de ultrapassar as temperaturas necessárias para fundir o alumínio enquanto mantém uma temperatura relativamente baixa em sua superfície externa. A caixa metálica para fundição em areia verde é sólida e apresenta alinhamento adequado. O molde de areia verde produz peças com interior visivelmente sólido. Uma das peças fabricadas passa por um teste de carga estática com a utilização de 10kg de massa. A fusão das latinhas retorna mais de 50% de volume em alumínio líquido.

Palavras-chave: Fundição, Alumínio, Forno, Cadinho, Reciclagem.

ABSTRACT

This study addresses the manufacturing of a small-scale crucible furnace powered by LPG gas, focusing on the aluminum casting process using the green sand molding method and investigating the challenges and opportunities associated with this process, emphasizing its relevance to aluminum recycling. The manufactured furnace is capable of reaching the necessary temperatures for aluminum melting while maintaining a relatively low surface temperature. The metal casing for green sand molding is robust and properly aligned. The green sand molds produce visually solid interior pieces. One of the manufactured parts undergoes a static load test using 10kg of mass. The melting of aluminum cans yields over 50% volume of liquid aluminum.

Keywords: Casting, Aluminum, Furnace, Crucible, Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Limiar de temperatura para queima da pele quando em contato com cerâmicas, vidros ou materiais de pedra a altas temperaturas. D indica o eixo do tempo, Ts a temperatura da superfície e as áreas, respectivamente: 1 - Não há queima, 2 - Limiar onde pode haver queima, 3 - Ocorre a queima da pele.....	18
Figura 2 - Representação cilíndrica do forno de fundição para a estimativa da espessura mínima do gesso. O conceito de resistência térmica pode ser usado para paredes cilíndricas de múltiplas camadas.....	19
Figura 3 - Molde da Idade do Bronze com um machado.....	27
Figura 4 – Caixa metálica para molde de areia verde.....	29
Figura 5 – Força de compressão da areia verde no eixo vertical em libras por polegada quadrada, porcentagem de umidade no eixo horizontal e porcentagem de argila indicado na imagem.	30
Figura 6 – Sistema de Alimentação – Molde de Areia Verde.....	31
Figura 7 – Fluxograma das etapas realizadas - Materiais e Métodos.....	38
Figura 8 - Estrutura externa do forno em aço inox.....	41
Figura 9 - Estrutura interna em gesso (à esquerda) e tampa (à direita)	42
Figura 10 - Corte do excesso de gesso da tampa com micro retifica com broca de 3mm.....	42
Figura 11 - Furação com broca comum HSS de 5mm. Idealmente este furo seria feito com uma broca do tipo serra copo.....	43
Figura 12 - Cilindro metálico que faz parte do queimador. Este cilindro metálico com parafuso é responsável por segurar o queimador na posição correta (com possível ajuste linear para cadinhos de tamanhos diferentes)	43
Figura 13 - Forno após feita a furação com queimador encaixado.....	44
Figura 14 – Broca feita de vergalhão para furo de 215mm no forno.....	44
Figura 15 – Broca feita de vergalhão para furo de 215mm no forno.....	44
Figura 16 – Termopar tipo K instalado.....	45
Figura 17 – Design da caixa metálica para molde de fundição.....	46
Figura 18 – Dimensões da caixa metálica, parte 1.....	46
Figura 19 – Dimensões da caixa metálica, parte 2.....	47
Figura 20 – Alinhamento da caixa metálica para molde de fundição.....	47
Figura 21 – Lavagem latinhas de alumínio recicladas. Preparação para fundição.....	48
Figura 22 – Pesagem de latinhas amassada.....	48
Figura 23 – Materiais para peneirar areia.	49
Figura 24 – Adição de água e argila à areia.	49
Figura 25 – Parte inferior da caixa metálica com molde/macho da peça fundida 1.....	50
Figura 26 – Alumínio líquido sendo despejado no molde.....	50
Figura 27 – Suporte do Carona, de alumínio.....	51
Figura 28 – Dimensões cantoneira (peça 2), a largura da peça, não mostrada na figura, é de 25mm.....	52
Figura 29 – A superfície em azul possui fixação do tipo deslizante. Esta superfície é a que ficaria em contato com a parede.....	52
Figura 31 – Fixação com 0 graus de liberdade para movimentação, duas arruelas também foram adicionadas e fixadas.....	53
Figura 32 - Tamanhos de malha controlados.....	53
Figura 33 – Pontos onde a malha foi refinada para a simulação.....	54
Figura 34 – Refinamento de malha para a simulação.....	54

Figura 35 – Molde de areia verde da peça 2.....	55
Figura 36 – Estado da parede interna de gesso após 5 ciclos de operação.....	56
Figura 37 – Suporte do queimador com corrosão.....	56
Figura 38 – Forno montado para uso, antes do seu quinto ciclo de operação.....	57
Figura 39 – Temperatura inicial antes do quinto ciclo de operação (produção da peça 3).....	57
Figura 40 - Forno em operação normal, ainda assim, acima dos 750°C para o qual foi projetado.).....	58
Figura 41 - Temperatura interna do forno (°C) ao longo do tempo, tempo total de teste de 95 minutos.).....	59
Figura 42 - Temperatura externa do forno (°C) ao longo do tempo.....	59
Figura 43 - Esta figura indica o ponto A da Figura 42 em sua temperatura máxima. A espessura da parede de gesso nesse ponto é de 5cm.....	60
Figura 44 -Temperatura da tampa durante primeira operação.....	60
Figura 45 - Forno operando em condições extremas, temperatura máxima chegou a 1215°C e só não subiu mais pois o teste foi encerrado por motivos de segurança. Nesta imagem é possível notar como a vedação da tampa não foi eficiente.....	61
Figura 46 - Condições do forno após teste de 95 minutos de duração, dos quais operou durante 74 minutos acima da temperatura para o qual foi projetado, 750 °C.....	61
Figura 47 - Condições da parte inferior da tampa do forno após teste.....	62
Figura 48 – Alumínio fundido em primeiro teste do forno.....	62
Figura 49 – Temperatura interna do forno durante operação de fundição da peça 3.....	63
Figura 50 – Temperatura externa do forno durante operação de fundição da peça 3. A Figura X mostra os dois termopares ligados no termômetro.....	64
Figura 51 – Aquecimento inicial do interior do forno.....	64
Figura 52 – Chapas de metal para fabricação da caixa metálica que comportará o molde de fundição e posteriormente a peça fundida, algumas medidas são indicadas, mais detalhes são encontrados na Figura 18.....	65
Figura 53 – Alças para alinhamento e fixação da caixa.....	65
Figura 54 – Exemplo de uma das alças de fixação com furação, parafuso, porcas e arruelas quando a caixa está presa.....	66
Figura 55 – Caixa montada após fabricação.....	66
Figura 56 – Processo de soldagem da caixa metálica.....	67
Figura 57 – Consistência da mistura de areia, argila e água (respectivamente em volume: 85%,15% e 5%).....	67
Figura 58 – Parte superior do molde com canal de vazamento.....	68
Figura 59 – Parte inferior do molde com canal de vazamento.....	68
Figura 60 – Peça fundida 1, vista da metade superior da caixa metálica, de baixo para cima.	69
Figura 61 – Peça 1 após ser retirada do molde.....	70
Figura 62 – Peça 1 após ser retirada do molde ao lado da peça original.....	70
Figura 63 – Zoom na superfície da peça 1 antes da rebarbação.....	71
Figura 64 – Corte na peça 1 durante rebarbação mostra interior sólido.....	71
Figura 65 – Tensão máxima por critério de Von Mises de 160,1 MPa para uma carga de 400N.....	72
Figura 66 – Deformação em mm.....	73
Figura 67 – Exemplifica o método de retirada do macho do molde das peças 2 e 3 após a compactação da areia.....	74
Figura 68 – Molde aberto para produção da peça 2.....	74

Figura 69 – O metal líquido não é suficiente para preencher todo o molde pois parte fica no cadinho.	75
Figura 70 – Resultado peça 2.....	75
Figura 71 – Alumínio utilizado para a fundição da peça 3.....	76
Figura 72 – Molde da peça 3.....	76
Figura 73 – Peça 3 após o alumínio líquido ser despejado.....	77
Figura 74 – Peça 3 antes da rebarbação.....	78
Figura 75 – Peça 3 após rebarbação, não possui formato regular pois não ocorreu o preenchimento perfeito do molde pelo alumínio líquido.....	78
Figura 76 – Prateleira criada para a peça 3.....	79
Figura 77 – Cantoneira suportando carregamento de 10kg.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição dos elementos térmicos do termopar tipo K.....	20
Quadro 2 – Ligas de Alumínio utilizadas na fundição.....	23
Quadro 3 – Materiais utilizados – Forno de Fundição.....	39
Quadro 4 – Parâmetros e Características do Forno de Fundição.....	40
Quadro 5 – Ferramentas utilizadas na fabricação do forno.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	O FORNO DE FUNDIÇÃO.....	16
2.1.1	Tipos de fornos de fundição.....	16
2.1.1.1	Forno de Cadinho.....	16
2.1.1.2	Forno Cubilô.....	17
2.1.1.3	Forno de Indução.....	17
2.1.1.4	Fornos de Resistência Elétrica.....	17
2.1.2	O Isolamento Térmico do forno de fundição.....	17
2.1.3	Materiais Refratários.....	20
2.1.4	A Função do Cadinho.....	20
2.1.5	O uso do gás como combustível.....	20
2.1.6	O Queimador.....	21
2.1.7	Medição de Temperatura.....	21
2.2	O ALUMÍNIO.....	22
2.2.1	A História do Alumínio.....	22
2.2.2	O Alumínio.....	22
2.2.3	Produção do Alumínio.....	23
2.2.4	A Reciclagem do Alumínio.....	23
2.2.5	Ligas de Alumínio Utilizadas na Fundição.....	24
2.3	PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	25
2.3.1	Origens do processo de fundição.....	26
2.4	O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE.....	28
2.4.1	A Fusão do Metal.....	31
2.4.2	O Vazamento do Metal Líquido.....	34
2.4.3	Solidificação e Resfriamento.....	35
2.4.4	Defeitos em peças fundidas.....	36
2.4.4.1	Defeitos decorrentes do vazamento.....	36
2.4.4.2	Inclusões e defeitos de areia.....	36
2.4.4.3	Defeitos de gás.....	36
2.4.4.4	Defeitos de encolhimento devido à contração de volume.....	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	FORNO DE FUNDIÇÃO.....	39
3.1.1	Materiais que compõe o forno.....	39
3.1.2	O Isolamento Térmico do forno de fundição.....	40
3.1.3	Fabricação do forno de fundição.....	41
3.1.3.1	Corte da estrutura externa do forno (lata de lixo de inox).....	41
3.1.3.2	Construção da estrutura interna e tampa em gesso.....	42
3.1.3.3	Instalação do termopar tipo K com revestimento de cerâmica.....	44
3.2	CAIXA METÁLICA PARA FUNDIÇÃO.....	45
3.3	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A FUNDIÇÃO.....	47
3.3.1	Preparação das Latas de Alumínio para Fundição.....	48
3.3.2	Preparação da Areia Verde e Moldes.....	49
3.4	PEÇAS FUNDIDAS.....	51

3.4.1	Peça 1 – Suporte do Carona em Alumínio.....	51
3.4.2	Peça 2 – Cantoneira de alumínio fundido para prateleira.....	58
3.4.3	Peça 3 – Cantoneira de alumínio fundido para prateleira.....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1	FORNO DE FUNDIÇÃO.....	55
4.1.1	O Forno em operação.....	58
4.1.2	Eficiência do Isolamento Térmico.....	62
4.2	CAIXA METÁLICA PARA FUNDIÇÃO.....	65
4.3	AREIA VERDE.....	67
4.4	PEÇAS PRODUZIDAS POR FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE.....	68
4.4.1	Peça 1 – Suporte do Carona.....	68
4.4.2	Peça 2 – Cantoneira de Alumínio Fundido para Prateleira.....	72
4.4.2.1	Critério de falha de Von Mises.....	72
4.4.2.2	Simulação de deformação da peça.....	73
4.4.3	Cantoneira de Alumínio Fundido para Prateleira.....	75
5	CONCLUSÃO.....	79
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

A fundição em areia verde é um processo amplamente utilizado na indústria metalúrgica para a produção de peças de diversos tipos de metais. Além de ser uma opção viável e acessível, especialmente para pequenas fundições, esse método desempenha um papel importante na economia circular, ao permitir a reciclagem, por exemplo, do alumínio.

O alumínio é um metal versátil e amplamente utilizado devido às suas propriedades físicas e químicas, como sua baixa densidade e resistência à corrosão. O processo de reciclagem requer apenas uma fração da energia necessária para produzir alumínio primário a partir do minério, bauxita.

A escolha e o uso adequados de fornos de fundição é essencial para garantir o sucesso do processo. A capacidade de alcançar as temperaturas necessárias para a fusão do alumínio e possuir um isolamento térmico que diminua as suas perdas de energia térmica são aspectos cruciais a serem considerados.

A viabilidade das pequenas fundições por meio da fundição em areia verde é um tema abordado neste estudo. A fundição em areia verde é um método eficaz para a fabricação de peças personalizadas, atendendo às necessidades de diversos setores industriais. Com baixo investimento inicial, as pequenas fundições oferecem flexibilidade e a capacidade de produzir peças personalizadas, atendendo às demandas específicas do mercado.

Neste trabalho, será explorado o processo de fabricação de um forno de fundição tipo cadinho de pequeno porte, assim como o processo de fundição em areia verde com a fusão do alumínio proveniente de latinhas recicladas. O objetivo do trabalho é contribuir para o conhecimento e desenvolvimento dessa área, buscando compreender os desafios e as oportunidades presentes nesse processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O FORNO DE FUNDIÇÃO

A seleção dos fornos de fusão não se baseia apenas na eficiência térmica, mas em uma série de fatores que afetam a economia geral das operações de fusão. Além da transferência eficiente de calor para a carga, outros aspectos como depreciação do capital, grau de utilização, custos operacionais (manutenção, mão de obra, combustível e energia) também devem ser considerados. A escolha do forno é determinada pelo custo, qualidade do metal, requisitos de produção e tipo de liga. Para muitos tipos de produção, a flexibilidade para uma ampla gama de condições é uma vantagem. Portanto, a seleção do forno e suas características principais devem ser abordadas por meio de um estudo de viabilidade do projeto, levando em consideração diversos aspectos, e não apenas buscando a máxima eficiência térmica isoladamente (BEELEY, 2001).

2.1.1 Tipos de fornos de fundição

O forno de fusão deve ser capaz de gerar e manter as temperaturas necessárias por um período prolongado. Existem várias arquiteturas de fornos de fusão capazes de realizar esse processo, algumas das quais são introduzidas a seguir:

2.1.1.1 Forno de Cadinho

O aquecimento é feito normalmente por meio de gás ou óleo combustível. Ocasionalmente, utilizando-se fornos aquecidos por meio de carvão. Os cadinhos são construídos com argila e grafita, ou com carbetto de silício ligado com carbono. Esse tipo de forno é utilizado principalmente na fundição de ferro, aço, ligas de alumínio, de magnésio e de cobre (FILHO; DAVIES, 1978). O forno cadinho é o tipo de forno adotado neste projeto.

2.1.1.2 Forno Cubilô

É um forno de cuba vertical sendo utilizado quase que exclusivamente na fusão de ferros fundidos. Produz 90% do ferro fundido usado nas fundições (FILHO; DAVIES, 1978).

2.1.1.3 Forno de Indução

Este tipo de forno opera sob o mesmo princípio do transformador, em que é passada uma corrente por uma bobina primária; o metal (ou o cadinho) funciona como uma bobina secundária. Desta forma, são induzidas correntes parasitas (correntes de Foucault) no metal, produzindo um efeito de aquecimento. A profundidade de penetração da corrente é dependente da frequência. São amplamente utilizados equipamentos de alta frequência (~450 KHz) (FILHO; DAVIES, 1978).

2.1.1.4 Fornos de Resistência Elétrica

São normalmente fornos de cadinho aquecidos com resistência elétrica (STEFANESCU et al, 1998).

2.1.2 O Isolamento Térmico do forno de fundição

Isolante térmico é um material que apresenta uma baixa dissipação de calor, ou seja, ele evita que ocorra transferência de energia de um meio para outro. O isolamento, além de não permitir que o calor gerado pelo forno seja dissipado, gerando uma eficiência maior e o consumo de energia menor (BERGMAN et al., 2014).

Segundo a ISO 23062 (Requisitos de segurança para máquinas de moldagem e fabricação de núcleos de fundição e equipamentos associados) as superfícies que são acessíveis e podem ser tocadas devem ter temperaturas que não excedam o limite de queima para tempo de contato e material especificado na ISO 13732-1:2006.

De acordo com a ISO 13732-1:2006, no caso de contato curto (períodos de contato de 0,5 s a 10 s), os limites de temperatura que pode ocasionar a queima não são definidos em números, mas são refletidos em gráficos em relação ao período de contato. Os limites de queima de materiais com propriedades de condutividade de calor semelhantes são combinados para

representar uma propagação. Para a parede do forno foi escolhida a tabela da Figura 1 da ISO 13732-1:2006 para cerâmicas, vidros e materiais de pedra:

Figura 1 - Limiar de temperatura para queima da pele quando em contato com cerâmicas, vidros ou materiais de pedra a altas temperaturas. D indica o eixo do tempo, T_s a temperatura da superfície e as áreas, respectivamente:
 1 - Não há queima, 2 - Limiar onde pode haver queima, 3 - Ocorre a queima da pele

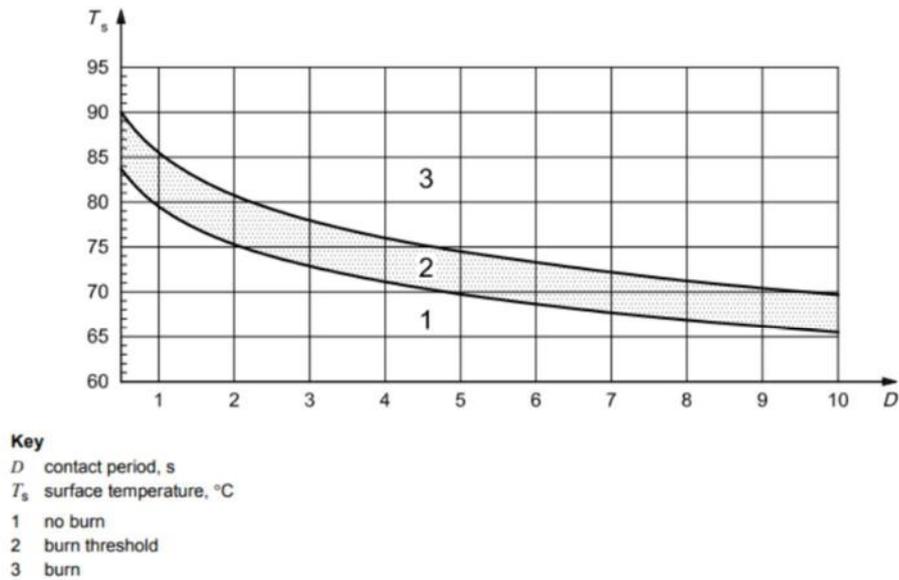


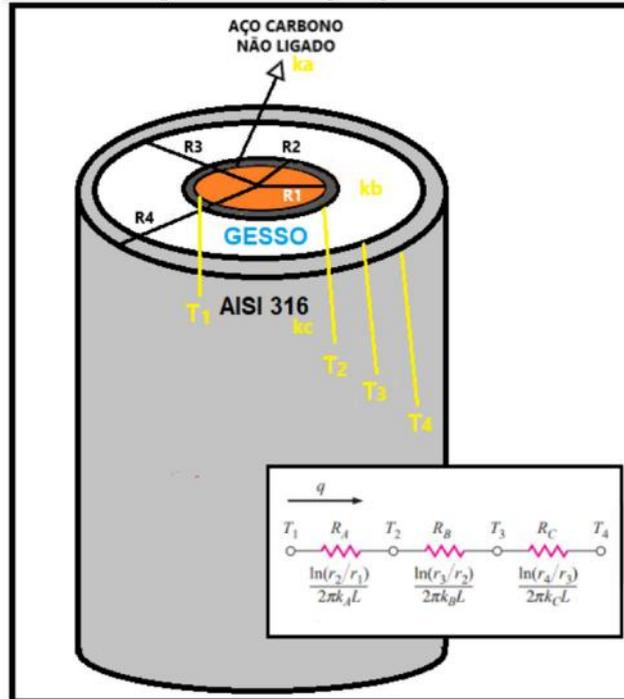
Figure 5 — Burn threshold spread when skin is contact with hot, smooth surface made of ceramics, glass and stone materials

Fonte: ISO 13732-1:2006. Ergonomia do ambiente térmico - Métodos para avaliação das respostas humanas ao contato com superfícies.

Ou seja, é esperado que o forno de fundição em plena operação tenha sua temperatura externa dentro da área 1 da Figura 1.

Considerando uma condução em estado estacionário e considerando o forno como um cilindro oco composto de dois materiais, aço inox AISI 316 externamente e gesso internamente indicado na Figura 2.

Figura 2 - Representação cilíndrica do forno de fundição para a estimativa da espessura mínima do gesso. O conceito de resistência térmica pode ser usado para paredes cilíndricas de múltiplas camadas.



Fonte: Holman, 2010.

Seja k a condutividade térmica do material em $W/m.K$, a perda de calor por unidade de comprimento (q/l) para o cilindro com três materiais diferentes é representado pela Equação 1 (HOLMAN, 2010):

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(T_1 - T_4)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_a} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_b} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_c}} \quad (1)$$

Para o isolamento térmico do forno o material escolhido foi o gesso pela sua característica de baixa condutividade térmica, $0,17 W/mK$ segundo a tabela A.3 do Incropera. Por motivo de comparação, o aço inox possui condutividade térmica de $24,2W/mK$. No interior do forno, encontra-se uma lata de tinta de 3,6 litros feita de aço não ligado, com espessura de 1 mm e condutividade térmica de $60,5 W/mK$ (BERGMAN et al., 2014)

A Equação 1 é utilizada para estimar a espessura mínima de gesso com o objetivo de atender o limite de temperatura por tempo de contato da ISO 13732-1 com o objetivo de evitar queimaduras.

2.1.3 Materiais Refratários

Os materiais refratários podem suportar temperaturas muito altas (até 3000 °C ou mais) sem se degradar ou amolecer. São usados em fornos para sustentar altas temperaturas e manter a estrutura do forno. Estes materiais incluem certas cerâmicas e superligas e são usados como isolantes térmicos em fornos. As operações metalúrgicas como fundição, fusão, aquecimento, etc são possíveis devido ao uso de refratários. O desempenho de uma cerâmica refratária depende em grande parte de sua composição. Com base nesse critério existem várias classificações - argila refratária, de sílica, básica e refratários especiais (GROOVER, 2010).

2.1.4 A Função do Cadinho

Os cadinhos estão entre os artefatos mais antigos produzidos pelo homem, sua história está relacionada à Idade do Bronze. Os primeiros cadinhos eram feitos à base de argila misturada e fibras vegetais para conferir uma maior resistência mecânica. Em 1820 desenvolveram um cadinho melhorado que continha grafite natural (plumbago) ligado à argila refratária. O grafite possui alta condutibilidade térmica, é quimicamente estável e altamente refratário. Somando, portanto, todas as propriedades ideais para um cadinho. Outro grande avanço ocorreu em 1935 com a introdução do carbetto de silício na composição da estrutura, oferecendo ganhos ainda maiores na resistência ao choque térmico, à oxidação, condutividade térmica e no ataque químico (MORGANITE, 2005).

Um cadinho é um recipiente usado para manter o metal fundido em uma fornalha. Um cadinho deve suportar as altas temperaturas de fusão e o material do cadinho deve ter um ponto de fusão mais alto que o do metal que está sendo fundido. Os cadinhos são usados para fundir metais não ferrosos como zinco, alumínio, latão/bronze, etc. Diferentes metais não devem ser fundidos no mesmo cadinho, pois isso leva à contaminação do fundido e altera as propriedades das peças fundidas (BEELEY,2001).

2.1.5 O uso do gás como combustível

Combustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Combustíveis líquidos e gasosos têm a vantagem de serem convenientemente manipulados por tubos ao contrário de carvão ou coque.

Define-se como gases liquefeitos de petróleo, GLP, as misturas formadas majoritariamente por moléculas de hidrocarbonetos contendo, de três a quatro átomos de carbono que podem ser liquefeitos por resfriamento e/ou compressão. A queima do GLP é limpa, comparada aos combustíveis mais pesados, com reduzido nível de emissão de particulados, SO_x e NO_x. Produz também baixo nível de emissões de CO₂ por unidade de energia gerada, em relação aos combustíveis líquidos, por sua alta proporção Hidrogênio/Carbono (PETROBRAS, 2022).

2.1.6 O Queimador

O queimador deve possuir sua ignição de forma controlada e confiável, a chama resultante deve possuir a forma e estrutura necessárias além de ser estável. O aparelho deve ser inerentemente seguro (LOPEZ-TAPIA, 2019).

2.1.7 Medição de Temperatura

O objetivo desta seção é fornecer detalhes do termopar utilizado para a medição de temperatura no interior do forno. O termopar utilizado foi um Termopar Tipo K Cerâmico com temperatura máxima de operação de 1300°C.

O termopar tipo K é um termopar de uso geral e é mais resistente à oxidação em temperaturas altas do que os tipos E, J e T. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis em diversos tipos de montagens (ECIL, 2019).

O termopar tipo K encontra sua aplicação em temperaturas acima de 500°C . Seus elementos térmicos tem suas composições indicadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição dos elementos térmicos do termopar tipo K.

Elemento térmico positivo		Elemento térmico negativo	
Material	%	Material	%
Ni	89-90	Ni	95-96
Cr	9-9.5	Mg	1,6-3.2
Outros como: Ferro e Silício	0.5	Al	1-2.3
		Si	1-1.5
		Co	0.5
		Outros como: Cobre, Ferro e Chumbo	< 0.5

Fonte: BURNS, 1993.

Os termopares tipo K são recomendados pela ASTM para o uso dentro da faixa de temperatura entre -250°C e 1260°C em atmosferas oxidantes ou inertes. A norma E230-87 (1992) da ASTM especifica tolerâncias de $\pm 2,2^\circ\text{C}$ ou 0,75% (o que for maior) para temperaturas entre 0 e 1250°C (BURNS, 1993).

2.2 O ALUMÍNIO

2.2.1 A História do Alumínio

Desde 3000 a.C já eram produzidos artigos de argila com alumina, utilizados para a fabricação de cosméticos e medicamentos (CASOTTI; BEL; CASTRO, 2011).

Em 1807, o químico inglês Humphrey Davy, acreditando que o mineral Al_2O_3 tinha uma base metálica, tentou extrair o metal. Ele não conseguiu, mas nomeou o metal assim mesmo. Em 1825, o físico/químico dinamarquês Hans Orsted conseguiu separar o metal. Ele observou que "se assemelha ao estanho". Em 1845, o físico alemão Friedrich Wohler foi o primeiro a determinar a densidade, a ductilidade e várias outras propriedades do alumínio (GROOVER, 2010).

O moderno processo eletrolítico para a produção de alumínio foi baseado no trabalho simultâneo, mas independente, de Charles Hall nos Estados Unidos e Paul Heroult na França por volta de 1886. Em 1888, Hall e um grupo de empresários fundaram a Pittsburgh Reduction Co. O primeiro lingote de alumínio foi produzido pelo processo de fundição eletrolítica no mesmo ano. A demanda por alumínio cresceu. A necessidade de grandes quantidades de eletricidade no processo de produção levou a empresa a se mudar para as Cataratas do Niágara em 1895, onde a energia hidrelétrica estava se tornando disponível a um custo muito baixo. Em 1907, a empresa mudou seu nome para Aluminium Company of America (Alcoa). Foi o único produtor de alumínio nos Estados Unidos até a Segunda Guerra Mundial (GROOVER, 2010).

2.2.2 O Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre e o elemento metálico mais abundante. Nos últimos 50 anos, ficou atrás apenas do ferro em seu uso industrial (TECHNAVIO, 2023). O alumínio não ocorre em estado elementar; ao contrário, é sempre combinado em um composto químico (LUMLEY, 2011).

O alumínio e suas ligas são altamente valorizados na indústria devido a diversas propriedades que apresentam, como atraente aparência, leveza, facilidade de fabricação, além de possuírem propriedades físicas e mecânicas notáveis e resistência à corrosão. Essas características tornam o alumínio um material versátil e econômico para uma ampla gama de aplicações industriais (STEFANESCU et al., 1998).

O alumínio possui alta condutividade elétrica e térmica, e sua resistência à corrosão é excelente devido à formação de um filme superficial de óxido fino e duro. É um metal muito dúctil e é conhecido por sua conformabilidade. O alumínio puro tem resistência relativamente baixa, mas pode ser ligado e tratado termicamente para competir com alguns aços, especialmente quando o peso é uma consideração importante (KAUFMAN; ROOY, 2004).

2.1.3 Produção do Alumínio

A bauxita é o principal minério utilizado para produzir alumínio, sendo composta principalmente de óxido de alumínio hidratado $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ e outros óxidos. A extração do alumínio da bauxita é realizada em três etapas principais. Na primeira etapa, a bauxita é lavada e triturada até que se obtenha um pó fino. Em seguida, é realizada a etapa conhecida como processo Bayer, onde a bauxita é convertida em alumina pura (Al_2O_3). Por fim, na terceira etapa, é realizada a eletrólise, onde a alumina é separada em alumínio e gás oxigênio (O_2) (GROOVER, 2010).

2.1.4 A Reciclagem do Alumínio

Para a realização deste projeto, o metal utilizado na fundição provém da reciclagem de latinhas de alumínio. O alumínio tem sido reciclado desde que foi produzido comercialmente e hoje representa cerca de um terço do consumo mundial de alumínio. As razões iniciais para a reciclagem eram tanto comerciais quanto ambientais. Há uma economia significativa de energia no alumínio reciclado (LUMLEY, 2010).

O alumínio pode ser classificado em primário ou secundário, dependendo do seu processo de obtenção. O alumínio primário é produzido a partir da redução da alumina, em um processo que consome considerável quantidade de energia elétrica, correspondendo a cerca de 30% a 35% do custo de fabricação. Já o alumínio secundário é proveniente da reciclagem de materiais já utilizados, sendo geralmente utilizado na produção de ligas metálicas. A fabricação de fundidos em alumínio secundário é menos intensiva em energia elétrica, correspondendo a apenas 2% do custo de produção. Esse processo é economicamente e ambientalmente mais viável do que a produção de alumínio primário, já que há uma significativa economia de energia e recursos naturais (CASOTTI; BEL; CASTRO, 2011).

A indústria do alumínio secundário é composta por um número significativo de empresas em comparação com o número relativamente baixo de produtores primários. Isso se

deve, em parte, aos requisitos específicos de reciclagem em diferentes locais e ao fato de que um refinador secundário pode ser operado de forma econômica com volumes relativamente baixos (LUMLEY, 2010). Um exemplo disso é este próprio projeto, no qual a reciclagem das latas de alumínio, com os materiais e ferramentas adequados, pode ser realizada em casa, em uma garagem.

A composição química das fontes de sucata de alumínio é um fator determinante na escolha do setor da indústria onde ela será utilizada. As ligas de fundição de alumínio contendo silício podem ser mais flexíveis na aceitação de uma variedade de sucata, uma vez que seus limites de impurezas são maiores do que as ligas forjadas. No entanto, as ligas fundidas geralmente têm menor valor agregado do que as ligas forjadas, o que significa que o uso de algumas sobras precisa ser limitado não apenas com base em sua composição, mas também no seu custo (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Uma grande proporção de sucata reciclada por refusão é originária da produção inicial de tarugos e placas. Toda a sucata coletada pelos comerciantes de metais é classificada, processada e categorizada em diferentes tipos para ser vendida a refinarias ou refusões, tanto localmente quanto para destinos de exportação. As sucatas são negociadas seguindo especificações internacionais, existem cerca de 40 tipos de sucata de alumínio especificados pelo Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI, 2007) (LUMLEY, 2010).

2.1.5 Ligas de Alumínio Utilizadas na Fundição

Na parte prática deste estudo, foram utilizadas latas de alumínio, as quais são amplamente empregadas na indústria de bebidas. Essas latas são constituídas por uma liga de alumínio 3004 no corpo, e 5182 nas extremidades, que é a combinação de ligas de maior volume da indústria (KINSEY *et al*, 2011), sua composição é indicada no Quadro 2.

Quadro 2 – Ligas de Alumínio utilizadas na fundição.

Liga	3004	5182
Código UNS	A93004	A95182
Código ISO R209	AlMn1Mg1	-
Si	0.3%	0.2%
Fe	0.7%	0.35%
Cu	0.25%	0.15%
Mn	1.0-1.5%	0.2-0.5%
Mg	0.8-1.3%	4.0-4.5%
Cr	-	0.1%
Zn	0.25%	0.25%
Ti	-	0.1%
Outros Elementos	0.15%	0.15%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor com base no livro ASM Specialty Handbook Aluminum and Aluminum Alloys-ASM (1993).

2.3 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição de metal é único entre os processos de fabricação de metal por uma variedade de motivos. Dentre eles a variedade de processos de moldagem e fundição disponíveis que são capazes de produzir componentes complexos em qualquer metal, variando em peso de poucas gramas a peças únicas pesando várias centenas de toneladas. Existem processos de fundição em uso que são economicamente viáveis para produzir uma única peça de protótipo, enquanto outros obtêm sua viabilidade na criação de milhões da mesma peça. Praticamente qualquer metal que pode ser fundido pode e está sendo fabricado por processos de fundição hoje (STEFANESCU et al, 1998).

Na fundição o metal líquido é vazado em um molde cuja cavidade corresponde ao negativo da peça desejada. Para a construção de um molde de areia é necessário a fabricação de um modelo. O modelo é uma adaptação ao desenho da peça. Caso a peça possua parte oca é necessário a fabricação do macho, que assim como o molde é feito de areia. Após o vazamento do metal líquido no molde a peça é retirada do molde com forma próxima à final, sendo necessário passar pelas etapas de acabamento como a rebarbação, usinagem e tratamento térmico (opcional). Ou seja, a fundição consiste na preparação, fusão e refino de insumos metálicos, vazamento em moldes (por gravidade, pressão, centrifugação ou vácuo) e a limpeza e acabamento das peças brutas assim obtidas (CASOTTI; BEL; CASTRO, 2011).

As vantagens funcionais que os fundidos metálicos oferecem e que são exigidas pelo projetista devem ser equilibradas com os benefícios econômicos que o cliente exige. O crescimento da fundição de metais e sua estabilidade são em grande parte resultado da capacidade da indústria de fundição de manter esse equilíbrio. As vantagens de projeto e produção descritas acima trazem consigo uma variedade de economias de custos que outros processos de usinagem não podem oferecer. Essas economias decorrem dos seguintes pontos (STEFANESCU et al, 1998):

- A capacidade de combinar várias peças individuais em uma única fundição integral, reduzindo os custos gerais de fabricação;
- A liberdade de design da fundição minimiza os custos de usinagem e o excesso de metal;
- Moldes usados na fundição são mais baratos em comparação com outros tipos de ferramental;
- As peças fundidas requerem um tempo de espera comparativamente curto para a produção.

Fatores de qualidade são importantes na seleção do processo de fundição. O grau de solidez interna, as propriedades mecânicas e características de desempenho são um reflexo da composição da liga, qualidade do metal fundido, condições de solidificação, características microestruturais e solidez. O processo de fundição dita as condições de solidificação e, na maior parte dos casos, as variações nas características microestruturais e solidez. O processo de fundição selecionado deve ser competente para fornecer o nível de qualidade exigido (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Entre os fundidos não ferrosos estão os fundidos em alumínio, zinco, cobre e magnésio. E entre esses, o alumínio revela a maior importância comercial, tanto nacional como internacionalmente, globalmente as fundições de alumínio representam mais de 82% da participação total de mercado (TECHNAVIO, 2023).

2.3.1 Origens do processo de fundição

O ouro foi o primeiro metal a ser descoberto e utilizado pelas primeiras civilizações; características como maleabilidade e moldabilidade à temperatura ambiente facilitavam o seu uso. No início, parecia não haver necessidade de outras formas de moldar o ouro (STEFANESCU et al, 1998).

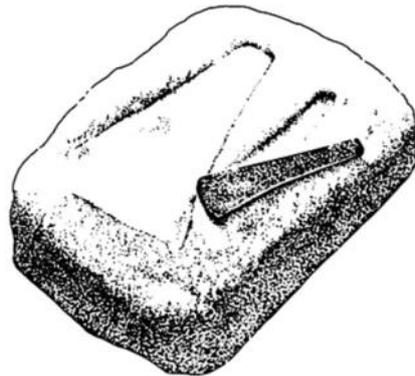
A utilização do processo de fundição que data de 4000 a.C. Foi a descoberta do cobre que deu origem à necessidade do processo de fundição. Embora, o cobre pudesse ser forjado para moldar, o processo era mais difícil (devido ao encruamento) e limitado a formas relativamente simples (GROOVER, 2010).

Os historiadores acreditam que centenas de anos se passaram antes que o processo de fundição de cobre fosse realizado pela primeira vez, provavelmente por acidente durante a redução do minério de cobre em preparação para martelar o metal em alguma forma útil. É provável que a descoberta tenha ocorrido na Mesopotâmia, e a “tecnologia” se espalhou rapidamente pelo resto do mundo antigo (GROOVER, 2010).

Os fornos eram rudimentares. Assim mesmo, com esses fornos já era possível fundir cobre, por exemplo, em um cadinho. As evidências da fundição demonstram uma capacidade crescente de gerenciar e direcionar o fogo para atingir as temperaturas de fusão necessárias. O combustível empregado era o carvão vegetal, que tendia a fornecer uma atmosfera redutora onde o fogo era confinado, na tentativa de diminuir a perda de calor (STEFANESCU et al, 1998).

Os moldes eram de pedra (Figura 3). A tradição da escultura em pedra era mais longa do que qualquer uma das pirotecnologias, e o nível de habilidade permitia um trabalho minuciosamente detalhado. A pedra esculpida era geralmente de textura lisa, como esteatito ou andesito, e os moldes produzidos são frequentemente objetos muito finos, que podem ser vistos em museus e exposições arqueológicas (STEFANESCU et al, 1998).

Figura 3 - Molde da Idade do Bronze com um machado.



Fonte: STEFANESCU et al, 1998.

A religião foi uma influência importante durante a Idade Média para perpetuar as técnicas de fundição. A construção de catedrais e igrejas exigia a fundição de sinos que eram utilizados nessas estruturas. O tempo e o esforço necessários para fundir os grandes sinos de bronze da época ajudaram a mover o processo de fundição do reino da arte para o regime da tecnologia. Avanços nas técnicas de fusão e fabricação de moldes foram feitos. Além disso, quem fabricava o sino aprendeu as relações entre o tom do sino, que era a medida importante da qualidade do produto, e seu tamanho, forma, espessura e composição do metal (STEFANESCU et al, 1998).

Outro produto importante associado ao desenvolvimento da fundição foi o canhão. Cronologicamente, seguia o sino e, portanto, muitas das técnicas de fundição desenvolvidas para a fundição de sinos foram aplicadas à fabricação de canhões. O primeiro canhão fundido foi feito em Ghent, Bélgica, no ano de 1313 - por um monge religioso. Era feito de bronze e o furo era formado por meio de um núcleo durante a fundição. Por causa da superfície áspera criada pelo processo de fundição, esses primeiros canhões não eram precisos e tinham que ser disparados a uma distância relativamente próxima para serem eficazes (GROOVER, 2010).

2.4 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

Peças fundidas em areia, um termo usado de forma ampla para incluir outras peças fundidas feitas em moldes refratários, variam em peso de alguns gramas a várias centenas de toneladas, cobrindo assim quase toda a faixa de tamanho para peças fundidas; praticamente todos os tipos de liga de fundição são produzidos. A fabricação de uma peça fundida em areia pode ser considerada em três etapas principais, a saber, a produção do molde, a fusão e a fundição, e as operações de acabamento (BEELEY, 2001).

A primeira etapa importante na fundição é a produção do molde, com sua impressão do molde e sua previsão planejada para o fluxo de metal e alimentação. Para isso, é necessário um modelo, juntamente com equipamentos de fundição que vão desde máquinas de moldagem e fabricação de núcleos até caixas de moldagem, guindastes e ferramentas manuais (SAHOO; SAHU, 2014).

Uma decisão que pode afetar consideravelmente os custos de produção é a escolha do tamanho da unidade de molde e a disposição dos modelos em relação às dimensões do molde. A estratégia mais vantajosa consiste em utilizar o maior tamanho de molde possível, desde que seja conveniente para a planta, e em obter um uso intensivo do espaço do molde por meio de alta densidade de compactação das peças fundidas. Essa abordagem reduz o número de operações de moldagem e minimiza o consumo de areia. Esses objetivos podem ser alcançados com o uso de moldes de múltiplas peças, nos quais dois ou mais modelos são agrupados em torno de um canal comum ou sistema de alimentação, ou em que partes do molde são empilhadas para produzir camadas sobrepostas de peças fundidas (CAMPBELL, 2011).

Na fundição em areia, o molde consiste em duas metades. Uma metade superior do molde e uma metade inferior. Essas duas partes do molde estão contidas em uma caixa (exemplificada na Figura 4) que também é dividida em duas metades, uma para a parte superior e outra para a inferior. As duas metades do molde se separam na linha de partição (BEELEY, 2001).

Figura 4 – Caixa metálica para molde de areia verde.

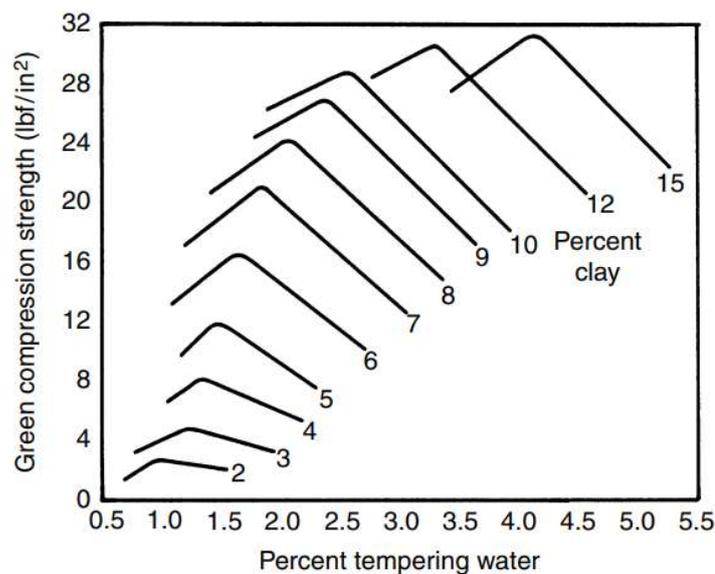


Fonte: Fabricação do autor, 2023.

As caixas de moldagem e os moldes são escolhidos com o objetivo de minimizar o consumo de areia e o tempo de produção por unidade de peso da fundição. Nesse sentido, é vantajoso utilizar o maior número possível de modelos por molde, o que reduz o número de operações de moldagem e maximiza a densidade de enchimento da caixa. A construção das caixas pode ser feita em ferro fundido, aço ou ligas leves, por meio de fundição ou fabricação. Independentemente do material utilizado, é necessária uma construção robusta para suportar o manuseio bruto ao qual elas são frequentemente expostas. Para fundições de menor porte, é comum utilizar unidades fabricadas a partir de seções de aço laminado, pois são fortes e leves (STEFANESCU et al, 1998).

As areias de moldagem para práticas de areia verde e areia seca tradicional são comumente ligadas com argila. Uma vez que o desenvolvimento da força de ligação depende da hidratação da argila, a resistência inicial de uma mistura de moldagem aumenta com o teor de água até atingir um valor ótimo determinado pela proporção de argila (entre 1,5 e 2% de umidade). Acima desse valor adicionar água resulta na diminuição da resistência inicial novamente. Outro ponto a ser considerado é que quando a areia é fina demais traz problemas de permeabilidade dos gases (principalmente o vapor de água do proveniente do molde úmido), já quando grossa demais gera peças com superfície áspera (BEELEY, 2001). A Figura 5 indica a influência da quantidade de argila e umidade na resistência à compressão da areia verde, fator importante para determinar a resistência do molde antes de sua ruptura.

Figura 5 – Força de compressão da areia verde no eixo vertical em libras por polegada quadrada, porcentagem de umidade no eixo horizontal e porcentagem de argila indicado na imagem.



Fonte: GRIM; CUTHBERT, 1945.

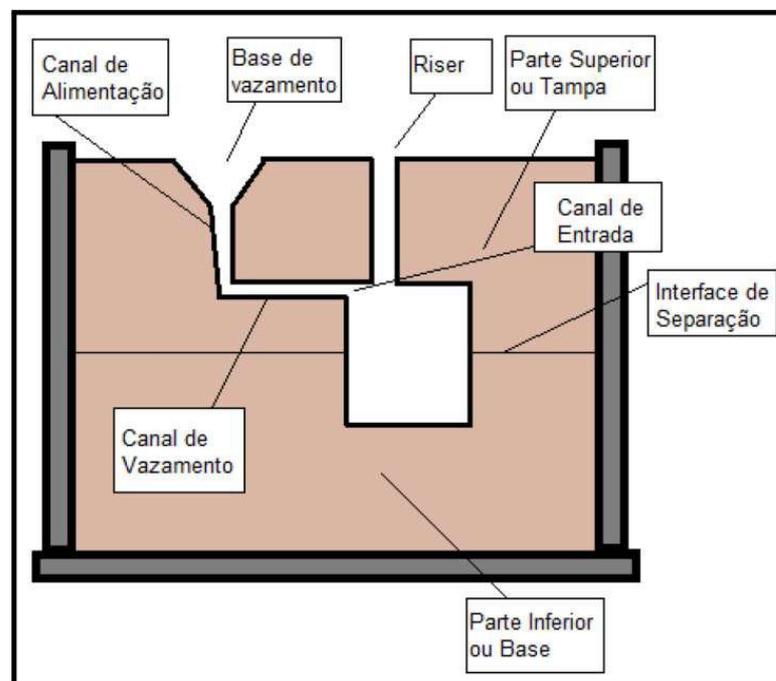
O padrão utilizado na fundição em areia, assim como em outros processos de moldagem descartáveis, é feito de materiais como madeira, metal, plástico ou outros materiais e tem o formato da peça a ser fundida. A cavidade do molde é formada pela compactação de areia em torno do padrão, metade em cada lado, para que, ao remover o padrão, o vazio resultante possua a forma desejada da peça fundida. O padrão é geralmente superdimensionado para permitir o encolhimento do metal durante o resfriamento e solidificação. A areia usada no molde é úmida e contém um aglutinante para manter sua forma (BEELEY, 2001).

A cavidade no molde fornece as superfícies externas da peça fundida. Além disso, uma peça fundida pode ter superfícies internas. Essas superfícies são determinadas por meio de um

núcleo, uma forma colocada dentro da cavidade do molde para definir a geometria interior da peça. Na fundição em areia, os núcleos são geralmente feitos de areia, embora outros materiais possam ser usados, como metais, gesso e cerâmica (GROOVER, 2010).

No processo de fundição, o metal líquido é despejado em um canal ou rede de canais que leva à cavidade principal do molde. Para reduzir respingos e turbulências, é comum o uso de um copo de vazamento na parte superior do canal descendente. Alguns copos de vazamento possuem formato de tigela, com um canal aberto que direciona o metal para o canal descendente (GROOVER, 2010). Uma ilustração esquemática é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Sistema de Alimentação – Molde de Areia Verde.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor com base em Groover, 2010.

Para garantir uma fundição de qualidade, é importante considerar não apenas o sistema de canais e o riser, mas também a evacuação adequada de ar e gases durante o processo. O riser funciona como um reservatório de metal líquido extra dentro do molde para evitar defeitos da contração do metal líquido durante o resfriamento. Quando o metal líquido é despejado no molde, o ar que ocupava anteriormente a cavidade, bem como os gases quentes formados pelas reações do metal fundido, devem ser removidos para permitir que o metal preencha completamente o espaço vazio (STEFANESCU, 2009).

Na fundição em areia, por exemplo, a porosidade natural do molde de areia permite que o ar e os gases escapem pelas paredes da cavidade. Em moldes de metal permanentes, por outro lado, pequenos orifícios de ventilação são perfurados no molde ou usinados na linha de

separação para permitir a remoção de ar e gases. Além disso, é importante projetar o riser de forma adequada para compensar a contração durante a solidificação do metal, para que a fundição possa ter a qualidade desejada (BEELEY, 2001).

2.4.1 A Fusão do Metal

O forno é utilizado para aquecer o metal a uma temperatura de fundido suficiente para a fundição. A energia térmica necessária é a soma do calor para elevar a temperatura ao ponto de fusão, o calor de fusão para convertê-lo de sólido para líquido e o calor para elevar a temperatura do metal fundido à temperatura desejada para vaziar (GROOVER, 2010). Isso pode ser expresso por:

$$H = \rho V \{ C_s (T_m - T_0) + H_f + C_l (T_p - T_m) \} \quad (2)$$

Onde:

H: calor total necessário para elevar a temperatura do metal até a temperatura de vazamento, J;

ρ : densidade; g/cm³;

C_s: calor específico por peso do metal sólido, J/g-°C;

T_m: temperatura de fusão do metal, °C; T₀ = temperatura inicial - geralmente ambiente, °C;

H_f: calor de fusão, J/g; C_l é o calor específico por peso do metal líquido, J/g-°C;

T_p: temperatura de vazamento, °C;

V: volume de metal sendo aquecido.

Durante o processo de fundição, é importante lembrar que o metal líquido é um composto altamente reativo que pode reagir com os gases presentes acima dele. Além disso, se houver presença de escória ou fluxo flutuando na superfície do metal, também haverá reação. Outro aspecto a considerar é a reação do metal com os recipientes em que é contido, como cadinhos e revestimentos de fornos (STEFANESCU, 2009).

As reações no cadinho ou forno durante a fusão do metal são vistas como sérias, uma vez que há tempo suficiente para mudanças extensas. A captação de hidrogênio de refratários úmidos é comum. Problemas semelhantes são frequentemente encontrados com metais que são fundidos em fornos aquecidos pela queima de combustíveis de hidrocarbonetos, como gás ou petróleo (BEELEY, 2001).

A queima de combustíveis compostos por hidrocarbonetos gera gás carbônico e água, de modo que os gases residuais quentes de tais fornos são efetivamente molhados. Essa umidade

pode reagir com o metal líquido, gerando óxidos e hidrogênio, o que pode causar problemas na qualidade do metal fundido (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Assim, um pouco de metal é sacrificado para formar seu óxido, e o hidrogênio é liberado para se equilibrar entre as fases gasosa e metálica (BEELEY, 2001).

Embora muitos metais dissolvam mais hidrogênio do que o alumínio, é o alumínio que mais sofre com a porosidade do hidrogênio devido à enorme diferença de solubilidade entre o líquido e o sólido. O sólido pode conter apenas cerca de 1/20 do gás no líquido correspondente a um coeficiente de partição de 0,05), de modo que há uma grande força motriz para a rejeição de quase todo o hidrogênio na solidificação, criando uma porosidade significativa (CAMPBELL, 2011).

Entretanto, os gases em solução em líquidos viajam mais rapidamente quando o líquido está em movimento, pois, é claro, eles são simplesmente transportados pelo líquido. Em muitas situações o líquido é estacionário, ou quase isso. Este é o caso da camada limite na superfície do alumínio líquido no cadinho. A presença de um filme sólido de óxido na superfície manterá a superfície estacionária (CAMPBELL, 2011).

Quando o metal quente interage com seu ambiente, muitas das reações resultam em produtos que se dissolvem rapidamente no metal e se difundem para o seu interior.

Os filmes de óxido geralmente começam como camadas amorfas simples (isto é, não cristalinas), como Al_2O_3 em Al ou MgO em ligas de Mg e Al-Mg (SAHOO; SAHU, 2014). Sua estrutura amorfa provavelmente deriva necessariamente da fundição amorfa no qual eles se nucleiam e crescem. No entanto, eles se convertem rapidamente em produtos cristalinos à medida que engrossam e, posteriormente, muitas vezes se desenvolvem em uma complexidade de diferentes fases e estruturas.

A natureza do filme em um metal líquido em uma relação de equilíbrio contínuo com seu ambiente precisa ser levada em consideração. Em tal situação, o fundido estará sempre coberto com o filme. Por exemplo, se o filme for retirado, ele se reformará imediatamente. Além disso, as duas reações de formação de filme mais comuns, a formação de filmes de óxido a partir da decomposição da umidade e a formação de filmes grafíticos a partir da decomposição de hidrocarbonetos, resultam no aumento de hidrogênio no metal (BEELEY, 2001).

As ligas leves, alumínio e magnésio possuem ligas de fundição caracterizadas pela estabilidade dos produtos de suas reações superficiais. Embora um produto da reação seja o hidrogênio, que se difunde para o interior, o produto restante perceptível da reação é um filme de óxido na superfície. Os óxidos das ligas leves são tão estáveis que, uma vez formados, em circunstâncias normais, não podem ser decompostos de volta ao metal e ao oxigênio. Os óxidos

tornam-se características permanentes positivas ou negativas, dependendo de onde eles chegam ao repouso final sobre ou no produto fundido (CAMPBELL, 2011).

Os óxidos podem trazer características benéficas para a peça quando encontrados em sua superfície. A superfície exposta do alumínio reage com o oxigênio para formar um óxido de alumínio inerte, com apenas algumas dezenas de milionésimos de polegada de espessura, o qual bloqueia a oxidação adicional (STEFANESCU et al, 1998). Por outro lado, durante o processo de fundição de alumínio, é possível que ocorram turbulências no fluxo metálico, o que pode levar à inclusão de óxidos ou outros contaminantes no interior da peça, tema este abordado no capítulo sobre vazamento do metal líquido (BEELEY, 2001).

2.4.2 O Vazamento do Metal Líquido

A introdução do metal fundido no molde, incluindo seu fluxo através do sistema de canais e na cavidade, é uma etapa crítica no processo de fundição. Para que essa etapa seja bem-sucedida, o metal deve fluir em todas as regiões do molde antes de solidificar. Os fatores que afetam a operação de vazamento incluem temperatura de vazamento, taxa de vazamento e turbulência (CAMPBELL, 2011).

A temperatura de vazamento é a temperatura do metal fundido à medida que é introduzido no molde. O que é importante aqui é a diferença entre a temperatura no vazamento e a temperatura na qual a solidificação começa (o ponto de fusão para um metal puro ou a temperatura líquidos para uma liga). Essa diferença de temperatura às vezes é chamada de superaquecimento. Este termo também é usado para a quantidade de calor que deve ser removido do metal fundido entre o vazamento e quando a solidificação começa (BEELEY, 2001).

A taxa de vazamento refere-se à taxa volumétrica na qual o metal fundido é derramado no molde. Se a taxa for muito lenta, o metal irá esfriar e congelar antes de preencher a cavidade. Se a taxa de vazamento for excessiva, a turbulência pode se tornar um problema sério. A turbulência no fluxo de fluido é caracterizada por variações erráticas na magnitude e direção da velocidade ao longo do fluido. O fluxo é agitado e irregular, em vez de suave e linear, como no fluxo laminar. O fluxo turbulento deve ser evitado durante o vazamento por vários motivos. Ele tende a acelerar a formação de óxidos metálicos, como mencionado anteriormente, que podem ficar presos durante a solidificação, degradando assim a qualidade da fundição. A turbulência também agrava a erosão do molde, o desgaste gradual das superfícies do molde devido ao impacto do metal fundido que flui (GROOVER, 2010).

As densidades da maioria dos metais fundidos são muito maiores do que a água e outros fluidos com os quais normalmente lidamos. Esses metais fundidos também são muito mais reativos quimicamente do que à temperatura ambiente. Com isso o desgaste causado pelo fluxo desses metais no molde é significativo, principalmente em condições turbulentas. A erosão é especialmente grave quando ocorre na cavidade principal porque a geometria da peça fundida é afetada (GROOVER, 2010).

2.4.3 Solidificação e Resfriamento

Após vaziar no molde, o metal fundido esfria e solidifica. A solidificação envolve a transformação do metal fundido de volta ao estado sólido. O processo de solidificação difere dependendo se o metal é um elemento puro ou uma liga. Um metal puro solidifica a uma temperatura constante igual ao seu ponto de solidificação, que é o mesmo que seu ponto de fusão (GROOVER, 2010).

Devido à ação de resfriamento da parede do molde, uma película fina de metal sólido é inicialmente formada na interface imediatamente após o vazamento. A espessura da película aumenta para formar uma casca ao redor do metal fundido à medida que a solidificação progride em direção ao centro da cavidade. A taxa na qual a solidificação ocorre depende da transferência de calor para o molde, bem como das propriedades térmicas do metal (BEELEY, 2001).

Um aspecto interessante a ser analisado durante o processo de solidificação é a formação e crescimento dos grãos metálicos. O metal que forma a película inicial é resfriado rapidamente devido à extração de calor através da parede do molde. Esse resfriamento resulta em grãos finos próximos à superfície, orientados aleatoriamente. À medida que o processo de resfriamento continua, mais formação e crescimento de grãos ocorrem em direção oposta à transferência de calor (FILHO; DAVIES, 1978).

Em contrapartida, a maioria das ligas solidifica em uma faixa de temperatura, em vez de uma temperatura única. Essa faixa exata varia de acordo com o sistema de liga e a composição específica (GROOVER, 2010).

A contração ocorre em três etapas: contração do líquido durante o resfriamento antes da solidificação, contração durante a mudança de fase de líquido para sólido, chamada de contração de solidificação e contração térmica do fundido solidificado durante o resfriamento à temperatura ambiente (GROOVER, 2010).

A compensação da contração de solidificação é obtida de várias maneiras, dependendo da operação de fundição. Na fundição em areia, o metal líquido é fornecido à cavidade por meio de risers (BEELEY, 2001).

A fim de minimizar os efeitos nocivos do encolhimento, é desejável que as regiões do fundido mais distantes do suprimento de metal líquido solidifiquem primeiro e que a solidificação progrida dessas regiões remotas em direção ao riser. Dessa forma, o metal fundido estará continuamente disponível nos risers para evitar vazios de contração durante a solidificação (BEELEY, 2001).

2.4.4 Defeitos em peças fundidas

Os defeitos em peças fundidas podem ser minimizados por uma compreensão clara de suas causas fundamentais. Dentre os possíveis defeitos:

2.4.4.1 Defeitos decorrentes do vazamento:

Quando o metal líquido entra no molde, o primeiro requisito é que deve preencher satisfatoriamente a cavidade do molde e desenvolver uma película lisa através do contato com a superfície do molde. A falha grosseira em atender a essas condições produz o defeito mais sério nesse grupo, a fundição incorreta ou de curto prazo, na qual o metal solidifica prematuramente e algum membro ou seção da fundição é omitido (BEELEY, 2001).

Os defeitos são geralmente associados à temperatura do metal, sendo o metal frio a causa usual em peças fundidas para as quais o método de produção é normalmente satisfatório. Outra causa pode ser o resfriamento excessivo da face do molde; isso pode surgir de resfriamento intenso ou de um teor de umidade muito alto na areia verde (BEELEY, 2001).

2.4.4.2 Inclusões e defeitos de areia.

O conhecimento das causas fundamentais dos defeitos em peças fundidas pode ajudar a minimizá-los. Existem dois grupos principais de inclusões: as internas e as exógenas. As inclusões internas são partículas relativamente pequenas que permanecem suspensas na liga ou que são precipitadas durante o resfriamento, e são consideradas inerentes à liga e à prática de fusão. Por outro lado, as inclusões exógenas resultam do arrastamento de não-metálicos durante o vazamento, e incluem escória, resíduos de fluxo, fragmentos refratários e material de

moldagem desalocado. As inclusões exógenas são consideradas como defeitos específicos e tendem a se concentrar em certas regiões da peça fundida (STEFANESCU, 2008).

2.4.4.3 Defeitos de gás

Os gases podem estar presentes em fundidos em solução, como compostos químicos, ou como porosidades: estes últimos são os verdadeiros defeitos de gás (BEELEY, 2001).

Uma das causas de defeitos em peças fundidas é a presença de ar aprisionado em seu interior. Isso pode acontecer quando há uma turbulência excessiva ou aspiração durante o vazamento, combinada com um metal pouco superaquecido. Nesse caso, as bolhas de ar podem ficar presas na peça antes de sua solidificação parcial. Outra causa é a falha do molde em extrair o ar deslocado pelo metal líquido, especialmente em bolsões confinados de molde, quando o preenchimento acontece mais rapidamente do que o sistema de ventilação e a permeabilidade do molde podem sustentar. Quando o ar fica preso na peça fundida, ele atua como um amortecedor, retardando o fluxo do metal líquido e impedindo seu preenchimento total. Isso pode produzir um defeito de "câmara" em projeções voltadas para cima na peça fundida (BEELEY, 2001).

Outro grupo de defeitos é causado pela precipitação de gases do metal durante o resfriamento. Os gases podem ter sido dissolvidos durante a fusão ou como resultado da interação entre o metal líquido e a superfície do molde, ou podem resultar de reações envolvendo elementos já em solução (MONROE, 2005).

O gás mais frequentemente precipitado como um único elemento é o hidrogênio, que mostra solubilidade apreciável na maioria das ligas fundidas (BEELEY, 2001).

Uma das potenciais fontes de contaminação de gases no fundido vem da atmosfera do forno de fundição. As atmosferas do forno contêm vapor de água e produtos de combustão, bem como nitrogênio e oxigênio: têm sido frequentemente estabelecidas correlações entre a umidade atmosférica e a absorção de hidrogênio. Uma das precauções para esse tipo de defeito em fundidos é por exemplo o pré-aquecimento de materiais de carga para evaporar a umidade. (BEELEY, 2001).

2.4.4.5 Defeitos de encolhimento devido à contração de volume

Durante a solidificação os defeitos de contração surgem da falha em compensar a contração do líquido e da solidificação (FILHO; DAVIES, 1978); portanto, sua ocorrência geralmente é um sintoma de técnica inadequada do sistema de alimentação exemplificado na Figura 6.

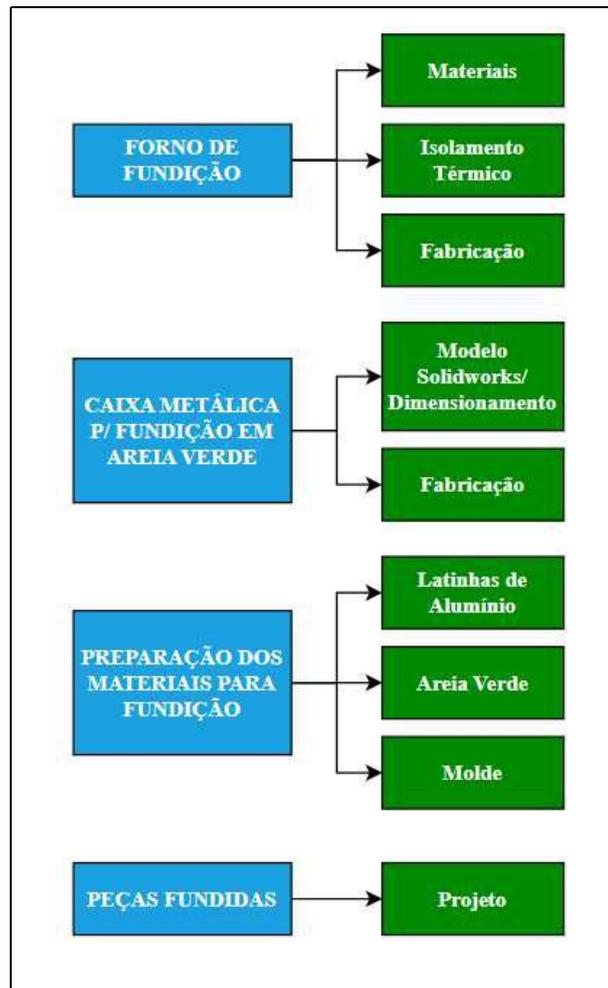
Após a solidificação, ao contrário das retrações líquidas e de solidificação, que podem ser compensadas por um influxo de líquido, a contração sólida afeta todas as dimensões lineares da peça fundida, daí a necessidade de tolerâncias no padrão do molde de acordo com o comportamento de contração esperado da liga (FILHO; DAVIES, 1978)..

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é baseada em método indutivo, utilizando o levantamento de dados e hipóteses através de fontes bibliográficas disponíveis. A pesquisa tem cunho exploratório, em que as abordagens são relacionadas à construção de um forno para fundição a cadinho de pequeno porte, à melhoria do processo de fundição de alumínio e a investigação de uma alternativa para a reciclagem de alumínio com baixo custo. As técnicas para a análise do processo de fusão do alumínio levam em consideração os arranjos dos equipamentos utilizados.

O fluxograma desenvolvido para o capítulo de Materiais e Métodos, visto na Figura 7, apresenta uma representação visual dos passos e procedimentos adotados. É destacada a sequência lógica e as etapas-chave envolvidas na coleta de dados e execução dos experimentos. O fluxograma é uma ferramenta útil para compreender de forma concisa o processo de pesquisa adotado nesta seção do trabalho.

Figura 7 – Fluxograma das etapas realizadas - Materiais e Métodos.



Fonte: Autoria própria.

O capítulo apresenta o forno de fundição, subdividido em materiais necessários, cálculos para o isolamento térmico e o seu processo de fabricação. O capítulo sobre a caixa metálica, que comporta o molde em areia verde, incluindo dimensionamento, material e processo de fabricação. A preparação dos materiais necessários para o processo de fundição também é abordado, subdividido em: metal utilizado (latinhas de alumínio recicladas), preparação da areia para fundição e macho/molde. O projeto adotado em cada uma das peças fundidas também é indicado.

3.1 FORNO DE FUNDIÇÃO

3.1.1 Materiais que compõe o forno

O Quadro 3 indica os materiais utilizados para a fabricação do forno de fundição.

Quadro 3 – Materiais utilizados – Forno de Fundição.

Descrição	Propósito	Material	Preço
Lata de lixo	Estrutura externa do forno	Aço inox AISI 316	0 reais
Lata de tinta de 3,6l	Dimensionamento do interior do forno	Latão	0 reais
Cadinho refratário para fundição de metais 300ml	Recipiente para fusão do alumínio	Carbeto de silício e grafite	100,80 reais
Cadinho refratário para fundição de metais 1000ml	Recipiente para fusão do alumínio	Carbeto de silício e grafite	140,00
Queimador Atmosférico Ember	Queimador do forno de fundição e forja	Aço	140,00 reais
Gás GLP	Combustível	Botijão de gás de cozinha de 13kg.	100,00 reais
Termopar Tipo K Cerâmico 1300° C 215 mm P/ Forno Forja Cod.214	Medição da temperatura interna do forno durante a operação.	Cerâmica e metal (aço ou similar).	100,00 reais
Termômetro Digital Minipa Mt-455A	Será ligado ao termopar de cerâmica e também vem com um outro sensor que permite medição simultânea da temperatura externa do forno.	N/A (não aplicável).	208,00 reais
Termômetro Laser Industrial Infravermelho -32 A 360 Celsius - Corneta	Termometro mais versátil para medição da temperatura externa em diversos pontos.	N/A.	120,00 reais
Total:			868,80 reais

Fonte: Autoria própria, 2023.

3.1.2 O Isolamento Térmico do forno de fundição

O Quadro 4 indica as considerações tomadas para o cálculo da Equação 1.

Quadro 4 – Parâmetros e Características do Forno de Fundição.

Considerações	Descrição
Forma do forno	O forno é considerado um cilindro por motivos de simplificação e por se tratar de uma estimativa.
Temperatura interna de trabalho do forno	750°C, acima da temperatura de fusão do alumínio.
Temperatura casca externa do forno	70°C, temperatura suficiente para um toque de mais de 4 segundos sem que haja queimaduras (ISO 13732-1, 2006).
Poder calorífico do gás GLP	Poder calorífico do gás GLP de 11750 kcal/kg (Supergasbras, 2021).
Densidade média do gás GLP	Densidade média do gás GLP de um botijão P13 de 2,5 kg/m ³ (Ultragaz, 2022).
Pressão nominal botijão de gás GLP	Pressão nominal de um botijão P13 de 2,75 KPa (Muller, 2015).
Diâmetro externo do forno de fundição	Diâmetro externo do cilindro (casca externa em aço inox) de 29 cm e espessura de 1mm.
Condutividade Térmica da casca interna	Material: lata de tinta de aço não ligado, entre R ₁ e R ₂ da Figura 2. Condutividade térmica de 60,5W/mK (BERGMAN et al., 2014).
Condutividade Térmica do isolamento térmico	O material adotado para o isolamento térmico, material entre R ₂ e R ₃ da Figura 2, é o gesso, a condutividade térmica deste material é de 0,17 W/mK (Incropera, 2014).
aço	Material: aço inox AISI 316, entre R ₃ e R ₄ da Figura 2. A condutividade térmica deste material fica entre 24,2 W/mK (BERGMAN et al., 2014).

Fonte: Autoria própria, 2023.

Os dados do Quadro 4 foram utilizados para a resolução da Equação 1 (perda de calor para um cilindro com três materiais diferentes) com o objetivo de encontrar a espessura mínima necessária para a camada de gesso (material isolante).

Para T₄ da Equação 1, 70°C é o valor que a parede do forno não deve passar durante seu funcionamento, desta forma, segundo a ISO 13732-1(2006) um toque de menos de 4 segundos não causaria queimadura.

3.1.3 Fabricação do forno de fundição

Nesta seção é abordado o processo de fabricação do forno de fundição. O Quadro 5 mostra as ferramentas utilizadas.

Quadro 5 – Ferramentas utilizadas na fabricação do forno.

Ferramenta	Modelo	Funções
Micro retífica	BLACK+DECKER-RT18KA	Utilizada para corete do gesso da tampa.
Furadeira de Impacto	Black+Decker Profissional Tipo 2 550W Brocas utilizadas: <ul style="list-style-type: none"> • Brocas MTX HSS de 3, 5 e 8mm. • Brocas caseiras de vergalhão fabricadas com esmerilhadeira e disco de desbaste. 	Furo do queimador; Furo do termopar de cerâmica; Furação para rebites do suporte do termopar de cerâmica; Furos na tampa superior para fluxo de ar quente.
Esmerilhadeira	Black+Decker G720-BR - 820W Discos utilizados: <ul style="list-style-type: none"> • FG035 115mm. • Disco de desbaste Black+Decker A24R tipo 27. 	Corte da lata de lixo em inox; Fabricação da broca de vergalhão utilizada na furação onde o termopar de cerâmica ficaria alojado no forno.
Alicate Rebitador 10,5 Pol	Rebite utilizado: <ul style="list-style-type: none"> • 2 x rebite de repuxo 3,2 x 10,0 mm. 	Prender o suporte do termopar de cerâmica.

Fonte: Autoria própria, 2023.

3.1.3.1 Corte da estrutura externa do forno (lata de lixo de inox)

A estrutura externa, Figura 8, foi cortada com esmerilhadeira e disco de corte, possui diâmetro de 29 cm ($\pm 0,5$ cm) e altura de 26cm ($\pm 0,5$ cm). Uma seção da lixeira, sem fundo, foi utilizada para a tampa, possuindo diâmetro de 29 cm ($\pm 0,5$ cm) e altura de 4,5cm ($\pm 0,5$ cm).

Figura 8 - Estrutura externa do forno em aço inox.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

3.1.3.2 Construção da estrutura interna e tampa em gesso

O gesso foi misturado com água em uma caixa plástica de 20 litros na proporção indicada na embalagem do próprio gesso, 700ml de água para cada 1 kg de gesso. No total foram utilizados 12 kg para a estrutura e tampa (Figura 9). Posteriormente mais 1 kg de gesso foi utilizado para melhoria da vedação da tampa.

Figura 9 - Estrutura interna em gesso (à esquerda) e tampa (à direita).



Fonte: Foto de autoria própria, 2023

Na Figura 10 pode ser visto a retirada do excesso de gesso da tampa com a micro retífica.

Figura 10 - Corte do excesso de gesso da tampa com micro retífica com broca de 3mm.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

3.1.3.3 Furação para o queimador

A furação do queimador idealmente seria feita com uma broca do tipo serra copo. Por motivos de custo e indisponibilidade foi utilizada uma broca comum HSS de 5mm, a furação pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 - Furação com broca comum HSS de 5mm. Idealmente este furo seria feito com uma broca do tipo serra copo.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023

O queimador é possui um cilindro metálico que é fixado à parede do forno de fundição (Figura 12). Após a remoção da chapa de metal e do gesso localizados abaixo da furação, o cilindro pode ser adequadamente posicionado e fixado em sua posição correta. Essa configuração proporciona a integração adequada do queimador ao forno de fundição.

Figura 12 - Cilindro metálico que faz parte do queimador. Este cilindro metálico com parafuso é responsável por segurar o queimador na posição correta (com possível ajuste linear para cadinhos de tamanhos diferentes).



Fonte: Foto de autoria própria.

O cilindro possui um parafuso responsável por segurar o queimador no lugar durante a sua operação. A Figura 13 mostra o queimador fixo em sua posição de operação, onde a parede de gesso do forno está secando e já está sólida.

Figura 13 - Forno após feita a furação com queimador encaixado.



Fonte: Foto de autoria própria.

3.1.3.4 Instalação do termopar tipo K com revestimento de cerâmica

O termopar tipo K, que possui revestimento em cerâmica, é observado na Figura 16 conectado ao termômetro MT-455a.

Para fazer esta instalação foi necessário furar a parede do forno com uma broca feita em vergalhão, Figuras 14 e 15, devido ao comprimento de 215mm do termopar, maior que as brocas disponíveis.

Figura 14 – Broca feita de vergalhão para furo de 215mm no forno.



Fonte: Foto de autoria própria.

Figura 15 – Broca feita de vergalhão para furo de 215mm no forno.



Fonte: Foto de autoria própria.

Em seguida foi feito o suporte para o termopar. Para o suporte foi utilizada a esmerilhadeira com disco de corte para recortar o formato necessário da mesma chapa de metal da casca externa do forno (Figura 8). O suporte foi dobrado e conectado com rebite, como pode ser observado montado na Figura 16.

O termopar indicado na Figura 16 é responsável por medir a temperatura interna do forno e possui capacidade de medir temperaturas de até 1300°C. Mais detalhes deste tipo de termopar são abordados no capítulo 2.1.7.

Figura 16 – Termopar tipo K instalado.

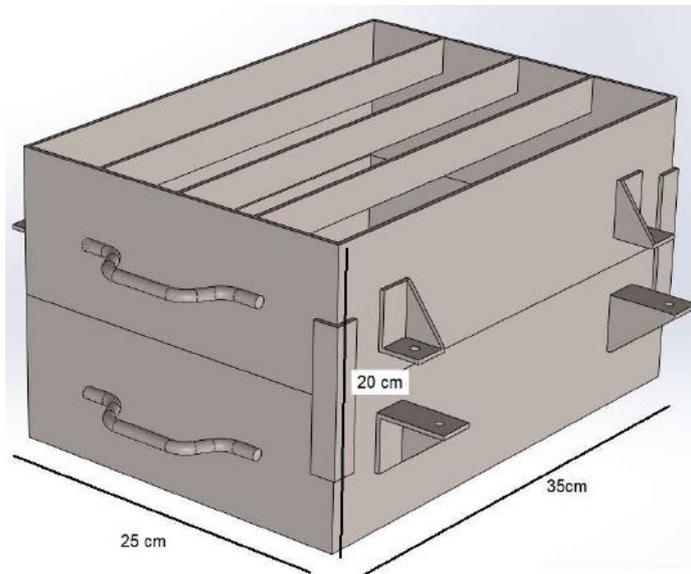


Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

3.2 CAIXA METÁLICA PARA FUNDIÇÃO

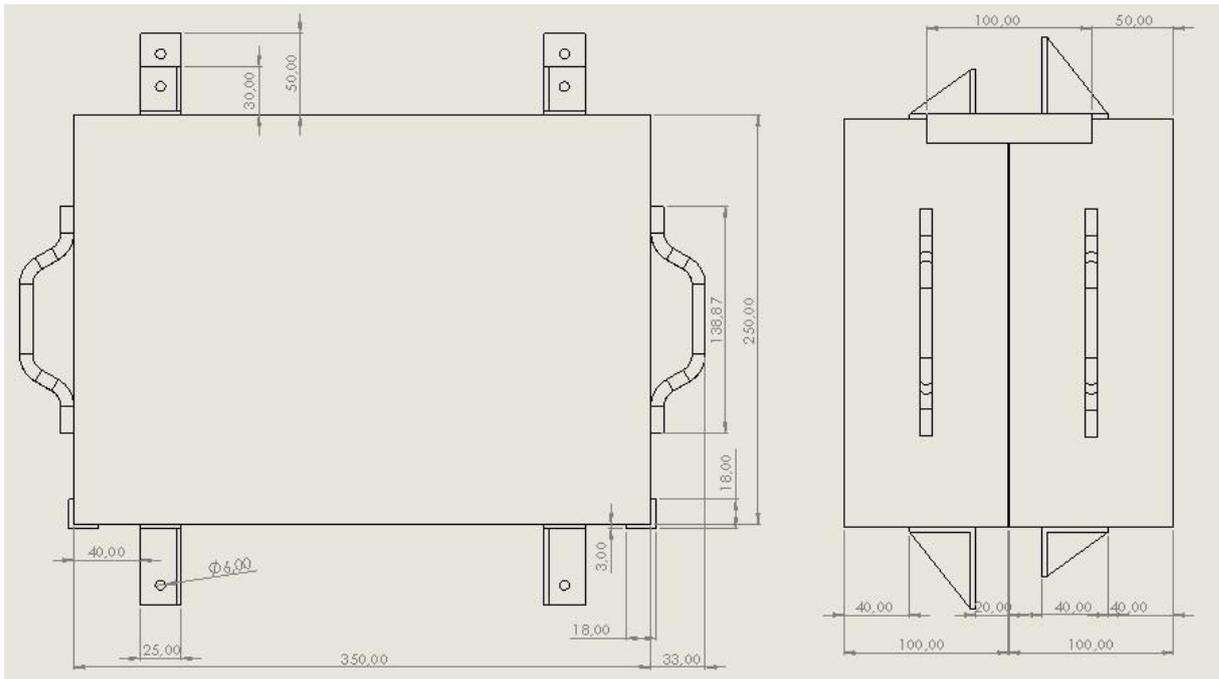
O modelo da caixa metálica é de autoria do próprio autor com design feito no Solidworks, com dimensões observadas nas Figuras 17, 18 e 19. A caixa foi fabricada com chapas de aço 1020 de 3mm de espessura vistas na Figura 52. É uma caixa para comportar a areia e o molde de fundição, é necessário que as orelhas metálicas instaladas, mostradas antes da furação na Figura 52, forneçam alinhamento para a parte superior e inferior que comportarão o molde de fundição. A caixa montada pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Design da caixa metálica para molde de fundição.



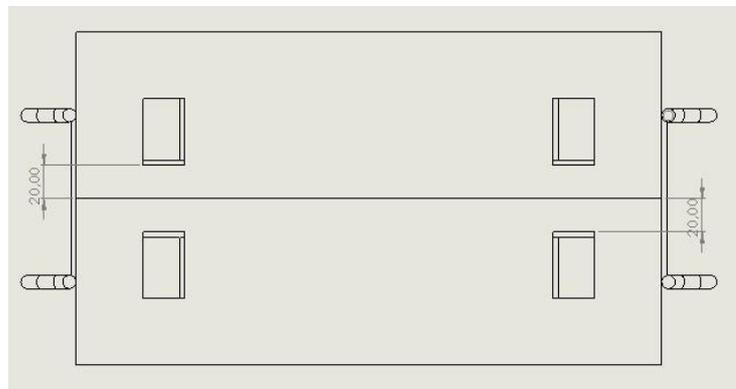
Fonte: Solidworks, autoria própria, 2023.

Figura 18 – Dimensões da caixa metálica, parte 1.



Fonte: Desenho 2d Solidworks, autoria própria, 2023.

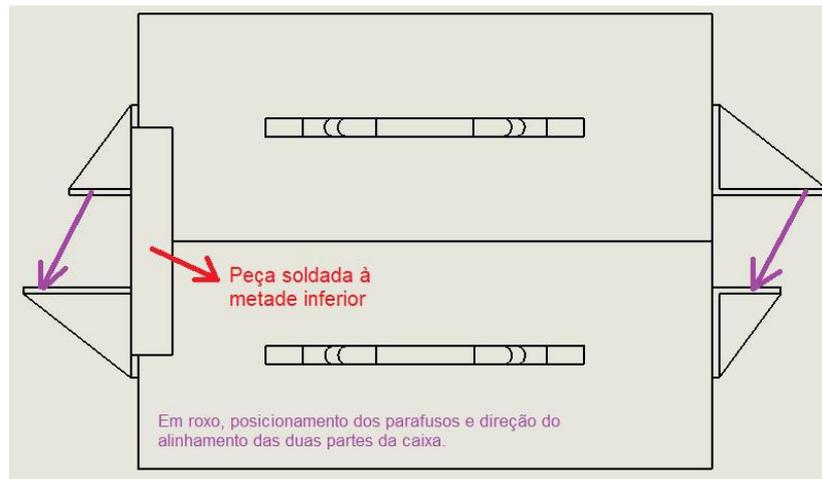
Figura 19 – Dimensões da caixa metálica, parte 2.



Fonte: Desenho 2d Solidworks autoria própria, 2023.

O alinhamento da metade superior e inferior da caixa metálica é feito por meio dos parafusos que prendem as duas metades da caixa. Estes parafusos fazem um ângulo (em roxo na Figura 20) que faz a parte superior da caixa encostar na cantoneira (destacada em vermelho na Figura 20).

Figura 20 – Alinhamento da caixa metálica para molde de fundição.



Fonte: Desenho 2d Solidworks, autoria própria, 2023.

3.3 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A FUNDIÇÃO

Para a preparação dos materiais para a fundição em alumínio, é necessário realizar uma série de etapas. Primeiro, as latas de alumínio após coletadas e separadas, passam por um processo de lavagem para remover qualquer sujeira ou resíduo. Em seguida, as latas são secas, garantindo que não haja umidade que possa afetar o resultado final da fundição.

Além disso, é importante preparar a areia para o molde de areia verde. A areia é peneirada e preparada, removendo-se grãos maiores, umedecendo-a e adicionando argila na proporção necessária para alcançar a consistência adequada. A areia preparada é então colocada em um molde, onde é compactada e moldada para criar a forma desejada.

Antes de prosseguir com o processo de fundição, o alumínio é pesado com precisão para garantir a quantidade adequada de metal a ser utilizado.

3.3.1 Preparação das Latas de Alumínio para Fundição

Após coletadas, as latinhas foram lavadas conforme a Figura 21, com água e sabão na parte da manhã, em seguida a água foi escorrida e o resto do dia as latinhas ficaram espostas ao sol para secagem. Ao fim da tarde já estavam secas e foram separadas/armazenadas em uma caixa de papelão.

Figura 21 – Lavagem latinhas de alumínio recicladas. Preparação para fundição.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

As latinhas foram amassadas com marreta e martelo para ficarem o mais compactas possível. Em seguida 12 latinhas foram separadas para amostra de pesagem no laboratório de metrologia da UFRJ em uma balança eletrônica analítica Mettler Toledo AB204-S com resolução de 0.01mg (Figura 22). O peso médio da amostra de latinhas é 14,6296 g, o desvio padrão da amostra é 0,1513 g e a moda é 14,5003 g.

Figura 22 – Pesagem de latinhas amassada.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

3.3.2 Preparação da Areia Verde e Moldes

A areia foi peneirada para retirar grãos maiores, conforme as peneiras da Figura 23. Os grãos que passam pela malha da peneira mais fina possuem tamanho inferior a 1mm de diâmetro. Segundo o livro Foundry Technology (BEELEY, 2001) os grãos das areias de fundição ficam entre 0,1mm e 1mm de diâmetro.

Figura 23 – Materiais para peneirar areia.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A areia utilizada no experimento foi previamente exposta ao sol no dia anterior, resultando em um teor de umidade próximo de zero. As proporções adotadas para a mistura foram baseadas no referencial teórico (BEELEY, 2001) e na avaliação da consistência da areia. Para o balde de 10 litros utilizado, adicionou-se 1 litro de argila e cerca de 500 ml de água, completando o restante com os 8,5 litros de areia seca. A argila e o borrifador podem ser visualizados na Figura 24.

Foto 24 – Adição de água e argila à areia.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Para a produção da peça fundida 1, suporte do carona, a própria peça original foi utilizada como molde, indicado na Figura 25. A areia foi compactada com uma marreta e um martelo.

Figura 25 – Parte inferior da caixa metálica com molde/macho da peça fundida 1.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Foi utilizado um agente de desmoldagem para evitar que a parte superior do molde aderisse à superior. O agente desmoldante é o pó branco observado nas Figuras 58 e 59 ($Mg_3Si_4O_{10}$, filossilicato de magnésio hidratado ou talco). O objetivo é garantir uma desmoldagem eficiente e reduzir o risco de danos ao molde.

Neste ponto a caixa metálica contém o molde pronto com a areia verde compactada, o próximo passo é ligar o forno e fundir as latinhas de alumínio dentro do cadinho. Após isso o alumínio líquido é despejado no molde, como pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Alumínio líquido sendo despejado no molde.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

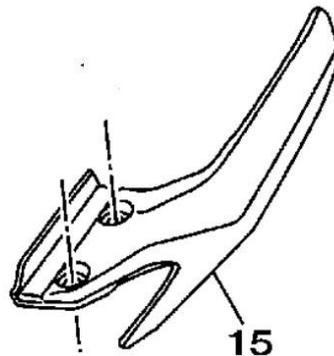
3.5 PEÇAS FUNDIDAS

3.6

3.4.1 Peça 1 – Suporte do Carona em Alumínio

Inicialmente pretendia-se fabricar uma peça de moto de alumínio fundido, um suporte do carona. Veja a Figura 28 retirada do catálogo de peças da Yamaha:

Figura 28 – Suporte do Carona, de alumínio.



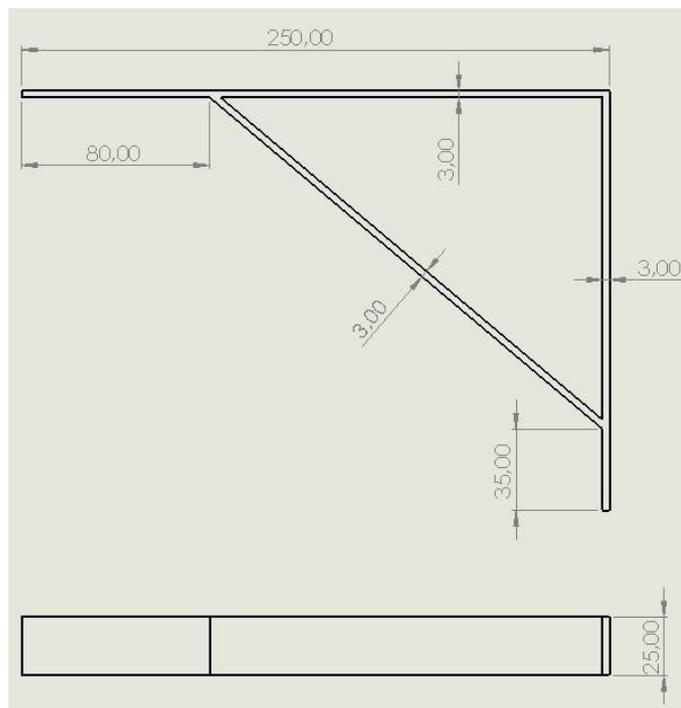
Fonte: Catálogo Yamaha MT03 ABS 2017.

Para a produção da uma nova peça, a própria peça original serviria de molde, como pode ser visto nas Figuras 25 e 62.

3.4.2 Peça 2 – Cantoneira de alumínio fundido para prateleira

A segunda peça a passar pelo processo de fundição foi a cantoneira com o design feito no Solidworks, suas dimensões são indicadas na Figura 29. Para a fabricação desta peça e da peça 3, foi adotado o método de fundição por molde aberto, que consiste simplesmente em utilizar um recipiente com o formato desejado da peça (GROOVER, 2010).

Figura 29 – Dimensões cantoneira (peça 2), a largura da peça, não mostrada na figura, é de 25mm.

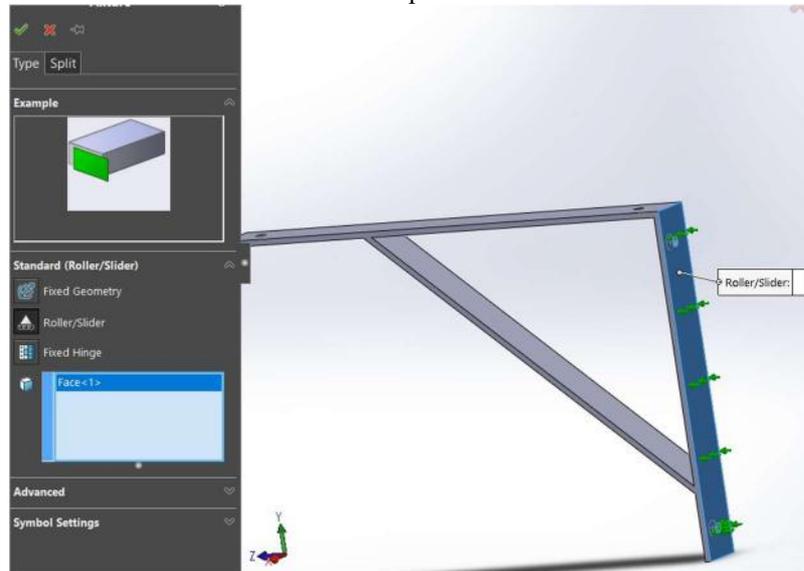


Fonte: Autoria própria, Solidworks 2018.

O objetivo é a cantoneira suportar 25kg ou cerca de 245N de força na superfície superior.

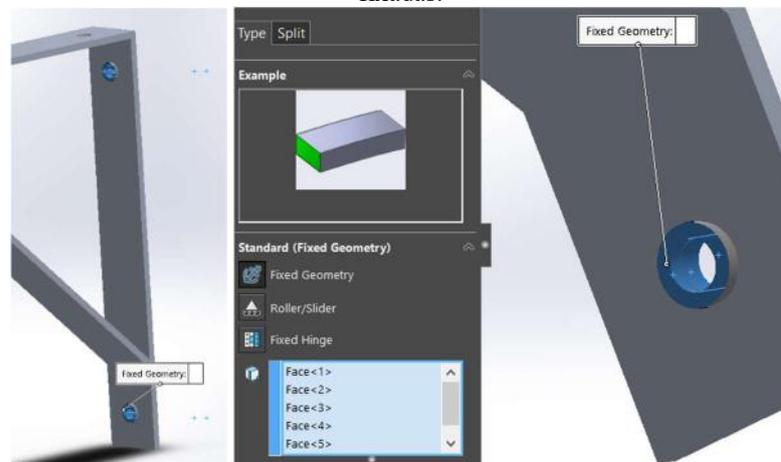
As Figuras 30 e 31 indicam as fixações para a simulação de carga estática:

Figura 30 – A superfície em azul possui fixação do tipo deslizante. Esta superfície é a que ficaria em contato com a parede.



Fonte: Autoria própria, Solidworks 2018.

Figura 31 – Fixação com 0 graus de liberdade para movimentação, duas arruelas também foram adicionadas e fixadas.

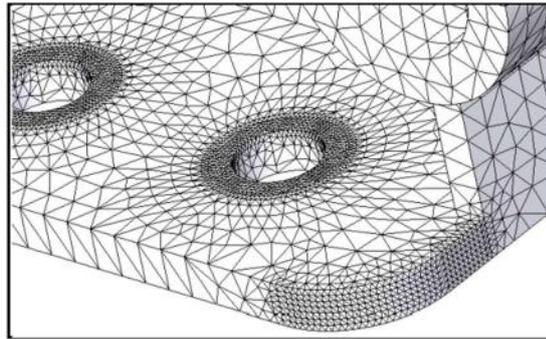


Fonte: Autoria própria, Solidworks 2018, 2023.

Uma funcionalidade padrão do SolidWorks Simulation é controlar a geração da malha, evitando que novas áreas e linhas de superfície tenham tamanhos de malha locais diferentes. No entanto, é necessário um julgamento de engenharia para determinar onde uma peça precisa de divisões extras de linhas ou superfícies para aplicar cargas e restrições em uma análise. Onde forem aplicadas restrições de deslocamento translacional, ou seja, restrição ao movimento que envolve o deslizamento em uma ou mais das três dimensões, serão desenvolvidas forças de

reação e concentrações localizadas de tensões são prováveis. Portanto, é necessário garantir que pequenos elementos de malha sejam criados nessas regiões. Esse processo é chamado de controle de malha (AKIN, 2010). A Figura 32 a seguir mostra uma redução no tamanho da malha de 3 para 1 mm nessas áreas:

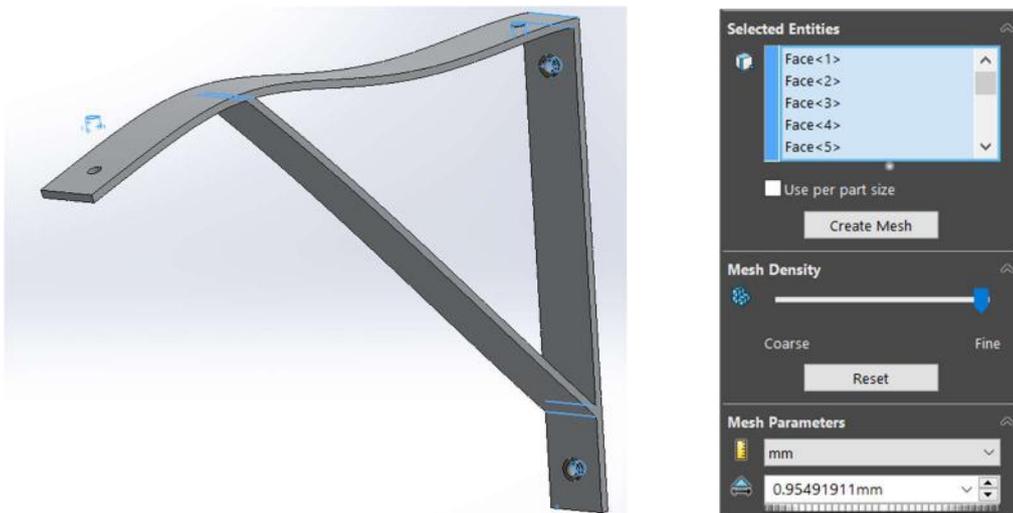
Figura 32 - Tamanhos de malha controlados.



Fonte: EDWARD, 2009.

Com o objetivo de obter resultados mais precisos sobre a resistência estrutural e o desempenho do componente, a Figura 33 indica os pontos onde a malha foi refinada para a simulação de carga estática da cantoneira:

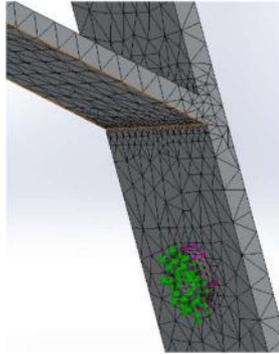
Figura 33 – Pontos onde a malha foi refinada para a simulação.



Fonte: Autoria própria, Solidworks 2018, 2023.

A Figura 34 ilustra um zoom em uma parte específica da peça, destacando o refinamento da malha. Nesse caso foi realizado um refinamento de malha que reduziu o tamanho de 3 mm para menos de 1 mm.

Figura 34 – Refinamento de malha para a simulação.



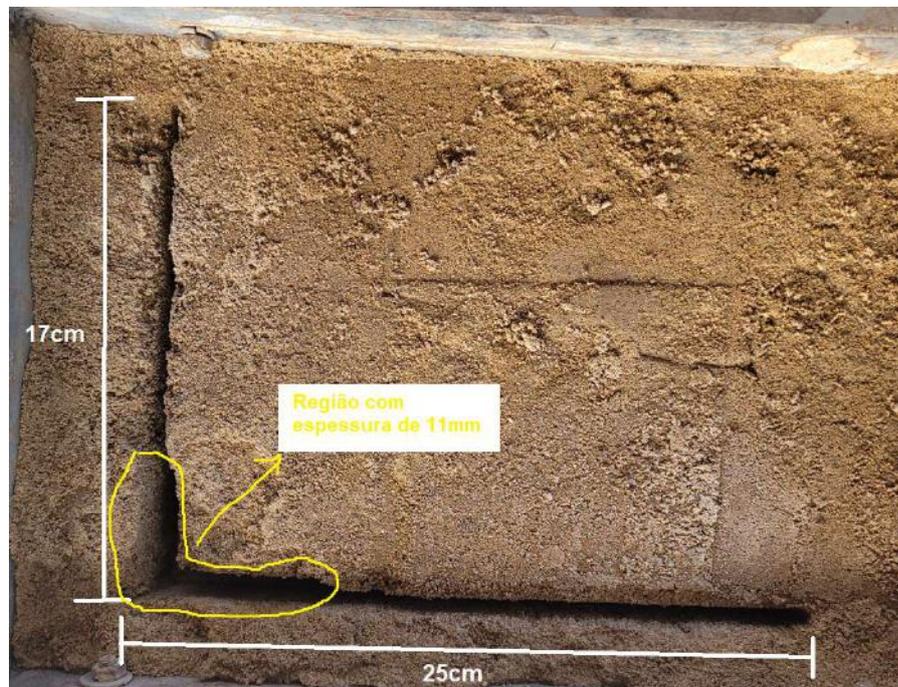
Fonte: Autoria própria, Solidworks 2018, 2023.

3.4.3 Peça 3 – Cantoneira de alumínio fundido para prateleira

Esta peça foi fabricada sem design prévio no Solidworks, após não ser obtido êxito na fabricação da Peça 2 (detalhes serão abordados no capítulo Resultados e Discussões). Após a fabricação desta peça, ela foi instalada em uma prateleira e foi feito um teste de carga com 10kg para aferir se a peça era funcional, a carga deve ser mantida por pelo menos 3 minutos.

O molde foi feito na hora com peças de metal, obtendo o formato observado na Figura 35. O design da peça 3 foi criado no próprio molde (Figura 35), sem o reforço visto na peça 2 (Figura 29), porém com uma região que possui maior espessura no molde (11mm em vez de 3mm).

Figura 35 – Molde de areia verde da peça 2.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados, bem como as discussões e análises relacionadas aos mesmos. O capítulo oferece uma visão dos principais aspectos do projeto, com o objetivo de compreensão e discussão dos resultados obtidos.

4.1 FORNO DE FUNDIÇÃO

O forno foi utilizado um total de 5 vezes. A quinta vez já não se apresentava em boas condições para operação, visto que devido à degradação do gesso apresentou muitos vazamentos de ar, com isso houve um consumo muito maior de gás para manter temperaturas acima de 800 °C.

A casca externa de aço inox se mostra em boas condições bem como a tampa que apenas apresenta um ressecamento interno (veja a Figura 38).

Para continuar utilizando o forno é necessário refazer a parte interna de gesso, o custo para isso é baixo, o valor do gesso é indicado no Quadro 3. O isolamento térmico feito em gesso, após 5 ciclo térmicos de operação (onde o forno é mantido acima de 800 °C por cerca de 1 a 1,5 horas) ficou na condição observada na Figura 36. A temperatura externa da parede continua aceitável durante a operação, isto significa que em nenhum momento passa dos 70 °C definidos no Quadro 4.

Figura 36 – Estado da parede interna de gesso após 5 ciclos de operação.



Fonte: Autorial própria, 2023.

O problema observado com a degradação da parede interna de gesso é que ocorrem vazamentos de ar significativos tanto na utilização do cadinho de 300ml quanto na utilização do cadinho de 1 litro. Esses vazamentos de ar tornam necessário utilização do queimador com um consumo de gás muito maior para manter a temperatura de operação (Ao redor dos 800 °C), além do consumo ser maior, a chama que o queimador produz precisa ser mais forte e junto do vazamento de ar quente passa a transmitir uma sensação de insegurança durante a operação.

Um ponto a ser observado é a corrosão no suporte do queimador, como é visto na Figura 37. Entretanto o suporte ainda está sólido e não apresenta nenhuma dificuldade em continuar sendo utilizado.

Figura 37 – Suporte do queimador com corrosão.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 38 mostra o forno montado para operação em seu quinto ciclo. Na foto pode ser observado que entre a tampa e o forno há um extensor, este serve para comportar o cadinho maior de 1 litro. O cadinho não cabe no forno em altura (Este cadinho com uma tampa de metal é visto na Figura 36), portanto foi feito um extensor com a mesma chapa da casca externa do forno.

Figura 38 – Forno montado para uso, antes do seu quinto ciclo de operação.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 39 é visto o termômetro Mt-455A montado com o termopar tipo K, para medição de temperatura interna, e o termopar que vem com o próprio termometro que foi preso à casca externa do forno para medição de temperatura externa.

Figura 39 – Temperatura inicial antes do quinto ciclo de operação (produção da peça 3).



Fonte: Aatoria própria, 2023.

4.1.1 O Forno em operação

A primeira utilização do forno de fundição serviu como teste de sua funcionalidade, o forno pode ser observado operando na Figura 40.

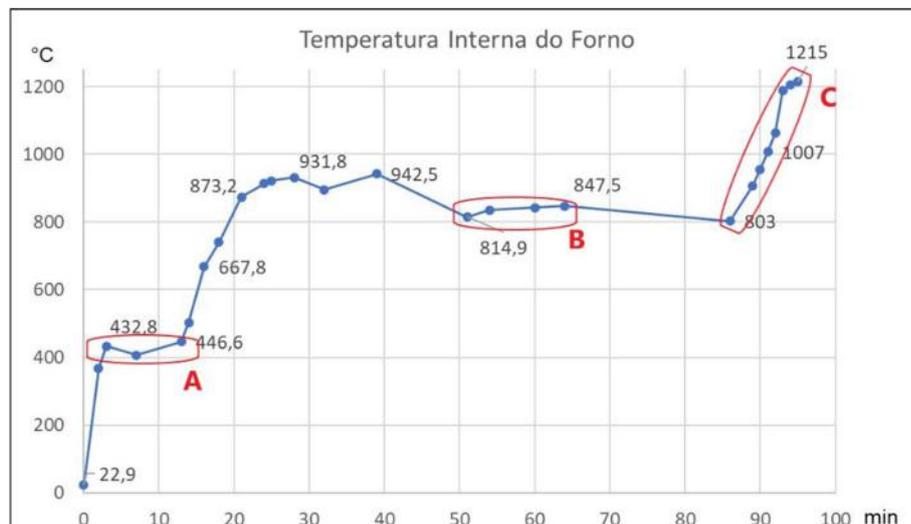
Figura 40 - Forno em operação normal, ainda assim, acima dos 750°C para o qual foi projetado.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Dos pontos destacados da Figura 41 algumas informações podem ser extraídas. Nos pontos em A o queimador estava com sua entrada de ar próximo da abertura mínima, então mesmo que injetasse mais gás GLP a queima estava limitada e a temperatura não subia, após isso a entrada de ar foi aumentada e a temperatura continuou a subir. Nos pontos em B houve uma redução na injeção de gás e uma pequena redução na entrada de ar, para menor gasto de combustível. Nos pontos em C o máximo de gás foi injetado com a abertura máxima da entrada de ar, a temperatura do forno subiu 412°C em um intervalo de tempo de 9 minutos, sendo que o mesmo já se encontrava a 803°C.

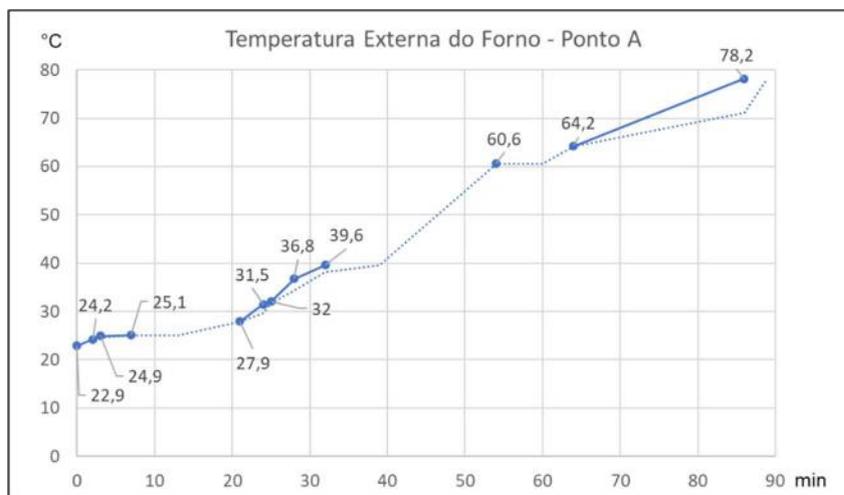
Figura 41 - Temperatura interna do forno (°C) ao longo do tempo, tempo total de teste de 95 minutos.



Fonte: Figura de autoria própria com a utilização do Excel, 2023.

A temperatura externa do forno foi medida no ponto A (Figura 43) pelo termômetro a laser e pode ser observada, ao longo do tempo do teste, na Figura 42. O forno foi projetado para operar a 750 °C, entretanto em seu primeiro teste chegou-se na temperatura de 1215°C para teste de temperatura máxima com a utilização do queimador Ember. Este valor é próximo ao valor máximo de leitura do termômetro digital Minipa Mt-455a de 1300 °C. Mesmo com valor de temperatura interna acima do que foi projetado para o isolamento térmico, a temperatura externa passou apenas 8,2°C dos 70°C máximos calculados.

Figura 42 - Temperatura externa do forno (°C) ao longo do tempo.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 43 - Esta figura indica o ponto A da Figura 42 em sua temperatura máxima. A espessura da parede de gesso nesse ponto é de 5cm.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A temperatura da tampa, longe da saída de ar quente (observado na Figura 44), se manteve baixa, sendo medida com menos de 60°C por volta dos 50 minutos de operação, temperatura similar à temperatura externa do forno como é visto na Figura 42 durante o mesmo período de tempo. A espessura de gesso da tampa é de cerca de 6 cm.

Figura 44 -Temperatura da tampa durante primeira operação.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Durante este primeiro ciclo de utilização o forno foi levado ao extremo, chegando à temperatura de 1215°C. As chamas vistas na Figura 45 mostram por onde sai o ar quente do forno. A sensação durante o funcionamento do forno à temperaturas tão altas é de insegurança devido ao fluxo muito alto de gás GLP e muitas chamas vazando para fora do forno. O queimador no entanto demonstra plena capacidade de inclusive continuar a aumentar a temperatura do forno, ainda havia espaço para aumentar o fluxo de combustível para o queimador. No entanto por motivos de segurança o queimador foi desligado logo após o forno atingir 1215°C.

Figura 45 - Forno operando em condições extremas, temperatura máxima chegou a 1215°C e só não subiu mais pois o teste foi encerrado por motivos de segurança. Nesta imagem é possível notar como a vedação da tampa não foi eficiente.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Este forno não possui material refratário em seu interior pois havia sido projetado para funcionar à temperatura de 750°C. Desta forma, pode ser observado na Figura 46 a deterioração do seu interior logo após sua primeira utilização. O gesso começa a apresentar algumas rachaduras, entretanto o forno ainda se encontra em condição suficientemente boa para outros ciclos de operação.

Figura 46 - Condições do forno após teste de 95 minutos de duração, dos quais operou durante 74 minutos acima da temperatura para o qual foi projetado, 750 °C.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A tampa do forno apesar de ficar com a aparência ressecada, continuou estruturalmente sólida e manteve seu formato. Como indicado na medição de temperatura da Figura 47, a tampa cumpre o seu papel de isolamento térmico.

Figura 47 - Condições da parte inferior da tampa do forno após teste.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A Figura 48 mostra o alumínio fundido durante a primeira operação, retirado do cadinho de 300 ml. O intuito desta figura é mostrar que o forno possui capacidade de derreter o alumínio e cumpre com o seu objetivo de construção.

Figura 48 – Alumínio fundido em primeiro teste do forno.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

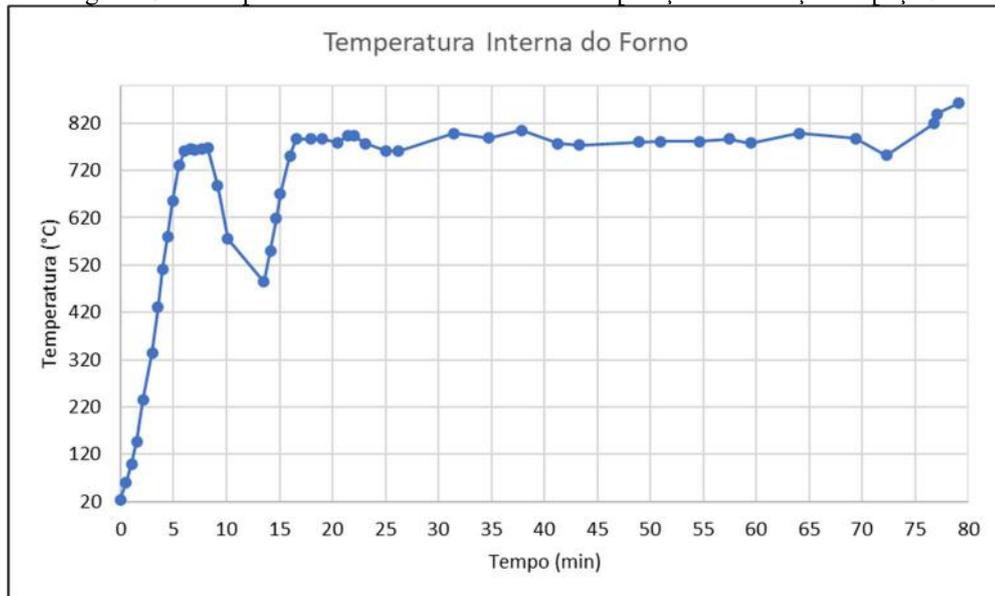
4.1.2 Eficiência do Isolamento Térmico

A espessura do isolamento térmico inicialmente foi pré definida pelo espaço disponível entre os moldes (casca externa e casca interna) a espessura de gesso disponível, desta forma, a parede interna seria de 5,9 cm, o preenchimento de gesso é visto na Figura 2 entre R2 e R3, onde $R_2 = 8,5\text{cm}$ e $R_3 = 14,4\text{cm}$.

Desta forma a espessura de gesso encontrada que satisfaz a Equação 1 para os limites de temperatura T_1 e T_4 , respectivamente, 750°C e 70°C é de 5,25 cm. Isso significa que a espessura do isolamento termico de gesso deve ser maior ou igual a 5,25 cm, ou seja, o valor de 5,9 cm pré definido atende os limites de temperatura do Quadro 4.

As Figuras 49, 50 e 51 mostram o comportamento do forno e do seu isolamento térmico durante os 79 minutos que levaram para a fundição da peça 3. A Figura 49 mostra a temperatura interna do forno, que foi mantida ao redor de 770°C durante a operação.

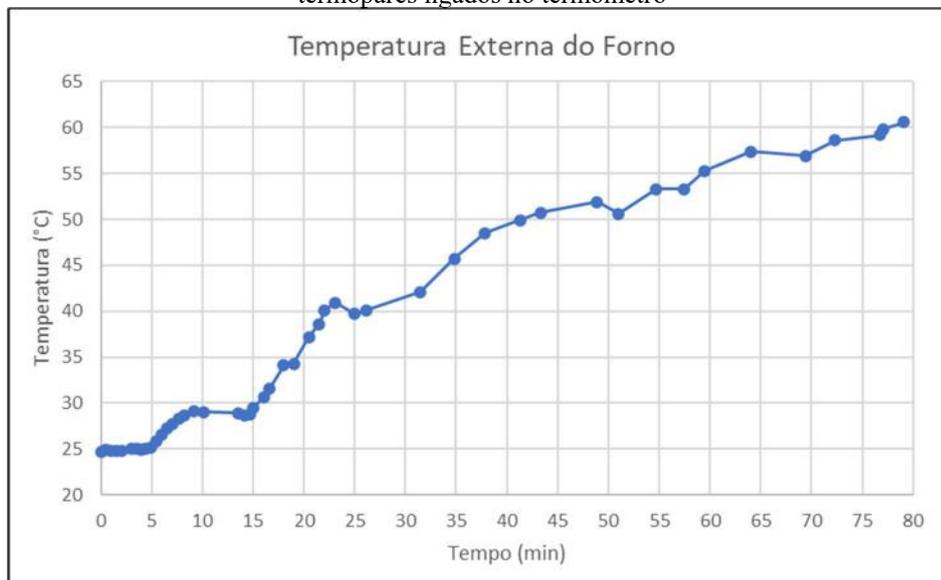
Figura 49 – Temperatura interna do forno durante operação de fundição da peça 3.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

O comportamento do isolamento térmico fornecido pela parede interna de gesso pode ser observado na Figura 50. A temperatura de 750°C foi utilizada para determinar a espessura da parede de gesso através da Equação 1 junto das outras variáveis de entradas fornecidas no Quadro 4. Como pode ser visto na Figura 49, o forno fica ligado com temperatura interna mais de 25 °C superior à temperatura máxima de 750°C em 40,3% das medições de temperaturas tomadas. Ainda assim a temperatura máxima externa do forno é de 60,6°C, inferior à temperatura mínima de 70°C definida para que a superfície externa do forno não causasse queimaduras conforme o Quadro 4.

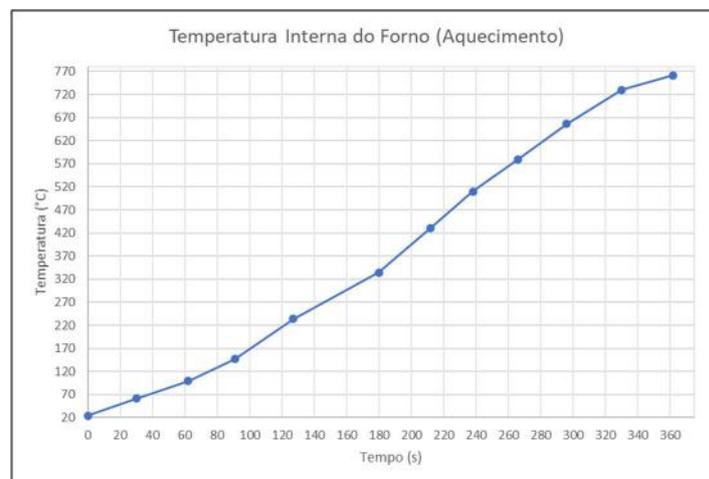
Figura 50 – Temperatura externa do forno durante operação de fundição da peça 3. A Figura X mostra os dois termopares ligados no termômetro



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A Figura 51 mostra o aquecimento interno do forno de fundição. A medição tomada durante a fundição da peça 3 mostra que em 362 segundos o forno já se encontra a 761,7 °C, pouco acima de sua temperatura de operação (750°C conforme Quadro 4). O mesmo entretando não pode ser afirmado para a temperatura do cadinho. O termopar com sua ponta em contato com a atmosfera dentro do forno mede a temperatura do ar dentro do forno de fundição, o cadinho e o alumínio precisam de mais tempo para aquecer devido ao tempo necessário para que ocorra a condução de calor da chama do queimador para o cadinho e dor ar quente em volta ao cadinho.

Figura 51 – Aquecimento inicial do interior do forno.

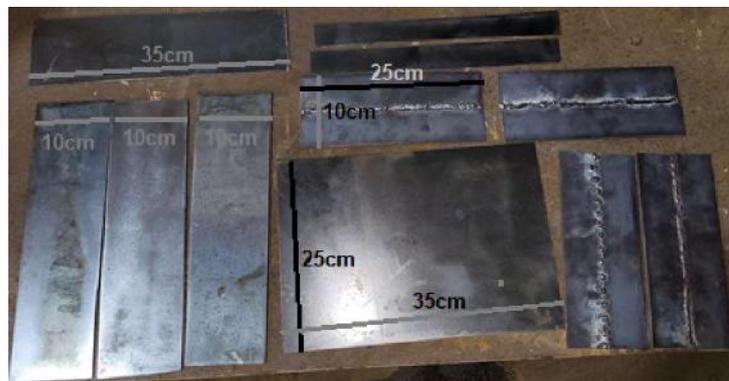


Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

4.2 CAIXA METÁLICA PARA FUNDIÇÃO

A caixa metálica foi fabricada com chapas de aço 1020 com 3mm de espessura mostrada na Figura 52, sua rigidez demonstra ser ótima para manter a forma do molde e para suportar a compressão da areia para o molde de areia verde. Durante seu uso a caixa se mostrou superdimensionada quanto à espessura da chapa, se mostrando demasiadamente pesada. Uma solução já apresentada para a dificuldade de manuseio é a fabricação de alças conforme o desenho original do Solidworks indicado na Figura 52 do Capítulo 3.

Figura 52 – Chapas de metal para fabricação da caixa metálica que comportará o molde de fundição e posteriormente a peça fundida, algumas medidas são indicadas, mais detalhes são encontrados na Figura 18.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

As alças para alinhamento e fixação entre a parte superior e inferior da caixa (Figura 53), diferente do design produzido no *solidworks*, são todas de mesmo tamanho (25x25mm), sendo assim, o que promove o alinhamento é a furação que não é centralizada, mostrado na Figura 54. Apesar de durante a fabricação as alças serem de mesmo tamanho, o alinhamento da caixa continua a seguir o mesmo princípio do posicionamento dos parafusos mostrado na Figura 20. A caixa com as partes superior e inferior presas é mostrada na Figura 55.

Figura 53 – Alças para alinhamento e fixação da caixa.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 54 – Exemplo de uma das alças de fixação com furação, parafuso, porcas e arruelas quando a caixa está presa.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 55 – Caixa montada após fabricação.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A caixa foi fabricada por soldagem com eletrodo revestido, o eletrodo utilizado foi o E6013 de 2,5mm de diâmetro. Na Figura 56 é mostrado um exemplo de solda ainda com escória e a fixação com 4 sargentos de uma das peças. Após a peça ser soldada o revestimento que se transformou em escória é removido com um martelo picador de solda de 500g, que aparece ao fundo da Figura 56, em seguida utiliza-se uma escova de aço para remover o restante da escória da solda.

Figura 56 – Processo de soldagem da caixa metálica.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

O modelo de máquina de solda utilizado foi a Boxer Touch 150BV, foi utilizada em tensão de 220V com a corrente sendo ajustada entre os valores de 80 e 100A. Nesta corrente esta máquina pode ser utilizada com ciclo de trabalho de 100%, sua capacidade máxima é de 140A e em nenhum momento foi necessário utilizá-la em capacidade máxima.

4.3 AREIA VERDE

A consistência final da areia verde antes da compactação (na caixa metálica) pode ser observada na Figura 57. A areia verde preparada é composta em volume por: 85% de areia, 15% de argila e 5% de água.

Figura 57 – Consistência da mistura de areia, argila e água (respectivamente em volume: 85%,15% e 5%).



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

4.4 PEÇAS PRODUZIDAS POR FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

Nesta seção serão apresentados os resultados para os 3 moldes de peças produzidos através do método de fundição por areia verde aqui abordado.

4.4.1 Peça 1 – Suporte do Carona

O molde da peça 1 (Figuras 58 parte superior e Figura 59 parte inferior) quebrou em algumas partes devido ao formato complexo da peça original (veja o formato da peça original nas Figuras 28 e 62), a areia não teve liga o suficiente para manter toda sua forma, seja por falta de compressão ou de elemento ligante como argila ou outro aditivo.

Figura 58 – Parte superior do molde com canal de vazamento.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 59 – Parte inferior do molde com canal de vazamento.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Como resultado, o molde ficou maior que a peça, sendo a solução para a produção da peça a rebarbação final, veja a Figura 60 com a peça ainda no molde superior da caixa metálica.

Figura 60 – Peça fundida 1, vista da metade superior da caixa metálica, de baixo para cima.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A Figura 61 apresenta a peça juntamente com o alumínio que solidificou no canal de alimentação e a Figura 62 mostra a mesma ao lado da peça original. Neste caso, optou-se por não utilizar o sistema de riser, conforme mencionado anteriormente na Figura 6. Após o vazamento do metal líquido, foi observado que a areia do molde apresentava uma boa permeabilidade, permitindo a saída do ar enquanto o alumínio líquido preenchia a cavidade. No entanto, como evidenciado na superfície da peça antes da rebarbação na Figura 61, houve um desprendimento significativo da areia do molde. Portanto a superfície do fundido ficou grãos de areia encrustrados, defeito semelhante à inclusões exógenas mencionadas na seção 2.4.4.2, entretanto esse defeito ocorre apenas na superfície da peça e ao realizar o corte da peça fundida não foi observado grãos de areia em seu interior, como pode ser visto na Figura 64. Isso pode ter ocorrido devido a uma compactação insuficiente do molde.

Figura 61 – Peça 1 após ser retirada do molde.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 62 – Peça 1 após ser retirada do molde ao lado da peça original.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Algumas características que podem ser observadas dessa peça é sua superfície porosa e com bastante desprendimento de areia, observado na Figura 63, entretanto o interior da peça se mostrou bastante sólido e não foi observado grãos de areia no interior (característica observada nas Figuras 63 e 64).

Figura 63 – Zoom na superfície da peça 1 antes da rebarbação.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 64 –Corte na peça 1 durante rebarbação mostra interior sólido.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A rebarbação da peça não foi levada a frente, pois havia muito metal extra e o formato da peça original dificilmente seria alcançado com uma esmerilhadeira, desta forma a peça foi cortada e utilizada para ser refundida para a fabricação da peça 3 (veja Figura 71).

4.4.2 Peça 2 – Cantoneira de Alumínio Fundido para Prateleira

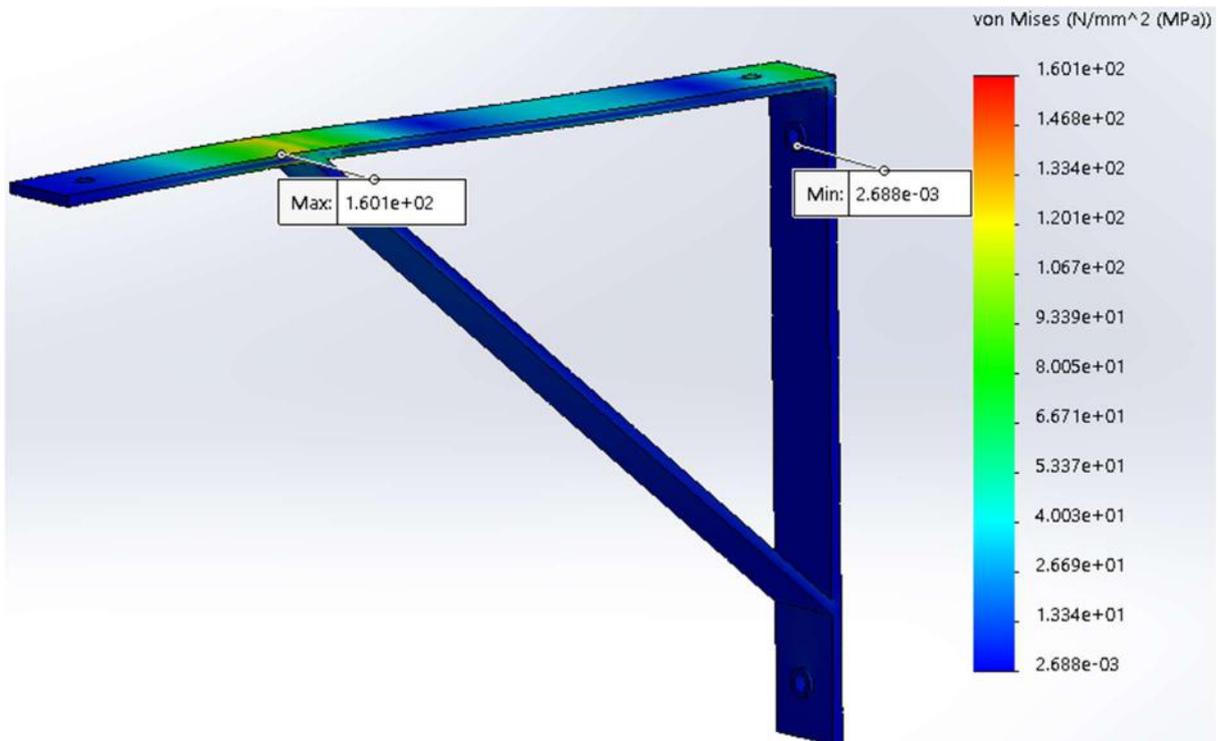
Para a avaliação do design dessa peça foi feita uma simulação por carga estática com uma força de 400N distribuída na superfície superior da cantoneira, ou seja, uma força 1,63 vezes superior ao necessário para suportar 25kg (245N).

Realizadas as fixações no programa e refinamento de malha, os resultados obtidos para a força de 400N da simulação estática foram:

4.4.2.1 Critério de falha de Von Mises

Como indicado na Figura 65, o valor máximo de tensão obtido foi de 160,1 MPa. Dentre as ligas de alumínio presentes na composição de uma latinha de alumínio, a liga 3004 possui limite de escoamento de 179MPa e a liga 5182 de 276MPa (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1993), ou seja, acima do máximo da simulação que já possui fator de segurança ao adotar força superior ao necessário.

Figura 65 – Tensão máxima por critério de Von Mises de 160,1 MPa para uma carga de 400N.

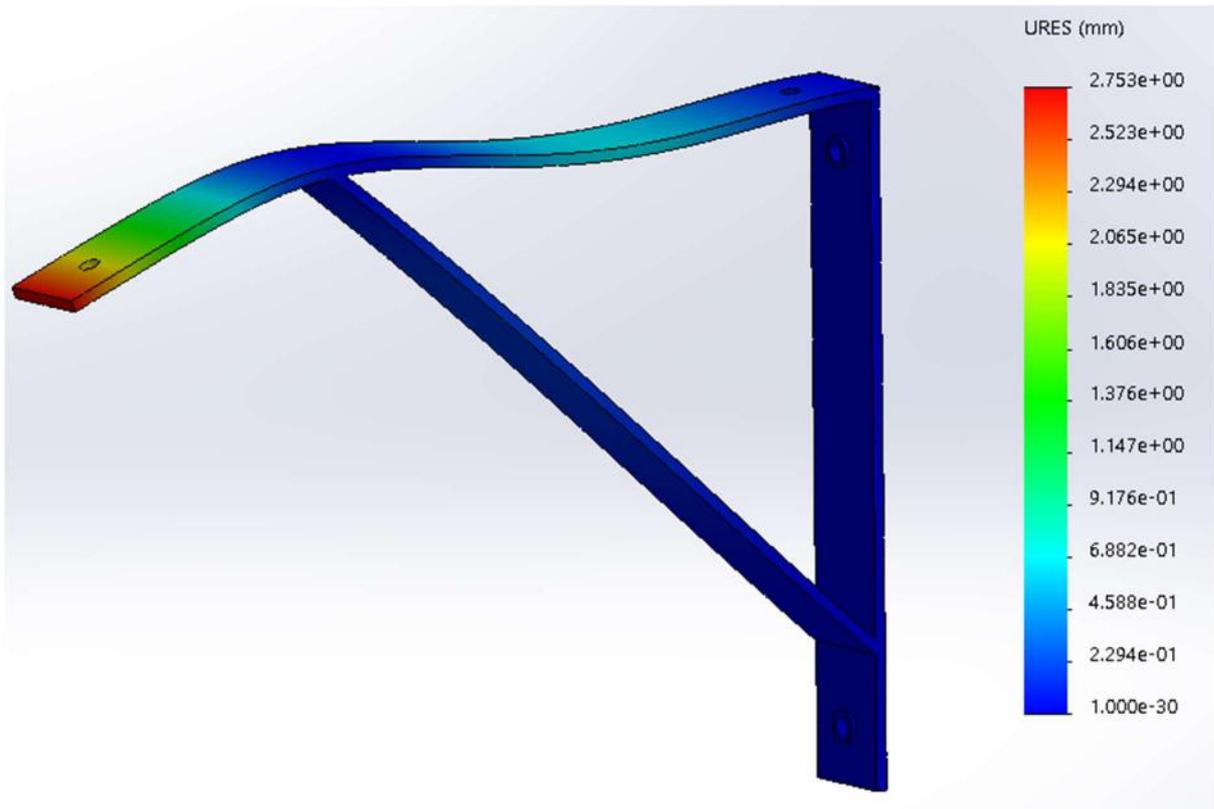


Fonte: Autoria própria através da utilização do programa Solidworks 2018, 2023.

4.4.1.2 Simulação de deformação da peça

A Figura 66 indica a deformação da peça durante a simulação de carga estática. A deformação máxima foi inferior a 3mm.

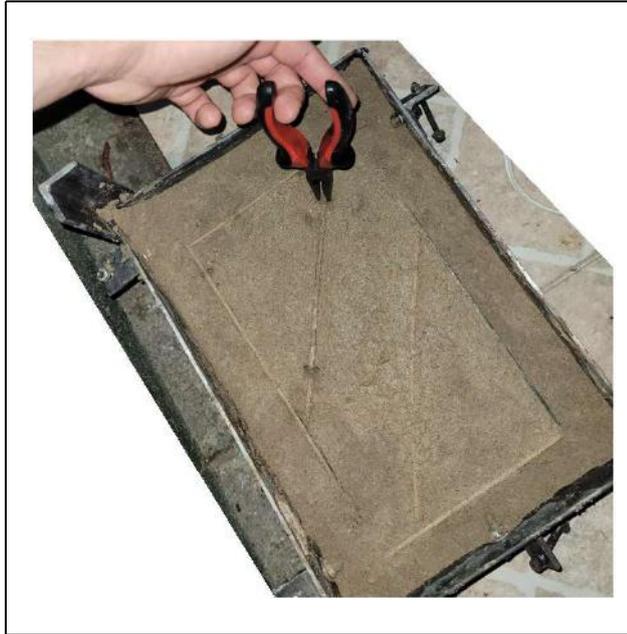
Figura 66 – Deformação em mm.



Fonte: Autoria própria através da utilização do programa Solidworks 2018, 2023.

A Figura 67 ilustra o processo de remoção do molde da cantoneira. Inicialmente, o molde foi construído utilizando folha de PVC e, posteriormente, foi substituído por chapas de aço com espessura equivalente à da peça. Essa substituição ocorreu devido à necessidade de um molde mais resistente que não se deformasse durante a compactação da areia com martelo e marreta.

Figura 67 – Exemplifica o método de retirada do macho do molde das peças 2 e 3 após a compactação da areia.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Após a retirada do macho ocorreram algumas quebras na areia que podem ser observadas na Figura 68.

Figura 68 – Molde aberto para produção da peça 2.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Para a tentativa de fabricação desta peça foi utilizado o Cadinho de 300ml. O volume do molde (visto na Figura 68 e 69) na areia é de 168ml (sem contar o volume do canal de alimentação), ou seja, o volume total do molde com o canal de alimentação é próximo de 200ml. Esperava-se que o cadinho preencheria todo o molde com metal líquido, porém houve perdas por oxidação do metal líquido, por solidificação prematura dentro do próprio cadinho ou outro motivo não identificado. O resultado para esta peça pode ser observado na Figura 70.

Figura 69 – O metal líquido não é suficiente para preencher todo o molde pois parte fica no cadinho.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 70 – Resultado peça 2.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

4.4.3 Cantoneira de Alumínio Fundido para Prateleira

Após o resultado da peça 2, observado na Figura 70, a estratégia adotada para a produção da peça 3 foi de utilizar o cadinho de 1 litro em vez do cadinho de 300ml, além disso seria produzido um molde só em vez de um molde duplo, reduzindo o volume de 168ml para 144ml, e dessa vez sem a necessidade de um canal de alimentação visto que só seria produzido uma peça. Para esta peça foi adotado um design mais simples. A peça foi criada direto no molde de areia (Figura 72) sem desenho no *Solidworks* nem simulação de carga estática. Entretanto, ao fim de sua produção esta peça foi instalada e testada com cargas de 10 e 15kg.

O metal utilizado para a fabricação desta peça não foram as latinhas e sim as peças 1 e 2 recortadas, e refundidas como pode ser observado na Figura 71.

Figura 71 – Alumínio utilizado para a fundição da peça 3.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

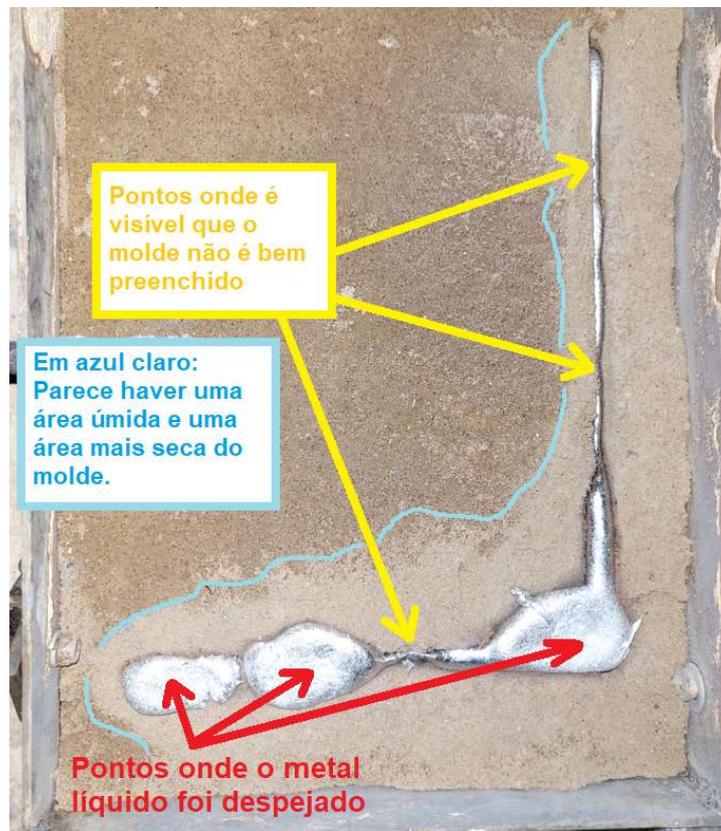
Figura 72 – Molde da peça 3.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Na Figura 73, é possível observar o resultado da fundição da peça 3 através do molde da Figura 72. O volume de alumínio fundido dessa vez é mais do que suficiente para preencher o molde. No entanto, um desafio encontrado é a solidificação prematura do alumínio nesse molde de espessura fina (4mm). Isso ocorre devido à perda de calor do metal líquido para a água presente na areia verde, resultando em uma solidificação antes do preenchimento completo do molde. Na Figura 73, é destacada em azul claro a transição entre a areia verde e a área onde a areia secou após o despejo do alumínio líquido.

Figura 73 – Peça 3 após o alumínio líquido ser despejado.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

A peça 3 durante o início do processo de rebarbação é observada na Figura 74:

Figura 74 – Peça 3 antes da rebarbação.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

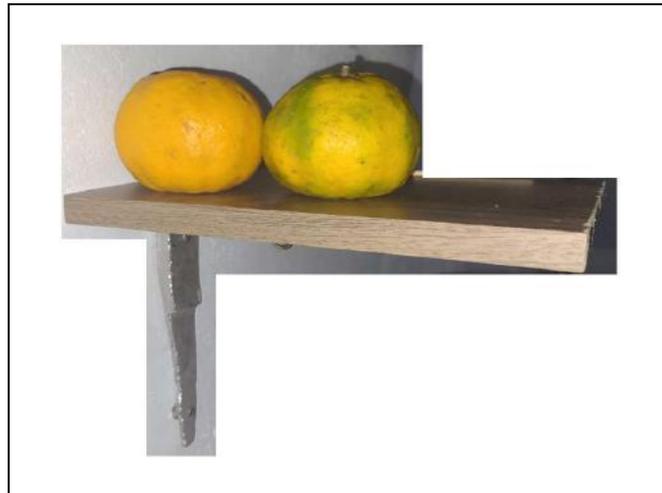
Mesmo com os defeitos apresentados na fabricação da peça 3, após a rebarbação com a esmerilhadeira, foi possível realizar a furação da peça e utilizá-la em uma prateleira (Figura 75 e 76).

Figura 75 – Peça 3 após rebarbação, não possui formato regular pois não ocorreu o preenchimento perfeito do molde pelo alumínio líquido.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

Figura 76 – Prateleira criada para a peça 3.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Foi realizado um teste de carga onde a cantoneira suportou 10kg por 3 minutos sem nenhum dano. Também foi testada com 15kg, porém após alguns segundos ocorreu a deformação plástica da cantoneira, logo o peso foi retirado e a peça desentortada. O esquema do teste de carga é mestrado na Figura 77.

Figura 77 – Cantoneira suportando carregamento de 10kg.



Fonte: Foto de autoria própria, 2023.

4 CONCLUSÃO

A fabricação do forno, da caixa metálica para o molde e a produção da areia verde possibilitou a fundição das 3 peças estudadas no presente trabalho. Para a fabricação do forno de fundição selecionou-se materiais economicamente viáveis e que teriam boa resistência à altas temperaturas. O valor total necessário para a produção do forno de fundição foi de 868,80 reais. Para a produção da caixa metálica foi utilizado aço coletado em um ferro velho, que doou o material.

O gás combustível GLP foi selecionado como fonte de energia, este se mostrou a melhor escolha em questões econômicas, pela sua acessibilidade e potência térmica como pode ser visto no teste do forno em que o mesmo alcançou 1215 °C . O forno de fundição fabricado mostrou-se uma ferramenta eficaz na obtenção de altas temperaturas e no processo de fusão do alumínio. Apesar das limitações identificadas, como a necessidade de reparos no isolamento térmico interno, é importante ressaltar que o forno demonstrou desempenho satisfatório ao longo dos ciclos de utilização. A casca externa de aço inoxidável e a tampa do forno mostraram-se sólidas e eficientes, o suporte do queimador e a estrutura do forno permaneceram funcionais. O forno de fundição pode continuar sendo uma valiosa ferramenta para futuras atividades de fundição de alumínio, pode ser testado o retoque das paredes internas com gesso novo em vez de refazê-lo totalmente, a fim de possibilitar sua utilização por mais ciclos.

Durante os experimentos, o forno de fundição foi utilizado cinco vezes. O forno mostra plena capacidade para a fundição do alumínio no quesito de manter as temperaturas necessárias para fundição. Na quinta utilização, apresentou deterioração do gesso, resultando em vazamentos de ar quente e gases de exaustão, exigindo maior fluxo de gás. Entretanto, ainda que com vazamentos não ocorreram dificuldades em manter a temperaturas próximas de 800 °C.

Conforme o projeto, a temperatura da superfície externa do forno não ultrapassa 70°C para uma temperatura interna do forno de 750°C. A temperatura da superfície externa do forno chega apenas a 60,8°C para uma temperatura interna do forno constantemente superior a 800°C em um teste que durou cerca de 80 minutos.

A caixa metálica fabricada funcionou perfeitamente, aceitando a compactação da areia; o alinhamento superior e inferior também funciona bem. A caixa se mostrou muito sólida, o que significa que o processo de soldagem foi satisfatório. Sobre o processo de fundição adotado, a areia verde não ficou com uma liga ideal, ou seja, ela ainda solta alguns grãos quando o metal líquido é despejado. Entretanto, o defeito não se propaga para o interior da peça. Ou seja, é

necessário apenas um processo de rebarbação posterior a fundição. Essa prática é padrão na fabricação por fundição, o que é preciso é a análise da quantidade de rebarbação requerida.

A primeira peça fabricada contém o design original, entretanto muita rebarbação seria necessária. A princípio foi pensado que a rebarbação do alumínio consumiria menos tempo, o que não ocorreu, sendo deixado de lado a finalização desta peça. Um corte foi feito na peça onde, visualmente (isto é, a olho nu), foi observado um interior sólido sem inclusões exógenas.

A produção da segunda peça, apesar de ter sido levado em conta o volume do cadinho e o volume do molde, o resultado foi que mais da metade do volume de metal dentro do cadinho ou virou óxido ou não foi completamente fundido, obtendo-se um rendimento próximo de 50% de metal líquido. Ou seja, um cadinho de 300ml relativamente cheio poderia fornecer um pouco mais que 100ml de alumínio líquido ao molde. O molde necessitava de 168ml de alumínio líquido.

Por fim, o resultado da última peça foi satisfatório no sentido de ter produzido uma peça funcional que foi submetida a teste de carga estático com 10kg de massa. Defeitos observados na peça foram decorrentes da espessura fina de um molde úmido, que faz o alumínio perder calor muito rápido antes de formar a peça como um todo. O molde de areia verde utilizado para a produção desta peça se mostrou relativamente íntegro, não sendo observado o carregamento de grãos de areia ao interior da peça.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação microestrutural das peças fundidas.
- Avaliação por líquido penetrante das peças fundida, para verificação de defeitos superficiais de fundição como poros e microtrincas
- Fabricação de um forno maior com utilização de material refratário. Objetivo: aumentar a vida útil do forno e capacidade de trabalho a temperaturas mais altas. O forno deve ser maior para comportar melhor o cadinho de 1 litro.
- Estudar a viabilidade da fundição de materiais de maior ponto de fusão.
- Fabricação de alças na caixa metálica do molde para melhorar o seu manuseio.
- Estudo para a redução da espessura das chapas utilizadas na caixa metálica.
- Adequar o tamanho da caixa aos moldes de areia que serão compactados.
- Fabricação de peças com maior espessura para que o alumínio consiga fluir ao longo do molde inteiro.
- Estudar a influência da redução na umidade da areia verde na fabricação de peças de menor espessura
- Estudar aplicabilidade da pré-queima das latinhas para a queima do verniz e diminuição da oxidação do alumínio durante sua fusão.
- Estudar a utilização de aditivos ligantes na areia para melhorar suas propriedades de aglomeração e coesão durante o processo de moldagem. O objetivo é manter a integridade do molde de areia verde, permitindo que ele suporte o peso do metal fundido e evite a ocorrência de defeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, R.Q. **Talco e Pirofilita**. Paraná: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1993. 11 p.
- BEELEY, P. **Foundry Technology**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 699 p. ISBN 0 7506 4567 9.
- BERGMAN, T.L. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014. 1699 p. ISBN 978-85-216-2587-2.
- BURNS, G.W. et al. **Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90**. 1. ed. Gaithersburg, MD: United States Department of Commerce Technology - National Institute of Standards and Technology Administration, 1993. 630 p. v. 175.
- CAMPBELL, J. **Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design**. 1. ed. UK: Butterworth-Heinemann, 2011. 1162 p. ISBN 978-1-85617-809-9.
- CASOTTI, B.P.; BEL FILHO, E.D.; CASTRO, P.C. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011. 43 p.
- EDWARD, J.E. **Finite element analysis concepts: via Solidworks**. 1. ed. Houston, Texas: World Scientific, 2009. 313 p. ISBN 978-9814313018.
- ECIL. **Termopares Tipo K**. [S. l.]: Grupo Ecil, 2019. Disponível em: <https://ecil.com.br/pirometria-2/termopares/termopar-tipo-k/>. Acesso em: 15 maio 2023.
- FILHO, M.P.C.; DAVIES, G.J. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A., 1978. ISBN 78-0495.
- GROOVER, M.P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 4. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2010. 1003 p. ISBN 978-0470-467002.
- GRIM, R. E.; CUTHBERT, F. L., Illinois State Geol. **Survey Report 103**: J. Am. Ceram. Soc., 28 No. 3, 1945.
- HOLMAN, J.P. **Heat Transfer**. 10. ed. New York: McGraw-Hil, 2010. 713 p. ISBN 978-0-07-352936-3.
- IEC. **INTERNATIONAL STANDARD IEC 60584-1: Thermocouples - Part 1: EMF Specifications And Tolerances**. 3. ed. [S. l.]: Commission Electrotechnique Internationale, 2013. 13 p. v. 1. ISBN 978-2-8322-1047-5.

KAUFMAN, J.G.; ROOY, E.L. **Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications**. 1. ed. United States of America: ASM International, 2004. 321 p. ISBN 0-87170-803-5.

KINSEY, B.L.; WU, X. **Tailor Welded Blanks for Advanced Manufacturing**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. 217 p. ISBN 978-1-84569-704-4.

LOPEZ-TAPIA, A.C. **Optimización de la geometría de los inyectores de los quemadores de gas domésticos utilizando el proceso de Exploración de Diseño**. Orientador: Luis Alberto Fernández. 2019. 69 f. Trabajo de Fin Master (Máster en matemáticas y computación) - Universidad de Cantabria - Facultad de Ciencias, Santander, Espanha, 2019.

LUMLEY, R.N. **Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, processing and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. 854 p. ISBN 978-1-84569-654-2.

MONROE, R. Porosity in Castings. **American Foundry Society**, Schaumburg, IL USA, n. 05-245, ed. 4, p. 28, 2005.

MORGANITE DO BRASIL (ed.). **Manual de Fundição a Cadinho**. 1. ed. São Bernardo do Campo: Morgan, 2005.

MUELLER. **Manual de instruções linha de fogões**. Timbó: Mueller Fogões Ltda, 2015. 12 p.

PETROBRAS (Brasil). Gerência de Relacionamento com Clientes – Comercialização no Mercado Interno; PETROBRAS (Brasil). Gerência de Planejamento de Marketing e Inteligência de Mercado – Comercialização no Mercado Interno; PETROBRAS (Brasil). Gerência Desenvolvimento de Produtos & Avaliação De Petróleo – PD&I em Downstream, Midstream & Sustentabilidade - Cenpes. **GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO: Informações Técnicas**. [S. l.]: Assistência Técnica Petrobras, 2022. 15 p.

SAHOO, M.; SAHU, S. **Principles of Metal Casting**. 3. ed. [S. l.]: McGraw Hill, 2014. 816 p. ISBN 978-0071789752.

S&P GLOBAL. ISO (org.). **INTERNATIONAL STANDARD ISO 13732-1: Ergonomics of the thermal environment — Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces**. 1. ed. Vernier, Geneva: International Organization for Standardization, 2006. 50 p.

S&P GLOBAL. ISO (org.). **INTERNATIONAL STANDARD ISO 23062: Foundry machinery - Safety requirements for molding and coremaking machinery and associated equipment**. 1. ed. Vernier, Geneva: International Organization for Standardization, 2022. 50 p.

STEFANESCU, D.M. et al, (org.). **ASM Handbook: Volume 15, Casting**. 4. ed. [S. l.]: ASM International, 1998. 2002 p.

STEFANESCU, D.M. **Science and Engineering of Casting Solidification**. 2. ed. Columbus, OH: Springer, 2009. 412 p. ISBN 978-0-387-74612-8.

SUPERGASBRAS. **Qual a vantagem do poder calorífico do GLP?**. [S. l.]: SHV Gas Brasil Ltda, 2016. Disponível em: <https://www.supergasbras.com.br/super-blog/negocio/2021/qual-a-vantagem-do-poder-calorifico-do-glp>. Acesso em: 15 nov. 2022.

TECHNAVIO. **Non-ferrous Castings Market by Type, Application, and Geography: Forecast and Analysis 2023-2027**. [S. l.]: Infiniti Research, 2023. Disponível em: <https://www.technavio.com/report/non-ferrous-castings-market-industry-analysis>. Acesso em: 15 maio 2023.

ULTRAGAZ. Quantos metros cúbicos tem um botijão de gás?. In: **O que você precisa saber sobre o botijão de gás**. [S. l.]: Ultragaz, 2022. Disponível em: <https://www.ultragaz.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-botijao-de-gas>. Acesso em: 15 nov. 2022.

YAMAHA. **Catálogo de Peças: MT03A (B094) BRASIL**. 1. ed. Brasil: Yamaha Motor do Brasil Ltda, 2019. 77 p.