



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Bruno Paulino Colella

Avaliação da Viabilidade da Alumina Calcificada como substituto da Zirconita na  
Preparação da 1ª Lama no Processo de Microfusão

Florianópolis  
2024

Bruno Paulino Colella

Avaliação da Viabilidade da Alumina Calcinada como substituto da Zirconita na  
Preparação da 1ª Lama no Processo de Microfusão

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Prof. Fernando Antônio Forcellini

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Colella, Bruno Paulino

Avaliação da viabilidade da alumina calcinada como substituto da zirconita na preparação da 1ª lama no processo de microfusão / Bruno Paulino Colella ; orientador, Fernando Antônio Forcellini, 2024.  
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Microfusão. 3. Zirconita. 4. Alumina Calcinada. I. Forcellini, Fernando Antônio . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Bruno Paulino Colella

**Avaliação da Viabilidade da Alumina Calcinada como substituto da Zirconita na Preparação da  
1ª Lama no Processo de Microfusão**

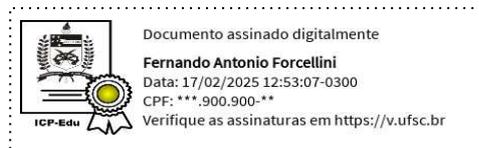
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em  
Ciência e Engenharia de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de  
Materiais.

Local Florianópolis, 17 de dezembro de 2024.

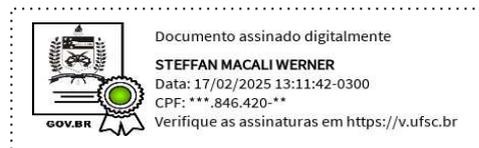


Prof. Cristiano Binder, Dr.  
Coordenador do Curso

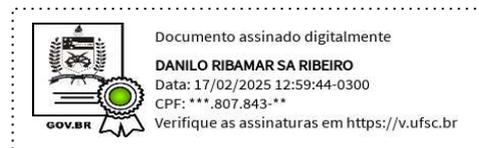
**Banca examinadora**



Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.  
Orientador



Prof.(a) Steffan Macali Werner, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Danilo Ribamar Sá Ribeiro, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Florianópolis, 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Paulo e Cristina, por todo o apoio e suporte incondicional que sempre me proporcionaram, especialmente ao me incentivarem nas decisões mais importantes da minha vida. À minha irmã, Fernanda, sou grato pela parceria e pelos ensinamentos que tanto contribuíram para minha jornada acadêmica.

Expresso também minha gratidão à Precicast, uma empresa séria, competente e referência em seu mercado de atuação, pelas oportunidades concedidas desde o início da minha trajetória como estagiário até minha efetivação. Após quatro anos de aprendizado e crescimento, sinto-me cada vez mais fascinado pelas complexidades e possibilidades do processo de microfusão.

Ao meu orientador, Prof. Fernando Forcellini, agradeço pela orientação dedicada e pela disponibilidade nos momentos em que precisei de auxílio.

Por fim, deixo meu agradecimento aos colegas Fernando, João, Matheus, Matias, Pedro e Saymon, que tornaram o ambiente acadêmico mais leve e enriquecedor, além de me apoiarem em momentos de desafios.

"Eu não cheguei até aqui apenas para chegar até aqui, então ainda tenho muito mais para conquistar."

*(Tom Brady)*

## RESUMO

A escassez de zirconita no mercado tem levado a indústria de microfusão a buscar alternativas viáveis para a formulação da primeira camada refratária do processo. Diante desse cenário, este trabalho avaliou a viabilidade técnica e econômica da substituição da farinha de zirconita por alumina calcinada. Para isso, foram analisados aspectos visuais das amostras, a facilidade de manuseio da nova matéria-prima e os custos de produção associados. As amostras foram submetidas ao processo convencional de microfusão, sendo testadas em diferentes ligas metálicas. Os resultados demonstraram que a alumina calcinada apresentou desempenho satisfatório em materiais de baixa reatividade, como aço carbono, aço inoxidável austenítico e ferro fundido nodular. No entanto, foram observadas limitações significativas em aços inoxidáveis martensíticos, devido à ocorrência de reações metal-molde. Este estudo contribui para o entendimento do comportamento da alumina calcinada como alternativa à zirconita, destacando seu potencial de aplicação e suas limitações. Os resultados obtidos fornecem subsídios para a avaliação de novos materiais refratários no contexto da microfusão.

**Palavras-chave:** Microfusão; Lama refratária; Zirconita; Alumina.



## **ABSTRACT**

The scarcity of zircon in the market has led the investment casting industry to seek viable alternatives for the formulation of the process's first refractory layer. In this context, this study evaluated the technical and economic feasibility of replacing zircon flour with calcined alumina. To achieve this, visual aspects of the samples, the ease of handling the new raw material, and the associated production costs were analyzed. The samples were subjected to the conventional investment casting process and tested in different metal alloys. The results showed that calcined alumina exhibited satisfactory performance in low-reactivity materials, such as carbon steel, austenitic stainless steel, and ductile iron. However, significant limitations were observed in martensitic stainless steels due to metal-mold reactions. This study contributes to the understanding of the behavior of calcined alumina as an alternative to zircon, highlighting its application potential and limitations. The results provide insights for the evaluation of new refractory materials in the context of investment casting.

**Keywords:** Investment casting; Refractory slurry; Zircon flour; Alumina.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas Processo de Microfusão .....	21
Figura 2 - Molde metálico .....	22
Figura 3 – Modelo em cera da peça com canais de alimentação .....	23
Figura 4 – Cacho em cera .....	24
Figura 5 – Montagem do cacho .....	24
Figura 6 – Banho de lama refratária e chuva de areia refratária .....	26
Figura 7 – Cacho finalizado na etapa de revestimento.....	27
Figura 8 – Operação de vazamento do metal.....	29
Figura 9 – Reação metal-molde .....	31
Figura 10 – Injetora de cera.....	49
Figura 11 – Cacho amostra nº 6 em cera .....	50
Figura 12 – Cacho amostra nº 6 fundidos .....	54
Figura 13 – Vista superior amostra Nº1 .....	59
Figura 14 – Vista inferior amostra Nº1 .....	59
Figura 15 – Vista lateral amostra Nº1 .....	60
Figura 16 – Vista superior amostra Nº2.....	61
Figura 17 – Vista lateral amostra Nº2 .....	61
Figura 18 – Vista lateral amostra Nº3 .....	62
Figura 19 – Vista lateral amostra Nº3 .....	62
Figura 20 – Vista lateral amostra Nº4 .....	63
Figura 21 – Vista lateral amostra Nº4 .....	63
Figura 22 – Vista lateral amostra Nº4 .....	64
Figura 23 – Vista lateral amostra Nº5 .....	65
Figura 24 – Vista lateral amostra Nº5 .....	65
Figura 25 – Vista superior amostra Nº5.....	65
Figura 26 – Vista lateral amostra Nº6 .....	66
Figura 27 – Vista lateral amostra Nº6 .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre Processos de fundição.....	20
Tabela 2 – Reservas de Zircônio no Mundo .....	34
Tabela 3 – Ligas metálicas utilizadas, composição química e norma.....	45
Tabela 4 – Pesos e custo amostra N <sup>o</sup> 1 .....	67
Tabela 5 – Pesos e custo amostra N <sup>o</sup> 2 .....	68
Tabela 6 – Pesos e custo amostra N <sup>o</sup> 3 .....	69
Tabela 7 – Pesos e custo amostra N <sup>o</sup> 4 .....	70
Tabela 8 – Pesos e custo amostra N <sup>o</sup> 5 .....	71
Tabela 9 – Pesos e custo amostra N <sup>o</sup> 6 .....	72

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	FUNDIÇÃO .....	18
2.2	FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA.....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Etapas do Processo</b> .....	<b>20</b>
2.2.1.1	<i>Desenvolvimento molde metálico</i> .....	21
2.2.1.2	<i>Injeção do Modelo em Cera</i> .....	22
2.2.1.3	<i>Montagem</i> .....	23
2.2.1.4	<i>Revestimento</i> .....	25
2.2.1.5	<i>Deceragem</i> .....	27
2.2.1.6	<i>Calcinação</i> .....	28
2.2.1.7	<i>Fundição</i> .....	28
2.2.1.8	<i>Desmoldagem</i> .....	29
2.2.1.9	<i>Acabamento</i> .....	30
<b>2.2.2</b>	<b>Lama Primária</b> .....	<b>30</b>
2.2.2.1	<i>Preparação da lama primária</i> .....	32
2.3	ZIRCONITA.....	33
2.4	ALUMINA .....	35
2.5	ESTUDOS-CHAVE .....	37
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
3.1	INVESTIGAÇÃO NA LITERATURA E MERCADO .....	41
3.2	DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	42
<b>3.2.1</b>	<b>Identificação das amostras</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Definição das ligas metálicas</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Classificação das Amostras por Tamanho e complexidade</b> .....	<b>46</b>
3.3	PREPARAÇÃO DA LAMA PRIMÁRIA .....	47
3.4	PROCESSO DE MICROFUSÃO.....	48

3.4.1	Injeção dos modelos em cera .....	48
3.4.2	Montagem dos cachos .....	49
3.4.3	Limpeza dos cachos .....	50
3.4.4	Revestimento Primário e Demais Banhos .....	50
3.4.5	Deceragem.....	52
3.4.6	Calcinação .....	53
3.4.7	Fundição .....	53
3.4.8	Desmoldagem.....	55
3.4.9	Corte e Lixamento.....	55
3.4.10	Inspeção Visual.....	55
3.5	AVALIAÇÃO DO CUSTO ALUMINA CALCINADA X FARINHA DE ZIRCONITA.....	55
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
4.1	AVALIAÇÃO QUALITATIVA QUANTO AO ASPECTO VISUAL .....	58
4.1.1	<b>Amostra Nº1.....</b>	<b>58</b>
4.1.2	<b>Amostra Nº2.....</b>	<b>60</b>
4.1.3	<b>Amostra Nº3.....</b>	<b>62</b>
4.1.4	<b>Amostra Nº4.....</b>	<b>63</b>
4.1.5	<b>Amostra Nº5.....</b>	<b>64</b>
4.1.6	<b>Amostra Nº6.....</b>	<b>66</b>
4.2	AVALIAÇÃO DO CUSTO POR CACHO E POR PEÇA .....	67
4.2.1	<b>Custos Amostra Nº1 .....</b>	<b>67</b>
4.2.2	<b>Custos Amostra Nº2 .....</b>	<b>68</b>
4.2.3	<b>Custos Amostra Nº3 .....</b>	<b>69</b>
4.2.4	<b>Custos Amostra Nº4 .....</b>	<b>69</b>
4.2.5	<b>Custos Amostra Nº5 .....</b>	<b>70</b>
4.2.6	<b>Custos Amostra Nº6 .....</b>	<b>71</b>
5	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na metalurgia, diversos métodos de fundição são empregados na fabricação de componentes metálicos, cada um com suas vantagens e desvantagens. A fundição por cera perdida, também conhecida como microfusão ou fundição de precisão, destaca-se por permitir a obtenção de peças complexas com excelente acabamento superficial e alta precisão dimensional (ASM INTERNATIONAL, 1988; BEELEY, 2001). Esse processo tem sido utilizado há milhares de anos, com registros de aplicação na fabricação de artefatos e joias (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1997). No entanto, foi durante a Segunda Guerra Mundial que o método teve um grande avanço tecnológico, tornando-se amplamente empregado na produção de componentes para a indústria aeroespacial e bélica, devido à necessidade de otimização e melhoria da qualidade dos produtos fundidos.

O processo de microfusão inicia-se com a injeção de modelos em cera, que são réplicas exatas das peças finais, considerando as contrações dimensionais que ocorrem durante a solidificação do metal. Os modelos injetados são então montados em estruturas denominadas cachos ou árvores, nas quais várias peças de cera são unidas a uma haste central, também feita de cera. Essa montagem passa por sucessivos banhos cerâmicos, formando um molde refratário ao redor dos modelos de cera. Os primeiros banhos cerâmicos são formulados para garantir a reprodução precisa dos detalhes da peça, enquanto os banhos subsequentes conferem resistência mecânica ao molde (MACHADO, 2005).

Após a secagem do revestimento, a cera interna é removida, geralmente por autoclaves, permitindo que o molde cerâmico fique completamente vazio. Em seguida, ele é submetido à calcinação, uma etapa fundamental para eliminar resíduos de cera e conferir resistência térmica antes da fundição do metal (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 2017). O vazamento do metal líquido ocorre dentro do molde cerâmico, preenchendo o espaço anteriormente ocupado pela cera. Após a solidificação, o molde é quebrado, obtendo-se peças com elevada precisão dimensional e acabamento superficial de alta qualidade (GROOVER, 2014).

Dentro do processo de microfusão, a etapa de revestimento é uma das mais críticas, pois influencia diretamente a qualidade das peças produzidas. O controle rigoroso de variáveis como viscosidade, temperatura e pH das lamas cerâmicas é

essencial para garantir a formação adequada do molde. Além disso, a secagem dos cachos deve ocorrer em condições controladas de temperatura e umidade, a fim de evitar defeitos no revestimento (ABIFA, 2021).

A seleção das matérias-primas utilizadas na formulação das lamas cerâmicas desempenha um papel fundamental na qualidade final das peças fundidas. Na fundição por cera perdida, a lama primária, responsável por garantir um acabamento superficial preciso, é predominantemente composta por zirconita ( $ZrSiO_4$ ), devido à sua elevada refratariedade e estabilidade química (TREMARIN, 2011). Entretanto, a forte dependência da indústria de microfusão em relação à zirconita representa um desafio, pois há preocupações crescentes quanto à sua oferta no mercado. De acordo com estudos recentes, a escassez de zirconita pode comprometer a viabilidade do processo no futuro, tornando necessária a busca por alternativas viáveis para sua substituição (BRANSCOMB, 2011; WHITEHOUSE et al., 2005).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade do uso da alumina calcinada como alternativa à zirconita na formulação da lama refratária utilizada no processo de microfusão.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a eficácia da alumina calcinada como material alternativo em diferentes ligas metálicas, incluindo aços de baixa liga, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos e ferro fundido nodular.
- Avaliar a viabilidade econômica do uso da alumina calcinada em substituição à zirconita.
- Identificar as dificuldades e diferenças associadas ao uso da alumina calcinada em comparação à zirconita.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão técnica e bibliográfica abrangente sobre o processo de fundição, com ênfase na microfundição, também conhecida como fundição por cera perdida. O objetivo é fornecer uma base teórica sólida para compreender as etapas envolvidas, os materiais utilizados e as variáveis críticas que influenciam a qualidade final do produto fundido. A abordagem destaca as características intrínsecas da microfundição, como sua precisão dimensional, a possibilidade de moldagem de peças complexas e a ampla variedade de ligas metálicas aplicáveis.

Inicia-se com uma descrição geral do processo de fundição, contextualizando-o historicamente e classificando seus métodos principais. Em seguida, são detalhadas as etapas do processo de microfundição, desde o desenvolvimento do molde metálico até as operações de acabamento. Além disso, explora-se o papel fundamental dos materiais refratários, como a zirconita e a alumina, no desempenho dos moldes cerâmicos, analisando suas propriedades e aplicações específicas.

Com base na literatura técnica e em estudos, como os trabalhos de Tremarin (2011) e Machado (2005), são discutidas metodologias relevantes para o controle de variáveis do processo e para a melhoria das propriedades mecânicas e microestruturais das peças fundidas. Assim, este capítulo busca integrar conhecimentos teóricos e práticos, fundamentando as discussões subsequentes e a análise dos resultados apresentados neste trabalho.

### 2.1 FUNDIÇÃO

Segundo Groover (2014), a fundição é caracterizada como o processo em que o metal fundido é introduzido em um molde, preenchendo sua cavidade por meio da gravidade ou de outra força, solidificando-se e assumindo a forma do molde. O componente ou peça resultante desse processo é denominado fundido. Trata-se de um dos métodos de fabricação mais antigos, com registros de utilização há cerca de 6 mil anos.

Ainda conforme Groover (2014), os processos de fundição apresentam diversas variantes, que se diferenciam quanto ao grau de automação, produtividade, precisão dimensional e acabamento superficial. O tipo de molde utilizado desempenha

um papel significativo nas propriedades físicas do material fundido, como a taxa de dissipação de calor, que influencia diretamente o tamanho final do grão e, conseqüentemente, as características de resistência mecânica da peça. Com base nessas distinções, os processos de fundição podem ser classificados de acordo com o tipo de molde ou pela força utilizada para preencher o molde, seja por gravidade ou pressão.

Entre os principais métodos de fundição, podem ser destacados:

- fundição em areia;
- fundição por gravidade;
- fundição sob pressão;
- fundição em cera perdida (microfusão);
- fundição em moldes permanentes;
- fundição em casca (shell molding);
- fundição centrífuga;
- fundição a vácuo.

Cada método apresenta vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação, do custo e da complexidade do processo.

## 2.2 FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

O processo de fundição por cera perdida, também conhecido como fundição de precisão ou microfusão, consiste no revestimento de um modelo de cera com material refratário, que se transforma no molde onde o metal líquido será despejado. O termo "cera perdida" refere-se à remoção do modelo de cera antes da fundição, enquanto o nome "fundição de precisão" destaca a capacidade desse método de produzir peças com alta precisão dimensional e detalhes complexos (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1997).

Entre as principais vantagens da fundição por cera perdida, destacam-se:

- **Precisão dimensional:** permite a produção de peças detalhadas e com tolerâncias reduzidas.
- **Variedade de materiais:** possibilita o uso de uma ampla gama de ligas metálicas.

- **Produção em larga escala:** ideal para produção em massa de peças complexas.
- **Acabamento superficial** de qualidade: as peças resultantes apresentam superfícies lisas, reduzindo a necessidade de acabamento adicional.

**Tabela 1 - Comparação entre Processos de fundição**

Propriedades	Areia verde	Shell	Cera	Molde metálico (gravidade)	Molde metálico (injeção)
1 Tolerância dimensional	1,2 mm a 3,8 mm	0,25 mm a 5 mm	0,02 mm a 3,8 mm	2,5 mm a 7,5 mm	2,5 mm a 12,5 mm
2 Peso fundido	"Ilimitado"	250 lb	100 lb	100 lb	75 lb
3 Espessura mínima	2,5 mm	2,5mm	1,6 mm	3,2 mm	0,8 mm
4 Acabamento superficial	Razoável	Bom	Bom	Bom	Ótimo
5 Custo	Baixo	Médio	Alto	Alto	Muito alto
6 Capacidade de fundição de peças complexas	Razoável	Bom	Ótimo	Razoável	Bom
7 Gama de ligas que podem ser fundidas	"Ilimitada"	"Ilimitada"	"Ilimitada"	Indicado para alumínio e cobre	Indicado para alumínio

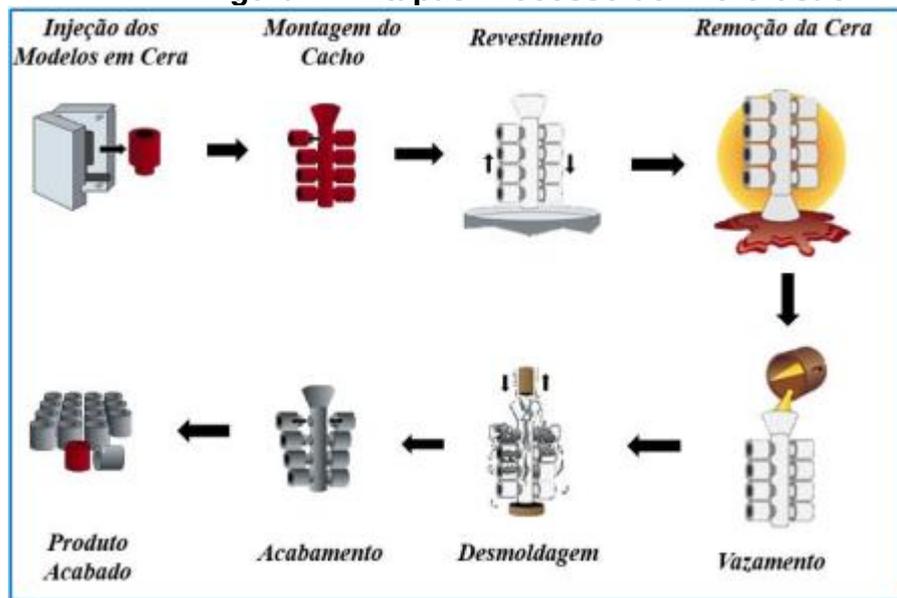
Fonte: Elaboração BNDES (2011)

Como mostrado na Tabela 1, a microfundição se destaca em relação a outros processos de fundição por essas características, mas seu custo pode ser elevado em comparação com métodos alternativos.

### 2.2.1 Etapas do Processo

O processo de microfundição envolve diversas etapas até a obtenção do produto final. Nesta seção do trabalho, serão descritas cada uma dessas etapas, bem como as dificuldades associadas e sua importância para o sucesso do processo.

**Figura 1 – Etapas Processo de Microfusão**



Fonte: Curso de Fundição de Precisão ABIFA (2021)

Na Figura 1, o processo é apresentado de forma simplificada, mostrando as etapas do processo, em que a peça passa pela injeção do modelo de cera em uma matriz metálica, sendo posteriormente montada em forma de cacho e revestida por um molde cerâmico, no qual o metal líquido será vazado. Ao final do processo, a peça passa por uma etapa de acabamento, resultando no produto final.

### 2.2.1.1 Desenvolvimento molde metálico

O projeto se inicia com o desenvolvimento de um molde metálico (Figura 2), local onde a cera será injetada para a produção das peças. Nesta etapa, alguns fatores importantes devem ser considerados, como a geometria da peça, o cálculo da contração da cera e do aço, a ventilação adequada para a saída de gases, o número de cavidades, o método de extração e o material da matriz, entre outros. Conforme descrito pelo Investment Casting Institute (1997), o molde pode ser simples, operado manualmente com uma única cavidade, ou automatizado, contendo múltiplas cavidades para maior eficiência na produção.

**Figura 2 - Molde metálico**

Fonte: Acervo do Autor (2024)

O molde pode ser confeccionado em diversos materiais, sendo os mais comuns: alumínio, aço e bismuto. A escolha do material deve ser baseada em uma análise das propriedades desejadas e da vida útil esperada do molde. Após a confecção, o molde pode passar por processos destinados a melhorar sua resistência ao desgaste, como o tratamento de nitretação, por exemplo.

#### *2.2.1.2 Injeção do Modelo em Cera*

O processo tem início com a injeção de cera no molde metálico. Cada cavidade do molde deve produzir um modelo que reproduza fielmente as características desejadas para a peça bruta após a fundição.

O modelo de cera (figura 3) deve incluir um ou mais canais de alimentação, geralmente posicionados nas áreas de maior massa, que serão responsáveis por alimentar a peça com o metal líquido durante a fundição (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1997). Esses canais de alimentação possuem três funções principais: conectar a peça ao canal de descida na etapa de montagem, permitir que a cera derreta e seja drenada do molde cerâmico durante a etapa de deceragem, e servir como o caminho pelo qual o metal líquido preencherá a peça na etapa de fundição.

**Figura 3 – Modelo em cera da peça com canais de alimentação**



Fonte: Acervo do autor (2024)

A cera utilizada no processo é composta por uma mistura de EVA, cera de carnaúba, parafina e breu. As ceras destinadas à produção dos modelos devem apresentar baixo ponto de amolecimento, baixo teor de cinzas e um coeficiente de expansão reduzido, garantindo a qualidade e precisão do processo (ABIFA, 2021).

#### *2.2.1.3 Montagem*

Para iniciar a montagem dos cachos, o primeiro passo é a injeção do canal de descida. Existem diversos tipos de canais de descida, e a escolha do mais adequado deve considerar fatores como a geometria da peça, a quantidade de canais de alimentação do modelo de cera e o peso final da peça fundida.

Conforme ilustrado na Figura 4, o conjunto formado pelo canal de descida, os canais de alimentação e as peças é denominado "cacho" ou "árvore".

**Figura 4 – Cacho em cera**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

A montagem do cacho deve ser realizada de forma que a lama cerâmica da etapa de revestimento consiga atingir todas as regiões da peça, garantindo uma cobertura uniforme. Além disso, é essencial deixar espaço suficiente para que o disco abrasivo possa cortar o canal e separar a peça fundida após a solidificação.

Conforme ilustrado na Figura 5, a fixação das peças ao canal de descida é realizada utilizando uma espátula aquecida, garantindo a fusão controlada dos pontos de contato e a aderência adequada das peças.

**Figura 5 – Montagem do cacho**



Fonte: Catálogo da empresa Precicast (2011)

Esse procedimento é fundamental para a estabilidade do cacho durante as etapas seguintes do processo, como o revestimento e a fundição, evitando falhas estruturais na montagem.

#### 2.2.1.4 *Revestimento*

Uma das etapas mais críticas do processo de fundição de precisão é o revestimento, cujo principal objetivo é formar um molde cerâmico que envolve o cacho de cera e que, posteriormente, resistirá às elevadas temperaturas do metal líquido durante sua inserção no molde (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1997).

O processo de revestimento inicia-se com a limpeza do cacho em uma solução desengraxante, seguida de uma lavagem cuidadosa e secagem completa. Este procedimento é fundamental para eliminar resíduos de poeira ou silicone provenientes da etapa de injeção, assegurando a aderência adequada da primeira camada de lama cerâmica.

Após o desengraxe, o cacho é submetido ao primeiro banho cerâmico, no qual é imerso em uma lama composta por farinha de zirconita (material de granulometria fina), sílica coloidal, um polímero, um tensoativo e um antiespumante, conhecida como "1ª lama" (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1997). Em seguida, o cacho é recoberto com uma camada de areia de zircônio, conforme ilustrado na Figura 6.

Essa etapa inicial tem como objetivo garantir que o molde cerâmico capture, com precisão, as dimensões e os detalhes do modelo de cera, replicando-os fielmente na peça metálica. O número de banhos subsequentes pode variar conforme a complexidade dos detalhes da peça e os requisitos do material fundido.

**Figura 6 – Banho de lama refratária e chuva de areia refratária**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

Na sequência, o cacho é imerso em uma lama composta por mulita e sílica coloidal, sendo posteriormente revestido com argila calcinada, também conhecida como chamote. O chamote é um material cerâmico granular de granulometria superior à da areia, responsável por conferir maior resistência ao molde cerâmico. O termo "lama" refere-se a uma suspensão homogênea de partículas sólidas finas em um líquido (sílica coloidal), utilizada para revestir o modelo de cera com materiais refratários. Esse processo é repetido várias vezes, com o aumento progressivo da granulometria do chamote, para assegurar a permeabilidade e resistência do molde.

Entre cada banho, o cacho deve ser transferido para uma sala de secagem, onde permanecerá sob condições controladas de temperatura e umidade. O tempo de secagem é variável e depende das características específicas do modelo.

A etapa final do processo de revestimento consiste no banho em uma lama refratária, cuja função principal é selar as partículas de chamote, prevenindo a contaminação da cera durante a deceragem e permitindo sua reutilização. Após essa operação, o cacho é novamente levado à sala de secagem, onde permanece por um período mínimo de 48 horas, completando assim o processo de revestimento e preparando-o para as etapas subsequentes, conforme observado na Figura 7.

**Figura 7 – Cacho finalizado na etapa de revestimento**



Fonte: Acervo do autor (2024)

O revestimento constitui uma etapa de fundamental importância no processo de fundição de precisão. Está diretamente ligado à resistência mecânica do molde, permitindo que ele suporte as pressões geradas durante a deceragem, bem como o peso do metal líquido durante a fundição. Além disso, confere ao molde propriedades essenciais, como boa condutividade térmica e elevada resistência ao choque térmico, garantindo a integridade e a qualidade do produto final.

#### *2.2.1.5 Deceragem*

O objetivo da deceragem é remover a cera do interior do molde cerâmico, utilizada como modelo durante sua confecção. Segundo *ASTM Metals Handbook* (1988), a operação de deceragem é a etapa que impõe o maior estresse ao molde cerâmico e, com frequência, resulta em problemas. Isso se deve ao fato de que as expansões térmicas dos modelos em cera são muitas vezes superiores às dos materiais refratários usados nos moldes. Quando o molde é aquecido para derreter a cera, essa diferença de expansão gera uma pressão significativa, que pode provocar trincas ou até mesmo a ruptura do molde.

O cacho é então colocado em uma autoclave, onde é submetido a altas pressões e temperaturas por um curto período de tempo, garantindo um aquecimento uniforme em toda a superfície do molde Investment Casting Institute (1997). Esse processo permite a extração eficiente da cera, sendo concluído em poucos minutos. A maior parte da cera extraída é recuperada para reutilização.

#### *2.2.1.6 Calcinação*

Conforme descrito pelo Investment Casting Institute (1997), após a deceragem, o molde é submetido a um forno de calcinação, onde é aquecido a temperaturas elevadas. Esse processo tem a função de eliminar a umidade e os resíduos de cera, além de proporcionar ao molde a resistência térmica necessária para suportar as altas temperaturas do metal líquido durante o vazamento. Além disso, a calcinação impede a solidificação rápida do metal, minimizando o risco de trincas por choque térmico. Os principais parâmetros a serem controlados neste processo são o tempo e a temperatura de aquecimento.

#### *2.2.1.7 Fundição*

A etapa mais importante e crítica do processo de microfusão é a fundição do metal líquido, que é obtido pela fusão de sucata ou materiais de retorno, juntamente com elementos de liga, normalmente aquecidos em um forno de indução elétrico. Após atingir a temperatura ideal, a liga metálica líquida é vazada no interior do molde cerâmico, preenchendo-o completamente devido à ação da gravidade e às altas temperaturas, que, no caso de ligas ferrosas, podem atingir cerca de 1600 °C, conforme se pode observar na figura 8.

**Figura 8 – Operação de vazamento do metal**

Fonte: Acervo do autor (2024)

Uma das principais vantagens do processo de microfusão é a ampla variedade de ligas que podem ser fundidas, permitindo a diversificação dos setores industriais atendidos, cada qual utilizando a liga mais adequada para proporcionar as características desejadas no produto final.

#### *2.2.1.8 Desmoldagem*

O processo de desmoldagem marca o início da avaliação da qualidade das peças fundidas, pois é a etapa em que o molde cerâmico é removido, possibilitando a inspeção visual do fundido. Esse processo é realizado, geralmente, por impacto, utilizando-se um martelo pneumático. Alternativamente, jatos de água ou banhos químicos também podem ser empregados. No caso do martelo pneumático, ele é normalmente posicionado no copo do cacho para evitar danos às peças.

### 2.2.1.9 *Acabamento*

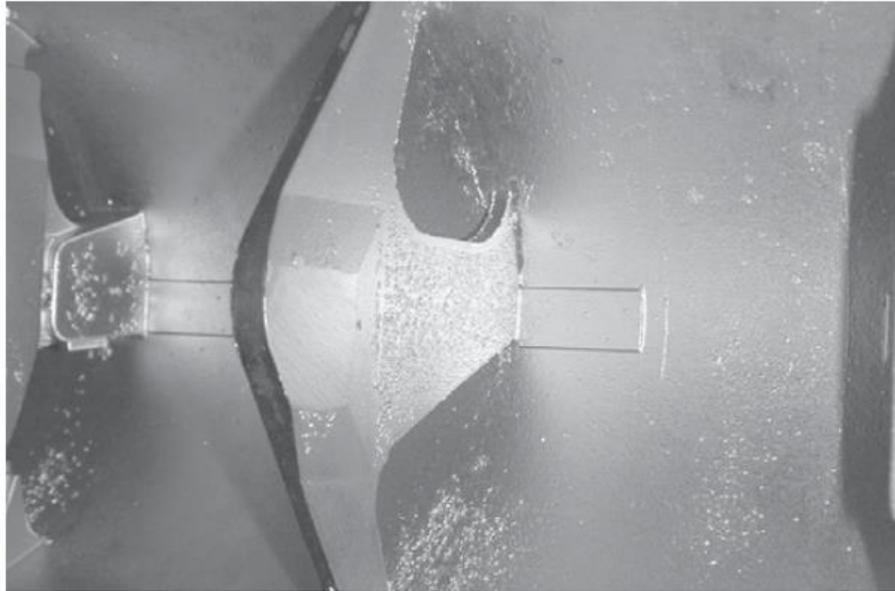
Na etapa de acabamento, a peça é trabalhada até atingir sua forma final. Inicialmente, o objetivo é separar as peças dos cachos utilizando um disco abrasivo em rotação.

Após essa separação, permanecem resquícios dos canais de alimentação, que são removidos através do lixamento. Em seguida, as peças são submetidas a um processo de jateamento com granalha de aço, a fim de obter o acabamento desejado e eliminar quaisquer vestígios de material refratário do molde cerâmico. O jateamento pode ser realizado com abrasivos metálicos, não metálicos ou esferas de vidro, conforme as especificações do produto.

Após esses processos, é realizada uma inspeção final com o objetivo de identificar e segregar produtos não conformes ou que necessitem de retrabalho, garantindo assim a qualidade do produto final. Operações como usinagem, tratamentos térmicos e superficiais, calibração, entre outras, podem ser realizadas após as etapas anteriores, dependendo dos requisitos de cada projeto.

### 2.2.2 **Lama Primária**

O material refratário caracteriza-se principalmente por sua capacidade de suportar altas temperaturas sem deformar-se, além de apresentar baixa condutividade térmica, desempenhando a função de isolante. No processo de microfusão, a casca cerâmica destaca-se por sua baixa expansão térmica, uma propriedade essencial para que as dimensões finais da peça fundida permaneçam dentro dos padrões estabelecidos, conforme descrito pela Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2021) em seu curso de fundição de precisão. Outra característica relevante do material refratário é sua não reatividade com o metal líquido, fator indispensável para evitar reações entre o metal e o molde, que poderiam gerar defeitos superficiais na peça fundida, um fenômeno conhecido como reação metal-molde.

**Figura 9 – Reação metal-molde**

Fonte: Atlas of Casting Defects (2017)

A lama cerâmica é composta por uma fase líquida e uma fase sólida, ambas fundamentais para o desempenho adequado do molde cerâmico, tanto na etapa de revestimento quanto nas fases subsequentes, como deceragem, calcinação e vazamento do metal. Sua composição confere ao molde cerâmico propriedades essenciais, como permeabilidade e resistência mecânica, assegurando seu comportamento ideal ao longo do processo.

#### **Componentes da fase líquida:**

**Sílica coloidal:** Trata-se do ligante mais amplamente empregado no processo de microfusão, desempenhando o papel de aglutinante na mistura, conforme descrito pelo ASTM Metals Handbook (1988). O processo de fabricação da sílica coloidal envolve a remoção de íons de sódio do silicato de sódio por meio de troca iônica, resultando em uma dispersão coloidal de partículas de sílica em água. Essa dispersão é estabilizada por uma carga iônica que impede a aglomeração das partículas. O íon estabilizador, geralmente sódio, confere ao produto caráter alcalino. Apesar de sua eficácia como aglutinante, a base aquosa da sílica coloidal pode tornar o processo de secagem mais lento, especialmente em áreas de difícil acesso ou núcleos complexos.

**Tensoativo:** Também denominado agente molhante, é um componente essencial na formulação da lama primária. Sua função principal é reduzir a tensão superficial das soluções aquosas, proporcionando maior cobertura do cacho durante

a imersão e aumentando a adesão da lama ao modelo de cera. Trata-se de um líquido translúcido e denso, cujas características otimizam o revestimento.

**Antiespumante:** Este componente desempenha um papel crucial na eliminação de bolhas de ar formadas durante a preparação da lama cerâmica, decorrentes da agitação necessária para homogeneizar os componentes. Sua inclusão assegura a consistência e uniformidade da mistura.

**Polímero:** É incorporado como um líquido polimérico dissolvido em meio aquoso, conferindo benefícios específicos ao processo. Dentre suas vantagens, destacam-se: maior flexibilidade da casca cerâmica frente a variações térmicas bruscas, melhor adesão da lama ao modelo, redução do peso final da casca, aumento da permeabilidade e maior retenção de materiais refratários, conforme apontado pela ABIFA.

#### **Componente da fase sólida:**

**Farinha de zirconita:** Material refratário amplamente utilizado na composição da fase sólida da primeira lama cerâmica. Sua função é garantir características fundamentais, como refratariedade, densidade, não reatividade com o metal líquido e controle da dilatação térmica do molde cerâmico. Essas propriedades são essenciais para assegurar a estabilidade dimensional do molde ao longo das etapas subsequentes do processo.

#### *2.2.2.1 Preparação da lama primária*

A preparação da lama inicia-se com a adição gradual da farinha de zirconita ao agente ligante, que, neste caso, é a sílica coloidal já presente no tanque misturador, juntamente com o polímero e o tensoativo. A farinha deve ser adicionada de forma gradual para evitar a formação de aglomerados. Em intervalos regulares, deve-se utilizar um misturador para garantir a homogeneização da mistura. Após a conclusão da mistura, o antiespumante é adicionado. Inicialmente, a viscosidade da lama será elevada, mas, conforme a mistura continua no tanque, a viscosidade irá diminuir até atingir o valor especificado.

## 2.3 ZIRCONITA

A zirconita, ou dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ ), é um material refratário amplamente utilizado na indústria de microfusão, especialmente nos primeiros banhos cerâmicos, devido às suas propriedades excepcionais de resistência ao calor e estabilidade dimensional em altas temperaturas. Esse material é obtido predominantemente a partir do mineral zircão ( $ZrSiO_4$ ), cuja composição teórica é de 67% de  $ZrO_2$  e 33% de  $SiO_2$ . Conforme o Technical Handbook on Zirconium and Zirconium Compounds (ZIA, 2019), a principal fonte global de zircão são depósitos de areias minerais pesadas, concentrados majoritariamente na Austrália e na África do Sul, que juntas dominam a produção mundial. Essa predominância na oferta ressalta a importância estratégica do zircão e sua influência na disponibilidade da zirconita como insumo industrial.

No processo de microfusão, a zirconita desempenha um papel essencial na formulação da lama primária, etapa inicial responsável por capturar os detalhes precisos do modelo de cera e assegurar a reprodução fiel das características desejadas na peça fundida. A farinha de zirconita, utilizada exclusivamente na composição dessa lama, apresenta alta estabilidade química e baixa reatividade com metais fundidos, prevenindo reações indesejadas entre o molde cerâmico e o metal, conhecidas como reações metal-molde (ASTM, 1988). Após a aplicação da lama primária, o modelo é submetido a uma chuva de areia de zircônio, que recobre a camada inicial. Esse recobrimento desempenha um papel complementar ao fornecer resistência mecânica adicional ao molde e promover a adesão eficaz das camadas subsequentes. Esse procedimento é indispensável para garantir que o molde suporte as condições adversas das etapas de deceragem e vazamento do metal líquido, características críticas para a integridade do processo de microfusão.

A zirconita destaca-se ainda por suas propriedades técnicas únicas, que incluem alta densidade, variando entre 4,2 e 4,86 g/cm<sup>3</sup>, baixa expansão térmica e elevada resistência ao choque térmico, conforme descrito no manual da ZIA (2019). Essas propriedades são cruciais para evitar deformações ou trincas no molde cerâmico durante o ciclo térmico, garantindo a estabilidade dimensional das peças fundidas. Além disso, sua resistência à lixiviação e à abrasão torna a zirconita altamente eficiente em ambientes de alta demanda, características que sustentam sua ampla aplicação na microfusão. A granulometria controlada da farinha de zirconita

permite sua formulação precisa na lama primária, otimizando o desempenho técnico do molde. O manual da ZIA (2019) ressalta que a classificação granulométrica do zircônio possibilita aplicações específicas, variando desde revestimentos primários detalhados até formulações refratárias avançadas, ampliando sua versatilidade no setor.

Embora a zirconita seja amplamente utilizada, sua disponibilidade enfrenta desafios relacionados à limitação das fontes minerais. De acordo com Silva (2004), a produção global de zircônio depende predominantemente de poucos países, como a Austrália e a África do Sul, que juntas dominam o mercado. Estudos apresentados no manual da ZIA (2019) indicam que depósitos alternativos, como os associados a fosfatos, areia e cascalho, podem suprir a crescente demanda global de zircônio. Essas iniciativas são fundamentais para garantir a sustentabilidade do setor, especialmente diante da crescente dependência desse material na microfusão.

**Tabela 2 – Reservas de Zircônio no Mundo**

Discriminação	Reservas (10 <sup>3</sup> t)		Produção (10 <sup>3</sup> t)			
	Países	2003 <sup>(p)</sup>	%	2002 <sup>(r)</sup>	2003 <sup>(p)</sup>	%
Brasil <sup>(1)</sup>		2.226	3,1	29	26	2,9
África do Sul		14.000	20,5	224	280	31,6
Austrália		30.080	43,4	408	400	45,0
China		3.700	5,3	15	15	1,7
Estados Unidos		5.300	7,6	100	100	11,2
Índia		3.800	5,4	19	20	2,2
Ucrânia		6.000	8,6	34	34	3,8
Outros países		6.894	9,6	9	15	1,7
<b>Total</b>		<b>72.000</b>	<b>100,0</b>	<b>830</b>	<b>890</b>	<b>100,0</b>

Fonte: Silva (2004).

Por fim, a utilização da zirconita na microfusão justifica-se por suas propriedades de resistência ao choque térmico, estabilidade química e baixa expansão térmica, características indispensáveis para assegurar a precisão dimensional e a qualidade das peças fundidas. Contudo, os desafios relacionados à oferta do material ressaltam a necessidade de explorar alternativas, como a alumina, além de fomentar inovações tecnológicas que atendam às demandas futuras da indústria, garantindo a continuidade e a eficiência dos processos produtivos.

## 2.4 ALUMINA

A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ou óxido de alumínio, é um dos materiais refratários mais amplamente utilizados em revestimentos cerâmicos, especialmente nas etapas intermediárias e finais do processo de microfusão. Composta predominantemente por óxido de alumínio, em formas como alumina eletrofundida ou tabular (ambas contendo no mínimo 99,5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), este material destaca-se por suas excelentes propriedades térmicas e mecânicas, que a tornam ideal para suportar as condições extremas impostas pela fundição de metais.

Entre suas principais propriedades, a alumina apresenta alta refratariedade, com ponto de fusão em torno de  $2038^\circ\text{C}$ , e baixa reatividade com ligas à base de níquel e cobalto, o que a torna especialmente adequada para aplicações com superligas. Além disso, a alumina possui uma expansão térmica intermediária em comparação com outros materiais refratários utilizados no processo de microfusão, o que possibilita sua resistência a choques térmicos e mudanças bruscas de temperatura, reduzindo o risco de trincas ou deformações no molde cerâmico durante etapas críticas, como a deceragem e o vazamento do metal.

Embora a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) seja amplamente utilizada em revestimentos cerâmicos, seu uso em substituição à zirconita no primeiro banho de revestimento apresenta desafios técnicos específicos. Segundo Branscomb (2011), a alumina, tanto na forma tabular quanto eletrofundida, é um material com excelente resistência térmica, suportando altas temperaturas sem degradação significativa. Além disso, sua alta expansão térmica a torna adequada para ligas de alta temperatura, como superligas à base de níquel e cobalto.

Contudo, a alta expansão térmica da alumina pode causar distorções no molde cerâmico se usada como camada primária em processos que envolvem múltiplos banhos, especialmente quando combinada com materiais de baixa expansão térmica, como a sílica fundida. Isso ressalta a necessidade de compatibilidade térmica entre os materiais utilizados no molde, a fim de evitar trincas e deformações durante o vazamento do metal (Branscomb, 2011).

Outro aspecto importante destacado por Branscomb (2011) é que a alumina possui baixa estabilidade com ligantes coloidais em comparação à zirconita. Isso pode resultar em uma vida útil mais curta da lama cerâmica, tornando o controle operacional

mais desafiador. Além disso, enquanto a zirconita é amplamente reconhecida por sua inércia química com a maioria das ligas fundidas, a alumina pode apresentar maior suscetibilidade a reações químicas com metais ferrosos, especialmente em altas temperaturas. Essas reações podem formar compostos de baixo ponto de fusão, comprometendo a integridade do molde e o acabamento superficial das peças fundidas.

Apesar de suas excelentes propriedades, a aplicação da alumina apresenta algumas limitações. Embora seja altamente resistente, pode ser quimicamente atacada por metais como nióbio, zircônio e titânio, conforme descrito no Manual de Testes Cerâmicos do Investment Casting Institute (1994). Essa suscetibilidade restringe seu uso em processos de fundição que envolvem esses metais refratários.

Além disso, a alumina não é amplamente utilizada no primeiro banho de revestimento cerâmico, uma etapa que exige materiais com partículas ultrafinas, capazes de capturar os detalhes precisos do modelo em cera. Nessa função, a zirconita sobressai devido ao seu menor coeficiente de expansão térmica, alta densidade e menor reatividade química com metais líquidos (Investment Casting Handbook; ASTM Metals Handbook, Volume 15 – Casting). Por essas razões, a zirconita é preferida para garantir a integridade superficial do molde e evitar trincas durante as variações térmicas iniciais.

Já nas camadas de backup, a alumina pode ser utilizada em algumas formulações, mas a sílica eletrofundida e a mulita são frequentemente os materiais predominantes. Isso ocorre porque essas substâncias oferecem uma combinação de estabilidade térmica, resistência mecânica e boa compatibilidade com a matriz cerâmica, além de serem mais econômicas em comparação com a alumina. Entretanto, a alumina destaca-se por sua elevada resistência mecânica e estabilidade térmica, sendo indispensável em aplicações específicas que envolvem condições extremas de carga térmica e mecânica, como na fundição de ligas de aço e superligas.

A produção de alumina tem início na extração da bauxita, um mineral amplamente disponível em países como Austrália, Brasil e China. A bauxita é submetida a processos de refino para a obtenção de óxido de alumínio, utilizado não apenas na produção de alumínio metálico, mas também como componente essencial na fabricação de cerâmicas refratárias empregadas no processo de microfusão. De acordo com dados do Governo Brasileiro (Sumário Mineral Brasileiro, 2018), a

Austrália lidera a produção mundial de bauxita, seguida pelo Brasil, o que reforça a importância estratégica desse material para a indústria global de fundição (GOV BR – Claudio Clayer Monteiro; João Paulo Alves da Silva).

## 2.5 ESTUDOS-CHAVE

A crescente escassez de zirconita e o aumento de seus custos têm motivado a busca por alternativas viáveis para sua substituição no processo de fundição de precisão. Nesse contexto, Whitehouse et al. (2005) exploraram o uso de materiais alternativos como substitutos da zirconita nas camadas primárias de moldes cerâmicos. O estudo buscou avaliar diferentes formulações de lamas cerâmicas e camadas de revestimento, considerando variáveis como viscosidade das lamas, composição das camadas, temperatura de vazamento e tipos de metais fundidos. Para isso, foram testados cinco materiais de revestimento primário, quatro combinações de zirconita e farinha de sílica fundida, quatro ligas metálicas e quatro níveis de viscosidade. Esses experimentos foram realizados tanto em condições laboratoriais quanto em produção piloto, com o objetivo de compreender como essas variáveis influenciam a qualidade do acabamento superficial das peças fundidas.

Os resultados destacaram que, embora a zirconita possua propriedades vantajosas, como alta densidade e baixa reatividade com metais fundidos, ela apresenta limitações em determinadas condições de aplicação, como o controle rigoroso necessário para evitar defeitos de penetração metálica. Este tipo de defeito, de natureza mecânica ou química, pode ser exacerbado pela interação entre o metal fundido e o material refratário na presença de oxigênio.

O estudo demonstrou que, com o uso adequado de materiais alternativos como alumino-silicatos, é possível obter acabamentos superficiais satisfatórios, desde que os parâmetros de aplicação sejam otimizados. Whitehouse et al. (2005) concluíram que a substituição da zirconita é tecnicamente viável, embora dependa de uma análise criteriosa dos parâmetros de processo, como viscosidade, granulometria e temperatura de vazamento, para garantir a manutenção da qualidade das peças fundidas.

No trabalho de Tremarin (2011), intitulado "Influência da Adição de Aluminato de Cobalto na Lama de Zirconita do Processo de Fundição de Precisão", o foco foi

analisar como a adição de aluminato de cobalto nas lamas cerâmicas afeta as propriedades mecânicas e microestruturais das peças fundidas. O estudo partiu do pressuposto de que o aluminato de cobalto atua como agente nucleante, promovendo a formação de núcleos heterogêneos que refinam a microestrutura metálica e reduzem o espaçamento Inter dendrítico. Para validar essa hipótese, Tremarin utilizou moldes cerâmicos formulados com diferentes proporções de aluminato de cobalto (até 8%) e fundiu corpos de prova com aço inoxidável AISI 347. O processo experimental incluiu etapas como preparação das lamas, deceragem, calcinação, fundição e análises detalhadas das propriedades mecânicas e microestruturais das peças.

Os resultados mostraram um aumento significativo na resistência mecânica e na ductilidade das peças fundidas, além de uma redução substancial na porosidade interna. A análise microestrutural evidenciou um refinamento no espaçamento Inter dendrítico e maior homogeneidade nos grãos metálicos, indicando que o aluminato de cobalto promove uma solidificação mais uniforme. Tremarin concluiu que o aditivo é uma solução promissora para otimizar a formulação de lamas cerâmicas, especialmente em aplicações industriais que demandam alta integridade estrutural e resistência sob condições de trabalho rigorosas. No entanto, ele enfatizou que a eficiência do aditivo está relacionada a fatores como composição da liga metálica e parâmetros térmicos do processo.

Já o estudo de Machado (2005), intitulado "Avaliação Microestrutural de Cascas Cerâmicas Utilizadas na Produção de Moldes para o Processo de Fundição por Cera Perdida", teve como objetivo investigar as propriedades e microestruturas de cascas cerâmicas formadas com lamas à base de sílica coloidal, com e sem a adição de aditivos poliméricos. A pesquisa se concentrou em estabelecer correlações entre densidade, porosidade e resistência mecânica das cascas cerâmicas, utilizando técnicas avançadas de caracterização, como picnometria de hélio, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de resistência à flexão. Foram produzidos corpos de prova representativos de cada camada, utilizando lamas com composições e granulometrias progressivamente maiores nas camadas subsequentes. A adição de polímero foi avaliada em concentrações de até 9%, buscando determinar seu impacto na porosidade e resistência das cascas.

Machado observou que o uso de aditivos poliméricos melhorou a resistência mecânica das cascas na condição "verde", antes da sinterização. No entanto, teores

elevados de polímeros aumentaram a porosidade aberta, reduzindo a resistência após a sinterização. O estudo destacou a importância do controle da granulometria dos materiais refratários, uma vez que partículas maiores nas camadas externas diminuíram a resistência à flexão das cascas. As análises microestruturais revelaram uma estrutura mais porosa nas cascas com polímero, mas com melhor aderência entre as camadas, especialmente durante o manuseio e a deceragem.

Machado concluiu que o controle rigoroso das variáveis de processamento, como teor de polímero, granulometria e método de aplicação, é essencial para garantir a qualidade das cascas cerâmicas. Embora os polímeros ofereçam vantagens, sua aplicação deve ser balanceada para evitar impactos negativos na resistência final. Este estudo forneceu uma base sólida para o desenvolvimento de cascas cerâmicas otimizadas, alinhando-se às demandas industriais por maior eficiência e qualidade.

Branscomb (2011), em seu estudo que tem como título "A Practical Approach to Replacing Zircon", abordou alternativas para substituir a farinha de zirconita no processo de fundição de precisão, enfatizando os desafios técnicos dessa substituição devido ao contato direto entre o metal fundido e o material cerâmico. A pesquisa avaliou o uso de alumina, sílica fundida e alumino-silicatos como possíveis substitutos, destacando suas características de reatividade, estabilidade com ligantes coloidais e propriedades reológicas das lamas cerâmicas.

Os experimentos envolveram a fabricação de pequenos cadinhos de teste com diferentes materiais no revestimento primário, incluindo zirconita, alumina tabular com Wing Beads, e Casfill 85, um alumino-silicato sinterizado com alumina. Estes cadinhos foram submetidos a temperaturas elevadas (até 1525 °C) e analisados quanto à interação metal-molde na interface. Os resultados mostraram que todos os materiais avaliados apresentaram uma camada de reação penetrando no primeiro e segundo revestimentos, com diferenças mínimas observadas entre eles. No entanto, o Casfill 85 mostrou-se promissor para substituir a farinha de zirconita em aplicações específicas, devido à sua estabilidade e boa reologia, embora ainda necessite de melhorias para aumentar sua inércia química.

Branscomb concluiu que, embora alternativas como alumino-silicatos e sílica fundida apresentem potencial para substituir a farinha de zirconita, o desenvolvimento de formulações otimizadas e a realização de testes extensivos em ambiente controlado são cruciais. Ele destacou que a transição para materiais alternativos exige

um controle rigoroso dos parâmetros do processo, como granulometria, viscosidade das lamas e temperaturas de vazamento, para garantir a integridade e qualidade das peças fundidas.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos analisados neste capítulo desempenharam um papel fundamental na formulação da presente pesquisa, fornecendo tanto um contexto para os desafios enfrentados pela indústria de fundição de precisão quanto diretrizes metodológicas para sua superação. O trabalho de Whitehouse et al. (2005) trouxe à tona a relevância da escassez de zirconita, não apenas como uma questão econômica, mas também como uma oportunidade de inovação tecnológica. Ao explorar alternativas à zirconita em moldes cerâmicos, o estudo forneceu uma base conceitual sólida para entender como a substituição desse material pode ser viabilizada sem comprometer a qualidade das peças fundidas, contribuindo diretamente para a motivação deste trabalho. Nesse contexto, o estudo de Branscomb (2011) complementa as contribuições de Whitehouse et al., ao fornecer uma abordagem prática para a substituição da zirconita, explorando materiais específicos como Cerabeads 60 e Casfill 85 e avaliando suas aplicações em condições reais de processo. Ambos os estudos alinham-se na busca por soluções que atendam aos desafios técnicos e econômicos impostos pela dependência da zirconita na fundição de precisão.

Por outro lado, os estudos de Tremarin (2011) e Machado (2005) destacaram a importância de metodologias robustas e bem estruturadas no campo da fundição de precisão. A pesquisa de Tremarin (2011) demonstrou como alterações na composição da lama cerâmica, como a adição de aluminato de cobalto, podem otimizar propriedades mecânicas e microestruturais, abrindo caminhos para adaptações no desenvolvimento de lamas com características específicas para diferentes aplicações. Da mesma forma, o trabalho de Machado forneceu uma abordagem metódica para avaliar as propriedades microestruturais das cascas cerâmicas, enfatizando a necessidade de controle rigoroso de variáveis como granulometria, porosidade e composição para alcançar a performance desejada.

Adicionalmente, o estudo de Branscomb (2011) trouxe uma perspectiva prática e aplicável para a substituição da zirconita, enfatizando os desafios técnicos

dessa transição e oferecendo soluções concretas baseadas em alternativas como alumino-silicatos e sílica fundida. Sua pesquisa não apenas demonstrou a viabilidade do uso de materiais como Cerabeads 60 e Casfill 85 em revestimentos primários, mas também ressaltou a importância do controle rigoroso dos parâmetros do processo e da análise detalhada da interação metal-refratário. As metodologias de Branscomb complementam as contribuições de Tremarin e Machado, ao propor abordagens específicas para avaliar e implementar substituições em ambientes industriais.

Ambos os estudos forneceram contribuições metodológicas diretas para este trabalho, servindo como referência para a adaptação de processos, planejamento experimental e escolha de técnicas de caracterização. A combinação de suas metodologias, aliada ao tema central levantado por Whitehouse et al. (2005) e enriquecida pela abordagem prática de Branscomb (2011), permitiu construir um caminho claro e fundamentado para investigar soluções práticas e sustentáveis no contexto da microfusão. Assim, este capítulo se encerra destacando que as contribuições desses trabalhos não apenas embasaram teoricamente a pesquisa, mas também guiaram as escolhas técnicas e metodológicas que sustentam os objetivos do presente estudo.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais utilizados no experimento, incluindo as ligas metálicas empregadas e os métodos adotados na preparação da 1ª lama. Serão descritos os parâmetros controlados durante o processo, bem como os materiais e insumos envolvidos. Adicionalmente, este capítulo detalhará o maquinário utilizado e o sequenciamento das etapas do processo experimental, permitindo uma visão completa e estruturada dos métodos e condições aplicados no desenvolvimento deste trabalho.

#### **3.1 INVESTIGAÇÃO NA LITERATURA E MERCADO**

Com o objetivo de justificar o trabalho a ser executado e a metodologia proposta, foi realizada uma revisão da literatura técnica e consulta a fornecedores,

buscando identificar materiais alternativos à zirconita para a preparação da 1ª lama no processo de microfusão.

A revisão bibliográfica foi conduzida por meio da consulta a bases de dados acadêmicas, utilizando palavras-chave como "fundição de precisão", "microfusão", "revestimentos cerâmicos", "zirconita" e "substituição de materiais refratários". Entre os trabalhos analisados, destacam-se Machado (2005), que avaliou microestruturas de cascas cerâmicas na fundição por cera perdida, e Tremarin (2011), que estudou a influência de aluminato de cobalto na lama de zirconita. Além disso, documentos técnicos do Investment Casting Institute (1997, 2017) foram consultados para embasar a composição tradicional das lamas refratárias.

Durante a pesquisa, constatou-se que a utilização da zirconita é amplamente predominante entre as empresas que adotam o processo de microfusão no Brasil, resultando em uma quantidade limitada de estudos sobre substituições viáveis. Para complementar essa lacuna, foram realizadas consultas com fornecedores de materiais refratários atuantes no mercado nacional e internacional, incluindo relatórios técnicos da Zircon Industry Association (ZIA, 2019) e estudos apresentados no congresso do Investment Casting Institute (Branscomb, 2011; Whitehouse et al., 2005).

Os contatos estabelecidos com fornecedores indicaram a viabilidade de testes com alumina calcinada, um material que apresenta propriedades semelhantes às da zirconita, como alta refratariedade e estabilidade química. Com base nessas informações, foram investigados estudos complementares para validar uma metodologia aplicável ao processo e obter insights sobre a análise de viabilidade da substituição da zirconita pela alumina calcinada.

## 3.2 DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

### 3.2.1 Identificação das amostras

Para a realização dos experimentos, foram preparadas diferentes amostras utilizando materiais refratários distintos na formulação da 1ª lama. Cada amostra foi caracterizada quanto à sua composição, aparência e comportamento durante o processo de fundição.

O Quadro 1 apresenta a identificação, descrição e imagem das amostras utilizadas neste estudo, detalhando as variações de materiais aplicadas no revestimento cerâmico primário.

**Quadro 1 - Identificação, descrição e imagem das amostras**

Nº da Amostra	Descrição	Imagem
1	Balancim	
2	Suporte	
3	Porta Bits	
4	Culatra	
5	Caixa de Mecanismo	
6	Bucha	

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A análise dessas amostras permitiu avaliar as diferenças de desempenho entre os materiais testados, fornecendo subsídios para a escolha da alternativa mais adequada à substituição da zirconita.

### 3.2.2 Definição das ligas metálicas

Conforme discutido anteriormente, uma das principais características do processo de microfusão é a sua versatilidade na produção de uma ampla variedade de ligas metálicas. Este estudo teve como principal objetivo avaliar a eficácia da utilização de alumina calcinada no primeiro banho da casca cerâmica para diferentes ligas metálicas, abrangendo uma diversidade de propriedades e parâmetros de fundição.

Foram selecionadas seis ligas metálicas distintas: GGG40, 1030, 1045, 410, 304 e 416. A escolha dessas ligas foi baseada em dois critérios principais:

1. **Representatividade das condições reais de uso:** Essas ligas são amplamente utilizadas pela empresa em aplicações industriais devido à sua alta demanda no mercado. Por serem ligas de maior consumo, sua inclusão no estudo reflete diretamente os desafios enfrentados na prática industrial.
2. **Diversidade de propriedades e requisitos de fundição:** As ligas selecionadas possuem diferentes composições químicas e características mecânicas, abrangendo uma ampla gama de comportamentos durante o processo de fundição. Por exemplo:
  - **GGG40** (ferro fundido nodular) é amplamente utilizado em peças que requerem boa resistência mecânica e tenacidade.
  - **Aços-carbono (1030 e 1045)** apresentam maior sensibilidade à oxidação e possíveis interações químicas com o molde cerâmico durante a fundição.
  - **Aço inoxidável 410** (martensítico) e **416** (com adição de enxofre para usinabilidade) possuem características que podem gerar interações químicas e térmicas mais intensas com o molde.
  - **Aço inoxidável 304** (austenítico) é menos reativo e oferece elevada resistência à corrosão, sendo frequentemente escolhido para aplicações que exigem acabamentos superficiais superiores e estabilidade química.

A inclusão dessas ligas no experimento permite simular condições reais de uso, considerando os diferentes tipos de interação metal-molde que ocorrem no processo industrial. Dessa forma, o estudo busca verificar dois aspectos principais:

- **Reação metal-molde:** Analisar possíveis reações químicas entre as ligas metálicas e a casca cerâmica contendo alumina calcinada, avaliando a viabilidade técnica do material refratário em diferentes contextos.
- **Qualidade do acabamento superficial:** Avaliar se o acabamento superficial resultante atende aos padrões exigidos no processo de microfusão, considerando as especificidades de cada liga.

Ao selecionar ligas representativas do portfólio da empresa, o trabalho alinha-se diretamente às necessidades industriais, garantindo que os resultados obtidos possam ser aplicados de maneira prática e eficaz no contexto produtivo.

**Tabela 3 – Ligas metálicas utilizadas, composição química e norma**

Nº Amostra	Liga utilizada	Composição Química								Norma	
1	GGG40	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>			DIN	
		3,50 3,80	2,40 2,80	0,20 Máx	0,04 Máx	0,02 Máx	0,30 0,50				
2	IC 1030	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>				ICI	
		0,25 0,35	0,20 0,60	0,70 1,00	0,04 Máx	0,04 Máx					
3	1045	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>				ABNT NBR 15990	
		0,40 0,50	0,20 1,00	0,70 1,00	0,04 Máx	0,04 Máx					
4	CA-40 (410)	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	ICI	
		0,05 0,15	1,50 Máx.	1,00 Máx	0,04 Máx	0,02 Máx	11,50 14,00	1,00 Máx	1,00 Máx		
5	IC 416	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	ICI
		0,15 Máx.	1,50 Máx.	1,25 Máx	0,05 Máx	0,15 0,35	11,50 14,00	0,50 Máx	0,50 Máx	0,50 Máx.	
6	CF-8 (304)	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	ICI	
		0,08 Máx.	2,00 Máx.	1,50 Máx	0,04 Máx	0,04 Máx	18,00 21,00	8,00 11	0,50 Máx		

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

### 3.2.3 Classificação das Amostras por Tamanho e complexidade

Com base na seleção das ligas metálicas, as peças a serem testadas foram definidas seguindo dois critérios principais: tamanho e complexidade geométrica. Esses critérios foram estabelecidos para avaliar a eficácia da alumina calcinada como material na preparação da 1ª lama, considerando diferentes desafios impostos pelo processo e conectando os resultados esperados ao objetivo de realizar uma avaliação da viabilidade econômica do uso desse material em substituição à zirconita.

O primeiro critério considerou o tamanho das peças, abrangendo amostras classificadas como pequenas, médias e grandes. Espera-se que, ao utilizar a alumina calcinada, a casca cerâmica seja capaz de revestir peças de diferentes dimensões de forma eficiente, sem comprometer sua integridade ou o acabamento superficial. Resultados positivos nessa etapa indicariam uma potencial redução de custos, uma vez que o material alternativo se mostraria adequado para uma variedade de aplicações sem a necessidade de ajustes significativos no processo.

O segundo critério focou na complexidade geométrica das peças. Foram escolhidas ao menos duas amostras com características desafiadoras para o revestimento, como detalhes com geometrias complexas ou cantos de difícil penetração da lama. Espera-se que a alumina calcinada demonstre boa adesão e cobertura em áreas de difícil acesso, atendendo às exigências do processo de microfusão em condições mais rigorosas. Caso os resultados confirmem sua eficácia, a substituição da zirconita por alumina calcinada pode ser economicamente vantajosa, especialmente em contextos industriais onde peças complexas são frequentemente produzidas.

A partir desses experimentos, os resultados esperados visam fornecer dados quantitativos e qualitativos que auxiliem na análise de custo-benefício do material alternativo, considerando não apenas a redução de custos de matéria-prima, mas também a manutenção ou melhora da qualidade final das peças fundidas. Dessa forma, o estudo busca embasar uma decisão técnica e econômica quanto à viabilidade de substituir a zirconita pela alumina calcinada no primeiro banho da casca cerâmica.

### 3.3 PREPARAÇÃO DA LAMA PRIMÁRIA

A preparação da lama refratária seguiu um procedimento rigoroso para assegurar a obtenção de uma mistura homogênea e estável, com as propriedades específicas necessárias ao processo de microfusão. A formulação foi desenvolvida pelo fornecedor da matéria-prima e composta por 33,4% de parte líquida e 66,6% de material refratário sólido, sendo este último constituído por alumina calcinada. A parte líquida, por sua vez, foi composta por 94,4% de sílica coloidal, 5% de polímero, 0,3% de antiespumante e 0,3% de tensoativo, garantindo a estabilidade da lama durante o processo. Durante toda a preparação, a mistura foi mantida em um tanque em rotação contínua para assegurar sua homogeneidade.

Inicialmente, a sílica coloidal foi adicionada ao tanque juntamente com o polímero e o tensoativo, compondo a fase líquida. Em seguida, iniciou-se a adição do material refratário, com a introdução de 3 sacos de alumina calcinada, cada um com 20 kg. Após essa adição inicial, a mistura foi homogeneizada utilizando um misturador industrial até que se atingisse uma consistência uniforme. Esse procedimento foi repetido sucessivamente até que todos os 17 sacos de alumina calcinada fossem incorporados à formulação. Ao final da mistura, foi adicionado o antiespumante para minimizar a formação de bolhas, garantindo a uniformidade do material.

A meta inicial era ajustar a viscosidade da lama para aproximadamente 30 segundos, medida com o copo Zahn nº 5. Para alcançar esse objetivo, a mistura foi mantida em rotação contínua por pelo menos 48 horas. Durante esse período, a estabilidade da viscosidade foi avaliada por meio de medições realizadas em intervalos de 1 hora, com o critério de que a diferença entre leituras consecutivas não ultrapassasse 1 segundo. A viscosidade final almejada situava-se na faixa de 33 a 35 segundos.

Vinte e quatro horas após a preparação da lama, observou-se que a viscosidade estava excessivamente alta, chegando a aproximadamente 1 minuto. Esse comportamento foi atribuído à decantação da alumina, um fenômeno comum em formulações com alta carga sólida, devido à densidade elevada do material refratário. Para corrigir essa anomalia, a viscosidade foi ajustada mediante a adição de água deionizada, um componente essencial para evitar reações químicas indesejadas que

poderiam comprometer a estabilidade da lama. Após o ajuste, a viscosidade foi reduzida para aproximadamente 25 segundos.

No dia seguinte, a viscosidade foi novamente medida e constatou-se que estava dentro da faixa desejada, estabilizando-se em torno de 34 segundos. Durante todo o processo, o antiespumante foi utilizado conforme necessário, com o objetivo de minimizar a formação de bolhas que poderiam comprometer a qualidade da camada aplicada.

Dessa forma, a metodologia adotada evidenciou a importância do controle rigoroso das etapas de preparação e ajuste, garantindo a homogeneidade e as propriedades ideais da lama refratária para o processo de microfusão. A manutenção da mistura em constante rotação e o monitoramento contínuo da viscosidade foram fatores determinantes para o sucesso da formulação.

Espera-se que os experimentos desta etapa identifiquem as principais dificuldades associadas ao uso da alumina calcinada, como a tendência à decantação e o aumento expressivo de viscosidade ao longo do tempo, conectando essas observações às diferenças operacionais em relação à zirconita. Esses resultados permitirão avaliar se os ajustes necessários para estabilizar a lama podem ser aplicados de forma eficiente em um ambiente de produção, atendendo às exigências práticas do processo de microfusão.

## 3.4 PROCESSO DE MICROFUSÃO

### 3.4.1 Injeção dos modelos em cera

Os modelos foram injetados controlando três principais parâmetros: tempo de injeção, pressão de injeção e temperatura da cera. O tempo de injeção variou de 60 a 120 segundos, ajustado conforme as especificações de cada amostra. A pressão foi mantida constante em 20 bar, enquanto a temperatura da cera variou entre 53 e 55 °C.

O maquinário utilizado foi uma injetora de cera do tipo "C", com capacidade de fechamento de 12 toneladas. Conforme observa-se na figura 10.

**Figura 10 – Injetora de cera**

Fonte: Acervo do Autor (2024)

### 3.4.2 Montagem dos cachos

A montagem dos cachos foi realizada com o auxílio de uma espátula aquecida, seguindo rigorosamente as especificações técnicas descritas na ficha técnica de cada item. Os cachos foram formados com a seguinte composição:

- **Amostra nº 1:** 96 peças por cacho; 13 cachos no total;
- **Amostra nº 2:** 3 peças por cacho; 9 cachos no total;
- **Amostra nº 3:** 4 peças por cacho; 10 cachos no total;
- **Amostra nº 4:** 28 peças por cacho; 12 cachos no total;
- **Amostra nº 5:** 4 peças por cacho; 12 cachos no total;
- **Amostra nº 6:** 64 peças por cacho; 13 cachos no total;

Esse processo visou garantir a correta distribuição e fixação das peças nos cachos, otimizando o equilíbrio e a aderência durante as etapas subsequentes do processo de microfusão.

**Figura 11 – Cacho amostra nº 6 em cera**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

### **3.4.3 Limpeza dos cachos**

Com o objetivo de eliminar contaminantes, como resquícios de silicone provenientes da injeção dos modelos e partículas de poeira, que poderiam comprometer a aderência da lama e do refratário aos cachos, foi realizada uma etapa de limpeza conforme descrito a seguir.

Os cachos foram imersos em um tanque contendo solução de detergente para remover os contaminantes. Após a imersão, foram drenados e posteriormente submersos em um tanque com água limpa para enxágue.

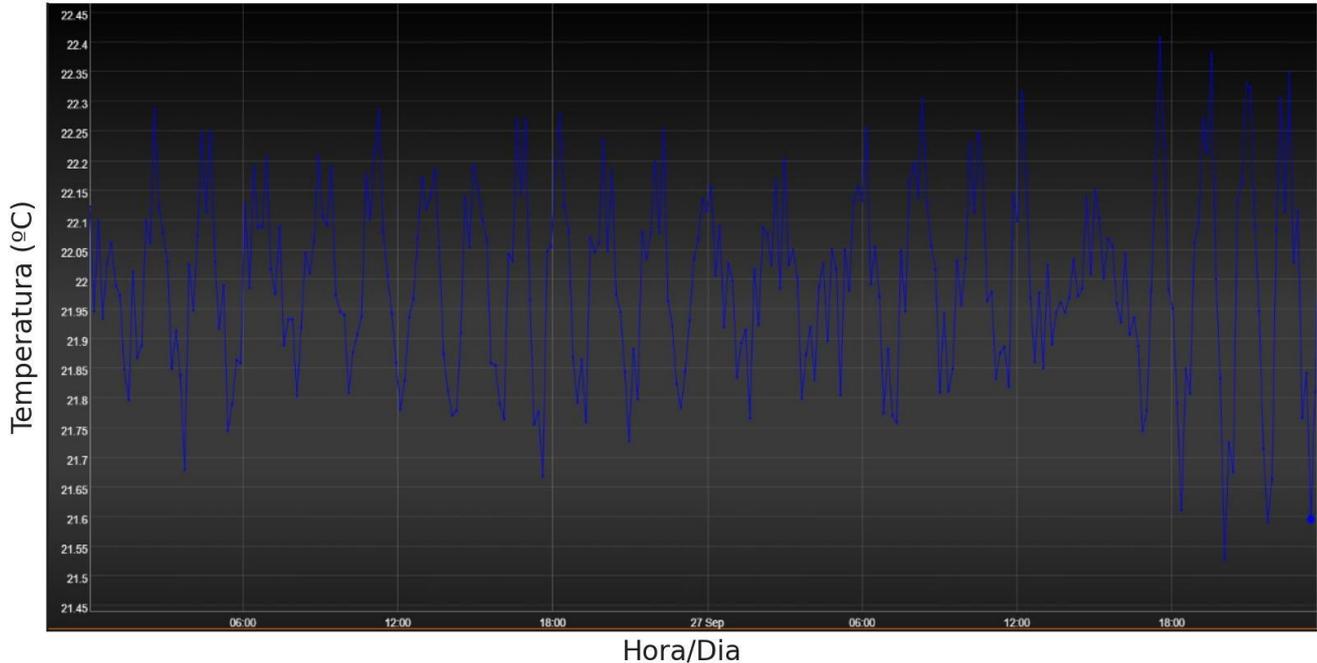
Finalizada essa etapa, os cachos passaram por uma secagem parcial utilizando uma pistola de ar comprimido. Em seguida, foram transferidos para a sala de secagem, onde permaneceram por um período de duas horas para garantir a completa remoção de umidade antes de avançar para as etapas subsequentes.

### **3.4.4 Revestimento Primário e Demais Banhos**

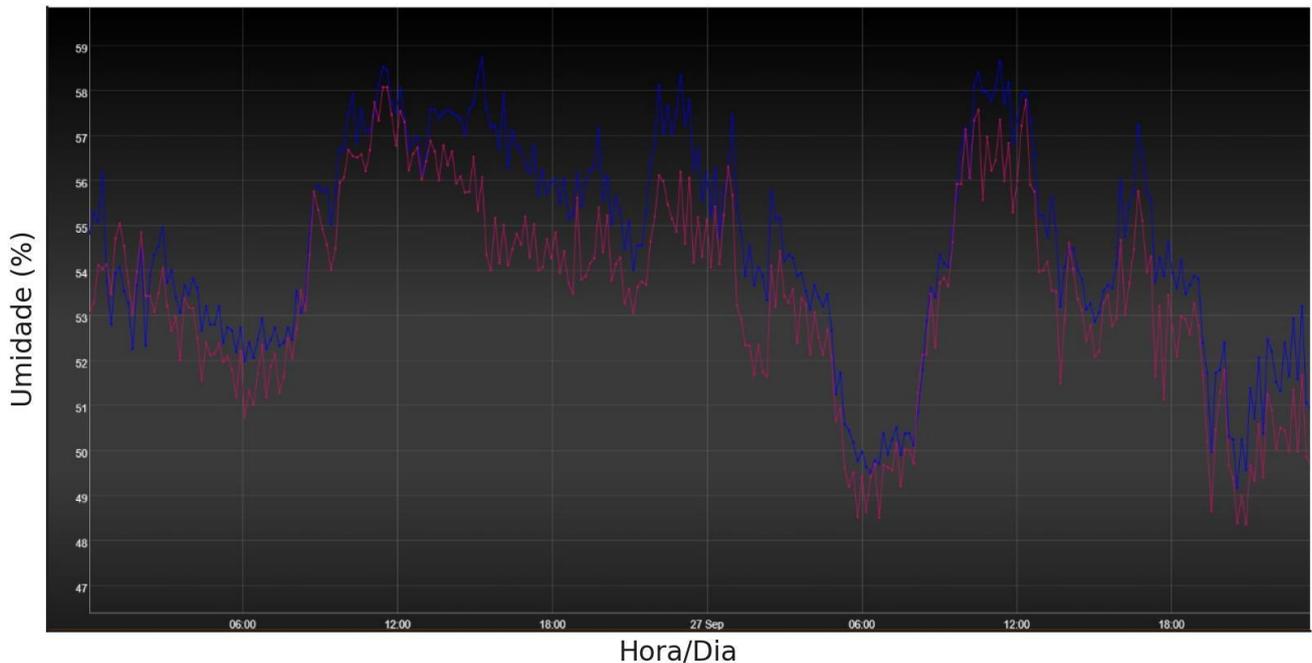
A etapa mais relevante do estudo consistiu no acompanhamento do processo em que os cachos foram submetidos à lama refratária contendo alumina calcinada.

Após a imersão, o excesso de líquido foi devidamente drenado, e os cachos foram imediatamente submetidos à aplicação de uma camada de areia de zirconita, formando, assim, a primeira camada do revestimento cerâmico. Posteriormente, os cachos foram transferidos para a sala de secagem, onde permaneceram armazenados por um período de 5 horas, sob condições controladas de temperatura e umidade, monitoradas e ajustadas por meio de um software específico.

Os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar foram rigorosamente mantidos dentro dos intervalos estabelecidos como requisitos do processo, com a temperatura controlada entre 20 e 24 °C e a umidade entre 45% e 65%. Esses limites foram considerados críticos para garantir uma secagem adequada e a formação homogênea da camada cerâmica, não podendo ser ultrapassados. Conforme demonstrado nos gráficos apresentados a seguir, no dia em que os cachos foram submetidos a essa etapa, a temperatura permaneceu em 22 °C e a umidade relativa variou entre 49% e 59%, assegurando total conformidade com os parâmetros exigidos pelo processo, conforme observa-se nos gráficos 1 e 2.



**Gráfico 1 - Variação da temperatura ao longo do período avaliado.**  
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)



**Gráfico 2 - Variação da umidade relativa ao longo do período avaliado.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a secagem do banho primário, as amostras seguiram para as etapas subsequentes do processo de confecção do molde cerâmico. Essas etapas consistiram na aplicação de banhos adicionais, cada um projetado para conferir resistência estrutural ao molde. Cada aplicação foi seguida de uma etapa de secagem, garantindo a completa consolidação da camada antes da adição da próxima. Esse ciclo de aplicação e secagem foi conduzido com extremo rigor, assegurando que o molde cerâmico apresentasse as propriedades necessárias para suportar as condições térmicas e mecânicas às quais seria submetido durante o processo de fundição.

### 3.4.5 Deceragem

Completado o processo de formação do molde cerâmico, os cachos foram levados à autoclave, onde foram submetidos a condições controladas de pressão, temperatura e tempo. Nessa etapa, os moldes foram expostos a uma pressão de 7 kgf/cm<sup>2</sup>, por um período de 20 minutos, e a uma temperatura de aproximadamente 180 °C. O objetivo desse procedimento foi remover completamente a cera injetada no início do processo, permitindo que o espaço interno do molde cerâmico, antes

ocupado pela cera, fosse liberado para o preenchimento posterior com o metal líquido durante a fundição.

#### **3.4.6 Calcinação**

Os cachos foram submetidos ao processo de calcinação em forno, sendo expostos a uma temperatura de 1100 °C durante um período de 2 horas. Essa etapa teve como objetivo a remoção de quaisquer resíduos orgânicos e a consolidação das camadas cerâmicas do molde, garantindo a estabilidade térmica e estrutural necessária para suportar as condições extremas do processo de fundição.

#### **3.4.7 Fundição**

Durante o processo de calcinação, foi realizada simultaneamente a preparação da liga metálica destinada a cada amostra, utilizando um forno de indução com capacidade de 150 kg e potência de 125 kW. A preparação de cada liga foi conduzida a partir de sucata, composta pelo material base correspondente ao tipo de liga a ser fundida (aço 1008 para carbono, inox martensítico 400 e inox austenítico 304), somado ao material de retorno e aos elementos de liga necessários para ajustar a composição química, atendendo rigorosamente às especificações normativas.

As temperaturas de vazamento foram definidas de acordo com as fichas técnicas de cada peça fundida, considerando as propriedades específicas de cada material e as condições do processo. O Quadro 2 apresenta as temperaturas estabelecidas para o início do procedimento de vazamento.

Conforme ilustrado na Figura 12, os cachos da amostra nº 6 foram fundidos seguindo os parâmetros estabelecidos, permitindo a análise do comportamento das peças durante essa etapa do processo.

**Quadro 2 – Temperatura de vazamento dos aços**

Nº Amostra	Temp. Vazamento
1	1560 °C
2	1660 °C
3	1660 °C
4	1620 °C
5	1600 °C
6	1620 °C

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

**Figura 12 – Cacho amostra nº 6 fundidos**

Fonte: Acervo do Autor (2024)

### **3.4.8 Desmoldagem**

Após o processo de fundição e solidificação do metal, os cachos foram transferidos para um martetele pneumático, equipamento utilizado para a remoção do excesso de material refratário que compunha o molde cerâmico.

### **3.4.9 Corte e Lixamento**

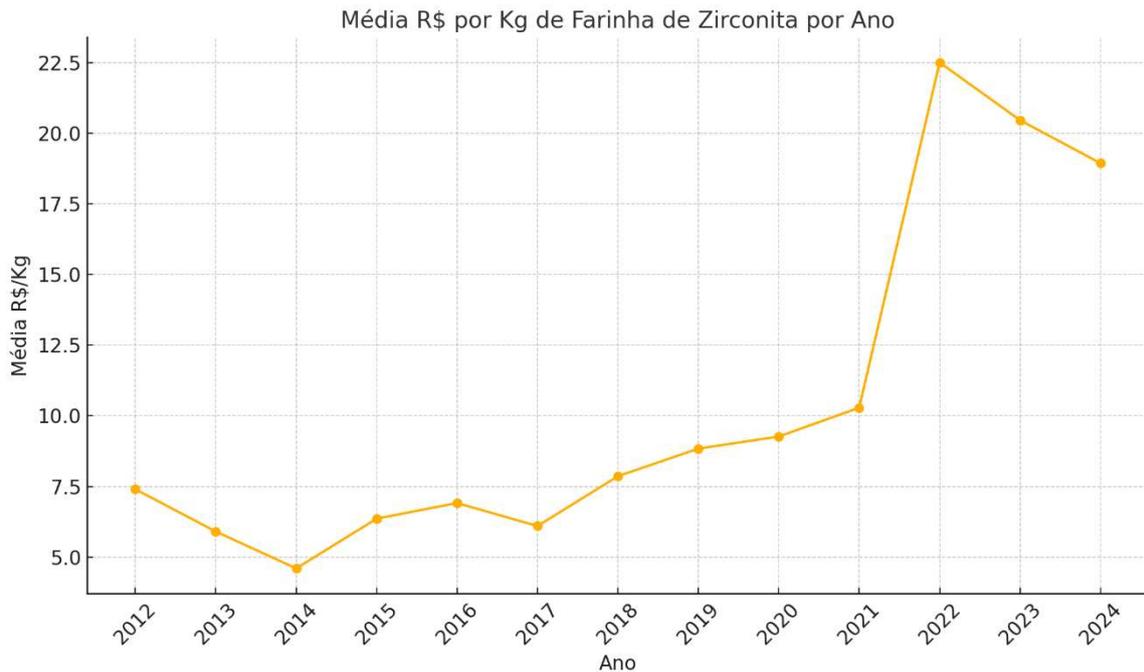
No setor de acabamento, as peças fundidas foram separadas dos canais de descida por meio de cortes realizados com discos abrasivos. Após essa etapa, permaneceu uma pequena porção do canal de alimentação aderida às peças, a qual foi removida por meio da operação de lixamento. Esse procedimento garantiu a eliminação do excesso de material, resultando em um acabamento superficial adequado e preparando as peças para a etapa subsequente de inspeção.

### **3.4.10 Inspeção Visual**

A inspeção visual foi conduzida por um inspetor de qualidade, que utilizou como base os documentos normativos que orientam os operadores na realização da seleção visual. Esses documentos especificam os critérios para identificar os defeitos passíveis de retrabalho, bem como aqueles que devem ser categorizados como refugos.

## **3.5 AVALIAÇÃO DO CUSTO ALUMINA CALCINADA X FARINHA DE ZIRCONITA**

O gráfico apresentado abaixo mostra a evolução do custo por quilograma da farinha de zirconita adquirida pela empresa Precicast ao longo de um período de 12 anos. Observa-se uma tendência de aumento progressivo no preço desse material, com um crescimento expressivo a partir de 2021, e mesmo que mesmo reduzindo, seguiu um alto valor nos anos subsequentes. Esse aumento reforça a necessidade de investigar alternativas viáveis para reduzir os custos de produção, considerando o impacto significativo da zirconita nos gastos operacionais.



**Gráfico 3 – Variação do custo médio do Kg de farinha de Zirconita por ano.**

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para realizar uma comparação técnica e econômica entre a farinha de zirconita e a alumina calcinada, foi conduzido um estudo experimental utilizando dois cachos de moldes cerâmicos. Um cacho foi submetido ao processo padrão de fabricação, utilizando farinha de zirconita, enquanto o outro foi revestido com alumina calcinada. O objetivo dessa análise foi avaliar a quantidade de lama refratária e de areia eram absorvidos por cada cacho durante o processo de fabricação, permitindo uma análise comparativa entre os dois materiais.

A avaliação consistiu na pesagem dos cachos em três momentos distintos: (i) antes da aplicação de qualquer revestimento, com o cacho ainda seco; (ii) após a imersão na lama refratária; e (iii) após a aplicação do material refratário durante a etapa de "chuva de areia". Essas medições permitiram determinar a quantidade de lama e areia refratária aderida em cada cacho, proporcionando dados quantitativos para análise econômica.

A partir da quantidade de lama e de areia absorvida por cada cacho, foi realizado o cálculo do custo total desses materiais, multiplicando o volume consumido pelo custo por quilograma de cada material. O valor total foi então dividido pela quantidade de peças por cacho, resultando no custo médio por peça.

Para a avaliação dos custos envolvidos no processo de fundição, foram considerados os valores dos principais materiais utilizados na formulação das lamas cerâmicas. O custo da lama composta por farinha de zirconita foi calculado em 18,04 R\$/kg, enquanto a lama composta por alumina calcinada apresentou um custo inferior, de 13,02 R\$/kg.

Além disso, a areia de zirconita, utilizado para revestir os cachos em ambas lamas, teve seu custo avaliado em 23,54 R\$/kg. Todos os valores foram calculados com base no preço da última compra realizada para cada material, assegurando a representatividade dos custos reais do processo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a análise detalhada dos resultados obtidos ao longo dos experimentos realizados, discutindo a eficácia da utilização de alumina calcinada como substituto à zirconita no processo de microfusão. Os resultados são abordados em duas vertentes principais: a avaliação qualitativa quanto ao aspecto visual das peças e a avaliação econômica do processo, permitindo uma análise abrangente dos impactos técnicos e financeiros da substituição.

Na primeira parte, os resultados qualitativos são apresentados para cada uma das seis amostras analisadas, considerando diferentes materiais metálicos e condições de processo. São discutidos aspectos como uniformidade do acabamento superficial, presença de defeitos e índices de rejeição. Esses resultados são ilustrados com imagens e acompanhados de uma análise dos fatores que influenciaram a performance do revestimento cerâmico.

Na segunda parte, é realizada a análise dos custos por cacho e por peça para cada amostra, permitindo uma comparação direta entre o uso da alumina calcinada e da zirconita. A discussão enfatiza como fatores como geometria da peça, área superficial e adesão de materiais influenciam nos custos, destacando as condições em que a alumina calcinada pode ser economicamente viável.

Por fim, as dificuldades e diferenças operacionais observadas durante o uso da alumina calcinada são analisadas, conectando os resultados obtidos às condições reais de uso e destacando os desafios e as oportunidades para a aplicação desse material em escala industrial.

### 4.1 AVALIAÇÃO QUALITATIVA QUANTO AO ASPECTO VISUAL

#### 4.1.1 Amostra Nº1

A primeira amostra analisada corresponde a uma peça fabricada em ferro fundido nodular. Por meio de uma avaliação visual similar àquela aplicada aos itens seriados revestidos com zirconita, foi possível constatar que as peças apresentaram resultados satisfatórios, evidenciando um aspecto visual uniforme e sem defeitos

perceptíveis. As Figuras 13, 14 e 15 ilustram os aspectos visuais observados nas amostras.

**Figura 13 – Vista superior amostra Nº1**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 14 – Vista inferior amostra Nº1**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 15 – Vista lateral amostra N°1**

Fonte: Acervo do Autor (2024)

Durante o experimento, um total de 1.056 peças foram submetidas ao processo, das quais 978 foram aprovadas, resultando em um índice de perda de aproximadamente 7%. A análise dos rejeitos revelou que as perdas não estão associadas à aplicação de alumina calcinada no processo, mas foram atribuídas a duas principais causas: inclusões cerâmicas e quebras de cachos ocorridas durante a operação de revestimento, sendo estas últimas decorrentes de falhas de execução por parte da mão de obra.

#### **4.1.2 Amostra N°2**

A amostra nº 2 foi analisada seguindo os mesmos critérios adotados para a amostra anterior. Trata-se de uma peça fabricada em material IC 1030. Os resultados mostraram, novamente, um aspecto visual uniforme e isento de defeitos visíveis provenientes da 1ª camada de revestimento cerâmico, como apresentado nas Figuras 16 e 17.

**Figura 16 – Vista superior amostra Nº2**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 17 – Vista lateral amostra Nº2**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

O comportamento da lama contendo alumina calcinada foi satisfatório nesse caso, proporcionando um acabamento superficial equivalente ao obtido com o banho de zirconita, evidenciando sua eficácia no processo.

Durante o experimento, ocorreram perdas de três peças, atribuídas à trincas no cacho durante a etapa de fundição, fazendo com que o mesmo não resistisse à pressão do metal líquido e ocorresse uma ruptura. Além disso, foi observada uma leve penetração de revestimento em algumas peças, conforme observa-se na Figura 17. Contudo, essas peças foram submetidas a retrabalho, resultando em sua aprovação final para conformidade.

### 4.1.3 Amostra Nº3

A amostra nº 3, fabricada em aço 1045, apresentou resultados plenamente satisfatórios. Das 40 peças submetidas ao processo, todas foram aprovadas sem a necessidade de retrabalho, não havendo qualquer ocorrência de perdas. O revestimento com lama contendo alumina calcinada demonstrou excelente desempenho também neste caso, proporcionando acabamento uniforme e isento de defeitos, conforme ilustrado nas Figuras 18 e 19.

**Figura 18 – Vista lateral amostra Nº3**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 19 – Vista lateral amostra Nº3**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

#### 4.1.4 Amostra Nº4

A amostra nº 4 foi fundida em um material inoxidável martensítico, conhecido por sua alta reatividade. No lote produzido utilizando alumina calcinada, 100% das peças apresentaram reação metal-molde, indicando um desempenho inadequado desse material no revestimento. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 20, 21 e 22.

**Figura 20 – Vista lateral amostra Nº4**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 21 – Vista lateral amostra Nº4**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 22 – Vista lateral amostra N°4**

Fonte: Acervo do Autor (2024)

Os resultados mostraram que, ao seguir os mesmos parâmetros e procedimentos aplicados no revestimento com zirconita, as peças apresentaram defeitos superficiais significativos. Para mitigar esse problema, algumas adaptações no processo podem ser consideradas, como a redução do tempo de contato do aço com o oxigênio durante o vazamento. Atualmente, cada cacho é vazado individualmente, e o abafamento é realizado apenas após o vazamento do quinto cacho, o que permite uma exposição prolongada ao oxigênio nos primeiros cachos vazados.

Apesar dos defeitos, todas as peças foram recuperadas por meio de retrabalho, com a utilização de uma lima rotativa, removendo as imperfeições na superfície. No entanto, a recuperação demandou um tempo considerável de jateamento e ajustes com rebolos, tornando o processo, nessas condições, inviável para a produção em escala industrial.

#### **4.1.5 Amostra N°5**

A amostra n° 5 também foi fabricada em uma liga de aço inoxidável martensítico, diferenciada pela adição de enxofre para melhorar sua usinabilidade. Assim como a amostra n° 4, esta apresentou diversos defeitos superficiais ao longo de todo o lote.

A lama contendo alumina calcinada não se comportou adequadamente para esse tipo de material, resultando em reação metal-molde em 100% das peças analisadas. Esse fenômeno comprometeu significativamente a qualidade superficial,

exigindo um tempo elevado de jateamento para remover a reação e, mesmo assim, foi necessário realizar retrabalho adicional para corrigir as irregularidades superficiais.

Apesar dos desafios enfrentados, todas as peças foram recuperadas por meio de retrabalho intensivo. As Figuras 23, 24 e 25 ilustram os defeitos observados e os resultados após o processo de recuperação.

**Figura 23 – Vista lateral amostra N°5**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 24 – Vista lateral amostra N°5**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 25 – Vista superior amostra N°5**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

#### 4.1.6 Amostra N°6

A sexta amostra analisada foi fabricada em aço inoxidável austenítico, material classificado como AISI 304. A lama contendo alumina calcinada apresentou um desempenho excelente nesse caso, não sendo registradas perdas no lote de amostras.

Embora 7 peças tenham apresentado fragilidade na cavidade, resultando em um leve estufamento causado pela pressão do metal, não houve ocorrência de trincas, e este problema não está relacionado ao uso da alumina calcinada no processo. O comportamento do revestimento foi considerado satisfatório, proporcionando um acabamento superficial adequado e sem comprometer a qualidade final das peças.

As Figuras 26 e 27 ilustram os resultados obtidos, evidenciando a uniformidade e eficiência do processo aplicado a este tipo de material.

**Figura 26 – Vista lateral amostra N°6**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

**Figura 27 – Vista lateral amostra N°6**



Fonte: Acervo do Autor (2024)

## 4.2 AVALIAÇÃO DO CUSTO POR CACHO E POR PEÇA

### 4.2.1 Custos Amostra N°1

A partir da pesagem do cacho da amostra n° 1, verificou-se que, no cacho em que foi utilizada alumina calcinada na formulação da primeira lama, houve adesão de 0,21 kg de lama e 0,32 kg de areia. Multiplicando esses valores pelo custo por quilograma dos respectivos materiais, obteve-se um custo total de R\$ 10,27 por cacho. Dividindo esse valor pelo número de peças por cacho (96 peças no caso desta amostra), o custo unitário por peça foi calculado em R\$ 0,107.

Por outro lado, no cacho revestido com a lama formulada com farinha de zirconita, houve adesão de 0,28 kg de lama e 0,30 kg de areia, resultando em um custo total de R\$ 12,11 por cacho e um custo unitário por peça de R\$ 0,126. Esses resultados podem ser observados na Tabela 4.

**Tabela 3 – Pesos e custo amostra N°1**

PESOS CACHOS ALUMINA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,460	2,670	2,990	0,210	0,320

Custo por cacho/Alumina		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 13,02	R\$ 2,73
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 7,53
	<b>Total</b>	<b>R\$ 10,27</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 0,107</b>

PESOS CACHOS ZIRCONITA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,450	2,730	3,030	0,280	0,300

Custo por cacho/Zirconita		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 18,04	R\$ 5,05
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 7,06
	<b>Total</b>	<b>R\$ 12,11</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 0,126</b>

Fonte: Elaborado pelo autor e pelo fornecedor (2024)

A substituição da alumina calcinada pela farinha de zirconita gerou uma redução marginal no custo unitário por peça, evidenciando a viabilidade econômica da substituição no contexto desta amostra.

#### 4.2.2 Custos Amostra N°2

O mesmo comportamento não foi constatado na amostra n° 2, como pode ser observado na Tabela 5. Para o cacho revestido com a lama formulada com alumina calcinada, houve adesão de 0,12 kg de lama e 0,20 kg de areia, resultando em um custo total de R\$ 6,27 por cacho. Dividindo esse valor pelo número de peças por cacho, que neste caso é de 3 peças, o custo unitário por peça foi calculado em R\$ 2,09.

Por outro lado, ao utilizar a lama formulada com farinha de zirconita, o custo unitário foi reduzido devido à menor adesão de areia durante o processo, totalizando R\$ 6,17 por cacho e R\$ 2,056 por peça. Esses resultados evidenciam que, na amostra n° 2, o uso da lama de zirconita apresentou uma leve vantagem econômica no custo por peça.

A peça analisada na amostra n° 2 possui uma grande área superficial, o que influenciou diretamente na quantidade de areia necessária para o revestimento. No caso da lama formulada com alumina calcinada, a maior necessidade de areia resultou em um aumento do custo total por cacho. Esse acréscimo tornou o custo unitário da peça mais elevado em comparação ao obtido com a lama de zirconita, que apresentou menor adesão de areia e, conseqüentemente, um custo mais reduzido.

**Tabela 4 – Pesos e custo amostra N°2**

PESOS CACHO ALUMINA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
3,040	3,160	3,360	0,120	0,200

Custo por cacho/Alumina		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 13,02	R\$ 1,56
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 4,71
	<b>Total</b>	<b>R\$ 6,27</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 2,090</b>

PESOS CACHO ZIRCONITA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,980	3,100	3,270	0,120	0,170

Custo por cacho/Zirconita		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 18,04	R\$ 2,17
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 4,00
	<b>Total</b>	<b>R\$ 6,17</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 2,056</b>

Fonte: Elaborado pelo autor e pelo fornecedor (2024)

### 4.2.3 Custos Amostra N°3

Na amostra n° 3, observou-se uma redução de custo ao utilizar a alumina calcinada na formulação da lama. Essa redução ocorreu devido à menor quantidade de lama necessária para o revestimento da peça. O custo total foi de R\$ 4,21 por cacho, que, dividido pelo número de peças no cacho (4 peças), resultou em um custo unitário de R\$ 1,052 por peça.

Por outro lado, a lama contendo farinha de zirconita apresentou custos superiores, totalizando R\$ 4,81 por cacho e R\$ 1,202 por peça, evidenciando que, para esta amostra, a formulação com alumina calcinada foi economicamente mais vantajosa.

**Tabela 5 – Pesos e custo amostra N°3**

PESOS CACHO ALUMINA				
Seco	Lama	Areia	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,550	2,620	2,760	0,070	0,140

Custo por cacho/Alumina		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 13,02	R\$ 0,91
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 3,30
	<b>Total</b>	<b>R\$ 4,21</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 1,052</b>

PESOS CACHO ZIRCONITA				
Seco	Lama	Areia	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,540	2,650	2,770	0,110	0,120

Custo por cacho/Zirconita		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 18,04	R\$ 1,98
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 2,82
	<b>Total</b>	<b>R\$ 4,81</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 1,202</b>

Fonte: Elaborado pelo autor e pelo fornecedor (2024)

### 4.2.4 Custos Amostra N°4

Diferentemente das amostras anteriores, a amostra n° 4 apresenta uma característica específica devido às suas áreas de difícil penetração de lama e areia. Durante o processo, a peça requer um segundo banho na primeira lama após a aplicação inicial e o recebimento da chuva de areia. Entre os dois procedimentos, o cacho é levado à sala de secagem, onde permanece por um período de 4 a 6 horas antes de retornar para o novo revestimento.

Nesse contexto, o cacho revestido com a lama de alumina calcinada absorveu 0,38 kg de lama (considerando ambos os banhos) e 0,61 kg de areia, gerando um

custo total de R\$ 19,31 por cacho. Dividido pelo número de peças por cacho (28 peças), o custo unitário foi de R\$ 0,69 por peça.

Já o cacho revestido com a lama de zirconita apresentou custos ligeiramente superiores, totalizando R\$ 20,78 por cacho e R\$ 0,742 por peça. Esse resultado aponta uma vantagem econômica na utilização da alumina calcinada para a produção deste item, sem comprometer a qualidade do processo.

**Tabela 6 – Pesos e custo amostra N°4**

PESOS CACHO ALUMINA				
Seco	Lama	Areia		
			Peso de lama	Peso de Areia
2,240	2,380	2,640	0,140	0,260
2,600	2,840	3,190	0,240	0,350
			0,380	0,610

Custo por cacho/Alumina		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 13,02	R\$ 4,95
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 14,36
	<b>Total</b>	<b>R\$ 19,31</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 0,690</b>

PESOS CACHO ZIRCONITA				
Seco	Lama	Areia		
			Peso de lama	Peso de Areia
2,240	2,470	2,690	0,230	0,220
2,680	2,910	3,220	0,230	0,310
			0,460	0,530

Custo por cacho/Zirconita		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 18,04	R\$ 8,30
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 12,48
	<b>Total</b>	<b>R\$ 20,78</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 0,742</b>

Fonte: Elaborado pelo autor e pelo fornecedor (2024)

#### 4.2.5 Custos Amostra N°5

A amostra n° 5 segue um processo semelhante ao da amostra n° 4, devido à presença de regiões de difícil penetração da lama. Além disso, este item apresenta uma grande área superficial, similar à amostra n° 2, embora em menor proporção. Esses fatores contribuíram para que o custo de produção fosse mais elevado na formulação com alumina calcinada.

O cacho revestido com a lama de alumina calcinada apresentou um custo total de R\$ 14,00 por cacho, que, dividido pelo número de peças por cacho (4 peças), resultou em um custo unitário de R\$ 3,501 por peça. Por outro lado, o cacho revestido com a lama de zirconita apresentou valores inferiores, com custo total de R\$ 12,28 por cacho e R\$ 3,07 por peça. Os valores podem ser observados na Tabela 8.

Esses resultados destacam que, embora a formulação com alumina calcinada tenha gerado custos mais elevados nesta amostra, fatores como a geometria e a área

superficial da peça desempenham um papel significativo no consumo de materiais e, conseqüentemente, no custo final.

**Tabela 7 – Pesos e custo amostra N°5**

PESOS CACHO ALUMINA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,120	2,270	2,470	0,150	0,200
2,440	2,570	2,810	0,130	0,240
			0,280	0,440

Custo por cacho/Alumina		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 13,02	R\$ 3,65
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 10,36
	<b>Total</b>	<b>R\$ 14,00</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 3,501</b>

PESOS CACHO ZIRCONITA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,130	2,260	2,400	0,130	0,140
2,380	2,500	2,690	0,120	0,190
			0,250	0,330

Custo por cacho/Zirconita		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 18,04	R\$ 4,51
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 7,77
	<b>Total</b>	<b>R\$ 12,28</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 3,070</b>

Fonte: Elaborado pelo autor e pelo fornecedor (2024)

#### 4.2.6 Custos Amostra N°6

A partir da pesagem do cacho da amostra n° 6, verificou-se que, no cacho em que foi utilizada alumina calcinada na formulação da primeira lama, houve adesão de 0,16 kg de lama e 0,35 kg de areia. Multiplicando esses valores pelo custo por quilograma dos respectivos materiais, obteve-se um custo total de R\$ 10,32 por cacho. Dividindo esse valor pelo número de peças por cacho (96 peças no caso desta amostra), o custo unitário por peça foi calculado em R\$ 0,161.

Por outro lado, no cacho revestido com a lama formulada com farinha de zirconita, houve adesão de 0,22 kg de lama e 0,28 kg de areia, resultando em um custo total de R\$ 10,56 por cacho e um custo unitário por peça de R\$ 0,165. Esses resultados podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 8 – Pesos e custo amostra N°6

PESOS CACHOS ALUMINA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,280	2,440	2,790	0,160	0,350

PESOS ZIRCONITA				
Seco	Lama	Stucco	Coleta de pesos	
			Peso de lama	Peso de Areia
2,290	2,510	2,790	0,220	0,280

Custo por cacho/Alumina		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 13,02	R\$ 2,08
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 8,24
	<b>Total</b>	<b>R\$ 10,32</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 0,161</b>

Custo por cacho/Zirconita		
Material	R\$ / Kg	R\$ total
1a Lama	R\$ 18,04	R\$ 3,97
Areia Zr	R\$ 23,54	R\$ 6,59
	<b>Total</b>	<b>R\$ 10,56</b>
<b>CUSTO POR PEÇA</b>		<b>R\$ 0,165</b>

Fonte: Elaborado pelo autor e pelo fornecedor (2024)

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica e econômica da substituição da zirconita por alumina calcinada na formulação da lama primária utilizada no processo de microfusão. Os resultados obtidos indicaram que a alumina calcinada apresenta potencial como alternativa em ligas metálicas menos reativas, como aço carbono, aço inoxidável austenítico e ferro fundido nodular. Nesses casos, as peças apresentaram acabamento superficial uniforme e qualidade equivalente ao revestimento tradicional, confirmando sua eficácia em aplicações específicas. Além disso, a análise econômica demonstrou que, dependendo da aplicação e das características das peças, a utilização da alumina calcinada pode reduzir custos em relação à zirconita.

No entanto, foram observadas limitações significativas no uso da alumina calcinada em ligas mais reativas, como os aços inoxidáveis martensíticos, devido à ocorrência de reações metal-molde que comprometeram a qualidade final das peças. Esses resultados reforçam que, em aplicações envolvendo alta reatividade, a zirconita permanece a melhor escolha devido à sua menor interação química com o metal.

A análise econômica evidenciou que, embora a lama de alumina calcinada apresente um custo menor por quilograma, todas as amostras exigiram maior consumo de areia para o revestimento dos cachos em comparação à lama de zirconita. Isso impactou diretamente o custo total em peças com geometrias complexas ou grandes áreas superficiais, como observado nas amostras nº 2 e nº 5. Por outro lado, em peças com menor área superficial e geometrias simples, como nas amostras nº 1 e nº 3, a alumina calcinada demonstrou vantagem econômica, mesmo considerando o aumento do consumo de areia.

Também se identificou um desafio relacionado ao comportamento reológico da lama de alumina calcinada, que apresentou engrossamento significativo ao longo do tempo, exigindo ajustes frequentes para recuperação da viscosidade. Esse comportamento pode comprometer a produtividade, especialmente em processos contínuos ou de alta demanda.

Conclui-se que a alumina calcinada é uma alternativa viável e econômica ao revestimento de zirconita em materiais e geometrias menos exigentes. Entretanto, sua aplicação em situações que envolvam alta reatividade ou consumo adicional de areia exige uma avaliação criteriosa da viabilidade técnica e econômica. Com as

abordagens sugeridas, espera-se contribuir para o avanço da sustentabilidade e da inovação no setor de microfusão.

### **Trabalhos Futuros:**

Para ampliar os conhecimentos sobre a viabilidade do uso da alumina calcinada, sugere-se:

#### **1. Otimização das Formulações para Reduzir Reações Metal-Molde:**

Investigar aditivos ou modificações na composição da lama, com foco em minimizar reações metal-molde em ligas reativas, como aços inoxidáveis martensíticos. Essa abordagem pode incluir a exploração de revestimentos intermediários ou a melhoria da barreira química.

#### **2. Exploração de Novos Materiais:**

Testar combinações de alumina com outros óxidos refratários para melhorar a compatibilidade química, a estabilidade térmica e o desempenho geral das lamas cerâmicas, ampliando as opções de aplicação.

## REFERÊNCIAS

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. Curso de microfundição. Realizado virtualmente, setembro de 2021. Certificado de participação.

ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook: Casting. 9. ed. vol. 15. Materials Park: ASM International, 1988. Reimpressão: ASM Handbook, 1992.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). *Indústria de fundição: situação atual e perspectivas*. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1721/2/A%20BS%2033%20Ind%C3%BAstria%20de%20fundi%C3%A7%C3%A3o%20-%20situa%C3%A7%C3%A3o%20atual%20e%20perspectivas\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1721/2/A%20BS%2033%20Ind%C3%BAstria%20de%20fundi%C3%A7%C3%A3o%20-%20situa%C3%A7%C3%A3o%20atual%20e%20perspectivas_P.pdf). Acesso em: 18 set. 2024.

BEELEY, Peter. Foundry technology. 2. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.

BRANSCOMB, T. A practical approach to replacing zircon. In: INVESTMENT CASTING INSTITUTE 58TH TECHNICAL CONFERENCE & EQUIPMENT EXPO, 2011. Proceedings [...]. [s.l.]: Investment Casting Institute, 2011.

GOVERNO BRASILEIRO. *Sumário Mineral Brasileiro 2018 – Alumínio*. Cláudio Clayer Monteiro; João Paulo Alves da Silva. Brasília: Agência Nacional de Mineração (ANM). Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/aluminio>. Acesso em: 15 set. 2024.

GROOVER, Mikell P. *Introdução aos processos de fabricação*. São Paulo: LTC, 2014.

INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Atlas of casting defects*. Cleveland, Ohio: Investment Casting Institute, 2017.

INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Investment Casting Handbook*. Dallas, Texas: Investment Casting Institute, 1997.

INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Manual de testes cerâmicos*. Cleveland, Ohio: Investment Casting Institute, 1994.

LOSEKAN, Cláudio R.; CARPES Jr, Widomar P.; MORO, Norberto. *Processos de Fundição*. Apostila do Curso Técnico em Mecânica do CEFET/SC, 2002.

MACHADO, Ioná Macedo Leonardo. *Avaliação microestrutural de cascas cerâmicas utilizadas na produção de moldes para o processo de fundição por cera perdida*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, Mônica Beraldo Fabrício da. *Zircônio – Sumário Mineral Brasileiro 2004*. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2004/zirconio-2004.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

TREMARIN, Ronaldo Cesar. Influência da adição de aluminato de cobalto na lama de zirconita do processo de fundição de precisão. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2011.

ZIRCON INDUSTRY ASSOCIATION (ZIA). *Technical Handbook on Zirconium and Zirconium Compounds*. Londres: Zircon Industry Association, 2019.

WHITEHOUSE, C.; SNOW, J.; SNYDER, B.; SCOTT, D.; WRIGHT, J.; ROSMAIT, R. A study on prime coat slurry and stucco alternatives to zircon. In: 53rd Technical Conference & Expo. Investment Casting Institute, 2005.