

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL VINICIUS FROZA

**USO DE MOLDE PERMANENTE NA FABRICAÇÃO DE PANELA DE ALUMÍNIO
FUNDIDO**

PATO BRANCO

2023

GABRIEL VINICIUS FROZA

**USO DE MOLDE PERMANENTE NA FABRICAÇÃO DE PAINEL DE ALUMÍNIO
FUNDIDO**

Use of permanent mold in the manufacture of cast aluminum pan

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Maria Nalu Verona Gomes.

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL VINICIUS FROZA

**USO DE MOLDE PERMANENTE NA FABRICAÇÃO DE PAINEL DE ALUMÍNIO
FUNDIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23 de junho de 2023

Maria Nalu Verona Gomes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Silvana Patricia Verona
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Geocris Rodrigues dos Santos
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO
2023

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio incondicional durante meus anos de graduação, sobretudo meus pais Sadimar e Eleni.

Aos meus amigos que compartilharam de bons momentos sempre demonstrando grande parceria.

Aos professores pelos conhecimentos transmitidos durante a graduação.

A Deus por me abençoar durante esta jornada.

RESUMO

Este trabalho avaliou o uso de molde permanentes na fabricação de painéis de alumínio fundido no método de fundição por gravidade. Partindo de uma coquilha existente, foi desenvolvido um molde macho para a fabricação de um lote de peças para que pudessem ser registrados e analisados os parâmetros utilizados na produção das peças. Buscou-se com o conhecimento teórico adquirido, fabricação da ferramenta e análise de parâmetros para compreender o funcionamento de moldes permanentes no processo de fundição. Os dados registrados para análise foram a temperatura do alumínio no vazamento, temperatura do molde metálico anterior ao enchimento e o tempo aproximado de solidificação. Posteriormente a fabricação do lote de peças utilizando a ferramenta desenvolvida, analisou-se cada peça vazada e relacionando aos parâmetros de produção buscou-se compreender a relação de cada parâmetro com os defeitos de produção apresentados. Os resultados apontaram para uma falha de preenchimento do molde, originada possivelmente por um errado posicionamento do canal de enchimento na coquilha.

Palavras-chave: molde permanente; fundição por gravidade; alumínio fundido.

ABSTRACT

This paper evaluated the use of permanent mold in the manufacture of cast aluminum pans in the gravity casting method. Starting from an existing tool, a mold was developed for the manufacture of a batch of parts so the parameters used in the production of the parts could be registered and analyzed. With the acquired theoretical knowledge, tool manufacturing and parameter analysis, we sought to understand the functioning of permanent molds in the foundry process. The data recorded for analysis were the pouring aluminum temperature, the both part of mold temperature prior to filling and the approximate time of solidification. Subsequently to the manufacture of the batch of parts using the developed tool, each casted pan was analyzed and relating to the production parameters, it was sought to understand the relationship of each parameter with the production defects presented. The results pointed to a mold cavity filling failure, possibly caused by a wrong positioning of the pouring cup in the mold.

Keywords: permanent mold; gravity casting; cast aluminum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de Alimentação de um molde	13
Figura 2 - Ilustração do diagrama de equilíbrio de uma liga Al-Si	14
Figura 3 - Exemplos de falhas de solidificação em peças fundidas	15
Figura 4 - Comparação entre panela bruta e panela acabada	18
Figura 5 - Medidas do Produto Bruto Panela 16	19
Figura 6 - Desenho esquemático da coquilha disponibilizada para a fabricação das panelas 16	19
Figura 7 - Esquemático do sistema pneumático	21
Figura 8 - Representação dos pontos de medição de temperatura de coquilha (superior) e molde (inferior)	23
Figura 9 - Representação do termômetro utilizado na obtenção da temperatura do alumínio líquido	24
Figura 10 - Representação da ferramenta desenvolvida em vista explodida	25
Figura 11 - Desenho esquemático do molde desenvolvido para a fabricação da Panela 16	26
Figura 12 - Representação do funcionamento do sistema de extração.	26
Figura 13 - Tinta Dycote 11 aplicada sobre o molde	27
Figura 14 - Imagem da ferramenta desenvolvida montada em cavalete	27
Figura 15 - Pontos de rechupe no fundo de peças produzidas	29
Figura 16 – Rachaduras/trincas encontradas nas panelas produzidas	29
Figura 17 - Peças que apresentam falha no último terço/solidificação	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Tema e problema	9
1.2	Objetivos	9
1.2.1	Objetivo geral	9
1.2.2	Objetivos específicos.....	9
1.3	Justificativa	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Conceitos gerais	11
2.2	Solidificação	14
2.3	Molde permanente	16
2.4	Materiais de revestimento do molde	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1	Escolha da peça a ser fabricada	18
3.2	Escolha das ferramentas de produção	19
3.3	Projeto da ferramenta	20
3.3.1	Molde e coquilha	20
3.3.2	Sistema de extração.....	20
3.4	Escolha de tintas de revestimento do molde	21
3.5	Dados do processo de produção	22
3.5.1	Temperatura do molde e coquilha.....	22
3.5.2	Temperatura de vazamento do alumínio	23
3.5.3	Tempo aproximado de solidificação	24
4	RESULTADOS OBTIDOS	25
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O processo de fundição é um método de fabricação de peças em que o metal em sua forma líquida é despejado em um molde com a forma desejada para a peça solidificada. Durante o processo ocorrem mudanças de estado na matéria e reações químicas na liga do metal trabalhado (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Apesar de ser um método milenar de fabricação, o processo evoluiu para ser um dos mais versáteis para a fabricação de peças. É também um dos métodos mais econômicos para se produzir diversos componentes metálicos (BALDAM; VIEIRA, 2014). Dentre os diversos processos de fundição destaca-se neste trabalho a fundição por gravidade em molde permanente.

Moldes são negativos de uma peça, isto é, possuem cavidades com o formato da peça desejada, onde será despejado o metal líquido, o material de construção e a forma de utilização classificam os moldes em descartáveis, reutilizáveis ou permanentes (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). Aqueles fabricados em areia verde são considerados como reutilizáveis, pois a areia é reaproveitada na modelagem. Já os fabricados em metal, são considerados moldes permanentes, pois são utilizados para a fabricação de diversas peças sem a necessidade de nova modelagem.

Segundo dados da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), em 2021 o setor empregou mais de 61.000 trabalhadores e faturou mais de US\$ 10 bilhões por 890 empresas em sua maioria de médio e pequeno porte. A ABIFA também afirma que o Brasil é um país autossuficiente em matéria-prima e na produção de ferroligas, exportando um excedente de 40% da produção nacional, se tratando exclusivamente de ligas de alumínio esse valor é pouco maior que 20%. No mercado interno a produção destina-se principalmente à indústria automotiva (40%), indústrias de bens de capital (14,2%) e ferroviária (8,2%). (REVISTA FUNDIÇÃO & MATÉRIAS-PRIMAS, 2022).

O Sudoeste do Paraná possui a maior concentração de indústrias de alumínio do Estado, com mais de cem empresas atuando no ramo e gerando acima de dois mil empregos diretos. (PEGORARO, 2019). Essa aglomeração acabou formando para o setor um Arranjo Produtivo Local (APL), isto é, uma associação de empresas produtoras que defende seus interesses junto aos órgãos de governo, associações empresariais, sindicatos, instituições de crédito, de apoio, ensino e pesquisa. Segundo informações do APL, apenas uma parte dessas empresas trabalha com alumínio

fundido, e na maioria das indústrias utiliza-se processos de conformação e repuxo de chapas de alumínio para a fabricação de seus produtos. (APL, 2014).

1.1 Tema e problema

Considerado o fato de que, controlar a grande quantidade de variáveis pertinentes ao processo de fundição (temperatura de superfície, velocidade de vazão, taxa de resfriamento e outros) envolve desafios à sua complexidade, entre as quais, uso de equipamentos de aferição adequados, melhores técnicas de controle de produção, e ferramentas específicas, neste estudo o tema está delimitado ao processo de fundição de alumínio por gravidade vazado em molde permanente para fabricação de painéis de alumínio.

Quanto à possibilidade de redução de custo e melhoria na qualidade proporcionada por este método de produção, busca-se responder: “É possível fabricar painéis de alumínio fundido utilizando molde permanente e com restrições de tecnologia e investimento relacionadas ao processo de fundição por gravidade?”

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Aplicar de forma prática o uso de moldes permanentes na fabricação de painéis de alumínio na técnica de fundição por gravidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver um conjunto de ferramentas (molde e coquilha) que permitam a produção de painéis de alumínio;
- b) Controlar e registrar parâmetros de produção a fim de compreender o sucesso ou falha do projeto;

1.3 Justificativa

Embora a evolução tecnológica em processos de produção e controle de informação tenha apresentado grande avanço nas últimas décadas, nem todos os setores de produção e serviços têm acesso a tais ferramentas e sistemas, seja pelo

elevado investimento ou pela ausência de conhecimento técnico em determinadas funções de trabalho que impossibilitem a aplicação em determinados processos, ou ainda por incompatibilidades do processo com a fabricação de certos produtos.

Tome-se como exemplo do exposto a fundição de alumínio no processo de fabricação de utensílios de uso doméstico, como painéis, frigideiras e tachos. Uma atividade que devido às características do processo exige que parte da modelagem em areia verde seja feita manualmente para a produção de cada peça fundida em molde semipermanente. Esta técnica de produção abre espaços para que ocorram falhas na fabricação das peças, como o posicionamento errado no encaixe do molde, que pode acarretar na perda de um lote inteiro de produção.

Diante desse cenário, observou-se a possibilidade de utilizar o conjunto de moldes permanentes na fabricação de painéis de alumínio, uma vez que o processo pode resultar em aumento significativo de produção e de qualidade das peças fundidas.

O proposto neste estudo se justifica pela importância em aprimorar os conhecimentos acadêmicos em Engenharia Mecânica e, por se tratar de um tema relevante ao setor de fundição de painéis pois apresenta dados de um processo de fabricação que prevê aumento de qualidade dos produtos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos gerais

A fundição é um processo de fabricação que possibilita obter peças com formas simples ou complexas através da fusão da matéria prima, em que o metal líquido é colocado no molde o qual a cavidade tem a forma da peça ou objeto desejado. É um processo tido como um dos mais polivalentes processos de fabricação e, pode ser utilizado em diversos tipos de metais, como aços, zinco, magnésio, cobre, alumínio, ferros fundidos entre outros.

Trata-se de um método milenar que propiciou a evolução da humanidade, na medida em que se pode fabricar peças únicas ou em séries, de tamanhos e modelos diferentes e, ainda, é o método mais econômico de produção de componentes metálicos, em que se pode dar origem as peças no seu estado final ou não, passando por processos de conformação mecânica. (BALDAM; VIEIRA, 2014).

De acordo com Baldam e Vieira (2014), a fundição é considerada um processo mais curto entre a matéria-prima metálica líquida e a peça semiacabada em estado de uso, por isso, é considerada um processo de fabricação de peças metálicas.

As mudanças dos metais e ligas em peças para utilização em elementos e conjuntos mecânicos são diversas, em quantidade e variedade, no entanto, fundição é acompanhada por processos e etapas onde a escolha de cada passo depende da geometria da peça, do tipo de liga a ser fundida, do número de peças a ser produzida e da qualidade superficial desejada. (BALDAM; VIEIRA, 2014).

Segundo Baldam e Vieira (2014) os processos da fundição são: fundição em molde de areia; fundição de precisão (cera perdida); fundição de moldes permanentes por gravidade, objeto desse estudo; fundição sob pressão; fundição centrífuga; fundição contínua ou lingotamento contínuo; fundição no estado semissólido – tixoconformação. Processos estes que são utilizados na fundição dos metais de acordo com a restrição e exigência do produto fabricado.

De acordo com Kiminami, Castro e Oliveira (2013), o processo de fundição em molde de areia é o mais usado, responsável pela maior parte das toneladas de fundidos produzidos pelas indústrias do mundo todo. Tal processo consiste no vazamento do metal fundido no molde de areia, onde o metal se solidifica e a peça fundida é retirada com a quebra do molde. A maioria das ligas pode ser fundida em moldes de areia, pois é um dos processos que podem utilizar metais de alto ponto de

fusão, como aços, níquel e titânio. Nesse método pode-se produzir peças e componentes de peças em diversos tamanhos e quantidades. (GROOVER, 2014).

Na fundição por moldes permanentes por gravidade são utilizados moldes onde o preenchimento não precisa de força de injeção ou centrifuga, somente da ação da gravidade. O molde permanente nesse processo é fabricado de aço, ferro fundido, bronze ou grafite, e pode ser utilizado aproximadamente 250.000 vezes, compostos por duas ou mais partes que são projetadas para abertura e fechamento para extração da peça, as partes também tem a função de conter os canais de vazamento e massalote. (KIMINAME; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Será melhor detalhado no item 2.3, por ser o modelo escolhido para este estudo.

No processo de fundição sob pressão o metal fundido é injetado na cavidade do molde com auxílio de força mecânica, para garantir o preenchimento pleno do molde, que também é feito em molde metálico. (KIMINAME; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Os moldes são fabricados de aço ferramenta, fortes e resistente a temperaturas elevadas, chamadas matrizes. São construídas em duas partes, fechadas no momento do vazamento do metal líquido, que será bombeado em uma cavidade da matriz sob pressão, preenchendo todo o espaço e cavidade. (BALDAM; VIEIRA, 2014).

Após serem utilizadas as matrizes são resfriadas com água, no intuito de evitar superaquecimento, aumentar sua vida útil e evitando defeitos nas peças. Esse processo pode ser dividido em dois tipos: de câmara fria e de câmara quente. “Em máquinas câmara-quente, o metal é fundido num contêiner anexo a máquina, e um êmbolo é usado para injetar o metal líquido sob alta pressão na matriz”. (GROOVER, 2014, p. 128). O desgaste é uma desvantagem nesse processo, pois parte do sistema de injeção fica imersa no metal fundido, limitando em suas aplicações os metais de baixo ponto de fusão como zinco, estanho, chumbo e magnésio.

Segundo Groover (2014, p.128), nas “máquinas de fundição sob pressão câmara-fria, metal fundido é vazado numa câmara não aquecida a partir de um contêiner externo contendo o metal, e um embolo é usado para injetar metal em alta pressão”. A operação de produção é alta, mas comparando-se ao método por câmara-quente os ciclos são mais longos devido a transferência do metal líquido de uma fonte externa até a câmara. As máquinas utilizadas podem ser usadas para fundir metais

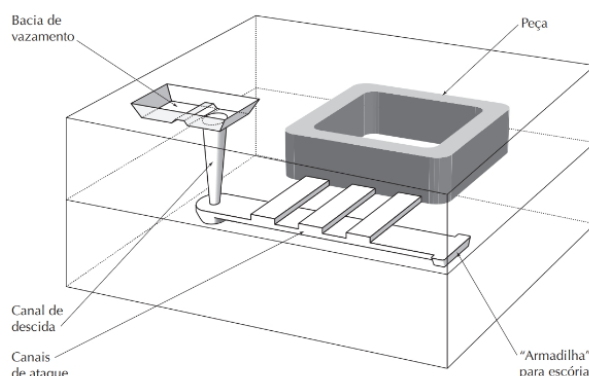
de alto ponto de fusão como alumínio, latão e ligas de magnésio, e os de baixo ponto de fusão, zinco, estanho e chumbo. (GROOVER, 2014).

A fundição por gravidade pode ser definida pelo processo em que o metal líquido é derramado e preenche toda a cavidade do molde apenas pela ação da gravidade. Para que isso seja possível é necessário que seja considerado na concepção do molde as características da peça e demais condições de trabalho. (TÂMEGA, 2017).

Vazamento ou enchimento pode ser definido como o ato de transferir para o molde o metal líquido por meio de uma panela de vazamento. Temperatura, limpeza da panela e velocidade de vazamento são variáveis importantes nessa etapa da produção. (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). Velocidades altas de preenchimento podem provocar turbulência no fluxo do metal pelo molde, fazendo o metal absorver gases e também danificar o molde.

O sistema de alimentação é parte do molde em que o metal é vazado, e tem o objetivo de garantir as melhores condições para que toda a cavidade do molde seja preenchida sem retenção de gases e oxidação do metal (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Os sistemas de alimentação são normalmente divididos em bacia de vazamento, onde se despeja o metal da panela de vazamento, o canal de descida, canal de distribuição e canais de ataque, que são projetados para garantir um melhor fluxo de entrada do metal na cavidade do molde referente a peça, como pode ser visto na figura 1.

Figura 1 - Sistema de Alimentação de um molde



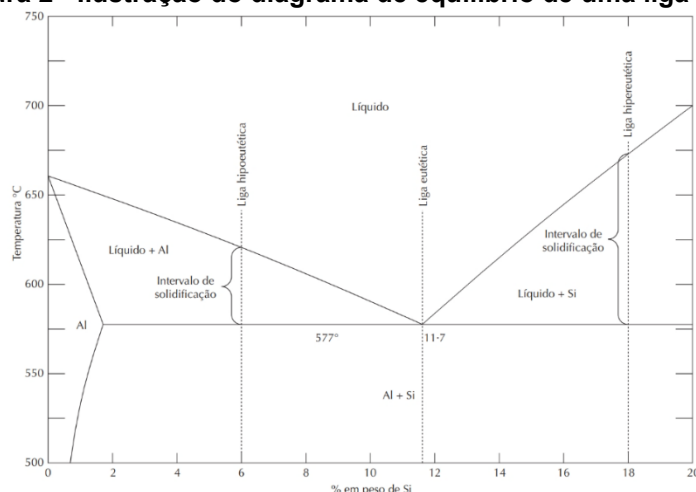
Fonte: (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, (2013)

É possível observar que o sistema de alimentação pode ser bastante complexo e consumir uma quantidade considerável de metal que não será aproveitado na peça final.

2.2 Solidificação

A solidificação é o processo de mudança de fase do metal líquido para material sólido e é determinante na microestrutura e defeitos apresentados em uma peça fundida. Essa transformação é dependente da composição da liga do metal, que possui uma faixa específica de temperatura para solidificar, e também das peculiaridades do processo, como material do molde. Para ligas de alumínio-Silício a faixa de solidificação está entre 620°C e 577°C, conforme mostra o diagrama da figura 2. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Figura 2 - Ilustração do diagrama de equilíbrio de uma liga Al-Si

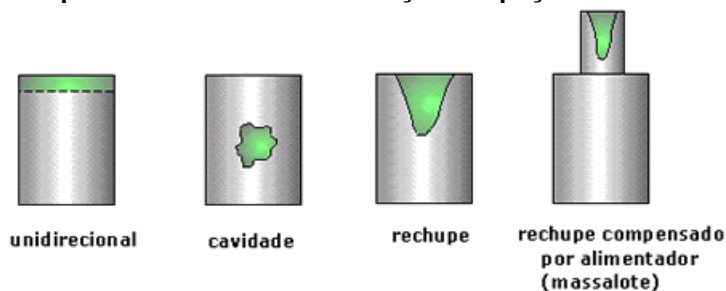


Fonte: (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, (2013)

O diagrama de equilíbrio apresentado na figura 2, representa as temperaturas de transformação de fases do metal baseado no percentual de silício presente em ligas de alumínio-silício.

Para que as peças não apresentem defeitos como rechupes, trincas de contração, porosidades, cavidades e/ou concentração de impurezas, faz-se necessário o controle da solidificação, também chamado de solidificação direcional (TÂMEGA, 2017). A figura 3 apresenta alguns defeitos que podem ocorrer em peças fundidas.

Figura 3 - Exemplos de falhas de solidificação em peças fundidas



Fonte: Adaptado de fonte: CIMM (2010)

Na figura 3 são representados na cor verde alguns dos defeitos de solidificação que podem ser encontrados em peças fundidas.

Para realizar o controle da solidificação pode ser adotado o uso de massalotes, que são reservas de material localizados em pontos da peça de maior tempo para solidificar, afim de evitar defeitos de fabricação. Para cálculo do tempo para a transformação para estado sólido, é possível utilizar a equação de Chvorinov (equação 1)(TÂMEGA, 2017).

$$t = C \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2 \quad \text{Equação 1}$$

Na equação t expressa o tempo, C representa uma constante dependente de condições do molde, V significa o volume da parte da peça em estudo e S a área da mesma parte da peça que está em contato com o molde.

Quando submetidos a mudança de estado líquido para sólidos, os metais tendem a apresentar um comportamento de contração em seu volume. No caso de ligas de alumínio a contração é expressa linearmente e, de acordo com Tâmega (2017) apresenta valor de 1,3%. Tal variação dimensional deve ser considerada no projeto do molde, e se necessário adotar o uso de massalotes, para garantir a peça as características desejadas e evitar trincas decorrentes da contração.

A distribuição de temperatura dentro da peça fundida dita a solidificação, taxas de resfriamento, microestrutura, propriedades mecânicas e tensões residuais que determinam a forma final da peça e a ocorrência de rachaduras. A análise da temperatura e fluxo de calor fornece um contexto para examinar os efeitos gerais das variáveis da fundição, dessa forma se aumentar a velocidade de vazamento do metal por consequência aumentará a taxa de aquecimento do molde, que afeta gradientes

de temperatura levando a um maior tempo de resfriamento. (GRANDFIELD; MCGLADE, 1996)

2.3 Molde permanente

Dentre os materiais que podem ser fundido nos moldes permanentes são: alumínio, magnésio, ligas a base de cobre e ferro fundido. No entanto, o ferro fundido exige uma temperatura elevada de vazamento, isso pode danificar os moldes e diminuir a vida útil. Dependendo do tipo da peça e do formato, são utilizados machos, que dá forma nas superfícies interna das peças. (GROOVER, 2014). Segundo Groover (2014), os machos podem ser confeccionados de metal, mas serem mecanicamente colapsáveis, permitindo a sua retirada, se for difícil ou impossível, os moldes são confeccionados de areia endurecida por aglomerantes e o processo é denominado fundição em moldes semipermanentes.

Baldam e Vieira (2014), expõem que o processo por moldes permanentes se limita a fabricação de peças pequenas, devido aos valores dos moldes serem mais substanciais, sendo mais viável quando a quantidade de peça a ser produzida for alta. Esse processo pode ser automatizado, permite a obtenção de peças bem acabadas, com taxa de produção de 5 a 100 conjuntos/hora, por conter cavidade para mais de uma peça, e com maior resistência mecânica.

Esse processo pode ser aplicado em peças e conjuntos mecânicos como, pistões, engrenagens e cabeçote de cilindros. (KIMINAME; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

A fundição em moldes metálicos, são geralmente fabricados em aço ou ferro fundido e apresentam um custo de fabricação elevado, sendo sua utilização mais adequada para produção de peças em grandes escalas (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). São chamados também por moldes permanentes por produzirem um grande número de peças sem a necessidade de serem remodelados, em oposição ao que é feito em processos que utilizam areia verde, ou cera perdida.

O material de construção desse tipo de molde deve apresentar uma temperatura de fusão maior do que a liga de metal das peças nele fundidas, e também deve ser resistente a fadiga térmica a qual será exposto durante sua vida útil no processo de produção. Para facilitar o fluxo do metal no preenchimento do molde é comum que ele seja pré-aquecido antes do início da produção (TÂMEGA, 2017).

Esse tipo de modelagem possibilita às peças uma maior uniformidade, melhores tolerâncias dimensionais, melhores propriedades mecânicas e também um excelente acabamento superficial, quando comparados a outras técnicas de moldagem (BALDAM; VIEIRA, 2014).

O molde pode sofrer adesão e corrosão originada pela interação química entre o material do molde e a liga de metal fundida, que gera formação de compostos intermetálicos causando agarramento da peça durante a extração.(VENDRAMIM; ENOKIBARA, 2008). É também possível associar estes fenômenos a temperatura de vazamento muito alta, ciclo de trabalho rápido, e quantidade insuficiente de desmoldante.

Segundo Vendramim e Enokibara (2008) o projeto do molde deve levar em consideração alguns aspectos para que tenham uma maior vida útil, como evitar grande variação de massa e cantos vivos, e apresentar baixa rugosidade. Também é recomendado que o molde seja pré-aquecido a 300°C antes do seu uso, utilização de tinta desmoldante, e manter molde aquecido a 150°C quando não estiver em uso, se possível.

2.4 Materiais de revestimento do molde

O revestimento na interface do molde é um fator muito importante no controle da transferência de calor entre o metal líquido e o molde, portanto tem grande influência na taxa de solidificação e no desenvolvimento da microestrutura apresentada na peça. O revestimento também é responsável pela integridade mecânica protegendo o molde de sofrer choque térmico pelo metal fundido, e além disso pode ser usado para controlar a taxa de solidificação e promover o preenchimento completo da cavidade das coquilhas (HAMASAIID *et al.*, 2007).

Existem também revestimentos desmoldantes, que são tipicamente produzidos a base de grafite. A principal função desta aplicação é lubrificar as superfícies do molde para facilitar a desmoldagem da peça, todavia esse tipo de revestimento não possui características isolantes (WALLACE; SCHWAM; HONG, 2001).

A camada de revestimento tem pouca influência na transferência de calor entre o molde e o metal enquanto este ainda está em seu estado líquido, e a resistência térmica está mais ligada a porosidade e espessura do revestimento nesse estado do processo do que relacionado a sua composição (HAMASAIID *et al.*, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Escolha da peça a ser fabricada

Em razões dos custos de material para o desenvolvimento de uma nova ferramenta, foi escolhida para a fabricação uma peça considerada pequena quando comparada à outras panelas de tamanho comercial, chamada de Panela 16, em referência ao seu diâmetro de 16 cm no encaixe da tampa. O produto passa por diversos processos de produção desde a fundição até o estado de produto acabado, dentre esses processos está a usinagem da peça, que garante o acabamento e a precisão dimensional necessários. Desta forma é aceito que haja variação de alguns milímetros nas dimensões da peça recém fundida, aqui denominada de Panela Bruta. A figura 4 mostra a diferença entre uma panela bruta e uma acabada.

Figura 4 - Comparação entre panela bruta e panela acabada

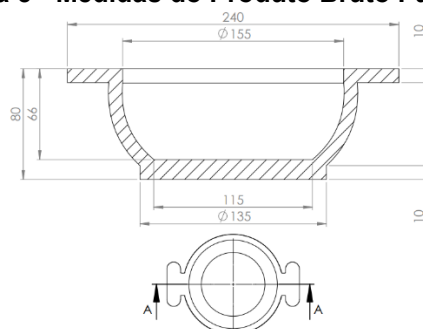


Fonte: Autoria própria (2023)

Na esquerda da figura 4 no item (a) é apresentado a peça bruta, sem passar pelos processos de usinagem que dão origem ao produto acabado (b).

É interessante que a panela bruta tenha as dimensões mais próximas possíveis do produto acabado, entretanto, existem limitações tecnológicas e exigências de mercado para que o produto fundido seja o exato produto acabado, por exemplo, a superfície precisa ser uniforme para receber as camadas de tintas que dão acabamento. Desta forma, tomou-se como base as dimensões do produto bruto, conforme desenho técnico apresentado na figura 5.

Figura 5 - Medidas do Produto Bruto Panela 16



Fonte: Autoria própria (2023)

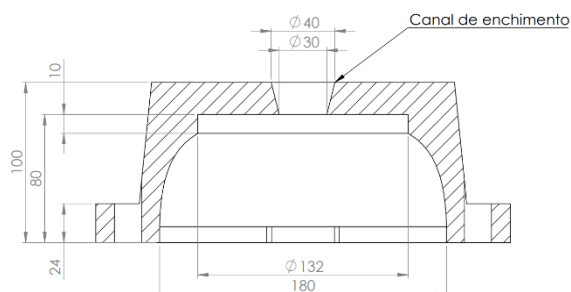
A figura 5 apresenta as dimensões em milímetros da panela bruta desejada após o processo de fundição.

3.2 Escolha das ferramentas de produção

Foi optado para realizar os testes da ferramenta projetada, apresentada na figura 9, o processo de fundição por gravidade, que é comumente encontrado nas pequenas fundições de panelas de alumínio do sudoeste do Paraná.

Em função de limitações de custos, foi estabelecido que a parte superior do molde, também chamada de coquilha, que é responsável por dar forma ao desenho externo da peça, seria um modelo já utilizado e que foi cedido para realização deste estudo. Isto limitou o desenvolvimento no que diz respeito a bacia de vazamento e canais de descida, distribuição e canal de ataque, além da linha de partição da ferramenta. A figura 6 representa a coquilha utilizada no teste.

Figura 6 - Desenho esquemático da coquilha disponibilizada para a fabricação das panelas 16



Fonte: Autoria própria (2023)

Pode ser observado na figura 6 que o canal de enchimento está posicionado no centro da peça que possui diâmetro de 180mm em sua maior dimensão.

3.3 Projeto da ferramenta

Toda a ferramenta foi projetada em *software* de CAD 3D (*SolidWorks*) com base nas dimensões da peça desejada, a panela 16. Foram projetados o molde, o mecanismo de extração da peça e o encaixe de todas as peças em cavalete para a produção. A ferramenta é dividida em 3 principais partes: A coquilha, que é a parte superior do molde e que o desenvolvimento estava limitado ao modelo cedido; o molde inferior que dá forma a parte interna da panela e o sistema pneumático de extração da peça.

3.3.1 Molde e coquilha

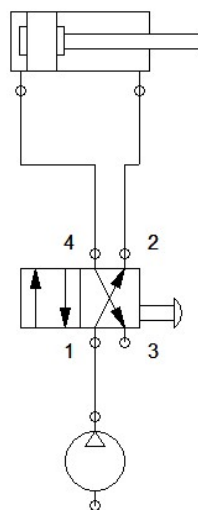
O material escolhido para a construção do molde foi o Ferro Fundido cinzento, por ser um material de conhecida resistência a fadiga térmica, e também por ter uma temperatura de fusão muito mais elevada, acima de 1140°C (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2020), do que a da liga de alumínio trabalhada na fundição.

Apesar de conceitualmente molde ser toda a ferramenta que dá forma a peça fundida, é comum haver nomenclatura do conjunto como molde-coquilha, neste trabalho é chamado de molde apenas a parte que dá forma ao desenho interno da peça, enquanto coquilha é a parte superior já apresentada na figura 6.

Enquanto o desenvolvimento da coquilha foi limitado ao uso da ferramenta cedida, o molde foi projetado utilizando o *software SolidWorks* considerando as dimensões da panela 16 apresentadas na figura 5 e todo o sistema de extração e fixação junto ao cavalete da produção.

3.3.2 Sistema de extração

Para solucionar os problemas de extração presentes em processos de fundição com moldes metálicos, provenientes da contração linear apresentada pela solidificação do alumínio, foi projetado um sistema pneumático, apresentado na figura 7, para auxiliar na extração da peça. Com esse sistema buscou-se encontrar uma forma de empurrar a peça para fora de contato com o molde.

Figura 7 - Esquemático do sistema pneumático

Fonte: Autoria própria (2023)

As partes mecânicas do sistema de extração, como anel de fixação, cilindro pneumático e pinos de extração, foram projetadas com o *software SolidWorks*..

3.4 Escolha de tintas de revestimento do molde

Dentre as tintas de isolamento disponíveis para o uso, foi escolhido se trabalhar com a *Dycote 34* diluída em água na proporção 1:5, conforme instrução do fabricante e aplicada de forma pulverizada, utilizando pistola de pintura de alta pressão da marca Arprex de modelo MOD-1, em toda área da coquilha que entra em contato com o metal líquido. A escolha foi baseada na alta rugosidade oferecida pela tinta e na boa fluidez que proporciona ao metal. Os dados das tintas fornecidos pelo fabricante são mostrados no quadro 1.

Quadro 1 - Informações das tintas isolante e desmoldante selecionadas

DYCOTE	RUGOSIDADE 1=GROSSA 5=FINA	DILUIÇÃO (DYCOTE- ÁGUA)	APLICAÇÃO
DYCOTE 34	2	1:3 – 1:5	Alta isolação Acabamento rugoso Boa fluidez do metal Versão ESS: Maior poder de fixação Indicação: Carter, Carcaças e Coletores
DYCOTE 11	4	1:10 – 1:20	Dispersão de grafite semi-coloidal Sem agente fixador Indicação: Agente desmoldante

Fonte: Adaptado de FOSECO INTERNATIONAL LIMITED, (2019)

Já a tinta desmoldante escolhida para o teste foi a *Dycote 11* que tem base em grafite, diluída em água na proporção 1:10 conforme indicação do fabricante, e foi aplicada também por pulverização, no mesmo equipamento utilizado para a tinta de isolamento, somente no molde, pois é preferível que a peça se solte mais facilmente do molde do que em relação a coquilha por questões de praticidade.

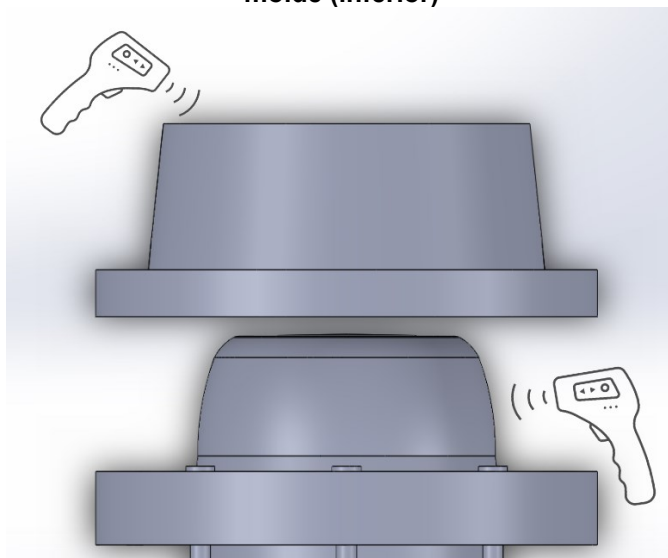
3.5 Dados do processo de produção

Para o uso e validação da ferramenta proposta, foi fabricado um lote de 10 peças fundidas em um único dia com condições de temperatura e umidade do ambiente não controladas. As peças foram enumeradas de 1 a 10, e foi anotado em tabela os seguintes dados de produção: Temperatura externa da coquilha na iminência do vazamento, temperatura do molde na iminência do vazamento, tempo aproximado de solidificação e temperatura do alumínio líquido. O intuito foi de conseguir analisar a panela solidificada e relacionar com os dados registrados para então entender qual a melhor janela de operação da ferramenta.

3.5.1 Temperatura do molde e coquilha

Baseado nos dados prévios de produção, os moldes foram aquecidos por chamas de gás GLP até atingirem a temperatura de aproximadamente 300°C. O registro da temperatura ocorreu com um termômetro infravermelho da marca *Wintact* modelo *WT326D*. As temperaturas foram registradas cerca de 10s antes do início do vazamento de alumínio de cada peça. A figura 8 mostra os locais onde foram obtidos os dados de temperatura no molde e coquilha.

Figura 8 - Representação dos pontos de medição de temperatura de coquilha (superior) e molde (inferior)



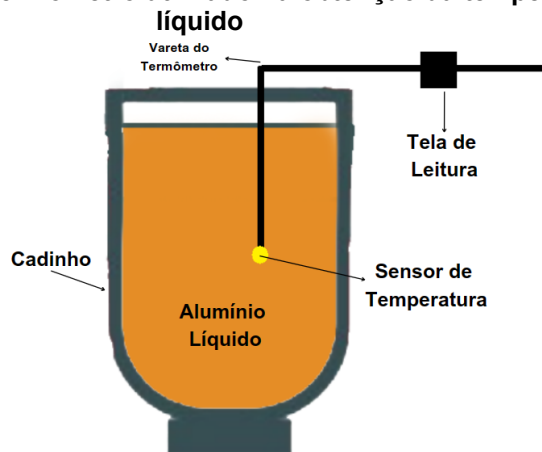
Fonte: Autoria Própria (2023)

Por questões de segurança, foi obtida a temperatura da parte externa da coquilha e não da superfície que entra em contato com o alumínio, já a temperatura do molde foi obtida na superfície que entra em contato com o alumínio.

3.5.2 Temperatura de vazamento do alumínio

A temperatura de vazamento do alumínio foi definida em 650°C , que já é suficiente para realizar a fusão deste metal, conforme indicado no diagrama de fases do alumínio mostrado na figura 2. A temperatura do metal líquido foi obtida por meio de um termômetro do tipo sensor J acoplado em um controlador de temperatura *Delta DTK*. Para realização da medição parte do equipamento é mergulhado no alumínio que está no cadinho, e assim obtém-se a temperatura. Conforme representado na figura 9.

Figura 9 - Representação do termômetro utilizado na obtenção da temperatura do alumínio líquido



Fonte: autoria própria (2023)

O controle do aquecimento do alumínio é feito por meio da queima de combustível (óleo BPF) na base do cadinho, o que dificulta haver precisão na temperatura de trabalho. Durante os testes tentou-se manter a temperatura de trabalho estável, apesar de apresentar algumas variações.

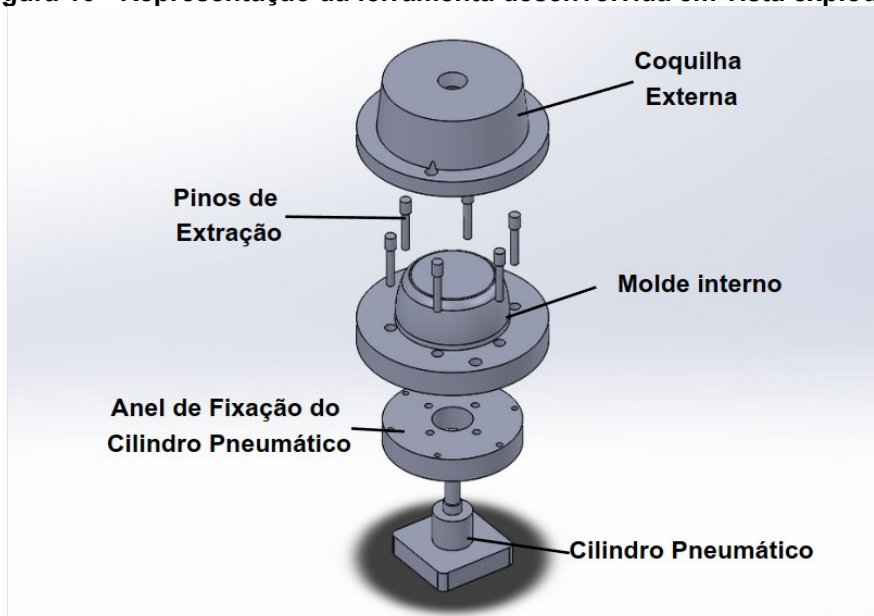
3.5.3 Tempo aproximado de solidificação

O tempo de solidificação é um fator importante tanto para a produtividade da ferramenta no cenário de uma empresa, mas principalmente para indicar se a solidificação direcional está acontecendo e quais os possíveis pontos de superaquecimento do alumínio. Todavia, pela impossibilidade de obter um valor exato com as ferramentas disponíveis, como forma de acompanhar a solidificação direcional, a tomada de tempo se deu pelo momento inicial do enchimento do molde até a solidificação completa do canal de vazamento, com o auxílio de cronômetro digital.

4 Resultados obtidos

A ferramenta projetada possui 3 principais partes: A coquilha, que é a parte superior do molde e que o desenvolvimento estava limitado ao modelo cedido; o molde inferior que dá forma a parte interna da panela e o sistema pneumático de extração da peça. Na figura 10 é apresentado uma vista explodida da ferramenta e suas partes projetadas em *SolidWorks*.

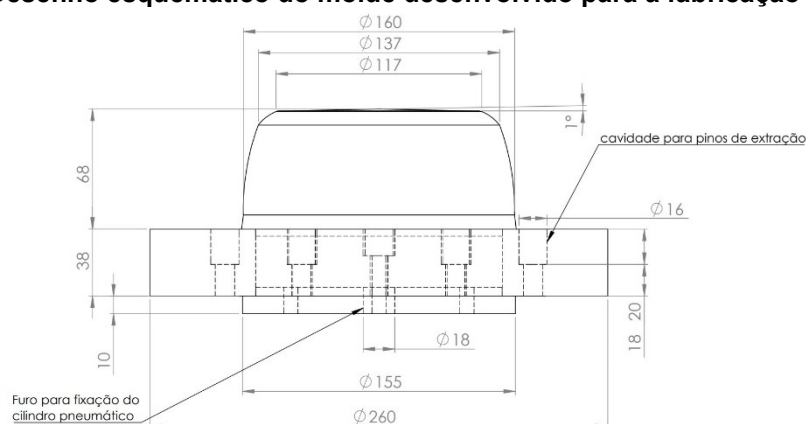
Figura 10 - Representação da ferramenta desenvolvida em vista explodida



Fonte: Autoria Própria (2023)

O molde fabricado em ferro fundido cinzento em acordo com as medidas mostradas na figura 11. No projeto do molde, além de atender as dimensões da panela bruta, também já foi concebido a fixação e disposição de alguns itens do sistema de extração.

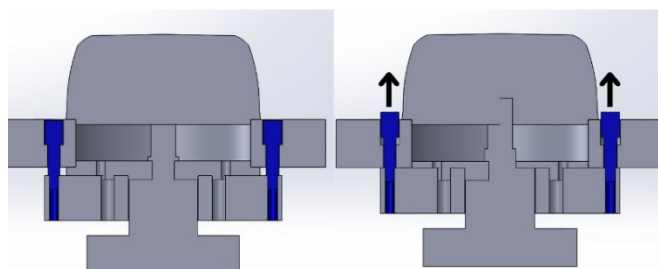
Figura 11 - Desenho esquemático do molde desenvolvido para a fabricação da Panela 16



Fonte: Autoria própria (2023)

O sistema de extração foi projetado e montado a partir de um sistema pneumático que force a peça a desprender do molde. Dessa forma, pinos de extração foram distribuídos na região da circunferência do encaixe de tampa da panela fundida, ou seja, na região de maior diâmetro. A figura 12 ilustra o funcionamento do sistema projetado.

Figura 12 - Representação do funcionamento do sistema de extração.
Na esquerda, o sistema em posição desligado, na direita o sistema de extração acionado



Fonte: Autoria própria (2023)

O sistema de extração se mostrou eficiente e cumpriu seu papel, nenhuma das peças apresentou grande dificuldade em se soltar do molde. Em momentos que as peças apresentavam maior resistência em desprender do molde, ocorria a reaplicação da tinta *Dycote 11* para a produção das peças subsequentes que não mais apresentavam resistência. A figura 13 mostra a tinta desmoldante aplicada sobre o molde.

Figura 13 - Tinta Dycote 11 aplicada sobre o molde



Fonte: Aatoria própria (2023)

A aplicação das tintas ocorreu de forma uniforme e atingiu o objetivo de isolamento e desmoldante que se esperava, demonstrando que a diluição e a aplicação das tintas foram realizadas de forma correta.

Toda a ferramenta desenvolvida foi montada em um cavalete de ferro para que pudesse ser feito um lote de peças que validasse o projeto. O molde e coquilha foram montados de forma paralela ao nível do chão da fábrica, que não apresenta uma inclinação considerável que pudesse afetar o preenchimento da cavidade da ferramenta. A figura 14 mostra a ferramenta montada em cavalete de ferro para a produção.

Figura 14 - Imagem da ferramenta desenvolvida montada em cavalete



Fonte: Aatoria própria (2023)

Realizando a análise dos dados registrados e das peças fabricadas é possível entender o que funcionou e o que apresentou problemas no processo de fabricação. Como as peças foram enumeradas o processo de relacionar os dados da produção

com as panelas fabricadas fica mais preciso, assim facilitando a análise. Tomamando como base a tabela 1 que apresenta os dados de temperatura de vazamento do alumínio, temperatura de molde e coquilha e tempo aproximado de solidificação, previstos nos itens 3.5.1, 3.5.2 e 3.5.3 do capítulo de materiais e métodos.

Tabela 1 - Dados de produção obtidos na fabricação das peças

N° da Peça Produzida	Temperatura do Alumínio Vazado (°C)	Temperatura da coquilha no momento do vazamento (°C)	Temperatura do molde no momento do vazamento (°C)	Tempo aprox. de solidificação (s)
01	649	292	337	33
02	656	305	379	41
03	664	332	404	40
04	667	350	420	45
05	667	366	443	45
06	661	368	450	50
07	664	385	468	50
08	665	391	478	46
09	667	399	484	49
10	663	405	486	51

Fonte: Aatoria própria (2023)

Observando a coluna Tempo aproximado de solidificação, na Tabela 1, é perceptível que seus valores apresentaram um padrão crescente, o que é esperado com o aumento de temperatura do molde e coquilha registrados em suas respectivas colunas. Falhas de rechupe ocorrem quando o metal se desloca de pontos quentes da peça para alimentar contrações de seções já solidificadas devido a diferença de troca de calor entre o metal e o molde em diferentes pontos da peça (FUOCO, 2017). Portanto, as falhas de rechupe nas peças 09 e 10 apresentadas na figura 15, indicam que o aumento do tempo de solidificação e das temperaturas de molde e coquilha estão relacionados ao surgimento dessas falhas.

Figura 15 - Pontos de rechupe no fundo de peças produzidas

Fonte: Autoria própria (2023)

As peças 01 e 02 apresentaram rachaduras, como destacado na figura 16, que são originadas pela contração do alumínio solidificado. Segundo Grandfield e McGalde (1996), o surgimento de trincas está relacionado a microestrutura do alumínio e a transferência de calor durante a solidificação. Como essa falha não ocorre nas demais peças, é plausível concluir que a sua origem ocorre da baixa temperatura no molde. Fazendo a análise dos dados de temperaturas somado ao que foi apresentado no parágrafo anterior, é possível afirmar que a janela de operação da ferramenta desenvolvida no que diz respeito a temperatura está aproximadamente entre 404°C e 478°C para o molde, e 332°C a 390°C para a coquilha.

Figura 16 – Rachaduras/trincas encontradas nas peças produzidas

Fonte: Autoria própria (2023)

Todas as peças apresentaram falhas na solidificação em uma região específica das peças, que foi livremente denominada de falha do terço final, referenciando que as falhas aconteceram no terço final de enchimento da peça. As

falhas não aconteceram repetidamente no exato mesmo ponto, mas sim em uma mesma região, variando de tamanho e posição na circunferência da panela. A figura 17 mostra essa falha de produção em diversas peças.

Figura 17 - Peças que apresentam falha no último terço/solidificação



Fonte: Autoria própria (2023)

Falhas de solidificação são particularmente difíceis de apontar uma única origem e até mesmo de afirmar com exatidão todas suas possíveis causas, entretanto com base nos conhecimentos adquiridos durante a graduação e as pesquisas teóricas é possível indicar alguns principais fatores que causaram este defeito. Um dos motivos pode ser uma errática solidificação direcional, isto é, ocorrer, falha de enchimento por haver solidificação do metal anterior ao preenchimento total da cavidade do molde. Outro fator pode estar relacionado com o posicionamento do canal de enchimento no centro da panela, que por ser uma peça circular não direciona todo o alumínio do enchimento por um mesmo caminho até que se preencha toda cavidade do molde.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O molde permanente foi desenvolvido e utilizado na fabricação de panela de alumínio em fundição por gravidade, porém não atingiu seu propósito de substituir o molde de areia verde no processo de produção de painéis, pois as peças produzidas apresentaram defeitos de trincas, rechupe e de enchimento do molde. Entretanto foi possível identificar as falhas do projeto que levaram a tal resultado.

Utilizar a coquilha já existente, apesar de ter sido uma forma de economizar os custos de produção se mostrou uma decisão errada, pois limitou o desenvolvimento da ferramenta, sobretudo a possibilidade de projetar um canal de enchimento em uma melhor posição que valorizasse os princípios da solidificação direcional e que pudesse fornecer uma entrada de alumínio líquido menos turbulenta na cavidade formada entre molde e coquilha.

Outro ponto limitante na validação da ferramenta foi a pequena quantidade de peças que foram produzidas no lote de teste, apenas 10 unidades. Esse fator acabou restringindo o leque de parâmetros que poderiam ser ajustados, como a temperatura do alumínio durante o enchimento. Para a fabricação das peças analisadas, este parâmetro foi pouco alterado e se houvesse produção em outras faixas de temperatura de vazamento, haveriam mais indicativos para concluir com maior precisão se as falhas do último terço ocorreram por falha na alimentação ou por falha na solidificação direcional.

Em estudos futuros é indicado trabalhar com maior controle de parâmetros de produção, que variam de acordo com a tecnologia disponível durante o processo. Trabalhar com um maior controle da temperatura de enchimento e também melhor constância de alimentação eliminam variáveis que prejudicam o entendimento dos resultados. Também é indicado desenvolver uma ferramenta que apresente um canal de enchimento mais complexo e melhor localizado, para que não ocorram falhas no enchimento da cavidade do molde, tal medida não foi tomada neste trabalho por conta do aproveitamento da coquilha disponibilizada. Ainda é sugerido que sejam fabricados mais e maiores lotes de peças, que contemplem condições de ambiente diferentes.

O estudo se mostrou satisfatório e cumpriu com seu objetivo de gerar o entendimento do uso de molde permanente na fabricação de painéis de alumínio fundido, desenvolvimento de ferramentas e controle do processo de produção e seus

desafios. Também foi indicado melhorias para os próximos estudos no tema, e o registro dos dados e procedimentos aplicados na obtenção dos resultados.

REFERÊNCIAS

- APL. **PROPOSTA AO INMETRO**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: [https://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindimetalso/aplaluminiosudoeste/uploadAddress/PROPOSTA_AO_INMETRO\[54118\].pdf](https://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindimetalso/aplaluminiosudoeste/uploadAddress/PROPOSTA_AO_INMETRO[54118].pdf). Acesso em: 15 jun. 2023.
- BALDAM, R. de L.; VIEIRA, E. A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. 2. ed. [S. l.]: Saraiva, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519746/>.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10°. [S. l.]: Grupo GEN, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. de. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. mar. 2011. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1721>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- CIMM. **Defeitos de solidificação - Inovação e Processos** | CIMM. 29 mar. 2010. Portal CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao. Acesso em: 1 jun. 2023.
- FOSECO INTERNATIONAL LIMITED. **Dycote Manual**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/pt-br/foundry/non-ferrous-foundry/die-dressings-and-coatings.html>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- FUOCO, R. **EFEITO DO SISTEMA DE CANAIS NA GERAÇÃO DE DEFEITOS DE FUNDIÇÃO**. 2017. .
- GRANDFIELD, J. F.; MCGLADE, P. T. **DC Casting of Aluminium: Process Behaviour and Technology**. 1996. .
- HAMASAIID, A.; DARGUSCH, M. S.; DAVIDSON, C.; TOVAR, S.; LOULOU, T.; RÉZAI-ARIA, F.; DOUR, G. **Effect of Mold Coating Materials and Thickness on Heat Transfer in Permanent Mold Casting of Aluminum Alloys**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 38, p. 1303–1316, 1 jun. 2007. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9145-2>.
- KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B. de; OLIVEIRA, M. F. de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. [S. l.]: Editora Blucher, 2013. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521206835/>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- PEGORARO, A. **Francisco Beltrão, o berço das indústrias de panela no Paraná**. 12 set. 2019. **Jornal de Beltrão**. Disponível em: <https://jornaldebeltroao.com.br/beltrao/francisco-beltrao-o-berco-das-industrias-de-panela-no-parana/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

REVISTA FUNDIÇÃO & MATÉRIAS-PRIMAS. **A Indústria de Fundição no Brasil**, , p. 12–18, 2022. .

TÂMEGA, F. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Arquivos%20FTP%202020/Bibliografia/LIVRO_processo_de_fundicao.pdf. Acesso em: 30 maio 2023.

VENDRAMIM, J. C.; ENOKIBARA, F. **Considerações sobre a vida útil de moldes para fundição de alumínio sob pressão**. 2008. Disponível em: http://assets.cimm.com.br/uploads/cimm/publicacao/arquivo/374/InTec_014_Fundio.Al.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.

WALLACE, J. F.; SCHWAM, D.; HONG, W. **Mold Materials For Permanent Molding of Aluminum Alloys**. 14 set. 2001. DOI 10.2172/791424. Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc737168/>. Acesso em: 1 jun. 2023.