

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOÃO PAULO GALDINO DA SILVA

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES
UTILIZADOS PARA O SISTEMA DE MOLDAGEM EM AREIA A
VERDE APLICADOS AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2017

UTFPR DAEMA	<p style="text-align: center;">JOÃO PAULO GALDINO DA SILVA</p> <p style="text-align: center;">ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES UTILIZADOS PARA O SISTEMA DE MOLDAGEM EM AREIA A VERDE APLICADOS AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO</p>	2017
----------------	---	------

JOÃO PAULO GALDINO DA SILVA

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES
UTILIZADOS PARA O SISTEMA DE MOLDAGEM EM AREIA A
VERDE APLICADOS AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA
2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES UTILIZADOS PARA O SISTEMA DE MOLDAGEM EM AREIA A VERDE APLICADOS AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

João Paulo Galdino da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 12 de junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dra. Délia do Carmo Vieira
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dra. Pollyane Márcia de Souto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Orientador

Prof. Dra. Délia do Carmo Vieira
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

OBS: A Folha de Aprovação assinada se encontra na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me permitir completar mais uma fase de minha vida, me providenciando sabedoria, dedicação, saúde, paciência e fé para seguir sempre em frente.

Ao meu orientador, Dr. Odney Carlos Brondino, por sempre dedicar seu tempo para compartilhar o seu conhecimento, mostrando caminhos facilitadores para conclusão não só deste trabalho, mas de diversas etapas juntos enfrentadas.

À minha família pelo apoio sempre contínuo, pelos puxões de orelha, pela paciência nos dias de estresse e por sempre estarem do meu lado desejando o meu melhor.

À minha namorada, Fernanda, por ser paciente e sempre estar do meu lado nos momentos difíceis, me acalmando com seu carinho e amor para poder levantar a cabeça e pelos puxões de orelha para sempre olhar o melhor em minha frente.

Ao Sr. Rodolfo Palhares, pelo gentil fornecimento da matéria-prima, sem a qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

À docente Nair Cristina Brondino, da instituição UNESP, pelo apoio e disponibilidade em me ajudar para o sucesso deste trabalho.

Ao técnico e seus auxiliares de laboratório por sempre estarem dispostos e ajudando em situações inesperadas.

A todos os professores que sempre se disponibilizaram para compartilhar seu conhecimento comigo e por sempre ajudarem nas mais diversas situações.

A todos os amigos que aqui encontrei, pelos momentos de felicidade e tristeza convvidos e pelo aprendizado compartilhado entre todos.

Aqui deixo o meu muito obrigado!

RESUMO

SILVA, João P. G. ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DE CONSTITUINTES DO SISTEMA DE MOLDAGEM EM AREIA A VERDE APLICADOS AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO. 140 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo da caracterização de componentes aplicados em sistemas de moldagem em areia a verde, visando especificar e ressaltar a importância do controle de propriedades dos materiais quando submetidos ao processo de moldagem em areia para fundição. A composição base da areia a verde é a mistura entre areia nova, comumente de sílica, materiais ligantes, como a bentonita, aditivos, como o carvão mineral moído e plastificantes, como a água. Foram empregados como materiais avaliados a areia nova com módulo 66 AFS, areia de retorno com módulo 55 AFS, bentonita sódica ativada, carvão mineral moído tipo Cardiff e água destilada. Misturadores apropriados são utilizados de modo a se adquirir coesão entre os grãos de sílica, materiais argilosos e carbonáceos, garantindo propriedades importantes ao sistema, como plasticidade, consistência, compactabilidade, permeabilidade e resistência mecânica, que são dependentes da distribuição granulométrica da sílica, do inchamento das camadas de argila e do teor de umidade presente. As etapas de construção de moldes dependem destas propriedades da areia a verde, que sofrem deterioração quando submetidos ao processo de vazamento em fundição, devido ao contato direto do metal com a superfície da areia, gerando a areia de retorno. O processo de oolitização (sinterização dos materiais argilosos e finos sob a superfície dos grãos de sílica) ocorre durante o vazamento e solidificação do metal, em que se inicia a etapa de formação da areia de retorno, carregando também algumas perdas de propriedades (compactabilidade, resistência mecânica, etc.) restauradas por uma nova adição de areia nova, materiais argilosos e carbonáceos. Entretanto, o nível de adição dos aditivos para a areia de retorno quando comparado a um sistema baseado em areia nova é superior, pois os grãos oolitizados, comumente porosos e de maior tamanho de grão, consomem mais argila para promover o mesmo requisito de propriedade dos moldes antes do vazamento do metal líquido. De forma conjunta, ocorre o aumento do grau de oolitização da areia, na qual chega em um nível crítico em que se torna inviável uma grande adição de aditivos e assim, gera-se a areia de descarte, considerada um resíduo sólido e gerador de impactos ambientais, sendo o maior problema deste tipo de processo.

Palavras-chave: Fundição. Areia a verde. Oolitização. Descarte de areia. Resíduos sólidos.

ABSTRACT

SILVA, João P. G. A CHARACTERIZATION STUDY OF THE GREEN SAND MOLDING SYSTEM APPLIED IN CASTING PROCESSES. 140 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

The purpose of this research was the characterization study of the components applied in the green sand molding system, evaluating the importance of the properties control of these materials when submitted the molding and to the casting process. The composition of the green sand is a mixture of new sand, commonly silica sand, bentonite (acting like a bonding agent), coal dust (additive for better surface qualities) and water. The materials applied were a 66 AFS new sand, 55 AFS reclaimed sand, sodic bentonite, Cardiff Coal Dust and distilled water. Appropriate mixers are used to promote the cohesion in the grains of the silica sand, bentonite and coal dust, providing important properties to the system, such as plasticity, consistency, compactability, permeability and mechanical strength. These properties have dependence with the granulometric distribution of silica sand, the bentonite swelling and the humidity content. The phases of the mold building totally depends of these green sand properties, that is subjected to deterioration process when silica grains are exposed to the melted metal directly on the green sand surface, making sand reclamation. The ooliticization process (sinterization of the clay materials and fines in the sand surface) occurs when the molten metal is verted on the mold, promoting the sand reclamation process, carrying on some loss of properties, such as compactability, mechanical strength, that might be restored by a new addition of bentonite and coal dust. However, the addition level of additives to the green sand is higher than to the original pattern because the higher the ooliticization, the higher the consumption of additives process to promote the same level of properties like compactability and permeability before a new exposition to the casting. The ooliticization rate is increased and when reached, the viability of adding new additives is prejudicated, turning the sand of reclaim in a solid waste that promotes environmental impacts, that is the biggest problem of this process.

Keywords: Foundry. Green sand. Ooliticization. Sand reclaims. Solid waste.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Módulo AFS e tamanho médio de grão	26
Tabela 2 - Forma dos grãos e efeitos nas propriedades	27
Tabela 3 - Propriedades da estrutura da argila bentonítica.....	30
Tabela 4 - Teores de adição de argila para moldagem em areia a verde	31
Tabela 5 - Adição de água no comportamento da areia a verde.....	32
Tabela 6 - Características de composição do carvão mineral moído	33
Tabela 7 - Tipos de misturadores do sistema de areia a verde.....	37
Tabela 8 - Durabilidade estimada de modelos em função dos materiais	39
Tabela 9 - Contração típica de metais durante sua solidificação.....	40
Tabela 10 - Código pré-estabelecido de cores para modelos e caixas de macho	41
Tabela 11 - Temperatura de vazamentos típicas de alguns tipos de materiais.....	44
Tabela 12 - Sequência de atividades para etapa de limpeza e acabamento	45
Tabela 13 - Teores adicionados para restaurar propriedades da areia de retorno....	47
Tabela 14 - Tipos de erro associados ao teste de hipótese.	52
Tabela 15 - Vantagens e desvantagens das análises paramétricas e não- paramétricas.....	55
Tabela 16 - Modificação do peneiramento para bentonita	59
Tabela 17 - Peneiramento da areia nova e de retorno	60
Tabela 18 - Obtenção do tamanho médio de grão para areia nova e de retorno.....	61
Tabela 19 - Classificação após inchamento de Foster.....	64
Tabela 20 – Determinação do teor de argila ativa nos constituintes do sistema de finos e areia de retorno.	66
Tabela 21 - Níveis para avaliação da compactibilidade do sistema de areia a verde	71
Tabela 22 - Níveis e variáveis baseadas na areia de retorno	71
Tabela 23 - Sequência de experimentos para a areia nova.	71
Tabela 24 - Sequência de experimento para a areia de retorno.	72
Tabela 25 - Ciclos de oolitização aplicados a areia nova.....	75
Tabela 26 - Características padrão da areia base utilizada em fundição.	79
Tabela 27 - Características da bentonita padrão para moldagem.....	79
Tabela 28 - Características do pó de carvão para fundição.	79
Tabela 29 – Resumo das características físicas da areia nova.....	80

Tabela 30 - Resumo das características físicas da areia de retorno.....	81
Tabela 31 - Dados obtidos nos ensaios de bentonita.....	86
Tabela 32 - Resultados obtidos pelo ensaio de CTC.	87
Tabela 33 - Resultados obtidos após análises no carvão.	89
Tabela 34 - Resultados dos ensaios de sifonamento, perda ao fogo e A.A.M.	90
Tabela 35 – Dados obtidos para o planejamento da areia nova.	92
Tabela 36 - Dados obtidos de performance do sistema de areia de retorno.....	93
Tabela 37 - Teste de assimetria para os resíduos de areia nova e de retorno.	96
Tabela 38 – Sequência de tratamentos para o teste de Kruskal-Wallis.	98
Tabela 39 – Teste de Kruskal-Wallis para compactabilidade.....	98
Tabela 40 – Diferença dos postos de compactabilidade baseados no teste de Kruskal-Wallis.	99
Tabela 41 - Comparações pareadas para a resposta de dureza nos diferentes níveis de água.	100
Tabela 42 – Análise de variância para permeabilidade.....	102
Tabela 43 - Densidade das areias em função do tempo de oolitização.	120
Tabela 44 - Caracterização dos finos do processo de moldagem.....	122
Tabela 45 - Ensaio de adsorção de azul de metileno para os finos.	123
Tabela 46 – Suposição de valores para empresas de fundição com base no sistema de moldagem de areia a verde.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais que constituem a areia a verde.	16
Figura 2 - Fluxograma do processo de fundição em areia a verde	20
Figura 3 - Produção de fundidos no Brasil entre janeiro e julho de 2014 e 2015	21
Figura 4 - Destino das exportações dos fundidos produzidos no Brasil	22
Figura 5 - Destino da produção e de vendas internas dos fundidos brasileiros	22
Figura 6 - Expansão térmica da sílica comparada a outros tipos de areia	24
Figura 7 - Distribuição da forma dos grãos	26
Figura 8 - Ação de íons externos presentes na mistura de água e bentonita	31
Figura 9 - Defeito de bolhas de gás (esquerda) e explosão (direita).....	32
Figura 10 - Misturadores MixMuller, SpeedMullor e Multi-Mull.....	36
Figura 11 - Defeitos comuns: pinhole, contração da peça e sinterização	38
Figura 12 - Modelos bipartidos (a,b) e molde formado (direita).....	39
Figura 13 - Areia de faceamento e de enchimento presentes em moldes de areia...	42
Figura 14 - Resumo da moldagem em areia a verde em fluxograma.....	49
Figura 15 – Distribuição da variância em função da média dos dados amostrais. Média de 75 cm para a imagem.....	50
Figura 16 - Esquema simplificado de atributo estatístico em um teste de hipótese.	53
Figura 17 - Quarteamento realizado nas amostras recebidas.....	56
Figura 18 - Secador por luz infravermelho, modelo AIDU.	58
Figura 19 - Sistema de sifonamento manual (agitação a esquerda e sifonamento a direita).	62
Figura 20 – Estereoscópio, aumento de 40 vezes, fabricante Physis.	63
Figura 21 – Exemplo do teste do halo ótimo para azul de metileno.	65
Figura 22 - Sistema de mistura da areia a verde.....	68
Figura 23 - Investigação do tempo adequado de mistura do sistema de areia.	69
Figura 24 – Conjunto de equipamentos utilizado para compactabilidade.....	72
Figura 25 - Permeâmetro de areia PERB, fabricante Tecnofund.	73
Figura 26 - Durômetro DAV-B, fabricante Tecnofund.....	74
Figura 27 – Aparato experimental para simulação do processo de oolitização, corpo de prova com 50mm de diâmetro.....	76

Figura 28 - Metodologia do método dos interceptos para avaliação do grau de oolitização.	78
Figura 29 - Curva granulométrica média das amostras de areia nova.	81
Figura 30 - Curva granulométrica média das amostras de areia de retorno.	81
Figura 31 – Morfologia dos grãos em mesh 60 - Areia nova (direita) e areia de retorno (esquerda) – aumento de 3,6 vezes – escala de 100 µm.	83
Figura 32 – Morfologia dos grãos em mesh 80 - Areia nova (direita) e areia de retorno (esquerda) – aumento de 3,6 vezes – escala de 100 µm.	84
Figura 33 – Morfologia dos grãos em mesh 140 - Areia nova (direita) e areia de retorno (esquerda) – aumento de 3,6 vezes – escala de 100 µm.	84
Figura 34 - Areia de retorno em mesh 40 - aumento de 3,6 vezes – escala de 100 µm.	86
Figura 35 - Inchamento de bentonita após 24 horas.	87
Figura 36 - Adsorção de azul de metileno para bentonita pura.	88
Figura 37 – Ensaio de capacidade de troca catiônica para areia de retorno.	88
Figura 38 - Teste de normalidade para propriedade de compactabilidade da areia nova (esquerda) e de retorno (direita).	94
Figura 39 – Teste de normalidade para propriedade de permeabilidade da areia nova (esquerda) e de retorno (direita).	94
Figura 40 - Teste de normalidade para propriedade de permeabilidade da areia nova (esquerda) e de retorno (direita).	94
Figura 41 – Análise de variabilidade para areia nova (esquerda) e de retorno (direita), baseada no desvio padrão amostral junto com a média da propriedade de compactabilidade.	95
Figura 42 – Análise de variabilidade para areia nova (esquerda) e de retorno (direita), baseada no desvio padrão amostral junto com a média da propriedade de permeabilidade.	95
Figura 43 – Análise de variabilidade para areia nova (esquerda) e de retorno (direita), baseada no desvio padrão amostral junto com a média da propriedade de permeabilidade.	96
Figura 44 – Interação da água (eixo X) com a compactabilidade (eixo Y) em diferentes níveis de carvão e bentonita.	101
Figura 45 – Interação da água (eixo X) com a dureza (eixo Y) em diferentes níveis de carvão e bentonita.	101

Figura 46 - Modelo de regressão obtido pela MANOVA para permeabilidade.	103
Figura 47 - Gráfico de interação para permeabilidade baseado nas médias ajustadas.	104
Figura 48 - Gráfico de efeitos principais para a permeabilidade.	105
Figura 49 - Sumário do modelo de análise multivariada para a compactabilidade da areia de retorno.	106
Figura 50 – Gráfico de interações dos aditivos para a resposta de compactabilidade da areia de retorno.	107
Figura 51 – Gráfico de efeitos principais dos aditivos para a compactabilidade da areia de retorno.	107
Figura 52 – Sumário do modelo de análise multivariada para a permeabilidade da areia de retorno.	108
Figura 53 - Gráfico de interação para permeabilidade da areia de retorno.	109
Figura 54 - Gráfico de efeitos principais para a permeabilidade - areia de retorno.	109
Figura 55 – Sumário do modelo de análise multivariada para a dureza da areia de retorno.	111
Figura 56 - Gráficos de interação para a dureza para a areia de retorno.	111
Figura 57 - Gráfico de efeitos principais da propriedade de dureza para a areia de retorno.	112
Figura 58 - Perfil de predição para o sistema de areia de retorno.	113
Figura 59 - Avanço da oolitização sob a superfície do corpo de prova.	114
Figura 60 - Processo de oolitização no sistema de areia a verde – escala 100µm.	115
Figura 61 - Teor de argila AFS em função do tempo de oolitização.	116
Figura 62 - Intercepto para avaliação da oolitização com ciclo de 5 minutos.	117
Figura 63 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 15 minutos.	118
Figura 64 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 30 minutos.	118
Figura 65 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 45 minutos.	119
Figura 66 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 60 minutos.	119
Figura 67 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização - areia de retorno.	120
Figura 68 - Resultado após o teste de inchamento dos finos.	122

Figura 69 - Ensaio de adsorção de azul de metileno para os finos. 123

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE	19
2.2 AVALIAÇÃO DO SETOR DE FUNDIÇÃO NO BRASIL.....	21
2.3 MATERIAIS PARA MOLDAGEM EM AREIA A VERDE.....	23
2.3.1 Areia Nova.....	23
2.3.2 Bentonita	27
2.3.3 Água.....	31
2.3.4 Aditivos.....	33
2.4 PROPRIEDADES DO SISTEMA DE AREIA A VERDE	34
2.5 MISTURA DOS COMPONENTES DA AREIA A VERDE	36
2.6 CONSTRUÇÃO DE MODELOS, MACHOS E MOLDES	38
2.7 FUSÃO E VAZAMENTO	43
2.8 DESMOLDAGEM, LIMPEZA E ACABAMENTO	44
2.9 PROCESSO DE OOLITIZAÇÃO	46
2.10 AREIA DE RETORNO.....	47
2.11 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	48
2.12 ANÁLISES ESTATÍSTICAS: UMA BREVE REVISÃO	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 MATERIAIS DE MOLDAGEM UTILIZADOS	56
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	57
3.2.1 Ensaio de Umidade	57
3.2.2 Ensaio Granulométrico.....	59
3.2.3 Sifonamento Manual - Determinação do Teor de Argila AFS.....	61
3.2.4 Determinação da Forma dos Grãos de Areia nova e de Areia de Retorno	63
3.2.5 Determinação do Inchamento de Foster – Bentonita	64
3.2.6 Determinação da Adsorção de Azul de Metileno e Capacidade de Troca Catiônica.....	64
3.2.7 Caracterização do Carvão Mineral Moído.....	66
3.2.8 Determinação da Perda ao Fogo.....	67
3.3 MISTURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE AREIA A VERDE.....	68
3.4 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS E AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE MOLDAGEM.....	70
3.4.1 Determinação da Compactabilidade.....	72
3.4.2 Determinação da Permeabilidade.....	73
3.4.3 Determinação da Dureza	73
3.4.4 Análise Estatística Dos Resultados	74
3.5 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE OOLITIZAÇÃO	75
3.5.1 Análise do Grau de Oolitização	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1 ANÁLISES DAS CARACTERIZAÇÕES REALIZADAS	80
4.1.1 Avaliação da Areia Nova e da Areia de Retorno	80
4.1.2 Análise da Morfologia da Areia Nova e da Areia de Retorno	83
4.1.3 Análise da Bentonita	86

4.1.4 Análises do Pó de Carvão Mineral Moído.....	89
4.1.5 Caracterização do Sistema de Areia de Retorno	90
4.2 PROPRIEDADES DE APLICAÇÃO	91
4.2.1 Avaliação da Compactabilidade, Permeabilidade e Dureza – Areia Nova e Areia de Retorno.....	91
4.2.2 Processo de Oolitização	114
4.2.3 Comportamento do teor de argila AFS das areias de retorno submetidas ao processo de oolitização	115
4.2.4 Avaliação do grau de oolitização	117
4.2.5 Avaliação dos finos recebidos.....	121
5 CONCLUSÃO	125
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS.....	128
APÊNDICE A - DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA.....	135

1 INTRODUÇÃO

A fundição é um dos principais processos para obtenção de componentes metálicos. Seu princípio consiste em preencher com metal líquido e fluidez adequada as cavidades internas dos moldes, que por sua vez definem a forma geométrica dos componentes, seguido pelo processo de solidificação do componente metálico desejado.

Para a constituição dos moldes são utilizados tanto materiais metálicos, quanto cerâmicos. Os moldes metálicos são mais utilizados na produção de componentes não ferrosos por possuírem menores temperaturas de fusão. Já os moldes obtidos por materiais cerâmicos, que são mais refratários, e, permitem obter uma gama maior de componentes metálicos, tanto não ferrosos, quanto metais ferrosos, que possuem temperaturas de fusão mais elevadas. Nesta classe de moldes cerâmicos se enquadra os moldes obtidos pelo processo de moldagem em areia a verde.

Para aplicar um material em um determinado processo, torna-se necessário o conhecimento de suas propriedades, as condições impostas sobre o mesmo e o seu comportamento em serviço. Alguns exemplos de conhecimentos necessários sobre o material dos moldes em areia a verde, segundo Ferreira (2010) são: constituição química, refratariedade, granulometria e morfologia dos grãos, permeabilidade e compactabilidade do molde, teor ideal de umidade, coesão entre aglomerante e areia, plasticidade do sistema e moldabilidade.

A moldagem é a atividade responsável pela construção do molde, com auxílio de modelos, formas, detalhes e dimensões específicas realizadas para receber o metal líquido por vazamento e assim, solidificá-lo da forma presente no molde. O processo de moldagem em areia a verde é um dos processos mais utilizados no ramo de produção de materiais fundidos, pois apresenta boas propriedades térmicas, mecânicas e químicas quando solicitados ao processo de vazamento do metal. Exemplos de propriedades são: a resistência ao desgaste por erosão, a fadiga térmica, a refratariedade e a plasticidade para conformação do molde. Segundo Beeley (2001), a areia a verde é composta pela mistura de quatro componentes, sendo estes exemplificados na Figura 1.

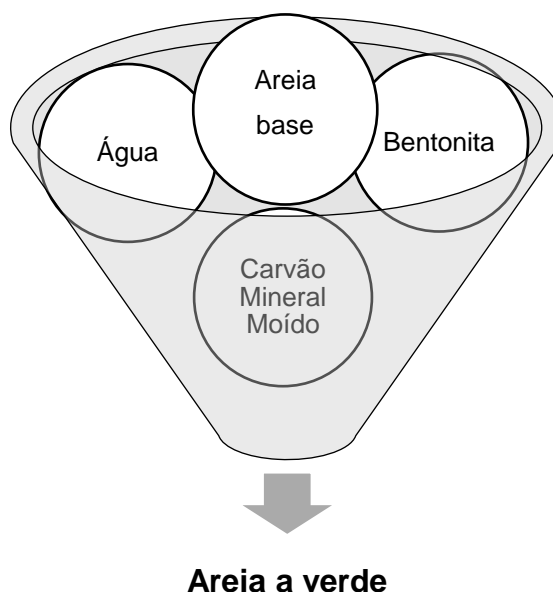


Figura 1 - Materiais que constituem a areia a verde.
Fonte: Adaptado de Brosch, Ré (1995).

A utilização da técnica de moldagem em areia a verde se engloba nos processos de moldagem perdida e modelo permanente, que de forma resumida, significa que após o processo de solidificação da peça metálica, há a quebra do molde de areia construído, também denominado de processo de desmoldagem. Ou seja, todo material compactado na forma, geometria e dimensão estabelecidas pelo modelo permanente utilizado é desfeito e sofre danos causados pela ação de vazamento do metal fundido. Segundo Brondino, Silva e Brondino (2014), os danos adquiridos pelos materiais se acumulam a cada processo de vazamento, devido a inclusões metálicas, oolitização da areia e aumento do teor de finos, responsável pela perda de propriedades necessárias aos materiais de moldagem. Desta forma, torna-se de fundamental importância o conhecimento sobre os níveis de materiais que são adicionados no sistema e suas influências nas propriedades do molde, sendo exemplos a compactabilidade, a permeabilidade e a dureza.

Após um determinado tempo de utilização em ciclos da areia de retorno, os níveis requeridos de adição de aditivos (bentonita e carvão mineral) para recuperação de propriedades aumenta de forma significativa. Quando este comportamento é atingido, origina-se a areia de descarte, caracterizada como resíduo sólido classe IIA – não inertes, segundo a ABNT (2004). Por ser considerado

não inerte, este resíduo torna-se um poluente devido a característica de lixiviação apresentada por ele, podendo então provocar impactos ambientais. Para se ter ideia da quantidade de resíduo descartada, tem-se que o índice médio do consumo de areia para fabricação de peças fundidas, segundo Cetesb (2002), é em torno de 800 a 1000 kg de areia por 1000 kg de peça fundida. Ou seja, quase uma tonelada de resíduo é gerada para produção de uma tonelada de material fundido. As regiões Sul e Sudeste são as responsáveis pela maior geração destes resíduos industriais, sendo 2 milhões de toneladas por ano de areia. Dentre tal teor de areia, segundo Rossetto (2010), há o percentual de cerca de 80% ser proveniente da utilização de areias a verde.

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar os materiais utilizados para moldagem em areia a verde, de forma a se ressaltar a importância dos constituintes deste sistema e o seu desempenho em propriedades quando submetidos aos procedimentos de moldagem. Em adição, foi realizada a verificação da interação entre os aditivos por meio de análises estatísticas, de modo a se ressaltar níveis satisfatórios de matérias-primas para as condições de propriedades de desempenho necessárias, reduzindo assim o problema da geração de defeitos em peças fundidas, aliada a redução do volume de resíduos sólidos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

1. Determinar o módulo AFS (American Foundrymen's Society) da areia nova, da areia de retorno e da bentonita;
2. Determinar o teor de umidade dos materiais do sistema;

3. Determinar a morfologia dos grãos das areias nova e de retorno;
4. Determinar o inchamento da bentonita;
5. Determinar a adsorção de azul de metileno para a bentonita;
6. Determinar o teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo para o carvão mineral moído;
7. Determinar a perda ao fogo da areia nova, areia de retorno e finos;
8. Determinar a compactabilidade, permeabilidade e dureza das areias de moldagem baseadas em sistemas de areia nova e areia de retorno;
9. Determinar a interação e dos efeitos principais dos aditivos em cada sistema;
10. Simular o processo de oolitização;
11. Determinar o teor de argila AFS para os corpos de prova oolitizados;
12. Avaliar o teor de grãos oolíticos nas areias nova e de retorno.

1.3 JUSTIFICATIVA

De modo conjunto ao apresentado na introdução, a realização deste trabalho teve como foco a obtenção do conhecimento de propriedades técnicas necessárias para o controle do processo de moldagem em areia a verde.

Foi realizada a investigação das propriedades desempenhadas em níveis de aditivos aplicados atualmente nas empresas, de modo a avaliar a interação entre os aditivos no sistema de moldagem e a identificação dos efeitos principais nas propriedades de aplicação, os quais permitem a obtenção de controle de qualidade e de custo do processo, devido a adição de materiais em teores adequados.

Como citado, um dos problemas da moldagem em areia a verde é a geração de resíduos sólidos. Em conjunto a obtenção dos teores adequados de matérias primas, foi exposto um modelo de investigação e controle de processo que pode ser aplicado as empresas, com o intuito de se tornar possível a redução da areia de descarte, além de permitir a identificação de fontes possíveis de materiais com alto potencial de reutilização, como os teores de argila e carvão presentes nos finos, sendo este material uma possível fonte de renda e de construção de parcerias com empresas de diversos ramos, como a ceramista.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE

O processo de fundição pode ser definido como um conjunto sequencial de atividades que por meio da aplicação de tecnologia, permite a obtenção de peças metálicas. Segundo Alves (2012), a indústria de fundição pode ser dividida em duas categorias, sendo elas ferrosas e não ferrosas. O processo de fundição, segundo Ferreira (2010), divide-se em basicamente três partes, sendo elas a confecção de modelos, que podem ser permanentes ou perdidos, a confecção de moldes, divididos da mesma forma dos modelos, e a etapa de vazamento, o qual permite com que o fundido penetre todas as cavidades presentes no molde, originando a peça desejada. Entretanto, no caso da utilização da moldagem por areia, caracterizada como moldagem perdida e modelo permanente, ocorre a geração de um volume muito alto de resíduos sólidos, como finos e a areia, sendo a areia descartada de fundição o principal deles. Segundo Hermenegildo (2011), o processo de moldagem em fundição mais tradicional empregado no Brasil é o de moldagem em areia a verde, sendo este o tema principal deste trabalho.

Assim como outros processos de fabricação e conformação de materiais, temos alguns fatores que devem ser considerados devido à influência na produção de peças. Segundo Neto (2004), alguns fatores que influenciam o projeto de peças fundidas são: a fluidez, contração, resistência a quente, características geométricas e o acabamento superficial, sendo estes inteiramente relacionados ao controle de qualidade empregado no processo.

A Figura 2 representa um fluxograma adaptado de Alves (2012) *apud* Oliveira et al. (2005), que representa o processo de fundição em indústrias que utilizam a moldagem em areia a verde.

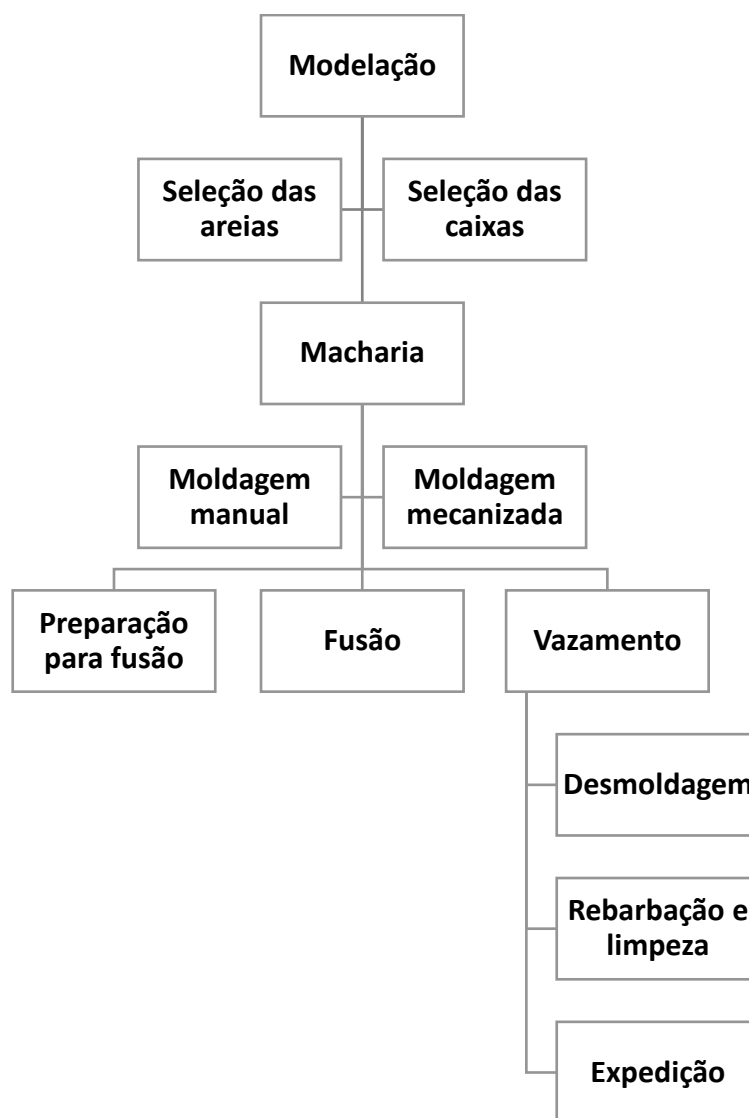


Figura 2 - Fluxograma do processo de fundição em areia a verde
Fonte: Adaptado de Alves (2012) *apud* Oliveira et al. (2005).

Este processo, assim como todos outros, possui vantagens e desvantagens. Sua vantagem principal é o baixo custo aplicado a moldagem, acompanhada de facilidade de desmoldagem e de limpeza. Já algumas desvantagens são a restrição a fusão de peças muito grandes, devido a limitação das propriedades mecânicas do molde. É de suma importância ressaltar que a variação na natureza do metal que será vazado também irá variar o percentual de materiais que devem ser adicionados no sistema, como o percentual de bentonita, de água e de carvão. Ambas as etapas serão citadas nos próximos itens.

2.2 AVALIAÇÃO DO SETOR DE FUNDIÇÃO NO BRASIL

O setor de fundição brasileiro abrange a produção de todos os tipos de metais, sendo classificados em três principais categorias: ferro, aço e não ferrosos. O Brasil ocupa a 7ª posição mundial do ranking de produtores de peças fundidas, sendo os principais produtores mundiais a China e Estados Unidos. Segundo a Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (2014), a média da produção total destas classes nos três últimos anos ficou entre 2,89 milhões de toneladas. A Figura 3 representa a produção de fundidos no Brasil relacionando dois períodos, sendo eles de janeiro a julho de 2014 e 2015, respectivamente.



Figura 3 - Produção de fundidos no Brasil entre janeiro e julho de 2014 e 2015
Fonte: Adaptado de Abifa (2014) e Abifa (2015).

A Figura 4 representa o destino das exportações de peças fundidas em percentual para os grupos econômicos internacionais. Com base nos dados representados pelas referências ABIFA (2012), ABIFA (2013) e ABIFA (2014), temos uma média representativa de cerca de 1,27 bilhões de dólares injetados na economia brasileira nos últimos três anos.

Destino das exportações

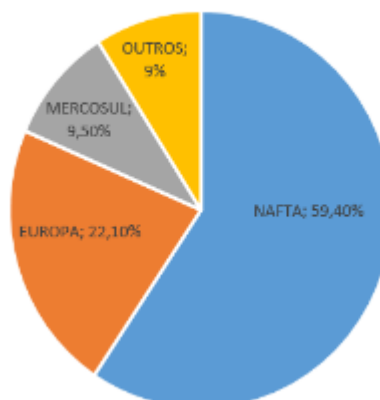


Figura 4 - Destino das exportações dos fundidos produzidos no Brasil
 Fonte: Adaptado de Brichesi (2009).

De forma paralela a este dado de exportação, temos também a questão do número de empregos envolvidos no setor de fundidos do país. Com base nos dados de ABIFA (2012), ABIFA (2013), ABIFA (2014) e ABIFA (2015), temos um valor médio de cerca de 61,3 mil pessoas empregadas nos últimos quatro anos.

Outros setores presentes no Brasil demandam materiais fundidos para sua cadeia, como é o caso representado na Figura 5, na qual representa os principais setores que necessitam utilizar materiais fundidos dentro de seu processo produtivo.

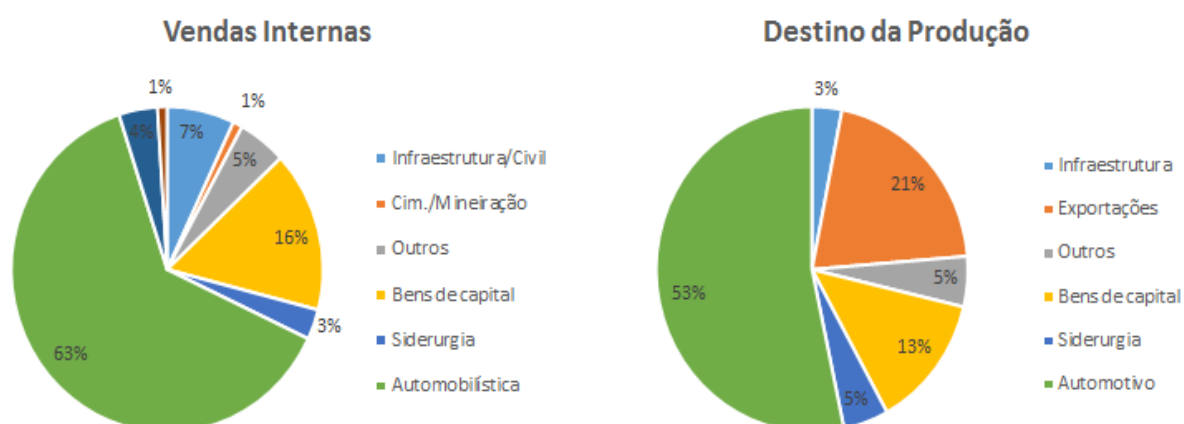


Figura 5 - Destino da produção e de vendas internas dos fundidos brasileiros
 Fonte: Adaptado de Brichesi (2009).

2.3 MATERIAIS PARA MOLDAGEM EM AREIA A VERDE

Os materiais para moldagem em areia a verde são de fundamental importância para a técnica de moldagem, pois são os responsáveis pelo desempenho de propriedades necessárias ao conjunto dos moldes. A moldagem em areia a verde continua sendo, atualmente, um processo largamente utilizado, devido ao seu baixo custo e alta produção. A areia a verde consiste de uma mistura heterogênea de materiais, que constroem o molde monolítico refratário. Essa mistura, segundo Brosch e Ré (1995), é realizada basicamente pela adição de areia nova (comumente a sílica), aglomerante (argilas bentoníticas naturais ou aditivadas), aditivos que suprem certas necessidades do molde (carvão mineral moído), além da adição da água, responsável pelo controle de umidade que auxilia a plasticidade necessária para a areia a ser compactada.

Esses materiais de moldagem passam por cerca de quatro estágios de produção, sendo: (i) preparação e distribuição; (ii) produção do molde e núcleo, (iii) fundição e (iv) desmoldagem. Cada tipo de fundição possui necessidades específicas de propriedades dos materiais de moldagem, sendo elas determinadas pela condição imposta pelo processo. Algumas dessas propriedades desejadas na moldagem são a resistência a verde e a fluidez, sendo a fluidez responsável pela compactabilidade dos materiais com densidade uniforme ideal para o processo. Já a resistência a verde, baseado em Baumer (2004), é responsável por manter a forma do molde sem que ocorra distorção ou quebra de regiões por meio de solicitações realizadas na peça. Os quatro constituintes da areia a verde são detalhados nos tópicos seguintes.

2.3.1 Areia Nova

A areia nova é um material granular refratário, sendo este o principal constituinte da areia a verde. Segundo Rego (2005), seu objetivo é resistir as solicitações impostas sobre ela, de natureza térmica, mecânica e química. Sua forma de obtenção, segundo Alves (2015), é dada pela extração a céu aberto em leitos de

rios ou barrancos, passadas por processo de lavagem utilizando soda cáustica, o qual tem como objetivo a separação das impurezas agregadas nos materiais extraídos, como argila, óxido de ferro entre outras impurezas, que por meio de filtração, são separadas da areia a base de sílica.

A areia de sílica é a mais utilizada para moldagem em areia a verde, devido a seu baixo custo quando comparadas a de olivina ou zircônia. A sílica possui tanto a fase amorfa quanto a fase cristalina. Além disto, ela apresenta também o comportamento de polimorfismo. Segundo Ferreira (2010), este polimorfismo é responsável pela expansão térmica linear, devido a transição entre a fase quartzo- α para fase quartzo- β em temperaturas aproximadamente de 573 °C. Deve-se ressaltar que a expansão térmica citada ocorre de forma reversível até a temperatura de 867 °C, não sendo mais reversível em temperaturas superiores, devido a modificação da estrutura do quartzo. A Figura 6 representa a expansão térmica da sílica comparada a outros tipos de areias. Segundo Ferreira (2010), com o coeficiente linear de expansão térmica elevado, diversos defeitos de fundição podem ser desenvolvidos como crostas superficiais e nervuras. Quanto ao seu uso, tanto as areias novas quanto as usadas fazem parte do sistema de moldagem a verde, sendo necessário controles sobre as propriedades que estas devem desempenhar, que serão discutidas posteriormente.

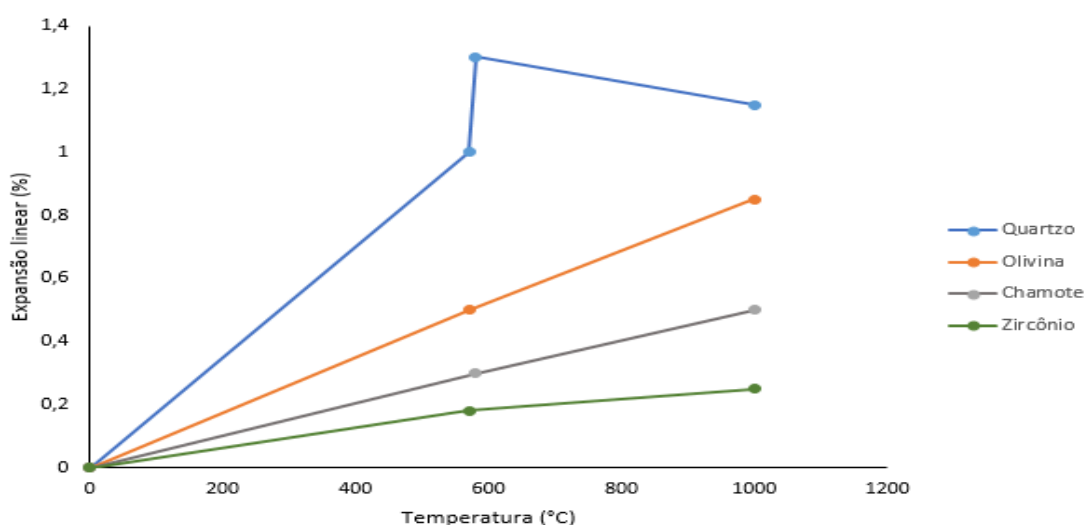


Figura 6 - Expansão térmica da sílica comparada a outros tipos de areia
Fonte: Adaptado de Ferreira (2010).

Sobre a parte de aplicação, temos que, segundo Romanus (2013), as areias de faceamento são as areias da superfície que entram em contato direto com o modelo e ficam expostas aos canais de vazamento, com a função de receber e suportar as condições impostas pelo metal fundido. Já as areias de enchimento são as areias que completam o preenchimento da caixa de moldagem, não sendo necessária a qualidade elevada de uma areia de faceamento.

Quanto ao teor de umidade, temos que, segundo Brosch e Ré (1995), a areia é denominada verde devido a adição de água ao sistema, sendo um componente que se mantém até a etapa de moldagem. Já os outros teores de umidade que denominam as chamadas areia estufada e seca também são relacionados ao processo que a areia sofreu de secagem anteriormente a etapa de moldagem, sendo expostas a secagem por estufa, chama ou até mesmo ao ar.

Segundo Brown (2000), as areias base são caracterizadas de acordo com sua composição química, granulometria e forma de grãos que a constituem. A distribuição granulométrica das areias é de fundamental importância por conta do acabamento superficial da peça fundida. Areias consideradas grosseiras, ou de maior tamanho médio de grãos, possuem módulo inferior a 50 AFS (abreviação de American Foundrymen's Society, associação responsável pelo controle eficaz de produção de peças fundidas dos Estados Unidos da América). Já as areias consideradas médias, entre 60 e 70 AFS, enquanto argilas com módulos superiores a 80 AFS, finas. Quanto maiores os grãos da areia, maior será a penetração do material fundido. Se a penetração do fundido é maior, maior será a irregularidade superficial da peça, produzindo assim, peças com superfícies grosseiras. De forma contrária, quanto mais fino forem os grãos, melhor será o acabamento da peça, devido a menor penetração do fundido e a maior distribuição regular quando o líquido é vazado no molde. Entretanto, no caso de grãos finos, há a queda de permeabilidade que favorece a formação de defeitos difusionais provocados pelos gases presentes.

Certas peculiaridades devem aqui ser tomadas, pois o processo de diminuição granulométrica pode aumentar consideravelmente o custo para o fabricante, acompanhada da necessidade de percentuais maiores de ligantes, sendo as vezes desnecessárias para o tipo de peça que se deseja fabricar.

De acordo com Brown (2000), a distribuição ideal se encontra na faixa de 50-60 AFS, que equivale a um tamanho médio de grãos de 220 a 250 μm . A sigla

AFS, neste caso, indica o módulo de finura dos grãos de areia presentes, por meio da relação de número de aberturas por polegada de peneiras empregadas na classificação granulométrica da areia. A Tabela 1 apresenta alguns valores que relacionam o número AFS com a média do tamanho de grão presente.

Tabela 1 - Módulo AFS e tamanho médio de grão

Nº AFS (Finura)	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90
Tamanho de grão médio (μm)	390	340	300	280	240	220	210	195	170	150

Fonte: Adaptado de Brown (2000).

De forma conjunta a granulometria da areia, as formas dos grãos da mesma devem possuir certa regularidade para que ocorra um empacotamento eficaz do conjunto. Segundo Brown (2000), são encontrados seis tipos de forma de grãos, sendo eles definidos pela angulação ou por sua esfericidade (medida do afastamento da forma esférica). Em relação à angulação, estão presentes os tipos: muito angulares, angulares, sub-angulares, sub-redondos, redondos e muito redondos, demonstrados na ordem de 1 a 6 na Figura 7. Já a esfericidade varia entre baixa, média e alta, representada de 1 a 3. A combinação entre as duas características define a forma final do grão. Por exemplo, 4-2 representa um grão sub-redondo e de esfericidade média.

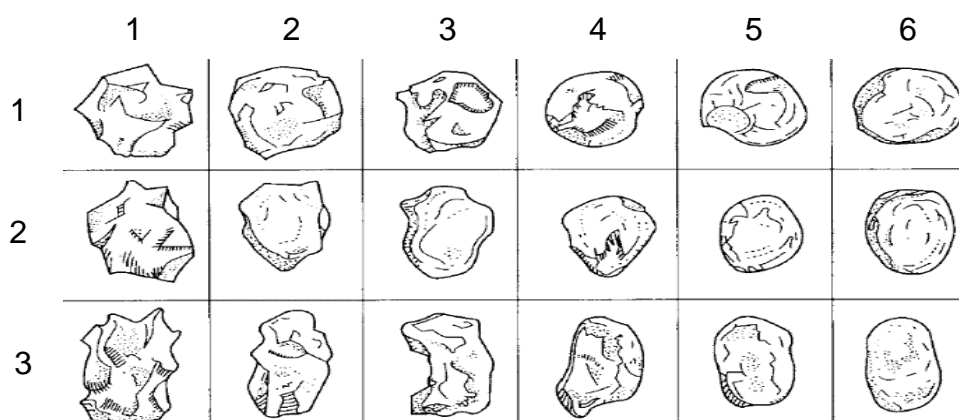


Figura 7 - Distribuição da forma dos grãos
Fonte: Brown (2000).

A diferença entre a distribuição das formas dos grãos reflete diretamente na quantidade de aglomerante bentonita para cobertura dos grãos de areia do sistema, além de propriedades como permeabilidade, densidade, dilatações e contrações, conforme especificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Forma dos grãos e efeitos nas propriedades

Forma dos grãos	Efeito nas propriedades
Alta esfericidade	Menor quantia de aglomerante para promover a camada de coesão necessária entre argila-areia
Angulares	Baixa densidade e alta permeabilidade, além do maior consumo de aglomerante
Sub-angulares	Absorvem melhor dilatações e contrações de areia, porém possuem baixa permeabilidade e media densidade

Fonte: Adaptado de Alves (2015).

Essa distribuição granulométrica e forma de grãos geram propriedades como a permeabilidade adequada ao sistema de areia a verde. Porém, devido a granulometria grosseira (50/60 AFS) leva ao pior aspecto superficial da peça. Além disso, segundo Romanus (2013), tem-se o problema de erosão metal/molde, devido ao refugo por inclusões de areia, gerando defeitos de peças por arraste de areia. A areia que será analisada foi fornecida por uma empresa de fundição da região de São Carlos.

2.3.2 Bentonita

A bentonita é definida como uma rocha constituída de silicato de alumínio hidratado, também conhecido como argilomineral montmorilonítico. Segundo Silva (2011), sua formação é decorrente da desvitrificação e da alteração química vítrea, de origem ígnea, sendo o tufo (conjunto de rochas de baixa densidade e desagregáveis) ou cinza vulcânica. Segundo Carnin (2008), dentre essa definição,

ela pode conter teores de sílica e de outras impurezas, como os fundentes, em teores comumente menores que 10%. A estrutura montmorilonítica, constituída pela fórmula química $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ possui partículas de tamanhos pequenos variando de 0,1 μm até 2 μm , dispersas em formatos de camadas em sua estrutura. Sua disposição estrutural é disposta da forma de aspecto 2:1 (duas folhas tetraédricas de sílica com uma folha octaédrica de hidróxido de alumínio), característico de argilas esmectíticas, forma tecnológica de denominar as bentonitas, de acordo com Silva (2011). A estrutura é composta por folhas tetraédricas de sílica com uma folha octaédrica de hidróxido de alumínio, sendo o oxigênio o responsável pela ligação entre as folhas. As placas dessa estrutura são comumente irregulares e seu empilhamento é devido a forças polares fracas, além da força de van der Waals. Segundo Silva e Ferreira (2008), algumas lacunas também são encontradas e denominadas de camadas internas nas quais permitem a troca catiônica de elementos como o Na^+ e o Ca^{2+} , possibilitando a formação da bentonita sódica e cálcica, respectivamente.

Algumas propriedades apresentadas pela bentonita são: elevada área superficial, alta capacidade de troca catiônica, finura de partículas e inchamento de camadas em presença de água. Segundo Carnin (2008) *apud* Luz et al. (2004), a propriedade de afastamento entre camadas depende diretamente de fatores como a natureza do cátion interplanar, natureza dos sítios de carga e da presença de contaminantes como substâncias orgânicas e sais solúveis. Normalmente, a avaliação desta propriedade é dada de forma primordial ao tipo de cátion presente, classificando as bentonitas em sódica e cálcica.

A bentonita sódica, em que o íon principal de sua estrutura é o sódio, são bentonitas caracterizadas pelo processo de inchamento. Tal característica é demonstrada pelo aumento de até 20 vezes em volume da argila seca quando comparadas a argila imersa em água. Segundo Carnin (2008), isso ocorre devido a hidratação dos cátions sódicos intercalados em sua estrutura, que por serem de menor valência, apresentam-se afastados devido à baixa energia de interação, permitindo então a penetração de água em sua estrutura.

O processo de inchamento da estrutura desta argila ocorre devido a exposição da mesma a água, nos quais a superfície da folha de sílica adsorve as moléculas de água, separando suas camadas umas das outras, caracterizando o

processo de inchamento de Foster, aumentando seu espaço interplanar para até 100 Å.

Além disso, segundo Schramm (1998), a bentonita sódica possui tixotropia, propriedade definida pela capacidade de reestruturação de uma substância quando permanecida em repouso (solução dispersa para forma de um gel) em um determinado período de tempo, sem a ação de tensão cisalhante. O processo depende da natureza catiônica presente, podendo ter um inchamento muito maior quando utilizada os íons Na^+ (sódico) do que os Ca^{2+} (cálcico) devido a força de atração entre as camadas, sendo esta maior na presença de íons cálcicos, o que então limita a adsorção das moléculas de água em sua estrutura, diminuindo o processo de inchamento e, portanto, a deformação plástica da mesma, de acordo com Beeley (2001).

A bentonita cálcica, de acordo com Carnin (2008), caracterizada como bentonita de não inchamento em água, possui de forma predominante a presença dos cátions Ca^{2+} , além de não possuir tixotropia como a sódica. A aditivação de argilas cálcicas corresponde ao processo de desintegração, adição de barrilha (Na_2CO_3) em 2,5 a 3% em massa, homogeneização, conformação, cura, secagem, moagem, classificação e ensacamento. Após o procedimento de homogeneização e transporte, ocorre o processo de umidificação da argila junto a barrilha, de modo a aditivá-la com os íons sódicos, aumentando assim, sua capacidade de inchamento entre as camadas.

Para avaliação da capacidade de troca de íons da bentonita, usa-se o ensaio de absorção de azul de metileno, cujo princípio está na capacidade de troca catiônica entre os íons presentes no corante (azul de metileno) com os íons presentes nas camadas de bentonita. Segundo Oliveira e Duarte (2011), este ensaio indica a quantidade de montmorilonita presentes nas bentonitas e nas areias de retorno.

A bentonita é o principal aglomerante do processo de mistura de areia a verde, responsável pela coesão entre areia-argila quando presente junto com a água. Segundo Carnin (2008), as características obtidas pela adição de argila são escoabilidade, consistência e plasticidade, responsáveis pela ótima compactibilidade dos moldes de areia a verde, consistindo no correto dimensionamento, junto a resistência da coesão exercida que não permite o rompimento entre materiais durante o processo de vazamento. De acordo com Miksovsky e Lichy (2008), existem diferenças entre as águas nos quais as estruturas bentoníticas são expostas, sendo

água de adição e água de constituição. A primeira é a adicionada na massa de areia no misturador, que se aloja nas estruturas montmoriloníticas e assim, promovem o inchamento entre camadas. Já as águas de constituição correspondem as da estrutura bentoníticas sob a forma de hidroxilas (OH), nos quais ao sofrerem temperaturas superiores a 380°C, promovem a sua liberação e perda de propriedades como plasticidade e coesão. Tal perda de água é irreversível, diferente da água de adição. Nos processos de fundição, temperaturas comumente chegam a 1000 °C e ocasionam a transformação da estrutura da argila em uma estrutura cerâmica amorfa. Algumas outras propriedades da bentonita estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades da estrutura da argila bentonítica

PROPRIEDADE	CARACTERÍSTICA
Capacidade de troca de cátions	80 a 150 mEq / 100g de montmorilonita
Área superficial	800 m ² /g
Umidade (%)	8-13 %
Resistência a temperatura (°C)	500 à 600
Inchamento (ml/2g)	35 – 50
Adsorção de azul de metileno	Mínimo de 50 ml
Resistência à compressão a verde	Mínimo de 12 N/cm ²
Resistência a tração a úmido	Mínimo de 0,30 N/cm ²

Fonte: Adaptado de Silva e Ferreira (2008) e Romanus (2014).

Apesar das vantagens apresentadas, a bentonita é um material não permanente, devendo então ser adicionada em cada ciclo de fundição, de forma a se restaurar as propriedades citadas para a areia de moldagem. Os teores de adição de argila variam de acordo com o tipo de peças que são fabricadas, sendo estes apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Teores de adição de argila para moldagem em areia a verde

Material	Teor de argila adicionado
Aço	7 a 9%
Ferros Fundidos	6 a 8%

Fonte: Adaptado de Romanus (2013).

Outros autores, sendo Neto (2004) um deles, citam teores diferentes de argila presentes na areia de moldagem, que variam entre 8% até 15%, dependendo do tipo de peça de aço e ferro fundido a ser produzida.

2.3.3 Água

A água é um item importante na areia a verde, pois é ela que confere a distribuição de umidade no sistema, afetando principalmente propriedades como plasticidade, consistência e compactibilidade. Problemas podem ser encontrados com a coesão entre partículas de areia e argila, devido à ação de íons presentes na composição química da água (íons atraem as moléculas de água e conseqüentemente, reduz o nível livre de água para a bentonita), que atuam na estrutura da bentonita, levando a deficiência de seu comportamento de inchamento e promoção de ligação entre os grãos arenosos e bentoníticos, conforme demonstrado pela Figura 8.

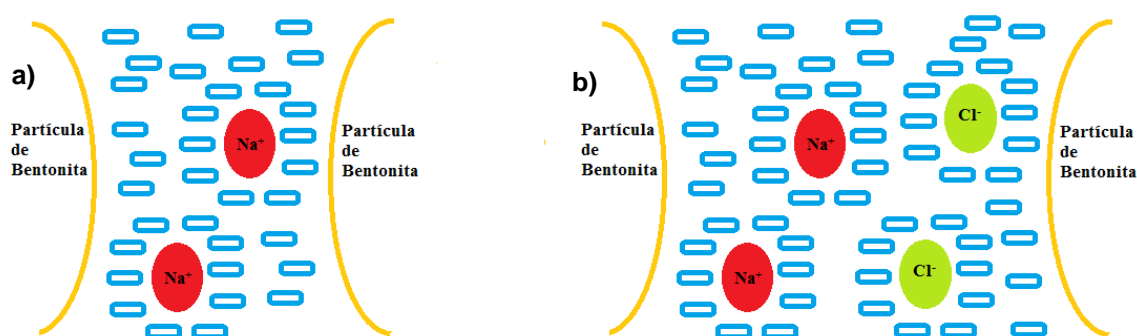


Figura 8 - Ação de íons externos presentes na mistura de água e bentonita

Fonte: Adaptado de Ittipon (2011).

Desta forma, de acordo com Romanus (2014), restringe-se o uso de água em concentrações de até 100mg/L de íons que promovem a troca de cátions com a bentonita, pois em concentrações maiores, torna-se necessário a adição de maiores teores de água, promovendo um aumento do uso de matérias primas, como a bentonita e o carvão, permitindo condições para o surgimento de defeitos de moldagem.

A Tabela 5 apresenta o comportamento dos moldes de areia a verde correlacionando a presença ou ausência de água.

Tabela 5 - Adição de água no comportamento da areia a verde

Adição de água	Comportamento
Deficiência	Defeitos em moldes por trincamento e quebras, levando a defeitos em peças como erosão e inclusão de areia.
Excesso	Muito teor de água livre, aumenta compactibilidade e leva a geração maior de gases, tornando a peça mais susceptível a defeitos, como as bolhas de gás.
Adequado	Adequa a compactibilidade. Depende do teor de argila adicionada, tamanho, formato e densidade da areia utilizada, além da temperatura de adição.

Fonte: Adaptado de Baumer (2004).

Alguns exemplos de defeitos produzidos nas peças devido a este teor de água são as bolhas de gás, penetração por explosão e a penetração metálica. As duas primeiras estão representadas na Figura 9.

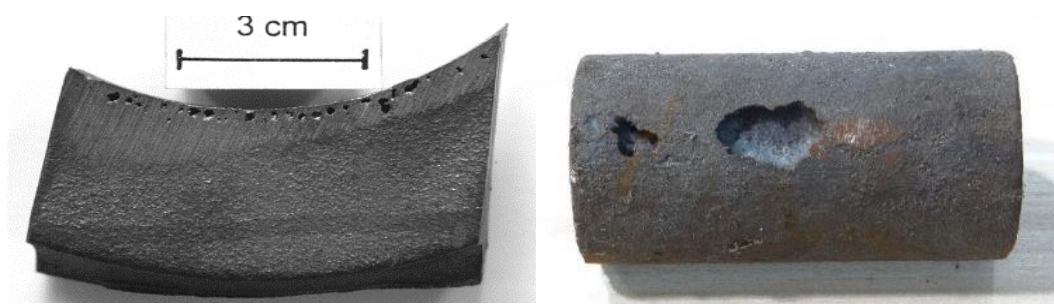


Figura 9 - Defeito de bolhas de gás (esquerda) e explosão (direita)
Fonte: Lexicon (2015) e Efoundry (2015).

2.3.4 Aditivos

Os aditivos são materiais adicionados ao sistema de areia a verde para aumentar certos requisitos necessários ao sistema, como suportar a expansão térmica da areia, aumentar a trabalhabilidade, evitar sinterização da areia, aumentar a qualidade superficial e prevenção de penetração de fundido.

O carvão mineral moído é o principal aditivo adicionado ao sistema de mistura de areia a verde para obtenção de uma atmosfera de redução, na qual protegerá o metal da oxidação. Segundo Beeley (2001), além dessa característica, a adição deste tipo de carvão promoverá a melhoria da qualidade superficial de peças que serão fundidas nos moldes de areia. Isso ocorre devido a volatilização e deposição de uma camada de carbono na areia de faceamento, o que promove um certo aspecto brilhoso ao molde. Comumente, são adicionados entre 3% a 8% em massa, dependendo da magnitude da fundição.

O tamanho das partículas de carvão influenciará na mistura com a massa de areia. Quanto mais fino for o pó, maior será a mistura. Cuidados com a permeabilidade devem ser tomados para que essa propriedade não decresça de forma acentuada, prejudicando a fundição. De acordo com Biolo (2005), sua adição ao sistema de moldagem a verde consiste, principalmente, para redução da expansão térmica da sílica já citada, para facilitar a limpeza da peça fundida, além de evitar a penetração do fundido no molde e reduzir defeitos. Algumas características importantes desse carvão são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características de composição do carvão mineral moído

PROPRIEDADES	PERCENTUAIS (em massa)
Percentual de voláteis	33-36%
Cinzas	Menos que 5%
Carbono fixado	50-54%
Enxofre	Menos que 1%
Cloro	Menos que 0,03%
Tamanho	75 – 100 AFS

Fonte: Turkeli (2009).

2.4 PROPRIEDADES DO SISTEMA DE AREIA A VERDE

As propriedades do sistema de areia a verde são fundamentais para o desenvolvimento das etapas de moldagem e vazamento, pois sem a presença delas, não seria possível dar a forma nem para o molde necessário, nem como resistir as altas temperaturas solicitadas em atividade de vazamento. De acordo com os autores Brosch e Ré (1995), Ferreira (2010) e Baumer (2004), temos que as principais propriedades são:

- **Plasticidade e consistência:** são propriedades responsáveis pela sustentação e moldabilidade por meio de forças externas aplicadas. A plasticidade é a capacidade de deformação plástica da bentonita no sistema, enquanto a consistência a coerência entre os grãos de areia, ligantes e aditivos no sistema, garantindo a estabilidade e ligação entre esses grãos;

- **Compactabilidade:** diretamente ligada a escoabilidade da areia, pois esta propriedade está relacionada com a compactação realizada sob a superfície do modelo, adentrando a propriedade de plasticidade do sistema, além da necessidade da distribuição de forma e tamanho de partículas que alteram diretamente a propriedade. Esta propriedade atinge um valor máximo que varia entre 45 e 55%, com a adição de teores controlados de bentonita e água.

- **Dureza:** é a propriedade responsável pela não deformação superficial dos moldes em detrimento a erosão causada pelo processo de vazamento do metal;

- **Resistência:** propriedade de resistir a deformação do molde em processos de transporte, vazamento e peso da peça vazada. É dividida em resistência à compressão a verde e resistência à tração a úmido, sendo que a primeira é correspondente a resistência a não deformação durante a extração do modelo e durante o vazamento do metal, enquanto a última correspondente a resistência na camada de condensação de água, responsável pela força de adesão da camada de areia, garantindo então a estabilidade térmica e superfície ativa da bentonita.

- **Permeabilidade:** capacidade de permitir ou aprisionar a passagem de gases e ar entre os grãos do sistema, de modo a não se aglomerarem sob a peça

fundida. A permeabilidade também está diretamente ligada a presença de substâncias formadores de gases, pois quanto maior for este teor, maior o volume de gás produzido, o que dificulta a liberação entre os grãos de areia compactados no molde. Depende diretamente da granulometria e do teor de finos, sendo maior a permeabilidade quanto maior a granulometria e menor a permeabilidade com o aumento do teor de finos;

- Refratariedade: resistência necessária contra a fusão ou excesso de amolecimento do material, de modo que este suporte as solicitações dos metais fundidos sob pressão em sua face; tem-se casos que ocorre o amolecimento de materiais aditivos, prevenindo assim a expansão da sílica demonstrada anteriormente; comumente, deseja-se que as areias estejam livres de partículas de baixo ponto de fusão e estabilidade térmica. Estas partículas de baixo ponto de fusão, como o carbonato de cálcio, óxido de ferro podem se combinar com a sílica e argila, gerando o processo de oolitização, que corresponde ao processo de sinterização dos aditivos e finos nas superfícies dos grãos de SiO_2 ;

- Umidade: variável importante na mistura de areia a verde, pois regula o teor necessário de adição de água que dependerá do tamanho de grão médio de areia e do teor de argila ativa. Ela possui direta relação com a compactibilidade, devido ao efeito plastificante que a água exerce sobre a argila. Portanto, seu teor deve ser controlado de forma a se obter a compactibilidade ideal do sistema. Ela é responsável pelo surgimento de defeitos superficiais, devido ao baixo grau de mistura ou falta de areia no sistema;

- Variação dimensional: propriedade que podem levar a geração de problemas para o sistema, pois, devido à presença de calor, ocorrem alterações dimensionais como expansão e contração, que podem levar a fraturas nos grãos arenosos, levando a ocorrência de irregularidade superficial na região de faceamento. Quanto maior for a estabilidade dimensional da areia, melhor será o controle dimensional do molde e peça.

- Colapsibilidade: é a capacidade de resistência da areia em suportar o vazamento do metal líquido sem que ocorra deformação arenosa, de modo a se evitar surgimento de defeitos em peças.

2.5 MISTURA DOS COMPONENTES DA AREIA A VERDE

O procedimento de mistura dos componentes da areia a verde deve ser considerado como primordial para obtenção de moldes de areia a verde, pois é nesta etapa que serão definidas as propriedades necessárias para exercer a resistência as condições que o molde será exposto.

Essas areias são depositadas em equipamentos denominados de misturadores que exercerão condições de cargas que realizaram a mistura dos componentes, sendo compressão e cisalhamento as principais solicitações realizadas nestas máquinas. Os equipamentos básicos, porém, mais utilizados nesta etapa, são os misturadores com mós verticais e horizontais, além dos agitadores de alta rotação. Alguns modelos são encontrados no mercado e atendem os diversos tipos e tamanhos de fundição. Estes modelos são exemplos de misturadores do tipo Muller, divididos em: Mix-Muller, SpeedMullor e Multi-Mull, ambos da empresa Simpson Technologies, representados na Figura 10. As características principais destes misturadores estão apresentadas na Tabela 7.



Figura 10 - Misturadores MixMuller, SpeedMullor e Multi-Mull
Fonte: (SIMPSON TECHNOLOGIES, 22 p.)

Tabela 7 - Tipos de misturadores do sistema de areia a verde.

Misturador	Operação de mistura	Aplicação
Mix-Muller	Média velocidade de mistura e alta intensidade de batelada, mó vertical em molas, que exercem pressão de acordo com o volume	Preparação de areia de empresas de pequeno e médio porte. Capacidade de batelada variando de 20 a 3810 quilogramas
SpeedMullor	Alta velocidade e alta intensidade de mistura e batelada, mós horizontais	Preparação de areia para empresas de médio a grande porte. Capacidade de batelada variando de 20 até 3400 quilogramas
Multi-Mull	Misturador de média velocidade e alta intensidade, com operação contínua em ferramentas contra-rotativas de mistura	Fundições de grande porte que utilizam alto volume de areia e trabalham em operações contínuas. Capacidade de retenção variando entre 15 e 10200 quilogramas

Fonte: Adaptado de Simpson Technologies (2015).

Algumas variáveis devem ser levadas em conta nesta etapa, sendo elas: tempo de mistura, ordem de adição de matéria-prima, carga imposta pelo misturador e a condição física exposta pelo misturador. O tempo é ligado de forma direta a resistência da mistura. Quanto maior o tempo, maior a mistura. Entretanto, caso atinja o excesso de tempo, ocorre a perda de mistura devido à ação do atrito entre os grãos, causando descoesão e conseqüente perda de constituintes. Então, de acordo com Beeley (2001), a resistência obtida ao sistema dependerá do tempo e da eficiência de mistura, sendo a resistência maior quanto maior for a eficiência de mistura. A ordem de adição é realizada de forma a se obter uma distribuição adequada dos componentes sobre cada grão de areia, o que aumenta suas propriedades de compactibilidade, plasticidade e resistência, que são necessárias para a moldagem. A ordem de adição de matéria-prima, de acordo com Baumer (2004), são:

- Areia de retorno e/ou areia base;
- 50% da água necessária;
- Argila e outros aditivos;

- Restante da água necessária;

Uma mistura eficiente é decorrente da obtenção de uma areia preparada de forma adequada, que resultará na minimização de problemas de solicitações de propriedades do molde nas etapas de moldagem em areia a verde. De acordo com Baumer (2004), quando este processamento não é adequado, produzimos areias com baixa resistência mecânica, baixa acomodação para combater a expansão térmica dos grãos e alta formação de argila latente, denominada como argila não aglomerada aos grãos de areia. Segundo Romanus (2013), a queda de propriedades como resistência a compressão a verde, resistência à tração a úmido, plasticidade e permeabilidade leva a geração de defeitos nas peças vazadas, como bolhas de gás, penetração por explosão, defeitos de porosidade tipo agulha, variação dimensional, sinterização da areia, penetração metálica e reações químicas entre metal-molde. A Figura 11 representa alguns defeitos de peças, citados na legenda.

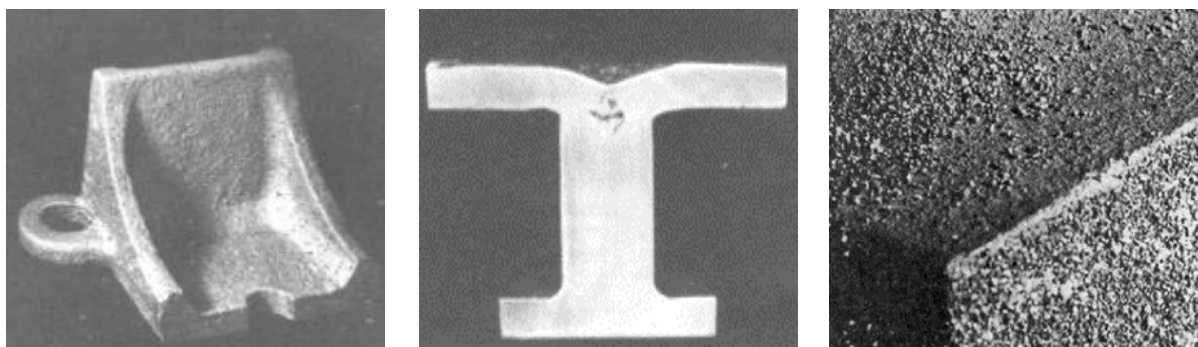


Figura 11 - Defeitos comuns: pinhole, contração da peça e sinterização
Fonte: Beeley (2010).

2.6 CONSTRUÇÃO DE MODELOS, MACHOS E MOLDES

A etapa de confecção dos moldes é primordial para uma fundição de qualidade. Ela irá englobar todas as etapas necessárias para garantir que a peça sairá de forma próxima ao formato final, denominadas de peças *near net shape*, junto a precisão de dimensões necessárias das peças. Para construção de moldes são

necessárias cerca de três operações: confecção de modelos, confecção de moldes e confecção dos machos, as quais envolvem o uso de mão-de-obra qualificada e matéria-prima adequada. Segundo Brosch e Ré (1995), o tempo de trabalho em cima do preparo desta etapa é cerca de 20 vezes maior do que o tempo gasto com o preparo do metal, o que explicita a importância do controle de matéria-prima e do uso de mão de obra qualificada, para evitar a perda de todo o trabalho realizado. Esta etapa pode ser realizada tanto pela própria fundição quanto por parceiros terceirizados.

A fabricação de modelos é a primeira etapa a ser realizada deste item. Os modelos são réplicas que geram a impressão da forma desejada da peça na areia, quando esta é compactada no processo de criação de moldes. Para a etapa de modelagem, são utilizados alguns tipos de materiais para construção dos modelos, sendo eles apresentados na Tabela 8 e a vida útil dos mesmos na etapa de modelagem. Dentre estes modelos, existem os bipartidos, representados nas Figura 12 junto ao processo de fundição em moldes bipartidos, que utilizam estes modelos. Existem também modelos maciços, aplicados de forma direta no molde para confecção da forma da peça.

Tabela 8 - Durabilidade estimada de modelos em função dos materiais

Material	Nº de moldes
Madeira	200 – 300
Madeira reforçada com metal	1500 – 2500
Alumínio/resina epóxi	5500 – 6500
Ferro fundido/aço	90000 – 100000

Fonte: Nunes (1988).

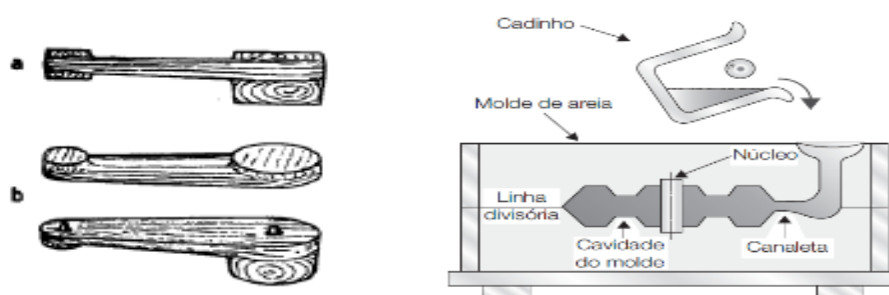


Figura 12 - Modelos bipartidos (a,b) e molde formado (direita)
Fonte: Soares (2000) e Ashby (2012).

A escolha destes materiais para modelo, no caso do processo de areia a verde, dependerá basicamente do nível de produção de peças, da tolerância dimensional e do acabamento necessário a peça que será fabricada. Segundo Soares (2000), a vida útil do modelo utilizado irá depender das condições de armazenamento em que estes estarão expostos, além do correto manuseio, pois as duas situações possuem a capacidade de deteriorar os materiais.

Segundo Neto (2004), deve ser levado em consideração que todos os metais se contraem quando expostos ao processo de solidificação, o que torna necessária a confecção de um modelo com as características dimensionais considerando a contração de cada material. A Tabela 9 apresenta a contração típica de materiais neste processo, sendo que estes valores devem ser considerados para fabricação da peça fundida, de modo a se prevenir problemas de dimensionamento, além da camada de sobre-metal adicionada, que posteriormente será usinada, adequando-o para utilização final.

Tabela 9 - Contração típica de metais durante sua solidificação

Metal	Contração linear (%)
Aço	2,0
Ferro fundido	0,5 – 1,0
Ferro nodular	0,8
Alumínio	1,7

Fonte: Soares (2000).

A extração deste modelo deve ser realizada da melhor forma possível, pois é necessário evitar a quebra dos cantos dos moldes, podendo ocorrer a extração de um certo volume de areia aderida a superfície do modelo, o que torna irregular a forma e dimensão necessária para fabricação de peça fundida. Para garantir que a extração a ser realizada será correta, confecciona-se o modelo com um ângulo de saída na qual facilitará a sua retirada. Além disso, utiliza-se a técnica de pintura, que obedece um código pré-estabelecido, de modo a se considerar o tipo de material que será utilizado para confecção de peças, apresentado pela Tabela 10.

Tabela 10 - Código pré-estabelecido de cores para modelos e caixas de macho

Tipos de coloração	Material
Vermelho	Ferro fundido
Azul	Aço
Verde	Alumínio
Amarelo	Cobre
Preto	Marcação de machos

Fonte: Soares (2000).

Os machos são materiais que possuem a função de inibir a propagação de metais fundidos para os vazios internos das peças. A etapa de macharia é opcional no processo de confecção de moldes, pois ela é utilizada quando se apresenta a necessidade da produção de peças ocas, devido a sua função citada. Segundo Neto (2004) e Casotti, Filho e Castro (2009), sua construção é dada comumente por uma mistura de areias mais finas com aglomerantes, comumente resinas sintéticas de origem fenólica, que possuem a compactibilidade elevada, o que permite exercer sua função de dissipação dos gases quando o metal fundido entra em contato com o macho, evitando assim a formação de bolhas ou até mesmo explosão de gases. Outras características dessa areia de macho são a ótima resistência a agente químicos, resistência a abrasão, ao calor. Entretanto, segundo Rossetto (2010) *apud* Scheunemann (2005) ela é considerada tóxica. Os machos podem sofrer tratamentos superficiais, segundo Okida (2006) *apud* Scheunemann (2005), a base de tintas de zirconita e álcool, o que tende a melhoria no acabamento interno do macho.

Para a construção dos moldes, é necessária a utilização da mistura dos materiais do sistema da areia a verde, sendo eles a areia nova ou de retorno, responsável pela refratariedade e distribuição granulométrica da mistura, a bentonita para garantir a compactabilidade e resistência ao molde quando adicionada a água, e o carvão, para suprir necessidades de expansão térmica e melhorar o acabamento superficial da peça. Com a criação deste sistema de materiais, são utilizadas caixas contendo as dimensões ideais para a confecção da peça. Segundo Neto (2004), junto as caixas, são utilizados os modelos com o formato da peça e machos responsáveis pelos canais. Existem dois tipos de caixas que são moldadas, a caixa tampa e a caixa fundo. A caixa fundo é moldada com a presença do modelo, já com

o desmoldante, de forma a prevenir a aderência da areia de fundição sob sua superfície. Já a caixa tampa é moldada e compactada da mesma maneira que a caixa fundo, porém com a outra metade do modelo bipartido. Entretanto, ela irá possuir o copo de vazamento, o canal de vazamento principal e o canal de escape gasoso, denominados de canais de vazamento e de respiro, respectivamente, que são partes fundamentais para o vazamento do metal fundido. Posteriormente a confecção das duas caixas, faz-se o fechamento do molde de modo a unir as partes compactadas na caixa tampa e na caixa fundo. De acordo com Casotti, Filho e Castro (2009), a adição de macho, quando necessário, é realizada na caixa fundo.

Segundo Romanus (2014), existem diferenças entre as areias que são utilizadas no molde aplicadas a moldagem manual. Elas são chamadas de areias de faceamento e areias de enchimento, representadas na Figura 13. Um ponto a se ressaltar é a preparação destes tipos de areia para utilização no processo de moldagem. Comumente, as fundições visam a obtenção de uma areia de faceamento de maior qualidade quando comparada com as de enchimento, devido ao contato direto que esta sofrerá com o metal líquido. Entretanto, esta visão de qualidade pode levar ao aparecimento de defeitos nas peças, devido ao fato de que nem sempre é possível confeccionar os canais de vazamento de um molde apenas com a areia de faceamento. Isto leva ao contato direto entre metal líquido a ser vazado com a areia de enchimento, que se não preparada de forma igual a de faceamento, provocará a erosão e a inclusão de areia nas peças fundidas, procedimento não desejado pelas fundições.

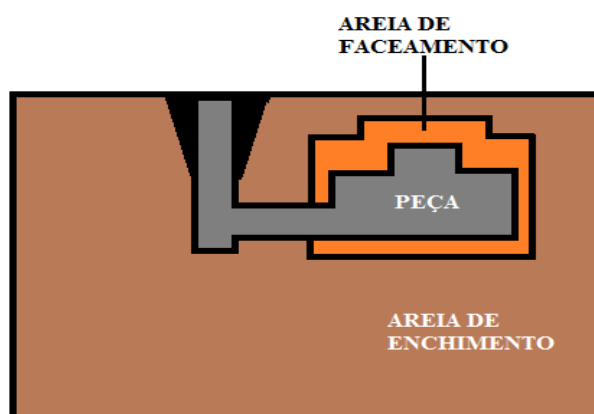


Figura 13 - Areia de faceamento e de enchimento presentes em moldes de areia
Fonte: Adaptado de Okida (2006).

Peças produzidas em grande escala utilizam apenas areia de enchimento adequada por meio de processos de retorno e adição de componentes como bentonita, carvão e água, garantindo a compactibilidade, resistência mecânica e o acabamento dos componentes fundidos. Exemplos de máquinas de preparação de moldes para grande escala são as denominadas Disamatic e Hunter, que possuem de modo mecanizado o enchimento das cavidades do molde com o sistema de areia a verde, o processo de compactação e assim, vazamento da peça.

Uma questão primordial para a fabricação de moldes é a quantidade de areia utilizada. Deve-se ter consciência da relação entre areia de moldagem/quantidade de metal vazado. Segundo Okida (2006) *apud* Scheunemann (2005), esta relação comumente varia de 0,8 a 1, sendo de 800 a 1000 kg de areia de moldagem na montagem do molde para cada peça de 1000 kg.

A moldagem em areia a verde continua a ser o método mais empregado no setor de confecção de moldes, pois além de servir para todos os tipos de metais, possui abundância de matéria-prima e o custo para a operação é baixo quando comparado aos outros. A areia a verde é adequada para a confecção de peças de porte pequeno a médio, que variam entre 0,3 kg e 50 kg devido as características do processo de solidificação. Segundo Biolo (2005) e Neto (2004), a sua desvantagem se encontra em peças maiores por conta da maior erosão, pior acabamento superficial e pela menor estabilidade dimensional. Entretanto, pode se utilizar a moldagem em areia a verde para produção de fundidos de grandes dimensões, mas esta não será a melhor opção.

2.7 FUSÃO E VAZAMENTO

A fusão é a etapa na qual a carga metálica sólida é transformada para o estado líquido em operação realizada por fornos de indução, elétrico ou cubilot. Estes fornos devem superaquecer o material, de forma controlada, para que não ocorra problemas de início de solidificação durante transporte ou durante a etapa de vazamento e preenchimento do molde. É necessária a utilização de cadinhos ou painéis que serão responsáveis por armazenar o volume metálico fundido e assim, transportá-los para os moldes de areia. Um cuidado a ser tomado é a formação de

escória, que por ser menos densa, permanecerá sob a superfície do metal fundido. Dessa forma, é necessária sua remoção antes de vazamento. De acordo com Rossetto (2010), em alguns casos, deixa-se uma fina camada de escória de modo a proteger o metal fundido da oxidação.

Esta etapa envolve também o controle de qualidade dos minerais, as quais a fundição deve ter conhecimento para especificar o tipo de material que será fabricado, de acordo com os limites desejados de composição química, detendo valores de teores de cada elemento que é responsável pela formação do fundido.

O processo de vazamento consiste no derramamento do metal líquido diretamente nos canais de vazamento confeccionados no molde, de modo a direcioná-lo para as cavidades principais que formarão a peça. De acordo com Casotti, Filho e Castro (2009), algumas variáveis estarão presentes nesta fase, sendo a temperatura de retirada do fundido do forno e a velocidade de vazamento nos canais do molde, de modo a se prevenir a erosão e a inclusão de areia na peça. Dentre essas variáveis, existem algumas temperaturas de vazamento comuns, conforme apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Temperatura de vazamentos típicas de alguns tipos de materiais

Material	Temperatura de Vazamento (°C)
Aço	Entre 1600 e 1650
Ferros Fundidos	Entre 1300 e 1450
Metais Não-Ferrosos	Entre 650 e 1300

Fonte: Adaptado de Ferreira (2010), Vidal (2013) e Neto (2004).

2.8 DESMOLDAGEM, LIMPEZA E ACABAMENTO

Posteriormente aos processos de vazamento e solidificação, tem-se que o processo de desmoldagem, no qual o conjunto do molde passa por etapas de vibração ou até mesmo o processo de quebra controlada, de modo a não se afetar a peça fundida com danos superficiais. A temperatura é uma variável importante, pois se a desmoldagem for realizada em temperaturas superiores ao adequado,

teremos problemas como choque térmico, gerando trincas na peça, em acordo com Casotti, Filho e Castro (2009).

Neste processo, a peça metálica é separada da areia. O volume de areia é praticamente reintegrado para o processo de uma nova preparação de moldes, porém de forma limitada. Quando se atinge o limite de uso da areia, obtida por meio de processos de caracterização da evolução da oolitização nas areias, torna-se necessária a adição de areia nova. De acordo com Okida (2006) *apud* Scheunemann (2005), de forma a se controlar a adição de excedente e manter contínuo o volume de areia aplicada para moldagem, descarta-se uma quantia equivalente ao excedente de areia usada.

Após a etapa de desmoldagem, o fundido passa para a etapa de limpeza e acabamento. Esta etapa é responsável pela limpeza superficial da peça e realização de cortes de canais e saliências sob a superfície do metal. Ela possui o âmbito de preparar a peça para seu destino final, para usinagem ou para montagem com outros componentes. Segundo Okida (2006), existem algumas operações que devem ser realizadas em sequência para garantir a qualidade deste procedimento, sendo elas apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Sequência de atividades para etapa de limpeza e acabamento

Atividade	Função
Limpeza grosseira	Remoção de canais e alimentadores
Limpeza superficial	Limpeza das regiões internas e externas do fundido
Remoção	Corte de rebarbas e canais de vazamento
Acabamento final	Diminuir a rugosidade da superfície
Inspeção	Aprovação para uso ou montagem

Fonte: Adaptado de Okida (2006).

A etapa de inspeção e recuperação envolve a identificação de defeitos da peça por meio de ensaios não-destrutivos, como líquido penetrante e inspeção visual. Posteriormente, a peça é submetida a testes de propriedades mecânica e físicas de modo a se avaliar o seu desempenho, classificando-os em adequados e não adequados.

2.9 PROCESSO DE OOLITIZAÇÃO

O processo de oolitização é um fenômeno que ocorre nos grãos de areia a verde devido à presença da bentonita adicionada ao sistema ligante. Ela ocorre na etapa de vazamento do metal líquido, que entram em contato com a areia e distribuem o calor de acordo com a permeabilidade do molde, sendo a profundidade atingida de areia diretamente proporcional a permeabilidade.

Segundo Miksovsky e Lichy (2008), a exposição da argila que recobre os grãos arenosos a altas temperaturas provoca os fenômenos de desidratação, dehidroxilação, mudança cristalina e agregação de fases formadas. A desidratação é responsável pela perda de umidade do sistema de areia a verde, perdendo a água que hidrata as camadas de bentonita e provoca a sua expansão. Já a dehidroxilação é a etapa de perda da água constituinte de bentonita, que promoverá a etapa de mudança cristalina presente em temperaturas entre 500 e 600 °C, com a transformação da estrutura montmorilonítica da bentonita em metacaolinita, que se agregará sobre a superfície arenosa dos grãos de sílica e assim, estabelecer uma ligação de alta energia, como representado em um processo de sinterização. Os grãos distribuídos que sofreram o ataque de temperatura sofrem a perda de plasticidade, devido à perda de bentonita do sistema original. Esta nova camada formada possui características porosas sob a superfície e conseqüentemente, torna-se um local de absorção maior de água. Além disso, a propriedade de refratariedade é reduzida quando a oolitização ocorre, devido a diminuição do porcentual de sílica total no sistema. Portanto, a areia de sílica nova será um novo ingrediente no sistema da areia de retorno.

A areia oolitizada retornará para o sistema de mistura base. Esta areia é denominada de areia de retorno. Devido as características citadas no parágrafo anterior, este material demandará uma maior quantia tanto de bentonita, para promover o aumento de plasticidade do sistema, quanto de água, devido a absorção maior destes grãos e do teor de umidade necessário para plastificar a bentonita adicionada.

Após a preparação dessa nova mistura entre areia nova, bentonita, água e areia de retorno, o conjunto é submetido novamente as mesmas condições, caracterizando o processo de oolitização como cíclico. Aliado ao processo citado,

ocorre também a diminuição da densidade da areia, variando de 2650 kg/m³ para 2000 kg/m³.

2.10 AREIA DE RETORNO

As areias de retorno são areias já submetidas a um ciclo de vazamento e são dispostas a retornar para a etapa de moldagem. Esta areia, como já mencionado anteriormente, necessita da adição de teores de constituintes como a areia nova, bentonita, água e carvão mineral, de modo a se restaurar em um certo percentual, suas propriedades para o molde de areia a verde. Como citado no item anterior, o processo de oolitização promove a deterioração das areias de retorno de forma diretamente proporcional ao número de ciclos de vazamento, sendo necessária o seu descarte, devido a geração de um resíduo não mais aproveitado para o processo de fundição. Entretanto, até que este número de ciclos seja atingido, as fundições continuam a utilizar a areia de retorno. A Tabela 13 apresenta os teores de areia, aditivos, para materiais ferrosos e não ferrosos, que são adicionados na areia de retorno para que esta se torne novamente adequada ao uso no processo de moldagem.

Tabela 13 - Teores adicionados para restaurar propriedades da areia de retorno

Material	Areia de retorno (%)	Areia nova (%)	Bentonita (%)	Carvão (%)
Aço	100	0 - 10	0,8 - 2	0,3 - 0,8
Ferro Fundido	100	0 - 10	0,5 - 1,5	0,2 - 0,8
Não-ferroso	100	0 - 10	0,2 - 1,2	0,05 - 0,6

Fonte: Adaptado de Romanus (2013).

2.11 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos gerados no processo de fundição constituem-se como um dos maiores problemas deste ramo devido ao grande volume gerado neste processo. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – os resíduos sólidos são classificados em duas classes de acordo com sua periculosidade e reatividade com o meio ambiente, sendo elas descritas na norma ABNT 10004:2004, em que outras normas como a NBR 10005, 10006 e 10007 citam procedimentos e métodos de análise do processo de lixiviação (fase líquida de componentes solúveis dos resíduos sólidos industriais emitidos ao meio), de solubilização e de amostragem, respectivamente. De acordo com Florido (2007), a maioria das areias de fundição são classificadas como classe II A – não inerte, devido as características de lixiviação apresentadas e quantias ainda consideráveis de solubilização quando expostos aos testes descritos na norma 10005.

Tais resíduos sólidos são provenientes da etapa de desmoldagem, sendo a principal causa da geração de resíduos sólidos, o processo de oolitização. Para ilustrar, temos cerca de 80% do processo de fundição brasileiro baseado na moldagem em areia a verde, responsável pela fabricação de cerca de 2,3 milhões de toneladas de fundidos. Como citado anteriormente, o índice de geração de resíduos de areia por tonelada de produtos fundidos gira em torno de 0,8 a 1. Portanto, com base nos dados apresentados de produção e de geração de resíduos, temos um número correspondente entre 1,8 milhões e 2,3 milhões de toneladas de resíduos gerados anualmente pela indústria de fundição. Assumindo a geração máxima de resíduos brasileira como 2,3 milhões de toneladas, temos que o volume gerado resíduos sólidos é então de 11,5 milhões de m³, equivalentes a 1,92 milhões caçambas de construção civil, aproximadamente 821 mil carretas com caçamba basculante e cerca de 77 reservatórios de controle de cheias de Itaquera – São Paulo.

Com base nos dados apresentados por Okida (2006), com gasto aproximado de despejo em aterros industriais de forma normalizada em US\$ 30,25 por tonelada. Assim, para o despejo correto dos resíduos sólidos de fundição, o custo seria de aproximadamente US\$ 69.575.000,00, englobando todas as fundições geradoras de resíduo.

O processo de recuperação de areia de retorno consiste na adição de componentes do sistema de areia a verde (areia nova, bentonita, carvão e água) com objetivo de regular as propriedades da nova mistura, adequando-a para aplicá-la novamente a etapa de moldagem. Os teores de adição, de acordo com a literatura, variam de acordo com a Tabela 13.

De modo a minimizar a geração de resíduos sólidos, é necessário avaliar as condições impostas sobre os materiais presentes no processo de moldagem em areia a verde, pois são as composições destes componentes que determinam a velocidade de deterioração das propriedades necessárias dos moldes, pelo processo de oolitização, como a refratariedade, compactibilidade e permeabilidade. Portanto, é de grande importância obter o conhecimento do processo produtivo e de quais variáveis este processo estará exposto, obtida por meio da caracterização dos materiais empregados no sistema, com o objetivo de reduzir adições desnecessárias ao sistema de materiais ligantes como a bentonita e o carvão, promovendo então, a redução da geração de resíduos sólidos. O fluxograma representado na Figura 14 demonstra todas as etapas apresentadas de modo a resumir o processo de moldagem em areia a verde.

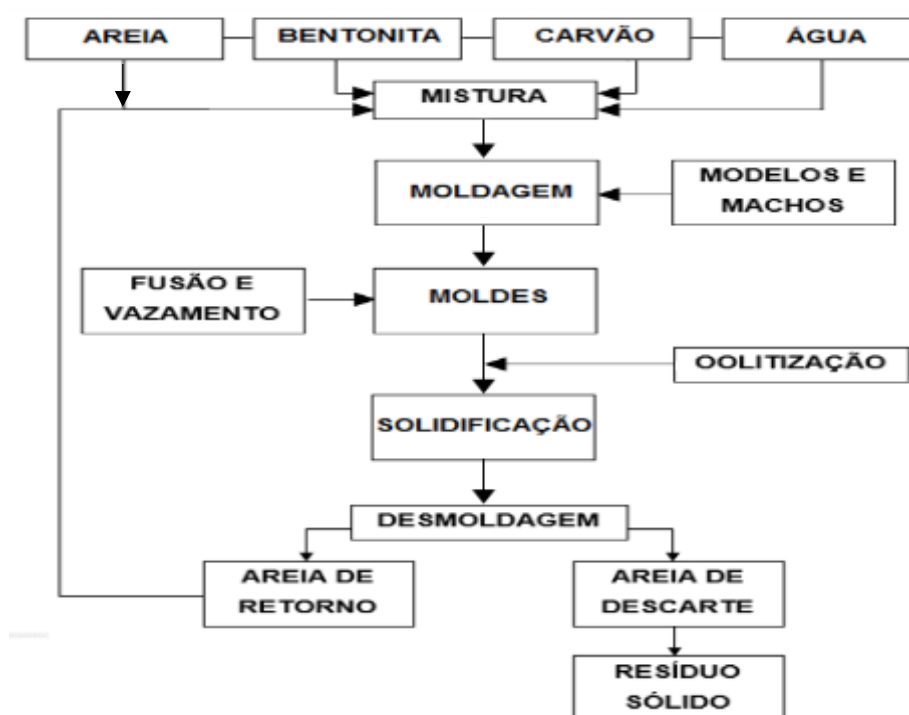


Figura 14 - Resumo da moldagem em areia a verde em fluxograma.
Fonte: Autoria Própria.

2.12 ANÁLISES ESTATÍSTICAS: UMA BREVE REVISÃO

As análises estatísticas são divididas em dois grandes tipos: análise paramétrica e análise não-paramétrica. As análises paramétricas consistem na avaliação estatísticas dos dados amostrais baseados nos parâmetros de distribuições dos mesmos. Para a utilização das ferramentas estatísticas paramétricas, como a análise de variância (ANOVA), algumas condições primárias devem ser atendidas, sendo elas as principais a presença de uma distribuição normal e a variabilidade na variância homogênea dos resíduos dos dados amostrais, como citado na referência Minitab (2016). A ANOVA calcula os resíduos por meio da diferença das médias obtidas pelo modelo de regressão utilizado com o valor observado no experimento. Com base nestes resíduos, são realizadas análises estatísticas para verificação da normalidade, como o teste de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling. Para mais informações sobre estes testes, pode-se consultar a referência ACTION (2017). Em resumo, ambos são testes potenciais para a identificação da normalidade ou não normalidade dos resíduos. Para a análise da variância dos dados amostrais, é necessário o cálculo das médias dos dados, acompanhados de seu desvio padrão e sua respectiva variância. Os dados de variância são dispostos de acordo com os valores médios de cada resultado. Desta forma, verifica-se a distribuição das variâncias em função dos valores médios dos dados. O ideal é que esta distribuição seja a mais aleatória possível e sem pontos de concentração de variância. Um exemplo é descrito na Figura 15.

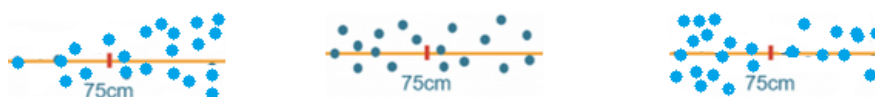


Figura 15 – Distribuição da variância em função da média dos dados amostrais. Média de 75 cm para a imagem.

Fonte: Adaptado de Portal Action (2015)

Quanto menor for a igualdade da distribuição da variância aos lados positivos e negativos da média, maior a indicação de que a distribuição segue um

comportamento não normal, devido à alta diferença de variância para as médias. A concentração de dados em pontos destoantes da média e em grupos concentrados também indica uma tendência a não normalidade (primeira e terceira situação da Figura 15).

Os coeficientes de assimetria são fontes de informação para a análise de uma distribuição normal ou assimétrica. Segundo Lopes (2003), para identificar se a assimetria é significativa em um conjunto, admite-se um coeficiente denominado de coeficiente de assimetria que varia entre três valores em módulo. Valores de coeficiente de assimetria nulos significam distribuição simétrica. Maiores ou menores que zero, assimetrias positivas e negativas, respectivamente.

A conexão destas três análises para a realização de uma análise estatística paramétrica é importante. Dados de distribuição normal, com variabilidade de dados homogênea e simetria são os mais indicados para a escolha deste teste. Entretanto, quando pelo menos a distribuição de normalidade é afetada, pode-se aplicar testes paramétricos devido a sua robustez. Desta forma, como citado em Reis e Júnior (2007), é recomendável a realização da ANOVA com o método de regressão dos mínimos quadrados, comumente aplicado aos planejamentos experimentais atuais, permitindo a extração da interação dos fatores estudados em uma determinada situação. Seus testes pertinentes são o teste T para os parâmetros da equação de regressão e o teste F, que avalia o teste como todo. Ambos testes possuem correlação com seu valor P, indicando a presença de significância para os termos do modelo de regressão quando estes são menores que o nível de significância adotado. Termos da equação de regressão que serão não significativos terão valores P maiores que o nível de significância adotado.

Já os testes não-paramétricos consistem na comparação dos dados amostrais em situações em que não é possível conhecer bem a distribuição da população e de seus parâmetros, desde que os dados obtidos sejam possíveis de serem ordenados. Um exemplo de teste não-paramétrico é o teste de Kruskal-Wallis, como relata Viali (2008). O teste de Kruskal-Wallis é um teste alternativo para dados que não são adequados para a realização da ANOVA.

Ambos os tipos de análises possuem como objetivo a realização dos testes de hipóteses estatísticas. Segundo Ehlers e Justiniano (2017), a hipótese estatística é definida como uma afirmação realizada sobre um conjunto desconhecido. Este conjunto, em estatística, é definido como população. Em geral, são realizadas duas

hipóteses para os casos que são analisados, sendo a hipótese nula, representada por H_0 , e a hipótese alternativa, representada por H_1 , como exemplificado no trabalho de Fagundes (2012). A hipótese nula corresponde a uma determinação sobre uma característica sob determinada população, sendo tomada como verdadeira, até que a estatística prove o contrário. Já a hipótese alternativa, que também corresponde a uma determinada característica de uma população, é a afirmação de que tal característica é verdadeira ou real em detrimento de H_0 , como explicado por Viali (2008).

A avaliação de um teste de hipótese é baseada no valor P, que segundo Ferreira e Patino (2015), é definido como a probabilidade da observação de um valor estatístico maior do que o nível de significância, também conhecido como nível alfa (α). Ou seja, quão provável é de ser observada uma diferença maior do que a assumida na hipótese nula.

Assim como qualquer outro teste, o teste de hipótese está associado a erros. Estes erros são divididos em dois: erro do tipo I e erro do tipo II. Os erros são relacionados com o nível de significância do teste, citado anteriormente, associados a probabilidades de tomar decisões de forma inadequada. A Tabela 14 apresenta como os erros são distribuídos nas situações.

Tabela 14 - Tipos de erro associados ao teste de hipótese.

Situação	Conclusão do teste	
Real	Rejeita-se H_0	Não rejeita H_0
H_0 Verdadeiro	Erro tipo I	Decisão correta
H_0 Falso	Decisão correta	Erro tipo II

Fonte: Adaptado de Ehlers e Justiniano (2017)

Associado ao nível de significância alfa, encontra-se o intervalo de confiança (I.C.), definido como uma extensão de diversos valores derivados dos tratamentos aplicados em uma determinada população. O cálculo de um intervalo de confiança é demonstrado na Equação 1. Um intervalo de confiança permite a avaliação das estimativas que podem ser realizadas sobre a população (MINITAB, 2016).

$$\text{Intervalo de confiança} = 1 - \alpha \quad (1)$$

Tópicos relacionados a estatísticas Z, além de testes unilaterais ou bilaterais são amplamente disseminados na literatura. Portanto, não serão comentados nesta revisão.

A Figura 16 resume os parâmetros que comumente são analisados em um tratamento de dados estatísticos.

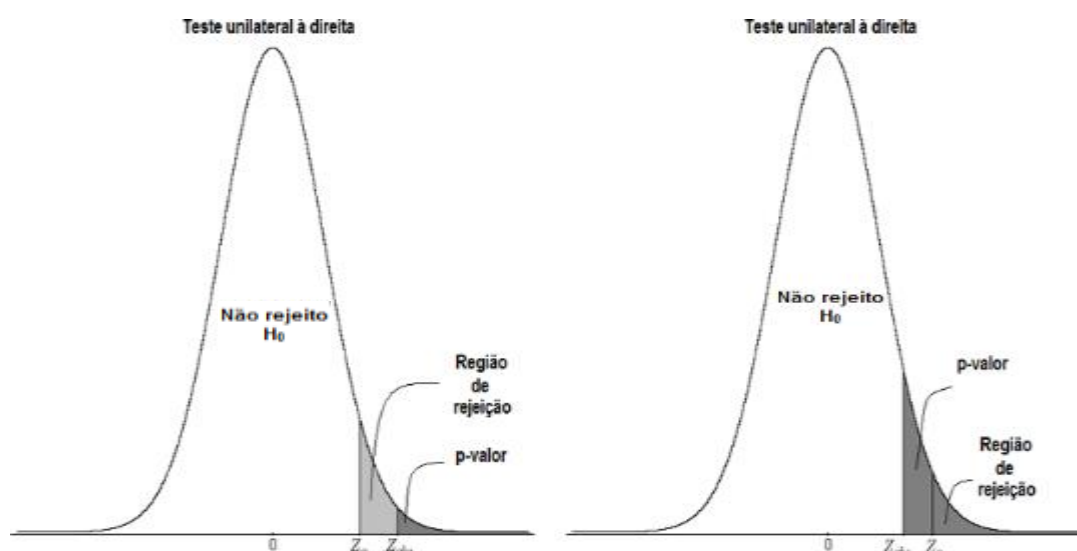


Figura 16 - Esquema simplificado de atributos estatísticos em um teste de hipótese.
Fonte: Adaptado de Estatcamp (2017)

Existem diversos tipos de testes paramétricos e não-paramétricos, sendo cada um adequado para cada tipo de situação de populações. Serão revisados apenas os modelos utilizados neste trabalho.

A análise de variância, um teste paramétrico, permite com fundamentos estatísticos, a determinação das hipóteses nula e alternativa com base nas médias entre populações. Para a utilização deste tipo de análise, algumas suposições devem ser atendidas. Estas são divididas em: aleatoriedade das amostras, amostras com potencial distribuição normal e variâncias aproximadas ou iguais. Ele se baseia na adoção de um modelo de regressão, comumente o método dos mínimos quadrados, e por meio do cálculo de coeficientes da equação desenvolvida, permitindo a

realização de testes estatísticos para a aquisição do valor P, baseado no nível de significância alfa adotado para a interpretação dos resultados. Este tipo de teste é amplamente difundido em softwares, como o JMP, da empresa SAS e o MiniTab, ambos oferecidos gratuitamente para testes durante 30 dias.

O teste de Kruskal-Wallis é um teste não-paramétrico, no qual é um teste equivalente a ANOVA. O objetivo deste teste não-paramétrico é a decisão de afirmar se os dados amostrais são provenientes de populações diferentes ou não. É uma prática natural observar que dados amostrais se diferem entre si em seus valores absolutos. Segundo Viali (2008), torna-se um problema decidir em até qual nível de significância alfa (α), os valores realmente se diferem, ou se correspondem apenas as variações esperadas em um teste experimental. Este teste é realizado com dados de características ordinais, ou seja, que possam ser ranqueados.

A Equação 2 representa a fórmula de Kruskal-Wallis, utilizada para o cálculo do teste estatístico H, que representa este tipo de teste.

$$H = \left(\frac{12}{N(N+1)} \right) \sum_i \left(\frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad (2)$$

Nesta fórmula, temos que N é igual ao tamanho de amostras em cada grupo, R_i representa os valores somados dos ranques de cada grupo e n_i representa o número de amostras em cada grupo. Após o cálculo, é necessário saber o valor de $H_{\text{crítico}}$ para o tipo de tratamento adotado. A tabela de distribuição de $H_{\text{crítico}}$ para cada tipo de tratamento pode ser consultada no trabalho de Iman, Quade e Alexander (1975). Com o teste de hipótese formulado, analisamos o valor de H dos grupos de tratamento comparado ao valor de $H_{\text{crítico}}$. Se H dos grupos de tratamento for superior ao $H_{\text{crítico}}$, realiza-se comparações pareadas. Para amostras grandes, utiliza-se a estatística Z com a correção de Bonferroni. Para amostras pequenas, utiliza-se a metodologia desenvolvida por Rublík (2001), representada na Equação 3. O valor de $ca(n)$ é tabelado e pode ser consultado na própria referência do método.

$$|R_i - R_j| > ca(n) \quad (3)$$

Em que R_n representa os ranks calculados através do teste de Kruskal-Wallis. Com base em Viali (2008), para o cálculo deste rank é necessária a ordenação dos dados amostrais, considerando todos os grupos envolvidos. Desta forma, levantam-se os dados amostrais em postos (ranks). Levanta-se o rank de número um a partir do menor valor presente nos grupos e assim em diante, de forma crescente. Caso ocorra igualdade de valores, faz-se a média dos ranks encontrados (i.e., valor 20 ordenado no rank 15 e 16; faz-se a média, obtendo o valor de 15,5). Desta forma, cada dado amostral é transformado em um rank e assim, é realizada a comparação pareada e conclusões sobre a população.

Como resumo desta revisão, a Tabela 15 apresenta algumas vantagens e desvantagens do método paramétrico e não-paramétrico.

Tabela 15 - Vantagens e desvantagens das análises paramétricas e não-paramétricas.

	Vantagens	Desvantagens
Método paramétrico	<ul style="list-style-type: none"> - Maior robustez do que os testes alterativos não paramétricos; - Levam em consideração os dados amostrais e não ranks; 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicáveis apenas em distribuições normais (ou quase normais) e de variâncias não discrepantes - Complexidade de cálculos
Método não-paramétrico	<ul style="list-style-type: none"> - Dispensam normalidade de dados e independem da forma da população, logo são menos exigentes; - São aplicados de forma fácil; - Trabalham com diferentes tipos de população 	<ul style="list-style-type: none"> - Desperdiça informações por transformar os dados em ordens; - Não testam interações entre grupos;

Fonte: Adaptado de Vilela (2014) e Viali (2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS DE MOLDAGEM UTILIZADOS

Conforme demonstrado anteriormente, o sistema de moldagem em areia a verde consiste comumente de cinco materiais. Porém, o presente trabalho utilizou apenas quatro, sendo eles: areia nova lavada, bentonita sódica aditivada, da Companhia Brasileira de Bentonita - CBB, carvão mineral moído fabricado pela empresa de mineração Urussanga e areia de retorno. Estes materiais foram gentilmente cedidos por uma fundição localizada na região de São Carlos – São Paulo, com mais de 20 anos no mercado.

Todos os materiais recebidos foram submetidos ao processo de quarteamento, conforme representado na Figura 17, de modo a se obter uma amostra representativa dos mesmos e verificar as suas características por meio dos ensaios pertinentes a cada tipo de material.

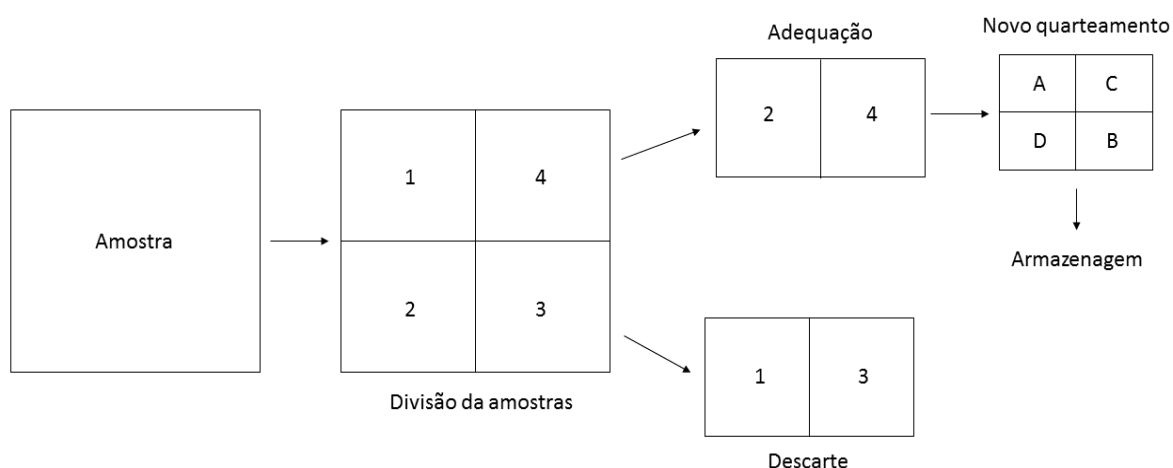


Figura 17 - Quarteamento realizado nas amostras recebidas.
Fonte: Adaptado de Matos e Schalch (2007)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A caracterização dos materiais foi realizada com o auxílio dos seguintes equipamentos:

- Agitador mecânico com capacidade de rotação de 1750 RPM;
- Balança digital modelo MD-15, fabricante DIGIMED;
- Balança eletrônica de precisão 0,001 gramas, modelo BL-320AB-BI, fabricante EVEN;
- Balança eletrônica de precisão 0,0001 gramas, fabricante Bioscale;
- Becker de 600 mL e 1000 mL, fabricante DiogoLab;
- Bureta graduada de 25ml;
- Cadinhos de porcelana de 50ml e 100ml;
- Micro estereoscópio com câmera para avaliação da característica morfológica, com aumento capaz de 3,6 vezes;
- Mufla com capacidade de 1000 °C para análises térmicas nas areias, bentonita e carvão;
- Picnômetro de 50ml;
- Pissetas de 500ml;
- Provetas 100 ml \pm 1 ml, fabricante DiogoLab;
- Suporte universal com garras triplas e muflas duplas;
- Tubo de cobre flexível com diâmetro de ¼ polegada;
- Vidro relógio para deposição de amostra e visualização no estereoscópio.

3.2.1 Ensaio de Umidade

O ensaio de umidade para a areia e bentonita foi realizado com auxílio de estufa em temperatura de 120°C e do aparelho infravermelho para determinação de umidade, modelo AIDU, série C, fabricado pela empresa Tecnofund, conforme

representado na Figura 18. O equipamento tem como princípio de funcionamento a secagem da amostra por meio de uma lâmpada com radiação na região do infravermelho com o controle de intensidade definido pelo fabricante, que varia de zero a cinco, sendo zero sem presença da luz ambiente e cinco, a máxima potência exercida pela lâmpada. O índice recomendado, segundo o fabricante, para manter a temperatura entre 105 °C e 130 °C no equipamento é de dois e meio. Ambos os procedimentos foram realizados baseados na recomendação 105 da Cemp (2015).



**Figura 18 - Secador por luz infravermelho, modelo AIDU.
Fonte: Autoria própria.**

As etapas para realizar o ensaio foram seguidas de acordo com o manual do aparelho, sendo:

- Pesar uma quantidade entre 30 e 50 gramas de material depositado no recipiente do aparelho;
- Configurar o aparelho com o temporizador disponível, sendo 12 minutos a forma padrão do equipamento;
- O recipiente já com a amostra pesada (denominado como peso úmido – PU) retorna ao aparelho;
- Ativou-se o sistema da lâmpada infravermelho;

- Após o término do procedimento, o recipiente com a amostra seca deve ser pesado (denominado como peso seco – PS);
- O cálculo de umidade foi realizado de acordo com a Equação 4, demonstrada abaixo:

$$\text{Umidade (\%)} = \left(\frac{\text{PU} - \text{PS}}{\text{PU}} \right) \times 100 \quad (4)$$

3.2.2 Ensaio Granulométrico

O ensaio granulométrico foi aplicado tanto para os dois tipos de areia, quanto para a bentonita, com o objetivo de se determinar o tamanho médio dos grãos utilizados, caracterizando-os de acordo com o módulo AFS dos componentes utilizados para fabricação de peças metálicas utilizando a moldagem em areia a verde.

Para a determinação da granulometria da bentonita, foi utilizado o procedimento descrito na tese da literatura de Silva (2011), item 3.2.2.1.5, página 108, baseado na norma CPTECH/BENTONISA, no qual utiliza a bentonita seca em distribuição de peneiras. Foram realizadas modificações das peneiras utilizadas devido a limitação de equipamentos, sendo estas apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Modificação do peneiramento para bentonita

Peneiramento original	Peneiramento modificado
60	60
100	80
150	140
200	200
270	270
325	400
Panela	Panela

Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Já para determinação da granulometria da areia base e de retorno, utilizou-se o procedimento encontrado na recomendação CEMP 081 (CEMP, 2015), com a modificação da ordem das peneiras, apresentada na Tabela 17, junto com as demais propriedades para obtenção do módulo AFS, representado na Equação 5.

Em adição a propriedade de módulo, o teor de finos foi determinado como sendo a soma das peneiras 200, 270 e da panela, segundo CEMP 081, CEMP (2015).

Tabela 17 - Peneiramento da areia nova e de retorno

Abertura malha (µm)	Malhas	Peneira vazia (g)	Peneira + amostra (g)	Retenção (g)	Retenção (%)	Fatores	Produto (P)
425	40	X1	Y1	Y1 - X1	(Y1-X1)/m	30	
250	60	.	.	.	.	40	
180	80	.	.	.	.	60	
106	140	.	.	.	.	80	
75	200	.	.	.	.	140	
53	270	.	.	.	.	200	
	Panela	Xn	Yn	Yn-Xn	(Yn-Xn)/m	270	
Massa da amostra	m		∑Y1-n		∑RP		∑P

Fonte: Adaptado de CEMP-081 (2015).

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\sum P}{\sum RP} \quad (5)$$

Já para a obtenção do tamanho médio de grão (T.G.M), utilizou-se as informações contidas na literatura Brown (2000), apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Obtenção do tamanho médio de grão para areia nova e de retorno.

Malha (μm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (μm)
425	498	% Malha 425	498 x % Malha	$\frac{\sum P}{\sum \%R}$
			425	
250	300	.	.	
180	212	.	.	
106	119	.	.	
75	80	.	.	
53	38	.	.	
37	38	% malha 37	.	
Panela	38	% Panela	38 x % Panela	
		$\sum \%R$	$\sum P$	

3.2.3 Sifonamento Manual - Determinação do Teor de Argila AFS

Para a determinação do teor de argila AFS, definida como o teor de partículas de tamanho inferior a 0,02mm, como finos inertes e partículas de aditivos (bentonita e carvão), utilizou-se a metodologia de sifonamento manual, de acordo com a recomendação 082 da CEMP (2015). O sifonamento é baseado em um sifão confeccionado com tubo de cobre flexível com diâmetro de $\frac{1}{4}$ polegada. O aparato utilizado para o sifonamento manual está representado na Figura 19. As etapas do procedimento foram:

1. Deposição de uma massa de aproximadamente 50 gramas de areia do sistema (Ma) no Becker de 1000ml de corpo alto;
2. Adição de 600 ml de água destilada e 25 ml de solução de NaOH com concentração de 3%;
3. Ajuste da altura da lâmina do agitador mecânico no Becker, de modo a permanecer suficientemente baixa para provocar a dispersão da amostra;
4. Agitação da amostra em velocidade correspondente a 1500 RPM durante 5 minutos;
5. Desativação do sistema de agitação e limpeza dos resíduos da haste metálica do agitador;

6. Adição de modo brusco de água destilada suficiente para atingir a altura de 15,2 centímetros, sendo a referência o fundo do Becker;
7. Repouso da amostra durante 10 minutos;
8. Realização do sifonamento até a altura de 2,54 centímetros da base do Becker, com auxílio do tubo de cobre flexível;
9. Verificação da presença de finos na água restante. A água límpida representa a não presença de finos. Caso a água esteja turva, prosseguir ao passo 10 e repeti-lo até obter a água límpida. Caso esteja límpida, prosseguir ao passo 11;
10. Nova adição brusca de água até a altura de 15,2 centímetros e repouso da amostra por 5 minutos. Após o tempo de repouso, repetir o passo 8 e 9;
11. Filtragem da amostra com água destilada;
12. Secagem com auxílio de uma estufa em temperatura de 120 °C até a obtenção da constância de massa;
13. Pesagem da massa seca, obtendo a massa residual (M_r);
14. Determinação do teor de argila ativa de acordo com a Equação 6.

$$\text{Teor de argila ativa (AFS)} = \left(\frac{M_a - M_r}{M_a} \right) * 100 \quad (6)$$



**Figura 19 - Sistema de sifonamento manual (agitação a esquerda e sifonamento a direita).
Fonte: Autoria Própria.**

De acordo com Cemp (2015), o ensaio de sifonamento manual permite a retirada dos finos que decantam a uma velocidade inferior a 25,4 mm/minuto, sendo assim possível obter apenas os grãos de areia de retorno, possibilitando avaliar o grau de oolitização do sistema, procedimento de avaliação que será descrito posteriormente.

3.2.4 Determinação da Forma dos Grãos de Areia nova e de Areia de Retorno

Para determinação da forma dos grãos arenosos, foi necessária a utilização do estereoscópio, do fabricante Physis, conforme demonstrado na Figura 20. As imagens foram captadas com a câmera do estereoscópio, com capacidade de aumento de 3,6 vezes. Após a obtenção das imagens, foram analisadas as formas dos grãos e estes foram classificados de acordo com a distribuição demonstrada na Figura 7, da referência Brown (2000).



**Figura 20 – Estereoscópio, aumento de 40 vezes, fabricante Physis.
Fonte: Autoria própria.**

3.2.5 Determinação do Inchamento de Foster – Bentonita

Para determinação do inchamento, foi empregada a metodologia de Foster, baseada na norma 058 da CEMP, especificado na referência CEMP (2015). A classificação para o ensaio de determinação do inchamento de Foster foi realizada de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19 - Classificação após inchamento de Foster

Classificação	Valor inchado
Não-Inchamento	Menor ou igual a 2 mL/g
Baixo	Entre 3 e 5 mL/g
Médio	Entre 6 e 8 mL/g
Alto	Maior que 8 mL/g

Fonte: Adaptado de Silva (2011).

3.2.6 Determinação da Adsorção de Azul de Metileno e Capacidade de Troca Catiônica

Para a determinação da capacidade de troca catiônica dos componentes contendo bentonita, foi utilizada a metodologia de adsorção de azul de metileno. Os materiais aqui avaliados foram a bentonita como recebida, a areia de retorno e os finos coletados pelo sistema de exaustão. O intuito de realizar as comparações entre areia de retorno e finos com a bentonita foi a de descobrir a quantidade de argila ativa presente na composição destes materiais. Para o caso da areia de retorno, com o conhecimento do teor de argila ativa presente no sistema de moldagem, melhor será o controle da adição correta deste material nos misturadores. Já para os finos, o objetivo foi de tentar descobrir se o sistema de exaustão estava trabalhando de forma eficiente, sem retirar bentonita em excesso da areia de retorno, pois este comportamento afeta diretamente o custo do sistema de moldagem.

O procedimento para obtenção do valor da capacidade de troca catiônica (CTC) dos materiais foi baseado nos artigos dos autores Calábria, Amaral, *et al.* (2013) e Bilal, Mohhamed-Dabo, *et al.* (2016). Desta forma, foram adotadas as seguintes etapas:

- Secagem dos materiais em estufa com temperatura entre 100 e 105 °C;
- Separação de 2 gramas do material a ser avaliado em Becker de 600 mL;
- Adicionar 300 mL de água destilada ou de osmose reversa e quantidade suficiente de solução de ácido sulfúrico 1.2M, de modo a ajustar o pH da solução entre 2,5 e 3,8 e agitar;
- Preparação da bureta graduada de $25 \pm 0,1$ mL com a solução de azul de metileno de concentração 0,01 M;
- Depositar cerca de 5ml da solução de azul de metileno e, com um auxílio de um bastão, depositar uma gota no papel filtro, verificando se ocorre a formação de um halo azul leve, conforme demonstrado na Figura 21;
- Caso não apareça, deve-se agitar o conjunto mais 2 minutos e adicionar mais 1 ml da solução, até seu ponto ótimo;
- Observações: Caso se tenha ideia da capacidade de troca catiônica da argila em ensaio, adiciona-se o conteúdo correspondente a 80% do valor requerido da solução do indicador e assim, se procede as etapas de adição em menores volumes. Caso ocorra a saturação da solução, desconsiderar o teste e começar novamente.

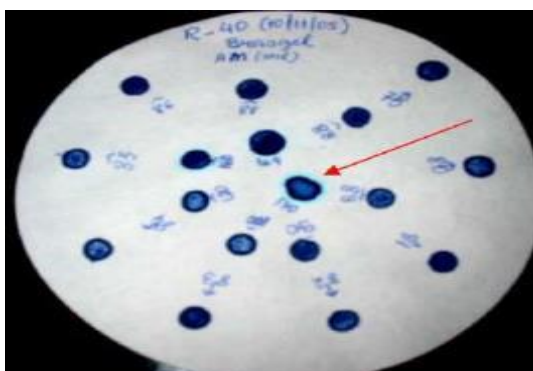


Figura 21 – Exemplo do teste do halo ótimo para azul de metileno.
Fonte: Adaptado de Calábria, Amaral, *et al.* (2013)

A capacidade de troca catiônica, CTC, foi obtida através da fórmula da Equação 7, seguindo a referência do autor Calábria, Amaral, *et. Al.* (2013).

$$CTC = \frac{EV}{W} * 100 \quad (7)$$

Em que CTC é a capacidade de troca catiônica (meq/100g) de bentonita, E é a concentração de azul de metileno (0,01M), V é o volume (mL), de solução adicionada de azul de metileno e W é a massa adicionada de material, em gramas.

O teor de argila AFS é o resultado da soma do nível de argila ativa, de carvão e finos inertes. Logo, com o ensaio de capacidade de troca catiônica, foi possível determinar o teor de argila ativa presente na areia de retorno e nos finos por meio da relação estabelecida na Tabela 20.

Tabela 20 – Determinação do teor de argila ativa nos constituintes do sistema de finos e areia de retorno.

Amostra	Bentonita	Areia de retorno	Finos
Teor de argila ativa(%)	100	X1	X2
Volume de azul de metileno utilizado (mL)	Y1	Y2	Y3

Fonte: Autoria própria.

3.2.7 Caracterização do Carvão Mineral Moído

A determinação de materiais voláteis, percentual de cinzas e do percentual de carbono fixo nesta matéria prima foi realizado de acordo com as recomendações 138, 141 e 205 da CEMP - ABIFA, respectivamente. Ambos os procedimentos utilizaram a mufla em uma temperatura de 950 ± 20 °C e uma massa de aproximadamente $1 \pm 0,020$ gramas.

Para a obtenção dos materiais voláteis, foi depositada a massa (M1) citada em um cadinho com tampa e o mesmo foi exposto durante sete minutos na mufla a 950 °C, sendo dois minutos na entrada do forno mufla e cinco minutos na zona de

fusão do forno. Após este tempo, foi retirado os cadinhos e observada a perda de coloração rubra do material, sendo este levado a um dessecador e pesado em temperatura ambiente, obtendo a massa residual de voláteis (M2).

Já para a determinação do percentual de cinzas, foi depositada a massa (M1) nos cadinhos e os mesmos foram expostos as condições citadas de temperatura na zona de fusão da mufla durante um período de quatro horas e meia, tempo necessário para a combustão completa do material. Desta forma, após a perda de coloração rubra dos cadinhos, os mesmos foram depositados em dessecadores e a massa residual (M2) foi medida em temperatura ambiente.

Tanto o teor de materiais voláteis, quanto o teor de cinzas foi obtido a partir da Equação 8. O teor de carbono fixo foi obtido a partir da Equação 9.

$$\% \text{ cinzas ou voláteis} = \left(\frac{M2 - M1}{M1} \right) * 100 \quad (8)$$

$$\% \text{ Carbono Fixo} = 100 - \% \text{ Umidade} - \% \text{ Materiais voláteis} - \% \text{ Cinzas} - \% \text{ Enxofre} \quad (9)$$

3.2.8 Determinação da Perda ao Fogo

A perda ao fogo foi avaliada apenas para a areia nova, areia de retorno e finos, baseada na recomendação CEMP 120, referenciada em (CEMP, 2015). Segundo esta referência, este método permite a obtenção do teor de materiais orgânicos (carvão) e águas de cristalização que estão presentes nos constituintes do sistema de areia a verde, permitindo quantificar o teor de materiais do sistema. Para a realização deste ensaio, foram adotadas as seguintes etapas:

- Secagem da amostra em estufa ou secador de infravermelho entre 105 e 130 °C;
- Resfriamento até a temperatura ambiente em dessecador;

- Pesagem de $1 \pm 0,002$ grama da amostra no cadinho;
- Exposição do material na mufla e calcinar até constância da massa (em torno de três horas para cada material);
- Resfriamento em dessecador;
- Cálculo da massa de resíduo (M_r);
- Obtenção da perda ao fogo, baseada na Equação 10.

$$\text{Perda ao Fogo (\%)} = \frac{(M_a - M_r)}{M_a} * 100 \quad (10)$$

Desta forma, com este ensaio, foi possível determinar o teor de carvão presente na areia de retorno e nos finos, de modo a concluir a caracterização dos materiais do sistema de areia a verde.

3.3 MISTURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE AREIA A VERDE

A mistura dos componentes do sistema de areia a verde foi realizada com o uso de um misturador de jarros, ajustado em uma velocidade de 150 RPM, e com o uso de um recipiente plástico, conforme representado na Figura 22.



Figura 22 - Sistema de mistura da areia a verde
Fonte: Autoria Própria.

Como base de mistura, utilizou-se uma massa de areia, como recebida, em torno de 500 gramas. Os demais aditivos também foram utilizados como recebido e suas massas foram calculadas com base na massa de areia adicionada. A Equação 11 demonstra a base de cálculo levando em consideração a umidade dos materiais.

$$\text{Massa a ser adicionada} = \frac{\text{Massa do componente requerida}}{1 - (\% \text{ Umidade do componente} * 100)} \quad (11)$$

A primeira etapa de mistura consistiu na adição dos materiais no recipiente plástico, levando em consideração a umidade de cada material adicionado. A segunda etapa consistiu na homogeneização dos materiais durante 15 minutos. Após os 15 minutos, adicionou-se a água necessária para adequação da umidade e foi iniciada a etapa final de mistura.

A investigação de qual o tempo adequado da mistura úmida foi realizada a partir da etapa final, utilizando os maiores níveis de aditivos em ambos os sistemas, conforme citado na Tabela 23 e Tabela 24. A amostra foi retirada em intervalos de 5 minutos para a aferição da propriedade de permeabilidade, utilizada como critério de mistura adequada, pois esta propriedade deve permanecer em constância após determinado tempo de mistura, efeito correlacionado a uma eficiência de mistura.

A Figura 23 demonstra a correlação entre o sistema de areia nova e areia de retorno baseada na permeabilidade e no tempo de mistura.

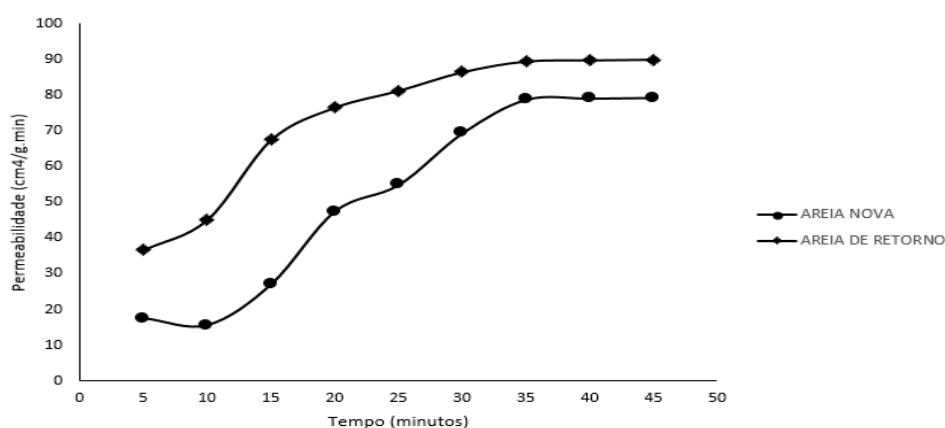


Figura 23 - Investigação do tempo adequado de mistura do sistema de areia a verde.
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 23, após o tempo de 35 minutos, a permeabilidade permanece praticamente constante para ambos os sistemas. Desta forma, utilizou-se como procedimento de mistura as seguintes etapas:

- Pesagem dos materiais em base úmida;
- Adição dos componentes do sistema no recipiente;
- Mistura por 15 minutos em velocidade de 150 RPM;
- Adição da água necessária para o sistema, adequando a umidade;
- Mistura por 35 minutos em velocidade de 150 RPM;
- Retirada do recipiente plástico;
- Avaliação de propriedades.

3.4 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS E AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE MOLDAGEM

O planejamento experimental foi realizado com base no planejamento fatorial completo, de modo a se avaliar as principais variáveis que afetam os comportamentos de mistura e de reutilização da areia a verde, com o objetivo de analisar as propriedades de compactibilidade, permeabilidade e dureza dos materiais utilizados para caracterizar um sistema de moldagem em areia a verde. Além disso, o planejamento fatorial completo distribui aleatoriamente as variáveis, garantindo a distribuição imparcial dos fatores.

A Tabela 21 apresenta os níveis e variáveis utilizadas para análise da compactibilidade, permeabilidade e dureza da areia a verde baseada na utilização de areia nova, baseado em um planejamento fatorial completo 3^3 . Já para a areia de retorno, foi planejado um fatorial completo de dois níveis e quatro fatores (2^4), apresentado pela Tabela 22.

Tabela 21 - Níveis para avaliação da compactibilidade do sistema de areia a verde

Abreviação	Fatores	Níveis (%)
A	Teor de água (%)	3; 3,5 e 4
B	Teor de bentonita (%)	7; 8,5; 10
C	Teor de carvão (%)	2, 3 e 3,5

Fonte: Adaptado de Romanus (2013) e Beeley (2001).

Tabela 22 - Níveis e variáveis baseadas na areia de retorno

Abreviação	Fatores	Níveis (%)
A1	Teor de areia nova (%)	3 – 6
B1	Teor de água (%)	4 – 6
C1	Teor de bentonita (%)	1 - 2
D1	Teor de carvão (%)	0,3 – 0,7

Fonte: Adaptado de Romanus (2013) e Beeley (2001).

A Tabela 23 e a Tabela 24 apresentam a distribuição das amostras de forma sequencial para ilustração de como foi dividida a sequência de experimentos, tanto para a areia nova, quanto para a areia de retorno.

Tabela 23 - Sequência de experimentos para a areia nova.

Item	A	B	C	Item	A	B	C	Item	A	B	C
Un.	%	%	%	Un.	%	%	%	Un.	%	%	%
1	3,0	7,0	2,0	6	3,0	8,5	3,5	17	3,5	10,0	3,0
4	3,0	8,5	2,0	15	3,5	8,5	3,5	26	4,0	10,0	3,0
7	3,0	10,0	2,0	24	4,0	8,5	3,5	19	4,0	7,0	2,0
8	3,0	10,0	3,0	10	3,5	7,0	2,0	20	4,0	7,0	3,0
9	3,0	10,0	3,5	11	3,5	7,0	3,0	23	4,0	8,5	3,0
18	3,5	10,0	3,5	12	3,5	7,0	3,5	13	3,5	8,5	2,0
27	4,0	10,0	3,5	21	4,0	7,0	3,5	16	3,5	10,0	2,0
2	3,0	7,0	3,0	5	3,0	8,5	3,0	22	4,0	8,5	2,0
3	3,0	7,0	3,5	14	3,5	8,5	3,0	25	4,0	10,0	2,0

Tabela 24 - Sequência de experimento para a areia de retorno.

Item	A1	B1	C1	D1	Item	A1	B1	C1	D1
Un.	%	%	%	%	Un.	%	%	%	%
1	3,0	4,0	1,0	0,3	3	3,0	4,0	2,0	0,3
4	3,0	4,0	2,0	0,7	12	6,0	4,0	2,0	0,7
13	6,0	6,0	1,0	0,3	14	6,0	6,0	1,0	0,7
15	6,0	6,0	2,0	0,3	6	3,0	6,0	1,0	0,7
2	3,0	4,0	1,0	0,7	7	3,0	6,0	2,0	0,3
9	6,0	4,0	1,0	0,3	10	6,0	4,0	1,0	0,7
8	3,0	6,0	2,0	0,7	16	6,0	6,0	2,0	0,7
11	6,0	4,0	2,0	0,3	5	3,0	6,0	1,0	0,3

3.4.1 Determinação da Compactabilidade

O ensaio de compactabilidade foi realizado de acordo com o manual do Martete Mecânico, modelo MM, série B, disponibilizado pelo fabricante Tecnofund. Para realizar o ensaio, foram necessários mais quatro componentes, sendo eles: tubo recipiente, base da peneira, a peneira e o funil de carregamento. A utilização da peneira junto ao funil é necessária devido a necessidade do preenchimento do tubo por queda livre conforme se adiciona o material na peneira. Ambos componentes estão representados na Figura 24, sendo o lado esquerdo o conjunto de peneiras e molde e lado direito, o martelete mecânico.



Figura 24 – Conjunto de equipamentos utilizado para compactabilidade.
Fonte: Autoria Própria.

3.4.2 Determinação da Permeabilidade

A permeabilidade dos corpos de prova foi realizada após a compactação das materiais primas no martetele, baseada na norma 080 de CEMP - ABIFA. O ensaio consiste na passagem do fluxo de ar liberado pela permeâmetro, representado na Figura 25, através da coluna dos materiais compactados, sob uma determinada pressão e tempo. A permeabilidade, com auxílio do equipamento, é obtida de forma direta e sua unidade é de $\frac{cm^4}{g.min}$.



**Figura 25 - Permeômetro de areia PERB, fabricante Tecnofund.
Fonte: Autoria Própria.**

3.4.3 Determinação da Dureza

O ensaio de dureza foi realizado com auxílio do durômetro portátil para areia a verde, tipo DAV, série B, com indentador de raio de 12,7 mm, promovendo média pressão na superfície do corpo de prova compactado. O valor de dureza é retornado na escala B (0-100%) da AFS. Para realizar o procedimento do ensaio, utilizou-se o corpo de prova com o Martetele Mecânico, devido a formação de uma superfície livre de ondulações. Para medir a dureza, aplicou-se uma pressão com o durômetro sob

a superfície do corpo de prova, possibilitando assim a leitura direta no leitor do equipamento. A Figura 26 representa o equipamento utilizado para este tipo de ensaio.



**Figura 26 - Durômetro DAV-B, fabricante Tecnofund.
Fonte: Autoria própria.**

3.4.4 Análise Estatística Dos Resultados

Como a capacidade de mistura do sistema utilizado foi de aproximadamente 500 gramas, foi possível realizar a compactação de três corpos de prova, que permitiu a aquisição de três resultados para cada tipo de propriedade. Com base nesta triplicata, foi realizada as análises estatísticas dos dados de modo a permitir conclusões sobre as propriedades avaliadas, sendo elas a compactabilidade, a permeabilidade e a dureza.

O primeiro passo foi a verificação da normalidade dos resíduos das respostas, acompanhadas das análises de covariância entre os mesmos dados. Segundo os autores Reis e Júnior (2007), a ausência de normalidade nos resíduos não geram preocupações para os resultados dos testes F, obtidos com ANOVA e seus derivados. Como foram levantados três fatores para o planejamento fatorial da areia nova e quatro fatores para a areia de retorno, avaliou-se a interação múltipla destes fatores (i.e., Bentonita com carvão, carvão com água, bentonita com carvão com água). Caso a interação seja significativa, toma-se como método de tratamento a análise multivariada de fatores, conhecida também como MANOVA. Os autores Torman, Coster e Riboldi (2012) sugerem a adoção de métodos não-paramétricos quando os planejamentos possuem amostras pequenas por grupo ($n < 10$). Isto é,

quando n é menor ou igual a dez para cada tipo de tratamento. Como os testes foram feitos em triplicatas, foi determinado que o número de amostras por grupo de níveis eram 3. Esta afirmação é baseada no baixo poder do teste T para as estimativas dos parâmetros individuais do modelo da ANOVA em pequenos grupos. Desta forma, foi adotado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis com múltiplas comparações para o sistema de areia nova para determinar o impacto dos fatores de resposta (médias ajustadas) dos dados obtidos da MANOVA das areias. Portanto, a análise estatística utilizada para a explicação das interações entre os fatores em cada sistema de moldagem em areia a verde foi a análise mista (paramétrica e não-paramétrica).

Todos os tratamentos estatísticos adotados neste trabalho foram desenvolvidos utilizando os softwares MiniTab® 17, da empresa MiniTab® Inc e JMP® 13, da empresa SAS.

3.5 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE OOLITIZAÇÃO

O processo de oolitização foi avaliado e realizado com corpos de prova confeccionados de acordo com o melhor resultado de propriedades no sistema de areia nova, obtido através do planejamento realizado, de modo a se reproduzir a aplicabilidade em indústrias de fundição. Para isso, os corpos de prova foram avaliados quando expostos à temperatura de 1000 °C, com base nos ciclos apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Ciclos de oolitização aplicados a areia nova.

Tempo do Ciclo
5 minutos
15 minutos
30 minutos
45 minutos
1 hora

O ensaio foi realizado com o auxílio de um suporte de aço baixo carbono, ao qual o corpo de prova compactado de areia a verde com 50mm de diâmetro foi inserido e exposto na mufla. O aparato experimental se encontra na Figura 27.



Figura 27 – Aparato experimental para simulação do processo de oolitização, corpo de prova com 50mm de diâmetro.

Fonte: Autoria própria.

Após esta etapa, os corpos de prova compactados e oolitizados foram fragmentados e destorroados. O material resultante deste processo foi encaminhado para a realização do sifonamento manual, de modo a avaliar apenas a superfície da areia oolitizada, conforme citado em Miksovsky e Lichy (2008).

3.5.1 Análise do Grau de Oolitização

A análise do grau de oolitização foi realizada de acordo com dois métodos. Ambos foram aplicados para os cinco tempos de oolitização citados. Os métodos foram:

- 1) Densidade: de acordo com os autores Miksovsky e Lichy (2008), a relação percentual entre a densidade da areia nova (sem percentual de oolitização) e densidade da areia após a oolitização permite a obtenção do teor de

oolitização. Para a obtenção da densidade, utilizou-se a metodologia apresentada na norma CEMP – ABIFA – número 111, referenciado como CEMP (2015). Entretanto, modificações foram realizadas, como a não exposição do picnômetro em chapas aquecidas, evitando sua descalibração. Além disso, a massa de material adicionada ao picnômetro foi modificada para $5 \pm 0,010$ gramas.

A avaliação da densidade por meio da picnometria consiste na comparação entre a densidade conhecida de um líquido (comumente H₂O destilada) e um material desconhecido. Para isso, foram necessárias medidas separadas em quatro etapas, sendo elas:

m_0 = Massa do picnômetro vazio e seco;

m_1 = Massa do picnômetro + massa da amostra;

m_2 = Massa do picnômetro + amostra + H₂O;

m_3 = Massa do picnômetro + H₂O.

A Equação 12 demonstra a obtenção da densidade por meio da relação entre as massas acima, junto com a densidade do líquido e do ar na temperatura de realização dos testes.

$$\text{Densidade} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m_1 - m_0}{(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)} (\rho_{\text{líquido}} - \rho_{\text{ar}}) + \rho_{\text{ar}} \quad (12)$$

2) Método dos interceptos: com o auxílio do micro estereoscópio, a área das imagens capturadas com escala 100 μm (imagem) foi dividida com 832 interceptos (número total de interceptos em cada imagem), divididos a cada 100 μm na imagem. Desta forma, foi realizada a identificação de grãos oolitizados presentes nos interceptos, e assim, obteve-se a razão entre o número de grãos oolitizados e o número total de interceptos, retornando o grau de oolitização.

A massa utilizada para este método foi de 1 grama, na qual esta foi disposta sobre um vidro relógio e vibrada por 10 movimentos paralelos, dispondo os grãos de maneira aleatória. A captura de imagem foi realizada no ponto central do vidro relógio. O padrão da areia nova é representado na Figura 28.

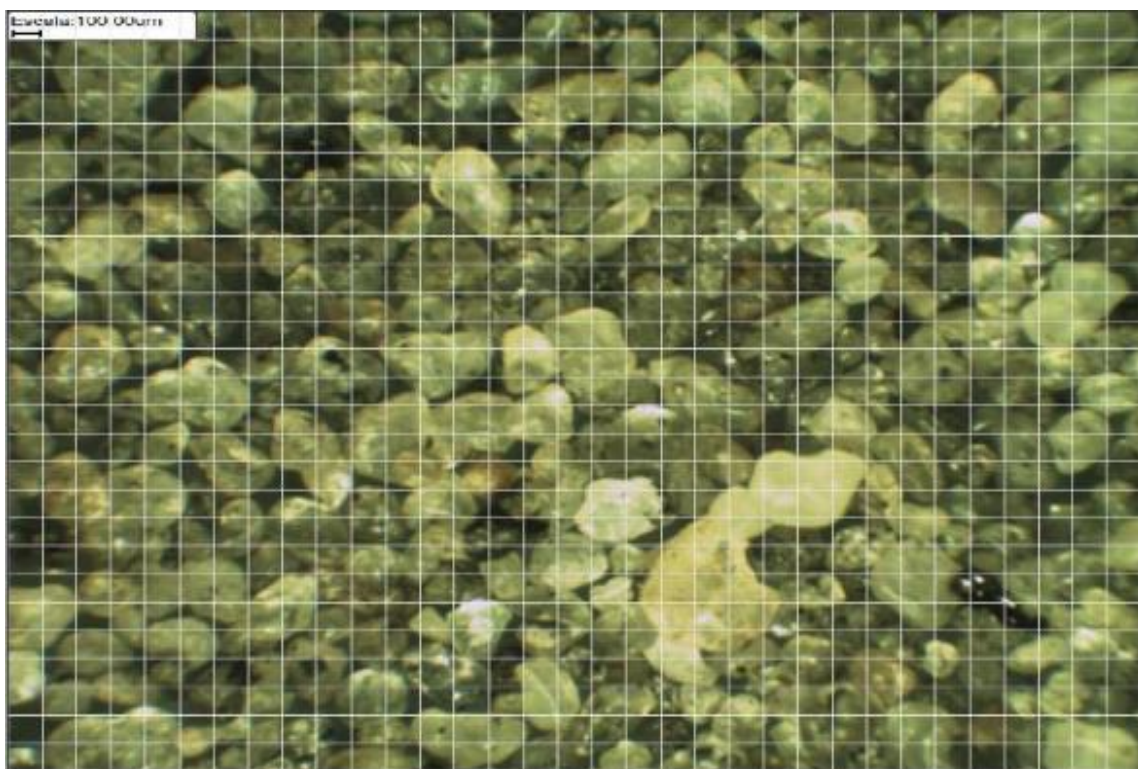


Figura 28 - Metodologia do método dos interceptos para avaliação do grau de oolitização.
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para efeito comparativo entre os resultados obtidos nos procedimentos de caracterização, utilizou-se as Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28 como valores-padrão.

Tabela 26 - Características padrão da areia base utilizada em fundição.

Propriedades/Materiais	Areia base
Umidade (%)	Máx 0,10
Tamanho do grão médio (mm)	0,230 – 0,260
Módulo de Finura (AFS)	55 - 61
Teor de Finos (%)	Máx. 0,1
D50 (mm)	0,188 – 0,211

Fonte: Adaptado de Comissão de Estudos de Matérias Primas (2015)

Tabela 27 - Características da bentonita padrão para moldagem.

PROPRIEDADES	Sódica	Sódica	Sódica	Sódica	Cálcica
	Natural	aditivada Tipo I	aditivada Tipo II	aditivada Tipo III	
Umidade (%)	9-13	9-13	9-13	9-13	9-13
Inchamento (ml/2g)	Mín. 30	Mín. 35	Mín. 30	Mín. 26	
Absorção de azul de metileno (ml/g)	Mín. 100	Mín. 100	Mín 90	Mín. 96	Mín.100
% de partículas grossas #200 (%)	Máx. 15	Máx. 15	Máx. 15	Máx. 15	Máx. 15

Fonte: Adaptado de Comissão de Estudos de Matérias Primas (2015)

Tabela 28 - Características do pó de carvão para fundição.

(continua)

Características/Tipo	AA	A	B	C
Umidade (%)	Máx 6,0	Máx 6,0	Máx 6,0	Máx 6,0
Mat. Voláteis (%)	Mín 34,0	Mín 30,0	Mín 25,0	Mín 20,0
Cinzas (%)	Máx. 12,5	Máx. 14,0	Máx. 20,0	Máx. 30,0

Tabela 28 – Características do pó de carvão mineral moído para fundição.

Características/Tipo	(conclusão)			
	AA	A	B	C
Enxofre (%)	Máx. 1,5	Máx. 1,5	Máx. 1,8	Máx. 3,0
C Vítreo (%)	Mín. 10,0	Mín. 9,0	Mín. 6,0	Mín. 4,0

Fonte: Adaptado de Comissão de Estudos de Matérias Primas (2015)

4.1 ANÁLISES DAS CARACTERIZAÇÕES REALIZADAS

4.1.1 Avaliação da Areia Nova e da Areia de Retorno

Foram realizados três ensaios de granulometria para obtenção do módulo de finura (MF), teor de finos (soma da retenção em porcentagem das peneiras de número 200, 270 e panela) e tamanho de grão médio (TGM) da areia nova, além dos ensaios de umidade e perda ao fogo.

O resumo dos resultados da areia nova (base) e da areia de retorno se encontram na Tabela 29 e 30. Já a curva granulométrica média da areia nova e de retorno se encontram na Figura 29 e 30. Os dados brutos de granulometria se encontram no Apêndice A.

Tabela 29 – Resumo das características físicas da areia nova.

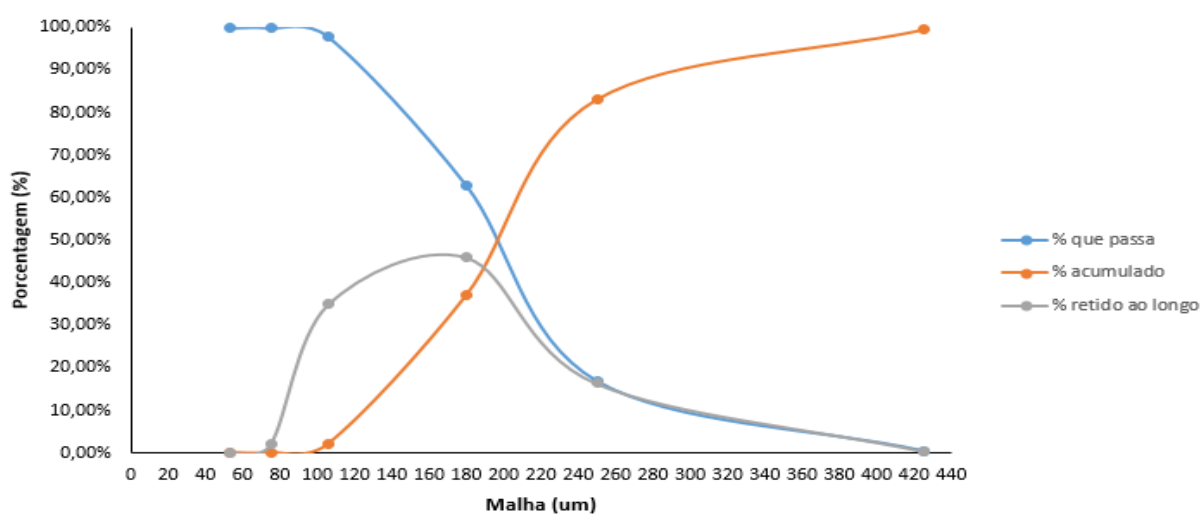
Amostra	Ensaio	Umidade (%)	Perda ao fogo (%)	Módulo de Finura (AFS)	TGM (µm)	Teor de finos (%)
Areia Nova	1	0,03	1,10	66	191,1	2,00
	2	0,02	0,80	65	194,3	2,13
	3	0,05	0,90	66	192,1	3,02
Média		0,03	0,93	66	192,5	2,38
Desvio Padrão Amostral		0,01	0,15	1	1,6	0,55

Fonte: Autoria própria.

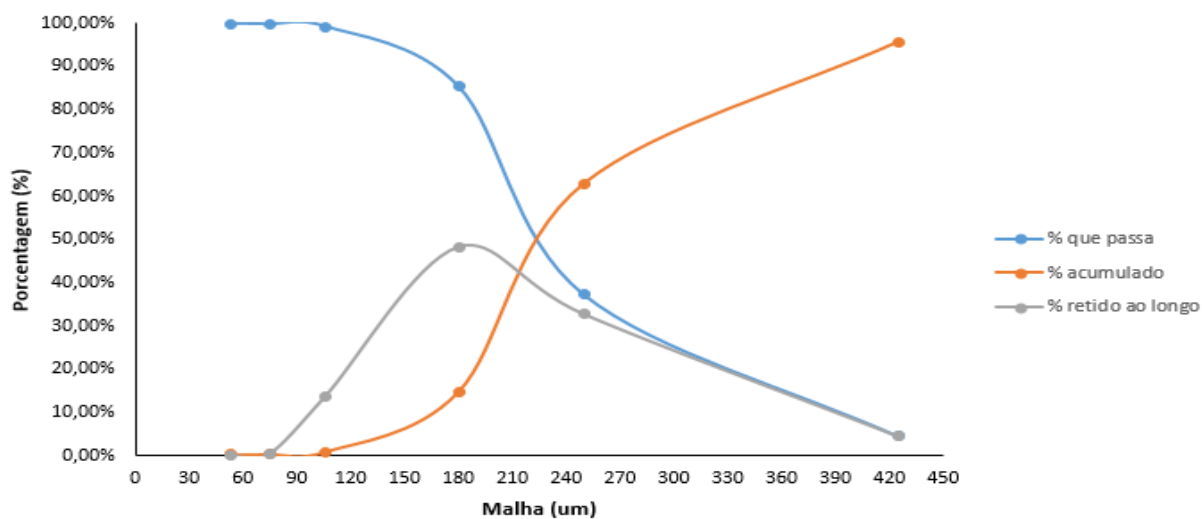
Tabela 30 - Resumo das características físicas da areia de retorno.

Amostra	Ensaio	Umidade (%)	Perda ao fogo (%)	Argila AFS (%)	Módulo de Finura (AFS)	TGM (μm)	Teor de finos (%)
Areia de retorno	1	1,39	3,19	9,60	55	243,8	0,62
	2	1,35	3,36	10,60	57	233,2	0,78
	3	1,35	3,31	9,90	56	241,9	1,38
Média		1,36	3,29	10,10	56	239,6	0,93
Desvio Padrão Amostral		0,03	0,09	0,51	1	5,6	0,40

Fonte: Autoria própria.

**Figura 29 - Curva granulométrica média das amostras de areia nova.**

Fonte: Autoria própria.

**Figura 30 - Curva granulométrica média das amostras de areia de retorno.**

Fonte: Autoria própria.

Em comparação com a Tabela 26, temos que a areia nova está dentro apenas da faixa de umidade. Entretanto, esta variação de resultados representa que o material fornecido pela fundição é diferente do padrão recomendado para os testes, devido as necessidades específicas de suas peças.

Nos resultados de granulometria, verifica-se que o módulo de finura da areia nova é de 66 ± 1 AFS, enquanto o módulo da areia de retorno é de 56 ± 1 AFS, comportamento esperado devido aos ciclos de moldagem impostos na areia de retorno, promovendo o aumento do tamanho de grão médio. Este comportamento é confirmado com o cálculo de tamanho de grão médio, no qual resultou em $192,5 \pm 1,6$ μm para a areia nova e $239,6 \pm 5,6$ μm para a areia de retorno, representando um crescimento de tamanho de grão de aproximadamente 19,60%. Este crescimento é explicado pelo fenômeno de oolitização, que conforme descrito anteriormente, promove a aderência de camadas de argila sob a superfície dos grãos de areia, aumentando o seu tamanho.

Com base na Figura 29, curva granulométrica para a areia nova, é possível verificar que a concentração de grãos nas peneiras 60, 80 e 140 é de quase 80%. Já para a Figura 30, curva granulométrica da areia de retorno, verifica-se que este valor está em torno de 70%. Segundo (OLIVEIRA, 2013) *apud* (DOYLE, 1978), uma concentração de grãos de superior a 70% nas peneiras de 60, 80 e 140 (grãos de alto tamanho de grão) indica uma tendência a apresentar alta expansão térmica, o que como já demonstrado no referencial teórico, é indesejado para peças metálicas, devido ao surgimento de defeitos nas superfícies dos fundidos. Portanto, pode-se afirmar que a expansão da areia nova é superior que a expansão da areia de retorno. Este comportamento é explicado devido a inclusão da camada de argila sob a superfície dos grãos de sílica, exercendo forças superficiais que minimizam sua expansão, quando comparado com a superfície sem argila.

Um ponto de atenção dos resultados foi o percentual de finos. É possível verificar que este percentual é maior para a areia nova do que para a areia de retorno, no qual deveria se comportar de forma inversa, devido a adição contínua de aditivos na moldagem. Este comportamento é explicado pelo fato da passagem da areia de retorno por um exaustor, o qual retira os finos antes de entrar para o processo de mistura. Desta forma, foi levantada a hipótese da verificação da perda ao fogo, inchamento e absorção de azul de metileno dos finos recebidos da fundição, de modo a verificar o percentual de argila que possivelmente é descartada no exaustor,

além do percentual de carvão. Os resultados desta investigação foram demonstrados no último item do tópico 4.

4.1.2 Análise da Morfologia da Areia Nova e da Areia de Retorno

A avaliação da morfologia dos grãos de areia foi realizada para se obter um efeito comparativo entre a literatura, representado na Figura 7, a areia nova sem exposição ao vazamento de metal líquido e a areia de retorno. Além disso, avaliou-se os grãos de maior retenção nas classificações granulométricas. Por exemplo, peneiras 60, 80 e 140, de acordo com os resultados de granulometria da Tabela 29 e Tabela 30. A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 representam as comparações entre areia nova e de retorno, em mesh 60, 80 e 140, respectivamente.

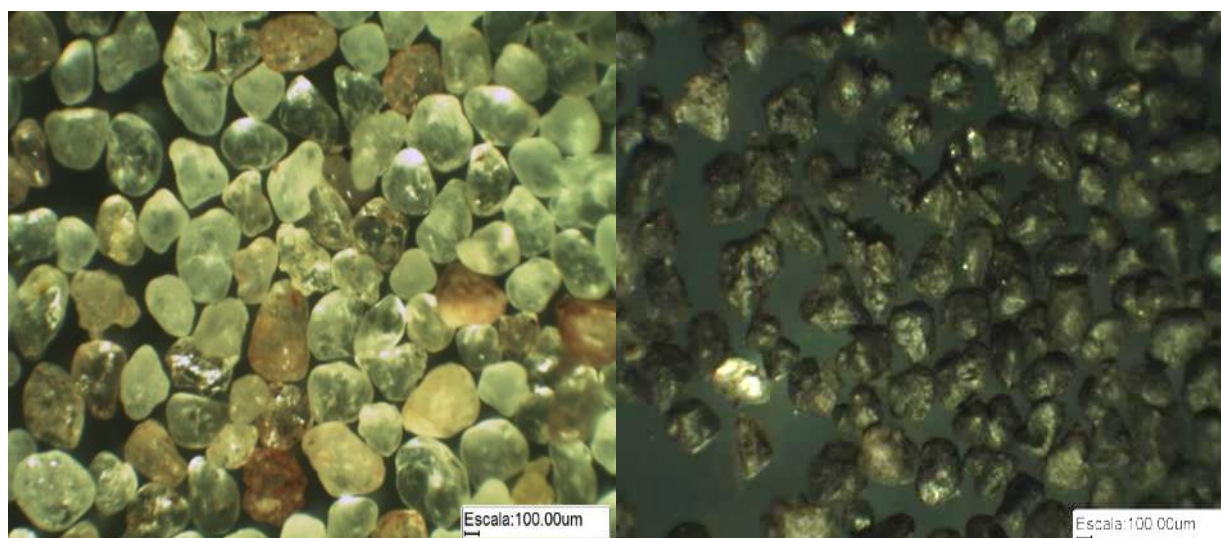


Figura 31 – Morfologia dos grãos em mesh 60 - Areia nova (direita) e areia de retorno (esquerda) – aumento de 3,6 vezes – escala de 100 µm.

Fonte: Autoria própria.

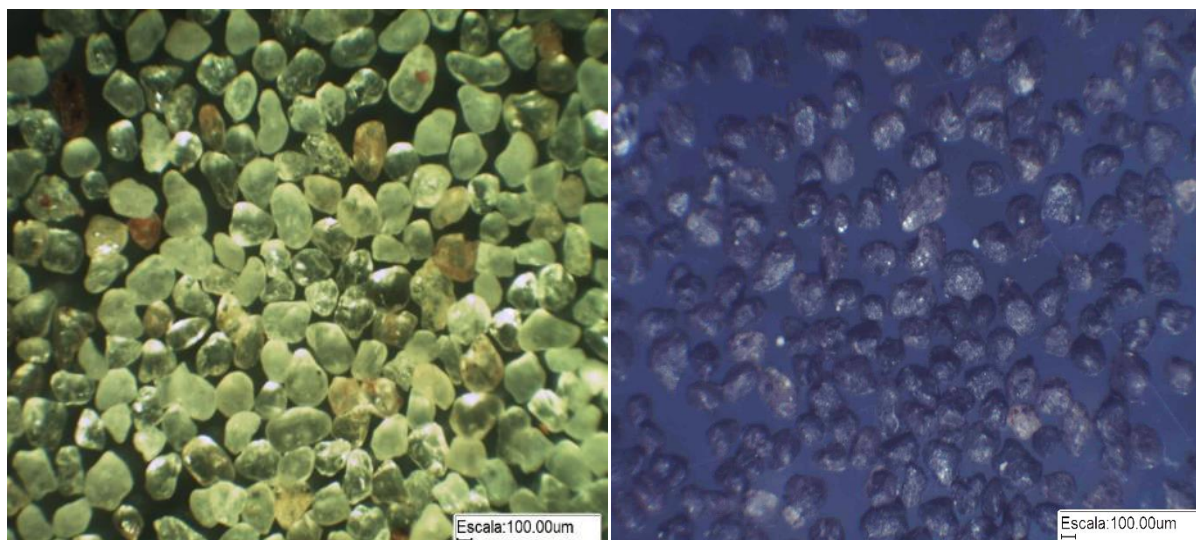


Figura 32 – Morfologia dos grãos em mesh 80 - Areia nova (direita) e areia de retorno (esquerda) – aumento de 3,6 vezes – escala de 100 μ m.

Fonte: Autoria própria.

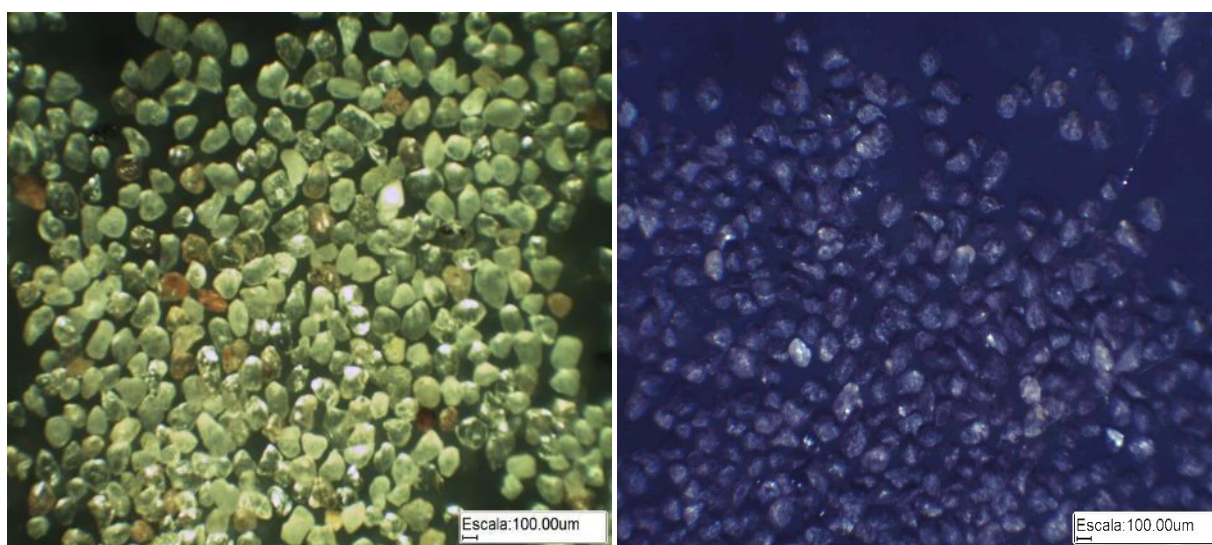


Figura 33 – Morfologia dos grãos em mesh 140 - Areia nova (direita) e areia de retorno (esquerda) – aumento de 3,6 vezes – escala de 100 μ m.

Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 31, temos uma morfologia 4-2 e 4-3 (pouco redondos de baixa e média esfericidade) para a areia nova. Entretanto, para a areia de retorno, a morfologia é 2-2, 2-3 e 3-2 (angulares e sub-angulares de baixa e média esfericidade).

Já na Figura 32, nota-se morfologias 3-2, 4-2 e 4-3 (sub-angulares de média esfericidade com sub-redondos de média e baixa esfericidade) para a areia nova. Para a areia de retorno, nota-se morfologias 2-2, 2-3 e 3-3.

Para a Figura 33, temos de forma predominante a morfologia 4-1 e 4-2 (sub-redondos de alta esfericidade) para a areia nova. Para a areia de retorno, verifica-se que as morfologias 4-2 até 2-2.

Estes fenômenos de mudança de morfologia estão associados a oolitização. O coeficiente de angularidade dos grãos, isto é, quão diferente a superfície real de um grão ou um conjunto de grãos é da superfície teórica, pode ser correlacionado com a oolitização, pois quanto mais ciclos de moldagem a areia sofre, maior a ocorrência de clivagem dos grãos e conseqüentemente, aumento da angularidade dos mesmos, o que afeta a escoabilidade entre grãos, avaliada pela compactabilidade.

Além deste fenômeno, ocorre também o aumento do tamanho de grão médio e a geração de aglomerados após os ciclos de oolitização, conforme representado na Figura 34. Quanto mais ciclos realizados, maior será a ocorrência destes fenômenos. Apesar da separação destes aglomerados ser relativamente fácil quando seca e moldada, o acúmulo dos mesmos sob a superfície da areia de faceamento leva a geração de defeitos em peças metálicas, como pinholes e sinterização, demonstrado na Figura 11.

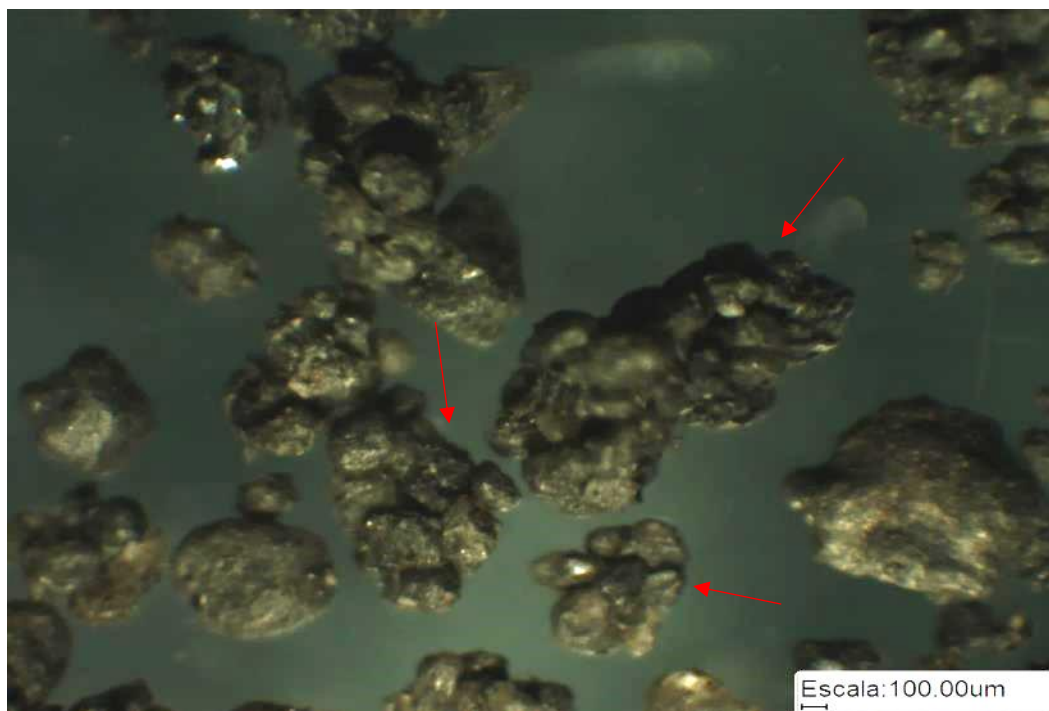


Figura 34 - Areia de retorno em mesh 40 - aumento de 3,6 vezes – escala de 100 µm.
Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Análise da Bentonita

Com base na Tabela 27, foram realizados em triplicata os ensaios de caracterização da bentonita para efeito comparativo. O resumo dos resultados obtidos está representado na Tabela 31.

Tabela 31 - Dados obtidos nos ensaios de bentonita.

Amostras	Umidade (%)	Inchamento (ml/2g)	Retenção #200	Módulo AFS
1	10,66	1 hora: 27 24 horas: 29	7,34	272
2	11,71	1 hora: 29 24 horas: 30	7,71	267
3	13,38	1 hora: 28 24 horas: 30	6,83	269
Média	11,91	1 hora: 28 24 horas: 30	7,29	269
Desvio Padrão Amostral	1,38	24 horas: 0,6	0,44	2,51

Desta forma, com base na Tabela 19, podemos classificar que o inchamento da bentonita é alto. A Figura 35 representa o ensaio. O inchamento da bentonita pouco varia entre 1 hora e 24 horas. Logo, é possível induzir que seu comportamento em mistura é muito sensível, pois o procedimento de mistura normalmente é realizado em menos de uma hora. Assim, deve-se ressaltar a importância de que a mistura seja feita de forma adequada e que os grãos de argila permaneçam sob a superfície da areia, garantindo as propriedades mecânicas necessárias para performance adequada do molde.

O resultado do ensaio de capacidade de troca catiônica e os valores adsorção de azul de metileno (A.A.M.) da bentonita, areia de retorno e finos estão descritos na Tabela 32. Os ensaios para a bentonita e para a areia de retorno estão representados na Figura 36 e 37.

Tabela 32 - Resultados obtidos pelo ensaio de CTC.

Amostras	Bentonita	Areia de retorno
Teor de argila ativa (%)	100	9,31
Volume de azul de metileno (mL)	150,3	14
Massa (g)	2,003	2,006
A.A.M (ml/g)	75	6,98
CTC (meq/100g)	75	
Superfície específica (m ² /g)	561	52,2

Fonte: Autoria própria.



Figura 35 - Inchamento de bentonita após 24 horas.
Fonte: Autoria própria.

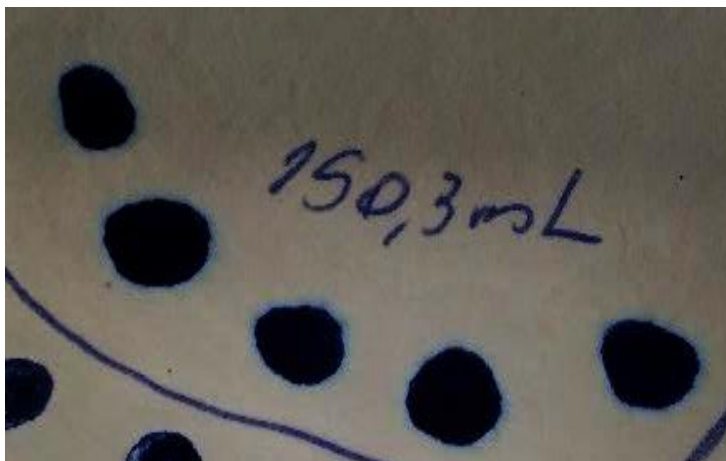


Figura 36 - Adorção de azul de metileno para bentonita pura.
Fonte: Autoria própria.

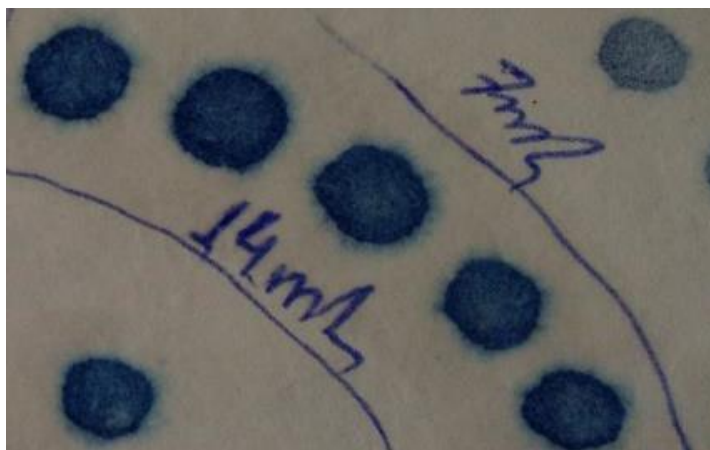


Figura 37 – Ensaio de capacidade de troca catiônica para areia de retorno
Fonte: Autoria própria.

Apesar do resultado de A.A.M. for menor do que o esperado para os valores padrões apresentados na Tabela 27, pode-se verificar que os valores mais próximos aos resultados obtidos estão entre as bentonitas sódicas ativadas do tipo II e do tipo III. Logo, com os resultados obtidos, é possível concluir que classificar a bentonita recebida pela fundição como Bentonita Sódica Aditivada tipo II ou tipo III. Ensaio de resistência a compressão a verde permitiriam afirmar qual o tipo de bentonita exato, em vista que a variação destas propriedades quando aplicadas em areia a verde são diferentes.

4.1.4 Análises do Pó de Carvão Mineral Moído

Os resultados obtidos para as análises de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo estão descritos na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados obtidos após análises no carvão.

Amostras	% umidade	% Materiais voláteis	% cinzas	% Carbono Fixo
1	1,52	52,24	8,49	37,74
2	1,21	51,86	8,30	38,31
3	2,16	52,72	8,39	37,37
Média	1,63	52,27	8,39	37,81
Desvio Padrão Amostral	0,48	0,43	0,10	0,47

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, com base na Tabela 28, concluiu-se que o carvão mineral moído fornecido é do tipo AA, devido ao alto conteúdo de materiais voláteis e ao baixo percentual de cinzas. Para o cálculo exato do carbono fixo presente na amostra, era necessário a realização do ensaio de obtenção do percentual de enxofre. Entretanto, este não foi realizado, pois é possível identificar que a amostra não poderia ser de nenhum outro tipo de carvão, com base no percentual de cinzas obtido.

Em adição, é possível verificar que o conteúdo de carbono no carvão do tipo AA é superior aos demais. Este nível superior permite a obtenção de melhores superfícies de peças metálicas, devido a geração da atmosfera entre a areia de faceamento e o metal líquido, de modo a garantir uma solidificação adequada para cada tipo de peça.

4.1.5 Caracterização do Sistema de Areia de Retorno

Com base na Tabela 30 e 32, temos os teores de argila AFS, bentonita ativa, finos inertes e perda ao fogo. Os finos inertes são resultado da subtração entre argila AFS e bentonita ativa. Já o teor de areia é obtido pela subtração de cem e o somatório de argila AFS e perda ao fogo. Estes resultados são descritos na Tabela 34. Foi utilizada a massa de 50 gramas como base para representação dos cálculos de cada massa constituinte do sistema de areia de retorno.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios de sifonamento, perda ao fogo e A.A.M.

Amostra	Argila AFS (%)	Bentonita ativa (%)	Finos inertes (%)	Perda ao fogo (%)	Sílica (%)
Areia de retorno	10,10	9,31	0,79	3,29	86,6
Massa (g)	5,05	4,65	0,39	1,65	43,3

Fonte: Autoria própria.

Como citado anteriormente, o teor de argila AFS quantifica a presença dos finos inertes e de aditivos presentes no sistema. A perda ao fogo determina o teor de materiais orgânicos, neste caso, o teor de carvão. A bentonita ativa representa o nível disponível para atuação deste material como ligante no sistema. A subtração entre teor de argila AFS e a bentonita ativa permite a quantificação dos finos inertes, já definidos anteriormente. Desta forma, a parcela faltante para completar o sistema de moldagem é composta, predominantemente, de areia de sílica.

Portanto, o sistema de areia de retorno recebido possui por volta de 9,31% de argila que contribuirá para uma moldagem futura, denominada de argila ativa. É importante se ressaltar que, conforme ciclos de moldagem são concluídos, os grãos oolíticos se tornam cada vez mais presentes e a quantidade de nível de aditivo a ser adicionada também aumenta, pois, a restauração do sistema com base nos níveis iniciais de produção se torna não possível e assim, maiores quantidades de materiais são incorporadas ao sistema, de modo a garantir que as propriedades do molde estejam de acordo com o padrão especificado.

Portanto, a caracterização completa do sistema de areia de retorno permite visualizar e definir a adição de aditivos na etapa de uma nova moldagem. Logo, novos teores de bentonita e carvão são adicionados em função do teor de bentonita ativa e da perda ao fogo, respectivamente. Tais medidas vão proporcionar a restauração de propriedades básicas de um molde, citadas no item 2.4, permitindo a realização de uma peça fundida adequada.

4.2 PROPRIEDADES DE APLICAÇÃO

4.2.1 Avaliação da Compactabilidade, Permeabilidade e Dureza – Areia Nova e Areia de Retorno

Conforme explicado no item de planejamento experimental, foram realizados modelos de planejamento de experimentos do tipo Fatorial Completo 3^3 para a areia nova e 2^4 para a areia de retorno. Os ensaios foram realizados de maneira aleatória, de modo a garantir a imparcialidade dos fatores. Além disso, utilizou-se uma massa suficiente para possibilitar a realização de três ensaios de cada propriedade, de modo a permitir a análise estatística.

Foi adotado como padrão de comparação para a areia nova, o sistema com 5% de bentonita e 2,25% de água, com compactabilidade em 46%, permeabilidade em $85,2 \frac{cm^4}{g.min}$ e dureza igual a 78 AFS, da escala B de dureza (AFS-B), realizado com base na recomendação de mistura padrão para areias, número 068, retirada de CEMP. Já para a areia de retorno, utilizou-se como padrão o sistema com 2% de água, adicionados a 1,2% de bentonita, 0,5% de carvão, somados aos valores calculados da Tabela 34, que representam os valores de aditivos presentes na areia como recebida. As propriedades foram de 33% de compactabilidade, permeabilidade de $68,2 \frac{cm^4}{g.min}$ e dureza igual a 91 AFS – B. A Tabela 35 apresenta os resultados dos experimentos do planejamento fatorial para areia nova, em que R1, R2 e R3 são as réplicas dos experimentos.

Tabela 35 – Dados obtidos para o planejamento da areia nova.

Item	Compactabilidade (%)			Permeabilidade (cm ⁴ /g.min)			Dureza (AFS-B)		
	Un.	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	38	41	41	58,2	56,1	57,9	81	81	82
2	35	37	37	59,0	60,8	58,1	78	80	80
3	45	44	44	73,4	72,7	73,8	81	79	81
4	45	46	45	63,7	61,5	62,5	90	90	88
5	36	42	44	60,8	53,4	61,4	76	82	82
6	41	43	43	68,0	70,4	66,8	87	87	89
7	39	37	38	59,0	55,6	54,1	90	90	90
8	42	41	38	55,1	53,5	53,1	91	91	88
9	40	39	37	55,1	53,9	52,1	90	91	90
10	44	44	45	68,2	66,0	66,9	81	79	74
11	46	45	45	73,2	71,5	72,6	79	81	81
12	46	46	47	71,1	65,8	71,5	85	84	83
13	43	44	44	57,3	56,2	56,3	85	86	85
14	49	47	49	73,3	66,6	70,5	84	87	82
15	50	48	50	77,7	74,4	81,7	88	87	88
16	46	46	46	57,5	60,3	57,8	89	88	89
17	50	50	49	69,1	67,2	69,9	88	88	89
18	45	46	44	61,1	61,7	60,3	91	92	90
19	52	53	52	81,8	81,2	85,6	80	75	73
20	51	50	51	78,0	78,1	77,6	80	79	80
21	49	49	48	72,7	70,2	69,5	83	85	80
22	41	44	43	54,6	56,2	60,5	80	81	81
23	54	52	53	80,4	76,3	76,8	87	85	84
24	54	54	54	84,4	85,3	84,0	88	88	87
25	46	45	47	63,2	63,6	61,3	88	87	87
26	54	55	55	73,0	76,0	75,7	89	88	89
27	48	49	49	78,2	76,2	79,6	88	87	88

Fonte: Autoria própria.

Os resultados de propriedades para o sistema de areia de retorno se encontram na Tabela 36.

Tabela 36 - Dados obtidos de performance do sistema de areia de retorno.

Item	Compactabilidade (%)			Permeabilidade (cm ⁴ /g.min)			Dureza (AFS-B)		
	Un.	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	45	47	46	68,3	65,3	67,0	92	90	92
2	44	41	41	67,6	69,5	69,5	93	92	92
3	43	43	42	71,0	70,1	68,0	92	93	92
4	59	58	59	76,3	80,1	78,9	92	92	92
5	62	61	60	91,2	88,0	88,0	94	93	93
6	49	50	49	60,7	60,4	62,0	93	92	93
7	60	61	61	76,2	72,2	72,1	92	92	91
8	61	61	61	85,2	84,2	86,0	92	91	92
9	57	59	59	68,1	71,2	69	92	90	92
10	62	63	62	78,1	78,3	790	90	92	91
11	62	62	62	91,1	90,1	93,7	91	90	91
12	43	45	45	65,2	62,7	64,4	92	90	92
13	55	55	55	74,8	78,1	80,6	91	92	91
14	53	51	51	88,0	86,1	86,5	92	91	92
15	54	54	53	82,6	86,1	84,3	93	91	90
16	61	62	62	78,6	76,3	75,7	91	90	90

Fonte: Autoria própria.

Os erros de compactabilidade e dureza são o valor obtido $\pm 1\%$, enquanto para permeabilidade, valor obtido $\pm 0,1$ (cm⁴/g.min). Foi assumido como alvos de propriedades, para ambos sistemas, os valores de compactabilidade mínima de 35%, permeabilidade mínima de $80 \frac{cm^4}{g.min}$ e dureza mínima de 85 AFS-B.

Com os dados obtidos, foi utilizado os softwares citados na metodologia para promover o tratamento estatístico adequado. A primeira etapa foi a verificação da normalidade dos resíduos. A Figura 38 a 40 representam os testes de normalidades para a areia nova e areia de retorno, baseada nos resíduos das respostas de compactabilidade, permeabilidade e dureza. O teste de normalidade adotado foi o de Anderson-Darling, com critério de índice de normalidade presente quando o valor P for maior que 0,05.

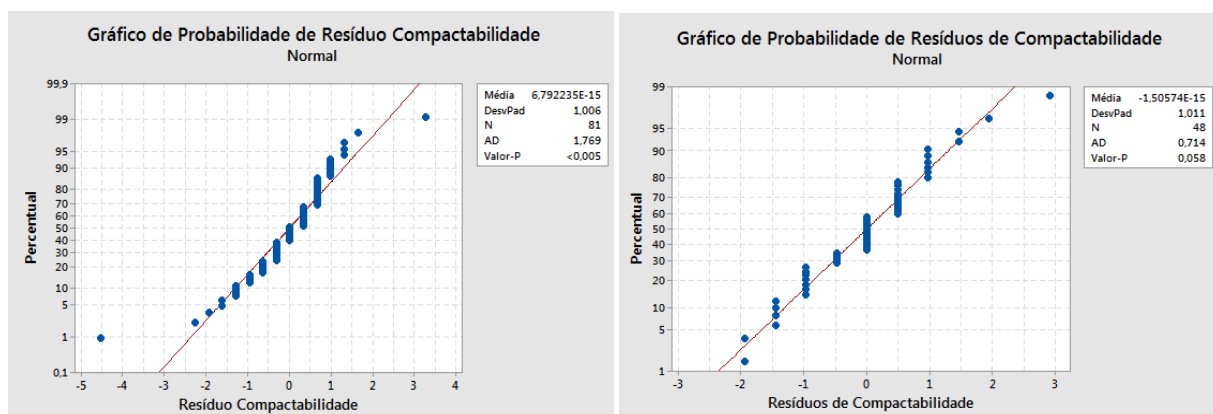


Figura 38 - Teste de normalidade para propriedade de compactabilidade da areia nova (esquerda) e de retorno (direita).
Fonte: Autoria própria.

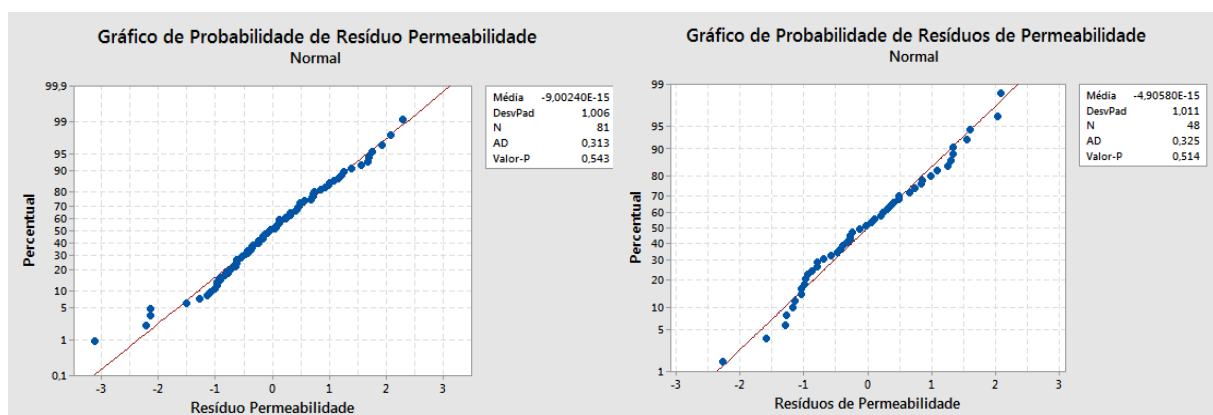


Figura 39 – Teste de normalidade para propriedade de permeabilidade da areia nova (esquerda) e de retorno (direita).
Fonte: Autoria própria.

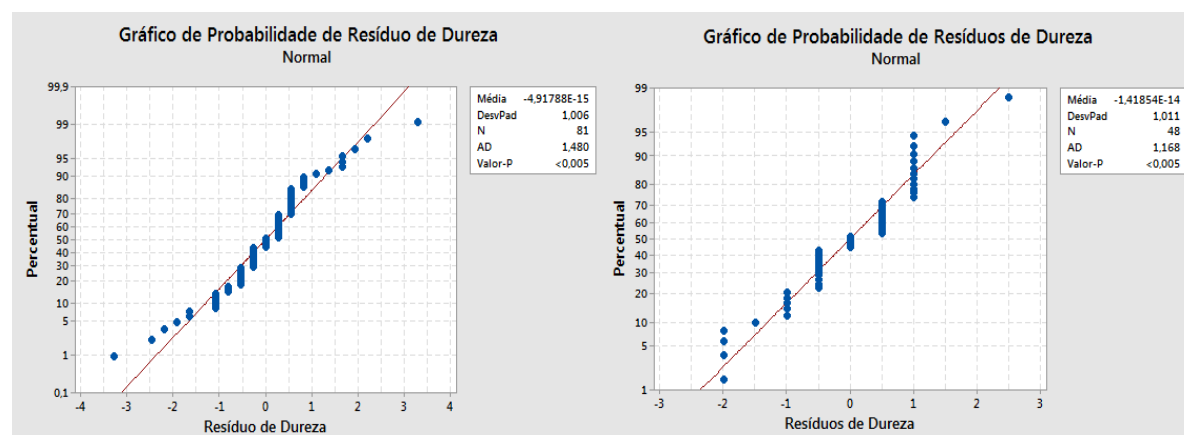


Figura 40 - Teste de normalidade para propriedade de permeabilidade da areia nova (esquerda) e de retorno (direita).
Fonte: Autoria própria.

Foi observada a não normalidade nos resíduos de compactabilidade para a areia nova e nos resíduos de dureza, tanto para areia nova, quanto para a areia de retorno. Conforme citado na metodologia, a ausência de normalidade não faz com que o teste F se torne insignificante caso a variabilidade esteja distribuída de forma aleatória e sem grupos de aglomerados. Desta forma, a variabilidade foi avaliada com base nos valores médios obtidos e seu desvio padrão. A Figura 41, 42 e 43 representam esta análise para cada tipo de areia.

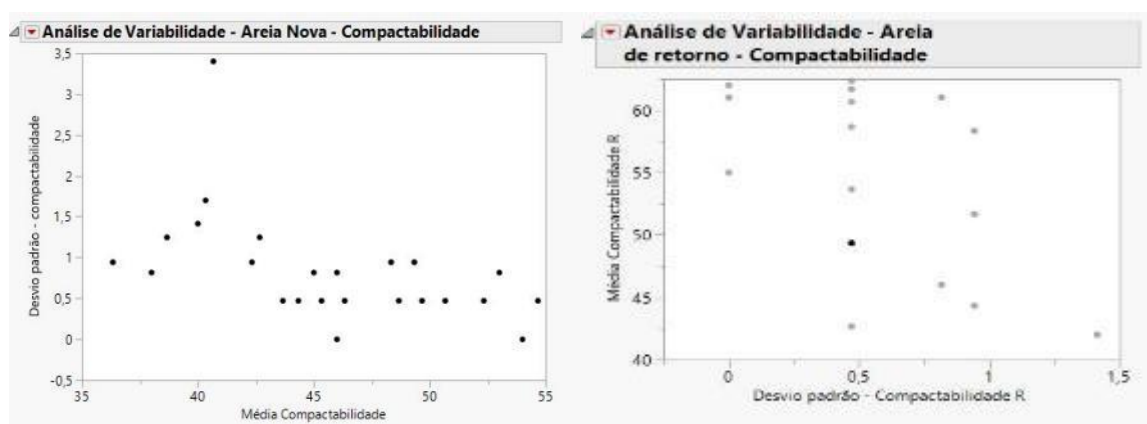


Figura 41 – Análise de variabilidade para areia nova (esquerda) e de retorno (direita), baseada no desvio padrão amostral junto com a média da propriedade de compactabilidade.
Fonte: Autoria própria.

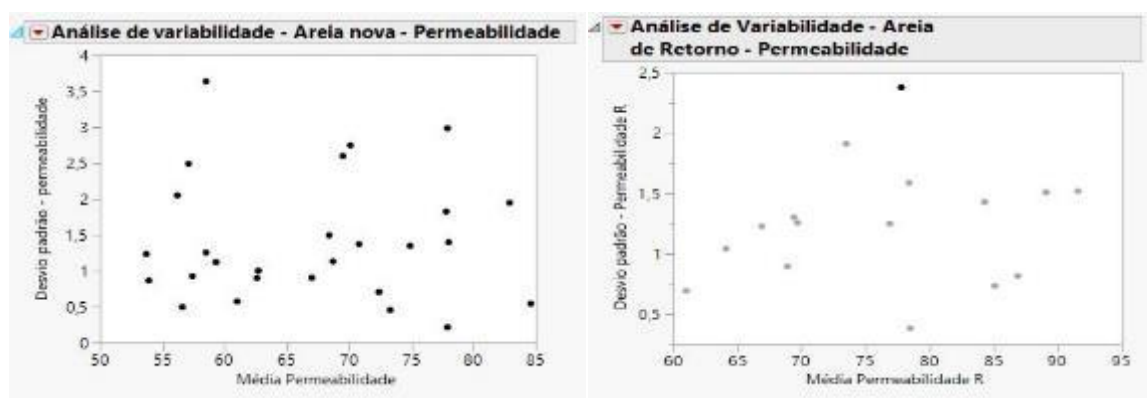


Figura 42 – Análise de variabilidade para areia nova (esquerda) e de retorno (direita), baseada no desvio padrão amostral junto com a média da propriedade de permeabilidade.
Fonte: Autoria própria.

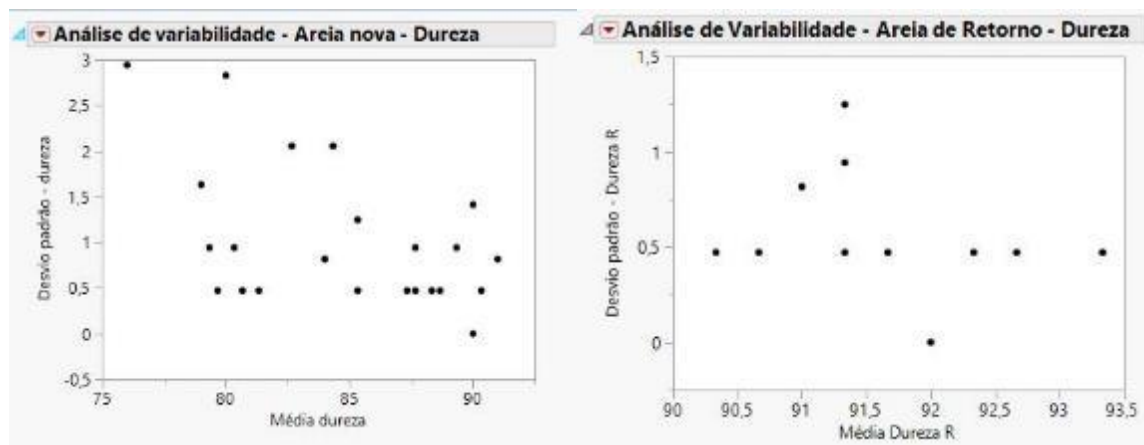


Figura 43 – Análise de variabilidade para areia nova (esquerda) e de retorno (direita), baseada no desvio padrão amostral junto com a média da propriedade de permeabilidade.
Fonte: Autoria própria.

Apesar da verificação de um comportamento quase não homogêneo da compactabilidade da areia de retorno, realizou-se o teste para verificação da assimetria dos dados, de modo a confirmar a possibilidade de aplicação de análises paramétricas para explicação das interações entre fatores. O resultado do teste de assimetria e curtose se encontra na Tabela 37.

Tabela 37 - Teste de assimetria para os resíduos de areia nova e de retorno.

	Grupos	Assimetria	Curtose
Areia nova - Compactabilidade	81	-1,01861	5,21046
Areia nova - Permeabilidade	81	-0,214714	0,621805
Areia nova – Dureza	81	-0,151642	2,16310
Areia de retorno - Compactabilidade	48	0,235699	0,355664
Areia de retorno - Permeabilidade	48	0,0535733	-1,07610
Areia de retorno - Dureza	48	-0,225871	-0,176676

Fonte: Autoria própria.

Portanto, com base nos dados de assimetria e curtose da areia nova, afirma-se que a assimetria dos dados é significativa apenas para a compactabilidade da areia nova. Já a curtose é significativa para a compactabilidade e a dureza da areia nova, pois representam uma distribuição platicúrtica, a qual apresentam frequências dos dados amostrais distribuídos de forma quase iguais.

Desta forma, aliados aos demais testes citados acima, foi adotado o tratamento misto para a areia nova, sendo dividido em paramétrico (MANOVA) para modelagem dos dados de interação das três propriedades, utilizando o modelo não-paramétrico para avaliar as respostas de compactabilidade e dureza, baseado nos testes de Kruskal-Wallis e o próprio paramétrico para avaliação da interação da permeabilidade.

Já para a areia de retorno, adotou-se a análise de variância multivariada (MANOVA), devido aos baixos índices de assimetria e curtose, o que não afeta a robustez do teste T e F.

4.2.1.1 Análise da Interação entre os Níveis dos Fatores da Areia Nova – Teste de Kruskal-Wallis

Foi adotada a sequência de tratamentos que estão dispostas na Tabela 38. A hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) foram definidas com base nos níveis de água e são descritas a seguir.

$H_0 =$ *As respostas são iguais nos diferentes níveis*

$H_1 =$ *As respostas se diferem nos diferentes níveis*

Para calcular o valor do teste H de Kruskal-Wallis, é necessário a consulta na tabela de distribuição H de Kruskal-Wallis, retirada de Iman, Quade e Alexander (1975). Assim, com base nos experimentos, temos que $n_1 = n_2 = n_3 = 3$. Logo, temos uma dimensão amostral 3, 3, 3. Com o nível alfa igual a 0,05 ($\alpha = 0,05$) e dimensão amostral 3, 3, 3, o valor de $H_{\text{crítico}}$ é igual a 5,6.

Os tratamentos foram comparados entre três grupos, fixando os fatores Bentonita e Carvão e variando os valores do fator Água, com base na ordem da Tabela 38. Esta disposição permitiu o cálculo de H para cada um dos grupos, de modo individual para cada uma das respostas, com auxílio do MiniTab. Os valores de H para compactabilidade estão descritos na Tabela 39. Como decisão, devemos

assumir os valores de H e compará-los com os críticos, permitindo o teste de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O critério de decisão é escrito abaixo.

$$H_{\text{Calculado}} > H_{\text{Crítico}} : \text{Rejeita} - \text{se } H_0 \text{ e se assume } H_1;$$

$$H_{\text{Calculado}} < H_{\text{Crítico}} : \text{Aceita} - \text{se } H_0.$$

Tabela 38 – Sequência de tratamentos para o teste de Kruskal-Wallis.

Tratamento	Bentonita	Carvão	Água	Tratamento	Bentonita	Carvão	Água
1	7,00%	2,00%	3,00%	15	8,50%	3,00%	4,00%
2	7,00%	2,00%	3,50%	16	8,50%	3,50%	3,00%
3	7,00%	2,00%	4,00%	17	8,50%	3,50%	3,50%
4	7,00%	3,00%	3,00%	18	8,50%	3,50%	4,00%
5	7,00%	3,00%	3,50%	19	10,00%	2,00%	3,00%
6	7,00%	3,00%	4,00%	20	10,00%	2,00%	3,50%
7	7,00%	3,50%	3,00%	21	10,00%	2,00%	4,00%
8	7,00%	3,50%	3,50%	22	10,00%	3,00%	3,00%
9	7,00%	3,50%	4,00%	23	10,00%	3,00%	3,50%
10	8,50%	2,00%	3,00%	24	10,00%	3,00%	4,00%
11	8,50%	2,00%	3,50%	25	10,00%	3,50%	3,00%
12	8,50%	2,00%	4,00%	26	10,00%	3,50%	3,50%
13	8,50%	3,00%	3,00%	27	10,00%	3,50%	4,00%
14	8,50%	3,00%	3,50%				

Fonte: Autoria própria.

Tabela 39 – Teste de Kruskal-Wallis para compactabilidade.

Grupos de Tratamento	Compactabilidade ($H_{\text{calculado}}$)	Decisão	Dureza ($H_{\text{calculado}}$)	Decisão
1, 2 e 3	7,38	Rejeita H_0	5,24	Aceita H_0
4, 5 e 6	7,38	Rejeita H_0	1,56	Aceita H_0
7, 8 e 9	7,38	Rejeita H_0	3,92	Aceita H_0
10, 11 e 12	6,06	Rejeita H_0	7,38	Rejeita H_0
13, 14 e 15	7,26	Rejeita H_0	4,87	Aceita H_0
16, 17 e 18	7,58	Rejeita H_0	0,08	Aceita H_0
19, 20 e 21	5,89	Rejeita H_0	7,24	Rejeita H_0
22, 23 e 24	7,32	Rejeita H_0	1,85	Aceita H_0
25, 26 e 27	7,26	Rejeita H_0	6,06	Rejeita H_0

Com base nas decisões da Tabela 39, podemos confirmar que temos evidências estatísticas que os valores das medianas dos grupos são diferentes e, portanto, a compactabilidade é diferente para os três níveis de água. Assim, tornou-se necessária a realização de comparações pareadas, com base na Equação 3, de acordo com a subtração dos postos assumidos no teste de Kruskal-Wallis, dispostos na Tabela 40. Já para a dureza, apenas três grupos apresentaram diferenças, sendo o tratamento pareado apresentado na Tabela 41. Para mais informações de como são calculados os postos para este teste, recomenda-se o acesso ao trabalho de Viali (2008). Desta forma, a hipótese nula assumida foi a mesma citada anteriormente. O valor crítico para este teste pareado foi calculado de acordo com a metodologia descrita no artigo de Rublík (2001). Este valor, representado pela sigla $Ca(n)$, foi de 15,7, devido aos três grupos e três variáveis.

Tabela 40 – Diferença dos postos de compactabilidade baseados no teste de Kruskal-Wallis. (continua)

Comparação	$|S_i - S_j| \leq Ca(n)$ para compactabilidade	Decisão
1 com 2	9	Aceita H_0
1 com 3	18	Rejeita H_0
2 com 3	9	Aceita H_0
4 com 5	9	Aceita H_0
4 com 6	18	Rejeita H_0
5 com 6	9	Aceita H_0
7 com 8	9	Aceita H_0
7 com 9	18	Rejeita H_0
8 com 9	9	Aceita H_0
10 com 11	16	Rejeita H_0
10 com 12	11	Aceita H_0
11 com 12	5	Aceita H_0
13 com 14	9	Aceita H_0
13 com 15	18	Rejeita H_0
14 com 15	9	Aceita H_0
16 com 17	9	Aceita H_0
16 com 18	18	Rejeita H_0
17 com 18	9	Aceita H_0
19 com 20	13,5	Aceita H_0
19 com 21	13,5	Aceita H_0
20 com 21	0	Aceita H_0

Tabela 40 - Diferença dos postos de compactabilidade baseados no teste de Kruskal-Wallis (conclusão)

Comparação	$|S_i - S_j| \leq Ca(n)$ para compactabilidade	Decisão
22 com 23	9	Aceita H_0
22 com 24	18	Rejeita H_0
23 com 24	9	Aceita H_0
25 com 26	9	Aceita H_0
25 com 27	18	Rejeita H_0
26 com 27	9	Aceita H_0

Fonte: Autoria própria.

Tabela 41 - Comparações pareadas para a resposta de dureza nos diferentes níveis de água.

Comparação entre grupos	$|S_i - S_j| \leq Ca(n)$	Decisão
10 e 11	9	Aceita H_0
10 e 12	18	Rejeita H_0
11 e 12	9	Aceita H_0
19 e 20	9,5	Aceita H_0
19 e 21	17,5	Rejeita H_0
20 e 21	8	Aceita H_0
25 e 26	4	Aceita H_0
25 e 27	11,5	Aceita H_0
26 e 27	15,5	Aceita H_0

Fonte: Autoria própria.

Logo, é possível ver que predominantemente que, para a compactabilidade, os grupos com níveis de água em 3,00% e 4,00% possuem diferenças estatísticas significativas, as quais nos levam a afirmar que existem evidências estatísticas de que as diferenças entre estes níveis de água interferem na propriedade de compactabilidade. Apenas o grupo de tratamentos 19, 20 e 21 (com bentonita em 10% e carvão em 2%), permite inferir que a compactabilidade é afetada entre os níveis de 3,00% e 3,50%, além de 3,00% e 4,00%, enquanto a resposta se permanece não afetada no nível restante. Já para a dureza, apenas dois grupos mostraram evidências estatísticas significativas, sendo os níveis de 8,5% e 10% de bentonita com 2% de carvão entre os valores de dureza entre água em 3,00% e 4,00%. Estes comportamentos podem ser observados na Figura 44 para a

compactabilidade e para a dureza, a Figura 45. A bentonita varia de acordo com a coloração, sendo 7%, 8,5% e 10% as cores azul, vermelha e verde, respectivamente e os níveis de carvão foram fixados em 2%, 3% e 3,5%, da esquerda para a direita.

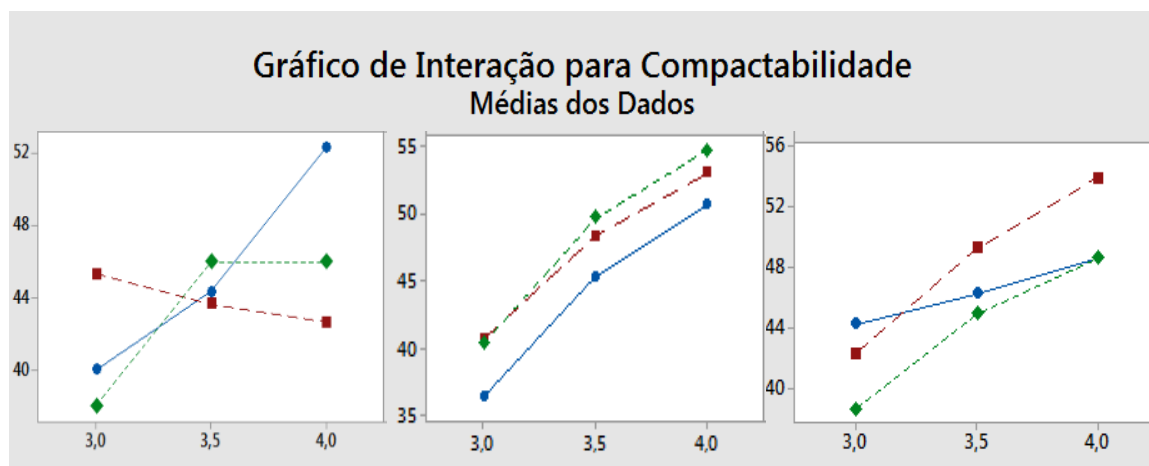


Figura 44 – Interação da água (eixo X) com a compactabilidade (eixo Y) em diferentes níveis de carvão e bentonita.

Fonte: Autoria própria.

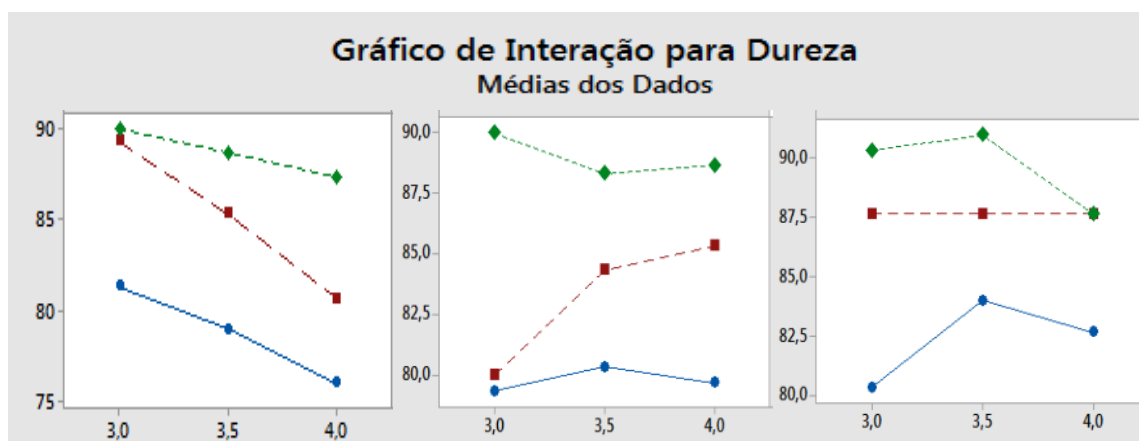


Figura 45 – Interação da água (eixo X) com a dureza (eixo Y) em diferentes níveis de carvão e bentonita.

Fonte: Autoria própria.

O aumento de compactabilidade é promovido com o aumento do teor de umidade (3% a 4% de H₂O) para teores de bentonita entre 8,5% e 10%, acompanhado do aumento do nível de carvão (3% e 3,5%). É notável que a interação entre os três fatores afeta de forma significativa o nível de compactabilidade, pois é

possível verificar que as diferentes combinações dos níveis dos aditivos retornam um comportamento diferente para a propriedade de compactabilidade. Em adição, é possível observar que a compactabilidade é minimizada com teores baixos de umidade, devido a retirada do efeito de plasticidade exercido pela água entre os grãos de sílica.

A propriedade de dureza é afetada significativamente em teores mínimos de carvão (2%) e em qualquer nível de bentonita, mesmo em nível crescente do teor de umidade. Este fenômeno é explicado pela baixa resistência adquirida por um sistema de areia nova com baixo percentual de argila, sendo sua superfície facilmente penetrada e arrastada pelo vazamento do metal líquido.

Para a permeabilidade, foi realizada a análise de variância. A Tabela 42 apresenta os dados do tratamento estatístico.

Tabela 42 – Análise de variância para permeabilidade.

Fonte	Graus de liberdade	SQ (Aj.)	QM(Aj.)	Valor F	Valor P
Modelo	26	6728,5	258,79	63,49	0,000
Linear	6	4254,9	709,15	173,98	0,000
Água	2	2537,3	1268,66	311,24	0,000
Bentonita	2	703,7	351,83	86,31	0,000
Carvão	2	1013,9	506,97	124,37	0,000
Interações de 2 fatores	12	1239,2	103,27	25,33	0,000
Água*Bentonita	4	120,1	30,03	7,37	0,000
Água*Carvão	4	395,3	98,82	24,24	0,000
Bentonita*Carvão	4	723,8	180,95	44,39	0,000
Interação de 3 fatores	8	1234,4	154,29	37,85	0,000
Água*Bentonita*Carvão	8	1234,4	154,29	37,85	0,000
Erro	54	220,1	4,08		
Total	80	6948,6			
Sumário do Modelo	R ² : 96,83%	R ² (aj.) = 95,31% =	R ² (pred.) = 90,39%		

Com base nos valores P da Tabela 42, obtidos com a MANOVA, conclui-se que todas as interações são significativas para o modelo de permeabilidade. O modelo obtido pela regressão possui valores de R² maior que 90%, sendo o R²

predito de 90,39%. Valores deste R^2 acima de 90% são altamente significativos de forma estatística. Isto indica que o modelo consegue ajustar os dados de forma significativa, com uma baixa porcentagem de variação nos resultados por ele obtido. Além disso, o modelo consegue prever valores de permeabilidade com um alto índice de segurança. Os coeficientes do modelo obtido pelo MiniTab® 17 são descritos na Figura 46, além do Valor T, que representa o valor do teste T para cada coeficiente e o valor P de significância para estes testes.

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	45,728	0,140	327,39	0,000	
Água					
3,0	-5,062	0,198	-25,63	0,000	1,33
3,5	0,716	0,198	3,62	0,001	1,33
Bentonita					
7,0	-0,358	0,198	-1,81	0,075	1,33
8,5	0,864	0,198	4,38	0,000	1,33
Carvão					
2,0	-1,469	0,198	-7,44	0,000	1,33
3,0	0,827	0,198	4,19	0,000	1,33
Água*Bentonita					
3,0 7,0	-0,086	0,279	-0,31	0,758	1,78
3,0 8,5	1,247	0,279	4,46	0,000	1,78
3,5 7,0	-0,753	0,279	-2,70	0,009	1,78
3,5 8,5	-0,198	0,279	-0,71	0,483	1,78
Água*Carvão					
3,0 2,0	1,914	0,279	6,85	0,000	1,78
3,0 3,0	-2,383	0,279	-8,53	0,000	1,78
3,5 2,0	-0,309	0,279	-1,10	0,274	1,78
3,5 3,0	0,506	0,279	1,81	0,076	1,78
Bentonita*Carvão					
7,0 2,0	1,654	0,279	5,92	0,000	1,78
7,0 3,0	-2,086	0,279	-7,47	0,000	1,78
8,5 2,0	-1,235	0,279	-4,42	0,000	1,78
8,5 3,0	-0,086	0,279	-0,31	0,758	1,78
Água*Bentonita*Carvão					
3,0 7,0 2,0	-2,321	0,395	-5,87	0,000	2,37
3,0 7,0 3,0	-0,247	0,395	-0,63	0,535	2,37
3,0 8,5 2,0	3,346	0,395	8,47	0,000	2,37
3,0 8,5 3,0	-0,469	0,395	-1,19	0,240	2,37
3,5 7,0 2,0	-0,877	0,395	-2,22	0,031	2,37
3,5 7,0 3,0	0,753	0,395	1,91	0,062	2,37
3,5 8,5 2,0	-0,432	0,395	-1,09	0,279	2,37
3,5 8,5 3,0	-0,025	0,395	-0,06	0,950	2,37

Figura 46 - Modelo de regressão obtido pela MANOVA para permeabilidade.
Fonte: Autoria própria.

Com base nos valores dos coeficientes, temos que o valor de inflação de variância (VIF) varia entre 1,33 e 2,37, sendo moderadamente correlacionadas. Se $VIF > 5$, temos uma correlação muito forte e consequentemente, o modelo é prejudicado, devido à instabilidade dos coeficientes de regressão. Em adição, o valor P do teste T, que testa de forma independente os parâmetros da equação de regressão, mostra que pelo menos um dos níveis de cada fator e da interação de fatores é significativo para a resposta de permeabilidade.

Valores que não são significativos (Valor $P > 0,05$) podem ser excluídos do modelo, desde que o valor em módulo do coeficiente de interação de dois ou mais fatores seja superior ao valor independente de um dos fatores individuais (i.e., 8,5 Bentonita* 3,0 Carvão possui um coeficiente em módulo de 0,430, mas Bentonita individual a 8,5% e carvão individual a 3,0% possuem um coeficiente de 1,078). Como não foram encontrados casos deste tipo no modelo, foi prosseguida a avaliação da interação entre os fatores. De modo a avaliar a interação entre estes fatores e o seu comportamento de acordo com os níveis, foram plotados os gráficos de interação para permeabilidade, em que são demonstrados na Figura 47.

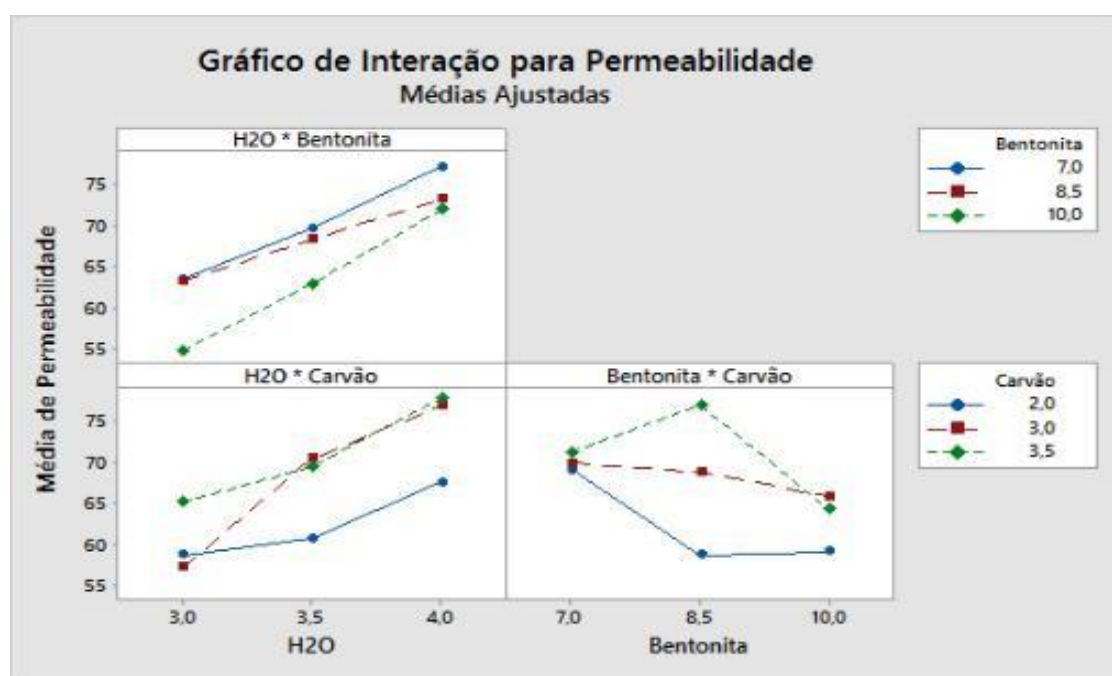


Figura 47 - Gráfico de interação para permeabilidade baseado nas médias ajustadas.
Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 47, podemos interpretar o comportamento da permeabilidade assumindo seus valores médios em cada nível de fatores do planejamento experimental. Para interpretar o comportamento destes fatores, verifica-se a inclinação da reta em cada nível desejado. Quanto maior for o coeficiente de inclinação da reta entre dois níveis, maior será o efeito sobre a propriedade de permeabilidade.

Analisando o gráfico de H₂O*Bentonita temos que os valores médios de permeabilidade são superiores para um sistema de 7,0% de bentonita e 4 % de água.

Analisando o gráfico de H₂O*Carvão, conclui-se que entre o nível 3,0% e 3,5% de água, um sistema com 3% de carvão proporciona um maior valor de permeabilidade, comportamento que é repetido entre os níveis 3,5% e 4,0% de H₂O. O valor de permeabilidade para o sistema com 3,5% de carvão e 4% de H₂O é praticamente igual ao último citado.

Já a interação entre bentonita e carvão não é contínua. Entretanto, um sistema com 2% de carvão demonstrou ter o menor nível de permeabilidade, independente da concentração de bentonita. O melhor índice de permeabilidade foi desempenhado pelo carvão a 3,5% e bentonita a 8,5%.

Desta forma, é possível inferir que a permeabilidade é superior para os níveis de 4% de H₂O, 8,5% de Bentonita e 3,5% de Carvão. Este comportamento coincide com os resultados obtidos no planejamento experimental.

O gráfico de efeitos principais para cada fator é representado na Figura 48. Com base nestes efeitos, podemos confirmar que a permeabilidade é aumentada com o aumento de H₂O e carvão, mas penalizada com o aumento da concentração de bentonita. Este comportamento pode ser explicado devido ao inchamento das camadas da bentonita, promovendo a expansão e recobrimento dos grãos do sistema, o que impede a passagem dos gases em sua estrutura.

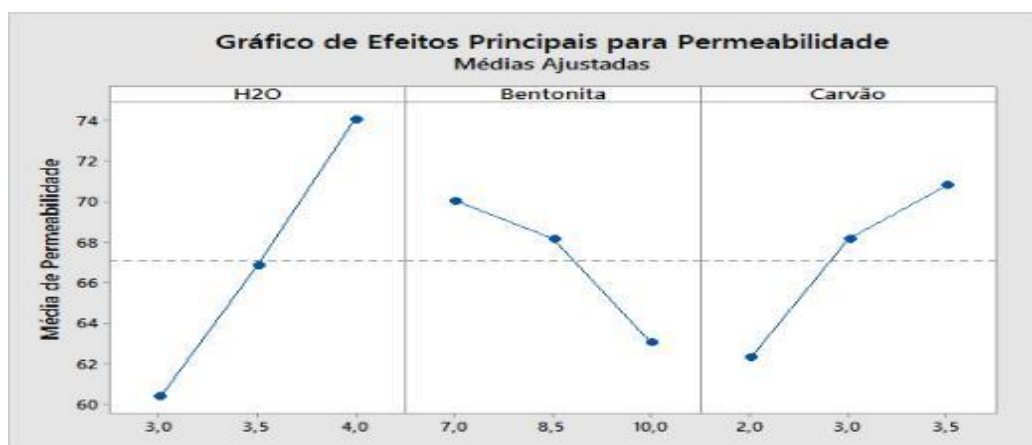


Figura 48 - Gráfico de efeitos principais para a permeabilidade.
 Fonte: Autoria própria.

4.2.1.2 Análise multivariada para a areia de retorno

Conforme citado anteriormente, procedeu-se a MANOVA para análise da interação dos fatores em seus diferentes níveis, de modo a se descrever o comportamento das propriedades. Além disso, foi realizada também a avaliação dos efeitos principais para cada fator na resposta de cada propriedade.

O sumário da análise multivariada para a compactabilidade está representado na Figura 49. Este sumário e os demais que serão demonstrados foram obtidos através com o auxílio do software JMP 13.

Estimativa de Parâmetros - Coeficientes da Equação de Regressão				
Termos	Coeficientes	Erro Padrão dos		
		Coeficientes	Valor-T	Valor P
Intercept	54,395833	0,121478	447,78	<,0001*
Areia Nova	1,7291667	0,121478	14,23	<,0001*
Agua	2,3541667	0,121478	19,38	<,0001*
Bentonita	1,1875	0,121478	9,78	<,0001*
Carvao	-0,520833	0,121478	-4,29	0,0002*
Areia Nova*Agua	-2,979167	0,121478	-24,52	<,0001*
Areia Nova*Bentonita	-1,895833	0,121478	-15,61	<,0001*
Agua*Bentonita	1,3125	0,121478	10,80	<,0001*
Areia Nova*Carvao	-0,604167	0,121478	-4,97	<,0001*
Agua*Carvao	-0,3125	0,121478	-2,57	0,0149*
Bentonita*Carvao	1,3541667	0,121478	11,15	<,0001*
Areia Nova*Bentonita*Agua	1,5625	0,121478	12,86	<,0001*
Areia Nova*Bentonita*Carvao	-2,645833	0,121478	-21,78	<,0001*
Areia Nova*Agua*Carvao	2,6041667	0,121478	21,44	<,0001*
Agua*Bentonita*Carvao	1,5625	0,121478	12,86	<,0001*
Areia Nova*Agua*Bentonita*Carvao	2,5625	0,121478	21,09	<,0001*

Análise de Variância					
Fontes	Nparm	G. L.	Quadrados		
			médios	Valor F	Prob > F
Areia Nova	1	1	143,52083	202,6176	<,0001*
Agua	1	1	266,02083	375,5588	<,0001*
Bentonita	1	1	67,68750	95,5588	<,0001*
Carvao	1	1	13,02083	18,3824	0,0002*
Areia Nova*Agua	1	1	426,02083	601,4412	<,0001*
Areia Nova*Bentonita	1	1	172,52083	243,5588	<,0001*
Agua*Bentonita	1	1	82,68750	116,7353	<,0001*
Areia Nova*Carvao	1	1	17,52083	24,7353	<,0001*
Agua*Carvao	1	1	4,68750	6,6176	0,0149*
Bentonita*Carvao	1	1	88,02083	124,2647	<,0001*
Areia Nova*Bentonita*Agua	1	1	117,18750	165,4412	<,0001*
Areia Nova*Bentonita*Carvao	1	1	336,02083	474,3824	<,0001*
Areia Nova*Agua*Carvao	1	1	325,52083	459,5588	<,0001*
Agua*Bentonita*Carvao	1	1	117,18750	165,4412	<,0001*
Areia Nova*Agua*Bentonita*Carvao	1	1	315,18750	444,9706	<,0001*

Figura 49 - Sumário do modelo de análise multivariada para a compactabilidade da areia de retorno.

Fonte: Autoria própria.

Com base no sumário para a compactabilidade, verifica-se que todos os fatores e suas interações agem de forma significativa para a variável de resposta. De modo a se investigar o comportamento de cada aditivo na areia de retorno, foi

plotado os gráficos de interação e efeitos principais para a compactabilidade. Estes se encontram na Figura 50 e na Figura 51.

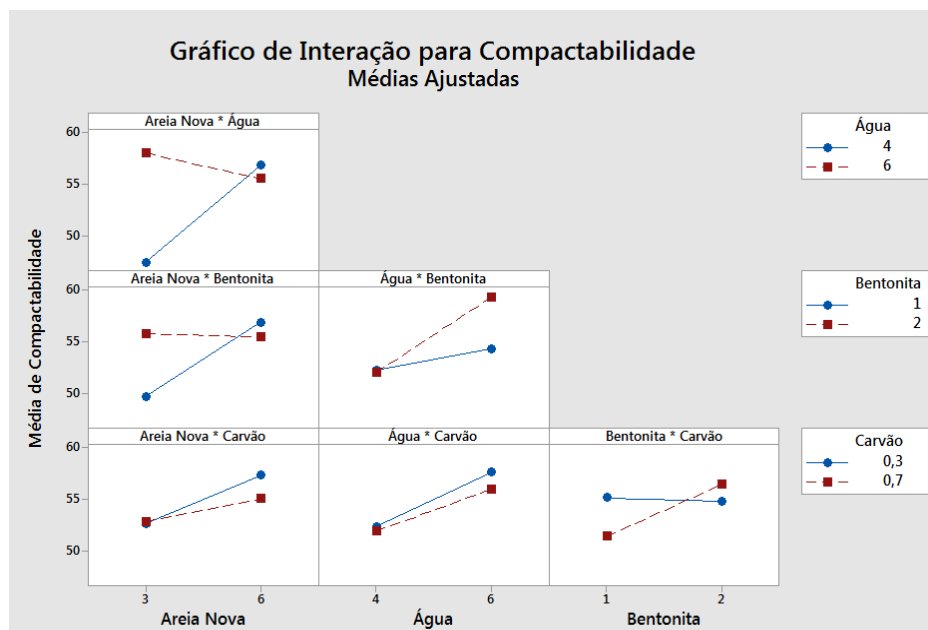


Figura 50 – Gráfico de interações dos aditivos para a resposta de compactabilidade da areia de retorno.

Fonte: Autoria própria.

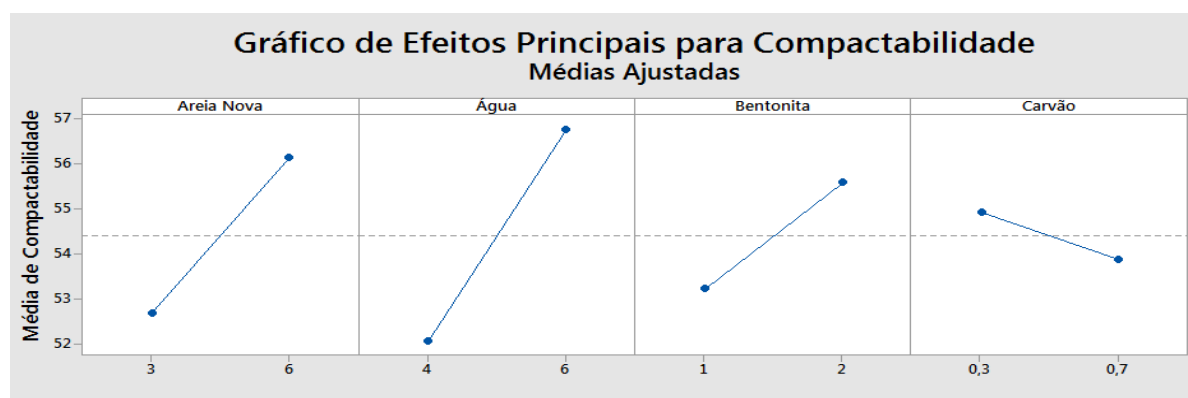


Figura 51 – Gráfico de efeitos principais dos aditivos para a compactabilidade da areia de retorno.

Fonte: Autoria própria.

Com base nos gráficos de interação e efeitos principais para os aditivos da areia de retorno, verifica-se que apenas o aumento do nível de carvão afeta o nível

de compactabilidade de forma desprezível (cerca de 1%). Os demais fatores aumentam o nível de compactabilidade do sistema.

A adição de areia nova a um sistema de areia de retorno promove o aumento da compactabilidade devido ao melhor escoamento dos grãos de sílica nova adicionados ao sistema, promovendo assim um nível de moldabilidade maior.

Como a água atua como plastificante, o aumento de seu nível promove o aumento significativo para a compactabilidade, pois o escoamento entre os grãos se torna mais fácil e a absorção de umidade pela argila, acompanhado de seu inchamento, promove o aumento da moldabilidade associada a resistência mecânica do molde, devido a ligação dos grãos de areia presentes no sistema. Desta forma, correlaciona-se a umidade como principal fator do aumento da moldabilidade de um molde de areia a verde. O aumento do nível de bentonita promove o aumento da compactabilidade devido ao poder ligante dos grãos e sua alta capacidade de deformação, devido ao seu inchamento, conforme já citado.

A Figura 52 representa o sumário da análise multivariada para a permeabilidade.

Estimativa de Parâmetros - Coeficientes da Regressão para Permeabilidade				
Termos	Coeficientes	Erro padrão dos coeficientes		
		Valor T	Valor P	
Intercept	76,383333	0,235942	323,74	<0,0001*
Areia Nova	2,3083333	0,235942	9,78	<0,0001*
Água	2,9458333	0,235942	12,49	<0,0001*
Bentonita	1,5791667	0,235942	6,69	<0,0001*
Carvão	-1,4125	0,235942	-5,99	<0,0001*
Areia Nova*Água	-0,1625	0,235942	-0,69	0,4960
Areia Nova*Bentonita	-1,0375	0,235942	-4,40	0,0001*
Água*Bentonita	-0,95	0,235942	-4,03	0,0003*
Areia Nova*Carvão	-0,704167	0,235942	-2,98	0,0054*
Água*Carvão	-0,441667	0,235942	-1,87	0,0704
Bentonita*Carvão	-0,416667	0,235942	-1,77	0,0869
Areia Nova*Bentonita*Água	-0,466667	0,235942	-1,98	0,0566
Areia Nova*Bentonita*Carvão	-6,216667	0,235942	-26,35	<0,0001*
Areia Nova*Água*Carvão	2,95	0,235942	12,50	<0,0001*
Água*Bentonita*Carvão	3,3125	0,235942	14,04	<0,0001*
Areia Nova*Água*Bentonita*Carvão	-0,804167	0,235942	-3,41	0,0018*

Análise de Variância					
Fontes	Nparm	G.L.	Quadrados médios		
			Valor F	Prob > F	
Areia Nova	1	1	255,7633	95,7168	<0,0001*
Água	1	1	416,5408	155,8862	<0,0001*
Bentonita	1	1	119,7008	44,7968	<0,0001*
Carvão	1	1	95,7675	35,8400	<0,0001*
Areia Nova*Água	1	1	1,2675	0,4743	0,4960
Areia Nova*Bentonita	1	1	51,6675	19,3360	0,0001*
Água*Bentonita	1	1	43,3200	16,2121	0,0003*
Areia Nova*Carvão	1	1	23,8008	8,9072	0,0054*
Água*Carvão	1	1	9,3633	3,5041	0,0704
Bentonita*Carvão	1	1	8,3333	3,1187	0,0869
Areia Nova*Bentonita*Água	1	1	10,4533	3,9121	0,0566
Areia Nova*Bentonita*Carvão	1	1	1855,0533	694,2348	<0,0001*
Areia Nova*Água*Carvão	1	1	417,7200	156,3275	<0,0001*
Água*Bentonita*Carvão	1	1	526,6875	197,1074	<0,0001*
Areia Nova*Água*Bentonita*Carvão	1	1	31,0408	11,6167	0,0018*

Figura 52 – Sumário do modelo de análise multivariada para a permeabilidade da areia de retorno.

Fonte: Autoria própria.

Para a permeabilidade, existem quatro interações não significativas, representadas pelos valores P maior que 0,05. Estas são: Areia Nova*Água, Água*Carvão, Bentonita*Carvão e Areia Nova*Bentonita*Carvão. Novamente, como o módulo do coeficiente das interações são inferiores aos módulos dos fatores independentes, o modelo não pode ser ajustado.

Os gráficos de interação e efeitos principais dos fatores para a permeabilidade estão representados na Figura 53 e Figura 54. É possível verificar que os fatores não significativos estão dispostos de forma paralela.

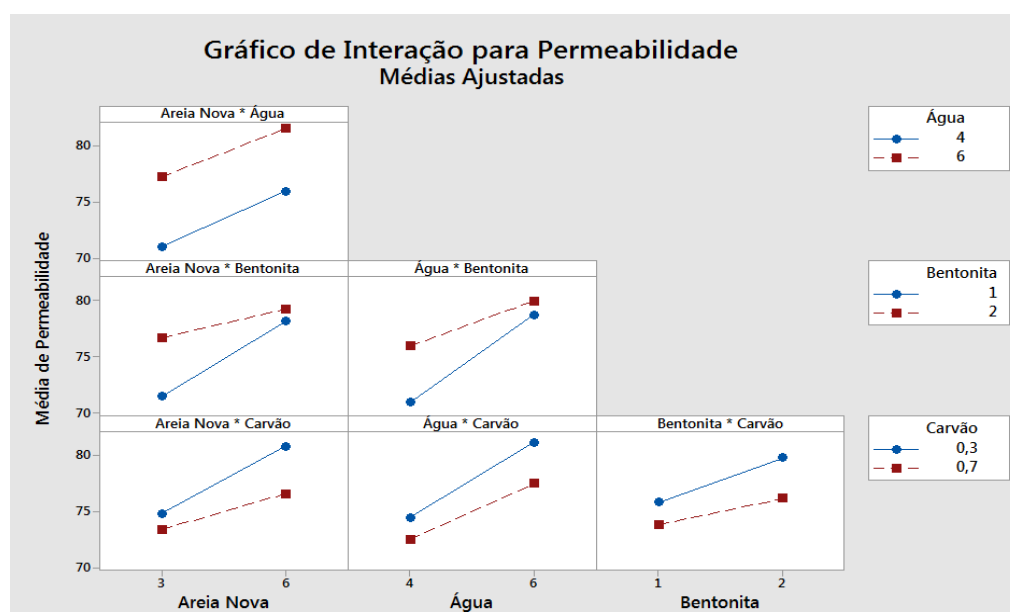


Figura 53 - Gráfico de interação para permeabilidade da areia de retorno.
Fonte: Autoria própria.

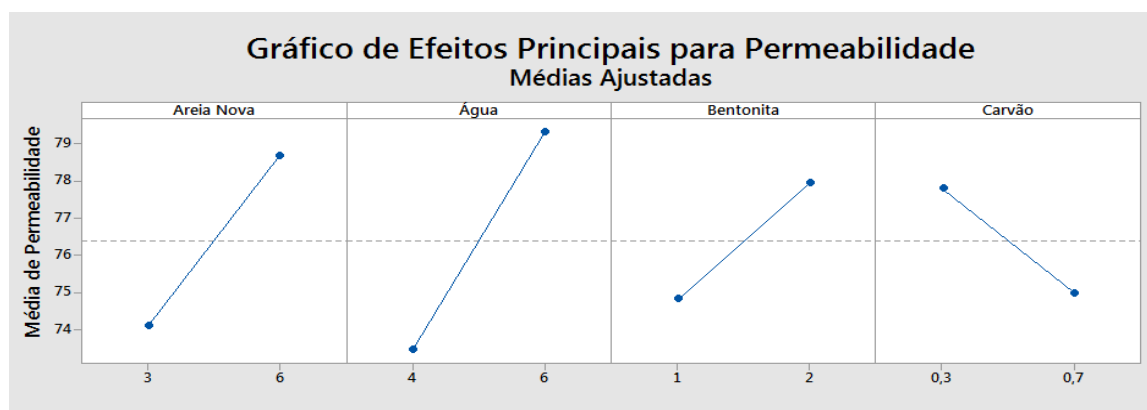


Figura 54 - Gráfico de efeitos principais para a permeabilidade - areia de retorno.
Fonte: Autoria própria.

Com base na interação entre os fatores e os efeitos principais para a permeabilidade, pode-se concluir que apenas o aumento do nível do carvão no sistema da areia de retorno promove a diminuição da permeabilidade, devido a deposição das finas partículas de carvão nos subespaços formados entre os grãos de areia, impedindo a passagem dos gases. Para os demais fatores, a permeabilidade é aumentada com o incremento do nível de seus fatores.

O aumento do teor de areia nova promove aumento na permeabilidade devido a adição de grãos com faixas granulométricas maiores (entre 180 e 250 μm , como demonstrado nos valores de retenção granulométrica) e de morfologia bem definida (como analisado pelo meio do estereoscópio), que combinadas aos grãos da areia de retorno (grãos de granulometria superior ou igual as areias novas e de morfologia irregular), promovem o aumento do volume interpartícula, aumentando a capacidade de escoamento dos gases na estrutura.

O aumento da umidade (teor de água) aumenta a permeabilidade devido ao aumento do volume intersticial entre os grãos oolitizados da areia de retorno, que possuem maior porosidade e conseguem reter mais umidade, liberando interstícios em pontos com baixo grau de oolitização.

O aumento de bentonita promove uma melhoria de permeabilidade apenas quando o teor de umidade é adequado, pois por ser caracterizado como um material de partículas finas quando não inchado, o mesmo se aloca em espaços com volume suficiente e impede a passagem dos gases.

Em sequência na análise multivariada, tem-se a Figura 55, que representa o sumário da análise multivariada para a dureza.

Estimativa de Parâmetros - Coeficientes da regressão para Dureza				
Temos	Coeficientes	Erro padrão dos coeficientes	Valor T	Valor P
Intercept	91,645833	0,117851	777,64	<,0001*
Areia Nova	-0,520833	0,117851	-4,42	0,0001*
Água	0,1041667	0,117851	0,88	0,3834
Bentonita	-0,229167	0,117851	-1,94	0,0607
Carvão	-0,020833	0,117851	-0,18	0,8608
Areia Nova*Água	-0,0625	0,117851	-0,53	0,5995
Areia Nova*Bentonita	0,0208333	0,117851	0,18	0,8608
Água*Bentonita	-0,270833	0,117851	-2,30	0,0282*
Areia Nova*Carvão	-0,020833	0,117851	-0,18	0,8608
Água*Carvão	-0,145833	0,117851	-1,24	0,2249
Bentonita*Carvão	-0,0625	0,117851	-0,53	0,5995
Areia Nova*Bentonita*Água	0,1458333	0,117851	1,24	0,2249
Areia Nova*Bentonita*Carvão	0,0208333	0,117851	0,18	0,8608
Areia Nova*Água*Carvão	0,0208333	0,117851	0,18	0,8608
Água*Bentonita*Carvão	-0,020833	0,117851	-0,18	0,8608
Areia Nova*Água*Bentonita*Carvão	-0,270833	0,117851	-2,30	0,0282*

Análise de Variância					
Fontes	Nparm	G.L.	Quadrados médios	Valor F	Prob > F
Areia Nova	1	1	13,020833	19,5313	0,0001*
Água	1	1	0,520833	0,7813	0,3834
Bentonita	1	1	2,520833	3,7813	0,0607
Carvão	1	1	0,020833	0,0313	0,8608
Areia Nova*Água	1	1	0,187500	0,2813	0,5995
Areia Nova*Bentonita	1	1	0,020833	0,0313	0,8608
Água*Bentonita	1	1	3,520833	5,2813	0,0282*
Areia Nova*Carvão	1	1	0,020833	0,0313	0,8608
Água*Carvão	1	1	1,020833	1,5313	0,2249
Bentonita*Carvão	1	1	0,187500	0,2813	0,5995
Areia Nova*Bentonita*Água	1	1	1,020833	1,5313	0,2249
Areia Nova*Bentonita*Carvão	1	1	0,020833	0,0313	0,8608
Areia Nova*Água*Carvão	1	1	0,020833	0,0313	0,8608
Água*Bentonita*Carvão	1	1	0,020833	0,0313	0,8608
Areia Nova*Água*Bentonita*Carvão	1	1	3,520833	5,2813	0,0282*

Figura 55 – Sumário do modelo de análise multivariada para a dureza da areia de retorno. Fonte: Autoria própria.

A propriedade de dureza possui como significativa apenas três interações, sendo elas a Areia Nova, Água*Bentonita e a interação quadrupla. Os gráficos de interação e efeitos principais para a dureza se encontram nas Figura 56 e 57.

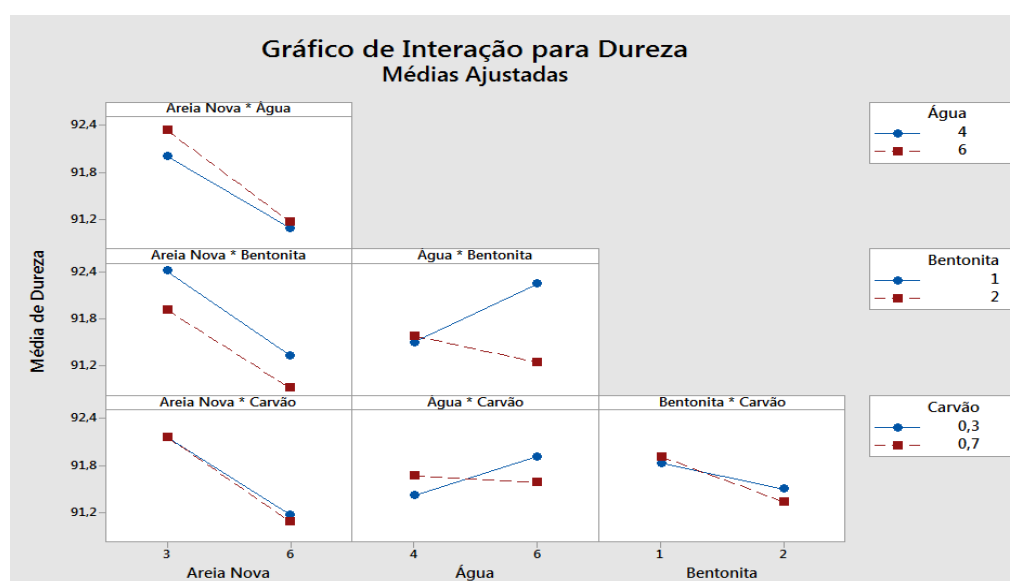


Figura 56 - Gráficos de interação para a dureza para a areia de retorno. Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 56, pode-se afirmar que a dureza diminui com o aumento do nível de areia nova no sistema, de modo independente aos níveis dos demais aditivos, assim como para o aumento de bentonita e carvão de forma combinada. Já para a água, a dureza é aumentada nos níveis inferiores de bentonita e carvão (1% e 0,3%).

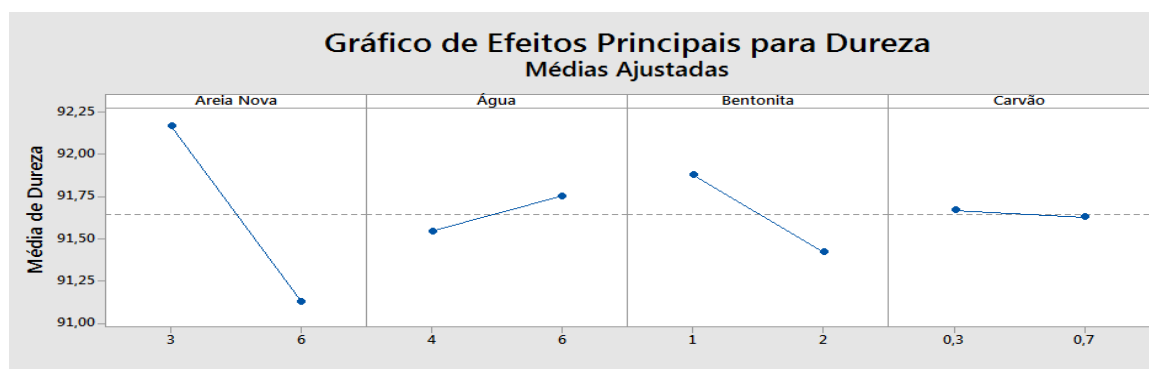


Figura 57 - Gráfico de efeitos principais da propriedade de dureza para a areia de retorno.
Fonte: Autoria própria.

Como efeitos principais para a propriedade de dureza, podemos afirmar com base na Figura 57 que a alteração de areia nova, água, bentonita e carvão nos níveis dispostos no planejamento não interfere significativamente na propriedade de dureza, conforme demonstrado pelo gráfico, pois a variação está dentro do erro da medição do equipamento (valor obtido ± 1 AFS-B).

Portanto, foi possível verificar que a propriedade de compactabilidade se comportou de maneira positiva com o aumento do teor de areia nova, umidade e bentonita. Já a propriedade de permeabilidade foi afetada de forma negativa apenas com o aumento do nível do carvão, devido a acomodação destas partículas finas entre os interstícios. Já a dureza apresentou variabilidade insignificante para a areia de retorno.

Com o modelo de predição de valores de propriedades do software JMP, foi possível a obtenção dos níveis que representam o máximo desempenho das propriedades, ambas baseadas no modelo multivariado. O perfil de predição para a areia de retorno está representado na Figura 58.

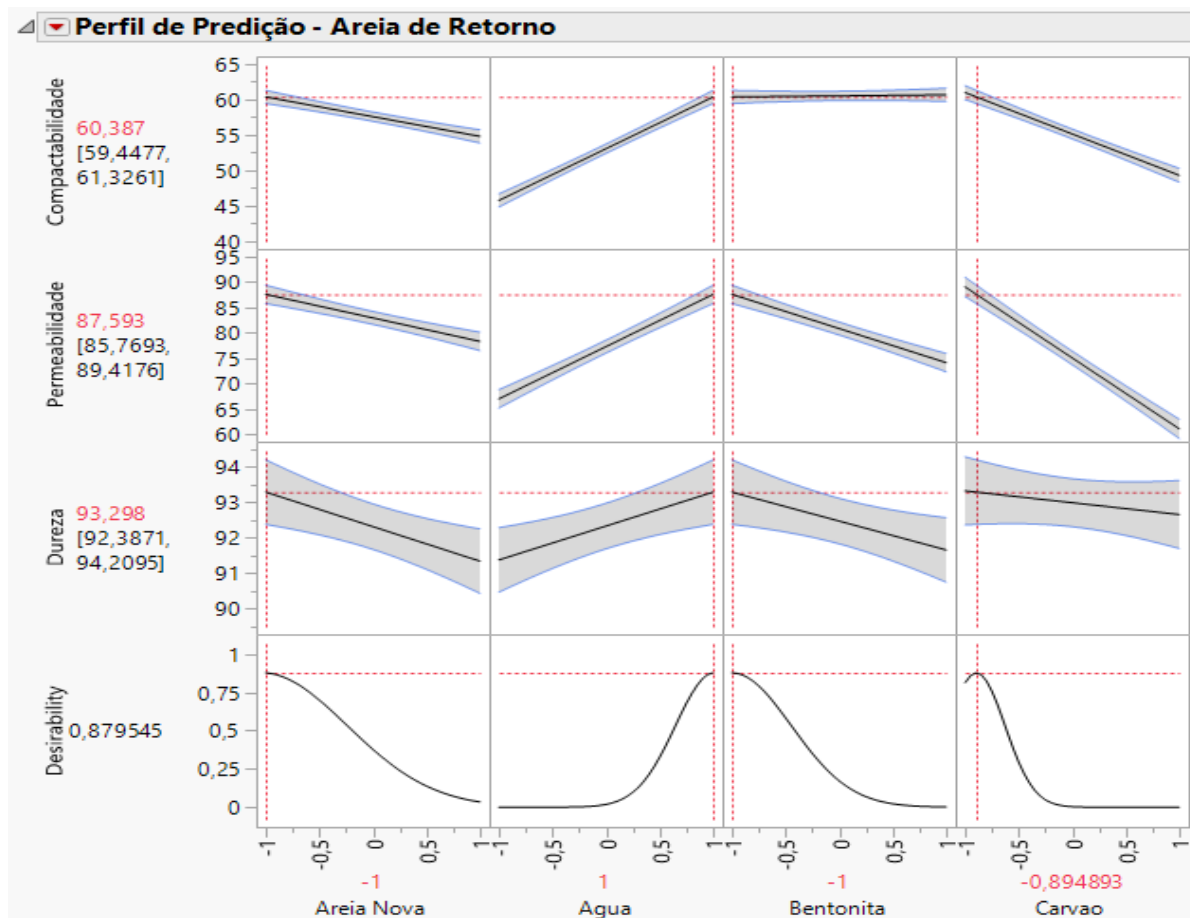


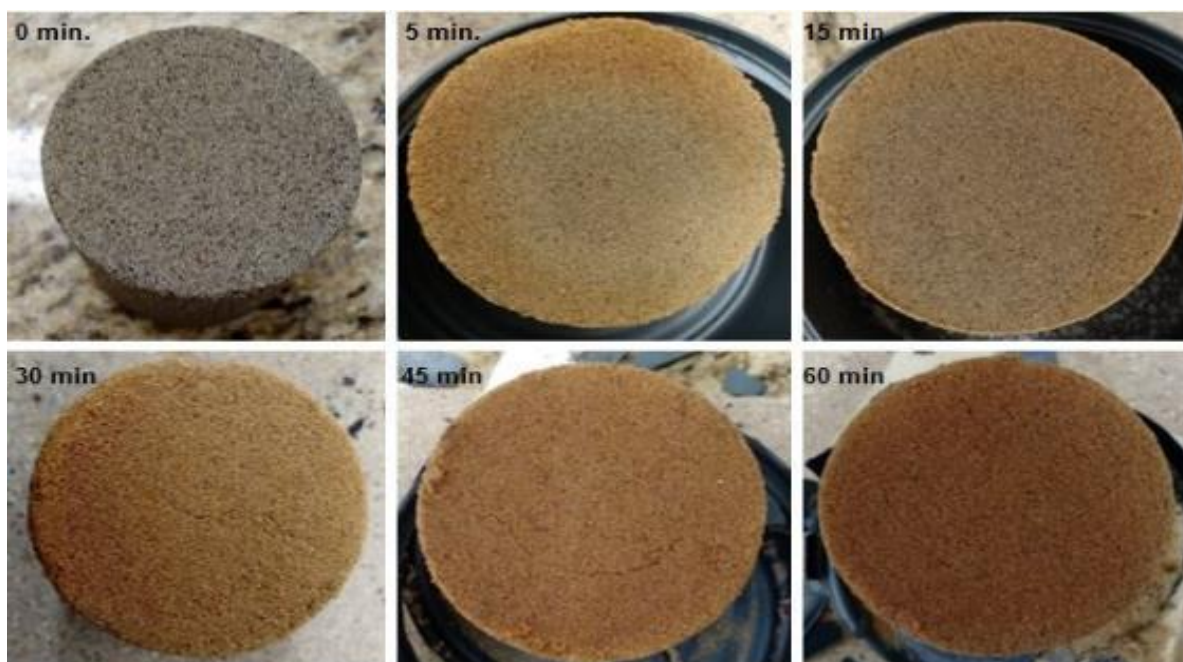
Figura 58 - Perfil de predição para o sistema de areia de retorno.
Fonte: Autoria própria.

Desta forma, com base na Figura 58, o modelo utilizado para avaliação dos fatores aplicados a areia de retorno prediz um valor de resultado de aplicação ao sistema, baseado em 3% de Areia Nova, 4% de água, 1% de bentonita e aproximadamente 0,35% de carvão adicionados em uma areia de retorno com 9,3% de bentonita e 3,3 % de carvão.

Logo, com a aplicação deste sistema, os ganhos de propriedades quando comparados aos valores padrão, citados anteriormente, são de cerca de 80% para a compactabilidade, 28,8% para a permeabilidade e 1% para a dureza. Amostras com estes teores devem ser submetidas a outros tipos de ensaios, como a resistência a tração a verde e a resistência a compressão, além de ensaios práticos com simulação de vazamento de metal, de modo a validar sua utilização em sistemas de moldagem.

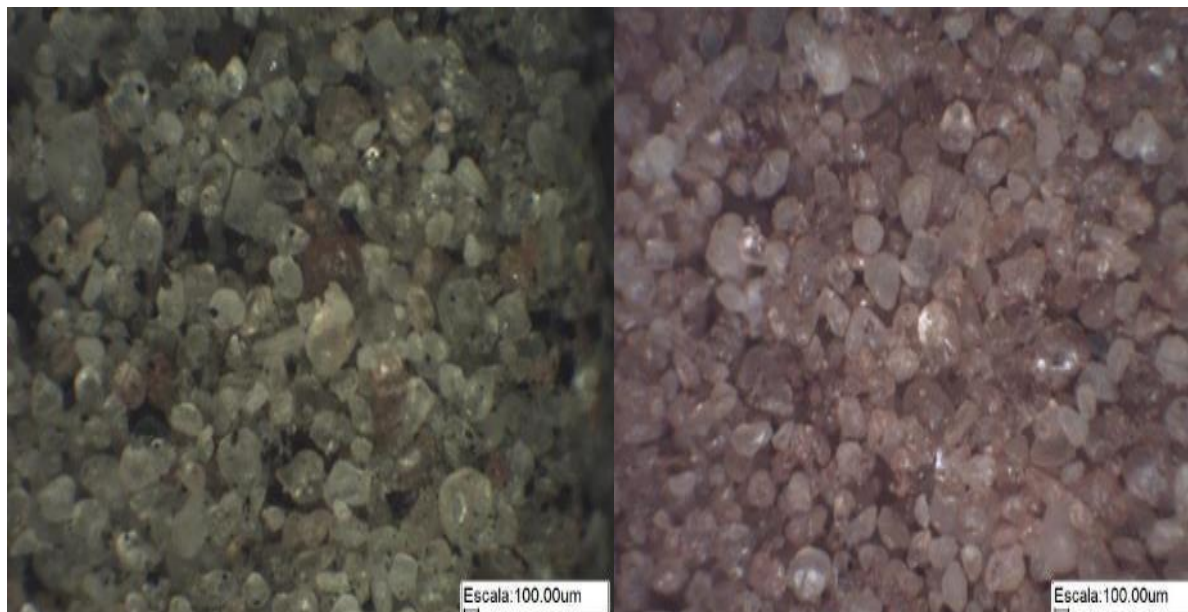
4.2.2 Processo de Oolitização

Para avaliar o processo de oolitização, foi escolhida uma das amostras do planejamento fatorial da areia nova, na qual desempenhou os requisitos especificados. A amostra 24 obteve a melhor performance na avaliação das três propriedades do sistema. Deste modo, foram compactadas 5 amostras para a simulação do processo de oolitização. A Figura 59 representa as amostras do ciclo de oolitização.



**Figura 59 - Avanço da oolitização sob a superfície do corpo de prova.
Fonte: Autoria própria.**

A partir da Figura 59, é possível verificar que o avanço da oolitização pareceu ser gradual e maior com o aumento do tempo de exposição ao forno. A Figura 60 representa a comparação dos grãos de areia a verde ao lado esquerdo e os grãos oolitizados, ao lado direito. É possível verificar o acúmulo de material sob a superfície da areia após a exposição em 1000 °C.



**Figura 60 - Processo de oolitização no sistema de areia a verde – escala de 100 μ m.
Fonte: Autoria própria.**

4.2.3 Comportamento do teor de argila AFS das areias de retorno submetidas ao processo de oolitização

Após a oolitização, foram realizados os ensaios de sifonamento da areia, conforme especificado nos procedimentos. É importante ressaltar que o corpo de prova utilizado para promover a oolitização pesava em torno de 160 gramas, massa na qual foi dividida em três partes iguais para cada tempo de oolitização. Desta forma, foram realizados três ensaios de sifonamento para cada tempo de oolitização. O resultado do teor de argila AFS foi a soma dos três ensaios realizados. Os três sifonamentos foram realizados para garantir que a massa total de resíduo restante era composta apenas de areia de retorno sem aditivos, característica importante para a determinação do grau de oolitização do sistema.

Os resultados obtidos do teor de argila AFS foram plotados em função do tempo de oolitização das areias, conforme demonstrado na Figura 61.

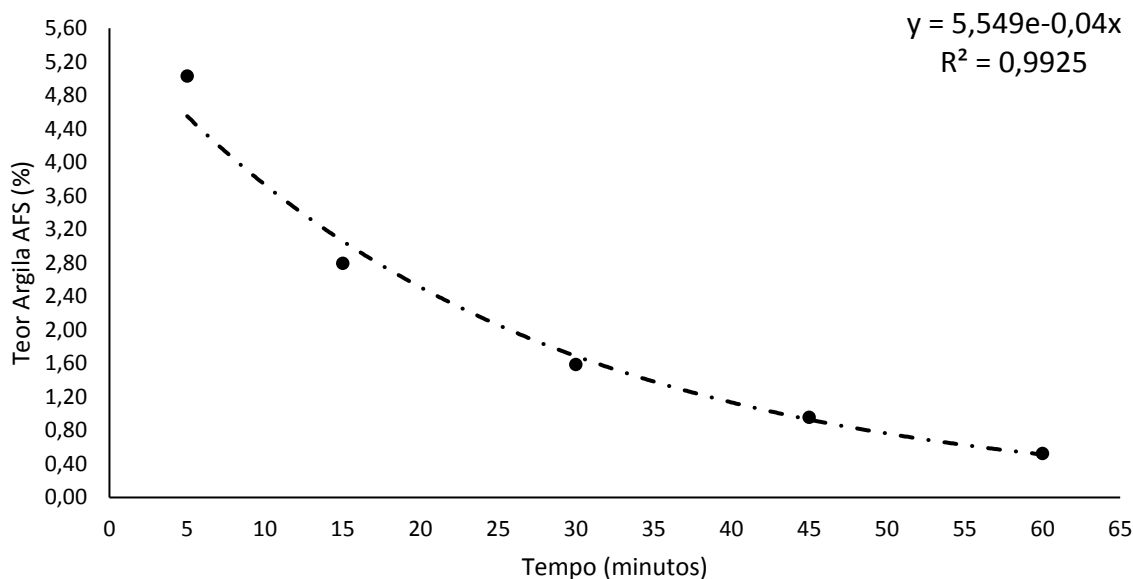


Figura 61 - Teor de argila AFS em função do tempo de oolitização.
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, quanto maior o tempo de oolitização, maior a perda do teor de aditivos, resultando em um teor de argila AFS menor. Além disso, o comportamento de perda deste teor de argila, quando a areia é exposta a uma temperatura de 1000 °C pode ser aproximado por um modelo de equação de comportamento exponencial negativo, representada na Figura 61, com um coeficiente de determinação do modelo de 0,9925. Ou seja, o modelo utilizado é adequado para explicar o comportamento da perda do teor de argila AFS pelo tempo de oolitização com uma precisão de 99,25%.

A observação deste comportamento é importante para as fundições, pois a perda do teor de argila ocorre majoritariamente na areia de faceamento, areia na qual recebe diretamente a radiação térmica do processo de vazamento do metal nos moldes. O calor é conduzido também para a areia de enchimento, mas esta sofre menos perda de argila, a qual é reintegrada no circuito para a próxima moldagem.

4.2.4 Avaliação do grau de oolitização

A avaliação do grau de oolitização pelo método dos interceptos está disposta de forma crescente, representadas da Figura 62 até a 66, sendo a Figura 67 a avaliação da areia de retorno. O ponto vermelho nos interceptos representam os grãos oolitizados localizados.

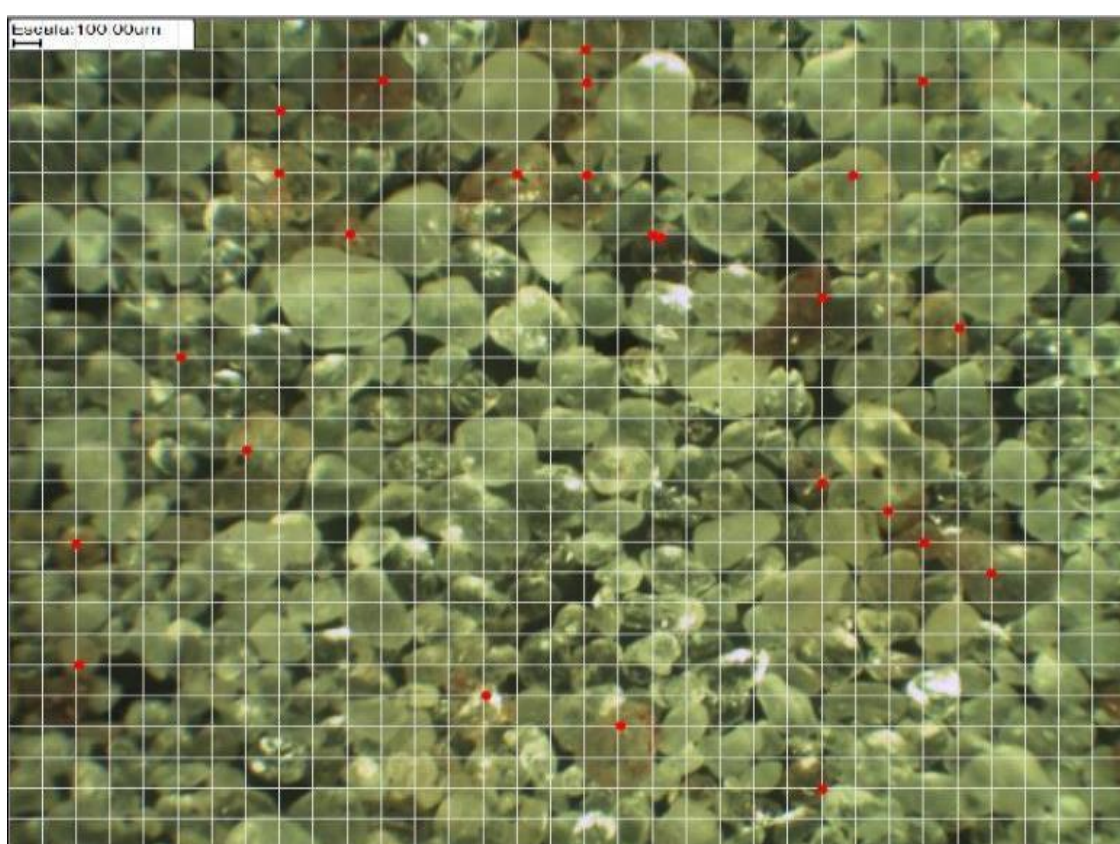


Figura 62 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 5 minutos.
Fonte: Autoria própria.

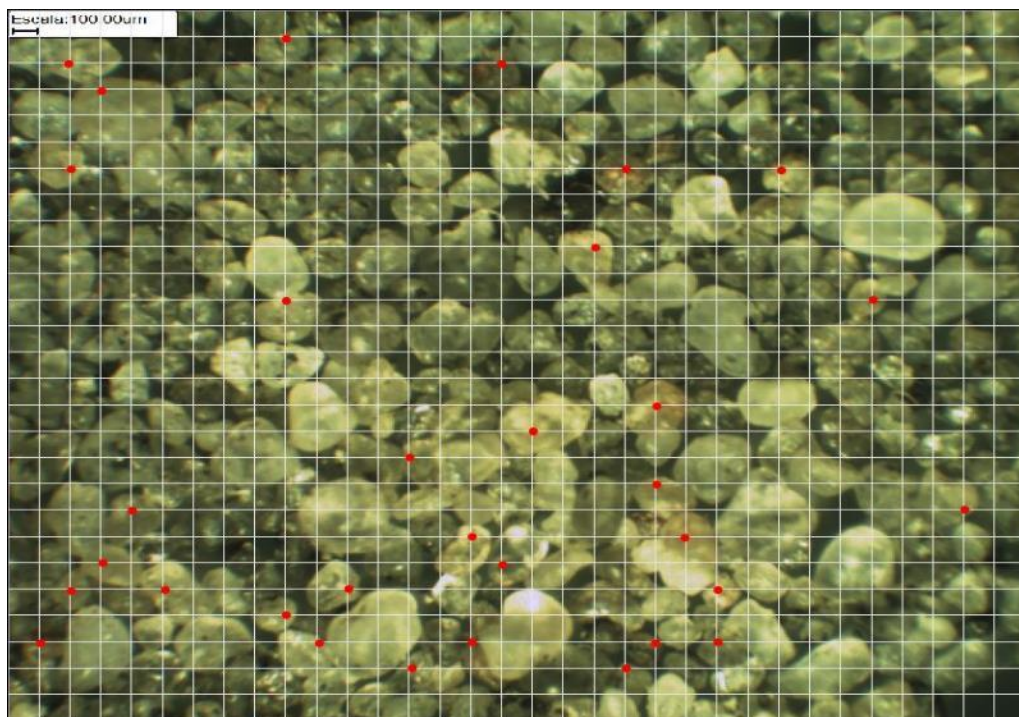


Figura 63 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 15 minutos.
Fonte: Autoria própria.

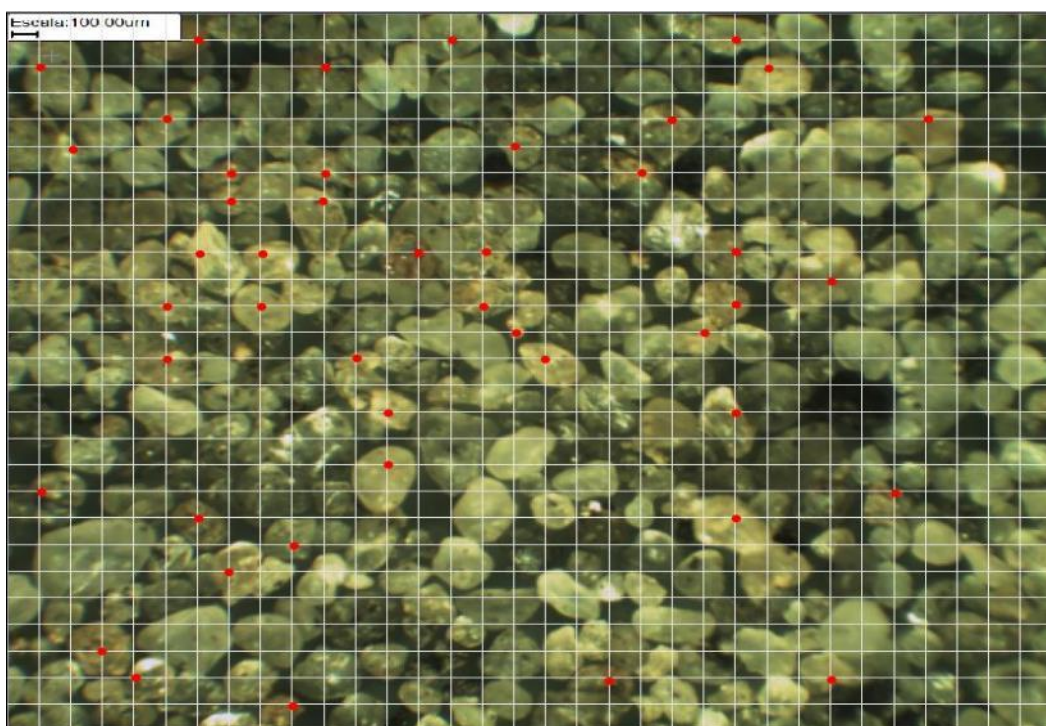


Figura 64 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 30 minutos
Fonte: Autoria própria.

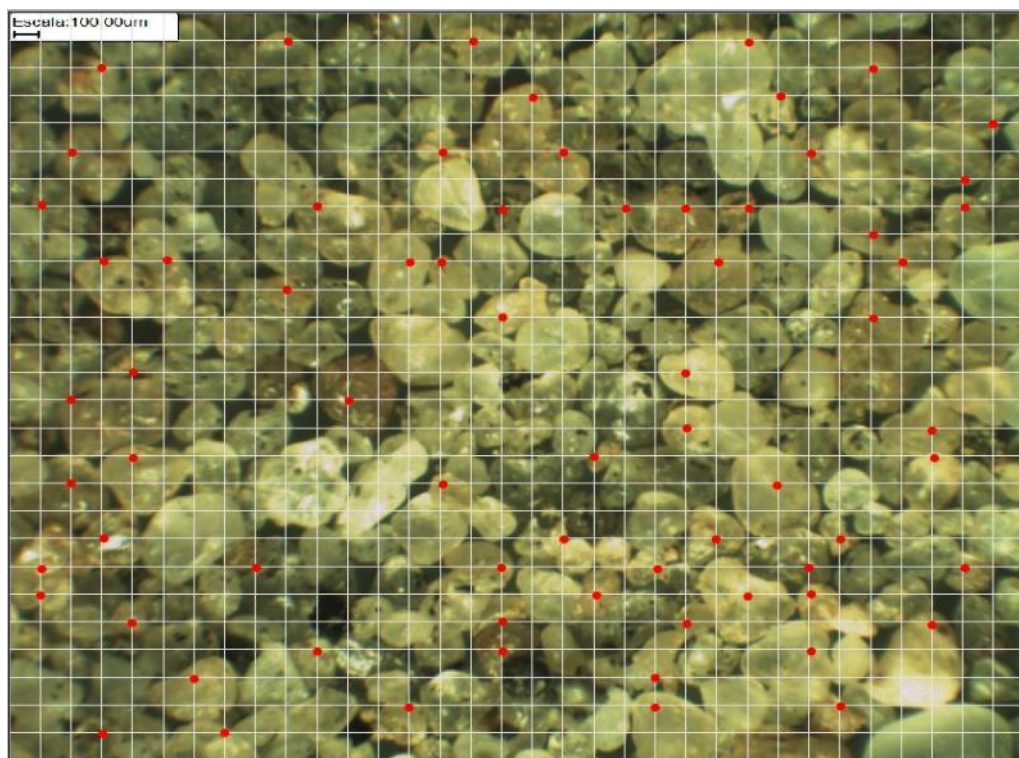


Figura 65 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 45 minutos.
Fonte: Autoria própria.

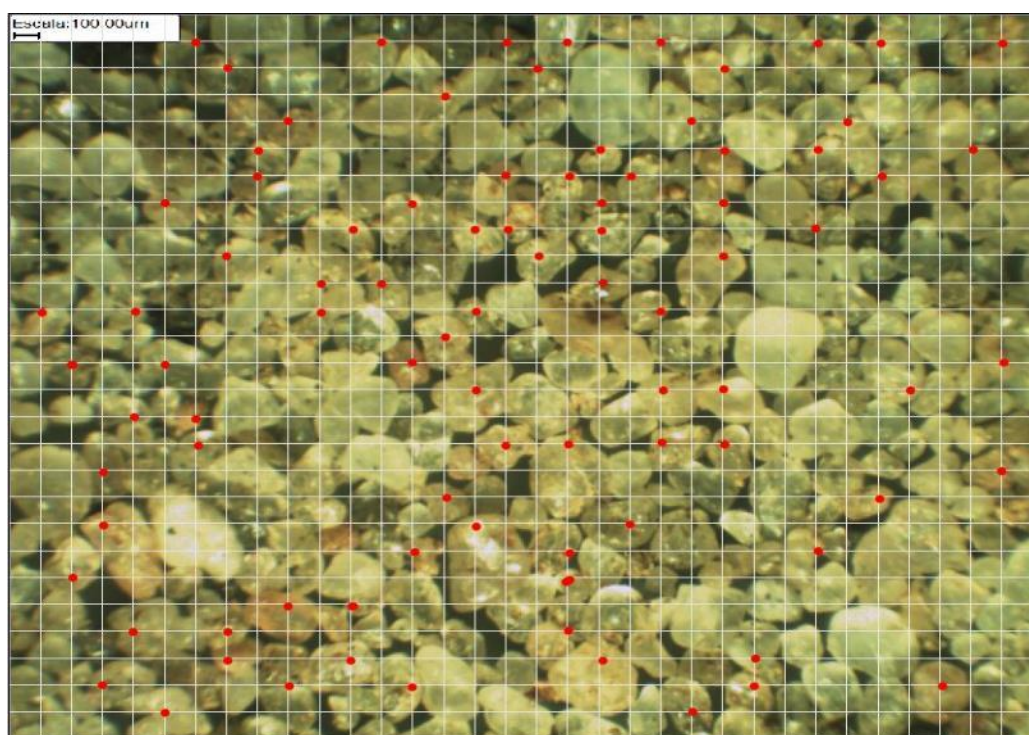


Figura 66 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização com ciclo de 60 minutos.
Fonte: Autoria própria.

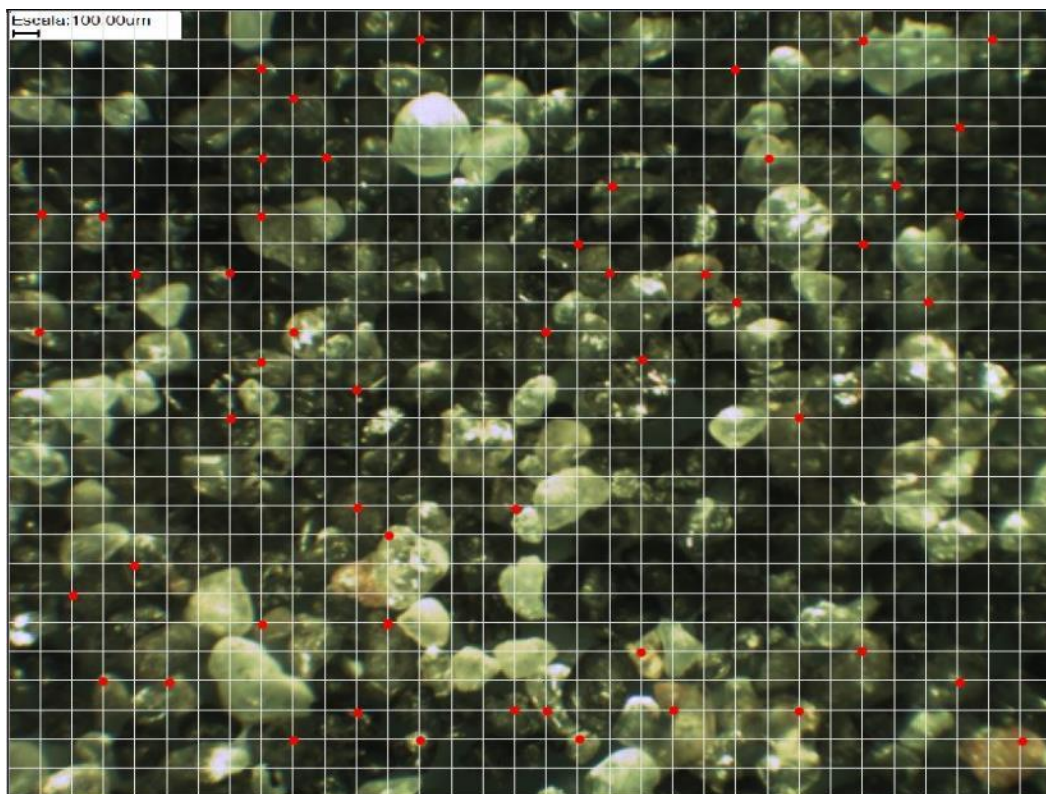


Figura 67 - Interceptos para avaliação do grau de oolitização - areia de retorno.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 43 apresenta o grau de oolitização obtido pelo método da densidade e pelo método dos interceptos. O erro da balança para o cálculo da massa utilizada na picnometria foi de 0,001 gramas. A temperatura observada foi de 21 °C.

Tabela 43 - Densidade das areias em função do tempo de oolitização.

Tempo de oolitização	Densidade (g/cm ³)	Grau de oolitização (%)	Interceptos com grãos oolíticos	Grau de oolitização (%)
0 minutos – Areia nova	2,627	0	0	0
Areia de retorno recebida	2,567	2,30	53	6,37
5 minutos	2,504	4,59	25	3,00
15 minutos	2,508	4,44	32	3,84
30 minutos	2,545	3,04	45	5,41
45 minutos	2,575	1,88	69	8,29
1 hora	2,581	1,66	89	10,69

Fonte: Autoria própria.

Com base na Tabela 43, é possível verificar que o comportamento da oolitização com o aumento do tempo de exposição a temperatura de 1000 °C não foi contínuo para o método da densidade, conforme exemplificado no artigo de Miksovsky e Lichy (2008). Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que o autor realizou a oolitização simulando um sistema fechado. Ou seja, partindo de uma areia nova, foi realizado um ciclo de exposição a temperatura. Com esta areia, foi realizado outro procedimento de mistura e exposição a temperatura, simulando ciclos fechados, fato este que não foi reproduzido neste trabalho.

O método dos interceptos foi realizado de modo a permitir a quantificação dos grãos oolíticos de forma aleatória, apesar de não ser um método normatizado para este propósito. Os resultados deste método se comportaram de maneira crescente. Entretanto, não há referências com o uso deste método para efeito comparativo. O intuito desta realização foi o de viabilizar este método para que este possa ser consultado e comparado com ensaios realizados em empresas.

A importância de se avaliar o grau de oolitização se encontra no índice de defeitos em peças metálicas devido as pobres propriedades da areia. Este indicador aumenta para cada batelada de produção, devido ao aumento do teor de oolitização, o que é um efeito indesejado. Cada empresa deve determinar o valor máximo do teor de oolitização, pois cada peça possui restrições de produção, sendo um exemplo o acabamento superficial que é afetado com o aumento deste teor.

4.2.5 Avaliação dos finos recebidos

Conforme citado na metodologia, foram recebidos finos que foram retirados do processo de moldagem da empresa. Os resultados dos ensaios estão dispostos na Tabela 44, enquanto as imagens de inchamento se encontram na Figura 68.

Tabela 44 - Caracterização dos finos do processo de moldagem.

Ensaio	Perda ao Fogo (%)	Inchamento (ml/g)
1	4,18	0,432
2	2,97	0,432
Média	3,46	0,432
Desvio Padrão Amostral	0,85	0

Fonte: Autoria própria.



Figura 68 - Resultado após o teste de inchamento dos finos.
 Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 44, temos que em média, 3,46% deste material é de carvão, enquanto o restante se divide em finos inertes, como cinzas de carvão e argilas ativas ou não ativas.

Com base na Tabela 19, referência do ensaio de inchamento de foster, pode-se afirmar que a argila presente nos finos não é capaz de inchar. Ou seja, tomando como ensaio principal o inchamento de foster para avaliação da capacidade de absorção de água nas camadas de bentonita, a argila remanescente nos finos não pode ser reutilizada para a moldagem, pois este resultado indica que a capacidade de tixotropia da argila é afetada e, conseqüentemente, ocorrem perdas nas propriedades mecânicas do molde, como a resistência a tração a verde. Entretanto, o ensaio de azul de metileno foi realizado com propósito de investigar a presença de argila ativa no sistema, sendo este método mais indicado para este propósito. O resultado do teste está demonstrado na Tabela 45. A Figura 69 representa o ponto de halo ideal para o teste (15,5 mL), enquanto o ponto de saturação ocorre em 16 mL.

Tabela 45 - Ensaio de adsorção de azul de metileno para os finos.

Amostras	Finos
Volume de azul de metileno (mL)	15
Massa (g)	2,017
A.A.M (ml/g)	7,43

Fonte: Autoria própria.

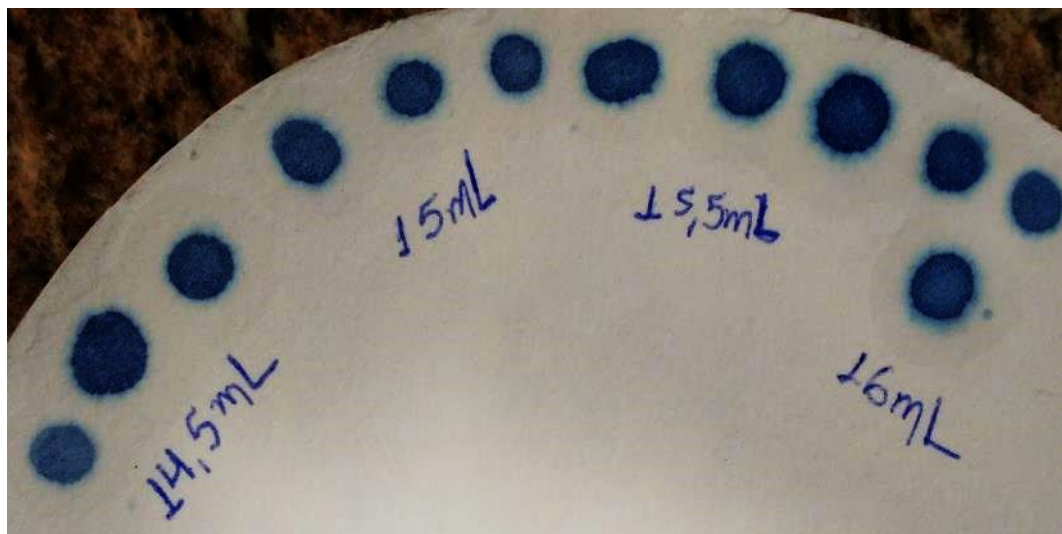


Figura 69 - Ensaio de adsorção de azul de metileno para os finos.

Fonte: Autoria própria.

Logo, com base nos resultados do teste de adsorção de azul de metileno, é possível verificar que os finos possuem argila ativa em sua composição. Em comparação com o mesmo ensaio realizado para a bentonita, temos que cerca de 10% dos finos são constituídos por bentonita ativa.

Portanto, com a investigação dos finos retirados pelo sistema exaustor, foi possível confirmar a presença de materiais de alto potencial de reutilização e reciclagem. De acordo com Romanus (2014), indústrias de fundição de grande porte que utilizam o sistema de moldagem em areia a verde consomem, podem adicionar, em média, 2% de bentonita em relação ao peso total de mistura. A Tabela 46 representa uma suposição de valores para empresas de fundição de grande porte que utilizam a moldagem em areia a verde.

Tabela 46 – Suposição de valores para empresas de fundição com base no sistema de moldagem de areia a verde

Material	Toneladas por turno	Bentonita (%)	Carvão (%)
Areia de retorno (toneladas por turno)	50	9,3	3,3
Finos	2	10	3,4%
Bentonita e carvão (capaz de ser reutilizado) em kg		200	70

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, se a cada turno de produção forem retiradas duas toneladas de finos, teremos que destes finos, cerca de duzentos quilos serão bentonita, acompanhada de setenta quilos de carvão. Se cada empresa trabalhar com dois turnos de produção ao dia, em 30 dias ao mês, temos que esse valor de descarte de bentonita se torna 6 toneladas e de carvão, 420 quilos. Pode-se afirmar que estes materiais possuem grande potencial para a destinação ao beneficiamento, promovendo a separação dos mesmos e sua reutilização em outros procedimentos tecnológicos. Deixou-se este tema como sugestão para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

Por meio da metodologia aplicada ao trabalho, foi possível obter os parâmetros especificados nos objetivos deste estudo, de modo a permitir a caracterização e quantificação dos constituintes utilizados no sistema de moldagem em areia a verde, devido a correlação deste sistema com técnicas de avaliação granulométrica, perda ao fogo, sifonamento manual e pela adsorção de azul de metileno.

Em adição, foi realizada a avaliação da interação dos diferentes níveis de materiais constituintes dos sistemas de areia a verde baseado em areia nova e em areia de retorno, por meio do desempenho observado em propriedades como compactabilidade, permeabilidade e dureza. Pode-se concluir com base nesta interação, que foi possível levantar que:

- A propriedade de compactabilidade é afetada diretamente e principalmente pelo nível de água do sistema, tanto baseado em areia nova quanto baseado em areia de retorno. Quanto maior o nível de água, maior o índice de compactabilidade, devido ao efeito plastificante que é promovido entre os grãos de areia, promovendo um melhor escoamento sob pressão;

- A propriedade de permeabilidade para o sistema de areia nova é diminuída com o aumento do nível de bentonita e aumentada com o aumento do teor de umidade e de carvão, devido ao aumento do volume intersticial pelo teor de umidade, permitindo a melhor passagem dos gases. Já a permeabilidade para o sistema de areia de retorno é beneficiada com o aumento dos teores de areia nova, devido a inclusão de novos grãos de granulometria superior ou igual ao da areia de retorno, promovendo o aumento da interporosidade dos materiais e assim, um melhor fluxo do ar pela estrutura do molde;

- A propriedade de dureza é superior para níveis superiores de água, bentonita e carvão para o sistema de areia nova. O nível de dureza é modificado de forma insignificante para a areia de retorno nos teores selecionados neste trabalho;

- Identificação das composições ótimas do sistema de moldagem estudados com base nos modelos estatísticos, permitindo uma adição controlada e adequada, visando a redução da geração de resíduos sólidos;

- Divulgação do método de quantificação do grau de oolitização via interceptos, sendo um método que deve ser validado;

- Identificação e quantificação da argila ativa e do carvão presente nos finos, de modo a apresentar uma fonte de vendas ou de reutilização dos mesmos em aplicações não-nobres.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio das dificuldades e oportunidades levantadas neste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

1. Aumento do número de réplicas de cada amostra de modo a se obter uma população maior de resultados e assim, afirmar o comportamento ressaltado neste trabalho;

2. Realização da investigação de propriedades mecânicas como resistência a tração a verde e resistência a compressão a verde, além da fusão e vazamento em moldes com os níveis de materiais aqui estudados, de modo a verificar o desempenho de cada amostra e assim realizar uma seleção mais adequada dos teores de aditivos a serem adicionados a um sistema de areia de retorno;

3. Verificação da reutilização da areia de descarte em materiais cerâmicos como o concreto ou misturas asfálticas, investigando o impacto nas propriedades de acordo com a adição deste material;

4. Estudo da validação do método dos interceptos para a quantificação do grau de oolitização em comparação a ensaios adotados como padrão nas indústrias;

5. Estudo investigativo e de quantificação de finos retirada por batelada de produção no processo de moldagem;

6. Estudo sobre a estrutura remanescente da argila nos finos e possíveis rotas de beneficiamento do material, possibilitando a investigação de sua aplicação em outros produtos;

REFERÊNCIAS

ABIFA. **Desempenho do setor de fundição - Dezembro de 2012**. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo, p. 3. 2012.

ABIFA. **Desempenho do setor de fundição - Dezembro de 2013**. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo, p. 3. 2013.

ABIFA. **Anuário Abifa**. São Paulo, 220 f. 2014.

ABIFA. **Desempenho de produtos fundidos fabricados no mês de abril de 2014**. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo, p. 3 pgs. 2014.

ABIFA. **Desempenho do setor de fundição - Dezembro de 2014**. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo, p. 3. 2014.

ABIFA. **Desempenho do mês de abril de produtos fundidos**. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo, p. 3 pgs. 2015.

ABNT. **Resíduos sólidos - Classificação - NBR 10004**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 71 pgs. 2004.

ACTION, P. Portal Action - 6.3 Teste de Anderson-Darling. **Portal Action**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/63-teste-de-anderson-darling>>. Acesso em: 26 Maio 2017.

ACTION, P. Portal Action - 6.4 Teste de Shapiro-Wilk. **Portal Action**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/64-teste-de-shapiro-wilk>>. Acesso em: 25 Maio 2017.

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. UFSC. Florianópolis, p. 239. 2012.

ALVES, M. A. www.areiaverde.com. **Areia Verde**. Disponível em: <http://www.areiaverde.com/bentonita_impresao.html>. Acesso em: 02 Maio 2015.

BAUMER, B. **Influência do teor de finos nas propriedades tecnológicas da areia a verde**. Instituto Superior Tupy. Joinville, p. 45. 2004.

BEELEY, P. **Foundry Technology**. 2nd. ed: Butterworth-Heinemann, v. 1, 2001.

BILAL, S. et al. Comparative Analysis of the Effect of Cation Exchange Capacity on Raw and Treated Nigerian Bentonitic Clay Samples. **Journal of Scientific and Engineering Research**, Zaria, v. 3, n. 2, p. 177-182, 2016. ISSN 2394-2630.

BIOLO, S. M. **Reuso do resíduo de fundição: areia verde na produção de blocos cerâmicos**. UFRGS. Porto Alegre, p. 162. 2005.

BRICHESI, D. **Ameaça Trazida pela Importação de Bens de Outros Países**. ABIFA. São Paulo. 2009.

BRONDINO, O. C.; SILVA, J. P. G. D.; BRONDINO, N. O problema do descarte da areia de fundição: ensino para o desenvolvimento sustentável. **XLII COBENGE**, Juiz de Fora, Minas Gerais, 16 a 19 Setembro 2014. 12.

BROSCH, C. D.; RÉ, V. L. **Areias de fundição e materiais de moldagem**. São Paulo: [s.n.], 1995.

BROWN, J. **Foseco Ferrous Foundryman's Handbook**. 11. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.

CALÁBRIA, J. A. A. et al. **Determination of the cation exchange capacity of bentonite exposed to hyperalkaline fluid**. International Nuclear Atlantic Conference - INAC. Recife: [s.n.]. 2013. p. 24-29.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. UFPR. Curitiba, p. 152. 2008.

CASOTTI, B. P.; FILHO, E. D. B.; CASTRO, P. C. D. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial., p. 121-162. 2009.

CEMP. **CEMP 058 - Determinação do Inchamento da bentonita**. ABIFA, p. 2. 2015.

CEMP. **CEMP 081 - Determinação da distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos em materiais granulares.** ABIFA, p. 5. 2015.

CEMP. **CEMP 082 - Determinação do teor de argila AFS pelo método de lavagem com sifonamento manual.** ABIFA, p. 3. 2015.

CEMP. **CEMP 105 - Determinação do teor de umidade.** ABIFA, p. 3. 2015.

CEMP. **CEMP 111 - Determinação da densidade relativa de materiais granulares pelo método do picnômetro.** ABIFA, p. 2. 2015.

CEMP. **CEMP 120 - Determinação da perda ao fogo.** ABIFA, p. 2. 2015.

CEMP. **CEMP E-01 - Areia Padrão para ensaios em fundição.** ABIFA, p. 3. 2015.

CEMP. **CEMP E-03 - Pó de Carvão Mineral para Fundição.** ABIFA., p. 3. 2015.

CEMP. **CEMP E04 - Bentonita para Fundição.** ABIFA, p. 3. 2015.

CETESB. **Redução do descarte de areia de fundição e do consumo de areia nova na indústria de fundição.** Indústrias Romi S.A. São Paulo, p. 2. 2002.

COLON. COLON. **COLON.** Disponível em: <<http://www.colon.com.br/produto-cacamba-basculante.html>>. Acesso em: 10 set. 2015.

DALQUIST, S.; GUTOWSKI, T. **Manufacturing Engineering and Materials Handling Engineering**, p. 11. 2004.

D'ELBOUX, F. A. **Minimização de descarte de areias de fundição.** Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara d'Oeste, p. 158. 2000.

DOYLE, L. E. **Processos de fabricação e materiais para engenheiros.** São Paulo: Edgar Blucher, 1978.

EHLERS, R.; JUSTINIANO, P. LEG. **LEG UFPR**, 2017. Disponível em: <<http://www.leg.ufpr.br/~paulojus/CE210/ce210/node3.html>>. Acesso em: 23 Maio 2017.

ESTATCAMP. Portal Action. **Portal Action**, 2017. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/512-calculo-e-interpretacao-do-p-valor>>. Acesso em: 25 Maio 2017.

FAGUNDES, G. S. **Metodologias não-paramétricas para estudos com medidas repetitivas**. UFRGS. Porto Alegre, p. 82. 2012.

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. O que realmente significa o valor-p? **JNP**, São Paulo, v. 41, n. 5, p. 485-485, 2015. ISSN 1806-3713.

FERREIRA, J. M. G. D. C. **Tecnologia da Fundição**. 3^o. ed. Lisboa: [s.n.], 2010.

FERREIRA, N. F. **Controle da temperatura do aço líquido em uma aciaria elétrica**. UFRGS. Porto Alegre, p. 141. 2000.

FLORIDO, C. **Estudo das características da areia descartada de fundição - da matéria prima ao produto final**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 57. 2007.

HERMENEGILDO, M. K. **Determinação da concentração de metais presentes em areia de fundição: Estudo de caso da fundição Tupy S.A.** UFSC. Florianópolis, p. 81. 2011.

IMAN, R. L.; QUADE, D.; ALEXANDER, D. A. **Exact Probability levels for the Kruskal-Wallis Test**. Institute of Mathematical Statistics - American Mathematical Society, v. III, 1975.

ITTIPON, U. **Green sand Molding Management**. Suranaree University of Technology. Suranaree, p. 92. 2011.

LAFATE. Lafaete Locação. **Lafaete**. Disponível em: <<http://www.lafaetelocacao.com.br/pt/equipamentos/cacamba-6m%C2%B3/>>. Acesso em: 10 set. 2015.

LOPES, L. F. D. **Apostila de Estatística**. UFSM. Santa Maria, p. 139. 2003.

LUZ, A. B. et al. **Caracterização, ativação e modificação superficial de bentonitas brasileiras**. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro. 2004.

MATOS, T. F. L.; SCHALCH, V. Composição dos resíduos poliméricos, pós-consumo, gerados no município de São Carlos - SP. **Polímeros**, São Carlos, v. 17, n. 4, Outubro 2007.

MIKSOVSKY, F.; LICHY, P. The oolitization rate determination bentonite moulding mixtures. **Archives of Foundry Engineering**, Ostrava-Poruba, v. 8, n. 22/2, p. 103-106, Fevereiro 2008. ISSN 1897-3310.

MINITAB. MiniTab. **MiniTab**, 2016. Disponível em: <<http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>>. Acesso em: 20 Maio 2017.

NETO, B. C. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 293. 2004.

NEVES, S. **Análise do funcionamento de circuito de areia**. FEUP. Porto, p. 47. 2000.

NUNES, R. M. et al. **ASM Metals Handbook - Casting**. 9th. ed: ASM International, v. 2º, 1988.

OKIDA, J. R. **Estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição**. UTFPR. Ponta Grossa, p. 137 pgs. 2006.

OLIVEIRA, B. B. D.; DUARTE, I. R. Estudo de métodos de dispersão da bentonita para a absorção de azul de metileno. **Instituto Superior Tupy**, Joinville, v. 13, n. 13, Novembro 2012.

OLIVEIRA, B. F. D. **Fundição**. IFPA. Belém, p. 108. 2013.

OLIVEIRA, H. L. D. et al. **Relatório Técnico de implementação de programa de produção mais limpa no setor de fundição**. Belo Horizonte, MG. 2005.

PAULO, P. D. S. Prefeitura. **Prefeitura de São Paulo**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/infraestrutura/obras_de_drenagem/piscinoes/index.php?p=37938>. Acesso em: 10 set. 2015.

PEREIRA, R. L. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. Universidade federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, SC. 2005.

PONTES, I. F.; ALMEIDA, S. L. M. D. Talco. In: PONTES, I. F.; ALMEIDA, S. L. M. D. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Cap. 29, p. 607-628.

REGO, F. C. D. A. **Sistema de beneficiamento de areia para fins industriais**. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 46. 2005.

REIS, G. M.; JÚNIOR, J. I. R. Comparação de testes paramétricos e não paramétricos aplicados em delineamentos experimentais. **III SAEPRO**, Viçosa, 2007. 13.

RIBERSID. Ribersid. **Ribersid**, 1996. Disponível em: <<http://www.ribersid.com.br/produtosDetalhes.asp?idProd=992>>. Acesso em: 20 Maio 2015.

ROMANUS, A. Foundry: Cursos e Orientação Ltda. **foundrynews.com.br**, 2014. Disponível em: <<http://foundrynews.com.br/artigos/ver/68/bentonita-aditivada-para-fundicao>>. Acesso em: 19 Maio 2015.

ROSSETTO, T. S. **Caracterização de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 87. 2010.

RUBLÍK, F. On performance of multiple comparison Methods used in conjunction with the Kruskal-Wallis test. **Measurement Science Review**, v. 1, n. 1, p. 37-42, 2001.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton**. UFSC. Florianópolis. 2005.

SCHRAMM, G. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry**. 2nd. ed. Kkarlsruhe: [s.n.], 1998.

SIEGEL, M. **Fundição, 13° edição**. Associação Brasileira de Metais. São Paulo. 1982.

SILVA, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do município de Boa Vista - Estado da Paraíba.** USP. São Paulo, p. 282. 2011.

SILVA, A. R. V.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **REMAP - Revista Eletrônica de materiais e Processos**, Campina Grande - Paraíba, v. 3.2, p. 26 - 35, Agosto 2008. ISSN 1809-8797.

SOARES, G. D. A. **Fundição:** Mercado, Processos e Metalurgia. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000.

TÉCNICO, C. **Fundição e Matérias Primas.** São Paulo: [s.n.].

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de Variáveis: Métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por população. **HCPA**, Porto Alegre, v. 32, n. 2, p. 227-234, 2012.

TURKELI, A. **Sand, Sand Addtives, Sand Properties and Sand Reclamation.** Marmara Üniversitesi. Istanbul, Turquia, p. 168. 2009.

VIALI, L. **Testes de Hipóteses.** PUC - RJ. Rio de Janeiro, p. 29. 2008.

VIALI, L. **Testes de hipóteses não paramétricas.** Porto Alegre: [s.n.], v. II, 2008.
VIDAL, D. F. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, p. 172. 2013.

VILELA, G. B. J. **Conteúdos ministrados nas disciplinas de estatística em cursos de graduação e pós graduação.** UNIMEP. Campinas, p. 9. 2014.

APÊNDICE A – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

Tabela A 1 – Dados do primeiro ensaio de granulometria para a areia nova – massa utilizada de 100,250 gramas.

Peneiras		Peneira	Peneira +	Retenção	Retenção	Fatores	Produto
Malha	N° da	Gramas	Gramas	Gramas	%	--	%
(µm)	malha		Material				
425	40	422,369	422,821	0,432	0,43	30	12,93
250	60	390,085	406,404	16,319	16,28	40	651,13
180	80	389,150	434,242	45,092	44,98	60	2698,77
106	140	378,467	414,866	36,399	36,31	80	2904,66
75	200	370,446	372,396	1,950	1,95	140	272,32
53	270	374,998	375,024	0,026	0,03	200	5,19
	Panela	369,330	369,360	0,030	0,03	270	8,08
			SOMA	100,248	100,00	SOMA	6553,08
Teor de Finos		2,00%				MF	66 AFS

Tabela A 2 – Dados do segundo ensaio de granulometria para a areia nova – massa utilizada de 100,013 gramas.

Peneiras		Peneira	Peneira +	Retenção	Retenção	Fatores	Produto
Malha	N° da	Gramas	Gramas	Gramas	%	--	%
(µm)	malha		Material				
425	40	422,350	422,970	0,620	0,62	30	18,60
250	60	390,055	406,582	16,527	16,52	40	660,99
180	80	389,140	436,242	47,102	47,10	60	2825,75
106	140	378,469	412,010	33,541	33,54	80	2682,93
75	200	370,310	372,377	2,067	2,07	140	289,34
53	270	374,955	374,998	0,043	0,04	200	8,60
	Panela	369,333	369,352	0,019	0,02	270	5,13
			SOMA	99,919	99,91	SOMA	6491,35
Teor de Finos		2,13%				MF	65 AFS

Tabela A 3 – Dados do terceiro ensaio de granulometria da areia nova – massa utilizada de 100,046 gramas;

Peneiras		Peneira	Peneira + Material	Retenção	Retenção	Fatores	Produto
Malha (μm)	N° da malha	Gramas	Gramas	Gramas	%	--	%
425	40	422,325	422,876	0,551	0,55	30	16,52
250	60	390,036	406,748	16,712	16,70	40	668,17
180	80	389,122	434,765	45,643	45,62	60	2737,32
106	140	378,440	412,996	34,556	34,54	80	2763,21
75	200	370,251	372,964	2,713	2,71	140	379,65
53	270	374,960	375,037	0,077	0,08	200	15,39
	Panela	369,297	369,532	0,235	0,23	270	63,42
			SOMA	100,487	100,44	SOMA	6643,68
Teor de Finos		3,02%				MF	66 AFS

Tabela A 4 – Cálculo do tamanho de grão médio para primeira amostra – areia nova.

Malha (μm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (μm)
425	498	0,43	214,59	191,13
250	300	16,28	4883,49	
180	212	44,98	9535,66	
106	119	36,31	4320,68	
75	80	1,95	155,61	
53	38	0,03	0,99	
Panela	38	0,03	1,13	
		100,00	19112,17	

Tabela A 5 - Cálculo do tamanho de grão médio para segunda amostra – areia nova.

Malha (μm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (μm)
425	498	0,62	308,72	194,27
250	300	16,52	4957,45	
180	212	47,10	9984,33	
106	119	33,54	3990,86	
75	80	2,07	165,34	
53	38	0,04	1,63	
Panela	38	0,02	0,72	
		99,91	19409,06	

Tabela A 6 - Cálculo do tamanho de grão médio para terceira amostra – areia nova.

Malha (µm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (µm)
425	498	0,55	274,27	192,12
250	300	16,70	5011,29	
180	212	45,62	9671,87	
106	119	34,54	4110,27	
75	80	2,71	216,94	
53	38	0,08	2,92	
Panela	38	0,23	8,93	
		100,44	19296,49	

Tabela A 7 - Dados do primeiro ensaio de granulometria da areia de retorno.

Peneiras		Peneira	Peneira + Material	Retenção	Retenção	Fatores	Produto
Malha (µm)	Nº da malha	Gramas	Gramas	Gramas	%	--	%
425	40	422,484	427,395	5,111	5,08	30	152,39
250	60	390,032	423,299	33,267	33,06	40	1322,53
180	80	389,169	438,920	49,751	49,45	60	2966,79
106	140	378,462	390,228	11,766	11,69	80	035,52
75	200	370,226	370,579	0,353	0,35	140	49,12
53	270	374,945	374,999	0,054	0,05	200	10,73
	Panela	369,275	369,489	0,214	0,21	270	57,43
			Soma	100,516	99,90	SOMA	5494,50
Teor de Finos		0,62%				MF	55 AFS

Tabela A 8 - Dados do segundo ensaio de granulometria da areia de retorno.

Peneiras		Peneira	Peneira +	Retenção	Retenção	Fatores	Produto
		Material					
Malha (μm)	N° da malha	Gramas	Gramas	Gramas	%	--	%
425	40	422,563	425,410	2,847	2,84	30	85,29
250	60	390,085	420,962	30,887	30,83	40	1233,29
180	80	389,342	441,073	51,731	51,66	60	3099,37
106	140	378,495	392,411	13,916	13,90	80	1111,67
75	200	370,315	370,782	0,467	0,47	140	65,29
53	270	375,030	375,092	0,062	0,06	200	12,38
	Panela	369,343	369,596	0,253	0,25	270	68,21
				100,153	100,01	SOMA	5675,49
Teor de Finos		0,78%				MF	57 AFS

Tabela A 9 - Dados do terceiro ensaio de granulometria da areia de retorno.

Peneiras		Peneira	Peneira +	Retenção	Retenção	Fatores	Produto
		Material					
Malha (μm)	N° da malha	Gramas	Gramas	Gramas	%	--	%
425	40	422,469	428,235	5,766	5,73	30	171,84
250	60	390,039	424,550	34,511	34,28	40	1371,38
180	80	389,284	433,020	43,736	43,45	60	2606,93
106	140	378,460	394,150	15,69	15,59	80	1246,96
75	200	370,260	371,032	0,772	0,77	140	107,37
53	270	374,962	375,131	0,169	0,17	200	33,58
	Panela	369,342	369,787	0,445	0,44	270	119,36
			SOMA	101,089	100,43	SOMA	5657,41
Teor de Finos		0,92%				MF	56 AFS

Tabela A 10 - Cálculo do tamanho de grão médio para amostra 1 – areia de retorno.

Malha (µm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (µm)
425	498	5,08	2529,70	243,85
250	300	33,06	9919,00	
180	212	49,45	10482,64	
106	119	11,69	1391,58	
75	80	0,35	28,07	
53	38	0,05	2,04	
Panela	38	0,21	8,08	
		99,90	24361,10	

Tabela A 111 - Cálculo do tamanho de grão médio para amostra 2 – areia de retorno.

Malha (µm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (µm)
425	498	2,84	1415,75	233,18
250	300	30,83	9249,69	
180	212	51,66	10951,09	
106	119	13,90	1653,61	
75	80	0,47	37,31	
53	38	0,06	2,35	
Panela	38	0,25	9,60	
		100,01	23319,40	

Tabela A 12 - Cálculo do tamanho de grão médio para amostra 3 – areia de retorno.

Malha (µm)	Fator	% retido (%R)	Produto (P)	TGM (µm)
425	498	5,73	2852,61	241,86
250	300	34,28	10285,31	
180	212	43,45	9211,15	
106	119	15,59	1854,85	
75	80	0,77	61,35	
53	38	0,17	6,38	
Panela	38	0,44	16,80	
		100,43	24288,46	