

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Ian Ferreira Belote

**ANÁLISE DO PROCESSO DE REGENERAÇÃO TÉRMICA DE AREIA DE
FUNDIÇÃO VIA FORNO DE LEITO FLUIDIZADO: um estudo experimental**

Belo Horizonte
2023

IAN FERREIRA BELOTE

**ANÁLISE DO PROCESSO DE REGENERAÇÃO TÉRMICA DE AREIA DE
FUNDIÇÃO VIA FORNO DE LEITO FLUIDIZADO: um estudo experimental**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Betim, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix.

Belo Horizonte

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

B452a Belote, Ian Ferreira
Análise do processo de regeneração térmica de areia de fundição
via forno de leito fluidizado: um estudo experimental / Ian Ferreira
Belote. – 2023.

55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Minas Gerais, Câmpus Betim, 2023.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix

1. Fundição. 2. Regeneração térmica. 3. Areia de fundição. 4.
Engenharia mecânica. I. Belote, Ian Ferreira. II. Título.

CDU: 621.7

Ian Ferreira Belote

**ANÁLISE DO PROCESSO DE REGENERAÇÃO TÉRMICA DE AREIA DE
FUNDIÇÃO VIA FORNO DE LEITO FLUIDIZADO: um estudo experimental**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Betim, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 07/12/2023 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE FONSECA FELIX
Data: 22/02/2024 09:58:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Fonseca Félix (Orientador) – IFMG *Campus* Betim



Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo – IFMG *Campus* Betim

Documento assinado digitalmente
gov.br NORIMAR DE MELO VERTICCHIO
Data: 20/02/2024 16:16:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Norimar Melo Verticchio – IFMG *Campus* Betim

À toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

Expresso profunda gratidão aos meus pais, Márcia Ferreira Diniz e Vicaci Eugênio Belote, pelo esforço contínuo em entregar motivação, pelo apoio e resiliência.

Ao meu querido irmão, Athus Ferreira Belote, com quem compartilho um amor e carinho imensuráveis.

Aos meus avós, em especial ao Sr. Vicaci Belote (*in memoriam*), por ser fonte inesgotável de apoio durante todos esses anos de graduação.

Especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. André Fonseca Félix, pela total disponibilidade, atenção e pelo apoio crucial no processo inicial de definição temática, além do incentivo constante durante a execução deste trabalho, sempre propondo sugestões de melhoria, fazendo questionamentos e se colocando à disposição para ajudar.

Agradeço ainda aos meus amigos e todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

E finalmente, gratidão especial à minha querida noiva – Marina L. A. L. Cordeiro – por ser paciente e cuidadora. Por cobrar, propor desafios e metas, por auxiliar na tomada de decisões e por ser a engrenagem motriz responsável pelo sucesso deste trabalho.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”.

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

O presente trabalho possui natureza analítico-experimental em que se busca verificar a viabilidade da reutilização da areia de fundição regenerada termicamente, via forno de leito fluidizado, no processo de fundição de Ferros Fundidos. Nesse sentido, foram confrontadas propriedades físico-químicas da areia de fundição regenerada e não regenerada, a fim de avaliar se, após o processo, os padrões mínimos de reinserção seriam atendidos. Para tanto, o estudo apresentará inicialmente uma revisão de literatura acerca dos elementos basilares do estudo, materiais e métodos utilizados durante o processo experimental, bem como os tipos de areia de fundição e o processo de regeneração térmica de areia. Por fim, exporará os resultados obtidos, com enfoque na granulometria – percentual de finos e módulo de finitura, e na perda por calcinação. O resultado obtido aponta para uma satisfatória eficácia do processo de regeneração térmica de areia, de modo que suas propriedades físico-químicas se assemelham às da areia comum (ADF não regenerada).

PALAVRAS-CHAVE: regeneração térmica de areia; areia de fundição; processo de fundição; forno de leito fluidizado.

ABSTRACT

This study has an analytical-experimental nature in which the feasibility of reusing thermally regenerated foundry sand in a fluidized bed furnace in the process of casting Cast Iron is examined. In this regard, the physical and chemical properties of the regenerated and non-regenerated foundry sand were compared to assess whether, after the process, the minimum reinsertion standards would be met. To this end, the study will initially provide a literature review on the fundamental elements of the study, materials and methods used during the experimental process, as well as the types of foundry sand and the thermal regeneration process of sand. Finally, it will present the results obtained, focusing on particle size - percentage of fines and fineness modulus, and calcination loss. The result obtained indicates a satisfactory effectiveness of the thermal regeneration process of sand, so that its physical and chemical properties resemble those of common sand (non-regenerated ADF).

KEYWORDS: thermal sand regeneration; foundry sand; casting process; fluidized bed furnace.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama do processo de fundição em areia.....	21
Figura 2 – Componentes de um molde de areia para fundição.....	23
Figura 3 – Forno tipo “cubilô” para fusão do ferro fundido.....	24
Figura 4 – Etapa de basculamento da panela de vazamento com metal líquido para dentro do molde.....	25
Figura 5 – Classificação típica dos grãos de areia.....	29
Figura 6 – Torrão de areia residual do processo de moldagem.....	33
Figura 7 – Etapas da regeneração térmica de areia em forno de leito fluidizado.....	34
Figura 8 – Quarteador de amostras.....	37
Figura 9 – Agitador mecânico de peneiras marca +GF+.....	37
Figura 10 – Saco plástico para armazenamento de amostras de areia.....	38
Figura 11 – Balança semi-analítica modelo AD330 Marte Científica.....	39
Figura 12 – Cadinho em material refratário.....	40
Figura 13 – Forno Mufla modelo SP-1200DRP7/F marca SP Labor.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção mundial de fundidos em 2018 (milhões de toneladas).....	18
Gráfico 2 – Percentual retido por peneira (amostra 01).....	43
Gráfico 3 – Percentual retido por peneira (amostra 02).....	44
Gráfico 4 – Percentual retido por peneira (amostra 03).....	45
Gráfico 5 – Percentual retido por peneira (amostra 04).....	46
Gráfico 6 – Percentuais retidos por peneira para as Amostras 01, 02, 03 e 04.....	47
Gráfico 7 – Resultados de Perda por Calcinação para as Amostras 1, 2, 3 e 4.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção brasileira de fundidos (mil t/mês).....	18
Tabela 2 – Composição química das areias de fundição.....	27
Tabela 3 – Principais características das areias-base.....	28
Tabela 4 – Características desejadas da areia regenerada.....	36
Tabela 5 – Aberturas de malha (mesh) das peneiras.....	38
Tabela 6 – Massa retida por peneira para a Amostra 01.....	43
Tabela 7 – Massa retida por peneira para a Amostra 02.....	44
Tabela 8 – Massa retida por peneira para a Amostra 03.....	45
Tabela 9 – Massa retida por peneira para a Amostra 04.....	46
Tabela 10 – Resultados de TF e M para as Amostras 01, 02, 03 e 04.....	47
Tabela 11 – Resultados de massa para os Cadinhos 01, 02, 03 e 04 antes e depois da Calcinação.....	48
Tabela 12 – Resultados de massa para as Amostras 01, 02, 03 e 04 antes e depois da Calcinação.....	48
Tabela 13 – Percentual de Perda por Calcinação para as Amostras 1, 2, 3 e 4.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NBR – NORMA BRASILEIRA.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE.

M – MÓDULO DE FINURA.

CG – CONCENTRAÇÃO GRANULOMÉTRICA.

TF – TEOR DE FINOS.

PF – PERDA AO FOGO.

pH – POTENCIAL HIDROGENIÔNICO.

ADF – AREIA DE FUNDIÇÃO.

PPC – PERDA POR CALCINAÇÃO.

LISTA DE SÍMBOLOS

- t/h – Toneladas por hora.
- g/cm³ – Gramas por centímetro cúbico.
- g – Gramas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Objetivo Geral	19
1.2. Objetivos Específicos	20
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1. Contexto Histórico e o Processo de Fundição.....	20
2.1.1. <i>Modelação</i>	21
2.1.2. <i>Macharia</i>	22
2.1.3. <i>Moldagem</i>	22
2.1.4. <i>Fusão</i>	23
2.1.5. <i>Vazamento</i>	24
2.1.6. <i>Desmoldagem</i>	25
2.1.7. <i>Rebarbação e Limpeza</i>	26
2.1.8. <i>Expedição</i>	26
2.2. Areia de Fundição	26
2.2.1. <i>Tipos de Areia de Fundição</i>	26
2.2.1.1. Forma do grão ou esfericidade.....	29
2.2.1.2. Distribuição granulométrica.....	30
2.2.1.3. Perda ao fogo.....	30
2.2.1.4. Potencial hidrogeniônico (pH).....	31
2.2.2. <i>Areia Verde</i>	31
2.2.3. <i>Areia como Resíduo</i>	32
2.2.4. <i>Reaproveitamento de Areia</i>	32
2.2.5. <i>Processo de Regeneração em Forno de Leito Fluidizado</i>	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1. Granulometria: Percentual de Finos e Módulo de Finura.....	36
3.1.1. <i>Materiais utilizados</i>	36
3.1.2. <i>Procedimento Experimental</i>	39
3.2. Perda por Calcinação (PPC)	40
3.2.1. <i>Materiais utilizados</i>	40
3.2.2. <i>Procedimento Experimental</i>	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. Granulometria: Percentual de Finos e Módulo de Finura.....	42

4.2. Perda por Calcinação (PPC)	48
5. CONCLUSÃO	50

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável dos últimos anos requer cada vez mais intensivamente a substituição de estratégias corretivas por alternativas preventivas, no que diz respeito à gestão ambiental, muito pelo fato de se estabelecer uma regulamentação mundial nesse quesito.

A indústria da fundição é conhecida como altamente poluidora, talvez, pelo fato de ser confundida, com o setor siderúrgico, ou também pelo fato de décadas anteriores, despejarem seus poluentes na atmosfera, através dos seus fornos de fusão. Hoje, o grande problema das empresas de fundição são os seus resíduos sólidos (BONET *et al.*, 2003).

Faz-se necessária a redução da produção de resíduos para descarte no meio ambiente, bem como a busca por meios de reciclagem mais eficazes, constituindo-se de tarefas básicas e de cunho mandatório. Objetiva-se resultados de natureza financeira e ambiental.

O metal é integralmente reciclável e, na metalurgia da fundição, utiliza-se de forma contundente estes materiais. No entanto, são produzidos outros tipos de resíduos sólidos, considerados excedentes de fundição, como as areias do processo de produção de machos e do processo de moldagem em si. As areias correspondem ao maior volume de resíduos gerados pela indústria da fundição, cujo potencial de reaproveitamento é considerado alto, principalmente em atividades relacionadas à construção civil. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em 2009, a NBR 15702/2009 que estabelece as diretrizes para aplicação de areias descartadas de fundição como matéria-prima em concreto asfáltico e cobertura diária de aterro sanitário.

O setor de fundição utiliza grande quantidade de sucatas metálicas como matéria-prima, com o objetivo de equilibrar a balança ambiental entre geração de resíduos e extração de recursos naturais. No processo de fabricação utiliza-se grande quantidade de areia para confecção dos moldes e machos. O índice de consumo de areia, dependendo do tipo de peça, varia de 800 kg a 1.000 kg para cada peça de 1.000 kg. Essa areia normalmente é extraída de jazidas de cava ou rios, sendo considerado um bem não renovável, cujo beneficiamento geralmente causa impactos

ambientais. No preparo dos moldes, a areia é misturada com um ligante que pode ser bentonita e outros aditivos para o preparo da areia verde, utilizada na produção de peças de menor peso e tamanho. Para fabricação de peças maiores, geralmente são utilizados moldes e machos, constituídos por areia misturada com resina e catalisador, que conferem maior resistência mecânica ao conjunto molde e macho. A areia com resina dificulta a sua recuperação e reutilização, gerando assim grande quantidade de resíduo a ser enviado aos aterros industriais e, conseqüentemente, onerando ainda mais o custo de produção (DANTAS, 2003 *apud* SCHEUNEMANN, 2005).

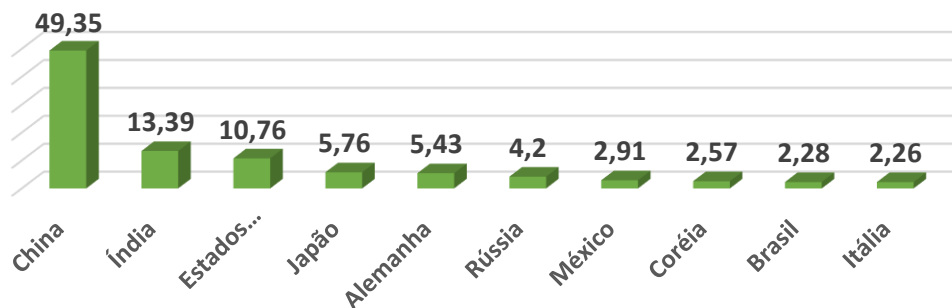
A produção de fundidos no mundo segue em alta e a tendência é continuar assim para os próximos anos. O Brasil ocupa a nona posição no ranking de países produtores de peças fundidas, segundo a revista Modern Casting (ano base 2018). O ranking é liderado pela China, fato que enfatiza a importância desses países no âmbito mundial da fundição (ABIFA, 2019). No contexto brasileiro, entre os anos 2016 e 2019, a produção de fundidos cresceu, conforme representado na tabela 1:

Tabela 1 – Produção brasileira de fundidos (mil t/mês).

TIPO	2016	2017	2018	2019
FERRO	1.774	1.778	1.829	1.838
AÇO	164	187	243	259
NÃO FERROSOS (ALUMÍNIO)	165	183	199	192
TOTAL	2.103	2.148	2.271	2.289

Fonte: ABIFA, 2020.

Gráfico 1 – Produção mundial de fundidos em 2018 (milhões de toneladas).



Fonte: ABIFA, 2020.

Os dados acima relacionados enunciam de forma incisiva a representatividade da indústria de fundidos no mundo, bem como a tendência crescente na produção ao longo dos anos. Logo, demanda-se a aplicação de metodologias para reaproveitar os resíduos sólidos gerados no processo, principalmente as areias de fundição, reduzindo os impactos ambientais decorrentes do seu descarte.

Dados divulgados pela FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente, no estado de Minas Gerais, através do Inventário de Resíduos Sólidos Industriais, mostram que o resíduo denominado areia de fundição é o oitavo mais gerado no estado, com volume (em peso) de aproximadamente 1,2 milhão de tonelada produzida no período concebido entre janeiro e dezembro de 2017 (FEAM, 2018).

A regeneração de areia é o processo para tornar reutilizável a areia já empregada em processos de fundição, podendo substituir a areia nova total ou parcialmente. O processo consiste em um tratamento térmico, físico, mecânico ou químico, dos resíduos gerados, sem causar perdas significativas das propriedades originais do material.

Vale salientar que a areia de fundição pode ser regenerada termicamente quantas vezes for necessário mantendo suas propriedades originais, evitando assim o seu descarte no meio ambiente.

O presente trabalho se constituirá em apresentar o processo de regeneração térmica de areia de fundição, bem como detalhar o processo de regeneração térmica de areia via forno de leito fluidizado e apresentar, ainda, o fluxograma esquemático, incluindo pré-processamento, tratamento e pós-processamento. Cabe ainda a verificação da eficiência do sistema de regeneração térmica de areia de fundição com base na avaliação das propriedades tecnológicas do material estudado.

1.1. Objetivo Geral

Analisar e comparar as Propriedades Tecnológicas da Areia de Fundição (ADF) Regenerada via Forno de Leito Fluidizado, na proporção de 100% ADF regenerada termicamente, embasando-se nas características normalizadas da ADF

não regenerada (ou virgem) para analisar a viabilidade de reinserção da ADF regenerada no processo de fundição.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho em questão incluem a realização de procedimentos experimentais em laboratório, sendo:

- a) Percentual de Finos, verificado por peneiramento;
- b) Módulo de Finura (M);
- c) Perda por Calcinação (PPC).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contexto Histórico e o Processo de Fundição

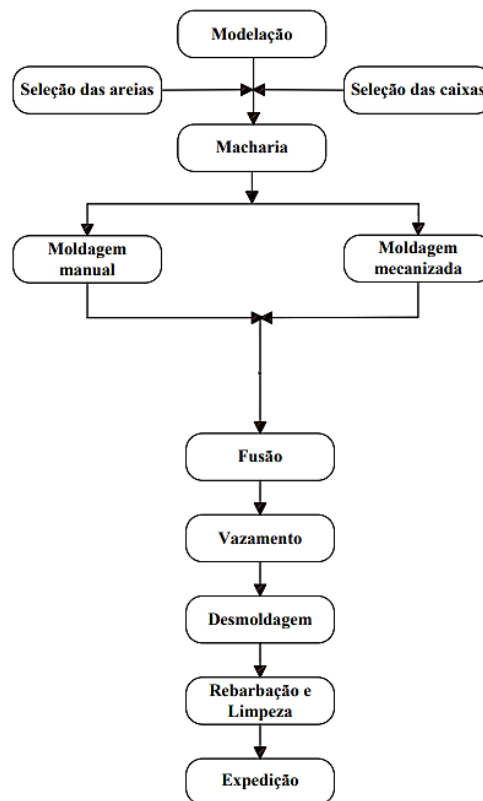
Por volta do ano 7.000 a.C na Ásia Ocidental, mais precisamente na região da Anatólia (República da Turquia), teve-se os primeiros indícios de manipulação de metais. No terceiro milênio a.C as técnicas de fundição eram frequentes no Egito e na Suméria. Já no segundo milênio a.C a indústria metalúrgica se fazia presente por todo o Mediterrâneo Oriental. Em meados do ano 1700 a.C. os hititas (povos indo-europeus estabelecidos na Anatólia) deram o ponta pé inicial na produção de peças de ferro fundidas em fornos utilizando o método de cera perdida. Dessa forma, por volta de 1000 a.C. começa a chamada Idade do Ferro (MEDEIROS, 2009 *apud* SANTOS, 2018).

O processo de fundição consiste na fusão de um metal que, em estado líquido, é vazado na quantidade necessária para o preenchimento de um molde e que, ao solidificar-se, gera uma peça com o formato desejado (FAGUNDES *et al.*, 2009 *apud* SILVA 2010).

Segundo Beeley (2001) *apud* Pinheiro e Rocha (2017) o processo de fundição, em linhas gerais, consiste em derramar metal líquido na cavidade de um molde, permitindo a obtenção de peças com o formato da referida cavidade, após a solidificação do metal. Os principais componentes para obtenção de fundidos são: o molde, o modelo e o macho.

A moldagem de peças fundidas ocorre com o resfriamento do metal que foi vazado dentro de um recipiente denominado “molde”. O molde compreende uma estrutura resistente, podendo ter formas externas geométricas parecidas com uma caixa, cujo interior apresenta-se um vazio denominado “cavidade”, e que tem o formato desejado da peça. Na fundição em areia, a construção do molde parte do modelo e, em suma, é colocado em uma caixa bipartida, em que é acomodada e compactada a areia de moldagem. A complexidade do produto final pode determinar os parâmetros do processo de fundição, bem como a forma como será vazado o metal líquido. Nesse sentido, pode-se definir o processo de fundição em areia de acordo com o diagrama abaixo proposto por Oliveira (1998) *apud* Alves (2012) na figura 1:

Figura 1 – Diagrama do processo de fundição em areia.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (1998) *apud* ALVES (2012).

2.1.1. Modelação

Os modelos, segundo Carnin (2008) *apud* Santos (2018), são as réplicas perfeitas das peças metálicas a serem produzidas, os quais podem ser constituídos por diversos tipos de materiais como isopor, madeira, plástico ou metal.

Geralmente, fabricados em madeira ou alumínio, darão o formato interno dos moldes (CHIAVERINI, 2008 *apud* BAPTISTELLA, 2016).

O material usado na confecção do modelo depende do processo de moldagem que está sendo utilizado. O modelo deve ter ângulos favoráveis à saída do molde, evitando que ocorra travamento dentro cavidade durante sua extração, podendo ocasionar quebra durante a desmoldagem (SCHEUNEMANN, 2005 *apud* SILVA 2010).

2.1.2. Macharia

Compreende a etapa do processo de fabricação dos machos, formados pela mistura de areia e resina aglomerante. São os machos que darão origem às cavidades internas do produto final a ser obtido.

O macho é usado quando a peça a ser fundida necessita de reentrâncias ou furos, nesse caso o modelo já é projetado considerando os alojamentos dos machos, que são moldados em material refratário (geralmente o mesmo do molde) e montados dentro do molde (SCHEUNEMANN, 2005 *apud* SILVA, 2010).

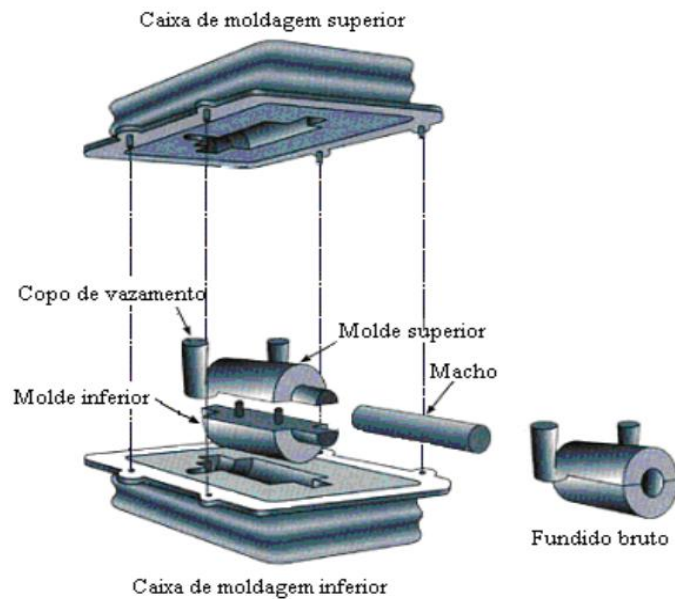
2.1.3. Moldagem

Etapa em que se promove a compactação das areias sobre os modelos, normalmente bipartidos, cada qual numa caixa de fundição. Fazem-se os devidos canais de alimentação (para que o metal fundente possa fluir internamente) e juntam-se a caixa superior e a caixa inferior, constituindo o molde para fundição (CHIAVERINI, 2008 *apud* BAPTISTELLA, 2016).

A moldagem, como foi citado, pode ser realizada manualmente (com soquete manual ou pneumático) ou mecanicamente. Neste último caso, empregam-se máquinas e sistemas de moldar especiais, entre os quais podem ser citados: máquinas de compressão, máquinas de impacto, máquinas de compressão vibratória, máquinas de sopragem e máquinas de projeção centrífuga (CHIAVERINI, 1986, p. 21).

Conforme Peixoto (2003) *apud* Santos (2018), 80% das peças metálicas na indústria de fundição são obtidas com a utilização de moldes de areia, sendo areia de sílica o principal tipo de material usado. Nesse sentido, visualiza-se na figura 2 os componentes para fabricação de um molde de areia para obtenção de um produto no processo de fundição.

Figura 2 – Componentes de um molde de areia para fundição.



Fonte: GIÃO E COSTA (2001) *apud* OLIVEIRA (2007).

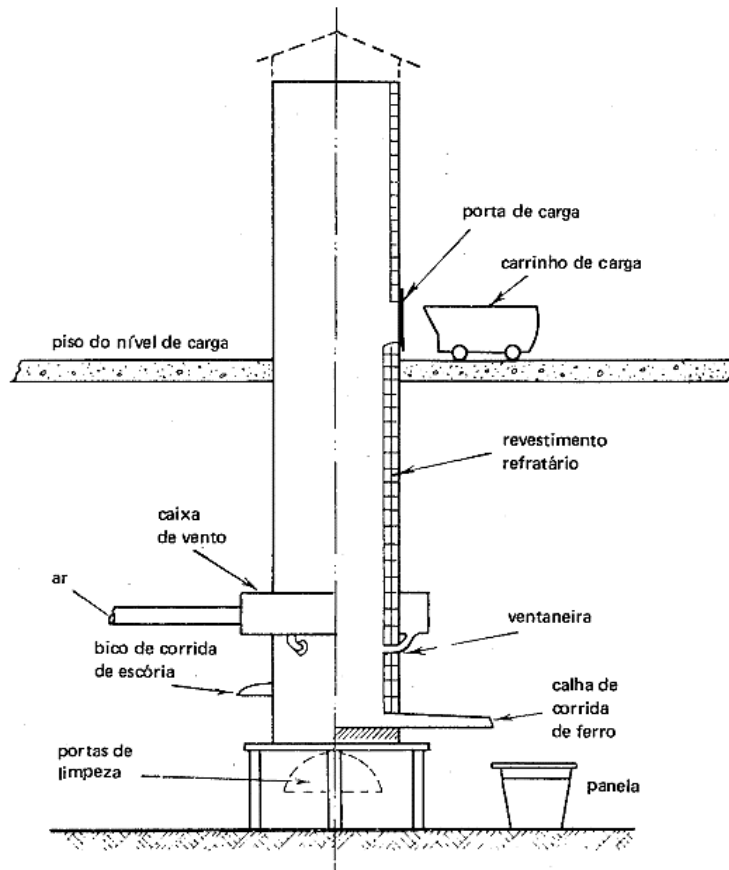
Segundo Ihobe (2000) *apud* Santos (2018), o molde deve apresentar características que aparentam ser opostas, pois necessita de resistência suficiente para que não se rompa ao receber o metal líquido e, ao mesmo tempo, ser frágil no final da operação para não dificultar a realização do desmolde. Peixoto (2003) *apud* Santos (2018) ainda ressalta que, após os moldes resfriarem, esses são destruídos para a retirada da peça metálica.

2.1.4. Fusão

Compreende a etapa de transformação da matéria-prima base do estado sólido para o estado líquido, através de fornos de indução eletromagnética, de arco elétrico, fornos a óleo/gás e fornos tipo "Cubilô". Para o processo de fundição do ferro fundido, o método mais comumente utilizado na indústria é o que conta com o forno tipo "cubilô", cuja economia e eficiência térmica são elevadas, conforme dito por Chiaverini (1986).

O forno tipo Cubilô consiste [...] em uma carcaça cilíndrica vertical de aço, revestida internamente com tijolos de material refratário. O seu diâmetro interno pode chegar a cerca de 1,80m e a altura superar a 15 metros. **Sua capacidade de fusão varia de 1t/h até cerca de 50t/h** (CHIAVERINI, 1986, p. 42, grifo nosso).

Figura 3 – Forno tipo “cubilô” para fusão do ferro fundido.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986, p. 21).

Segundo Chiaverini (1986), o forno tipo “cubilô” não produz matéria-prima com composição química uniforme. Portanto, no processo de fundição do ferro fundido, utiliza-se de fornos a indução eletromagnética, chamados “foros de espera”, para realização da correção da liga do metal e conservação da temperatura ideal para a etapa de vazamento.

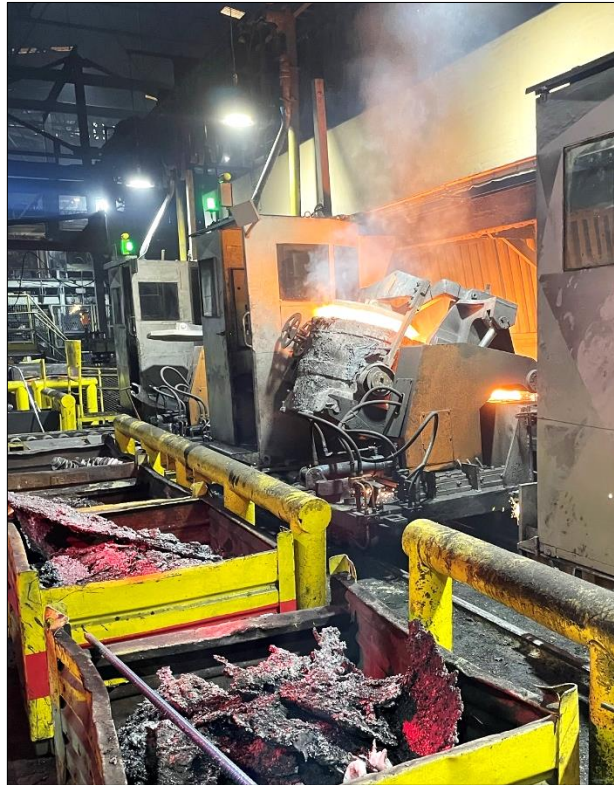
2.1.5. Vazamento

A etapa de vazamento consiste no derramamento por gravidade, do metal líquido, controlando-se vazão e temperatura (aproximadamente 1500°C), dentro do canal de vazamento dos moldes, de forma a preencher completamente suas cavidades internas.

O processo de vazamento geralmente é realizado por um operador capaz de atuar o basculamento da panela de metal líquido, através de um botão de

acionamento no interior da cabine do carro de vazamento, conforme representado na figura 4.

Figura 4 – Etapa de basculamento da panela de vazamento com metal líquido para dentro do molde.



Fonte: Próprio autor, 2023.

“Completada a solidificação das peças no interior dos moldes, procede-se às operações de desmoldagem, corte de canais, limpeza e rebarbação (Chiaverini, 1986, p. 51).”

2.1.6. Desmoldagem

Segundo Casotti, Bel Filho e Castro (2011), a operação de desmoldagem compreende a retirada da peça sólida do interior do molde. A temperatura é uma variável que deve ser controlada para evitar choque térmico e posteriores trincas no produto final.

Chiaverini (1986) cita que a desmoldagem tem o objetivo de separar a areia da peça solidificada, ainda quente. Em regra, o equipamento que realiza o processo

de desmoldagem consiste em uma grade dotada de movimento vibratório (ou calha vibratória). A areia separada cai sobre transportadores e é levada a silos, de forma a ser reaproveitada.

2.1.7. Rebarbação e Limpeza

A etapa de rebarbação e limpeza compreende a remoção do metal excedente que ficou nos canais de vazamento e massalotes, e posterior jateamento abrasivo, conforme Casotti, Bel Filho e Castro (2011).

Segundo Chiaverini (1986), a remoção dos canais de vazamento e massalotes pode ser realizada por um operador, utilizando-se de ferramentas como martelos ou marretas. A limpeza da superfície da peça procede-se mediante o emprego de jatos de areia ou granalha em equipamentos que promovem o arremesso sob pressão do material abrasivo contra a peça.

Por fim, a rebarbação e esmerilhagem removem as rebarbas e demais protuberâncias metálicas em excesso. A rebarbação utiliza-se de equipamentos dotados de rebolos abrasivos, sendo que a esmerilhagem é geralmente manual e realizada por um operador.

2.1.8. Expedição

A fase final compreende a inspeção das peças fundidas, com o objetivo de rejeitar as peças defeituosas e preservar o padrão de qualidade das matérias-primas utilizadas no processo. Segundo Chiaverini (1986), o controle de qualidade compreende as etapas de inspeção visual, conferência dimensional e metalúrgica.

Após aprovadas no controle de qualidade, as peças finais seguem para o estoque até a entrega aos clientes. As peças reprovadas nos testes de qualidade, denominadas refugo interno, podem ser utilizadas novamente como matéria-prima no processo.

2.2. Areia de Fundição

2.2.1. Tipos de Areia de Fundição

Segundo Oliveira (2007), existem quatro tipos de areia usualmente utilizadas nos processos de fundição, classificadas de acordo com suas respectivas

composições químicas, tais como: Olivina [(MgFe)₂(SiO₄)]; Zirconita (ZrSiO₄); Cromita (FeCr₂O₅) e Sílica (SiO₂). A tabela 2 relaciona a composição química das principais areias empregadas em fundições:

Tabela 2 – Composição química das areias de fundição.

Análise Química	Tipos de areias			
	Sílica	Zirconita	Cromita	Olivina
SiO ₂	99,820	33,500	1,340	41,200
MgO	0,031	-	8,750	49,400
Cr ₂ O ₃	-	-	45,800	-
ZrO ₂	-	65,000	-	-
Al ₂ O ₃	0,049	1,000	21,340	1,800
Fe ₂ O ₃	0,019	0,030	19,500	7,100
CaO	0,006	-	0,940	0,200
TiO ₂	0,012	0,190	0,300	-

Fonte: Oliveira (2007) *apud* Mankosa *et al.*, (1997).

Segundo Carey (2002) *apud* Alves (2012) essas areias são denominadas areia-base, areia virgem ou areia convencional (constituídas por granulados de origem mineral, formados pela fragmentação de rochas). As areias permitem que os gases provenientes do processo de moldagem atravessem seus grãos, absorvendo e transmitindo calor.

“A areia de sílica é a mais utilizada e sua constituição mineralógica é essencialmente sílica, termo comum aplicado ao SiO₂ na forma mineral do quartzo (ZIEGLER, 1994 *apud* OLIVEIRA, 2007).”

Para Filipkowski *et al.* (2001) *apud* Oliveira (2007) a areia se tornou um produto de interesse técnico e gerencial, cujos detalhes envolvem desde a escolha da jazida de origem ou das características físico-químicas, até a sua destinação final. O custo e a qualidade do produto fundido estão diretamente relacionados às características da areia empregada no processo. A tabela 3 relaciona as principais características das areias-base comumente empregadas em fundições.

Tabela 3 – Principais características das areias-base.

Características	Tipos de areias			
	Sílica	Zirconita	Cromita	Olivina
COR	MARRON AMARELADO	MARRON CLARO	PRETA	CINZA ESVERDEADO
FORMATO DO GRÃO	ARREDONDADO ATÉ ANGULAR	ARREDONDADO ATÉ ANGULAR	ANGULAR	ANGULAR
EXP. TÉRM. - 1600 °C (mm/mm)	0,013	0,003	0,005	0,006
PONTO DE FUSÃO (°C)	1370 - 1760	2040 - 2200	1760 - 1982	1426 - 1760
REATIV. QUÍMICA	ÁCIDO-NEUTRO	ÁCIDO-NEUTRO	BÁSICO-NEUTRO	BÁSICO
MÓDULO DE FINURA - AFS	25 - 180	95 - 160	50 - 90	40 - 160
SIST. CRISTALINO	HEXAGONAL	TETRAGONAL	CÚBICA	ORTORRÔMBICA
CLIVAGEM	NENHUMA	NENHUMA	NENHUMA	(010) (100)
PESO ESPECÍFICO (g/cm³)	2,65	4,68	4,40 - 5,20	3,20 - 4,80
ÍNDICE DE REFRAÇÃO	1,54 - 1,56	1,92 - 2,02	2,00 - 2,12	1,63 - 1,69

Fonte: Alves (2012) *apud* Peixoto (2003).

Segundo Cobett (2002) *apud* Oliveira (2007) as propriedades químicas e físicas de uma areia de moldagem devem ser controladas para que o produto final possua aprovação técnico-comercial. As propriedades físicas são:

- Forma do grão ou esfericidade;
- Distribuição granulométrica;
- Permeabilidade;
- Massa específica;
- Umidade;
- Coeficiente de expansão térmica.

Já as propriedades químicas são:

- Composição química;
- Perda ao fogo ou Perda por Calcinação (PPC);

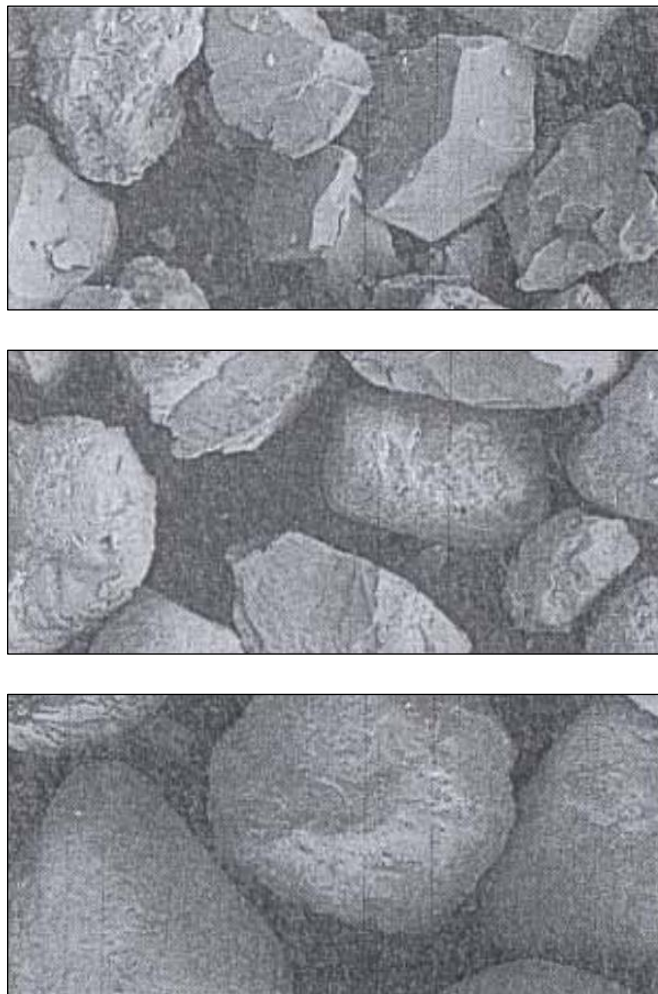
- pH (Potencial Hidrogeniônico);
- Demanda ácida;
- Ponto de fusão.

Serão explicadas as duas propriedades físicas e químicas que usualmente são controladas com mais afinco na indústria da fundição.

2.2.1.1. Forma do grão ou esfericidade

Segundo Oliveira (2007), as propriedades dos moldes, dos machos fabricados e a aparência dos fundidos, são influenciadas pela forma do grão de areia empregado. Conforme a figura 5, os grãos de areia são tipicamente classificados em: angular (superior), sub-angular (central) e arredondado (inferior).

Figura 5 – Classificação típica dos grãos de areia.



Fonte: Carey e Lott (1995) *apud* Oliveira (2007).

2.2.1.2. Distribuição granulométrica

Segundo Ziegler (1994) *apud* Oliveira (2007) a distribuição granulométrica da areia de fundição está diretamente ligada ao consumo de material aglomerante e ao aspecto superficial.

Para Oliveira (2007) a distribuição granulométrica pode ser avaliada de acordo com os seguintes parâmetros: Módulo de Finura (M), Concentração Granulométrica e Teor de Finos.

2.2.1.2.1. Módulo de Finura (M): Número de aberturas de uma peneira, por polegada, que permitiria a passagem da amostra de areia caso ela possuísse todos os grãos de tamanho uniforme. Pode ser obtido através da equação abaixo:

$$M = \frac{\sum (m_i \times AFS_i)}{\sum m_i} \quad (Eq.01)$$

Sendo m_i a massa de material sólido retido na peneira i ; AFS_i fatores de multiplicação arbitrários definidos pela American Foundrymen's Society (ZANETTI E FIORE, 2002 *apud* OLIVEIRA, 2007).

Segundo Santos (2018), o Módulo de Finura (M) trata-se de uma média ponderada do tamanho das partículas presentes na areia, considerando um fator multiplicador para cada peneira. Os fatores multiplicadores podem ser observados na tabela 5.

2.2.1.2.2. Concentração Granulométrica (CG): Parâmetro que mede a largura da faixa granulométrica do material. É recomendado que 70% dos grãos estejam distribuídos em três peneiras subsequentes.

*2.2.1.2.3. Teor de Finos (TF): Percentual de finos retidos abaixo da peneira de 200 mesh, incluindo-a (Oliveira, 2007 *apud* Stahl, 1994). É desejável que o percentual não exceda 5%, sobretudo para que não reduza a permeabilidade dos gases da etapa de vazamento.*

2.2.1.3. Perda ao fogo

Segundo Oliveira (2007) a Perda ao Fogo objetiva verificar a presença, em percentual, de material orgânico na areia de fundição. Para Cobett (2002) *apud*

Oliveira (2007) o material orgânico pode ser classificado em: fixos, quando se queimam entre 482 °C e 982 °C; ou voláteis, na ocorrência de queima abaixo de 482 °C.

O valor de referência ideal para o percentual de Perda ao Fogo é abaixo de 1% para a maioria dos processos de fundição (Blackburn, 1997 *apud* Oliveira, 2007).

Segundo Mendonça, Ferreira e Pavan (2017), o cálculo do resultado da Perda ao Fogo é dado pela seguinte equação:

$$Pf (\%) = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \text{ (Eq. 02)}$$

Onde Pf é a perda ao fogo; M1 é a massa do corpo de prova seco à 110 °C; M2 é a massa do corpo de prova após aquecimento.

“Valores elevados de perda ao fogo podem causar a geração de gases do conjunto molde/macho/metal líquido e provocar defeitos nas peças fundidas” (D’ELBOUX, 2001 *apud* OLIVEIRA, 2007).

2.2.1.4. Potencial hidrogeniônico (pH)

Segundo Bastian e Alleman (1998) *apud* Oliveira (2007) para uma areia considerada nova, os valores de pH podem variar entre 6 e 9, sendo que a areia residual quimicamente ligada possui pH neutro, variando entre 6,8 e 7,3. Portanto, o valor do pH pode ser útil para perceber o comportamento químico da areia quanto à acidez ou alcalinidade.

Para o processo de confecção de machos, a afinidade entre areia e resina pode ser verificada através do pH da areia, conforme dito por Zanetti e Fiore (2002) *apud* Oliveira (2007).

2.2.2. Areia Verde

Além da areia base, para formar as areias de fundição, são utilizados também ligantes e, em alguns casos, aditivos carbonáceos e aditivos celulósicos. E de acordo com o sistema ligante utilizado elas podem ser divididas em dois tipos genéricos principais: as areias verdes, que utilizam sistemas ligantes a base de argila

e as areias quimicamente ligadas, que são feitas com sistemas a base de resinas sintéticas (WINKLER; BOL'SHAKOV, 2000 *apud* ALVES, 2012).

Segundo Siddique e Noumowe (2008) *apud* Alves (2012), a mistura denominada de areia verde é composta por:

- 85 – 95% areia de sílica de alta qualidade;
- 4 – 10% argilas;
- 2 – 10% aditivos carbonáceos;
- 2 – 5% água.

O termo “verde” está relacionado à adição de água na mistura, fornecendo o que pode ser chamado de resistência verde. Ainda segundo Siddique *et al.* (2010) *apud* Alves (2012), resistência verde é a capacidade de um material, parcialmente curado, submeter-se à remoção do molde e ser manuseado sem distorções.

2.2.3. Areia como Resíduo

A areia de fundição é classificada, com base na ABNT NBR 10.004, como um resíduo perigoso (CLASSE I) ou como não inerte (CLASSE II A), dependendo do processo de moldagem/macharia (SCHEUNEMANN, 2005).

A norma ABNT NBR 10.004 (2004) entende que resíduos perigosos (CLASSE I) apresentam periculosidade devido às características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Já os resíduos não inertes podem apresentar combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Existem duas possíveis fontes de contaminação: constituintes orgânicos ou inorgânicos provenientes das resinas aglomerantes, tais como fenol, silicato de sódio etc.; e a presença de metais pesados, surgidos da etapa de vazamento (OLIVEIRA, 2007 *apud* SANTOS, 2018).

2.2.4. Reaproveitamento de Areia

O reaproveitamento da areia de fundição pode proceder-se através de três formas básicas: recuperação, regeneração ou reutilização (SILVA, 2010).

Segundo Hayes (1993) *apud* Oliveira (2007) a regeneração foi definida como um tratamento físico, químico ou térmico aplicado à areia de fundição, permitindo seu uso sem perdas significativas das propriedades originais. Entre elas está o processo de regeneração térmica de areia em forno de leito fluidizado, objeto de estudo deste trabalho.

O processo de recuperação mecânica, em que a ADF (Areia de Fundição), em forma de torrões, é britada/destorroada e novamente utilizada na etapa de moldagem. Esse processo de recuperação pode ser realizado até a areia atingir seu valor de saturação máxima, a ponto de perder as características base e inviabilizar sua re inserção no processo. Quando esta saturação acontece, a areia é descartada em aterros, gerando vastos impactos ambientais (MARIOTTO, 2001 *apud* SANTOS, 2018).

Figura 6 – Torrões de areia residual do processo de moldagem.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Segundo Oliveira (2007), reutilização ou reuso significa destinar a areia excedente para outros fins, desde que não seja em processos de fundição. Exemplos de destinação podem ser na utilização em fabricação de concreto, em massas asfálticas ou tijolos cerâmicos (MARIOTTO, 2000 *apud* PINHEIRO E ROCHA, 2017).

2.2.5. Processo de Regeneração em Forno de Leito Fluidizado

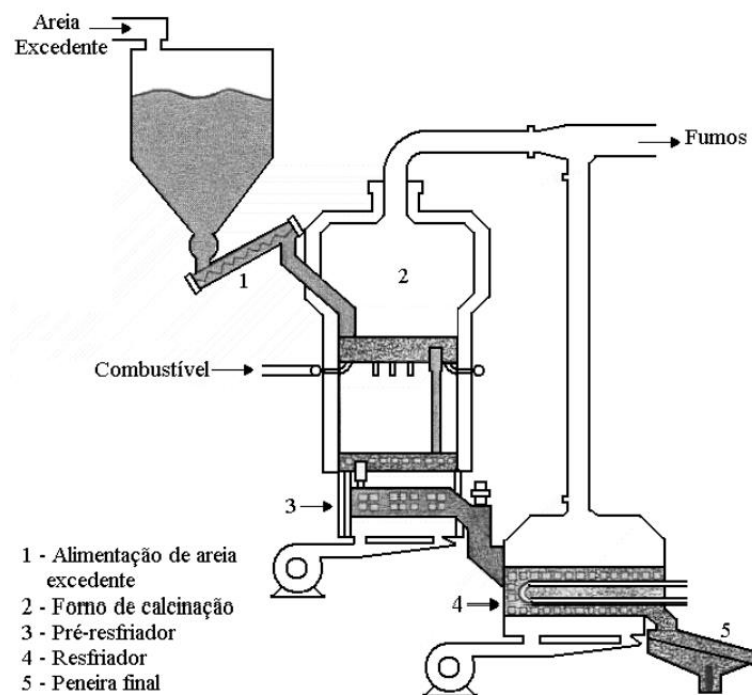
A regeneração térmica de areia em forno de leito fluidizado (figura 7), cujo processo também é denominado calcinação, é eficiente para a remoção e/ou oxidação de resinas orgânicas e aglomerantes dos grãos de areia (SANTICIOLLI E SOUZA, 2021).

Nota-se a calcinação em areias de fundição, com mais frequência, em processos que utilizam areia ligada com resinas, podendo ser altamente eficiente na remoção de resíduos orgânicos, cuja decomposição e volatilização ocorre a temperaturas elevadas (MARIOTTO, 2000).

A calcinação pode ser empregada também visando à inertização de resíduos minerais. Além disso, pelo aquecimento a temperaturas moderadas, consegue-se desidratar os resíduos argilosos, fragilizando-os de modo a facilitar sua remoção por atrição a seco, pneumática ou mecânica (MARIOTTO, 2000, p. E).

Segundo Peixoto e Guesser (2003), a etapa inicial do processo consiste no destorroamento, processo em que os torrões de areia são desagregados em peneiras vibratórias. Em seguida, o material é levado aos silos de alimentação do forno, através de elevadores de canecas. O forno de leito fluidizado, cujo combustível é o gás natural, opera em temperaturas que variam entre 600 e 630°C. Após a calcinação, a areia segue para a etapa de resfriamento, obtendo temperatura final de aproximadamente 34°C. A última etapa consiste novamente no peneiramento e posterior carregamento da areia regenerada em silos para ser novamente utilizada processo de fundição.

Figura 7 – Etapas da regeneração térmica de areia em forno de leito fluidizado.



Scheunemann (2005, p. 29) diz que:

O tratamento térmico através de fornos de leito fluidizado está baseado na suspensão de um agregado por um fluxo de ar até que este assuma algumas das características de um fluido. Este princípio é aplicado à regeneração, sendo a areia fluidizada suspensa por um fluxo de ar quente em contato com os grãos em uma câmara onde é queimada a matéria orgânica e calcinada a argila. O mesmo princípio é aplicado para o resfriamento da areia, substituindo o ar quente por ar frio.

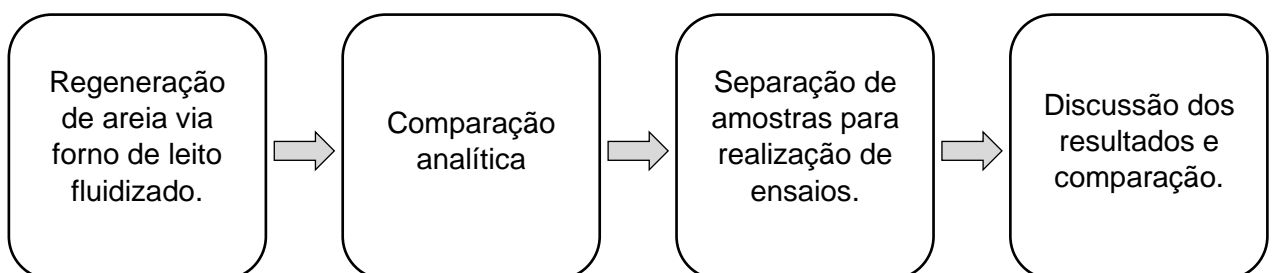
Os fornos de calcinação são capazes de remover praticamente todo o resíduo orgânico da superfície dos grãos de areia. A areia, então, torna-se nova, portanto, o processo de regeneração térmica apresenta rendimento final próximo de 100% (ABIFA, 1999 *apud* SCHEUNEMANN, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação das propriedades tecnológicas da areia de fundição regenerada termicamente ocorreu de forma sistêmica. O trabalho experimental seguiu etapas de processo tais quais descritas abaixo:

- 1) Regeneração dos resíduos sólidos de Areia de Fundição (ADF), através do processo de regeneração via forno de leito fluidizado;
- 2) Comparação analítica entre a areia nova e a areia regenerada;
- 3) Realização de ensaios em laboratório para determinação das propriedades tecnológicas estudadas;
- 4) Verificação dos resultados das análises laboratoriais e comparação com propriedades padrão.

Abaixo é representado um fluxograma “diagrama de blocos” ilustrando as etapas do procedimento experimental adotado no desenvolvimento deste trabalho:



Os ensaios laboratoriais foram realizados considerando os seguintes tipos de areia em seu processo:

- Areia regenerada: areia obtida através do processo de Regeneração Térmica em Forno de Leito Fluidizado;
- Areia nova: areia virgem, não regenerada.

Os resultados esperados para as principais características da Areia de Fundição regenerada e utilizados para o desenvolvimento deste trabalho podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 – Características desejadas da areia regenerada (caracterização com base na literatura e tabela 3).

CARACTERÍSTICA	AREIA DEPOIS DE RECUPERADA (DESEJADO)
MÓDULO DE FINURA (Nº/POLEGADAS)	Entre 45 e 55
TEOR DE FINOS (%)	≤ 0,5
PERDA POR CALCINAÇÃO (%)	≤ 0,5

Fonte: Próprio autor (caracterização), 2023.

Obs.: Todos os ensaios praticados para a execução deste trabalho foram realizados apenas com a Areia de Fundição (ADF) regenerada. Os dados obtidos para a Areia de Fundição não regenerada (ou virgem) foram retirados da literatura.

3.1. Granulometria: Percentual de Finos e Módulo de Finura

3.1.1. Materiais utilizados

- Quarteador de amostras em aço inoxidável para separação das amostras de areia (figura 8).

Figura 8 – Quarteador de amostras.



Fonte: Próprio autor, 2023.

- Agitador mecânico de peneiras marca +GF+ REF. LA-009 com dispositivo para fixação de até dez peneiras, incluindo tampa e fundo (figura 9).

Figura 9 – Agitador mecânico de peneiras marca +GF+.



Fonte: Próprio autor, 2023.

- Peneiras de malhas quadradas com aberturas conforme a norma Americana Mesh (#), representadas na tabela 5.

Tabela 5 – Aberturas de malha das peneiras.

PENEIRA	Nº DA SÉRIE (#)	ABERTURA (mm)	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO (AFS)
1	20	0,840	10
2	30	0,590	20
3	40	0,420	30
4	50	0,297	40
5	70	0,210	50
6	100	0,149	70
7	140	0,105	100
8	200	0,074	140
9	270	0,053	200
FUNDO	-	-	300

Fonte: Próprio autor, 2023.

- Saco plástico: Saco para armazenamento da amostra separada (figura 10).

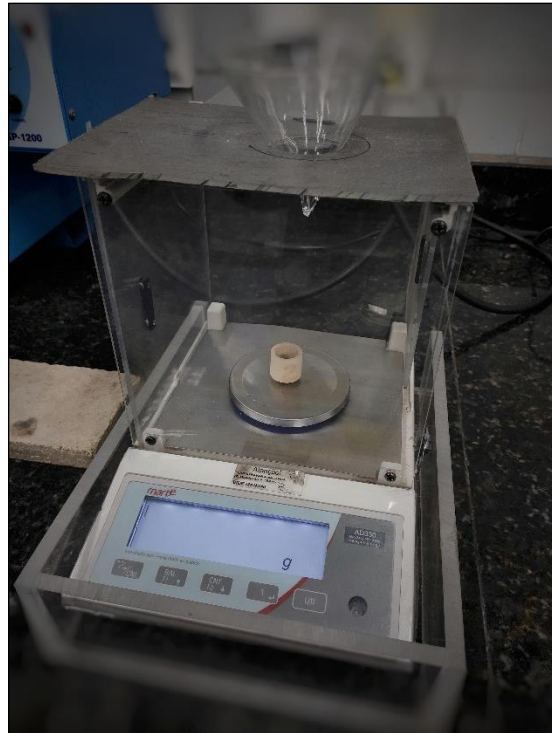
Figura 10 – Saco plástico para armazenamento de amostras de areia.



Fonte: Próprio autor, 2023.

- Balança eletrônica semi-analítica com capacidade de 340g, sensível a 0,001g, com capela em acrílico transparente, modelo AD330 marca Marte Científica aprovada pelo INMETRO conforme portaria INMETRO/DIMEL nº 0008, de 05 de janeiro de 2012 (figura 11).

Figura 11 – Balança semi-analítica modelo AD330 Marte Científica.



Fonte: Próprio autor, 2023.

3.1.2. Procedimento Experimental

Foi coletada uma porção de areia na saída do separador magnético pós-calcinação no forno de leito fluidizado e procedeu-se com a repartição utilizando-se o quarteador de amostras (figura 8). Após a repartição da areia, foram separadas quatro amostras, 1, 2, 3 e 4 com massas entre 30 e 50g para armazenamento individual de cada amostra nos sacos plásticos. Encaixou-se as peneiras devidamente limpas com as aberturas de malhas em ordem crescente (da base em direção ao topo), de modo a formar um único conjunto.

A primeira amostra separada foi então colocada na parte superior do agitador mecânico de peneiras, sempre evitando a formação de camadas espessas de material, e fechou-se o equipamento corretamente. Com isso, se inicia o processo

de agitação mecânica, com tempo de duração em 12 minutos. Após finalizada a agitação mecânica no equipamento, seguiu-se com a determinação da massa de material retido em cada peneira, incluindo o fundo do conjunto de peneiras e anotou-se os resultados na tabela 6. Para tanto, o mesmo procedimento foi seguido para as amostras 2, 3 e 4 e anotou-se os resultados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Prosseguiu-se então com o cálculo do Percentual de Finos e a determinação do Módulo de Finura (M) para cada amostra, através da equação 01.

3.2. Perda por Calcinação (PPC)

3.2.1. Materiais utilizados

- Balança eletrônica semi-analítica com capacidade de 340g, sensível a 0,001g, com capela em acrílico transparente, modelo AD330 marca Marte Científica aprovada pelo INMETRO conforme portaria INMETRO/DIMEL nº 0008, de 05 de janeiro de 2012 (figura 11).
- Cadinho em material refratário, formato tronco de cone para operações em altas temperaturas (figura 12).

Figura 12 – Cadinho em material refratário.



Fonte: Próprio autor, 2023.

- Forno Mufla Digital Microprocessado, dimensões internas 30x15x15cm, com sete rampas e sete patamares, potência de 3,5 kW, modelo SP-1200DRP7/F marca SP Labor Equipamentos para Laboratórios (figura 13).

Figura 13 – Forno Mufla modelo SP-1200DRP7/F marca SP Labor.



Fonte: Próprio autor, 2023.

3.2.2. Procedimento Experimental

Inicialmente foi coletada uma porção de areia na saída do separador magnético pós-calcinação no forno de leito fluidizado e procedeu-se com a repartição utilizando-se o quarteador de amostras (figura 8). Após a repartição da areia procedeu-se com a determinação de massa a vazio dos cadinhos 1, 2, 3 e 4 a serem utilizados no processo, sempre registrando os valores na Tabela 11. Com o cadinho 1 ainda na balança, colocou-se aproximadamente 4g de areia em seu interior e anotou-se o valor de massa do cadinho 1 na tabela 11. Analogamente o procedimento foi repetido para os cadinhos 2, 3 e 4. Em seguida, calculou-se as massas das

amostras 1, 2, 3 e 4 realizando a subtração entre a massa do cadinho com amostra de areia e a massa do cadinho a vazio. Os resultados foram registrados na tabela 12.

Posteriormente, inseriu-se os cadinhos 1, 2, 3 e 4 no Forno Mufla em temperatura de aproximadamente 930°C, mantendo-os pelo tempo de permanência de 04 (quatro) horas. Na próxima etapa, retirou-se os cadinhos 1, 2, 3 e 4 do forno e aguardou-se por mais 1,5 h (uma hora e trinta minutos), tempo necessário para o completo resfriamento das amostras.

Após finalizado o tempo de resfriamento, seguiu-se com a determinação da massa de cada cadinho (1, 2, 3 e 4) e anotou-se os resultados na tabela 11. Ainda, foi calculada a massa de cada amostra calcinada, ou seja, realizou-se a subtração entre a massa do cadinho com a amostra de areia pós-calcinação e a massa do cadinho sem amostra de areia. Os resultados foram registrados na tabela 12. Por fim, seguiu-se com a determinação do Percentual de Perda por Calcinação das amostras 1, 2, 3 e 4 através da equação 02 e anotou-se os resultados na tabela 13.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Granulometria: Percentual de Finos e Módulo de Finura

Os resultados obtidos para a amostra 01 do experimento denominado *Granulometria: Percentual de Finos e Módulo de Finura* (item 3.1.) podem ser observados na tabela 6:

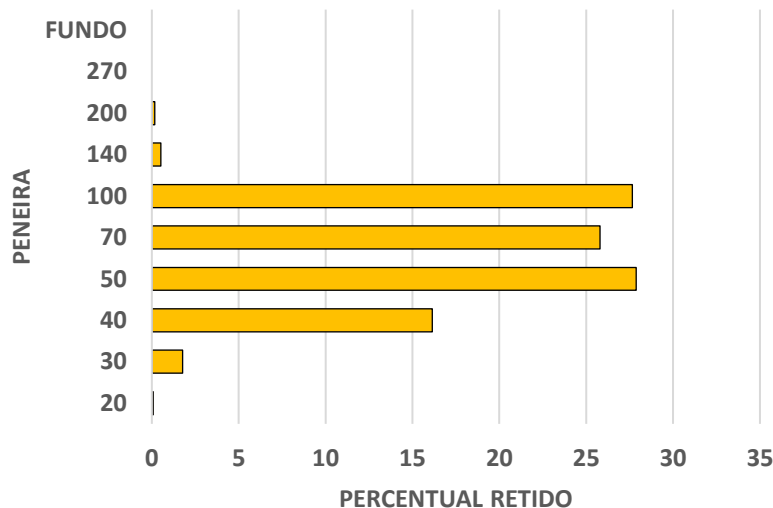
Tabela 6 – Massa retida por peneira para a Amostra 01.

PENEIRA	MASSA RETIDA	PERCENTUAL RETIDO
20	0,03	0,07
30	0,73	1,78
40	6,58	16,14
50	11,36	27,87
70	10,51	25,79
100	11,27	27,65
140	0,21	0,52
200	0,07	0,17
270	0,00	0,00
FUNDO	0,00	0,00
TOTAIS	40,76	100,00

Fonte: Próprio autor, 2023.

É possível perceber, através do Gráfico 2 abaixo, que existe uma maior concentração de material entre as peneiras 40 e 100 para a amostra 01.

Gráfico 2 – Percentual retido por peneira (amostra 01).



Fonte: Próprio autor, 2023.

Os resultados obtidos para a amostra 02 do mesmo experimento (item 3.1.) podem ser observados na tabela 7.

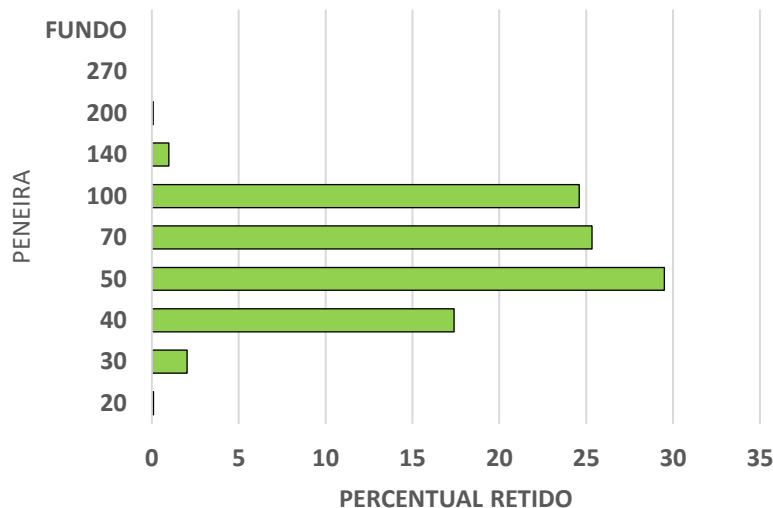
Tabela 7 – Massa retida por peneira para a Amostra 02.

PENEIRA	MASSA RETIDA	PERCENTUAL RETIDO
20	0,04	0,10
30	0,81	2,03
40	6,95	17,39
50	11,79	29,50
70	10,12	25,33
100	9,83	24,60
140	0,39	0,98
200	0,03	0,08
270	0,00	0,00
FUNDO	0,00	0,00
TOTAIS	39,96	100,00

Fonte: Próprio autor, 2023.

Através do Gráfico 3 abaixo, é possível perceber que existe uma maior concentração de material entre as peneiras 50 e 100 para a amostra 02.

Gráfico 3 – Percentual retido por peneira (amostra 02).



Fonte: Próprio autor, 2023.

Os resultados obtidos para a amostra 03 do mesmo experimento (item 3.1.) podem ser observados na tabela 8.

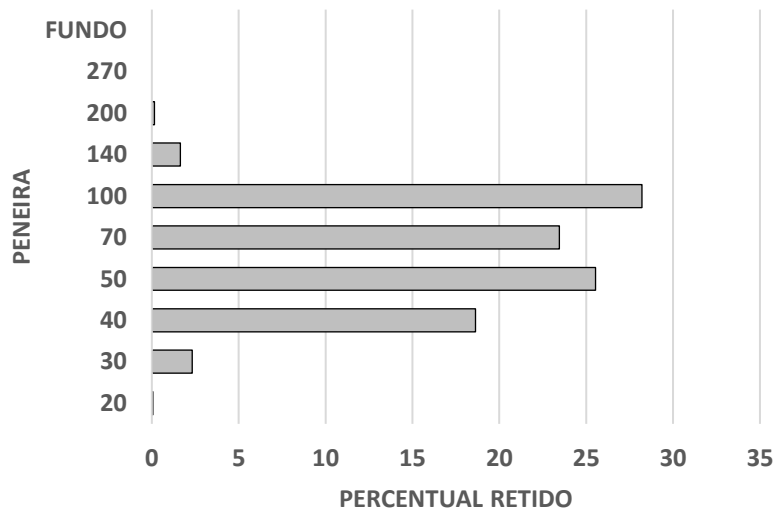
Tabela 8 – Massa retida por peneira para a Amostra 03.

PENEIRA	MASSA RETIDA	PERCENTUAL RETIDO
20	0,02	0,05
30	0,91	2,32
40	7,30	18,64
50	10,00	25,53
70	9,19	23,46
100	11,05	28,21
140	0,64	1,63
200	0,06	0,15
270	0,00	0,00
FUNDO	0,00	0,00
TOTAIS	39,17	100,00

Fonte: Próprio autor, 2023.

Através do Gráfico 4 abaixo, podemos perceber que existe uma maior concentração de material entre as peneiras 40 e 100 para a amostra 03.

Gráfico 4 – Percentual retido por peneira (amostra 03).



Fonte: Próprio autor, 2023.

Os resultados obtidos para a amostra 04 do mesmo experimento (item 3.1.) podem ser observados na tabela 9.

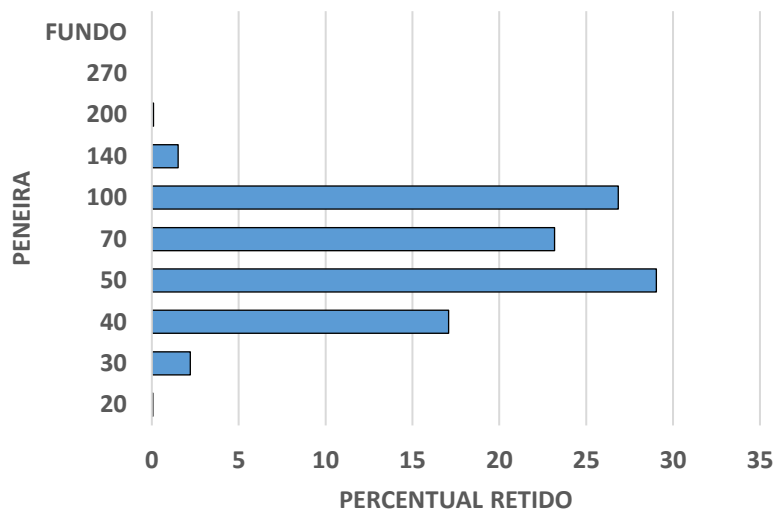
Tabela 9 – Massa retida por peneira para a Amostra 04.

PENEIRA	MASSA RETIDA	PERCENTUAL RETIDO
20	0,02	0,05
30	0,91	2,22
40	7,00	17,08
50	11,90	29,03
70	9,50	23,18
100	11,00	26,84
140	0,62	1,51
200	0,04	0,10
270	0,00	0,00
FUNDO	0,00	0,00
TOTAIS	40,99	100,00

Fonte: Próprio autor, 2023.

Através do Gráfico 5 abaixo, é possível perceber que existe uma maior concentração de material entre as peneiras 50 e 100 para a amostra 04.

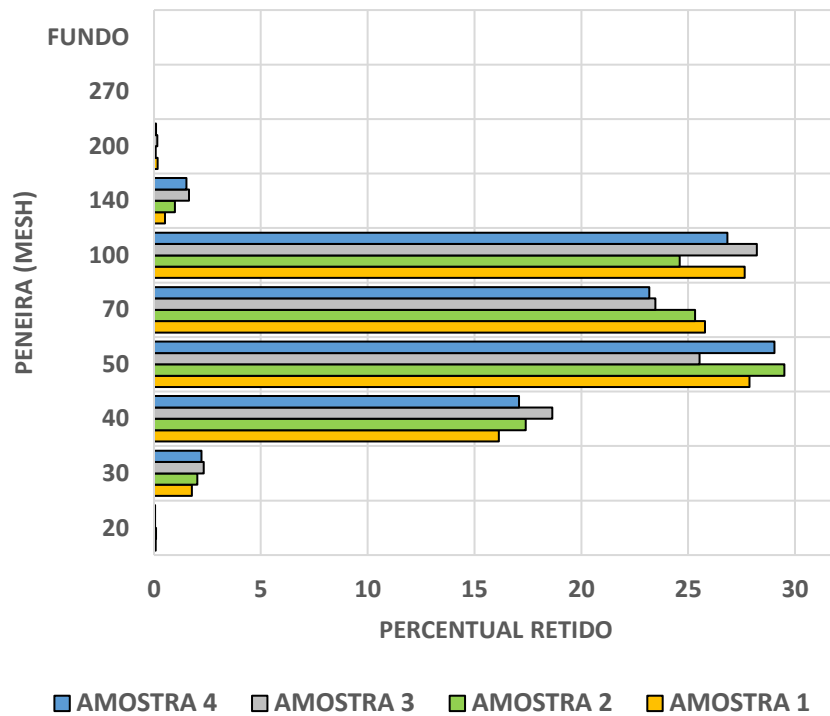
Gráfico 5 – Percentual retido por peneira (amostra 04).



Fonte: Próprio autor, 2023.

O Gráfico 6 apresenta um resumo dos percentuais retidos por peneira para as amostras 01, 02, 03 e 04.

Gráfico 6 – Percentuais retidos por peneira para as Amostras 01, 02, 03 e 04.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Conforme disposto no item 2.2.1.2.3, o Teor de Finos (TF) corresponde à soma dos percentuais de massa retidos em todas as peneiras abaixo de 200 *mesh*, incluindo-a. No item 2.2.1.2.2, temos o Módulo de Finura (M) definido como o N^o de aberturas de uma peneira, por polegada, que permitiria a passagem da amostra de areia caso ela possuísse todos os grãos de tamanho uniforme e pode ser obtido através da equação 01.

Portanto, temos os seguintes resultados para as Amostras 01, 02, 03 e 04, expressos na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de TF e M para as Amostras 01, 02, 03 e 04.

N	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4
TEOR DE FINOS	0,17	0,08	0,15	0,10
MÓDULO DE FINURA	49,36	48,40	49,60	49,21

Fonte: Próprio autor, 2023.

4.2. Perda por Calcinação (PPC)

O experimento denominado *Perda Por Calcinação* (item 3.2.) produziu os seguintes resultados expostos na tabela 11.

Tabela 11 – Resultados de massa para os Cadinhos 01, 02, 03 e 04 antes e depois da Calcinação.

AMOSTRA	MASSA CADINHO A VAZIO	MASSA CADINHO COM AMOSTRA DE AREIA	MASSA CADINHO COM AMOSTRA DE AREIA PÓS-CALCINAÇÃO
1	16,157	20,166	20,154
2	16,359	20,216	20,214
3	16,240	20,118	20,114
4	16,297	20,203	20,199

Fonte: Próprio autor, 2023.

É possível perceber, nestes casos, a perda de massa em todas as amostras analisadas.

Na tabela 12 é possível verificar a massa das amostras 1, 2, 3 e 4 antes do processo de calcinação e pós-processo de calcinação.

Tabela 12 – Resultados de massa para as Amostras 01, 02, 03 e 04 antes e depois da calcinação.

AMOSTRA	MASSA DA AMOSTRA	MASSA DA AMOSTRA CALCINADA
1	4,009	3,997
2	3,857	3,855
3	3,878	3,874
4	3,906	3,902

Fonte: Próprio autor, 2023.

A massa das amostras calcinadas deverá ser, sempre, menor que a massa das amostras antes do processo de calcinação.

Através da Equação 02 foi possível obter o Percentual de Perda por Calcinação, conforme ilustrado na tabela 13:

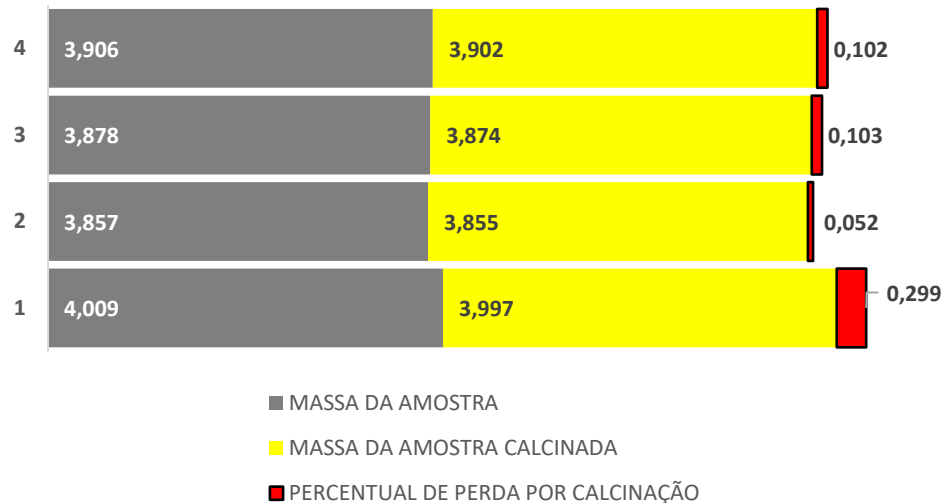
Tabela 13 – Percentual de Perda por Calcinação para as Amostras 01, 02, 03 e 04.

AMOSTRA	PERCENTUAL DE PERDA POR CALCINAÇÃO
1	0,299
2	0,052
3	0,103
4	0,102

Fonte: Próprio autor, 2023.

O Gráfico 7 ilustra as massas das Amostras 1, 2, 3 e 4 antes e depois do processo de Calcinação e os resultados de Perda por Calcinação.

Gráfico 7 – Resultados de Perda por Calcinação para as Amostras 01, 02, 03 e 04.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Observa-se que todos os resultados obtidos para Percentual de Perda por Calcinação (amostras 01, 02, 03 e 04) estão abaixo de 1%, ou seja, são valores aceitáveis para a maioria dos processos de fundição, conforme trata o item 2.2.1.3.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar as características da Areia de Fundição (ADF) pós-processamento em Forno de Leito Fluidizado, justificando sua posterior reaplicação na indústria da Fundição. Por conseguinte, foi utilizado o método comparativo entre a Areia de Fundição não regenerada (ou virgem) e a ADF regenerada analisando as seguintes Propriedades Tecnológicas: Granulometria – Percentual de Finos e Módulo de Finura; Perda por Calcinação.

A discussão exposta na fase de desenvolvimento deste trabalho resultou nas conclusões descritas abaixo:

- I. A Areia de Fundição regenerada é apropriada para reutilização no processo de confecção de Machos e Moldes para Fundição por não apresentar desvios relevantes em relação à Areia Virgem para os seguintes parâmetros: Percentual de Finos, Módulo de Finura e Perda por Calcinação. Os teores de carga orgânica são inferiores se comparados aos valores da Areia Virgem, de acordo com a literatura;
- II. No tocante ao Teor de Finos, pode-se concluir que os resultados obtidos em todas as amostras analisadas estão dentro dos valores de referência, ou seja, abaixo de 5% (conforme prevê a literatura) e, ainda, abaixo do valor caracterizado de 0,5% para a realização deste trabalho (tabela 4);
- III. Em relação ao Módulo de Finura, observa-se que, em todas as quatro amostras analisadas, os resultados foram igualmente satisfatórios, permanecendo dentro do valor de referência caracterizado, qual seja, entre 45 e 55. Considerando a literatura, os valores obtidos também podem ser validados para o tipo de areia analisado;
- IV. Por fim, ao analisar o tópico Perda por Calcinação, os resultados almejados foram atingidos. Todas as amostras analisadas apresentaram valores abaixo de 1% (conforme estipula a literatura) e, ainda, abaixo do valor caracterizado de 0,5% para a realização deste trabalho (tabela 4).

Sendo assim, o processo de Regeneração Térmica em Forno de Leito Fluidizado mostrou-se eficaz no que diz respeito a reestabelecer as características-

base da Areia de Fundição, por produzir um constituinte com grau de pureza considerável e baixo nível de contaminação, tornando-se ideal para reuso.

REFERÊNCIAS

ABIFA (São Paulo). **9th BRICS International Foundry Forum debate futuro da indústria de fundição no Brasil, China e Rússia**. 2019. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/9th-brics-international-foundry-forum-debate-futuro-da-industria-de-fundicao-no-brasil-china-e-russia/>. Acesso em: 20 maio 2021.

ABIFA (São Paulo). **Produção de fundidos tem novo incremento em 2019**. 2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019/>. Acesso em: 20 maio 2021.

ALVES, Bárbara Samartini Queiroz. **ESTUDO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DA REUTILIZAÇÃO DAS AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO**. 2012. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15702: Areia descartada de fundição: Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário**. Rio de Janeiro. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

BAPTISTELLA, Marco Antônio. **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO AAR- M 201 GRAU E, EM ENGATE FERROVIÁRIO FIXO TIPO “F”, APÓS MAGNETIZAÇÃO POR PRODS NO ENSAIO COM PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**. 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica na Área de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

CASOTTI, Bruna Pretti; BEL FILHO, Egmar del; CASTRO, Paulo Castor de (ed.). Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro, p. 121-162. mar. 2011. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1721>. Acesso em: 27 set. 2022.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: processo de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw Hill, 1986. 315 p. (Volume II).

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Governo do Estado de Minas Gerais. **Inventário de Resíduos Sólidos Industriais**: ano base 2017. Belo Horizonte: Feam, 2018. 47 p. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2018/RESIDUOS/Relat%C3%B3rio_Invent%C3%A1rio_Industria_2018_ano_base_2017.pdf. Acesso em: 06 jul. 2021.

MARIOTTO, C. L. **Regeneração de Areias: Uma Tentativa de Discussão Sistemática**. Fundação & Matérias-Primas. Caderno Técnico, n. 42, v. 33, p. A - T, 2000.

OLIVEIRA, Júlio César Dainezi de. **Estudo Experimental da Regeneração Térmica de Areia de Macharia em Leito Fluidizado**. 2007. 217 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PEIXOTO, Fabiano; GUESSER, Wilson Luiz. Reutilização de Areia Regenerada Termicamente. **CONAF-ABIFA**. São Paulo, 18 f. set. 2003.

PINHEIRO, Luís Vinícius. Reciclagem de Moldes de Areia de Fundição. **XIII Jornada de Iniciação Científica e VII Mostra de Iniciação Tecnológica – 2017**. São Paulo. 15 f. 2017.

REVISTA BRASILEIRA DE PROCESSOS QUÍMICOS V.2 N.2 JUL./DEZ. 2021. Campinas: Fatec Campinas, 2021. Disponível em: <https://www.fateccampinas.com.br/rbpq/index.php/rbpq/issue/view/3>. Acesso em: 25 out. 2022.

SANTOS, Marcos Leonardo Vieira dos. **REUTILIZAÇÃO DA AREIA RESIDUAL DE FUNDIÇÃO PARA FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA PEÇAS METÁLICAS**. 2018. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de Tratamento Químico via Processo Fenton**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **REGENERAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO ATRAVÉS DE TRATAMENTO QUÍMICO VIA PROCESSO FENTON**. 2005. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, Karine Dias da. **REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO O CONTEXTO DO ESTADO DE MINAS GERAIS**. 2010. 58 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

