

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ ANGELO DE PAULA DO ROSARIO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AREIA VERDE
PARA FUNDIÇÃO AGLOMERADA COM CAULIM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

LUIZ ANGELO DE PAULA DO ROSARIO

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AREIA VERDE
PARA FUNDIÇÃO AGLOMERADA COM CAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira

PONTA GROSSA

2019



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ
CÂMPUS PONTA GROSSA
Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

Análise de areia verde de fundição com caulim

por

Luiz Angelo de Paula do Rosario

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em xx de xx de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira

Prof. Orientador

Prof. Dr. Denilson J. M. Aguiar

Membro titular

Prof. Me.

Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

Dedico este trabalho minha companheira
Briane, a minha filha Luiza, ao meu Pai
Francisco, minha Mãe Paula, ao meu
irmão José Guilherme, à minha irmã Thais
e à minha sobrinha Maria Paula.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sempre a Deus e a minha protetora Nossa Senhora Aparecida por me dar a oportunidade de viver este desafio.

Agradeço também a toda minha família, minha companheira Briane, meu pai Francisco, minha mãe Paula, ao meu irmão José Guilherme, à minha irmã Thais, à minha sobrinha Maria Paula pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ivanir e a Ludmila, por ensinar mais do que deveria, por apoiar-me com sabedoria e conhecimento nesta etapa de minha vida e por me tratar com dignidade e ser um amigo.

Aos meus colegas de sala André, Elimar, Diego, Vinicius, Matheus, Maikon e todos aqueles dos quais tive o prazer de compartilhar muitos dias incríveis durante esta graduação.

Aos meus companheiros de moradia Lucas, Matheus, Giovane, Rafael e Felipe.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

A todos os professores que durante esta graduação me contribuíram com seu conhecimento e companheirismo, me influenciando positivamente e me inspirando para despertar o tipo de profissional que eu deveria ser.

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Construímos muros demais e pontes
de menos. (NEWTON, Isaac)

RESUMO

ROSARIO, Luiz Angelo de Paula. **Propriedades de areia a verde para fundição aglomerada com caulim**. 2019. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Este trabalho consiste em analisar a compactabilidade, permeabilidade e resistência mecânica de uma areia verde de fundição, composta da mistura de sílica, caulim e água. Os materiais foram caracterizados através da determinação da distribuição granulométrica (tanto da areia base como da areia verde) módulo de finura, teor de finos, teor de argila. O teor de umidade variou numa relação água/argila de 0,1 a 0,3 para areia aglomerada com 10% de caulim e de 0,09 a 0,43 para uma com 11,07%. Para cada ensaio de compactabilidade, permeabilidade e resistência à compressão a verde foram elaborados 3 corpos de prova padrão ABNT com diferente relação areia:argila:água. Como enriquecimento do trabalho, foram avaliadas as propriedades permeáveis da areia sílica utilizada nos ensaios. Conclui-se que o caulim, sem aditivos, oriundo da cidade de Tijucas do Sul, apresenta resistência mecânica à compressão aceitável para a sua utilização em fundição, entretanto, a permeabilidade não foi satisfatória em nenhuma composição. Já a compactabilidade foi aceitável apenas quando a umidade causou o inchamento da areia, sendo que neste ponto, houve também a máxima resistência mecânica à compressão.

Palavras-chave: Fundição. Areia. Verde. Caulim.

ABSTRACT

ROSARIO, Luiz Angelo de Paula. **Green sand properties for kaolin agglomerated foundry**. 2019. 75p. Work of conclusion course Graduation in Mechanical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

This work analyzes the compactness, permeability and mechanical resistance of a green foundry sand composed of a mixture of silica, kaolin and water. The materials were characterized by determining the particle size distribution (both base sand and green sand) fineness modulus, fines content, clay content. The moisture content varied in a water / clay ratio from 0.1 to 0.3 for agglomerated sand with 10% kaolin and from 0.09 to 0.43 to one with 11.07%. For each compactness, permeability and green compressive strength test 3 ABNT standard specimens with different sand: clay: water ratio were prepared. As enrichment of the work, the permeable properties of the silica sand used in the tests were evaluated. It can be concluded that kaolin, without additives, from Tijucas do Sul city, presents acceptable mechanical compressive strength for its use in casting, however, the permeability was not satisfactory in any composition. The compactability was acceptable only when moisture caused the sand to swell, and at this point there was also the maximum mechanical resistance to compression.

Keywords: Foundry. Green. Sand. Kaolin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do grão de sílica envolvido pela mistura de água e argila	15
Figura 2 - Disposição da sílica, argila e água.....	16
Figura 3 - Caráter dipolar da molécula de água	16
Figura 4 - Forças de adesão e coesão.....	17
Figura 5 - Variação das forças de adesão e coesão com a variação da umidade	18
Figura 6 - Representação da lamela de argilomineral com 7 Å de espessura	27
Figura 7 - Representação da lamela de argilomineral com 10 Å de espessura	27
Figura 8 – Lamelas de caulim. (A) Ilustração. (B) Foto real com aproximação em 250x.	28
Figura 9 - Estrutura da caulinita	29
Figura 10 - Partícula de argila em forma de placa com cargas negativas e cátions absorvidos.....	30
Figura 11 - Representação esquemática do espessamento progressivo da película de água e do declínio da tensão da água em macroporo	32
Figura 12 - Pilha cônica.....	35
Figura 13 - Pilha alongada	36
Figura 14 - Curva Tensão x Deformação na compressão para uma areia de moldagem.....	38
Figura 15 - Quarteador Jones	40
Figura 16 - Peneira, funil, raspador, molde cilíndrico e base.	41
Figura 17 - Marteleto para compactação de corpo de prova.....	41
Figura 18 - Peneira inferior à esquerda e superior à direita para ensaio de permeabilidade.....	42
Figura 19 - Permeâmetro	43
Figura 20 - Máquina de ensaio de R.C.V.	43
Figura 21 - Agitador mecânico acoplado ao béquer.....	44
Figura 22 - Fluxograma das etapas e procedimentos	46

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Teor de umidade	22
Equação 2 - Cálculo do Módulo de finura	24
Equação 3 - Teor de argila	24
Equação 4 - Capacidade máxima do misturador.....	33
Equação 5 - Massa de argila na mistura inicial	34
Equação 6 - Compactabilidade	36
Equação 7 - Permeabilidade	37
Equação 8 - Resiliência.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição Granulométrica da Areia Base	60
Gráfico 2 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V. da Areia Base	62
Gráfico 3 - Distribuição Granulométrica da Areia Verde.....	65
Gráfico 4 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V. da Areia Verde	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Planilha para calcular a distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos, com a série de peneira ABNT	23
Quadro 2 - Distribuição granulométrica da areia base	60
Quadro 3 - Distribuição granulométrica da areia verde	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características desejáveis em uma areia base	20
Tabela 2 - Capacidade de troca de cátions de alguns coloides do solo sob condições tropicais.....	29
Tabela 3 - Relação, massa e porcentagem para os experimentos	50
Tabela 4 - Teor de umidade da areia base	59
Tabela 5 - Teor de umidade do caulim.....	61
Tabela 6 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V.	62
Tabela 7 - Teor de umidade da areia	63
Tabela 8 - Teor de argila	64
Tabela 9 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V.	66
Tabela 10 - Permeabilidade da areia base.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEMP	Comissão Especial de Matéria Prima
CP	Corpo de Prova
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Regulamentadora
SENAI	Sistema Nacional de Educação Industrial
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SIMBOLOS

%	Porcentagem
g	Gramas
°C	Graus Celsius
g	Gramas
meq	Miliequivalência
ml	Mililitros
mm	Milímetros
mmolc/dm ³	Milimols de carga por decímetro cúbico de solo
MPa	Mega Pascal
R.C.V.	Resistência à Compressão a Verde
t	Tonelada
t/h.a	Tonelada sobre hora por ano
µm	Mícron
Å	Angstrom

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO	14
2.2 AREIA VERDE	15
2.2.1 Propriedades da Areia Verde	18
2.2.1.1 Escoabilidade	19
2.2.1.2 Consistência	19
2.2.1.3 Plasticidade	19
2.3 AREIA BASE	20
2.3.1 Propriedades da Areia Base	21
2.3.2 Teor de umidade	22
2.3.2.1 Granulometria	22
2.3.2.1.1 Distribuição Granulométrica	23
2.3.2.1.2 Módulo de finura	23
2.3.2.1.3 Teor de finos	24
2.3.2.1.4 Teor de argila	24
2.3.3 Sílica	25
2.3.3.1 Sílica Vítreas	25
2.4 LIGANTES	26
2.4.1 Argilas	26
2.4.1.1 Caulim	28
2.4.1.1.1 Aplicações do Caulim	30
2.4.1.1.2 Reservas de Caulim no Brasil	30
2.4.1.1.3 Processamento do Caulim	31
2.4.1.1.4 Uso do caulim na fundição	32
2.5 ÁGUA	32
2.6 MISTURA PADRÃO	33
2.6.1 Homogeneização e Quarteamento	34
2.6.2 Compactabilidade	36
2.6.3 Permeabilidade	37
2.6.4 Resistência à Compressão a Verde	37
2.7 EQUIPAMENTOS	39
2.7.1 Equipamento de Proteção Individual	39
2.7.2 Equipamentos de Uso Geral	40
2.7.3 Equipamentos de Uso Específico	42

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
3.2 DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
3.2.1 Determinação da Distribuição Granulométrica, Módulo de Finura e Teor de Finos	47
3.2.2 Determinação do Teor de Argila Error! Bookmark not defined.	
3.3 ELABORAÇÃO DA MISTURA PADRÃO	49
3.4 HOMOGENIZAÇÃO E QUARTEAMENTO ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
3.5 ENSAIO DE COMPACTABILIDADE	51
3.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE	51
3.7 ENSAIO DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO A VERDE	54
4 RESULTADOS	59
5 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A numerosa e crescente população mundial e a escassez de recursos culminam na incessante pesquisa em todos os setores de produção. Faz-se necessário conhecer a fundo todas as variantes que um determinado material pode apresentar, desde a sua aplicação no consumo humano quanto na fabricação de peças e objetos.

No quesito fabricação e materiais de consumo para a fabricação, encontram-se neste meio, a fundição. Ela necessita cada vez mais de produtos de qualidade, com baixo consumo energético e com disponibilidade em locais mais próximo, a fim de baixar os custos de produção e facilitar o acesso aos materiais.

Várias pesquisas estão sendo realizadas, em especial, com novos aditivos para o composto de areia verde e também, novas formas de reaproveitamento do resíduo oriundo do setor de fundição. Dentre os principais usos, o mais comum é como material para a construção civil em geral

A pesquisa no setor de fundição, o qual tem tido uma enorme elevação no padrão de qualidade após a segunda guerra mundial, tornou-se fundamental e indispensável, pois este processo é capaz de produzir, em conjunto com outros processos, a maior parte dos produtos em uso no planeta e fora dele. Até meados dos anos 60, muitos materiais deste setor eram simples e de composições pouco complexas (CALLISTER).

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da presença da caulinita (oriunda da cidade de Tijucas do Sul – Paraná – Brasil), em areias a verde de fundição.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as propriedades AFS de areias a verde com caulinita em diferentes teores de umidade.
- Correlacionar teores ótimos de umidade da caulinita em relação à bentonita sódica nacional em areias a verde de fundição.

- Avaliar a viabilidade da substituição da bentonita pela caulinita em alguns projetos de moldes.

1.3 JUSTIFICATIVA

Aumento da refratariedade e redução do custo no processo de fundição de areia verde.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

A fundição pode ser definida como um processo no qual o metal fundido é conduzido a fluir de forma forçada ou por gravidade para dentro de um molde, o qual possui o formato total ou parcial da peça que se deseja reproduzir (BALDAN, 2013; SENAI, 1987). A geometria final da peça fundida é obtida com a solidificação do metal. Este método de fabricação, com relatos de uso datados de 10.000 a.C., tem evoluído tornando-se um dos principais processos de fabricação, permitindo a fabricação em série ou em unidade e tem a capacidade de representar formas simples e complexas com baixo custo (BALDAN, 2013). As principais etapas do processo são confecção do modelo, macho e molde, vazão do metal fundido, desmoldagem e acabamento superficial e, podem ser realizadas de diversas maneiras.

Os principais processos de fundição podem ser divididos em duas características em relação ao molde:

- Para moldes permanentes os principais processos são sobre pressão (injeção): câmara quente e câmara fria, a vácuo, baixa pressão, coquilha por gravidade, lingotamento contínuo e descontínuo, compressão mecânica (squeeze casting), centrifugação e alguns processos especiais (Melt spinning, Spray, Rheocasting).
- Para os moldes não permanentes, os processos principais são lostfoam, cera perdida, em casca (Shellmolding), silicato/CO₂, caixa fria (cold-box), gesso, cura a frio e areia verde.

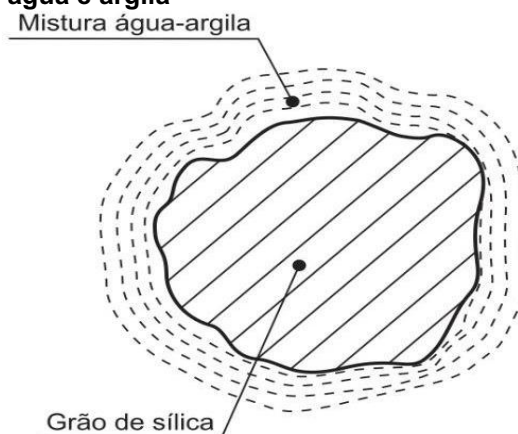
Para os processos de fundição sob pressão e fundição em coquilha são utilizados moldes metálicos e, para os demais processos, tanto o macho quanto o modelo são feitos principalmente em areia base com a função de material refratário com aglomerante (BALDAN, 2013). Há diversos tipos de areia e aglomerantes, os quais podem ser combinados e dosados de forma a obter uma composição ideal, com propriedades específicas que atendam às necessidades da peça a ser reproduzida.

2.2 AREIA VERDE

Areias de fundição em sua definição mais simples consistem em um material heterogêneo constituído de areia base (normalmente areia silicosa), (um ou mais) aglomerante(s) e plastificante (água). Caso o aglomerante seja líquido, a água poderá ser suprimida. O mecanismo de ligação entre o denominado trinômio fundamental (areia-argila-água) apresenta um ponto ótimo quando as lamelas de argilas umedecidas envolvem, com uma camada em forma de filme, cada grão de areia. As ligações entre as cerâmicas podem ser desde puramente iônicas até totalmente covalentes. Sendo que em alguns casos, ambas podem ocorrer em conjunto. A quantidade de ligação iônica em porcentagem no composto irá depender da eletronegatividade dos átomos (CALLISTER)

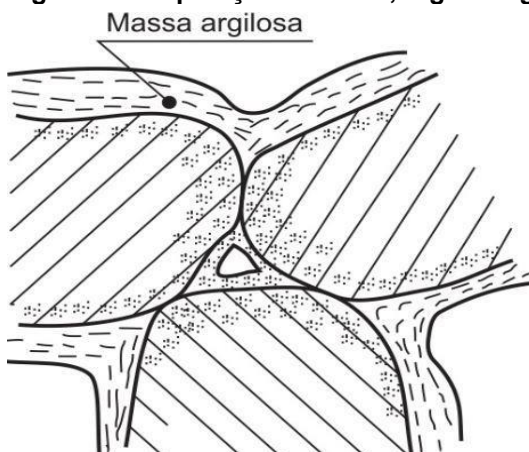
A morfologia formada por camadas finas de água, alternadas com lamelas de argila, são responsáveis pela formação desse material argiloso que fornece as propriedades à areia verde, conforme demonstram as figuras 1 e 2. Nas moléculas de água há a presença de ligação covalente entre uma molécula de oxigênio e duas moléculas de hidrogênio. Assim dois prótons de hidrogênio mantêm um ângulo de 105° entre si, tornando a carga assimétrica, gerando, portanto, uma molécula dipolar, conforme figura 3 (BALDAN, 2013; MARIOTTO, 1986)

Figura 1 - Ilustração do grão de sílica envolvido pela mistura de água e argila



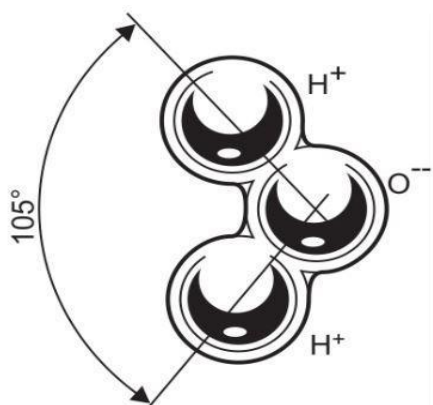
Fonte: SENAI (1987)

Figura 2 - Disposição da sílica, argila e água



Fonte: SENAI (1987)

Figura 3 - Caráter dipolar da molécula de água



Fonte: BALDAN (2013)

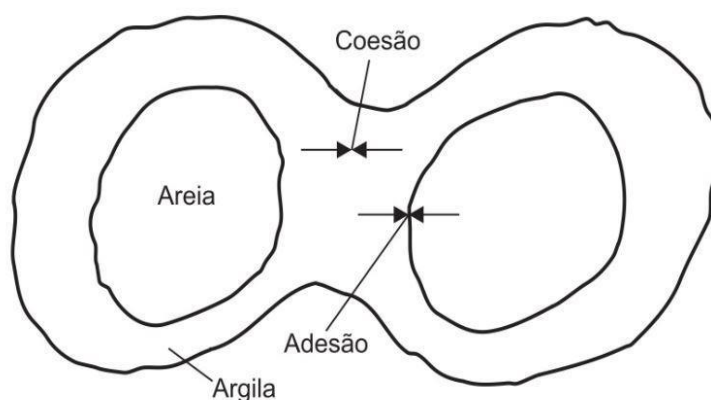
No grão de quartzo (SiO_2) há elétrons de oxigênio com cargas que não foram compensadas internamente, tendo portanto, enorme potencial de ligação com os prótons do hidrogênio da água, a qual devido a dipolaridade, mantém um alinhamento rígido em camadas subsequentes sobre a partícula sólida, unindo os grãos por forças coulombianas (BALDAN, 2013). Com este dipolo formado pela molécula de água, tem-se ligações entre lamelas adjacentes, as quais podem, devido a forças externas, deslizarem entre si. Tal deslizamento característico das lamelas, envolvidos do grão de areia base, explicam a formação da massa argilosa demonstrada na figura 2.

A água tem a capacidade de fornecer plasticidade às lamelas de argila, agindo como ligante delas através da força de ligação promovida nas pontes, as quais são formadas com a aproximação dos grãos de areia e seus pontos de contato, quando da compactação da areia utilizada nos moldes. A atração mútua entre as moléculas

de água e os átomos da superfície sólida de um grão de sílica por exemplo, são possíveis através das ligações de hidrogênio, as quais permitem que uma partícula se mantenha ligada à água. Tal propriedade também é chamada de molhabilidade (BALDAN, 2013).

A eficácia da argila em envolver os grãos de areia se devem às características de coesão, que ocorre no interior entre a argila e o filme de água e, a adesão que ocorre entre os grãos de sílica e a camada de argila conforme demonstra a figura 4. Tais forças de atração são devidas ao desequilíbrio elétrico interno devido à disposição atômica e à troca de átomos do elemento-base de alumínio (Al) por sódio (Na), cálcio (Ca) e potássio (K) possibilitando o desenvolvimento de pontes de hidrogênio.

Figura 4 - Forças de adesão e coesão



Fonte: adaptado de GUESSER (1982)

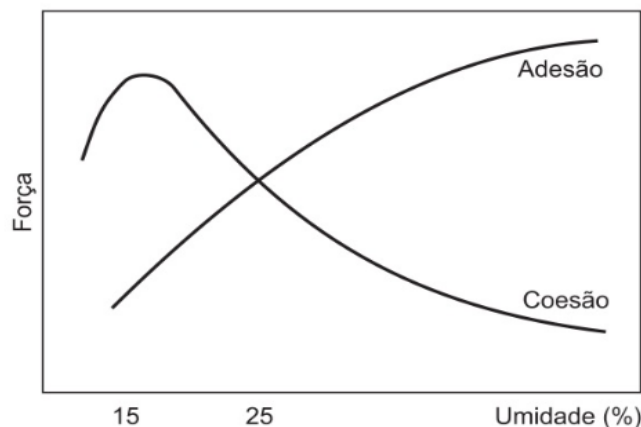
Caracterizando a água como o principal ligante no desenvolvimento da areia verde, faz-se necessário esclarecer a função da argila neste conjunto também chamado de trinômio fundamental. Assim sendo, a argila é a responsável por fornecer as características e condições que permitem a água atuar como ligante do sistema. O tamanho e a interação que a argila tem com a água, permitem expandir a superfície de contato, de forma que as pontes, rígidas e intensas, de ligações químicas formadas pela água sejam suficientes para manter as forças coesivas, indispensáveis nas areias de moldagem, além de fornecer plasticidade às ligações (BALDAN, 2013; MARIOTTO, 1986).

A plasticidade é uma característica permitida pela estrutura lamelar das argilas, ou seja, sem elas a água perderia rapidamente seu efeito ligante em baixas

temperaturas. Além disso a argila é capaz de reduzir consideravelmente a vaporização da umidade, pois retém a água no interior de suas lamelas por mais tempo, controlando a contração por perda de água durante o aquecimento. Tal perda causa é responsável por equilibrar a mistura durante a expansão dos grãos de areia base, concedendo estabilidade térmica ao molde (BALDAN, 2013).

Assim sendo, faz-se necessário conhecer um fator de equilíbrio denominado relação água/argila, que é a porcentagem de água sobre a porcentagem de argila, com extrema importância na resistência da areia de moldagem. Para cada mistura são necessários ensaios físicos para determinar qual a relação ideal que confere o valor ótimo. No geral, o fator de 0,25 fornece bons resultados, conforme demonstra a figura 5. Nela é possível observar que à medida que o fator passa a aumentar, o molde adquire maior resistência devido ao aumento das pontes de ligações químicas que consequentemente vão afastando as lamelas de argila. Quanto maior a distância entre as lamelas, menor a influência da diferença de potencial, reduzindo o efeito das pontes de ligação, deixando de ser efetivas em algumas lamelas, reduzindo consequentemente a resistência do conjunto (BALDAN, 2013).

Figura 5 - Variação das forças de adesão e coesão com a variação da umidade



Fonte: SENAI (1987)

2.2.1 Propriedades da Areia Verde

Saber a quantidade de água exata na areia verde é determinante para dar liga à mistura, conceder comportamento plástico e fluidez durante a moldagem. (BALDAN,

2013; CHANG E HOCHENG, 2001). Para as areias de moldagem, três características são de extrema importância são escoabilidade, consistência e plasticidade. O equilíbrio entre as três principais propriedades permite que moldes uniformemente compactados sejam fabricados reproduzindo fielmente a geometria do modelo, mantendo sua forma e resistindo às deformações antes do rompimento intencional com a aplicação de esforços mecânicos externos. Os minerais utilizados na fabricação de moldes e macharia são a areia base (sílica, zirconita, cromita, olivina e chamote), ligantes (argila, silicato de sódio, resinas, óleos e cimento) e aditivos (carvão mineral, enxofre, serragem, dextrina, óxido de ferro, ácido bórico e fluoreto de amônia) (BALDAN, 2013).

2.2.1.1 Escoabilidade

É a propriedade determina a capacidade da areia em se moldar, por escorregamento dos grãos, adquirindo a geometria da peça e ocupando todo o espaço no interior do molde. Ela é indispensável na determinação da energia que será empregada no processo de compactação, sendo que quanto maior o valor da escoabilidade, maior o escoamento e, portanto, menor será o esforço para empregado na fabricação do molde.

2.2.1.2 Consistência

É a propriedade relacionada à resistência à compressão a verde (R.C.V.), ou seja, a capacidade que a areia de moldagem possui de manter seu formato, resistindo aos esforços aplicados durante o processo.

2.2.1.3 Plasticidade

É a propriedade que a areia de moldagem possui de deformar-se plasticamente durante a aplicação de esforços externos, podendo ser observável também no ensaio de R.C.V.

2.3 AREIA BASE

As areias bases formam a maior porção da areia de verde (BALDAN, 2013; SENAI, 1987) e em ordem decrescente de uso na indústria, as principais areias são sílica (quartzo), cromita, zirconita e por último a olivina (BALDAN, 2013; MARIOTTO, 1986). A CEMP E-01 define como areia padrão a sílica livre de argila, materiais orgânicos e partículas estranhas, neutra, seca e com teor de sílica acima de 99%, com granulometria dentro dos limites e ponto de sinterização acima de 1400°C. Algumas condições específicas que deverão ser atendidas são apresentadas na CEMP E-01 são representadas na tabela 1.

Tabela 1 - Características desejáveis em uma areia base

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Teor de umidade (%)	Máx. 0,10
Teor de SiO ₂ (%)	Mín. 99,00
Teor de argila total (%)	Máx. 0,10
Superfície específica teórica (cm ² /g)	95 – 107
Tamanho do grão médio (mm)	0,230 – 0,260
Coeficiente de angularidade	1,20 – 1,40
Módulo de finura	55 – 61
Teor de finos (%)	Máx. 0,1
Valor da demanda de ácido (ml NaOH-0,1N/50g de areia a pH2)	Máx. 3,0
Permeabilidade base (AFS)	110 – 140
Número específico teórico de grãos (10 ⁴ unidades g)	7,0 – 10,0
Diâmetro representativo (mm)	0,188 – 0,211
Grau de afastamento (%)	10,0 – 13,0
pH	6,0 – 7,0

Fonte: CEMP E-01 (2015)

Tais minerais devem possuir algumas propriedades para que possam atender as solicitações na fabricação de moldes e macharia, são elas pureza, presença de orgânicos, forma dos grãos, granulometria, densidade, ponto de fusão e expansibilidade.

- Pureza: é uma característica que determina a quantidade de impurezas presente na mistura. Esses materiais indesejáveis são capazes de reagir com o metal em altas temperaturas e baixar o ponto de fusão.
- Presença de orgânicos: em alguns casos faz-se necessário realizar a queima da areia antes do uso, de forma a eliminar os compostos orgânicos capazes de gerar gases desnecessários e aumentar o consumo de ligantes.
- Forma dos grãos: os grãos de areia base são classificados em três geometrias, sendo elas arredondadas (oriundas de leito dos rios e dunas), subangulares (rios e dunas também) e angulares (oriundos de britagem). Os grãos arredondados consomem menos ligante devido a menor superfície específica.
- Granulometria: é a propriedade padronizada pela American Foundry Society (AFS) utilizado para medir a granulometria através de uma série de peneiras. A distribuição granulométrica determina o tamanho médio dos grãos calculado através da média ponderada. A granulometria é conhecida também como Módulo de Finura que com fórmulas de cálculo próprias podem fornecer valores em AFS. Partículas com menos de 20 μm são dispensadas nas aferições (BALDAN, 2013; MARIOTTO, 1986).
- Densidade: é a propriedade que determina a relação entre massa e volume.
- Ponto de fusão: é o ponto onde há uma mudança do estado da matéria da areia, que passa de sólido para líquido.
- Expansibilidade: é a característica que a areia tem em aumentar seu volume quando exposta à umidade e altas temperaturas. Quanto menor for a expansividade, menos defeitos serão causados à peça. A sílica vítrea, muito utilizada em fundição de precisão apresenta menor grau de expansão que a sílica normalmente utilizada, a qual é encontrada em abundância na natureza tendo como consequência o menor preço em relação à vítrea.

2.3.1 Propriedades da Areia Base

Algumas propriedades intrínsecas da areia base devem ser determinadas antes do uso da areia em qualquer experimento de fundição.

2.3.2 Teor de umidade

O teor de umidade, conforme definição da ABNT NBR 6502 e CEMP 105, representa a massa de água presente nos interstícios dos grãos e a massa das partículas sólidas da mistura. O valor pode ser medido em porcentagem e afeta diversos fatores, dentre eles a processabilidade, vida útil, usabilidade e qualidade de um produto. É importante conhecer o teor de umidade atual com exatidão pois o valor interfere diretamente na qualidade do material e, para muitas misturas existem valores máximos permitidos.

O teor de umidade é verificado por uma análise termogravimétrica, que é a perda em massa de líquido durante a secagem através do aquecimento e evaporação do vapor d'água. A umidade pode ser aferida com um analisador de umidade ou com o auxílio de uma balança, forno e vidro de relógio.

A CEMP 105, apesar de ser específica para a bentonita, traz em seu conteúdo a equação 1 para o cálculo do teor de umidade, onde o resultado é expresso em porcentagem, com precisão de 0,01.

Equação 1 - Teor de umidade

$$U = \frac{(M_{pf} + M_a) - (M_{pf} + M_r)}{M_a} * 100$$

Onde:

U = Teor de umidade, em %;

M_{pf} = Massa do recipiente, em g;

M_a = Massa da amostra, em g;

M_r = Massa do resíduo, em g.

2.3.2.1 Granulometria

A granulometria da areia base de fundição é uma das primeiras propriedades que devem ser verificadas. A análise pode ser dividida em três fatores distintos e complementares que são a distribuição granulométrica, o módulo de finura e o teor de finos. A CEMP 081 define como método o peneiramento dos materiais granulares através de um conjunto de peneiras padronizadas e sobrepostas em ordem

decrecente de abertura de malha. Os valores em massa retidos em cada peneira devem ser anotados em uma planilha de distribuição granulométrica conforme quadro 1 e os valores correspondentes ao campo “Fatores” devem ser adicionados de acordo com a norma utilizada entre ABNT, AFS, DIN e BS.

Quadro 1 - Planilha para calcular a distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos, com a série de peneira ABNT

Peneiras ABNT		Peso da peneira vazia (g)	Peso da peneira + material (g)	Retenção (g)	Retenção (%)	Fator	Produto
Malha (mm)	Nº Malha						
3,350	6					3	
1,700	12					5	
0,850	20					10	
0,600	30					20	
0,425	40					30	
0,300	50					40	
0,212	70					50	
0,150	100					70	
0,106	140					100	
0,075	200					140	
0,053	270					200	
PRATO	PRATO					300	
			SOMA		ΣRP		ΣP

Fonte: CEMP 081 (2015)

2.3.2.1.1 Distribuição Granulométrica

A CEMP 081 determina que a distribuição granulométrica consiste na determinação do percentual de retenção do material em duas ou mais peneiras da série padrão compreendida entre 0,053 a 3,35 mm.

2.3.2.1.2 Módulo de finura

A CEMP 081 determina que o módulo de finura é o valor resultante da divisão da somatória do produto pela somatória da porcentagem. No item 7.1.3 da norma acima citada tem-se a equação para o cálculo do módulo de finura conforme representa a equação 2.

Equação 2 - Cálculo do Módulo de finura

$$MF = \frac{\sum P}{\sum RP}$$

Onde:

MF = Módulo de finura, em AFS, ABNT, DIN ou BS;

$\sum P$ = Somatória dos produtos;

$\sum RP$ = Somatória da retenção em porcentagem.

2.3.2.1.3 Teor de finos

A CEMP 081 determina que o teor de finos é determinado pela somatória dos percentuais das duas últimas peneiras mais o prato do fundo.

2.3.2.1.4 Teor de argila

A CEMP 082 determina que o teor de argila consiste na existência de partículas finas indesejáveis por consumirem aglomerantes e catalisadores em a capacidade de propiciar poder ligante. O valor do teor de argila deve ser aferido com o auxílio de equipamentos específicos para a lavagem da massa, conforme determina a CEMP 82. A equação 3 determina o método de cálculo do teor de argila, onde o resultado é expresso em porcentagem com precisão de 0,01.

Equação 3 - Teor de argila

$$TA = \frac{MA - MR}{MA} * 100$$

Onde:

TA = Teor de argila, em %;

MA = Massa da amostra, em g;

MR = Massa do resíduo, em g.

2.3.3 Sílica

A sílica é um dos elementos mais abundantes na superfície da terra estando presente na maioria dos solos, rochas, areias e argilas (CALLISTER), por isso é silício é amplamente utilizado na fundição. São formados principalmente por quartzo, contendo algumas impurezas como feldspatos, argila, rutilo e óxidos de ferro (BALDAN, 2013; MARIOTTO, 1986). A sílica possui diversas formas com polimorfismo variado onde, tanto no estado de óxido como no estado hidratado, variam de coloidal até sílica gelatinosa. No estado de óxido a sílica apresenta diversas formas cristalinas (quartzo, tridimita e cristobalita) e não cristalizadas (sílica vítrea) com estrutura amorfa. Também apresenta variações estáveis das formas em diferentes faixas de temperatura (BALDAN, 2013; SENAI, 1987).

O dióxido de silício é a forma mais simples na qual a sílica pode ser encontrada. Este material tem a capacidade de formar uma rede tridimensional quando átomos de oxigênio posicionados nos vértices são compartilhados com outros tetraedros, estabelecendo assim um material neutro eletricamente. A estrutura cristalina nasce com a organização e arranjo de maneira organizada destes tetraedros. Entre as formas cristalinas mais conhecidas, destacam-se as polimórficas sílica, quartzo, cristobalita e tridimita. Tais estruturas são classificadas como complexas e abertas, apresentando então baixa massa específica, como por exemplo em temperatura ambiente o valor é cerca de $2,65\text{g/cm}^3$. Outro fator considerável é a temperatura de fusão que chega a 1710°C devido as formas de ligação interatômicas (CALLISTER).

2.3.3.1 Sílica Vítrea

É a areia obtida através do resfriamento acelerado da sílica fundida, a qual possui baixa velocidade de resfriamento natural. Tal rapidez no processo, forma um vidro amorfo, sem transformações alotrópicas o que é fundamental para determinar o baixo coeficiente térmico de expansão em todas as temperaturas abaixo do ponto de

fusão. Esta característica de baixa expansão volumétrica faz com que a sílica vítrea seja indispensável na fabricação de moldes que receberão peças que necessitam ter grande precisão dimensional (BALDAN, 2013; MARIOTTO, 1986).

2.4 LIGANTES

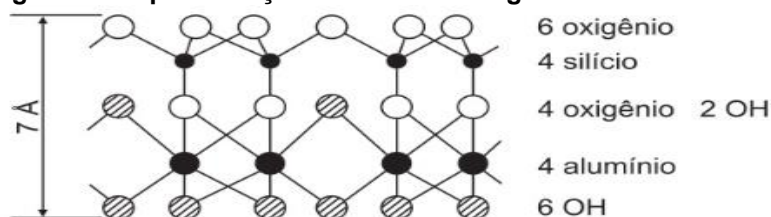
Ligantes é o nome dado ao componente responsável por unificar os grãos de areia, dentre eles destacam-se argila, silicato de sódio, óleos, cimentos, resinas de cura a frio e de cura a quente, entre outros (BALDAN, 2013).

2.4.1 Argilas

Argilas são denominadas silicatos de alumina hidratados, formada por diversos minérios conhecidos como argilominerais com estrutura constituída em lamelas atingindo comprimento de até 2 μm e espessura máxima de poucos Å (BALDAN, 2013). Portanto faz-se útil a classificação baseada na espessura das lamelas, as quais são classificadas entre 7, 10 e 14 Å . Alguns elementos como o silício, alumínio, oxigênio e hidrogênio são constantemente encontrados nos minerais argilosos e quando combinados formam SiO_2 , Al_2O_3 ou íons de OH, propiciando a formação de estruturas lamelares (SENAI, 1987).

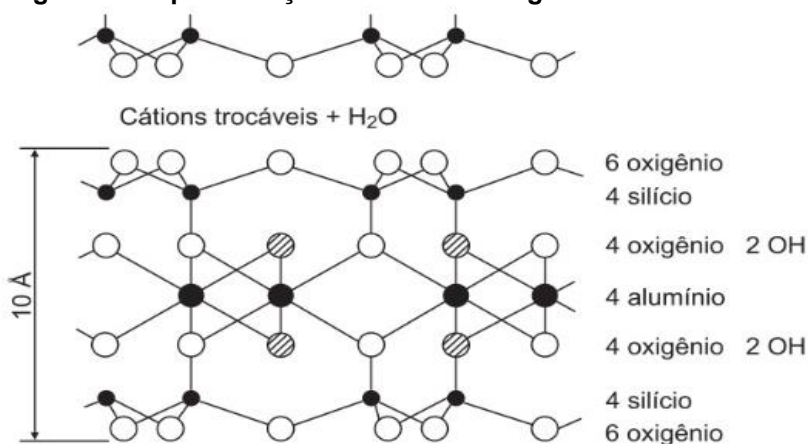
Para os argilominerais com espessura de lamelas de 7 Å estão a caulinita (elemento principal das argilas refratárias), haloisita e meta-haloisita, as quais apresentam uma camada de alumina entre a dupla camada de sílica, conforme demonstra a figura 6. Para as de espessura de 10 Å está a montmorilonita, principal constituinte da bentonita e illita, tem-se uma camada de alumina envolto por duas camadas de sílica, conforme figura 7. Para espessura de 14 Å estão a clorita e as pseudocloritas. Em cada conjunto, variando de duas a três camadas de acordo com o grupo das argilominerais, concebe a lamela elementar de cada mineral (SENAI, 1987).

Figura 6 - Representação da lamela de argilomineral com 7 Å de espessura



Fonte: SENAI, 1987 (1987)

Figura 7 - Representação da lamela de argilomineral com 10 Å de espessura



Fonte: SENAI, 1987 (1987)

As ligações iônicas são responsáveis por conferir estabilidade à estrutura das lamelas. Já as ligações secundárias entre lamelas são de menor intensidade e, permitem o afastamento e a entrada de água entre elas, conferindo às argilas o aspecto untuoso (facilidade de deslizamento de uma lamela sobre a outra) (BALDAN, 2013; SENAI, 1987).

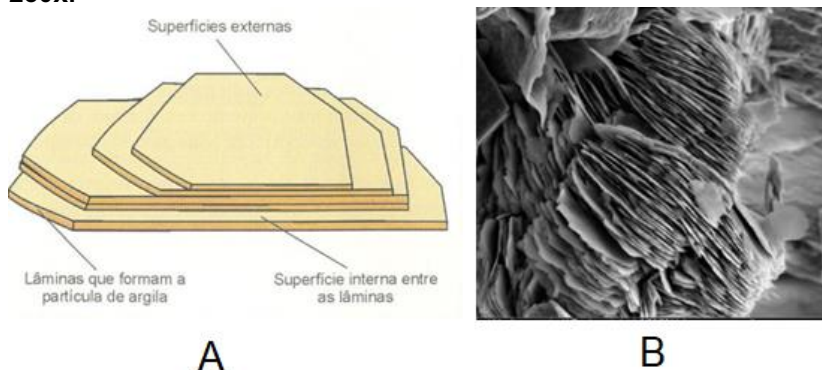
As argilas refratárias e as bentoníticas são as mais utilizadas em fundição. Sendo as refratárias constituídas pelos argilominerais caulinita, haloisita e meta-haloisita pertencentes ao grupo das caulinitas. Essas argilas podem ser formadas em jazidas, relacionadas às impurezas de metais alcalinos e alcalinos terrosos que atuam como fundente, devendo ter o menor teor possível. Dentre as principais impurezas estão o ferro (Fe), cálcio (Ca), manganês (Mg), titânio (Ti) e potássio (K).

2.4.1.1Caulim

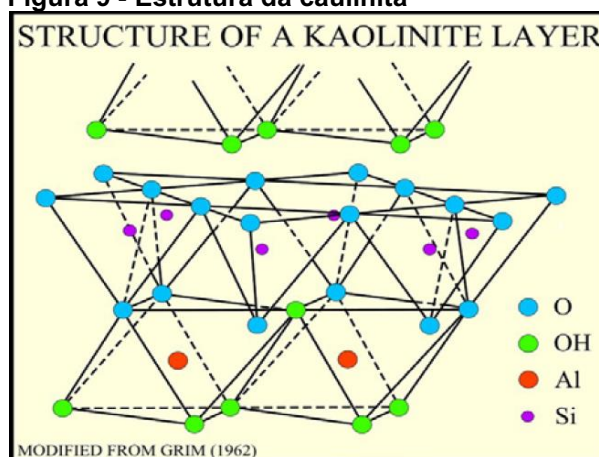
O caulim é caracterizado segundo a NBR 8826 como argila constituída essencialmente pelo argilomineral caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ constituindo a essência das argilas refratárias. A terminologia caulim é amplamente utilizada para rochas e para o grupo que de minerais caulinita, dickita, nacrita e haloisita. Dispõem uma composição química teórica em porcentagem de peso uniforme: 46,54% de SiO_2 , 39,50% Al_2O_3 e 13,96% de H_2O . Provém de rochas, derivadas da decomposição do feldspato, formadas de silicatos hidratados de alumina, contendo algumas impurezas como areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxido de ferro e titânio. São argilominerais que não possuem cargas residuais, onde a presença de cargas negativas é atribuída à presença de impurezas (grãos finos de mica ou de esmectita) (SENAI, 1987).

A partícula de caulinita é constituída de várias lâminas empilhada, fracamente ligadas entre si por superfícies internas ativas (OLIVEIRA, 2011), composta por alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio, os quais apresentam forma organizado em camada 1:1 com partículas muito finas, conforme figura 8, com única camada tetraédrica de siliconoxigênio (SiO_4) e única camada octaédrica de alumina [$\text{Al}(\text{O}, \text{OH})_6$] conforme ilustra a figura 9 (RIBAS, 2017) com comprimento de lamelas de 0,001mm e espessura entre as lâminas de 5 a 10Å (RAIMUNDO).

Figura 8 – Lamelas de caulim. (A) Ilustração. (B) Foto real com aproximação em 250x.



Fonte: OLIVEIRA (2011)

Figura 9 - Estrutura da caulinita

Fonte: <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/html/docs/clays/kaogr.htm>

As argilas minerais em conjunto com as substâncias húmicas, óxidos de ferro e óxidos de alumínio dispõem de uma superfície de barganha. Estas partículas do solo com tamanho reduzido (entre 10^{-4} e 10^{-7} cm) exibem cargas superficiais capazes de reter íons de modo trocável. Estes são designados como coloides que são encarregados pela capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos (RONQUIM, 2010). Em determinadas condições tropicais, os valores são apresentados em mmolc dm^3 (milimols de carga por decímetro cúbico de solo) na tabela 2.

Tabela 2 - Capacidade de troca de cátions de alguns coloides do solo sob condições tropicais

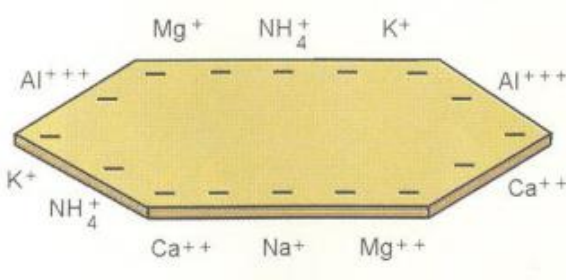
Coloide	CTC - mmolc dm^3
Caulinita	50 – 150
Montmorilonita	500 – 1.000
Ilita	100 – 500
Vermiculita	1.000 – 1.500
Alofana	250 – 700
Óxidos de Fe e Al	20 – 50
Substâncias húmicas	1.500 – 5.000

Fonte: Adaptado de Mello et al. (1983)

Para GUESSER (1982), o valor de CTC do caulim varia entre 3 e 15 meq/100g. A CTC de uma argila representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$). A maioria dos coloides possuem maior quantidade de cargas negativas do que positivas, culminando na adsorção de cátions, conforme representa figura 10. No

entanto, há casos de coloides carregados positivamente, acarretando na atração ânions como óxidos de ferro e alumínio (RONQUIM, 2010).

Figura 10 - Partícula de argila em forma de placa com cargas negativas e cátions absorvidos



Fonte: OLIVEIRA (2011)

2.4.1.1.1 Aplicações do Caulim

As principais aplicações industriais do caulim, utilizadas há muitos séculos, são para a fabricação de cerâmicas e porcelanas. A partir de meados de 1920, outros usos foram sendo pesquisados e aplicados, como por exemplo para o enchimento de borrachas e branqueamento de papel. Anos depois, o uso ampliou-se para produtos alimentícios, incluindo ração de animais e também para produtos farmacêuticos. Atualmente, o caulim é utilizado também em materiais refratários, plásticos, tintas, adesivos, cimento, inseticida, pesticida, catalisadores, absorventes, gessos, auxiliares de filtração, cosméticos, produtos químicos, abrasivos, além de servir como carga para enchimento em diversos setores (RAIMUNDO).

2.4.1.1.2 Reservas de Caulim no Brasil

No Brasil há a segunda maior reserva de caulim do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos da América e à frente de Alemanha e Reino Unido, terceiro e quarto lugar consecutivamente. No norte e no sul do país o caulim é encontrado de forma abundante, lotado de reservas com alta capacidade de abastecimento para grandes demandas onde as reservas são muito próximas a instalações de processamento e também de infraestruturas de transportes para

distribuição. Isto faz com que esta argila seja considerada como um produto de alta competitividade, assim como a bentonita (RAIMUNDO).

O Brasil detém a proporção de 28% do total estimado de todo o caulim mundialmente explorado. Nossas reservas medidas, indicadas e inferidas são de aproximadamente 24,5 bilhões de toneladas, donde apenas 9,4 bilhões foram medidas. O material pronto para a extração tem como principal característica a elevada pureza e alvura, sendo desejadas pelas indústrias de papel de todo o mundo. As principais reservas estão no norte do país, especificamente nos estados do Pará, Amazonas e Amapá, as quais detém 56%, 41% e 2% respectivamente. Estes são depósitos sedimentares, com grandes reservas e propriedade desejável em diversas aplicações, em especial para revestimentos em papel.

A natureza da região fornecedora de caulim em nosso país desenvolve-se de forma completamente exposta, sendo que em alguns casos, são utilizadas galerias para pesquisa em depósitos primários. Os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Goiás são ricos em caulim primário, oriundos da alteração de pegmatitos, a exemplo do intemperismo de granitos (RAIMUNDO).

2.4.1.1.3 Processamento do Caulim

O principal processo de melhoramento do caulim começa com a retirada da camada estéril e do minério brusco. Após a subtração de areia, o material é espalhado em água e levado até o beneficiamento, onde ocorre centrifugação, eliminação de ferro através da separação magnética e branqueação química, para depois o material passar por filtro e secador em fase de finalização, ficando pronto para embarque. As principais empresas do ramo utilizam minerodutos para o transporte de seus produtos até o Porto de embarque. O caulim utilizado no mercado interno é oriundo das minas localizadas nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e também de outros estados com produção pouco intensa, que abastecem as indústrias de cerâmicas brancas e de indústria de papel (RAIMUNDO).

Em minas sedimentares no Pará e no Amapá, a lavra ocorre de maneira totalmente mecanizada. Já nas regiões do sul e sudeste do Brasil, a lavra ocorre de maneira semi-mecanizada. Alguns subprodutos do caulim podem ser aproveitados, sendo eles o quartzo, a mica e o feldspato (RAIMUNDO).

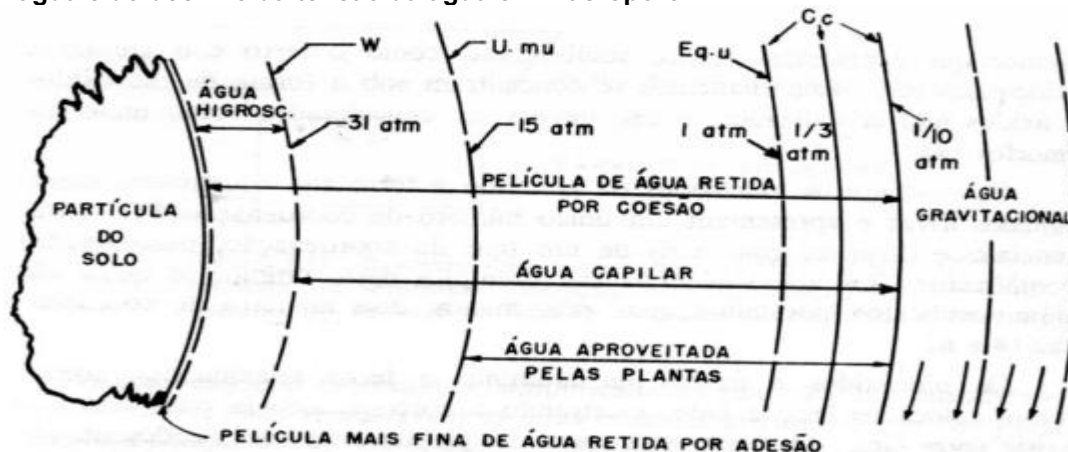
2.4.1.1.4 Uso do caulim na fundição

Em países do continente africano como a Nigéria por exemplo, é muito comum o uso do caulim como aglomerante da areia verde. Muitos estudos estão sendo realizados para o melhoramento desta areia base com a adição de aditivos como a acácia (ADEMOH, 2008).

2.5 ÁGUA

A água tem sua importância no contato com o solo devido a sua capacidade principal de destruir e desagregar os minerais e as rochas. Esta geralmente é oriunda da precipitação e grande parte infiltra no solo, ficando retida e alimentando o lençol freático. A água retida pode ser evaporada, absorvida por plantas ou preservadas no solo. A parte retida no solo pode ser classificada como água gravitacional, capilar ou higroscópica, conforme figura 11 (OLIVERIA, 2011).

Figura 11 - Representação esquemática do espessamento progressivo da película de água e do declínio da tensão da água em macroporo



Fonte: OLIVERIA (2011)

A água gravitacional mantém-se entre os macroporos com presença breve, sendo facilmente removida por drenagem através da lixiviação. A água capilar fica de forma permanente nos microporos atuando como solução do solo e, não pode ser retirada por processo de drenagem. E a água higroscópica encontrada muito próximas à superfície da partícula, é considerada como umidade higroscópica permanente no

solo. Sua quantidade máxima, exposta porcentagem, representa a capacidade que o solo possui em absorver vapor da atmosfera e manter-se em equilíbrio com o ambiente. Por isso, sua remoção só é possível no estado de vapor. Esta pode ser aferida com a secagem em estufa a temperatura de aproximadamente 110°C, com pesagem antes e depois. Tal característica tem relação com a superfície, sendo mais observadas em solos argilosos e orgânicos e pouco presente em solos arenosos (OLIVEIRA, 2011).

2.6 MISTURA PADRÃO

A CEMP 068 apresenta o conceito de mistura padrão como uma mistura mecânica de areia, argila e água que após a serem misturados podem apresentar uma compactabilidade padrão de acordo com as condições de preparação. Para a elaboração da mistura é comum o uso do método de razões água/argila e argila/areia, pois estes constituem meios que dão entendimento para princípios menos óbvios que estão envolvidos.

Uma composição com mais de 7% de argila ativa é considerada como mistura rica e como mistura pobre aquela que contém menos que isso. Nos casos de mistura rica, normalmente há uma inflexão nas curvas para valores de compactabilidade em torno de 47% (HEINE).

A CEMP 068 recomenda que a quantidade da massa de areia não ultrapasse 60% da capacidade máxima do misturador de rolos de forma a permitir a adição dos demais materiais da mistura e ainda permitir que haja espaço para uma possível expansão da mistura devido ao inchamento da argila. Através da equação 4 a massa de areia pode ser calculada.

Equação 4 - Capacidade máxima do misturador

$$MA = 60\% * CM$$

Onde:

MA = massa de areia em g

CM = capacidade máxima do misturador em g

A massa de argila a ser adicionada, pode ser calculada pela equação 5, conforme determinação da CEMP 68.

Equação 5 - Massa de argila na mistura inicial

$$MB = MA \left(\frac{Ar}{100 - U} \right)$$

Onde:

MB = massa de argila em estado de recebimento em g

MA = massa de areia em g

Ar = porcentagem em argila desejada %

U = teor de umidade de recebimento em %

A mistura padrão deve ser elaborada seguindo o procedimento e a ordem de adição dos componentes no misturador. A quantidade total de areia deve ser adicionada e espalhada igualmente por todo o recipiente. Em seguida deve-se adicionar a água e misturar por 46 voltas. Adicionar a argila em dois pontos distintos para proporcionar a melhor homogeneização possível e misturar por mais 700 voltas. A seguir a mistura deverá ser armazenada em um recipiente fechado, demarcado com os dados necessários como data da realização, porcentagem de argila e porcentagem de água.

2.6.1 Homogeneização e Quarteamento

A homogeneização consiste na amálgama da mistura como um todo. Sendo que a massa total passa por um processo de mistura entre si para que se obtenha uma distribuição de grãos uniforme. E o quarteamento consiste na repartição da amostra em partes menores, sendo que cada uma delas tem o potencial de representar o todo. A adoção de dois métodos em conjunto é preferível quando há uma grande quantidade de massa e volume das amostras. Esta forma tem a capacidade de dar uma maior homogeneidade ao material coletado e aumentar a representatividade para cada amostra separa (GOES; LUZ; POSSA).

O método da pilha cônica consiste na mistura e empilhamento em forma de domo de todo o material coletado e sua divisão em 4 partes iguais, conforme representa a figura 12. Tal método precede a elaboração da pilha alongada, conforme

figura 13, muito utilizada em casos de grande quantidade de material. A pilha alongada consiste na coleta do material com coletor e o derramamento da quantidade coletada em uma fileira. A quantidade de material no coletor deve ser espalhada de maneira uniforme do início ao final da pilha alongada, de maneira a não sobrar e não faltar material ao término do percurso da pilha. As distribuições de material sobre a pilha deveram ser feitas de forma alternada entre as extremidades, de maneira que os despejos ímpares iniciem por uma extremidade e os despejos pares se iniciem pela outra extremidade.

Para a preparação da pilha cônica, o conteúdo total da amostra deve ser distribuído em forma de domo, misturado com uma pá e dividido em 4 partes iguais. Para a preparação da pilha alongada recolhe-se o mineral da pilha cônica de forma aleatória, intercalando entre as partes. A porção recolhida da pilha cônica é espalhada de maneira constante e uniforme, em único sentido, revezado a cada despejo, do começo ao fim da pilha, de forma que não sobre e não falte material. Este procedimento é repetido diversas vezes até que todo material da pilha cônica esteja sobre a pilha alongada (GOES; LUZ; POSSA).

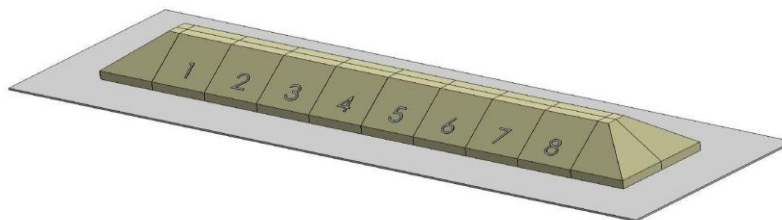
Com a nova pilha alongada concluída e a pilha cônica extinta, divide-se a nova pilha de forma transversal e longitudinal. Duas são as divisões longitudinais e a quantidade de divisões transversais irá depender da espessura do instrumento de coleta do mineral. A numeração da pilha alongada ocorre de forma espelhada e inversa. Sendo que as divisões das extremidades são coletadas e redistribuídas sobre o montante, de forma a evitar o máximo a heterogeneidade (GOES; LUZ; POSSA).

Figura 12 - Pilha cônica



Fonte: Autoria própria

Figura 13 - Pilha alongada



Fonte: Autoria própria

2.6.2 Compactabilidade

De acordo com a NBR 12107 e CEMP 065, compactabilidade é definida como redução em altura percentual sofrida por uma determinada massa solta de mistura padrão, sob influência da compactação. Já a NBR 6502 define compactação como: *“Processo artificial de aumento da massa específica de um solo, por redução do seu volume de vazios, através de aplicação de energia mecânica”*.

Para os casos em que o instrumento não possua escala, a CEMP 065 determina que a mesma porcentagem poderá ser aferida com a medição da altura do corpo de prova com o auxílio de um paquímetro e calculada através da equação 6.

Equação 6 - Compactabilidade

$$C_{pto} = \frac{h_f - h_0}{h_0} * 100$$

Onde:

C_{pto} = Compactabilidade em %

h_f = Altura inicial do corpo de prova em mm

h_0 = Altura final do corpo de prova em mm

Na compactação é aceito uma variação de 0,1% a 0,2% para compactabilidade para valores abaixo de 50% e uma variação de 0,35% para compactabilidade acima de 50% (HEINE) e seu valor ideal está entre 47% e 49% (SENAI, 1987).

2.6.3 Permeabilidade

De acordo com a NBR 12634, CEMP 061 e CEMP 080, permeabilidade é definida como o índice que representa a capacidade máxima de um corpo de prova padrão compactado em permitir a travessia do fluxo de substâncias gasosas através dos vazios intergranulares sob condições padronizadas de tempo de pressão. Esta especificidade deve-se à existência de espaços vazios entre os grãos de areia, tornando a granulometria um fator determinante da variação da permeabilidade. É uma propriedade de extrema importância no momento da penetração e evacuação dos gases formados durante o vazamento e solidificação do metal líquido (BALDAN, 2013).

Para a correta validação dos dados, de forma a garantir o valor aferido, devem ser realizados 3 ensaios e em seguida calcular a média aritmética dos valores coletados. Caso o mostrador não tenha a unidade de medida desejada, equação 7 poderá ser utilizada para se obter o valor da permeabilidade.

Equação 7 - Permeabilidade

$$P = \frac{Var * hCP}{p * A * t}$$

Onde:

P = Permeabilidade em $cm^4 * g^{-1} * min^{-1}$ ou AFS

Var = Volume de ar cm^3

hCP = altura do corpo de prova em cm

p = pressão em g/cm^2

A = área em cm^2

t = tempo em min

2.6.4 Resistência à Compressão a Verde

A resistência mecânica é a propriedade responsável por conferir à areia a capacidade de manter intacto a geometria do modelo na cavidade do molde durante a extração e, resistir aos diversos esforços durante o vazamento do metal líquido (BALDAN, 2013; SENAI, 1987).

De acordo com a CEMP 068, o ensaio consiste na aplicação de uma carga de forma contínua e progressiva sobre a área plana das extremidades do corpo de prova do tipo A, até que este sofra fratura e se rompa. A norma determina ainda que a resistência mecânica à compressão a verde é a tensão máxima que um corpo de prova é capaz de suportar. Os esforços mecânicos, dinâmicos e estáticos podem acarretar no rompimento do molde em diversas etapas do processo. Antes do preenchimento do molde com o metal líquido, o molde pode sofrer a ruptura durante a extração do modelo e a adesão deste à areia e por desalinhamento ou inclinação do modelo na extração deste do molde.

Para o cálculo dos valores da resistência mecânica da areia, pode ser determinado uma relação entre resistência e deformação, intitulada resiliência, demonstrada na equação 8, sendo que tais propriedades diferem em direções distintas (MARIOTTO, 1986).

Equação 8 - Resiliência

$$Resiliência = RCV * d$$

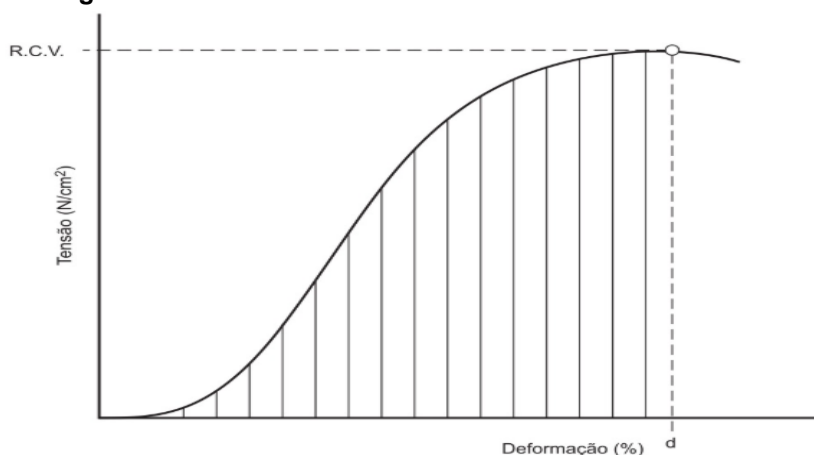
Onde:

RCV = Resistência à Compressão a Verde

d = Deformação

Os valores da equação podem ser coletados em uma curva tensão-deformação, figura 14, onde o resultado da equação 8 equivale à área do retângulo, que se assemelha ao dobro da área por baixo da curva.

Figura 14 - Curva Tensão x Deformação na compressão para uma areia de moldagem



Fonte: BALDAN (2013)

A resistência mecânica de uma areia de fundição se deve particularmente às forças adesivas e coesivas. A adesão é responsável pela aderência da argila em outras partículas, e a coesão está relacionada à resistência interna do filme que envolve os grãos de argila.

O teor de umidade e o tempo de mistura são fatores que influenciam diretamente a resistência mecânica da areia de moldagem e mesmo para misturas heterogêneas a coesão seria o principal fator da resistência mecânica (GUESSER, 1982).

Outro fator a ser levado em consideração é a capacidade de troca de cátions da argila. A resistência à compressão a verde cresce com o aumento da troca de cátions. Como a troca é uma medida do desbalanceamento de cargas, reflete na força de ligação superficial. Os tipos de cátions trocáveis não são capazes de afetar a resistência mecânica. Entretanto, a presença de ânions no sistema argila/água, oriundos das impurezas da água ou do sal para a troca de cátions, causa uma redução na resistência mecânica à tração a úmido. A resistência à compressão a verde, normalmente se estabiliza em misturas ricas com concentração acima de 7% de argila ativa, considerando um valor constante de compactabilidade (HEINE).

2.7 EQUIPAMENTOS

2.7.1 Equipamento de Proteção Individual

Para a realização dos ensaios são necessários vários equipamentos. Sendo os equipamentos de proteção individual como jaleco, luva, máscara e óculos são indispensáveis durante toda a permanência no laboratório, tanto para a pessoa responsável pela realização dos ensaios quanto para pessoas que desejam acompanhar os experimentos.

2.7.2 Equipamentos de Uso Geral

Alguns instrumentos são utilizados apenas no início dos ensaios, sendo seu uso dispensável no prosseguimento dos testes. O Quarteador Jones para a separação de amostras com aproximadamente 2,5kg, representado na figura 15, é utilizado apenas durante o quarteamento das amostras.

Figura 15 - Quarteador Jones



Fonte: Autoria própria.

Instrumentos como peneira e funil com raspador, molde cilíndrico com base em aço especial Ø50mm estão demonstrados na figura 16. Martelete para a compactação da amostra e confecção de corpo de prova com Ø50mm, munido de escala graduada demonstrado na figura 17, é utilizado em todos os ensaios.

Figura 16 - Peneira, funil, raspador, molde cilíndrico e base.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Martetele para compactação de corpo de prova



Fonte: Aatoria própria.

2.7.3 Equipamentos de Uso Específico

Equipamentos são específicos para a realização de apenas um tipo de ensaio. É o caso das Peneiras para ensaio de permeabilidade de base para corpo de prova de Ø50mm, do Permeâmetro com domo de água de 2 litros e funcionamento por gravidade, da máquina de ensaio de R.C.V. e do agitador mecânico para o ensaio de determinação do teor de argila AFS, representadas na figura 18, 19, 20 e 21 respectivamente.

Figura 18 - Peneira inferior à esquerda e superior à direita para ensaio de permeabilidade



Fonte: Aatoria própria.

Figura 19 - Permeômetro



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Máquina de ensaio de R.C.V.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - Agitador mecânico acoplado ao béquer

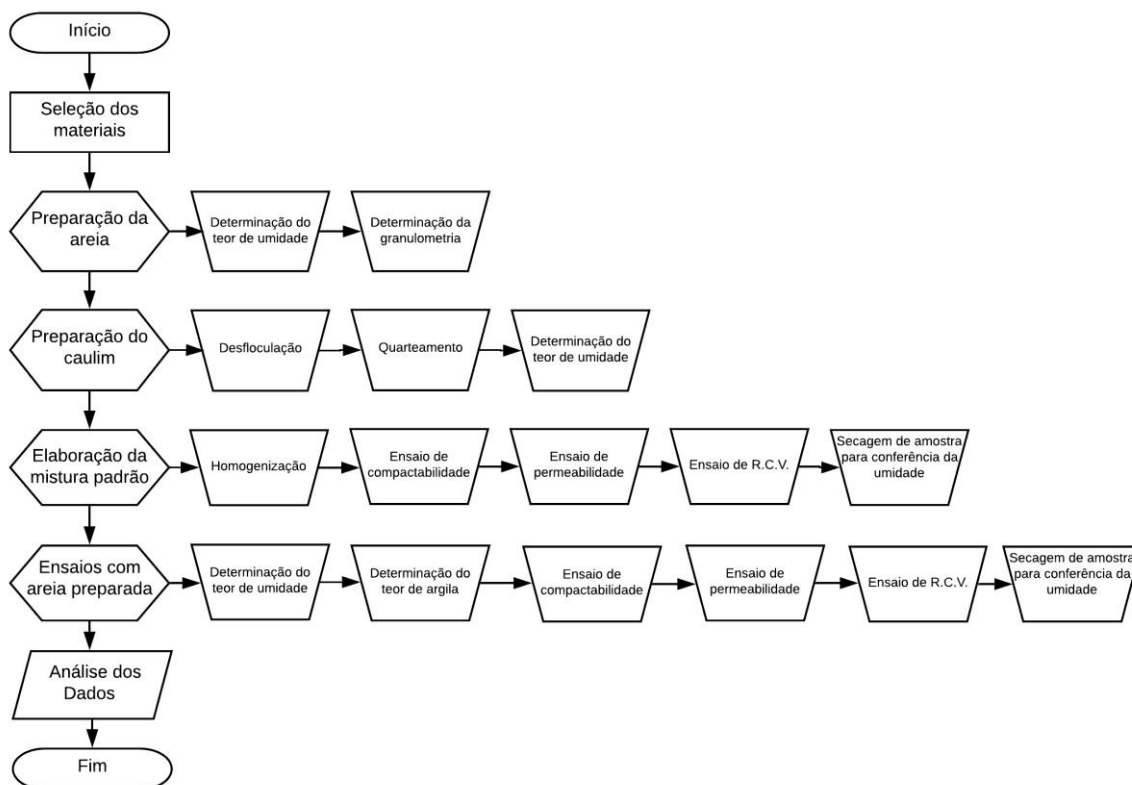


Fonte: Autoria própria.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consistiu em analisar as propriedades mecânicas da areia verde aglomerada com caulim. O material da análise é oriundo da cidade de Tijucas do Sul – Paraná – Brasil e foi extraído pela empresa Paraná Mineração. Os resultados das propriedades químicas do caulim foram analisados pela empresa fornecedora e são apresentados em Ficha Técnica, a qual consta como anexo 1 deste trabalho. Entre os dados apresentados, está o teor de umidade, entretanto, o teor de umidade real foi verificado novamente antes dos experimentos. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de fundição (bloco I) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa.

Quando do recebimento da amostra foi efetuada uma inspeção visual a fim de verificar o estado da embalagem, a presença de partículas estranhas e de materiais orgânicos. Em seguida a massa da amostra foi aferida em balança, a qual forneceu o valor de 64,4kg. Após o recebimento e conferência do material da análise, foram determinados os passos a serem dados. Tais procedimentos estão representados no fluxograma, apresentado abaixo pela figura 22.

Figura 22 - Fluxograma das etapas e procedimentos

Fonte: Autoria própria.

3.1 PREPARAÇÃO DA AREIA

Antes do início dos experimentos, analisou-se a areia a ser utilizada de forma a conhecer o teor de umidade, distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos.

3.1.1 Determinação do Teor de Umidade

A análise foi realizada conforme determina a CEMP 105, com o auxílio de alguns equipamentos listados abaixo:

- Balança analítica de precisão;
- Pesa filtro;
- Vidro de relógio;
- Cápsula de porcelana;
- Espátula;

- Dessecador;
- Tenaz;
- Forno.

Foram separadas 3 amostras de areia base e pesadas em um vidro de relógio, previamente, as porções contendo aproximadamente 50g de foram pesadas com o auxílio da balança analítica de precisão e anotados os respectivos valores em massa. Em seguida, a amostra foi introduzida no forno com temperatura em torno de $120^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$ por um período inicial de 2 horas. Após este período a areia base permaneceu em resfriamento por 30 minutos até atingir a temperatura ambiente, a massa de cada amostra foi aferida em balança e, em seguida a amostra foi reintroduzida no forno por um período de 1 horas e resfriada por 30 minutos. O procedimento seguiu-se por 6 etapas até que os valores da massa ficassem estáveis. Quando da estabilização da massa da amostra, o forno foi desligado e a amostra ficou em seu interior até que ambos chegassem à temperatura ambiente.

3.1.2 Distribuição Granulométrica, Módulo de Finura, Concentração e Teor de Finos

A realização do ensaio teve início com a limpeza e a pesagem de cada uma das peneiras e do fundo para determinação do peso inicial de cada componente. Conforme recomenda a CEMP 81, foi efetuado o peneiramento da amostra de areia e anotado os valores. Seguindo a recomendação da norma acima citada, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Balança;
- Cápsula metálica ou de porcelana;
- Estufa de laboratório;
- Dessecador;
- Espátula;
- Peneiras Nº 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 e 270 da série padrão da ABNT, acompanhadas de prato coletor e tampa;
- Peneirador mecânico;
- Pincel;
- Folha de papel liso de cor clara.

Uma porção de aproximadamente 20g de areia foi pesada em balança e reservada. Em seguida, o material foi despejado sobre o conjunto de peneiras, as quais foram tampadas para o início do procedimento. Durante o experimento as peneiras permaneceram vibrando por 12 minutos com intensidade regulada em 80% da capacidade máxima do vibrador mecânico. Após o peneiramento, cada uma das peneiras foi pesada novamente com o material retido. Posteriormente, após a pesagem de todas as peneiras, o material retido foi despejado sobre uma folha, com a ajuda de um pincel e pesado em uma balança. Os valores foram anotados em uma planilha, conforme determina a norma acima citada.

3.2 PREPARAÇÃO DO CAULIM

Quando do recebimento do material caulim, foi realizado uma inspeção visual para a identificação de possíveis anormalidades. Nesta análise foram identificados torrões de argila em quantidade acima do esperado. Inicialmente foi verificado a possibilidade de destorroamento pela simples combinação com a areia base e a água no misturador de rolos. Entretanto, o resultado, após as 700 voltas, não foi satisfatório. Assim, fez-se necessário a utilização de outro método para a desfloculação.

3.2.1 Desfloculação

Para a desfloculação do caulim foi utilizado o recurso do equipamento moinho de martelos que tem a função de reduzir o tamanho dos grãos. Após o primeiro processo o resultado foi satisfatório, reduzindo quantitativamente os torrões.

3.2.2 Quarteamento

O quarteamento foi realizado em duas etapas, sendo elas a pilha cônica e a pilha alongada consecutivamente. A pilha cônica foi elaborada com o despejo e mistura, com uma pá, em forma de domo. Em seguida, este monte foi dividido em 4 partes iguais numeradas em sentido horário de 1 a 4, estando pronto a pilha cônica, esta teve cada uma das partes, retiradas uma por vez, para a formação da pilha alongada. Sendo assim, o material foi retirado da pilha cônica, sendo primeiro as

partes ímpares e posteriormente as partes pares, para ser despejado de forma longitudinal para formar a pilha alongada. O material foi coletado com o auxílio de uma concha e derramado em cima de um encerado de lona para formar pilha alongada. A quantidade de material no coletor foi espalhada completamente de maneira uniforme do início ao final da pilha alongada.

As distribuições de material sobre a pilha foram feitas de forma alternada entre as extremidades de maneira que os despejos ímpares iniciem por uma extremidade e os despejos pares se iniciem pela outra extremidade, ou seja, o primeiro, terceiro, quinto... despejo iniciaram-se por uma extremidade e o segundo, quarto, sexto... despejo iniciaram-se pela outra extremidade. Com todo o material transferido da pilha cônica para a pilha alongada, esta foi dividida longitudinalmente em 2 porções e transversalmente em 17 porções idênticas com aproximadamente 0,3 m de largura cada. As recomendações da CEMP E-01 não determinam tamanho exato para as repartições, porém deixa claro que devem seguir um padrão e serem uniformes no tamanho. As frações de caulim foram armazenadas, catalogadas e lacradas.

3.3 ELABORAÇÃO DA MISTURA PADRÃO

Para a elaboração da mistura padrão foi idealizado a metodologia de porcentagens por acréscimo de massa a cada experimento, conforme demonstra a tabela 03. Para a construção desta, foi previamente estabelecido a relação água/argila, que será o fator variante do experimento, e a relação argila/areia que permanecerá fixa por todo o ensaio. Com a determinação das relações, foram calculadas as porcentagens relativas de cada componente e em seguida, partindo de uma massa inicial de areia base, foram calculadas as massas de argila e de água a serem adicionadas. Para medição dos valores de cada material foram utilizados balança, para a areia base e o caulim e uma proveta graduada para a água.

Tabela 3 - Relação, massa e porcentagem para os experimentos

Ensaio	Relações		Areia base		Aglomerante		Plastificante	
	Água/Argila	Argila/Areia	(%)	peso (g)	(%)	peso (g)	(%)	peso (g)
1	0,10	0,112	89,00	5240,92	10,00	588,87	1,0	58,89
2	0,12		88,80				1,2	70,82
3	0,14		88,60				1,4	82,81
4	0,16		88,40				1,6	94,86
5	0,18		88,20				1,8	106,96
6	0,20		88,00				2,0	119,11
7	0,22		87,80				2,2	131,32
8	0,24		87,60				2,4	143,59
9	0,26		87,40				2,6	155,91

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Homogeneização

Para a homogeneização da amostra foi utilizado um misturador de rolos. Durante o processo, foi seguido a NBR 12292, NBR 12669 e CEMP 68 que determina o seguinte procedimento:

- Colocar a areia no misturador;
- Umedecer a areia com a água;
- Misturar por 20 voltas;
- Adicionar a argila em dois pontos diferentes;
- Misturar por 700 voltas.

Para a mistura de forma correta e com a quantidade ideal de voltas, foi verificado a rotação por minuto (rpm) do misturador, o qual possui 46rpm. Assim, foi contabilizado o tempo necessário para misturar as 20 e as 700 voltas, que foram aproximadamente 26s para o primeiro e 15min e 13s para o segundo.

Após a primeira mistura da areia, foram realizados os primeiros ensaios de compactabilidade, permeabilidade e R.C.V. e, para o próximo ensaio, foi acrescentado à mistura a água em dois pontos distintos e misturado por mais 700 voltas. Para cada um dos ensaios realizados, foram coletadas amostras da areia para a conferência do teor de umidade real após o procedimento de mistura dos componentes.

3.3.2 Ensaio de Compactabilidade

Para a realização do ensaio foram seguidas as determinações contidas na CEMP 065. Foram necessários os seguintes equipamentos:

- Martelete mecânico;
- Molde cilíndrico, base e extrator;
- Funil padronizado com peneira e raspador.

Para a execução do ensaio foi coletada uma quantidade de areia, superior à necessária para o preenchimento do cilindro, com auxílio de uma concha. Após o despejo de areia sobre a peneira e o funil, houve um transbordo, como era de se esperar, do excesso de areia, sendo este nivelado na superfície superior. A raspagem deste foi realizada com o posicionamento perpendicular do raspador sobre a face superior do cilindro, partindo ao meio o montante de areia e, arrastando o excesso para fora do cilindro à direita e à esquerda.

Com a amostra nivelada, o cilindro foi posicionado sob o martelete com cuidado evitando a pré-compactação durante o manejo ou posicionamento sobre o equipamento. Com o cilindro sob o martelete, houve um cuidado adicional para garantir que apenas o peso do martelete, colocado de maneira cuidadosa, fizesse a primeira compactação de contato, evitando ao máximo um primeiro impacto indesejável. Em seguida, foram executadas três percussões no martelete de forma a compactar o material, sendo estas também executadas com cuidado, evitando que durante o giro da alavanca, o martelete ultrapassasse a altura máxima que deveria atingir antes do impacto. Ao final das três badaladas e com o martelete solto na última posição de impacto, o valor em porcentagem pode ser aferido diretamente na escala do instrumento. Para cada ensaio foram realizados três experimentos e adotado o resultado correspondente da média aritmética de 3 ensaios.

3.3.3 Ensaio de Permeabilidade

Durante a realização do ensaio foram seguidos os passos do item 6 da NBR 12634, a CEMP 068 e CEMP 080. Para a realização do ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Permeâmetro;

- Martelete;
- Balança com resolução 0,01g;
- Molde cilíndrico, base e peneiras;
- Funil padronizado com peneira e raspador.

O ensaio iniciou-se com a pesagem de 160g da mistura em balança, para confeccionar um corpo de prova do tipo 1A conforme descrito na CEMP E-10. Em seguida, com o cilindro munido de peneira e base, posicionados sob o funil com peneira, foram despejados o material de forma a preencher o interior do cilindro. Em relação à peneira do ensaio de permeabilidade, esta foi posicionada com a chapa metálica exposta para baixo e a saliência da borda apontando para cima ou interior do cilindro, ficando então na parte inferior do cilindro em contato com a base. Em seguida, a porção de 160g de areia foi adicionada. E então, a segunda peneira pode ser colocada sobre a parte superior do corpo de prova. Esta peneira também foi adicionada com a chapa metálica exposta para fora e com a saliência de metal da borda direcionada para o interior do corpo de prova.

O posicionamento das peneiras do ensaio de permeabilidade deve-se ao fato de que elas fazem o direcionamento do fluxo de ar para o interior do corpo de prova. O lado da peneira com maior orifício deve ficar em contato com o ar externo fazendo uma primeira orientação. Em seguida, este ar deverá passar pela peneira mais fina, a qual estará em contato com o corpo de prova e terá a função de direcionar finamente o fluxo de ar para dentro da amostra. Com o cilindro preenchido e as peneiras posicionadas, o conjunto pode ser colocado sob o martelete, com cuidado para evitar a pré-compactação. Em seguida foram efetuadas as três percussões. Finalmente o corpo de prova, embutido no cilindro e cercado por peneiras nas extremidades, pode ser acoplado à extremidade emborrachada do permeâmetro.

No permeâmetro, após o posicionamento do corpo de prova, a cúpula do aparelho foi puxada para cima apertando-se o botão superior que permite a entrada de ar. A cúpula, após posicionada na capacidade de 2 litros do equipamento, foi solta. Em seguida a alavanca do equipamento foi girada do modo “FECHADO” para o modo “ENSAIO”, iniciando assim o experimento. O valor da permeabilidade pode ser aferido diretamente no mostrador lateral em escala, o qual fornece valores em unidades de centímetros à quarta sobre gramas vezes minutos. Para a consideração do valor como verdadeiro e absoluto foram confeccionados três corpos de prova e considerado o valor da média aritmética de 3 ensaios.

Em relação à escala do equipamento, houve o cuidado com o detalhe de que, o permeâmetro utilizado continha 3 escalas, sendo elas, da esquerda para a direita, escala de baixa permeabilidade, escala de calibração e escala de alta permeabilidade.

A escala de calibração deve ser utilizada durante a aferição de funcionamento do equipamento antes da realização do ensaio. Com o auxílio de um corpo de prova padrão, feito de borracha e com um orifício que pode ser de 0,5mm ou de 1,5mm, deve-se realizar um experimento com este corpo de prova padrão acoplado ao cilindro e ambos acoplados ao equipamento. Para cada tamanho de orifício do corpo de prova, há um bico correto a ser utilizado no equipamento no local onde o cilindro será acoplado. No caso do equipamento utilizado neste experimento, os bicos continham a descrição P e G, indicando 0,5mm e 1,5mm consecutivamente.

Com o bico e corpo de prova padrão contendo o orifício de mesmo diâmetro, o ensaio deve ser efetuado. O resultado esperado é que a água atinja o número 10 da escala do centro.

Para a escala da esquerda que é a de baixa permeabilidade, deve ser utilizado o bico de orifício 0,5mm. Tal combinação é utilizada para a avaliação de grão com pouca permeabilidade. Nota-se que a escala parte de 0 e vai até o valor de 50 centímetros à quarta sobre gramas vezes minutos.

Para a escala da extremidade direita, a qual representa a alta permeabilidade, deve ser acoplado o bico com orifício de 1,5mm. Com o equipamento configurado desta maneira, material que apresentam valores de permeabilidade acima de 35 centímetros à quarta sobre gramas vezes minutos podem ser avaliados. O valor máximo apresentado para este equipamento é de 2500 centímetros à quarta sobre gramas vezes minutos.

Ao final do ensaio de permeabilidade da areia verde, elaborou-se a seleção, através do peneiramento, de areia base do tipo sílica para conhecimento da sua permeabilidade. Peneirou-se uma quantidade com 170g de areia para a confecção de um corpo de prova. Despejou-se este conteúdo sobre o funil munido de peneira. Como a massa de areia não preencheu o cilindro, não houve a necessidade de raspagem e nivelamento. Em seguida, efetuou-se em martelote, as três percussões para a compactação da amostra. Com a amostra compactada, envolvida pelas peneiras nas extremidades, iniciou-se o ensaio de permeabilidade.

3.3.4 Ensaio de Resistência à Compressão a Verde

Para a realização do ensaio foram executados os procedimentos descritos na NBR 12669 e CEMP 060. A qual prescreve a aplicação de uma carga de forma constante sobre as extremidades do corpo de prova até obter a ruptura. Para a realização do ensaio, a CEMP 060 determina a utilização dos seguintes equipamentos:

- Máquina de ensaio de R.C.V.;
- Martelete;
- Balança com resolução de 0,01g;
- Funil padronizado com peneira e raspador;
- Molde cilíndrico, extrator e base.

Após a elaboração da mistura padrão, foi peneirado uma quantidade de 170g de areia verde para a confecção de um corpo de prova padrão, conforme determina a CEMP E-10. Em seguida o material foi compactado com o martelete, retirado do cilindro com o extrator e acoplado à máquina de ensaios. A máquina de R.C.V. foi previamente verificada e nivelada, tendo seu marco zero em $0,5\text{N/cm}^2$. Após a previa conferência e calibração do equipamento, o corpo de prova foi posicionado e em seguida a carga de compressão foi aplicada, através do giro da manivela, de forma contínua e progressiva até atingir a ruptura do corpo de prova. O resultado da pressão exercida pode ser aferido no próprio equipamento, o qual é dotado de escala. A unidade de medida para o ensaio é em N/cm^2 . Para a adoção do valor verdadeiro e absoluto foram confeccionados três ensaios, cada uma com um corpo de prova diferente e então foi considerado o valor da média aritmética de 3 ensaios.

3.3.5 Secagem para Conferência das Amostras

Em todos os ensaios, foram coletadas amostras de cada mistura para a determinação do teor de umidade real. Sabe-se que durante a mistura a areia perde umidade para o ambiente, tendo grande déficit quando a temperatura ambiente está acima de aproximadamente 25°C e quando o misturador está sem a tampa. O simples

fato de o misturador realizar seu trabalho e homogeneizar a areia já causa uma perda significativa de umidade para o ambiente.

3.4 ENSAIOS COM AREIA PREPARADA

Após a realização dos ensaios onde componentes puros foram misturados para formar uma areia verde, novos ensaios foram realizados com relação argila/areia superior àquela do experimento anterior. A areia utilizada na primeira etapa de ensaios foi misturada a outras areias semelhantes disponíveis em laboratório. Todas as areias tinham a mesma composição, ou seja, todas continham apenas sílica, caulim e água. Porém, em cada uma delas havia um teor de umidade diferente. Portanto, para conhecimento deste valor, foram realizados os procedimentos de secagem para a verificação deste valor, o qual foi dado como ponto de partida dos novos ensaios. O teor de umidade da mistura foi verificado de forma semelhante a determinação do teor de umidade da areia base.

3.4.1 Determinação do Teor de Argila

Sendo a segunda etapa de realização dos ensaios composta de areia oriunda de várias misturas, cada uma delas com diferentes relações de argila/areia, fez-se necessário a determinação de teor de argila da composição atual. Para a realização do ensaio foi realizado a lavagem da amostra de areia através do sifonamento manual seguindo a recomendação da CEMP 082. Para a realização do procedimento, foram necessários os seguintes equipamentos:

- Balança;
- Béquer de 1000 ml tipo forma alta ou copo berzélius tipo forma alta;
- Agitador mecânico;
- Solução de Pirofosfato de Sódio a 2,0% ou solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) a 3,0%;
- Cronômetro;
- Pissete;
- Tubo de sifonamento manual da amostra;
- Estufa de laboratório.

Iniciou-se o processo de lavagem da areia pelo método do sifonamento manual, conforme recomenda a CEMP 82 e a NBR 9767/11. Inicialmente elaborou-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 3% e acionou-se 25 ml desta à areia. Em

seguida adicionou-se 600ml de água e acoplou-se o agitador mecânico ao béquer. A mistura permaneceu em processo de agitação por 5 minutos. Ao término da agitação, o agitador mecânico foi lavado com o auxílio de um pissete de forma a retirar toda a substância nele aderida. Em seguida, adicionou-se água com relativa violência até a altura de 152mm medida a partir da base interna do recipiente. Após a adição, a mistura permaneceu em repouso por 10 minutos. Transcorrido este tempo, sifonou-se a mistura água-argila até a altura de 25mm medida a partir da base interna do recipiente. Em seguida o sifonador foi lavado ao ser retirado do béquer, de forma a evitar que este retirasse de dentro do recipiente, qualquer partícula da areia.

Conforme determina a norma, o procedimento de adicionar água, até a altura de 152mm, com relativa violência, com intensão de causar um turbilhamento da amostra, foi repetido mais uma vez. E novamente a mistura permaneceu em repouso por 10 minutos. E após decorrido este intervalo, foi efetuado o sifonamento da mistura até a altura de 25mm. E ao termino do sifonamento, o equipamento foi lavado e retirado do béquer.

O procedimento de adição de água, repouso, sifonamento e lavagem do equipamento de sifonar foi executado por mais 5 vezes. Entretanto, apenas nas últimas cinco vezes o intervalo de repouso foi de 5 minutos, conforme recomenda a CEMP 081. Foram executadas 5 vezes, pois na quarta e quinta vez a mistura, após o repouso, já apresentava uma transparência e perfeição na limpeza acima de 25mm.

Com a mistura lavada e pronta para análise, esta permaneceu em forno, a temperatura de 120° por aproximadamente 13 horas. E após a secagem, resfriou-se a amostra em dessecador até a temperatura ambiente.

Enquanto a mistura esfriava, realizou-se a limpeza e a conferência, através da pesagem com laboratório devidamente fechado, da massa de cada uma das peneiras do agitador mecânico. Cada uma das peneiras permaneceu durante 1 minuto para pesagem, pois notou-se que durante aproximadamente 40s os valores ainda mudavam. As massas foram anotadas no quadro 2, seguindo o procedimento da CEMP 081. Após conhecida a massa das peneiras, pesou-se a amostra, a qual totalizou em 44,10g e, deste total, 20g foram utilizados para o peneiramento. Em seguida a amostra foi despejada no interior do conjunto de peneiras. E após o fechamento da extremidade superior, o processo de agitação teve início e permaneceu por 12 minutos em uma intensidade superior a 80% da capacidade do equipamento.

Em seguida, cada uma das peneiras foi pesada e anotou-se os valores na quarta coluna do quadro 2. Com os valores de peso da peneira e o peso da peneira com material conhecidos, pode-se determinar a retenção do material (em g e porcentagem) e o produto após a multiplicação da porcentagem retida pelo fator da ABNT.

4 RESULTADOS

Sendo a areia verde um material simples e, neste caso formada apenas da combinação de areia base, argila e água, torna-se necessário o conhecimento e determinação da quantidade correta de cada um destes elementos, pois a alteração em massa de cada um dos ingredientes da mistura afeta diretamente o percentual deste e dos demais. Sendo a água, um fator de extrema importância, faz-se necessário primeiramente a determinação do teor de umidade presente na areia base e no caulim. Tais valores devem ser abatidos no teor de umidade total da mistura. Para a verificação na areia base, foram coletadas 3 amostras com 50g cada, as quais foram inicialmente pesadas, secadas em forno e pesadas por fim. O valor em porcentagem de água das amostras está representado na tabela 4.

Tabela 4 - Teor de umidade da areia base

Amostra	Peso inicial	Peso final	Peso do recipiente	Umidade
	(g)	(g)	(g)	(%)
1	129,40	129,20	109,42	1,00
2	63,76	63,55	43,76	1,05
3	64,20	64,01	44,22	0,95
Média				1,00

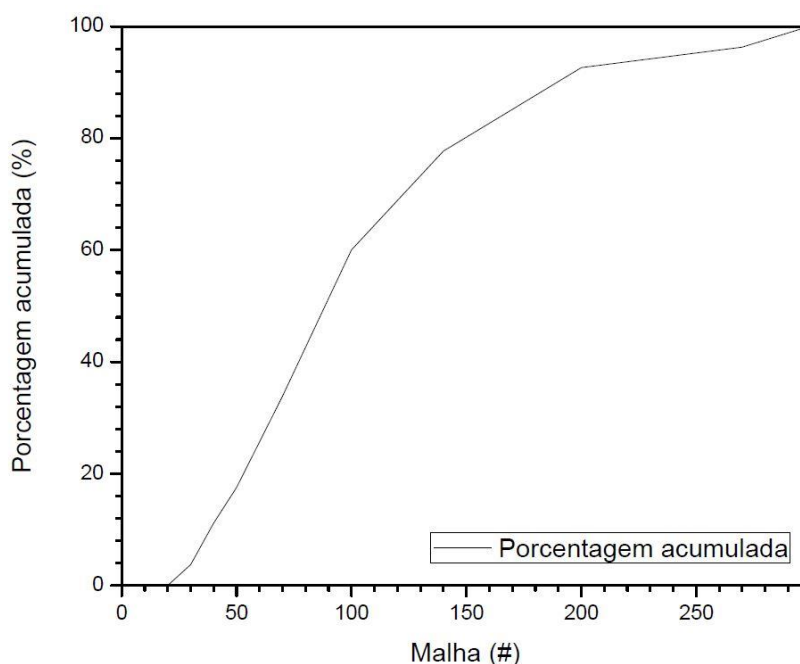
Fonte: Autoria própria.

Após conhecimento da umidade atual, foi feito ensaio para a verificação da granulometria da areia com a coleta de 1 amostra contendo 50g de areia base, inicialmente com a umidade de 1,0% verificada na tabela 4. Esta amostra foi seca em estufa e, em seguida, 20g de amostra seca foi retirada para a realização do ensaio. A distribuição granulométrica, teor de finos, concentração e módulo de finura estão representados no quadro 2 e no gráfico 1.

Quadro 2 - Distribuição granulométrica da areia base

Peneiras ABNT		Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + material (g)	Retenção (g)	Retenção (%)	Fatores	Produto
Malha (mm)	Nº Malha						
3,35	6	362,87	362,87	0,00	0,00	3	0,0
1,7	12	328,08	328,08	0,00	0,00	5	0,0
0,85	20	255,79	255,79	0,00	0,00	10	0,0
0,6	30	234,27	235,02	0,75	3,75	20	75,0
0,425	40	246,93	248,41	1,48	7,40	30	222,0
0,3	50	246,39	247,67	1,28	6,40	40	256,0
0,212	70	228,47	231,74	3,27	16,35	50	817,5
0,15	100	225,81	231,04	5,23	26,15	70	1830,5
0,106	140	227,21	230,74	3,53	17,65	100	1765,0
0,075	200	221,96	224,95	2,99	14,95	140	2093,0
0,053	270	208,41	209,14	0,73	3,65	200	730,0
Prato	Prato	305,65	306,39	0,74	3,70	300	1110,0
			SOMA	20,00	100		8899,0

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 1 - Distribuição Granulométrica da Areia Base

Fonte: Autoria própria

Após completado o Quadro 2 com todos os dados coletados, o módulo de finura pode ser calculado, com o auxílio da equação 2, o qual tem valor de 88,990. A concentração pode ser calculada com o somatório em porcentagem das peneiras 70, 100, 140 e 200, pois cada uma delas apresentou mais de 10,0% de retenção. Portanto, a concentração da amostra é de 75,10%. E o teor de finos pode ser determinado com

a somatório das porcentagens das últimas duas peneiras mais o fundo, o que resulta em 22,30%.

Conhecendo os dados da areia, iniciou-se o tratamento e preparo do caulim a ser acrescido na mistura. Devido ao seu estado de recebimento, apresentando excesso de torrões, optou-se por efetuar a desfloculação com o auxílio de um moinho de martelos. Tal equipamento foi capaz de destorroar a argila, deixando-a com aspecto aceitável para ser utilizada em uma mistura de areia verde. Vale salientar que como aspecto aceitável entende-se como sendo a significativa redução nos torrões presentes, tornando-os quase imperceptíveis visualmente.

A seguir, efetuou-se o quarteamento do total de caulim recebido. Devido a grande quantidade deste material, foi necessário a utilização combinada da pilha cônica e da pilha alongada. Onde a pilha cônica foi elaborada primeiro com o total do material recebido e, a partir desta, foi elaborada a pilha alongada, a qual permitiu uma maior divisão do material. Com a pilha alongada, foi possível separar o material em partes que, continham em massa, um valor suficiente para satisfazer a mistura no misturador disponível.

Após a separação da amostra de caulim, determinou-se o teor de umidade, assim como determinado para a areia base. Tal valor somado à umidade já existente, deve ser abatido no valor total da mistura da areia verde, pois para uma areia de fundição, pequenas porcentagens em água, tem grandes influências no comportamento mecânico.

Para a verificação do teor de água contido na argila, foram coletadas 3 amostras com aproximadamente 20g cada. Estas foram secadas seguindo o procedimento anteriormente descrito. Os valores são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Teor de umidade do caulim

Amostra	Peso inicial	Peso final	Peso do recipiente	Umidade
	(g)	(g)	(g)	(%)
1	129,42	128,2	109,42	6,10
2	63,76	62,55	43,76	6,05
3	64,22	63	44,22	6,10
Média				6,08

Fonte: Autoria própria.

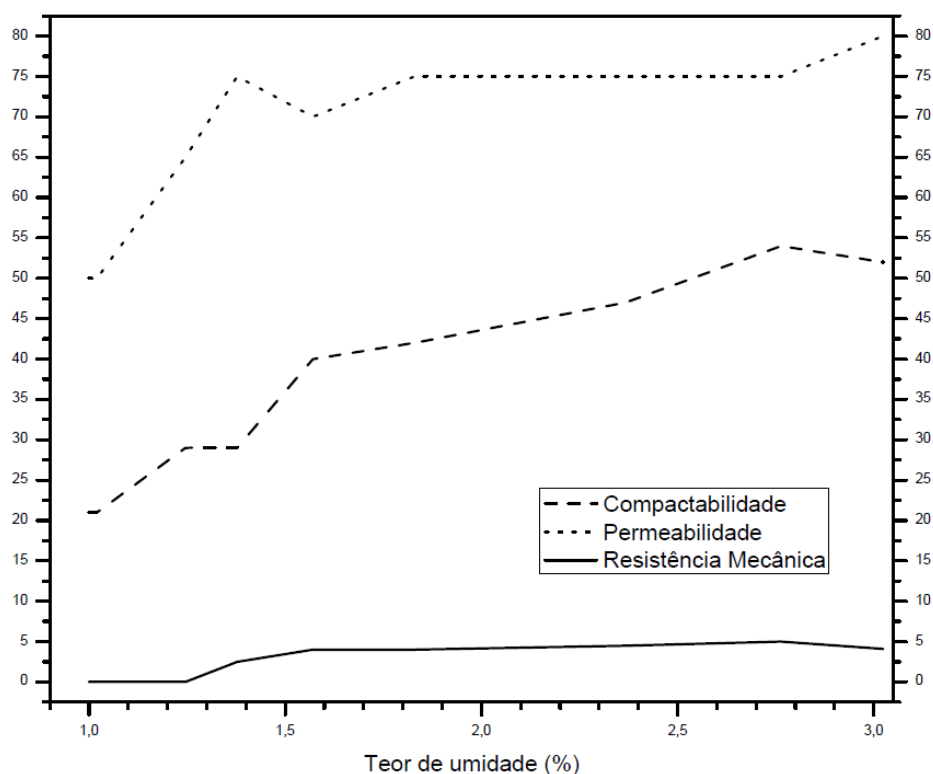
Após conhecido os teores de umidade para a areia base a para a argila. Descontando estes valores em massa da massa total de água de cada mistura. Os ensaios puderam ser realizados. Ao todo foram realizados 9 ensaios, variando a quantidade de água para cada um destes. Para uma maior confiabilidade dos dados coletados, para cada composição, foram realizados 3 ensaios. A média dos ensaios estão representados na tabela 6 e no gráfico 2.

Tabela 6 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V.

Ensaio	Compactabilidade (%)	Permeabilidade (cm ⁴ /g*min)	Resistência Mecânica (N/cm ²)	Teor de umidade (%)
1	21	50,0	0,0	1,00
2	21	50,0	0,0	1,02
3	29	65,0	0,0	1,25
4	29	75,0	2,5	1,38
5	40	70,0	4,0	1,57
6	42	75,0	4,0	1,43
7	47	75,0	4,5	2,37
8	54	75,0	5,0	2,76
9	52	80	4,1	3,02

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 2 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V. da Areia Base



Fonte: Autoria própria.

Para a conferência dos dados obtidos com ensaios realizados através da mistura de materiais puros, novos experimentos foram realizados com uma areia já misturada, disponível no laboratório da UTFPR, oriunda de diversos outros ensaios de mesmo aspecto. Tal areia era resultante dos experimentos semelhantes, realizados em outras ocasiões, onde, na ocasião, variou-se o teor de argila de 10% a 15%.

Todo o material utilizado nesta segunda etapa de ensaios foi peneirado em peneira ABNT 10 com abertura de 2,00mm. Após o peneiramento, a amostra inicial de 18,54kg foi quarteada e dividida em duas amostras com o auxílio de um Quarteador Jones, sendo uma com 9,54kg e outra com 9,0kg. A amostra com 9,54kg de areia foi colocada inteiramente dentro do misturador. Percebeu-se então que esta quantia preencheu apenas 40% (8 cm em altura) da capacidade máxima (20 cm em altura) do equipamento. Assim, completou-se com a outra amostra.

Para que a segunda amostra fosse acrescentada, esta fosse novamente quarteada com o equipamento Jones e, uma parte com 2,22kg foi adicionada. Assim, o misturador atingiu cerca de 50% da sua capacidade, ficando então com uma quantia de 11,76kg.

Para a conferência da umidade do material, seguindo algumas recomendações da CEMP 105, 3 amostras com aproximadamente 20g cada foram coletadas, pesadas, secadas em forno a $120^{\circ} \pm 4^{\circ}$ C durante um período de 2 horas. Após este período, as amostras resfriaram até atingir a temperatura ambiente por aproximadamente 30 minutos. Em seguida, estas foram pesadas e então o teor de umidade pode ser determinado, conforme demonstra a tabela 7.

Tabela 7 - Teor de umidade da areia

Amostra	Peso inicial	Peso final	Peso do recipiente	Umidade
	(g)	(g)	(g)	(%)
1	129,4	128,91	109,42	2,45
2	63,74	63,23	43,76	2,55
3	64,22	63,73	44,22	2,45
Média				2,49

Fonte: Autoria própria.

Após a secagem das 3 amostras, estas passaram pelo processo de lavagem com água e com hidróxido de sódio 3,0%, agitação e sifonamento manual. De maneira semelhante ao ensaio anteriormente feito e acima descrito, foram realizadas 2 lavagens com repouso de 10 minutos e mais 5 lavagens com repouso de 5 minutos até que a água ficasse extremamente limpa. Em seguida as amostras foram secas por um período de 2 horas e resfriaram por um período de 30 minutos até atingirem a temperatura ambiente. Novamente as amostras foram pesadas, e, desta vez, com a areia base isenta de umidade e de caulim, o teor de argila pode ser determinado, conforme demonstra a tabela 8.

Tabela 8 - Teor de argila

Amostra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Teor de argila (%)
1	18,78	16,72	10,97
2	18,79	16,71	11,07
3	18,78	16,68	11,18
Média			11,07

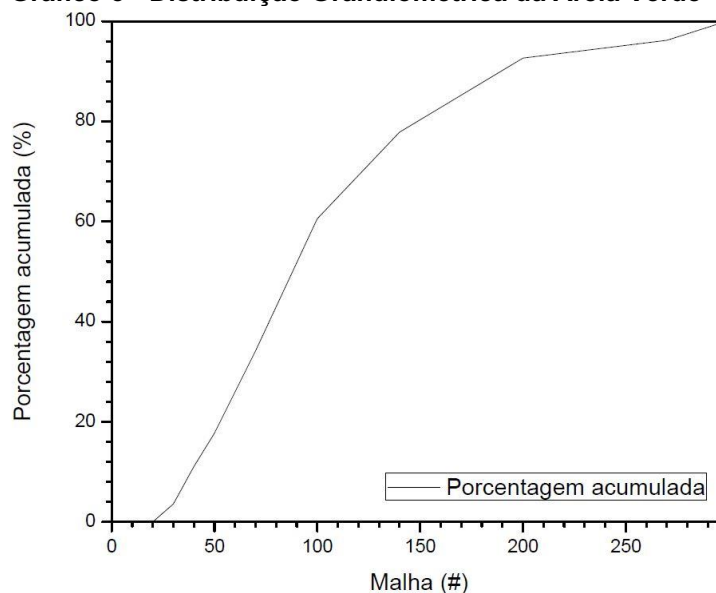
Fonte: Autoria própria.

Em seguida, uma amostra de 20g foi pesada e, através do peneiramento, pode-se determinar o módulo de finura, concentração e teor de finos de areia, conforme demonstra o quadro 3 e no gráfico 3.

Quadro 3 - Distribuição granulométrica da areia verde

Peneiras ABNT		Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + material (g)	Retenção (g)	Retenção (%)	Fatores	Produto
Malha (mm)	Nº Malha						
3,35	6	362,87	362,87	0,00	0,00	3	0,0
1,7	12	328,08	328,08	0,00	0,00	5	0,0
0,85	20	255,79	255,79	0,00	0,00	10	0,0
0,6	30	234,27	234,99	0,72	3,60	20	72,0
0,425	40	246,94	248,43	1,49	7,45	30	223,5
0,3	50	246,38	247,72	1,34	6,70	40	268,0
0,212	70	228,46	231,75	3,29	16,45	50	822,5
0,15	100	225,82	231,09	5,27	26,35	70	1844,5
0,106	140	227,23	230,69	3,46	17,30	100	1730,0
0,075	200	221,95	224,91	2,96	14,80	140	2072,0
0,053	270	208,42	209,13	0,71	3,55	200	710,0
Prato	Prato	305,65	306,41	0,76	3,80	300	1140,0
			SOMA	20,00	100,00		8882,5

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 3 - Distribuição Granulométrica da Areia Verde

Fonte: Autoria própria.

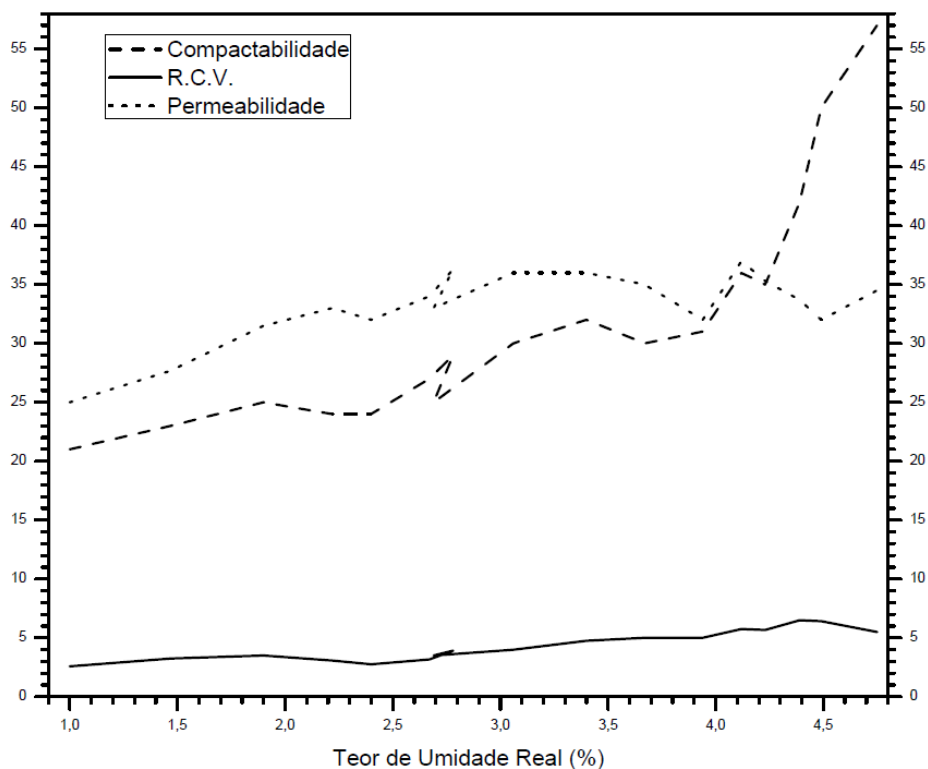
A partir da umidade inicial da areia de 2,49% representando uma relação água/argila de 0,221, realizou-se um ensaio para determinar o ponto de partida. Para este primeiro experimento, efetuou-se a mistura por 700 voltas e após este período, foram realizados 3 ensaios de compactabilidade, permeabilidade e R.C.V. conforme representa a tabela 9 e o gráfico 4.

Mesmo com valores previamente conhecidos de umidade, foram retiradas 3 amostras para secagem, de forma a determinar a umidade real da areia após a mistura. Tal comparativo demonstrou que num primeiro momento a umidade teve queda de 1,5% em massa. Este procedimento seguiu-se em todos os ensaios seguintes. A partir deste ensaio inicial, adicionou-se água numa relação água/argila de 0,25 ou aproximadamente 55,51ml.

Tabela 9 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V.

Ensaio	Compactabilidade (%)	R.C.V. (N/cm ²)	Compac. (%)	Permeabilidade (cm ⁴ /g*min)	Compac. (%)	Teor de Umidade Real (%)
1	21,0	2,58	58,67	<35	59,00	1,00
2	23,0	3,25	59,00	27,67	58,67	1,47
3	25,0	3,50	58,00	31,50	58,00	1,90
4	24,0	3,08	58,00	33,00	58,00	2,22
5	24,7	2,75	58,00	32,00	57,00	2,40
6	27,7	3,17	58,00	34,00	57,00	2,67
7	29,3	3,92	58,00	36,33	57,00	2,78
8	25,0	3,50	58,00	33,00	57,00	2,69
9	30,0	4,00	58,00	36,00	57,00	3,06
10	32,0	4,75	58,00	36,00	57,00	3,40
11	30,0	5,00	59,00	35,00	59,00	3,67
12	31,0	5,00	58,00	32,00	58,00	3,94
13	36,0	5,75	58,00	37,00	57,00	4,12
14	35,7	5,67	57,67	35,33	57,00	4,23
15	42,0	6,50	58,00	33,67	57,33	4,39
16	50,7	6,42	58,00	32,00	58,00	4,49
17	57,67	5,50	57,67	34,50	58,00	4,75

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4 - Compactabilidade, Permeabilidade e R.C.V. da Areia Verde

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de enriquecer a pesquisa acadêmica, foi elaborado um ensaio de permeabilidade da sílica utilizada como areia base como parte da composição da areia verde. Os resultados da areia base são demonstrados na tabela 10. Nesta, a descrição ocorre da seguinte maneira:

- Menor que: significa que a granulometria da areia é menor do que a abertura da peneira e por isso ela passou pela malha.
- Maior que: significa que a granulometria da areia é maior do que a abertura da peneira e por isso ela não passou pela malha e ficou retida.

Tabela 10 - Permeabilidade da areia base

Tamanho	Tamanho	Permeabilidade
<	>	(cm ⁴ /g*min)
30	40	500
40	50	355
50	70	230
70	100	85
100	140	33
140	fundo	12,5

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Com a metodologia empregada, os objetivos idealizados no início do trabalho puderam ser alcançados, permitindo que este apresentasse a caracterização de dados quantitativos à respeito das características mecânicas de uma areia verde de fundição aglomerada com argila caulinitica.

Devido ao emprego destes métodos, seguindo normas e recomendações sobre a confecção de corpo de prova, elaboração da mistura padrão, realização dos ensaios de compactabilidade, permeabilidade e R.C.V. entre outras, podemos concluir alguns pontos específicos a respeito da utilização deste como único aglomerante de uma areia verde de fundição.

Em relação ao teor de umidade, para o caulim é necessário acrescentar mais água quando comparado à bentonita, pois a caulinita apresenta grande perda de água para o ambiente. Perda esta que se dá pelo simples fato de estar exposto e, que é potencializada durante a homogenização no misturador de rolos. Portanto, para atingir o ponto ótimo em umidade, uma quantidade de água superior a este limite ótimo deve ser adicionada, e em casos de excesso de água, basta aguardar um tempo, misturando ou não, que o ponto ótimo será atingido através da evaporação natural do excesso de água.

O ponto máximo de R.C.V. com $5,0\text{N/cm}^2$, para 10% de caulim, foi com umidade em 2,76%. Um valor muito próximo ao esperado quando comparado à bentonita. Já para 11,07% de caulim, o ponto máximo de R.C.V. com $6,5\text{N/cm}^2$, ocorreu com umidade de 4,39%. Portanto, de fato, para um aumento relativo de 10,7% de aglomerante, houve a necessidade de um aumento relativo de 59,05% em água resultando em uma alta de 30% na R.C.V.

Em relação à homogenização, está se deu de maneira mais dificultada quando comparada à bentonita, pois ao final das 700 voltas, numa porcentagem não ótima de água, ainda notou-se torrões de argila na mistura. O conteúdo no misturador apresentava-se com a mesma aparência de antes da mistura. Entretanto, para a quantidade ótima de água, aquela na qual houve um inchamento da mistura, ocorreu uma notável homogenização, com redução significativa de torrões de argila.

Em relação a mistura, notou-se que os resultados mecânicos satisfatórios foram obtidos somente após o inchamento da areia verde, o qual superou a extremidade a borda de 20cm do misturador, grudando na tampa durante o

comprimento das 700 voltas. Inchamento este, que fez com que a areia verde, desgrudada das paredes do misturador e devolvida ao ambiente de mistura, ultrapassasse a marca de 17cm em altura, representando um preenchimento aproximado de 85% do volume disponível para a mistura. Vale salientar que havia uma boa resistência mecânica na areia que grudou ao redor do misturador, sendo necessário a utilização de espátula para efetuar a retirada.

Em avaliação das propriedades mecânicas, a areia verde com 10% de caulim apresentou compactabilidade satisfatória apenas quando a umidade ficou em torno de 2,76%. Já a mistura aglomerada com 11,07% apresentou compactação satisfatória com umidade em torno de 4,75%. Nos demais casos, em especial quando a umidade estava abaixo deste valor, a compactabilidade apresentou valores insatisfatórios.

Em relação à permeabilidade todos os resultados, tanto para 10% quanto para 11,07% de caulim, são considerados insatisfatórios para uma boa areia de fundição. Valores tão baixos quanto os obtidos durante os ensaios, impedem a fuga adequada dos gases durante a vazão do metal líquido.

Para uma areia resistente aos esforços mecânicos exigidos durante a fundição, é aconselhável que a R.C.V. apresente valores acima de $6,0\text{N/cm}^2$. Estes valores puderam ser alcançados com areia verde composta de 11,07% de caulim e umidade entre 4,39% e 4,49%.

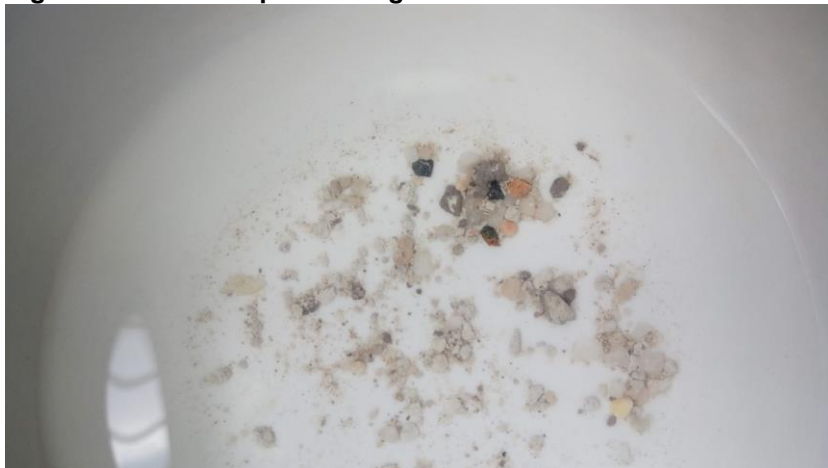
Os demais resultados podem ser utilizados de maneira calculada para alguns usos específicos dentre deste ramo de fabricação, porém, ainda assim não aconselha-se o uso desta areia caso a R.C.V. esteja abaixo de $6,0\text{N/cm}^2$, a compactabilidade esteja abaixo de 575 e a permeabilidade esteja abaixo de $300\text{cm}^4/\text{g}\cdot\text{min}$. Segundo SENAI V1, Pag 35, o simples ato de misturar componentes como areia base, argila, água e até mesmo aditivos, mesmo que em proporções pré-estabelecidas, não garante que a areia resultante terá resultado satisfatório.

Durante todos os ensaios e procedimentos, seguiu-se normas da ABNT e recomendações da CEMP, sendo algumas delas específicas para o aglomerante bentonita. Para a maioria das recomendações, os resultados aqui apresentados são considerados insatisfatórios.

Vale salientar que a baixa R.C.V. teve como influencia a presença de impureza como feldspato, mica e resíduos de rocha no caulim, conforme representa a figura 23. Estas impurezas são contadas como massa de argila e não possuem

poder ligante para fazer a mesma função na mistura. Assim sendo, faltará argila para que o desempenho da areia verde seja satisfatório.

Figura 23 - Caulim após a lavagem



Fonte: Aatoria própria.

Em relação à areia base utilizada para o experimento sabe-se que esta possui características muito finas, as quais fornecem maior resistência mecânica e menor permeabilidade do que uma areia com menor módulo de finura. Assim, com a substituição da areia por uma mais grossa, provavelmente haverá uma queda da resistência mecânica à compressão e um aumento significativo na permeabilidade, conforme demonstra a tabela 10.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Amostragem de resíduos sólidos - NBR 1007**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **Agregados – determinação da composição granulométrica - NBR 7217**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. **Bentonitas para fundição — Determinação da permeabilidade da mistura-padrão — Método de ensaio - NBR 8099**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **Materiais Refratários - Terminologia - NBR 8826**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. **Corpos de prova — Formas e tipos de ensaios — Padronização - NBR 10611**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. **Areia coberta e descoberta - Determinação de permeabilidade após cura - NBR 12046**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **Bentonita para fundição - Determinação da compactabilidade da mistura-padrão - Método de ensaio - NBR 12107**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. **Areia-base para fundição - Determinação da permeabilidade - Método de ensaio - NBR 12634**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. **Mistura-padrão para o ensaio de bentonita - Determinação da resistência à compressão a verde - Método de ensaio - NBR 12669**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. **Preparação da mistura-padrão utilizando batedeira planetária para o ensaio de resina caixa fria para fundição - Procedimento - NBR 16356**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ABIFA (Associação Brasileira de Fundição). ABIFA e SIFESP sediam 9th BRICS International Foundry Forum em setembro. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br/abifa-e-sifesp-sediam-9th-brics-international-foundry-forum-em-setembro/>> Acessado em 02/06/2019.

ADEMOH, N. A. Effect of kaolin clay addition on mechanical properties of foundry sand moulds bonded with grades 1 and 2 Nigerian acacia species. **International Journal of Physical Sciences**. Kaduna (Nigéria). v. 3 n. 10, p. 240-244, out. 2008.

BALDAN, 2013, R. L. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatadas**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2013.

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CEMP. **CEMP 060: Bentonita para fundição – Determinação da resistência mecânica à compressão a verde**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 061: Bentonita para fundição – Determinação da permeabilidade da mistura padrão**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 065: Bentonita para fundição – Determinação da compactabilidade da mistura padrão**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 068: Bentonita para fundição – Preparação da mistura padrão**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 080: Bentonita para fundição – Determinação da permeabilidade**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 081: Materiais para fundição – Determinação da distribuição granulométrica e módulo de finura e teor de finos em materiais granulares**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 105: Bentonita para fundição – Determinação do teor de umidade**. ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 125: Bentonita para fundição – Amostragem de material na forma granular.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 126: Bentonita para fundição – Amostragem de material na forma de pó.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 134: Equipamentos para areias de moldagem – Verificação do marteleto.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 140: Equipamentos para areias de moldagem – Verificação do permeâmetro.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 151: Equipamentos para areia de moldagem – Dispositivos de amostragem.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 198: Equipamentos para areias de moldagem – Verificação do misturador de laboratório.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 206: Bentonita para fundição – Determinação do teor de umidade.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP 207: Equipamentos para areias de moldagem – Verificação da máquina de ensaios de resistência.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP E-01: Areia padrão para ensaios em fundição.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP E-04: Bentonita para fundição.** ABIFA. São Paulo, 2015.

CEMP. **CEMP E-10: Corpos de prova – Formas e tipos de ensaios.** ABIFA. São Paulo, 2015.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). Caulim. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/6-2-caulim>> Acessado em 24/05/2019.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). Caulim. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2016>> Acessado em 24/05/2019.

FERREIRA, José M. G. de Carvalho. **Tecnologia da fundição**. Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian. 2010. 544 p.

GUESSER, W. L. **Estudo sobre as Bentonitas Brasileiras em Areia de Moldagem**. Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 1982.

HEINE, R. W.; GREEN, R. A.; SHIH, T. S. Entendendo a resistência e a compactabilidade da areia verde. **Fundição e Serviços**. p. 63-68. out. 1995.

LUZ, Adão B. da; SAMPAIO, João A.; FRANÇA, Silvia C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 896 p.

OLIVEIRA, D. **Propriedades físicas e químicas do solo**. USP. São Paulo. 2011. Disponível em: <http://www.geografia.ffe.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Deborah/2s_2011/F LG_1254-Pedologia_aula_10.pdf>. Acessado em 27/08/2019.

OLIVEIRA, I. L. de. **Moldagem – aula 4**. Ponta Grossa. 2014. Disponível em <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ivanir/disciplinas/disciplina-de-moldagem/Moldagem-%20aula%204%20-2014.pdf/at_download/file>. Acessado em 16/05/2019.

OLIVEIRA, I. L. de. **Classificação dos processos de fundição**. Ponta Grossa. 2018. Disponível em http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ivanir/disciplinas/disciplina-de-moldagem/1-%20Moldagem-%20aula%202.pdf/at_download/file>. Acessado em 02/06/2019.

RAIMUNDO, A. C. M. **Caulim**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/6-2-caulim>. Acessado em: 02/09/2019.

RIBAS, H. E. **Novos compósitos cerâmicos com base em caulim, borra de tinta, areia de fundição e vidros residuais**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, 2017.

RONQUIM, C. C. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 8: Conceito de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas. 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>. Acessado em: 27/08/2019.

SENAI, 1987, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila**. Belo Horizonte: DFP/DAT, v2, 1987.