

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MACHARIA *SHELL MOLDING* POR  
REDUÇÃO DO TEMPO DE CURA EM ESTUFA

**Chou En Lai de Azevedo**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Porto Alegre

2024

### CIP - Catalogação na Publicação

de Azevedo, Chou En Lai  
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MACHARIA SHELL MOLDING  
POR REDUÇÃO DO TEMPO DE CURA EM ESTUFA / Chou En Lai  
de Azevedo. -- 2024.  
37 f.  
Orientador: Vinícius Karlinski de Barcellos.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Machos de Areia. 2. Fundição. 3. Cura em Estufa.  
4. Resistência Mecânica. 5. Porosidades. I. Karlinski  
de Barcellos, Vinícius, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedico Aos meus pais e irmãos

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Ao técnico do Centro de Tecnologia-Laboratório de Fundição-LAFUN,  
Doutorando Engenheiro Régis F. do Amaral

Aos colegas de trabalho e à empresa STIHL Ferramentas Motorizadas.

## SUMÁRIO

<b>1.0</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2.0</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	10
2.1	OBJETIVO GERAL.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>3.0</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
3.1	PROCESSOS DE FUNDIÇÃO.....	11
3.2	FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE .....	12
3.2.1	Processo macho de areia <i>Shell Molding</i> .....	15
3.2.2	Granulometria da Areia.....	17
3.2.3	Composição da Resina e Catalisador.....	18
3.2.4	Processo de Cura dos machos de areia .....	18
<b>4.0</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	19
4.1	MATERIAIS .....	21
4.2	MÉTODOS.....	22
<b>5.0</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	26
5.1	TESTES E CONTROLES .....	26
5.1.1	Testes mecânicos de resistência a tração a quente (RTQ) e a frio (RTF) .....	26
5.1.2	Teste mecânico de Flexão.....	27
5.1.3	Teste de absorção de umidade.....	28
5.2	TESTES DE VALIDAÇÃO E CONTROLE .....	31
5.2.1	Controle de resíduos de areia nos canais.....	31
5.2.2	Controle de incidência de porosidades .....	31
<b>6.0</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	34
<b>7.0</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	36
<b>8.0</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

AFS – American Foundry Society

ASTM – American Society Testing Materials

CEMP – Comissão Ensaios Matérias-Primas

RTQ – Resistência à tração a quente

RTF – Resistência à tração a frio

SAE – Society of Automotive Engineers

## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade da eliminação da segunda cura em estufa dos machos de areia no processo de fundição de cilindros. Através de testes comparativos de resistência mecânica, absorção de umidade, incidência de porosidade e controle de resíduos de areia, foi possível concluir que a segunda cura não agrega características físico-químicas significativas. Os resultados mostraram que os machos de areia sem cura adicional apresentaram desempenho satisfatório, com uma diminuição de 22% na incidência de porosidades, resultando em uma redução de sucata de 2,8% para 2,2%. A inspeção visual confirmou que não houve anomalias ou resíduos de areia nos canais dos cilindros fundidos. A qualidade das peças produzidas não foi afetada de forma negativa com a eliminação da segunda etapa de cura, sendo assim a otimização do processo levou a um maior rendimento de produção e conseqüente economia de custos anuais da ordem de R\$150.000,00 após a implementação. No geral, esta pesquisa contribui para o avanço da fabricação de machos de areia *Shell molding* e sua otimização que agiliza o processo de produção, melhorando assim a competitividade e a sustentabilidade da empresa de manufatura.

**Palavras-chave:** Fundição, Machos de Areia, Cura em Estufa, Resistência Mecânica, Porosidade

## **ABSTRACT**

This study aimed to evaluate the feasibility of eliminating the second oven curing of sand cores in the cylinder casting process. Comparative tests on mechanical strength, moisture absorption, porosity incidence, and sand residue control concluded that the second curing does not add significant physico-chemical benefits. The results showed that sand cores without additional curing performed satisfactorily, with a 22% decrease in porosity incidence, resulting in a scrap reduction from 2.8% to 2.2%. Visual inspection confirmed that there were no anomalies or sand residues in the channels of the cast cylinders. Eliminating the second curing step contributes to reducing operational costs by approximately 20%, optimizing the process without compromising the quality of the cast pieces. The quality of the parts produced was not negatively affected by the elimination of the second curing stage, thus optimizing the process led to a higher production yield and consequent annual cost savings of around R\$150,000.00 after implementation. Overall, this research contributes to the advancement of shell molding sand core manufacturing and its optimization that speeds up the production process, thus improving the competitiveness and sustainability of the manufacturing company.

**Keywords:** Casting, Sand Cores, Oven Curing, Mechanical Strength,, Porosity

## 1.0 INTRODUÇÃO

A indústria de fundição por gravidade desempenha um papel fundamental na fabricação de peças metálicas desde os primeiros processos registrados na metalurgia. O processo de moldagem de machos de areia, *Shell Molding*, é uma técnica inerente a este processo, desenvolvida no século 20 pelo engenheiro alemão Johannes Cronig. Desde então, tem sido amplamente utilizada para atender às demandas de alta precisão e complexidade dimensional requeridas pela indústria em peças de tamanho médio e pequeno.

O *Shell Molding* é considerado um dos principais desenvolvimentos tecnológicos na indústria de fundição (NAGARAJAN; ROSHAN, 1992) e destaca-se como uma técnica eficiente na produção de machos de areia para fundição, oferecendo vantagens significativas em termos de precisão dimensional e qualidade superficial. No entanto, é importante destacar que o *Shell Molding* é um processo de produção subtrativa. Isso significa que, embora o molde seja criado adicionando camadas de areia e resina ao redor de um modelo, o processo final envolve a remoção (ou subtração) do molde para revelar a peça fundida. Após o metal ser vazado e solidificado dentro do molde de casca, o molde é quebrado e removido, caracterizando o processo como subtrativo.

Um dos desafios significativos enfrentados por esse setor é o tempo e os recursos investidos no processo de cura da resina dos machos de areia em estufa, que é realizado logo após o processo de moldagem em máquina. Este processo de cura em estufa demanda consideráveis recursos energéticos e tempo, impactando diretamente na eficiência e sustentabilidade da produção. Ao abordar este processo de cura em estufa, pretende-se contribuir para o avanço da indústria de fundição, promovendo uma prática mais sustentável e economicamente viável para as empresas que utilizam este processo.

Pesquisas realizadas com empresas que utilizam a moldagem via *Shell Molding*, bem como os estudos avaliados nesta área, não levam a uma definição conclusiva. Em geral, parece haver muito pouco trabalho investigando o efeito da composição do material e dos parâmetros do processo nas propriedades de moldes de areia quimicamente ligados e sem cura em estufa (KHANDELWAL; RAVI, 2016). Isso evidencia a falta de recomendações claras ou testes focados em responder à pergunta que este trabalho se propõe a responder: há necessidade de realizar a segunda cura da resina de machos de areia *Shell Molding* em estufa?

Os estudos nesta área geralmente analisam questões de melhorias na moldagem, uso de diferentes qualidades e granulometria de areias, bem como diferentes tipos de resinas, focando sempre em mudanças ou análises dentro do espectro já consolidado do processo: sopro/moldagem em máquina e posterior cura dos machos de areia em estufa.

Diante desse cenário, emerge a necessidade de realizar testes e analisar o processo em si para eliminar a dependência da cura da resina dos machos de areia em estufa. Para controlar a qualidade do *Shell Molding*, é necessário avaliar as propriedades da areia aglomerada com resina (NAGARAJAN; ROSHAN, 1992), buscando otimizar a eficiência da fabricação de machos de areia e, por conseguinte, impulsionar a competitividade da indústria de fundição por gravidade.

Este trabalho se propõe a explorar e analisar a viabilidade da eliminação de etapas do processo de cura em estufa, buscando otimizar e melhorar a eficiência do processo sem comprometer a qualidade e a integridade dimensional dos machos e das peças fundidas. Ao longo deste trabalho, serão exploradas metodologias de pesquisa experimental e estudo de caso, visando fornecer a solução para a eliminação de uma das etapas de cura da resina de machos de areia *Shell Molding* em estufa e suas implicações práticas no processo.

A motivação para este estudo foi a necessidade de otimização da produção de cilindros para ferramentas motorizadas que tiveram um crescimento de produção extraordinário durante a pandemia de covid-19. A partir disto, feito um Kaisen de melhoria contínua para mobilizar ações no sentido de aumentar a capacidade produtiva, à Engenharia de Processos coube avaliar as etapas de produção e realizar trabalhos de redução de tempo e atravessamento das peças e eliminação de gargalos. A produção de machos de areia, foi avaliada pela Engenharia de Processos como um gargalo significativo de produção.

Como haviam poucas estufas para a segunda cura e a capacidade de cada estufa era bastante limitada, os machos de areia eram produzidos em uma velocidade muito menor que o necessário para suprir as novas demandas. Somado ao fator anterior, a movimentação dos machos de areia em carrinhos metálicos para as estufas e o manuseio de colocação e retirada nestas estufas, eram fatores deletérios, uma vez que os machos de areia são muito frágeis e quebram com facilidade, o que ocasionava muitas perdas de produção.

## 2.0 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa analisar a real necessidade da realização em duas etapas do processo de cura de machos de areia *Shell Molding*, sopro e estufa, buscando eliminar a segunda cura em estufa, aumentando a eficiência do processo, reduzindo custos, minimizando o impacto ambiental e finalmente contribuindo para a evolução sustentável da indústria de fundição e promover a inovação e a eficiência nos processos de fabricação de machos de areia pelo método *Shell Molding*.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Avaliar a resistência à tração (a quente e a frio) e à flexão de corpos de prova produzidos em *Shell Molding*, com e sem segunda cura em estufa.
- II. Analisar a resistência à absorção de umidade em corpos de prova; teste comparativo, com e sem segunda cura em estufa.
- III. Produzir lotes pilotos de machos de areia sem a segunda etapa de cura em estufa e proceder os seguintes controles para atestar a possibilidade da retirada da segunda cura em estufa dos machos de areia:
  - a) Controle em liberação de lotes de peças para alterações no dimensional das peças vazadas no lote piloto;
  - b) Controle do nível de sucata por porosidade, para comparativo do processo antes e depois da retirada da cura dos machos de areia em estufa;
  - c) Controle de resíduos de areia dentro dos cilindros e qualidade de acabamento superficial – comparativa.

### 3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

Peças metálicas com formato próximo do definitivo podem ser fabricadas por vários métodos, no entanto, a fundição ainda é o processo mais preferido devido à sua capacidade de produzir peças de formatos complexos em uma variedade de ligas metálicas a um custo baixo em comparação com a fabricação subtrativa (KHANDELWAL; RAVI, 2016). O processo de fundição é um dos métodos mais antigos e amplamente utilizados na fabricação de peças metálicas, envolve a fusão de um material metálico e a moldagem desse material líquido em uma cavidade de molde específico para criar uma peça sólida com a forma desejada; em uma visão geral, assim se desdobra o processo de fundição:

- I. Preparação do molde: O primeiro passo é criar o molde que definirá a forma da peça final. Os moldes podem ser feitos de vários materiais, incluindo areia, gesso, metal ou cerâmica. O molde é projetado para ter a forma inversa da peça desejada.
- II. Preparação do material: O material metálico adequado (como ferro, alumínio, bronze, etc.) é selecionado e derretido em um forno de fundição. A temperatura do forno deve ser suficientemente alta para fundir completamente o metal.
- III. Vazamento: Uma vez que o metal atinge o estado líquido, ele é vazado no molde preparado. Isso geralmente é feito por meio de um funil/bacia e canais de alimentação, para garantir que o metal flua uniformemente pelo molde.
- IV. Resfriamento e solidificação: Após o vazamento do metal líquido no molde, ele começa a esfriar e solidificar. O tempo de resfriamento pode variar dependendo da liga metálica e do tamanho da peça. Durante este processo, o metal líquido toma a forma do molde.
- V. Extração da peça: Uma vez que o metal tenha solidificado completamente, o molde é removido, expondo a peça fundida. Dependendo do tipo de molde e do design da peça, pode ser necessário quebrar ou desmontar o molde para extrair a peça.
- VI. Acabamento: Após a extração da peça do molde são necessários processos adicionais de acabamento, como remoção de rebarbas, usinagem, polimento,

tratamento térmico, pintura, entre outros, para atingir as especificações finais desejadas.

A variedade de ligas fundidas, o tamanho e a complexidade das peças fundidas e os requisitos específicos dos componentes fundidos levam a uma variedade de propriedades e materiais de molde, todos usados para fins específicos na indústria de fundição (JONES; YUAN, 2021).

### 3.2 FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE

A fundição por gravidade é um processo de fabricação utilizado para produzir peças metálicas ou de ligas metálicas onde este metal é despejado em um molde que é preenchido através da força da gravidade, sem a aplicação de pressão externa. Esse método é frequentemente utilizado para a produção de peças de grande porte e alta complexidade, onde a precisão dimensional e a integridade estrutural são importantes. A força da gravidade e o projeto de canais e massalotes são os responsáveis por garantir que o metal preencha completamente as cavidades do molde, seguindo as formas desejadas.

A fundição por gravidade oferece várias vantagens, incluindo a capacidade de produzir peças de alta qualidade com boa precisão dimensional, boa integridade estrutural e baixo custo de produção. No entanto, o processo também possui algumas limitações, como restrições de *design* devido à gravidade e a possibilidade de inclusão de porosidades na peça fundida.

A fundição de metal utilizando machos de areia permite produzir componentes complexos com geometrias internas em grandes volumes, exemplos típicos são cabeçotes e blocos de motores de combustão (STAUDER; KERBER; SCHUMACHER, 2016). O macho de areia é uma peça inserida no molde para criar cavidades ou canais internos na peça fundida, ele é feito a partir de uma mistura especial de areia e aglomerante, que é compactada em um núcleo e colocado no molde antes do fechamento da caixa. Após a inserção do macho, as duas metades da caixa de moldagem são juntadas e presas, formando o molde completo. Quando o metal fundido é despejado no molde através de um canal de vazamento ele flui para o espaço vazio deixado pelo modelo, preenchendo a forma da peça. Uma vez que o metal tenha solidificado, o molde é desmontado e o macho é removido.

A fundição de metal utilizando machos de areia permite produzir componentes complexos com geometrias internas em grandes volumes. Exemplos típicos são cabeçotes e blocos de motores de combustão (STAUDER; KERBER; SCHUMACHER, 2016). O macho de areia é uma peça crucial no processo de moldagem, pois cria cavidades ou canais internos na peça fundida. Ele é feito a partir de uma mistura especial de areia e aglomerante, que é compactada em um núcleo e colocado no molde antes do fechamento da caixa. Após a inserção do macho, as duas metades da caixa de moldagem são juntadas e presas, formando o molde completo. Quando o metal fundido é despejado no molde através de um canal de vazamento, ele flui para o espaço vazio deixado pelo modelo, preenchendo a forma da peça. Uma vez que o metal tenha solidificado, o molde é desmontado e o macho é removido.

A mistura utilizada para produzir os machos de areia é geralmente composta por areia de alta qualidade e um aglomerante, como resina fenólica ou ureia-formaldeído. A areia deve ter características específicas, como granulometria controlada e alta resistência mecânica.

A mistura de areia e resina é compactada em uma caixa de moldagem que define a forma do macho. Existem diferentes métodos de compactação, incluindo:

- I. Sopro de Areia (Sand Blowing) A mistura é soprada na caixa de moldagem utilizando ar comprimido.
- II. Disposição Manual (Hand Ramming): A mistura é manualmente compactada na caixa.
- III. Injeção (Injection Molding): A mistura é injetada sob pressão em moldes fechados.

Após a moldagem, os machos de areia passam por um processo de cura para endurecer a resina e estabilizar o formato, existem diferentes métodos de cura tendo cada uma destas metodologias suas vantagens e desvantagens para os processo (tabela 1). Estes diferentes métodos de cura, são:

- I. Cura a Frio (Cold Box): Utiliza-se um gás catalisador que reage com a resina a temperatura ambiente.
- II. Cura a Quente (Hot Box): O macho é aquecido em um forno para ativar a resina.
- III. Cura por Micro-ondas (Microwave Curing): Utiliza-se radiação de micro-ondas para curar a resina rapidamente.

Depois da cura, os machos são inspecionados para garantir que não há defeitos e que as dimensões estão corretas. O acabamento pode incluir a remoção de rebarbas e o ajuste fino das dimensões.

*Tabela 1: Comparação dos métodos de cura de machos de areia*

<b>Método de Cura</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Cura a Frio</b>	Menor consumo de energia, adequado para grandes volumes	Tempo de cura pode ser mais longo
<b>Cura a Quente</b>	Cura rápida, controle preciso do processo	Alto consumo de energia, pode causar degradação térmica
<b>Cura por Micro-ondas</b>	Cura extremamente rápida, eficiente para pequenos volumes	Requer equipamento especializado, custo inicial elevado

Fonte: CENTRO DE FUNDIÇÃO SENAI-MG (1982).

Os machos de areia são essenciais para a produção de componentes metálicos complexos, pois permitem a criação de cavidades internas que seriam impossíveis de moldar diretamente. Eles garantem a precisão dimensional e a integridade estrutural das peças fundidas, sendo particularmente importantes em aplicações automotivas e aeroespaciais.

Um dos principais desafios na produção de machos de areia é o equilíbrio entre a resistência mecânica e a facilidade de remoção após a fundição. Inovações recentes incluem o uso de aditivos que melhoram a resistência sem comprometer a desagregação, e a aplicação de tecnologias de impressão 3D para criar machos de areia com geometria complexa e propriedades otimizadas.

Os processos de macharia são cruciais para a fundição de peças metálicas complexas, permitindo a criação de geometrias internas detalhadas com alta precisão. O entendimento e a otimização desses processos são essenciais para melhorar a eficiência e a qualidade na produção de fundidos, contribuindo para o avanço tecnológico na indústria de fundição.

O processo de moldagem com machos de areia é amplamente utilizado devido à sua versatilidade, custo relativamente baixo e capacidade de produzir peças de formas complexas.

### 3.2.1 Processo macho de areia *Shell Molding*

*Shell molding*, ou moldagem em casca, é um processo de fundição que utiliza um molde de areia revestido com resina. Este método é conhecido por produzir peças fundidas de alta precisão e com excelente acabamento superficial. Aqui estão os detalhes do processo e suas características:

Um modelo metálico é aquecido e revestido com um agente desmoldante para evitar que a areia grude no modelo. Este agente facilita a remoção da casca endurecida após a formação do molde. Uma mistura de areia fina e resina termoendurecível é soprada sobre o modelo quente. A resina se cura e endurece ao entrar em contato com o modelo aquecido, formando uma camada rígida ou "casca" ao redor do modelo. A granulometria da areia, geralmente entre 50 a 140 mesh (AFS), e a distribuição uniforme dos grãos são essenciais para obter um molde denso e resistente, garantindo a precisão e o acabamento superficial desejados.

A casca é submetida a um processo de cura adicional, geralmente em um forno, para garantir que a resina esteja completamente endurecida. Este processo de cura a quente envolve temperaturas entre 200°C e 250°C, permitindo uma cura rápida e eficiente da resina fenólica, amplamente utilizada devido à sua alta resistência térmica e estabilidade dimensional (NAGARAJAN; ROSHAN, 1992).

As metades da casca são removidas do modelo e montadas para formar o molde completo. Se necessário, machos de areia podem ser inseridos para criar cavidades internas na peça fundida. Esses machos são cruciais para a criação de geometrias internas complexas dentro da peça. O metal fundido é vazado no molde montado. Após a solidificação, o molde é quebrado para remover a peça fundida. Este processo garante que o metal preencha completamente o molde, replicando com precisão a geometria desejada.

A peça fundida é limpa, removendo qualquer excesso de material e rebarbas. Processos adicionais de acabamento podem incluir usinagem, polimento e tratamento térmico para garantir que a peça atenda às especificações finais de qualidade e precisão. O *Shell Molding* oferece várias vantagens, incluindo:

- I. Alta Precisão: Produz peças com excelente precisão dimensional e detalhes finos (STAUDER; KERBER; SCHUMACHER, 2016).

- II. Bom Acabamento Superficial: Resulta em superfícies lisas que requerem menos pós-processamento.
- III. Reprodutibilidade: Ideal para a produção em massa de peças complexas e de alta qualidade.
- IV. Eficiência: O processo pode ser altamente automatizado, melhorando a eficiência e reduzindo custos laborais.

Apesar de suas vantagens, o *Shell Molding* também apresenta algumas desvantagens:

- I. Custo Inicial Elevado: O custo inicial para preparar os modelos metálicos pode ser alto.
- II. Limitações de Tamanho: Mais adequado para peças pequenas e médias, devido às limitações dos equipamentos e modelos.
- III. Tempo de Configuração: Pode demorar um pouco mais para configurar comparado a outros métodos de fundição mais simples (KHANDELWAL; RAVI, 2016).

O *Shell Molding* é amplamente utilizado em várias indústrias, incluindo:

- I. Automotiva: Produção de componentes de motores e peças estruturais.
- II. Aeroespacial: Peças complexas de alta precisão para aeronaves.
- III. Indústria de Ferramentas: Fabricação de ferramentas e componentes de máquinas.

O *Shell Molding* é um processo eficiente e preciso, adequado para a produção em massa de peças complexas com excelente acabamento superficial. É amplamente utilizado em indústrias que exigem alta precisão e qualidade nas peças fundidas. A compreensão detalhada dos materiais e processos envolvidos no *Shell Molding* é essencial para otimizar a produção e garantir a qualidade das peças fundidas.

O *Shell Molding* é classificado como subtrativo porque envolve a remoção de material para alcançar a forma final desejada. Embora o termo "subtrativo" geralmente se refira à usinagem, onde o material é removido diretamente de um bloco sólido, a fundição (incluindo o *Shell Molding*) também é considerada subtrativa pelos seguintes motivos:

- I. Remoção do Molde: após o metal ser vazado e solidificado dentro do molde de casca, o molde é quebrado e removido, subtraindo assim o material do molde para revelar a peça final.

- II. Etapas de Acabamento: após a remoção do molde, a peça fundida frequentemente passa por processos de acabamento que removem material indesejado, como rebarbas e excessos de metal, para alcançar as especificações finais.

O processo Shell Molding é um método de fundição utilizado para produzir peças metálicas complexas com alto grau de precisão e acabamento superficial. Este método envolve a criação de moldes a partir de uma mistura de areia fina e resina termoendurecível.

### 3.2.2. Granulometria da Areia

Para evitar defeitos de colapsabilidade dos machos de areia, uma alta permeabilidade de gases e baixa evolução de gás são necessárias. O primeiro poderia ser garantido pelo controle adequado da distribuição granulométrica da areia, enquanto o este último depende da quantidade de aglutinante e impurezas voláteis presente na mistura de areia (Gyarmati *et al.*, 2021).

A areia utilizada no *Shell Molding* deve possuir características específicas para garantir a qualidade do molde e da peça fundida:

- I. Granulometria: A granulometria da areia é crítica para determinar a precisão e o acabamento superficial da peça fundida. Tipicamente, utiliza-se areia com uma granulometria fina, entre 50 a 140 mesh (AFS), que proporciona um bom equilíbrio entre resistência e fluidez.
- II. Distribuição dos Grãos: A distribuição uniforme dos grãos é essencial para obter um molde denso e resistente. A areia deve ter uma distribuição de tamanhos de grão controlada para evitar porosidades e defeitos na peça final.

A areia de moldagem é geralmente uma areia de sílica de alta pureza ( $\text{SiO}_2$ ), devido às suas propriedades refratárias e à sua capacidade de formar moldes precisos. Outras características importantes incluem:

- I. Forma dos Grãos: Grãos de forma angular ou sub-angular são preferidos, pois proporcionam melhor compactação e estabilidade do molde.

Pureza: A areia deve ser livre de contaminantes que possam afetar a qualidade do molde e a peça fundida.

### 3.2.3. Composição da Resina e Catalisador

A composição da resina é bastante importante para o manutenção das propriedades mecânicas dos machos de areia. Durante a fundição, o machos de areia é submetido a severas condições de carga (altas temperaturas, pressão metalo-estática...). A resina passa por degradação térmica e decomposição química. Isso às vezes leva à destruição do macho e prejudica sua extração da parte metálica solidificada (Bargaoui et al., 2017).

A resina utilizada no *Shell Molding* é uma resina termoendurecível, que endurece sob a ação do calor. As resinas mais comuns são à base de fenol-formaldeído ou ureia-formaldeído.

#### I. Resina

- a) **Fenol-Formaldeído:** Esta resina é amplamente utilizada devido à sua alta resistência térmica e estabilidade dimensional. Proporciona um molde com boa integridade e resistência mecânica.
- b) **Ureia-Formaldeído:** Utilizada quando se deseja um ciclo de cura mais rápido. Oferece boa resistência mecânica, mas pode ser menos estável a altas temperaturas comparada à resina fenólica.

#### II. Catalisador

O catalisador é um componente essencial no processo de cura da resina. Ele acelera a reação de polimerização, permitindo que a resina endureça rapidamente.

Comumente, utiliza-se:

- a) **Hexametenotetramina (Hexa):** Um catalisador comum para resinas fenólicas. Ele é misturado à resina e à areia, e a cura é iniciada pelo calor aplicado ao molde.

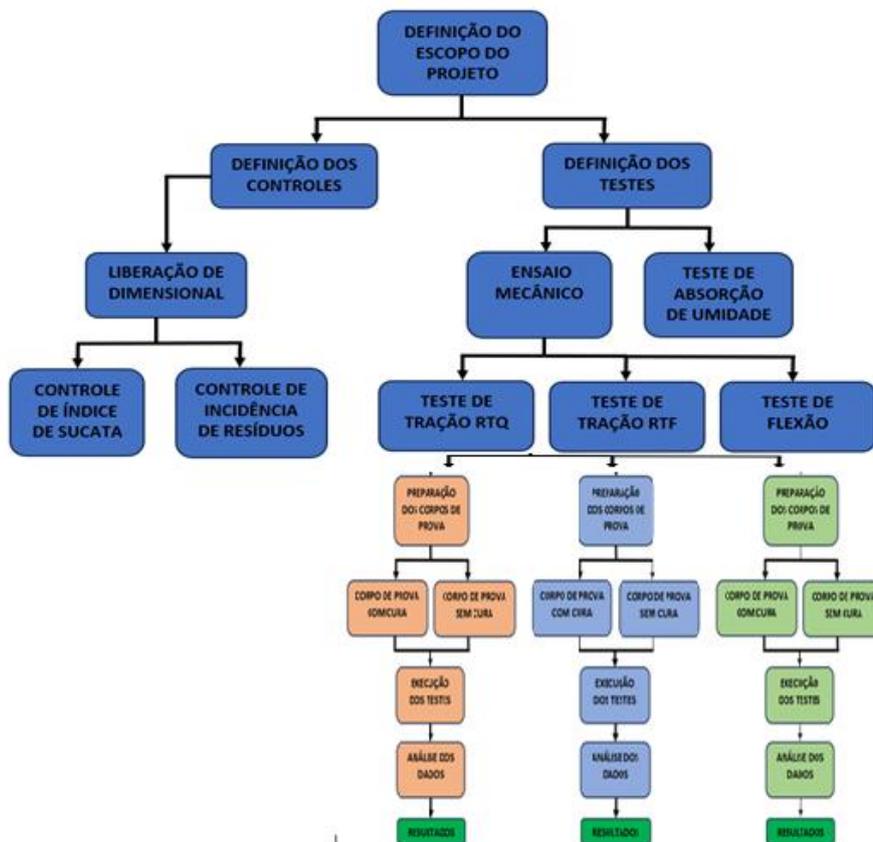
### 3.2.4. Processo de Cura dos machos de areia

O processo de cura é onde os machos são submetidos a condições controladas de temperatura e umidade para permitir que o ligante seque e endureça, isso geralmente é feito em estufas ou fornos dedicados. A influência da composição do molde nas propriedades do molde pode ser explicada em termos do fenômeno de cura (KHANDELWAL; RAVI, 2016). É importante ressaltar que o processo de cura exato pode variar dependendo do tipo de ligante e dos requisitos específicos da peça fundida.

#### 4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes e controles que foram indicados para avaliar as propriedades físico-químicas dos machos de areia com cura e sem cura, estão descritas no fluxograma da figura 1.

Figura 1: Fluxograma geral de testes e controles



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Esta etapa inicial envolve a determinação dos objetivos e das metas do projeto. É crucial para alinhar todas as atividades subsequentes com os objetivos estratégicos do estudo. No contexto do *Shell Molding*, o foco é analisar a viabilidade da eliminação da etapa do processo de segunda cura em estufa, buscando otimizar e melhorar a eficiência do processo sem comprometer a qualidade e a integridade dimensional dos machos e das peças fundidas.

Os controles são estabelecidos para monitorar e avaliar aspectos críticos da produção. No fluxograma, a definição dos controles se divide em duas principais atividades:

I. Liberação de Dimensional:

- a) Controle de Índice de Sucata: Monitora a quantidade de peças que não atendem às especificações e precisam ser descartadas. Este controle é essencial para avaliar a eficiência do processo e identificar áreas de melhoria.
- b) Controle de Incidência de Resíduos: Avalia a presença de resíduos de areia e outros materiais nas peças fundidas, que podem comprometer a qualidade final. Este controle garante que os machos de areia são completamente removidos após a fundição, evitando defeitos.

Os testes são necessários para garantir que os machos de areia e as peças fundidas atendam aos requisitos de qualidade e desempenho. A definição dos testes é subdividida em duas categorias principais:

II. Ensaio Mecânico:

- a) Teste de Tração RTQ (Resistência à Tração Quente): Avalia a resistência dos machos de areia quando expostos a altas temperaturas, simulando condições reais de fundição.
- b) Teste de Tração RTF (Resistência à Tração Fria): Mede a resistência dos machos de areia à tração em condições ambientais normais.
- c) Teste de Flexão: Determina a resistência dos machos de areia à flexão, importante para avaliar sua integridade estrutural durante o manuseio e a fundição.

III. Teste de Absorção de Umidade:

- a) Avalia a capacidade dos machos de areia de absorver umidade, o que pode afetar negativamente a qualidade da peça fundida, causando defeitos como porosidades.

O fluxograma geral de testes e controles apresentado na Figura 1 fornece uma visão detalhada das etapas e atividades preconizadas durante a fase de definição dos estudos. Esta clara definição dos controles e testes, assegura que todos os aspectos do processo serão monitorados e avaliados, contribuindo para a melhoria contínua e a eficiência da produção. Cada controle e teste tem um papel essencial na garantia da qualidade das peças fundidas, permitindo ajustes e otimizações conforme necessário para alcançar os melhores resultados possíveis.

#### 4.1 MATERIAIS

A areia para produção dos corpos de prova e para a produção dos machos de areia foi a areia *Shell Molding J90* (2,1 a 2,4% de teor de resina fenólica e módulo AFS 80) da fabricante Mineração Jundu.

A peça fundida analisada neste estudo é um cilindro (figura 2), utilizado em motores de combustão interna. O cilindro fundido possui as seguintes características aproximadas: diâmetro externo de 85 mm, diâmetro interno de 70 mm, altura de 100 mm e espessura da parede de 7,5 mm. A peça fundida foi avaliada quanto à precisão dimensional e à presença de defeitos. Os métodos de avaliação incluíram inspeção visual, controle dimensional utilizando instrumentos de medição de alta precisão e análise por tomografia computadorizada para detectar porosidades e outras imperfeições internas.

A liga metálica utilizada para a fundição do cilindro é uma liga de alumínio, escolhida por suas propriedades de leveza, resistência à corrosão e excelente condutividade térmica. A composição típica da liga de alumínio pode incluir elementos como silício, magnésio e cobre, que melhoram a resistência mecânica e a durabilidade do material.

O macho de areia utilizado no processo de fundição é posicionado dentro do molde para criar as cavidades internas do cilindro. Sua função é garantir que as paredes internas do cilindro sejam formadas corretamente, permitindo a passagem do pistão e a operação eficiente do motor. O macho é inserido no molde antes do fechamento da caixa de moldagem, assegurando que ele esteja corretamente alinhado para criar a geometria interna necessária.

Figura 2: Cilindro



Fonte: Adaptado pelo autor (2024).

O macho é colocado de forma a criar o diâmetro interno do cilindro (figura 2), permitindo a formação das paredes internas com precisão.

#### 4.2 MÉTODOS

Para a produção dos corpos de prova e dos machos de areia, foi utilizada a areia *Shell Molding J90*, fornecida pela fabricante Mineração Jundu. Esta areia possui um teor de resina fenólica entre 2,1 a 2,4% e um módulo AFS 80, garantindo a estabilidade e resistência necessárias para o processo de fundição. Os corpos de prova foram confeccionados seguindo as recomendações da ABIFA para garantir a reprodutibilidade e a precisão dos ensaios.

- a) Mistura da Areia e Resina: A areia *Shell Molding J90* da fabricante Jundu é produzida com a resina fenólica termoenduricível para formar a mistura adequada para a moldagem dos machos de areia.
- b) Moldagem: A mistura foi então compactada em moldes padrão CEMP-E10, específicos para a confecção dos corpos de prova, seguindo os parâmetros de produção de fábrica dos machos de areia que são:  
Temperatura da caixa de macho:  $230 \pm 5$  °C; Tempo de cura:  $50, \pm 2$  segundos.

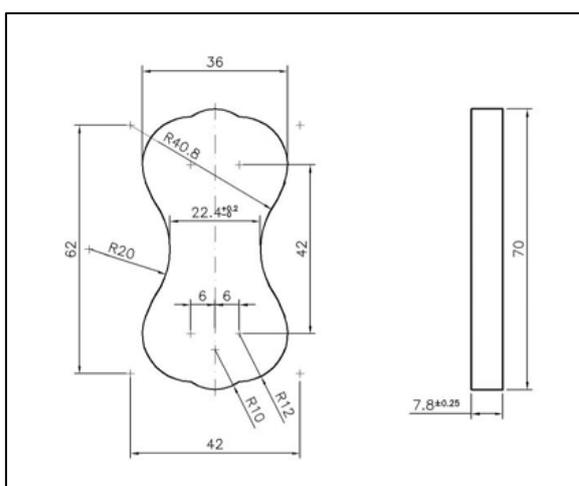
- c) Segunda Cura: Os corpos de prova foram aquecidos a 180°C por 10 minutos em estufa para a segunda cura da resina.

Os ensaios de tração RTQ (Resistência à Tração Quente), RTF (Resistência à Tração a Frio) e flexão a frio foram executados de acordo com as normas da ABIFA: CEMP-016, CEMP-017 e CEMP-029, respectivamente. Todos os testes mecânicos foram executados no Laboratório de Fundição (Lafun) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando o maquinário e a estufa requeridos para os testes.

Para os ensaios de tração, os corpos de prova foram preparados conforme as recomendações CEMP-E10 (figura 3 e 4). O ensaio de tração foi realizado seguindo as normas CEMP-016 para resistência à tração a quente (RTQ) e CEMP-017 para resistência à tração a frio (RTF). Os corpos de prova foram submetidos a uma carga crescente até a ruptura, registrando a resistência máxima.

Para os ensaios de flexão, os corpos de prova também foram produzidos conforme as recomendações CEMP-E10, e submetidos a ensaio de acordo com a norma CEMP-029. Os corpos de prova foram submetidos a uma carga de flexão até a ruptura, registrando a resistência máxima. A precisão na fabricação dos corpos de prova e dos machos de areia, bem como a utilização de procedimentos rigorosos de cura e ensaios mecânicos, são cruciais para garantir a confiabilidade dos testes.

Figura 3: Dimensões dos corpos de prova para ensaios mecânicos CEMP-E10



Fonte: ABIFA (2015)

Figura 4: Corpos de prova prontos para os testes



Fonte: Adaptado pelo autor (2024)

Para os machos de areia que foram usados nos testes de absorção de umidade (figura 5), o procedimento seguiu uma abordagem similar. A mistura de areia e resina foi compactada em moldes que definem a geometria dos machos de areia, seguindo os parâmetros de fábrica de: Temperatura da caixa de macho:  $230 \pm 5$  °C; Pressão de sopro:  $5,62 \text{ kgf/cm}^2 \pm 2\%$  ( $80 \text{ psi} \pm 2\%$ ); Tempo de sopro:  $2,0 \pm 0,2$  segundos; Tempo de cura:  $50, \pm 2$ , bem como uma segunda cura em estufa a  $180^\circ\text{C}$  por 10 minutos. Os machos de areia da variável sem segunda cura foram reservados após a confecção, sem serem submetidos a cura em estufa.

Figura 5: Machos de areia prontos para os testes



Fonte: Adaptado pelo autor (2024)

O ensaio de teor de absorção de umidade foi realizado em câmara úmida do modelo CCT-LQ da fabricante BASS (figura 6), seguindo os procedimentos recomendados na CEMP-018 da ABIFA. Um lote de 30 machos de areia de cada variável (com e sem segunda cura) foi pesado em uma balança de precisão antes e depois do teste para medir a quantidade de umidade retida. Este ensaio é crucial para avaliar a resistência dos machos de areia à absorção de umidade, que pode afetar negativamente a qualidade das peças fundidas.

*Figura 6: Câmara úmida para testes de absorção de umidade*



Fonte: Adaptado pelo autor (2024).

Após os resultados positivos dos testes em laboratório, foi produzido um lote piloto de 3000 machos de areia sem segunda cura, para avaliar o comportamento na produção de peças fundidas (cilindros) e controle em liberação de peças para alterações dimensionais.

## 5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 TESTES E CONTROLES

#### 5.1.1 Testes mecânicos de resistência a tração a quente (RTQ) e a frio (RTF)

Os resultados dos testes de Resistência à Tração Fria (RTF) são apresentados na Tabela 2. Observou-se uma diferença de aproximadamente 9% na média de resistência entre os corpos de prova sem segunda cura (217,5 N/cm<sup>2</sup>) e os com segunda cura (197,5 N/cm<sup>2</sup>). Essa diferença indica que a variável sem segunda cura apresentou uma média de resistência ligeiramente superior. No entanto, considerando os desvios padrão de 18,7 para os corpos de prova sem segunda cura e 19,4 para os corpos com segunda cura, não é possível afirmar que existe uma diferença estatisticamente significativa nos resultados dos ensaios analisados.

Tabela 2: Teste de Resistência à tração a frio (RTF)

RTF (N/cm <sup>2</sup> )	SEM CURA	COM CURA
1	180	155
2	240	195
3	225	185
4	180	200
5	210	200
6	230	220
7	230	220
8	225	200
9	200	190
10	210	200
11	230	180
12	220	210
<b>Média</b>	217,5	197,5
<b>Desvio</b>	18,7	19,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados dos testes de Resistência à Tração Quente (RTQ) são apresentados na Tabela 3. Observou-se uma diferença de aproximadamente 5% na média de resistência entre os corpos de prova sem segunda cura (102,6 N/cm<sup>2</sup>) e os com segunda cura (107,8 N/cm<sup>2</sup>). Essa diferença mostra que a variável com segunda cura teve um desempenho um

pouco superior. No entanto, considerando os desvios padrão de 4,7 para os corpos de prova sem segunda cura e 7,7 para os corpos com segunda cura, essa diferença nos resultados não é significativa estatisticamente.

Tabela 3: Teste de Resistência à tração a quente (RTQ)

RTQ (N/cm <sup>2</sup> )	SEM SEGUNDA CURA	COM SEGUNDA CURA
1	98	120
2	100	115
3	100	105
4	105	95
5	100	100
6	100	100
7	100	120
8	100	110
9	100	110
10	105	115
11	100	100
12	110	100
<b>Média</b>	102,6	107,8
<b>Desvio</b>	4,7	7,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 5.1.2 Teste mecânico de Flexão

Os resultados dos testes de flexão, apresentados na Tabela 4, indicaram que a variável sem segunda cura teve um desempenho ligeiramente melhor, com uma média de resistência de 40,6 N/cm<sup>2</sup> comparada à média de 38,5 N/cm<sup>2</sup> para a variável com segunda cura. A diferença percentual foi de aproximadamente 5%. Além disso, o desvio padrão para ambas as variáveis foi baixo, indicando uma consistência nos resultados. Essa pequena diferença mostra que a variável sem segunda cura teve um melhor comportamento neste teste, o que também é positivo em termos de produção.

Tabela 4: Teste de Resistência à Flexão

Flexão (N/cm <sup>2</sup> )	SEM SEGUNDA CURA	COM SEGUNDA CURA
1	40	38
2	42	37
3	41	39
4	39	38
5	40	39
6	41	38
7	42	38
8	41	37
9	40	39
10	40	38
11	39	39
12	41	37
<b>Média</b>	40,6	38,5
<b>Desvio</b>	1,0	0,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados dos testes mecânicos indicam que a diferença de desempenho entre as variáveis com e sem segunda cura é relativamente pequena e, considerando os desvios padrão, não se pode afirmar que há uma diferença significativa nos resultados. A eliminação da segunda etapa de cura pode, portanto, ser considerada uma opção viável para otimizar o processo de fundição.

### 5.1.3 Teste de absorção de umidade

O ensaio de teor de absorção de umidade foi realizado em câmara úmida, seguindo os procedimentos recomendados na CEMP-018 da ABIFA. Um lote de 30 machos de areia de cada variável (com e sem segunda cura) foi pesado em uma balança de precisão antes e depois do teste para medir a quantidade de umidade retida.

O teste de absorção de umidade foi realizado para avaliar a capacidade dos machos de areia sem a segunda cura de resistirem à umidade, o que é crucial para garantir a qualidade das peças fundidas. A seguir estão os procedimentos e os resultados deste teste.

- I. Preparação dos Machos de Areia: Foram preparados 30 machos de areia com e sem cura adicional, utilizando a areia Shell Molding J90 com resina fenólica.

- II. **Pesagem Inicial:** Os machos de areia foram pesados em uma balança de precisão para registrar o peso inicial (massa seca).
- III. **Exposição à Umidade:** Os machos foram colocados em uma câmara úmida conforme os procedimentos recomendados na CEMP-018 da ABIFA. A câmara úmida mantém um ambiente controlado com alta umidade relativa (100% de umidade a 40°C) para simular condições adversas.
- IV. **Duração do Teste:** Os machos foram expostos à umidade por um período de 24 horas.
- V. **Pesagem Final:** Após o período de exposição, os machos foram retirados da câmara úmida e pesados novamente para registrar o peso final (massa úmida).

A absorção de umidade foi calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Absorção de umidade (\%)} = \left( \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100$$

A tabela 5 apresenta os resultados do teste de absorção de umidade para os machos de areia sem segunda cura:

*Tabela 5: Resultados do teste de absorção de umidade para os machos de areia sem segunda cura*

<b>Macho</b>	<b>Peso Inicial (g)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Absorção de Umidade (%)</b>
1	100	102	2,00
2	98	100	2,04
3	99	101	2,02
4	101	103	1,98
5	100	102	2,00
6	98	100	2,04
7	99	101	2,02
8	101	103	1,98
9	100	102	2,00
10	98	100	2,04
11	99	101	2,02
12	101	103	1,98
13	100	102	2,00
14	98	100	2,04
15	99	101	2,02
16	101	103	1,98
17	100	102	2,00
18	98	100	2,04
19	99	101	2,02
20	101	103	1,98
21	100	102	2,00
22	98	100	2,04
23	99	101	2,02
24	101	103	1,98

25	100	102	2,00
26	98	100	2,04
27	99	101	2,02
28	101	103	1,98
29	100	102	2,00
30	98	100	2,04
<b>Média</b>	<b>99,13</b>	<b>101,13</b>	<b>2,00</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados do teste de absorção de umidade indicam que os machos de areia sem segunda cura absorveram uma média de 2,00% de umidade. Este valor está dentro dos limites aceitáveis, indicando que os machos de areia sem segunda cura têm uma boa resistência à umidade e não comprometem a qualidade das peças fundidas. A eliminação da segunda cura não afetou negativamente a resistência dos machos de areia à absorção de umidade.

A tabela 6 apresenta os resultados do teste de absorção de umidade para os machos de areia com segunda cura:

*Tabela 6: Resultados do teste de absorção de umidade para os machos de areia com segunda cura*

<b>Macho</b>	<b>Peso Inicial (g)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Absorção de Umidade (%)</b>
1	100	101	1,00
2	98	99	1,02
3	99	100	1,01
4	101	102	0,99
5	100	101	1,00
6	98	99	1,02
7	99	100	1,01
8	101	102	0,99
9	100	101	1,00
10	98	99	1,02
11	99	100	1,01
12	101	102	0,99
13	100	101	1,00
14	98	99	1,02
15	99	100	1,01
16	101	102	0,99
17	100	101	1,00
18	98	99	1,02
19	99	100	1,01
20	101	102	0,99
21	100	101	1,00
22	98	99	1,02
23	99	100	1,01
24	101	102	0,99
25	100	101	1,00
26	98	99	1,02
27	99	100	1,01
28	101	102	0,99
29	100	101	1,00
30	98	99	1,02
<b>Média</b>	<b>99,13</b>	<b>100,13</b>	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Já os resultados dos teste de absorção de umidade (figura 4) indicam que os machos de areia que receberam a segunda cura, tiveram uma média de absorção de 1,00% de umidade. Este valor é ligeiramente inferior ao resultado de absorção observada nos machos de areia sem segunda cura que foi de 2,00%. Isso demonstra que a segunda cura oferece uma leve vantagem em termos de resistência à umidade, mas a diferença não é suficientemente significativa para comprometer a viabilidade de eliminar a segunda cura no processo de produção dos machos de areia.

## 5.2 TESTES DE VALIDAÇÃO E CONTROLE

### 5.2.1 Controle de resíduos de areia nos canais

No controle de incidência de resíduos de areia nos canais dos cilindros fundidos do lote piloto, que foram produzidos com o uso dos machos de areia sem a segunda cura, não houve a constatação de anomalias ou qualquer fato que já não fosse usual no processo tradicional, que é feito com os machos de areia com a segunda cura em estufa. O controle foi realizado utilizando uma câmera de inspeção de canais, conforme ilustrado na Figura 7, que permite visualizar todo o interior dos canais em uma tela de alta resolução. Este controle mostrou que a variável sem a segunda cura não teve um desempenho muito abaixo da variável com a segunda cura, o que não afeta negativamente.

*Figura 7: Controle de incidência de resíduos de areia nos canais dos cilindros*



Fonte: Adaptado pelo autor (2024).

## 5.2.2 Controle de incidência de porosidades

No controle de incidência de porosidades, a eliminação da segunda etapa de cura no processo, gerou resultados bastante positivos de modo geral nos lotes piloto, comparativamente com os resultados de porosidade do ano anterior de produção. É possível ver na Tabela 7 que os lotes que foram feitos sem a segunda cura dos machos de areia em estufa, apresentaram uma considerável redução de sucata. Este controle mostrou que a variável sem a segunda cura teve um excelente desempenho em produção, o que é bastante promissor para a redução de custos e otimização de recursos de produção.

Tabela 7: Índice de Porosidade dos cilindros

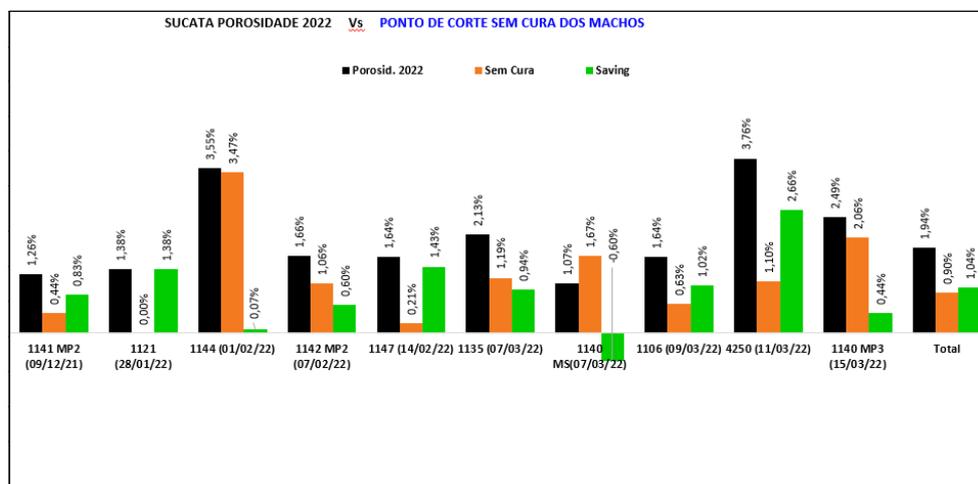
Ano	Índice de Porosidade (%)
Ano Anterior (com segunda cura)	3,6
Lote Piloto (sem segunda cura)	2,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados dos controles de incidência de resíduos de areia e porosidade indicam que a eliminação da segunda etapa de cura em estufa para os machos de areia é uma opção viável. A variável sem segunda cura apresentou desempenho satisfatório em ambos os controles, não comprometendo a qualidade das peças fundidas.

A análise detalhada e os resultados positivos (figura 8), indicam que a otimização do processo de fundição para eliminar a segunda cura dos machos de areia pode ser implementada com sucesso, resultando em uma produção mais eficiente e econômica, mantendo a qualidade das peças fundidas.

Figura 8: Controle incidencia de sucata por porosidades na peça fundida



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Não foram identificadas nos teste alterações significativas em termos de resistência mecânica de tração e flexão, para mais ou para menos, que possam dificultar os processos posteriores. Em termos de absorção de umidade, os machos de areia sem a segunda cura se mostraram pouco mais suscetíveis a reter umidade do que os machos com a segunda cura, mas não significativamente, o que é positivo para o manutenção do baixo índice de porosidades por gases nas peças fundidas.

Na avaliação de sujidades e presença de resíduos de areia, não foram registrados casos relevantes ou não corriqueiros à produção habitual. Os números de sucata por porosidade nos cilindros testados durante o projeto se mostraram, em média, menores do que o consolidado até o ponto de corte dos cilindros com macho de areia com a segunda cura usados anteriormente.

## 6.0 CONCLUSÕES

Em termos de resistência mecânica, não houve alterações significativas nos testes, indicando que a eliminação da segunda cura não compromete a integridade dos machos de areia. Nos testes de resistência à flexão, a variável sem segunda cura teve um desempenho ligeiramente melhor, com uma média de resistência de 40,6 N/cm<sup>2</sup> comparada à média de 38,5 N/cm<sup>2</sup> para a variável com segunda cura. Já nos testes de resistência à tração a frio (RTF) foi observada uma diferença de aproximadamente 9% na média de resistência entre os corpos de prova sem segunda cura (217,5 N/cm<sup>2</sup>) e os com segunda cura (197,5 N/cm<sup>2</sup>). Os testes de resistência à tração a quente (RTQ) apresentaram uma diferença de aproximadamente 5% na média de resistência entre os corpos de prova sem segunda cura (102,6 N/cm<sup>2</sup>) e os com segunda cura (107,8 N/cm<sup>2</sup>); houveram desempenhos bastantes comparáveis entre as variáveis com e sem segunda cura, apenas com pequenas diferenças percentuais significativas aos desvios padrão, demonstrando consistência nos resultados.

No que diz respeito à absorção de umidade, os machos de areia sem a segunda cura mostraram-se pouco suscetíveis à retenção de umidade, o que é positivo para a qualidade das peças fundidas. O ensaio de teor de absorção de umidade revelou que a variável sem a segunda cura apresentou uma média de absorção de 2,00%, comparada a 1,00% para os machos com a segunda cura, uma diferença pouco significativa em termos de processo.

A incidência de porosidades nos cilindros fundidos foi menor nos lotes piloto sem cura, resultando em uma redução significativa de sucata. Os dados indicam que os lotes sem a segunda cura apresentaram um índice de porosidade de 2,8%, enquanto os lotes com a segunda cura apresentaram um índice de 3,6%. Essa redução contribui para a eficiência do processo e a qualidade final das peças fundidas.

Além disso, não foram observadas anomalias na presença de resíduos de areia nos canais dos cilindros, demonstrando que a qualidade da fundição foi mantida. A inspeção visual realizada com uma câmera de inspeção de canais confirmou que a variável sem a segunda cura não apresentou desempenho inferior à variável com cura, em termos de incidência de resíduos de areia.

Os benefícios dessa mudança de processo são claros. A eliminação da segunda etapa de cura reduz o consumo de energia e os custos operacionais, tornando o processo

mais sustentável e econômico. A qualidade das peças fundidas, em termos de resistência mecânica, absorção de umidade, porosidade e resíduos de areia, foi mantida ou melhorada. Além disso, a produção com machos de areia sem a segunda cura é viável, mantendo a eficiência e a qualidade do processo, além de otimizar o uso de recursos.

A análise detalhada e os resultados positivos indicam que a otimização do processo de fundição para eliminar a segunda cura dos machos de areia pode ser implementada com sucesso. Esta mudança resultará em uma produção mais eficiente e econômica, mantendo a integridade e a qualidade das peças fundidas.

A eliminação da segunda etapa de cura em estufa para os machos de areia não comprometeu a qualidade das peças fundidas e apresentou diversas vantagens operacionais e econômicas. Os resultados dos testes e ensaios realizados forneceram uma base sólida para justificar essa mudança no processo, que pode levar a uma produção mais sustentável e eficiente sem comprometer a qualidade das peças fundidas.

## **7.0 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspectos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. De seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser objecto de futura investigação:

- Investigar a influência do teor de resina fenólica nos machos de areia para identificar um teor ótimo para otimizar as propriedades físico-químicas dos machos;
- Estudar a melhor resina que se encaixe no processo de produção de machos de areia sem a segunda cura em estufa;
- Estudar novas matérias para a produção de machos de areia que não necessitem cura em estufa e avaliar suas propriedades físico-químicas em comparação aos materiais tradicionais usados na atualidade.

## 8.0 REFERÊNCIAS

CENTRO DE FUNDIÇÃO SENAI-MG (Brasil). **Areias de Fundição Aglomeradas com Argila**. Itaúna, 1982.

GAWRONOVÁ, M. *et al.* **Evaluation of additive manufacturing of sand cores in terms of the resulting surface roughness**. *Heliyon*, 8.10, 2022.

JONES, S.; YUAN, C. **Advances in shell moulding for investment casting**. *Journal of Materials Processing Technology* 135, p. 258–265, 2021.

KHANDELWAL, H.; RAVI, B. **Effect of molding parameters on chemically bonded sand mold properties**. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, p. 127–133, 2016.

NAGARAJAN, N. M.; ROSHAN, H. Md. **NEWER METHODS OF TESTING RESIN BONDED SAND IN SHELL MOULDING. MECHANICAL BEHAVIOUR OF MATERIALS VI**. p. 681–686, 1992.

STAUDER, B. J.; KERBER, H.; SCHUMACHER, P. **Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation**. *Journal of Materials Processing Technology* 237, p. 188–196, 2016.

GYARMATI, G. *et al.*, **The effect of sand quality on the bending strength and thermal distortion of chemically bonded sand cores**. *Heliyon*. [s. l.], v. 7, n. 7, 2021.

BARGAOUI, H. *et al.* **Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting**. *Journal of Materials Processing Technology*, [s. l.], v. 246, p. 30–41, 2017.