

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

PEDRO HENRIQUE PEIXOTO

**CARACTERIZAÇÃO DE BENTONITAS PARA MOLDAGEM E FUSÃO DE  
FERRO FUNDIDO**

Porto Alegre

2021

PEDRO HENRIQUE PEIXOTO

**CARACTERIZAÇÃO DE BENTONITAS PARA MOLDAGEM E FUSÃO DE  
FERRO FUNDIDO**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Metalúrgica submetido à Banca da Examinadora da disciplina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Porto Alegre

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Peixoto, Pedro Henrique  
CARACTERIZAÇÃO DE BENTONITAS PARA MOLDAGEM E FUSÃO  
DE FERRO FUNDIDO / Pedro Henrique Peixoto. -- 2021.  
49 f.  
Orientador: Vinicius Karlinski de Barcellos.

Coorientador: Regis Fabiano do Amaral.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Fundação. 2. Bentonita. 3. Caracterização. I. de  
Barcellos, Vinicius Karlinski, orient. II. do Amaral,  
Regis Fabiano, coorient. III. Título.

Pedro Henrique Peixoto

**CARACTERIZAÇÃO DE BENTONITAS PARA MOLDAGEM E FUSÃO  
DE FERRO FUNDIDO**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Metalúrgica submetido à Banca da Examinadora da disciplina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Aprovado em: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela - UFRGS

---

Prof. Dr. Afonso Reguly - UFRGS

Dedico este trabalho ao meu primo e padrinho M.Sc.  
Eng. Régis Amaral pelo apoio constante e por  
representar um grande exemplo pessoal e profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

À comunidade da UFRGS especialmente ao Departamento de Engenharia Metalúrgica por possibilitarem a realização do curso de metalurgia, cuja excelência é reconhecida, e conseqüentemente deste trabalho de conclusão.

Ao meu orientador professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos pela contribuição não só a este trabalho como também durante toda vida acadêmica.

Aos colegas do Laboratório de Fundição da UFRGS, Régis Amaral, Tulio Nascimento, Leonardo Pereira e Gabriel Sant'Anna, pelas sugestões e observações valiosas, bem como no auxílio na execução deste trabalho.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho e durante a vida acadêmica, sejam eles professores, técnicos, colegas de curso e de trabalho.

A minha esposa Natalia Isabel Malüe Vieira pelo companheirismo, carinho, além do auxílio neste trabalho.

Ao meu pai Dejalme Peixoto, minha mãe Sirlei Peixoto e minha irmã Maitê Peixoto pelo suporte incomensurável até esta etapa da minha vida e também ao incentivo constante em todos esses anos de vida acadêmica.



## RESUMO

Neste trabalho, avaliaram-se as propriedades físico-químicas de três bentonitas nacionais, bem como suas propriedades mecânicas e aplicabilidade, além da comparação das mesmas com uma bentonita sódica natural e uma bentonita sódica ativada. Realizou-se a primeira etapa de caracterização com os ensaios de teor de umidade, inchamento, partículas grossas e adsorção de azul de metileno, este último feito tanto nas bentonitas conforme recebidas, quanto após sua calcinação à 550°C, possibilitando determinar o índice de estabilidade térmica. Na segunda etapa foi determinada a resistência a compressão a verde e a tração à úmido das bentonitas como recebidas e após calcinadas. Enquanto na terceira etapa realizou-se a moldagem, utilizando um corpo de prova conhecido, e posteriormente o vazamento com ferro fundido nodular obtido pelo processo sanduíche. Os resultados mostraram valores inadequados para uso da bentonita A em um dos ensaios na primeira etapa e resultados fora do especificados para as bentonitas B e C nas etapas um e dois. Na terceira etapa foram observados defeitos decorrentes da Bentonita A e defeitos não decorrentes da moldagem e/ou das bentonitas em questão para um dos corpos de prova da bentonita A e os dois corpos de prova da bentonita sódica ativada, utilizada como comparativo. Concluiu-se, através dos ensaios, que as três bentonitas são do tipo sódica e inadequadas para a utilização no processo de moldagem em areia verde.

Palavras-chave: fundição, bentonita, caracterização.

## **ABSTRACT**

In this work, the physicochemical properties of three Brazilian bentonites were evaluated, as well as their mechanical properties and applicability, in addition to comparing them with a natural sodium bentonite and an activated sodium bentonite. The first characterization step was carried out with tests for moisture content, swelling, coarse particles and methylene blue adsorption, the latter performed both on the bentonites as received, and after their calcination at 550°C, enabling the determination of the thermal stability index. In the second stage, the green compressive strength and wet tensile strength of the bentonites as received and after calcined were determined. While in the third stage, the molding was carried out, using a known specimen, and later the casting with nodular cast iron obtained by the sandwich process. The results showed inadequate values for the use of bentonite A in one of the tests in the first stage and results not specified for bentonite B and C in stages one and two. In the third stage, defects arising from Bentonite A and defects not resulting from molding and/or the bentonites in question were observed for one of the bentonite A specimens and the two specimens of activated sodium bentonite, used as a comparison. It was concluded, through the tests, that the three bentonites are of the sodic type and unsuitable for use in the molding process in green sand.

Keywords: Foundry, bentonite, characterization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de moldes e processos de fundição. ....	14
Figura 2 – Fluxograma do processo de fundição em areia verde. ....	15
Figura 3 – a) Representação de uma caixa tampa com seus elementos. b) Representação da caixa fundo durante a retirada do modelo. ....	17
Figura 4 – Representação da união das caixas fundo e tampa ....	17
Figura 5 – Representação da estrutura da montmorilonita. ....	21
Figura 6 – Representação da estrutura de uma montmorilonita sódica. ....	22
Figura 7– Análise térmica diferencial de uma bentonita de Wyoming, EUA. ....	22
Figura 8 – Aglomeração dos componentes da areia verde. ....	23
Figura 9 – Ação do ânion $Cl^-$ presentes na mistura de água e bentonita. ....	24
Figura 10 – Fluxograma das atividades. ....	26
Figura 11 – Inchamento da bentonita A após 24h. ....	27
Figura 12 – Conjunto necessário para realizar o CP do ensaio de compactabilidade. ....	30
Figura 13 – Caixa fundo (esquerda) e caixa tampa (direita) na presença do modelo de madeira antes da etapa de moldagem. ....	32
Figura 14 – Caixa fundo “cega” (esquerda) e caixa tampa (direita) após a retirada do modelo. ....	32
Figura 15 – Representação do corpo de prova. ....	33
Figura 16 – Sistema com a panela de reação (acima) e o cadinho (abaixo) responsável pelo vazamento. ....	33
Figura 17 – Esquema do processo de evaporação de água, similar ao ensaio de RTU. ....	37
Figura 18 – Imagem da face superior dos corpos de provas vazados em ferro fundido, sendo dois Cp's para cada mistura, com a presença de defeitos de inclusão de areia (amarelo) e inclusão de escória (vermelho). ....	39

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Valores típicos de contração linear dos metais durante a solidificação. ....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 3 – Média dos resultados dos ensaios físicos e químicos de caracterização das bentonitas conforme recebidas.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 4 – Média dos resultados dos ensaios físicos e químicos de caracterização das bentonitas calcinadas a 550°C.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 5 – Média dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 6 – Média dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas com as bentonitas calcinadas a 550°C .....</b>	<b>38</b>

## **LISTA DE SIGLAS**

CEMP – Comissão de Estudos de Matérias Primas

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

AFS – Classificação de módulo de finura da American Foundry Society

RCV – resistência à compressão a verde

CP – Corpo de prova

RTU – Resistência à tração a úmido

A.A.M. – Adsorção de Azul de Metileno

I.E.T. – Índice de Estabilidade Térmica

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	14
3.2	O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE	15
3.2.1	A modelação e a moldagem	16
3.2.2	Fusão e vazamento	18
3.2.3	Desmoldagem e limpeza	18
3.2.4	A mistura de areia a verde	19
3.2.4.1	– Areia base	19
3.2.4.2	Aglomerantes: Bentonita	20
3.2.4.3	Água	23
3.2.4.4	Aditivos	24
3.3	DEFEITOS DE MOLDAGEM	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA PRIMEIRA ETAPA	26
4.1.1	Determinação do teor de umidade	27
4.1.2	Determinação do inchamento	27
4.1.3	Teor de partículas grossas	28
4.1.4	Absorção de azul de metileno (A.A.M.) e índice de estabilidade térmica (I.E.T.)	28
4.2	DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA SEGUNDA ETAPA	29
4.2.1	Compactabilidade	29
4.2.2	Resistência à compressão a verde	30
4.2.3	Resistência à tração à úmido	31
4.3	DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA TERCEIRA ETAPA	31
4.3.1	Mistura	31
4.3.2	Moldagem e vazamento	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	35
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	36
5.3	DESEMPENHO PRÁTICO	38
6	CONCLUSÕES	41
7	TRABALHOS FUTUROS	43
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

## 1 INTRODUÇÃO

A fundição representa um dos principais processos de obtenção de peças metálicas, consistindo no preenchimento de moldes com metal líquido de fluidez adequada e na posterior solidificação desse metal no molde. Os moldes podem ser constituídos tanto de materiais metálicos quanto de cerâmicos e definem a geometria da peça metálica.

Os moldes de material cerâmico são mais refratários e abrangem um número maior de componentes metálicos que podem ser obtidos, sendo eles não ferrosos e ferrosos, cujos pontos de fusão são mais elevados. Dentre estes moldes cerâmicos inserem-se os moldes obtidos por moldagem em areia verde.

Segundo MAIS et al. (2014) a moldagem em areia a verde é a mais empregada, dentre as várias técnicas de fundição, na produção de peças acabadas. E segue apresentando as principais razões para isso, sendo elas, a boa flexibilidade, produtividade e qualidade, assim como a economia de matéria-prima. Este processo inicia a partir de um modelo, possibilitamos a confecção do molde, e para tal, utiliza-se a mistura de quatro componentes principais, sendo eles a areia base, água, bentonita e aditivos.

A bentonita é um mineral constituído por montmorillonita, podendo ser cálcica ou sódica, baseadas no cátion trocável. Segundo GUESSER et al. (2019) e GUESSER (2003), a indústria de fundição brasileira tem sido abastecida com bentonitas de diversas origens: Paraíba – Brasil e Bahia – Brasil sendo elas sódico ativadas, Rio Negro – Argentina (sódica natural) e Wyoming – EUA (sódica ativada).

A bentonita atua como um ligante da areia de moldagem, talvez seu principal constituinte, e seu comportamento pode restringir a aplicabilidade do processo de moldagem. De acordo com GUESSER et al. (2019), espera-se da bentonita como ligante: fornecer plasticidade e resistência à areia de moldagem, proporcionar ao molde bom desempenho a quente, mostrar boa desmoldabilidade na separação do molde da peça e apresentar alta durabilidade térmica.

Algumas propriedades, como densidade, teor de inchamento e estabilidade térmica são esperadas de acordo com o tipo de bentonita. Apresenta-se aqui um estudo de caracterização de bentonitas de procedência variada, bem como da experiência prática com cada uma.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo caracterizar três bentonitas nacionais e comparar os resultados obtidos entre ensaios físicos e químicos, tanto na temperatura ambiente, quanto após calcinadas, a 550°C, com uma bentonita sódica natural, uma sódica ativada e a recomendação ABIFA-CEMP E-04 (2015) para caracterização de bentonitas a fim de destacar sua importância e desempenho quando submetida ao processo de moldagem em areia verde.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as propriedades físicas e químicas das bentonitas, através dos testes de umidade, inchamento, índice de azul de metileno, partículas grossas, para uso em areia de moldagem;
- Avaliar as propriedades mecânicas das bentonitas após a confecção da mistura padrão, como compactabilidade, resistência à compressão e resistência a tração a úmido, para uso em areia de moldagem;
- Avaliar a geração de defeitos tipos: escamas e penetração, após a moldagem de corpo de prova padrão e vazamento de ferro fundido nodular.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

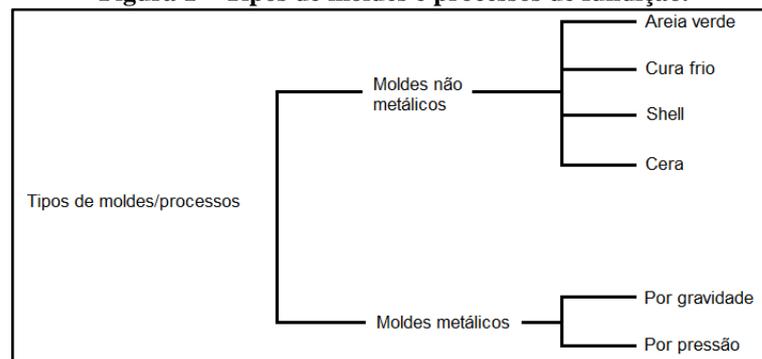
#### 3.1 A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição consiste na fabricação de peças metálicas através de uma série de etapas como a preparação, a fusão e o refino de insumos metálicos, o posterior vazamento em moldes, seja por gravidade, pressão, centrifugação ou vácuo, e por fim a limpeza e acabamento da peça obtida na desmoldagem. Para ALVES (2012) as fundições, com relação ao tipo de fundido, são classificadas como ferrosas (ferro e aço) e não ferrosas (alumínio e outros metais).

De acordo com CASOTTI (2011), a produção de fundidos no Brasil, que pouco se alterou nas últimas décadas, concentra-se em 90% quanto às ligas ferrosas (incluindo aço) e o método mais tradicional de fundição de metais ferrosos se utiliza de moldes de areia.

O tipo de processo de fundição utilizado deve ser muito bem analisado, pois tem influência direta na precisão dimensional, propriedades mecânicas e acabamento da peça final. Uma grande variável por trás dos processos é a escolha do molde. Dito isso, geralmente os processos são classificados conforme a escolha de seu molde (Figura 1).

**Figura 1 – Tipos de moldes e processos de fundição.**



Fonte: CASOTTI (2011).

Os moldes utilizados nas diferentes técnicas de fundição podem ser divididos em moldes permanentes e não permanentes. Os permanentes são sempre metálicos e não são destruídos após a desmoldagem, possibilitando sua aplicação em larga escala para fabricação de peças em série. Entretanto depende de um alto investimento inicial. Os moldes não permanentes, segundo MOREIRA (2004), são destruídos após o vazamento do fundido e são fabricados a partir de modelos que definem a forma desejada do fundido.

Os modelos podem ser destruídos, como no processo de cera perdida, ou não, como nos processos que se utilizam de moldes de gesso, cerâmica ou areia. MOREIRA (2004) ainda diz que a areia é utilizada como material refratário e principal constituinte dos moldes não permanentes.

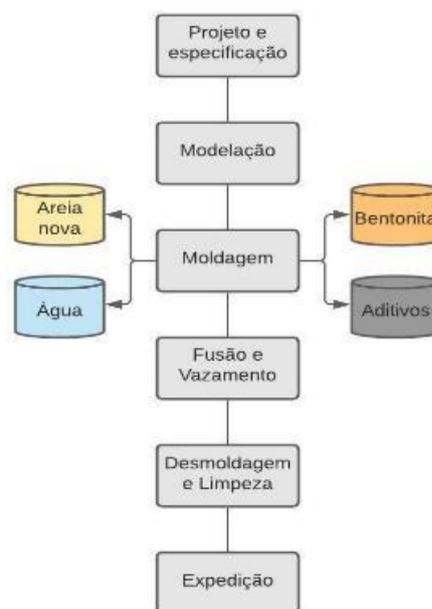
### 3.2 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

O processo que utiliza moldagem em areia verde é largamente empregado na indústria, dada a sua simplicidade tecnológica, o baixo custo, abundância de matéria-prima e a facilidade de recuperação da areia. Por outro lado, há uma restrição à fusão de peças muito grandes, devido a limitação das propriedades mecânicas do molde (ALVES, 2012).

Para CASOTTI (2011) o risco de heterogeneidade da areia influencia a qualidade da peça, propiciando um acabamento superficial inferior ao dos demais processos e um risco de erosão do molde para peças de tamanho grande.

O fluxograma representado na Figura 2 apresenta, de forma prática, o processo de fundição em indústrias que utilizam a moldagem em areia a verde desde o projeto e especificação, com todas suas variáveis descritas, dimensões de molde, materiais escolhidos, até a expedição do produto final.

**Figura 2 – Fluxograma do processo de fundição em areia verde.**



Fonte: Adaptado de FILHO (2016).

### 3.2.1 A modelação e a moldagem

A confecção de modelos, machos e moldes constitui uma etapa fundamental para a qualidade do processo. A preparação de modelos é a primeira etapa prática realizada, nela o objetivo é produzir uma réplica do produto final podendo ela ser de madeira, metal, resina, isopor entre outros materiais.

O cuidado com o material e as dimensões do modelo é fundamental, e deve-se levar em consideração a taxa de contração do metal durante a solidificação, apresentada na Tabela 1, já que na parte da moldagem o modelo é responsável por gerar a forma desejada da peça na areia durante a compactação da mesma. Segundo ALVES (2012) atualmente os erros e desperdícios dimensionais podem ser minimizados a partir da utilização de softwares e com o auxílio de lasers.

**Tabela 1 – Valores típicos de contração linear dos metais durante a solidificação.**

<b>Metal</b>	<b>Contração linear (%)</b>
Aço	2,0
Ferro fundido	0,5 - 1,0
Ferro Nodular	0,8
Alumínio	1,7

Fonte: Adaptado de SOARES (2000).

A etapa de confecção de machos é opcional, tendo em vista que são responsáveis por delimitar partes internas das peças, os chamados vazios, logo apenas utilizado em peças com essa exigência.

Na produção de moldes utiliza-se a mistura dos materiais do sistema de areia a verde, sendo eles a areia nova ou de retorno, oferecendo refratariedade e distribuição granulométrica da mistura e a bentonita, responsável pela compactabilidade e resistência ao molde quando adicionada a água e conseqüentemente no acabamento superficial do fundido.

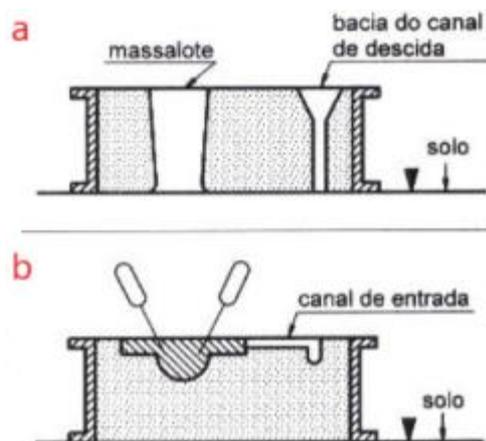
Na moldagem essa mistura é aplicada como areia de faceamento, cujo contato com o modelo é direto, e tem a função de suportar as condições impelidas pelo metal líquido durante o vazamento. São chamadas de areias de enchimento aquelas cuja função é apenas o

preenchimento do restante do molde e por isso sua qualidade não necessita ser elevada tal qual a areia de faceamento.

Com essa mistura (areia de faceamento) pronta, utiliza-se duas caixas com dimensões compatíveis para a produção da peça, são elas a caixa tampa e a caixa fundo, representadas nas Figura 3. A caixa fundo é moldada na presença do modelo e de machos (opcional) com auxílio do desmoldante para evitar a aderência da areia de fundição à superfície dos mesmos. Enquanto na caixa tampa estará a outra metade do modelo bipartido, sendo moldada da mesma maneira, porém com o canal de vazamento principal.

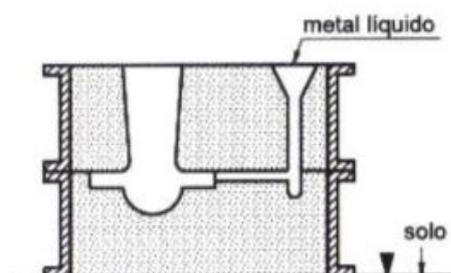
Em ambas caixas é realizada a socagem da areia, com auxílio de um martetele, para sua fixação junto ao modelo e canal de vazamento. Essa prática além de auxiliar na retirada desses dois elementos para a formação do molde também influenciará diretamente no acabamento superficial do fundido. Com as duas caixas preparadas faz-se a união das partes compactadas (Figura 4) da caixa fundo com a da caixa tampa utilizando presilhas ou grampos nas caixas e realiza-se a etapa de fusão.

**Figura 3 – a) Representação de uma caixa tampa com seus elementos. b) Representação da caixa fundo durante a retirada do modelo.**



Fonte: MORO (2007)

**Figura 4 – Representação da união das caixas fundo e tampa**



Fonte: MORO (2007)

### 3.2.2 Fusão e vazamento

A etapa da fusão é responsável pela transformação da carga metálica sólida para o estado líquido e é realizada predominantemente em fornos de indução. Existe a necessidade do controle constante da temperatura durante o superaquecimento da carga a fim de evitar problemas de início de solidificação durante transporte ou durante o preenchimento do molde. Para GIULIANO (2008), o valor de superaquecimento pode ser definido como a diferença entre a temperatura de vazamento e a temperatura de fusão do material.

Para transportar o material já fundido até o molde de areia utiliza-se um cadinho de tamanho compatível com a carga e antes do vazamento é fundamental a retirada da escória formada na superfície do metal fundido. Outro cuidado importante é na velocidade de vazamento, que deve se manter adequada e constante, para evitar erosão e inclusão de areia na peça.

No processo de vazamento é feita a transferência do metal líquido presente no cadinho diretamente nos canais de vazamento do molde e, ainda no preenchimento do molde por gravidade, o material vazado deve fluir para dentro da cavidade, ocupá-la completamente e iniciar a solidificação (GIULIANO,2008).

### 3.2.3 Desmoldagem e limpeza

A desmoldagem é a operação de retirada da peça solidificada de dentro do molde, podendo ser realizada por vibrações ou por quebra do molde feita controladamente para evitar danos à peça. HERMENEGILDO (2011) destaca a importância de controlar também a temperatura de desmoldagem, a fim de prevenir choques térmicos que possam causar trincas na peça.

Grande parte do volume de areia resultante da desmoldagem pode ser reintegrado à uma nova preparação de moldes, mas, segundo MARTINS (2017), outra parte perde as características de trabalhabilidade e permeabilidade e é descartada.

Após desmoldado, são cortados os canais e rebarbas da superfície do fundido e é realizada a limpeza da sua superfície. Por fim, a peça está preparada para o seu destino final, seja ele a usinagem, análises químicas e testes físicos ou ainda a montagem de outros componentes.

### 3.2.4 A mistura de areia a verde

A areia verde é uma mistura heterogênea composta pela adição de granulados refratários (usualmente sílica) denominados de “areia base”, e por um aglomerante desses grãos com os de ordem mineral, como as argilas bentoníticas naturais ou ativadas, além da adição da água, responsável pelo controle de umidade que auxilia a plasticidade necessária para a areia a ser compactada (PABLOS, 2008).

De acordo com FILHO (2016) o termo “verde” significa que a umidade foi acrescentada na areia e aglomerantes e essa é uma técnica de baixo custo, abundância de matéria-prima e de fácil implementação.

#### 3.2.4.1 – Areia base

A areia base ou areia nova é o principal componente da mistura de areia a verde e, ainda segundo FILHO (2016), os grãos de areia possuem as propriedades refratárias necessárias para a resistência do molde às altas temperaturas do processo de vazamento.

Algumas propriedades da areia base se fazem necessárias para sua aplicação na etapa de moldagem. Dentre as quais pode-se citar a baixa molhabilidade por metais fundidos e principalmente ser quimicamente inerte a eles para haver o mínimo de interferência no contato durante o canal de vazamento. A estabilidade dimensional e térmica a altas temperaturas também se faz necessária visto as temperaturas alcançadas nos processos de vazamento em moldes de areia a verde (MACIEL, 2017).

Outra característica importante é a disponibilidade em grandes quantidades e preço acessível que, dentre os diversos tipos de areia existentes, faz da areia de sílica a mais utilizada. As areias silicosas podem ser encontradas em jazidas geradas pela desagregação de rochas por processos naturais, originadas basicamente de arenitos e quartzitos (PABLOS, 2008). A sílica mais utilizada nas areias de fundição se apresenta sob a forma cristalizada quartzo.

A areia base pode ser caracterizada de acordo com sua composição química, granulometria e forma de seus grãos. A distribuição granulométrica influencia no acabamento superficial da peça fundida já que quanto maior o grão, maior a penetração do metal fundido e, portanto, mais irregularidades na superfície da peça. Ao mesmo tempo, se obtido um grão muito fino há uma queda da permeabilidade, o que possibilita defeitos difusionais provocados pela presença de gases.

A diferença entre a distribuição das formas dos grãos reflete diretamente na quantidade de aglomerante bentonita para cobertura dos grãos de areia do sistema. Grãos arredondados necessitam menor quantidade de aglomerante e conferem alta compactabilidade ao molde. Entretanto, grãos angulares resultam numa baixa densidade (baixa compactabilidade) e alta permeabilidade, além de consumir mais aglomerante a fim de atingir resistências satisfatórias (MARCO, 2021).

#### 3.2.4.2 Aglomerantes: Bentonita

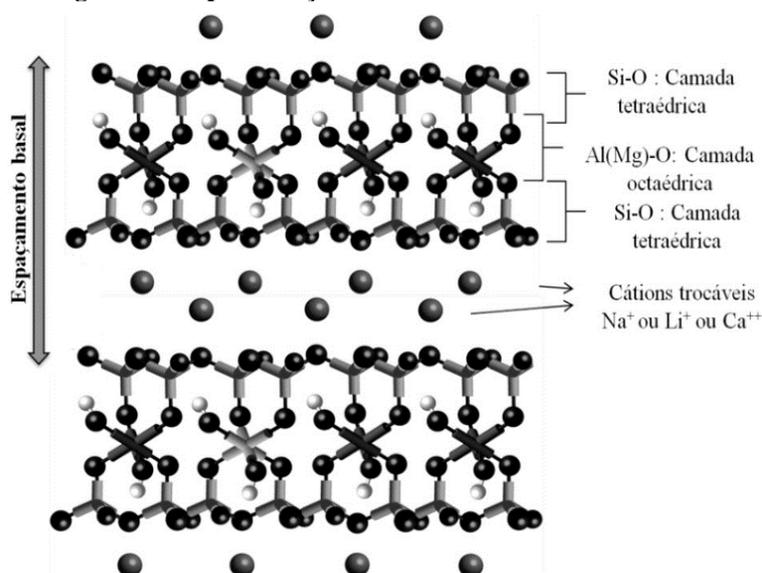
Os ligantes ou aglomerantes têm função de oferecer coesão, plasticidade e resistência necessários aos moldes de fundição. Podem ser naturais como bentonita, óleos minerais, vegetais e animal ou sintéticas tal como: resinas fenólicas, furânicas, uréia-formalaldeído (OKIDA, 2006).

As bentonitas são as argilas mais utilizadas como aglomerantes no setor de moldagem em areia a verde e são compostas por aproximadamente 80% do argilomineral montmorilonita. Conforme CARNIN (2008), na sua estrutura cristalina, a montmorilonita apresenta lamelas formadas por duas camadas tetraédricas de silício e uma camada octaédrica de alumínio ligando-as, numa estrutura do tipo 2:1, ilustrada na Figura 5. Nas lacunas entre lamelas se encontram as camadas intermediárias nas quais residem os cátions trocáveis como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2++}$ ,  $\text{Li}^+$ , fixos eletrostaticamente.

Na camada octaédrica estão presentes as hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) cuja decomposição em água e oxigênio durante altas temperaturas, como no vazamento, representa a eliminação da água de constituição da bentonita.

Algumas propriedades apresentadas pela bentonita são: elevada área superficial, alta capacidade de troca catiônica, finura de partículas e inchamento de camadas em presença de água.

**Figura 5 – Representação da estrutura da montmorilonita.**



Fonte: Adaptado de BARBOSA (2012).

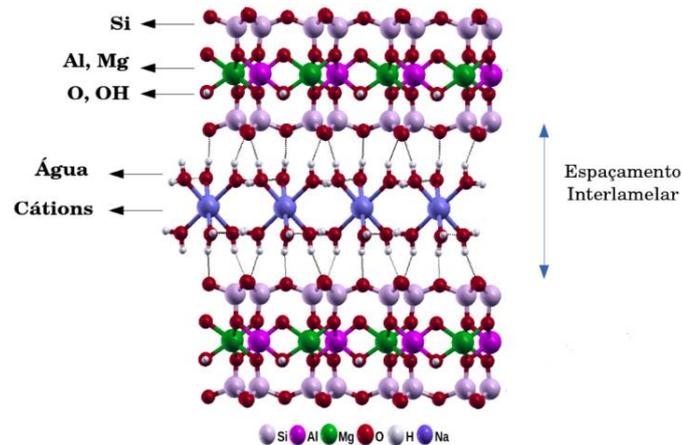
Segundo SILVA (2011), a bentonita é formada através de uma alteração química decorrente de origem ígnea, sendo o tufo ou cinza vulcânica. Há dois tipos principais de bentonitas naturais, são elas as cálcicas e as sódicas, refletindo respectivamente a predominância de cátions  $\text{Ca}^{++}$  ou  $\text{Na}^+$  no seu estado natural.

As bentonitas sódicas, Figura 6, apresentam melhores propriedades para o uso no processo de fundição, como a alta capacidade de troca catiônica e seu inchamento, isto se dá devido aos cátions  $\text{Na}^+$ , de menor valência, apresentarem-se afastados devido à baixa energia de interação resultando numa grande separação das lamelas e conseqüentemente permitindo a penetração de água em sua estrutura (CARNIN, 2008)

Outra vantagem das bentonitas sódicas, segundo MOREIRA (2004), é possuir uma temperatura de desagregação superior à das cálcicas ( $621^\circ\text{C}$  e  $315^\circ\text{C}$ , respectivamente), gerando moldes de maior resistência à temperatura e maior durabilidade, além de reduzir a quantidade de finos devido a menor queima da argila.

Devido a isso, de acordo com PABLOS (2008), as bentonitas cálcicas passam por um tratamento de “ativação” que se dá pela substituição de cátions  $\text{Ca}^{++}$  por  $\text{Na}^+$ , essas então, passam a ser chamadas de bentonitas sódicas ativadas e são amplamente usadas na indústria.

**Figura 6 – Representação da estrutura de uma montmorilonita sódica.**

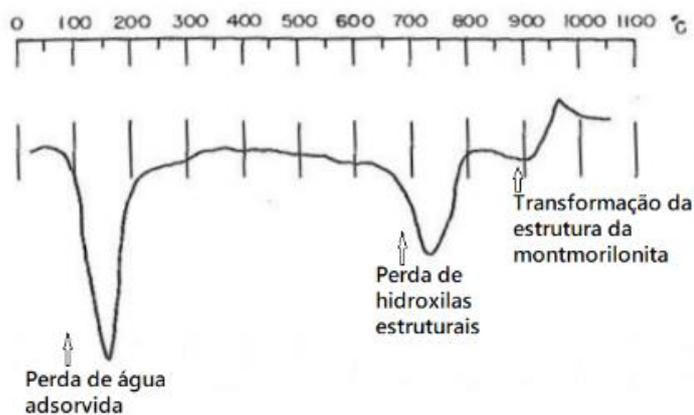


Fonte: Adaptado de GFQSI-UFJF (2012).

A bentonita em presença da água tem a função de coesão entre areia/argila, sendo o principal aglomerante na mistura a verde. As características obtidas pela adição de argila são escoabilidade, consistência e plasticidade, responsáveis pela compactabilidade e correto dimensionamento dos moldes, além de impelir a resistência da coesão exercida para evitar o rompimento da caixa de moldagem durante o vazamento CARNIN (2008).

Segundo PERRY (2019), a resistência à temperatura sem a decomposição da água de constituição dita a durabilidade de uma bentonita. Quanto maior a temperatura em que ocorre a saída dessa água, maior será a durabilidade da argila. A Figura 7 pode-se observar a região onde ocorre a decomposição da água de constituição através de uma curva de Análise Térmica Diferencial de uma bentonita aquecida até 1050°C.

**Figura 7– Análise térmica diferencial de uma bentonita de Wyoming, EUA.**



Fonte: Adaptado de PERRY (2019).

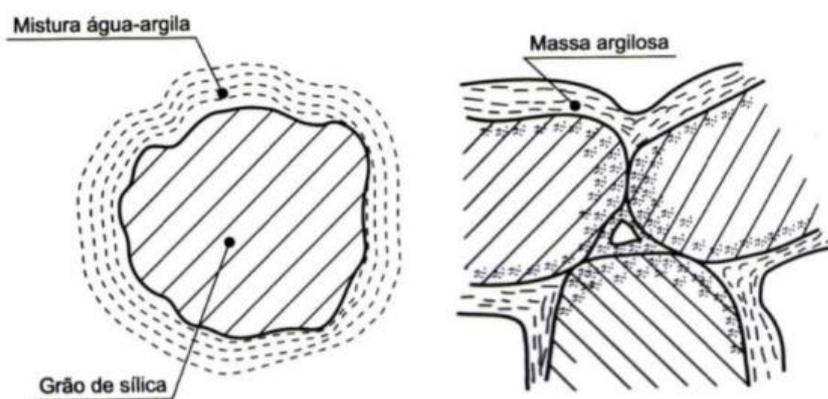
No vazamento do metal a água adsorvida, que participa da ligação, é evaporada e deve ser reposta no misturador para um novo ciclo de fundição. De acordo com PERRONY (2019), o aquecimento da bentonita resulta ainda na perda da água de constituição, em temperaturas de 400 a 700°C, e conseqüentemente na perda da capacidade de aglomerante de parcela da bentonita que deve então ser reposta no misturador. A água é essencial para a ativação de propriedades como plasticidade e resistência que a bentonita confere à areia a verde.

### 3.2.4.3 Água

Como mencionado no item anterior, a água é um item importante na areia a verde por conferir-lhe a distribuição de umidade no sistema, influenciando em propriedades como plasticidade, consistência e compactabilidade.

Existem dois componentes que resultam na aglomeração dos grãos de areia pela bentonita, representada na Figura 8, são eles: a adesão que se dá na interface areia/bentonita e permite a aderência da bentonita aos grãos de areia, e a coesão (da bentonita) que afeta a resistência interna do filme de bentonita que envolve os grãos.

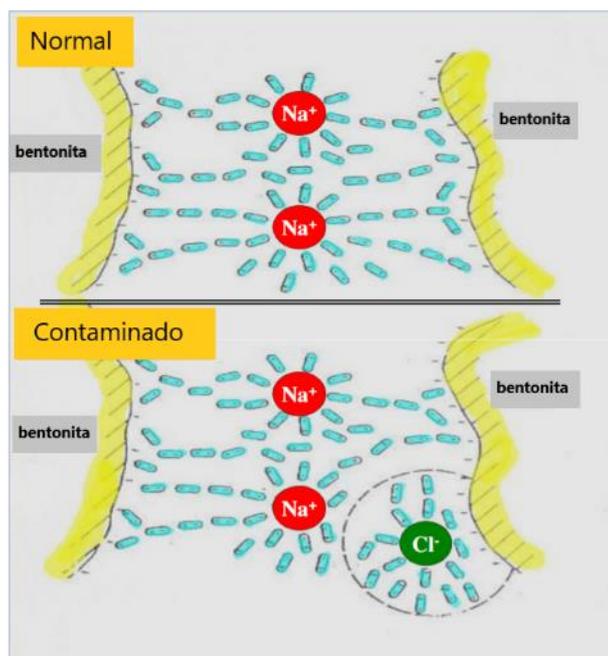
**Figura 8 – Aglomeração dos componentes da areia verde.**



Fonte: MACIEL (2017)

A ação de ânions como o  $\text{Cl}^-$  presentes na água podem causar uma redução na coesão entre partículas de areia e argila, pois eles atraem parte das moléculas de água que atuam na estrutura da bentonita conforme representado na Figura 9.

**Figura 9 – Ação do ânion  $\text{Cl}^-$  presentes na mistura de água e bentonita.**



Fonte: Adaptado de ITTIPON (2011).

Segundo BAUMER (2004) Uma quantidade deficiente de água de adição na bentonita leva a perda de coesão da mesma e conseqüentemente a defeitos como os de erosão e inclusão de areia. Ao mesmo passo que uma quantidade excessiva dessa água aumenta a compactabilidade, porém leva a defeitos causados pela maior geração de gases, como bolhas.

#### 3.2.4.4 Aditivos

Outro componente que pode ser adicionado à mistura como aditivos, sendo o pó de carvão o mais utilizado nesse processo. O pó de carvão tem como função principal evitar a sinterização da areia e melhorar o acabamento superficial das peças, funções possíveis devido ao amolecimento do aditivo à  $450^\circ\text{C}$ , o que permite um rearranjo dos grãos, evitando a penetração do metal (BAUMER, 2004).

BAUMER (2004) ainda diz que outro fator gerado pelo pó de carvão que contribui para a prevenção de defeitos é a atmosfera redutora que possibilita a reação com o  $\text{O}_2$  contido na cavidade do molde (ar, poros de areia, umidade), inibindo reações oxidantes. No vazamento, o ferro líquido reage com esse  $\text{O}_2$  formando  $\text{FeO}$  que, por sua vez, reage com o  $\text{SiO}_2$  para formar um silicato de baixo ponto de fusão (fayalita), reduzindo a viscosidade, tensão superficial e gerando defeitos.

### 3.3 DEFEITOS DE MOLDAGEM

É essencial o cuidado com a qualidade dos componentes e do processo de mistura para obter uma areia verde de qualidade e eliminar chances de defeitos de moldagem, já foram citados alguns decorrentes dos componentes da mistura nos seus respectivos itens, mas é importante salientar os principais defeitos de moldagem, sendo eles (PAREDES, 2017):

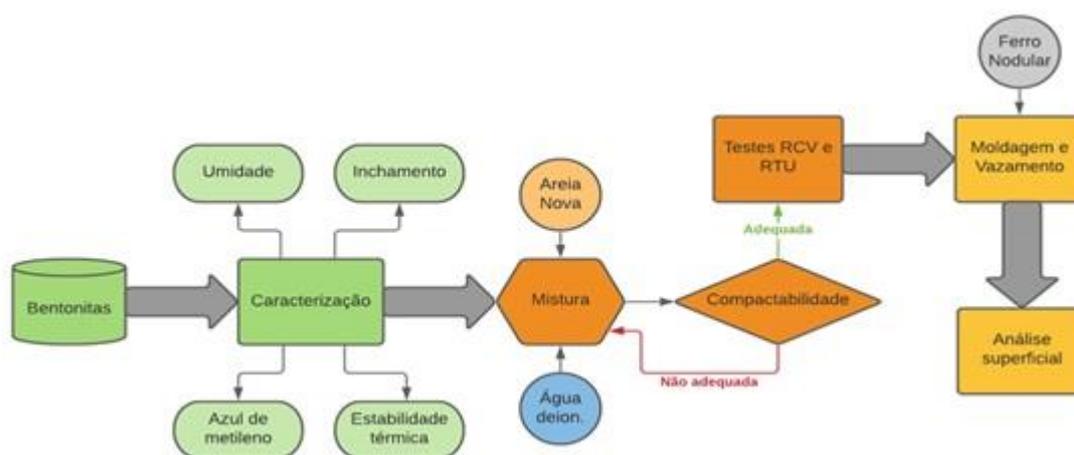
- Inclusão de areia: Pode ser causada por outros defeitos ou ainda por falta de cuidados no molde, como na parte da limpeza e fechamento do mesmo, além do cuidado com o transporte;
- Quebra de partes do molde: Normalmente tem sua causa numa baixa plasticidade da areia a verde, podendo ou não estar aliada com a mecânica do molde;
- Penetração do metal: Causado por uma falta de fluidez na mistura ou por grau de compactação inadequado;
- Superfície rugosa: Causas principalmente vinculadas com a falta de qualidade e de preparo dos componentes da mistura, como areia muito grossa, excessiva adição de água, bentonita ou aditivos;
- Erosão: Uma má compactabilidade, temperatura elevada da areia, areia muito grossa e resistência mecânica baixa do molde são possíveis causas deste defeito;
- Sinterização da areia: Normalmente ocorre devido a reações metal/molde, mas pode acontecer também por forte penetração do metal nos vazios intergranulares do molde;
- Escamas: A baixa tração a úmido é uma possível causa além de um excesso de tensões compressivas no molde;
- Inchamento da peça: Uma baixa resistência mecânica do molde somada a uma alta condensação de umidade no molde durante o vazamento.

Todos os defeitos com causas relacionadas às propriedades da areia a verde podem ser influenciados pela qualidade da bentonita.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados e as metodologias aplicadas neste trabalho. Desde os ensaios de qualificação físico e química das bentonitas utilizadas até aplicação em processo de moldagem, bem como sua influência e avaliação de possíveis defeitos gerados no produto final. Para a melhor visualização dos procedimentos utilizados a Figura 10 apresenta o fluxograma partindo da caracterização das bentonitas, passando por todas as etapas experimentais até a análise superficial após a desmoldagem. Todos os equipamentos utilizados durante este trabalho são pertencentes ao Laboratório de Fundição da UFRGS.

Figura 10 – Fluxograma das atividades.



Fonte: Autor.

### 4.1 DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA PRIMEIRA ETAPA

Na primeira etapa foram realizados ensaios de qualificação conforme as recomendações CEMP/ABIFA 2015 em cinco bentonitas conforme recebidas da Empresa X, sendo uma bentonita sódica natural, uma sódica ativada e três nacionais (identificadas como A, B e C), que devido ao local de origem podem ser classificadas também como sódicas ativadas.

#### 4.1.1 Determinação do teor de umidade

Para a caracterização das bentonitas conforme recebidas foi necessária a determinação da umidade na mesma, eliminando a água por aquecimento controlado e verificando a diferença de massa conforme recomendação da CEMP 206, os materiais utilizados para tal foram:

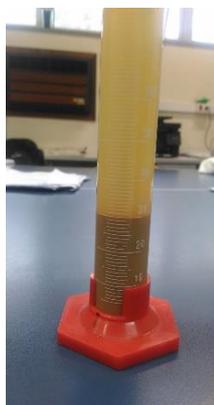
- Balança semi analítica, com resolução de 0,01g (Modelo UDI da Urano);
- Vidro de relógio para pesagem dos materiais;
- Espátula;
- Pinça tenaz;
- Estufa de laboratório para análises térmicas das bentonita;
- Dessecador.

#### 4.1.2 Determinação do inchamento

O ensaio de inchamento, visto na Figura 11, que consiste no princípio de aumento de volume pela introdução de água entre as camadas estruturais da bentonita e seu posterior afastamento, foi realizado conforme recomendação da CEMP 058, para ele, utilizou-se:

- Balança semi analítica, com resolução de 0,01g (Modelo UDI da Urano);
- Vidro de relógio;
- Espátula;
- Proveta graduada de 100ml;
- Pincel pequeno para auxiliar a transferência da amostra para a proveta;
- Água deionizada.

**Figura 11 – Inchamento da bentonita A após 24h.**



Fonte: Autor.

### 4.1.3 Teor de partículas grossas

O ensaio de partículas grossas consiste no princípio de avaliar a eficiência da moagem e preparação da bentonita para uso na fundição e foi realizado conforme a CEMP 208, utilizando os seguintes equipamentos:

- Balança semi analítica, com resolução de 0,01g (Modelo UDI da Urano);
- Vidro de relógio;
- Estufa de laboratório;
- Dessecador;
- Peneirador vibratório;
- Espátula;
- Pincel;
- Peneira malha #200 e malha #40.

### 4.1.4 Absorção de azul de metileno (A.A.M.) e índice de estabilidade térmica (I.E.T.)

A adsorção de azul de metileno em montmorilonitas ocorre primeiramente na superfície do plano basal com o envolvimento de cátions trocáveis. A interação das moléculas de água com a superfície do plano basal, com os cátions trocáveis e com o arranjo interno da montmorilonita ditam as propriedades de fundição. Então a adsorção de azul de metileno possibilita determinar a qualidade da bentonita nesse processo (OLIVEIRA, 2021). Para isso utilizou-se o método de determinação da absorção de azul de metileno, seguindo a CEMP 063.

Já para avaliar a capacidade que a bentonita possui em não sofrer alterações sensíveis de qualidade quando submetida à influência do calor proveniente do metal foi utilizado o índice de estabilidade térmica após calcinação a 550°C, conforme CEMP 078 e cuja equação é descrita como  $I.E.T. = \left(\frac{VC}{VR}\right) * 100$ , onde VC é o volume gasto de solução de azul de metileno na bentonita calcinada, em ml e VR é o volume gasto de solução de azul de metileno na bentonita em estado de recebimento, em ml.

Para esses procedimentos foram utilizados:

- Forno Mufla (da New Duty Eletric Co.) para realização da calcinação;
- Recipiente de aço inox para calcinação da bentonita;
- Dessecador;

- Balança analítica, com resolução de 0,0001g (Ohaus Adventurer, modelo ARA520);
- Bureta graduada de 50ml;
- Bastão de vidro;
- Papel de filtro faixa azul (Watmann 42);
- Copo de aço inox de 250ml para a posterior mistura para determinação da absorção de azul de metileno;
- Agitador mecânico de 1550 rpm;
- Vibrador ultra-sônico com sinal de 50 à 55 kHz;
- Chapa de aquecimento;
- Solução aquosa de pirofostato de sódio (P.A., marca Merk) a 2%;
- Solução do azul de metileno (Reagente analítico da Cinética Química), fatorada conforme a CEMP 116;

Após a calcinação da amostra a 550°C repetiram-se os testes de inchamento e azul de metileno conforme as recomendações CEMP/ABIFA.

- CEMP 058;
- CEMP 063 e CEMP 078.

## 4.2 DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA SEGUNDA ETAPA

Para realização dos ensaios de propriedades mecânicas das misturas de areia a verde, utilizaram-se os seguintes insumos: As bentonitas nacionais (A, B e C), a sódica ativada (nacional) e a sódica natural (importada) cujos teores de umidade já conhecidos, areia base de sílica com módulo 50 AFS (tamanho de grão de 280µm) e água deionizada.

### 4.2.1 Compactabilidade

Após a produção da mistura padrão, esta é peneirada e transferida, com auxílio de um funil, diretamente para um cilindro cujo topo deve estar nivelado com a superfície de areia, conjunto esse representado na Figura 12. Em seguida o cilindro com a mistura é transferido para o martetele onde serão realizados três golpes (conforme CEMP 065). A compactabilidade da mistura padrão para caracterização de bentonitas foi realizada conforme

a CEMP 068 (também aplicada para a produção da mistura padrão), onde especifica uma compactação de  $45 \pm 1\%$ .

Para a mistura padrão e o ensaio de compactabilidade utilizou-se:

- Misturador de mós, ajustado para 40rpm;
- Balança (marca Urano) com capacidade de 20 kg e uma resolução mínima de 0,1g;
- Balança semi analítica, com resolução de 0,01g (Modelo UDI da Urano);
- Cronômetro;
- Martelete mecânico e extrator de corpos de prova;
- Peneira com abertura de malha de 6,35mm;
- Espátula para nivelamento do topo do cilindro;

**Figura 12 – Conjunto necessário para realizar o CP do ensaio de compactabilidade.**



Fonte: Autor.

#### **4.2.2 Resistência à compressão a verde**

Para determinar a resistência à compressão a verde (RCV) da mistura padrão de bentonitas para fundição foi aplicada uma carga contínua e progressiva sobre a face plana de um corpo de prova (CV) padronizado até sua ruptura, conforme recomendações da CEMP 060. Além da aparelhagem necessária para o teste de compactabilidade foi também utilizada a máquina universal de resistência para areia junto ao molde cilíndrico para confeccionar o CV padrão conforme o tipo nº 1 da especificação CEMP E-10.

### 4.2.3 Resistência à tração à úmido

Já na determinação resistência à tração a úmido (RTU) foi realizado o tracionamento de uma camada de alta umidade num CV padronizado submetido a aquecimento até sua ruptura, conforme recomendações da CEMP 062. Para este ensaio foram utilizados os equipamentos do teste de compactabilidade juntamente com a máquina para ensaio de RTU e o molde cilíndrico para confeccionar o CV padrão conforme o tipo nº 6 da especificação CEMP E-10.

## 4.3 DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA TERCEIRA ETAPA

### 4.3.1 Mistura

A mistura padrão do sistema de areia foi realizada em um misturador de mós, ajustado para 40 rpm. O procedimento então teve os seguintes passos:

- Pesagem e adição de 4kg de areia base;
- Adição de 60ml de água deionizada junto à areia nova já disposta no equipamento;
- Acionamento do equipamento pelo tempo de 1min;
- Em seguida, seguindo a CEMP 068 realizou-se a pesagem e adição de bentonita cuja umidade deveria ser descontada;

Cálculo de desconto da umidade da bentonita:

$$\text{Bentonita a ser adicionada} = 200g \div [1 - (\% \text{ Umidade} \times 100)]$$

- Após 16 minutos, ou aproximadamente 700 rotações, o teor de água é corrigido de modo a obter compactabilidade de 45% ( $\pm 1$ ), seguindo orientação da CEMP 068;
- Com a obtenção da compactabilidade adequada pesou-se a quantidade de areia necessária para confecção dos corpos de prova para os testes de resistência à compressão (RCV) e resistência à tração à úmido (RTU), utilizando-se bentonitas na condição de recebimento, bem como calcinada a 550°C, conforme as recomendações CEMP/ABIFA.

### 4.3.2 Moldagem e vazamento

Com a realização dos ensaios previamente mencionados foram preparadas uma mistura de 4kg para cada bentonita, sendo elas, as bentonitas sódica ativada, sódica natural e as três bentonitas nacionais (A, B, C). Então se realizou a moldagem manual com um modelo da peça e o canal de vazamento posicionado na parte superior (tampa) da caixa de moldagem de geometria simples, e a caixa inferior (fundo) foi usada de forma preenchida (“cega”), conforme as Figuras 13 e 14.

**Figura 13 – Caixa fundo (esquerda) e caixa tampa (direita) na presença do modelo de madeira antes da etapa de moldagem.**



Fonte: Autor.

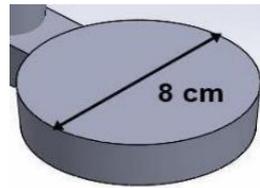
**Figura 14 – Caixa fundo “cega” (esquerda) e caixa tampa (direita) após a retirada do modelo.**



Fonte: Autor.

O vazamento do metal foi realizado em um molde contendo a cavidade do corpo de prova em disco com dimensões de 8 cm de diâmetro e 2 cm de espessura, representado na Figura 15, a fim de avaliar possíveis defeitos de moldagem, vazamento e solidificação, além do comparativo do desempenho das bentonitas no acabamento final.

**Figura 15 – Representação do corpo de prova.**



Fonte: Adaptado de PEREIRA (2018).

O ferro nodular, cuja composição é apresentada na Tabela 2, foi fundido em forno de indução (Marca Inductotherm) e vazado a aproximadamente 1400°C. Os tratamentos de nodularização e inoculação foram realizados previamente, pelo processo sanduíche em panela.

**Tabela 2 – Composição química do ferro fundido nodular (% mássica).**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
3,66	2,75	0,35	0,04	0,010
<b>Mg</b>	<b>Cr</b>	<b>Sn</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>
0,045	0,044	0,010	0,034	Bal.

Fonte: Autor

No processo sanduíche uma liga de magnésio é depositada ao fundo da panela de reação (Figura 16) e se utiliza de um divisor com o restante do raio da panela para retardar a reação, favorecendo a nodularização (ZILL, 2020).

**Figura 16 – Sistema com a panela de reação (acima) e o cadinho (abaixo) responsável pelo vazamento.**



Fonte: Autor.

Após a desmoldagem, removeu-se os canais do sistema de alimentação e a superfície foi limpa com escova de aço rotativa. Então as superfícies dos corpos de prova foram analisadas em microscópio lupa de baixa magnificação (magnificação de 12x a 50x) equipada com sistema de aquisição de imagens.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

Na tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios físicos e químicos de caracterização das bentonitas avaliadas e das duas bentonitas de uso corrente da indústria de fundição, servindo como parâmetro comparativo junto a CEMP E04, todas na condição de conforme recebidas.

**Tabela 3 – Média dos resultados dos ensaios físicos e químicos de caracterização das bentonitas conforme recebidas.**

<b>Características</b>	<b>CEMP E04</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Produção (Sódica Ativada)</b>	<b>Produção (Sódica Natural)</b>
<b>Umidade (%)</b>	9 – 13	11,0	10,5	10,4	11,3	10,1
<b>Inchamento (ml)</b>	30 mín.	30	26	26	31	32
<b>Teor de Partículas Grossas</b>	#40 (%)	0	0	0	0	0
	# 200 (%)	15 máx.	22,5	18,2	12,9	14,0
<b>A.A.M. original (ml/0,5g)</b>	45 mín.	58	48	50	56	58

Fonte: Autor

As bentonitas A, B e C analisadas apresentaram teor de umidade dentro do especificado quando comparadas à CEMP E04, e similar as bentonitas correntes de fundição.

As amostras B e C apresentam grau de inchamento insuficiente para uma boa moldagem, resultando em pouca capacidade de absorver água e, conseqüentemente, pouca aglutinação no grão de areia, o que reduz a coesão entre os grãos e a moldabilidade.

Quando avaliado os resultados dos ensaios de caracterização com o padrão de aceitabilidade de uma bentonita para uso em sistema de moldagem de uma fundição, observa-se que a amostra A apresentou propriedades físicas e químicas que a aprovam para utilização em moldagem sem prejuízo a qualidade, porém a amostra deve sofrer um melhor processo de moagem para reduzir o teor de partícula grossa, resultando assim numa maior área superficial pra envolver o grão de areia.

Todas as bentonitas analisadas apresentam índice de azul de metileno, ou seja, bentonita ativa, dentro do especificado na caracterização de bentonitas CEMP E04. É importante frisar que a adsorção de azul de metileno reflete a quantidade de montmorilonita presente em bentonitas e sistemas de areia.

Na tabela 4 são apresentados os resultados do ensaio químico de argila ativa, na caracterização das bentonitas avaliadas, todas na condição de calcinadas a 550°C para avaliar o efeito da perda de estabilidade térmica.

**Tabela 4 – Média dos resultados dos ensaios físicos e químicos de caracterização das bentonitas calcinadas a 550°C.**

<b>Características</b>	<b>CEMP E04</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Sódica ativada</b>	<b>Sódica natural</b>
<b>A.A.M. 550°C (ml/0,5g)</b>	25 mín.	31	6	16	28	35
<b>IET(%)</b>	-	53	13	32	50	60

Fonte: Autor

O I.E.T. foi calculado seguindo a CEMP 078. Quanto maior o valor do índice, mais próximo é o comportamento de uma bentonita calcinada em relação ao estado de recebimento. A bentonita da amostra A apresentou 53% de estabilidade térmica, pois o índice de demanda de azul de metileno na realização do ensaio de argila ativa mostrou-se conforme o esperado para uma bentonita de boa qualidade, bem como muito similar as bentonitas de uso corrente na indústria de fundição.

As bentonitas das amostras B e C apresentaram 13% e 32% de índice de estabilidade térmica, respectivamente, o que poderiam, durante o processo de vazamento e solidificação do metal, acarretar defeitos às peças produzidas nos moldes confeccionados utilizando-as como matéria prima.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Na tabela 5 são apresentados os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas das bentonitas avaliadas, todas na condição de conforme recebidas.

Tabela 5 – Média dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas.

Características	CEMP E04	A	B	C	Sódica ativada	Sódica Natural
<b>Compactabilidade (%)</b>	45 +/- 1	46	46	46	46	46
<b>R.C.V. (N/cm<sup>2</sup>)</b>	10 mín.	12,8	12,7	11,4	13,4	13,2
<b>R.T.U. (N/cm<sup>2</sup>)</b>	0,27 mín.	0,42	0,42	0,39	0,32	0,34

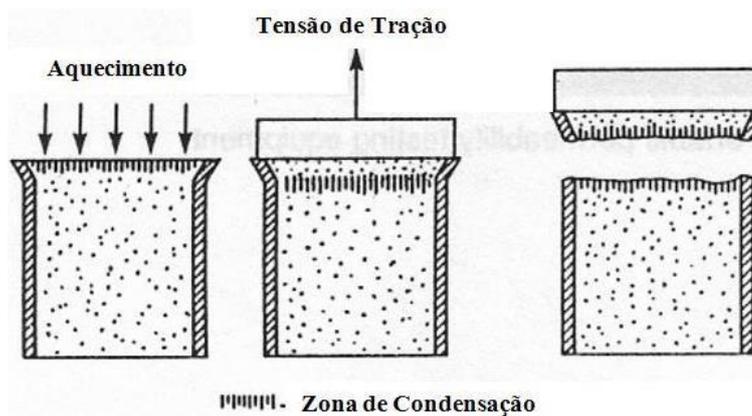
Fonte: Autor

Em todas as amostras na mistura padrão o critério de liberação para os ensaios de resistência é a compactabilidade de 46%, assim padronizando a condição de moldabilidade.

Ao analisar os resultados de resistência à compressão a verde e resistência a tração a úmido, tem-se que as amostras A, B e C atendem o especificado para uma bentonita de qualidade, com a qual é possível obter moldes com boas propriedades mecânicas e que não gerariam defeitos de fundição devido baixa capacidade de moldabilidade, bem como resistiriam a forças de tração exercidas durante o vazamento e solidificação do metal.

O RCV aumenta com a elevação do teor de argila ativa, mas algumas das argilas, após perder parte da água de cristalização durante o vazamento, geram finos inertes, reduzindo as propriedades plásticas da argila e causando perda de resistência.

Figura 17 – Esquema do processo de evaporação de água, similar ao ensaio de RTU.



Fonte: BAUMER (2004)

No ensaio de RTU, uma casca de areia seca (0,25 – 0,30mm) é separada do resto da areia na zona de condensação, representada na Figura 17, devido à expansão dos grãos de areia de sílica pelo calor e estrutura de areia enfraquecida na camada entre a areia úmida (condensada) e a areia seca. Quanto maior a argila ativa, especialmente bentonita sódica, que há na areia, maior será a camada de areia úmida e mais plástica a camada de areia seca.

Entretanto, quando da presença de muita argila inerte (finos inativos) na areia de moldagem, uma comparação entre RCV e RTU mostrará que enquanto a RCV se mantém constante, a RTU pode cair consideravelmente.

Na tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas das bentonitas avaliadas, todas na condição de calcinadas a 550°C para avaliar o efeito da instabilidade térmica.

**Tabela 6 – Média dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas com as bentonitas calcinadas a 550°C**

<b>Características</b>	<b>CEMP E04</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Sódica ativada</b>	<b>Sódica Natural</b>
<b>Compactabilidade (%)</b>	-	48	46,5	46	48	48
<b>R.C.V. (N/cm<sup>2</sup>)</b>	10 mín	14,0	9,1	8,9	12,4	12,9
<b>R.T.U. (N/cm<sup>2</sup>)</b>	0,27 mín.	0,32	0,10	0,10	0,34	0,35

Fonte: Autor

A bentonita A apresentou valores satisfatórios de resistência à compressão a verde (RCV) e à tração a úmido (RTU), ao comparar com o especificado na CEMP E04, após ter sido submetida à calcinação a 550°C. As bentonitas B e C apresentaram resultado não conforme. Nesse caso, pode acarretar em moldes que não suportariam os esforços de moldagem e/ou esforços de vazamento e solidificação, desta forma provocando defeitos de fundição nas peças.

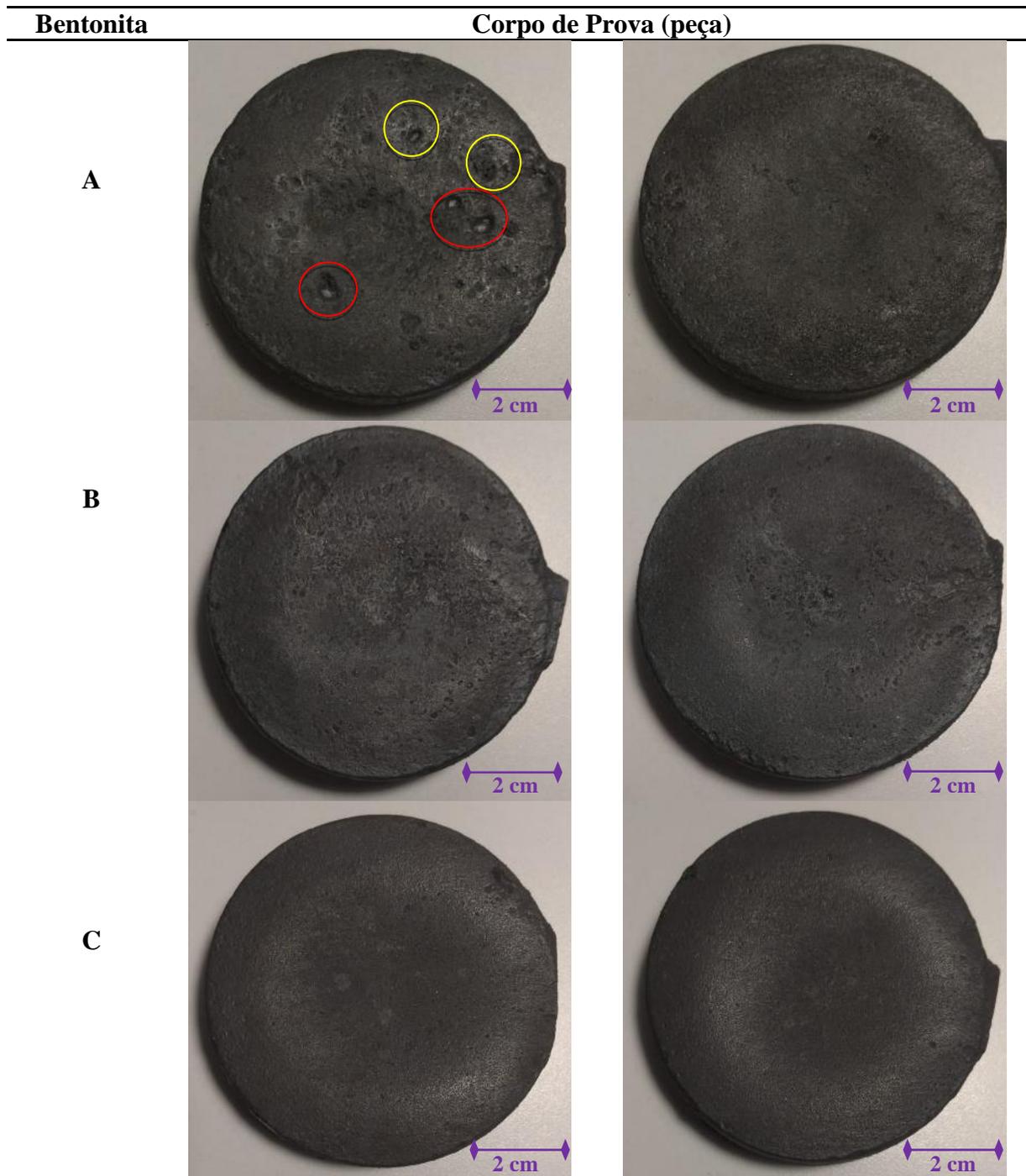
Quando comparadas com os resultados das bentonitas sódica natural e sódica ativada a bentonita A apresentou resultados similares, e as bentonitas B e C apresentaram resultados inferiores na resistência a compressão e 0,1 N/cm<sup>2</sup> para resistência a tração devido à perda quase que total da estabilidade térmica.

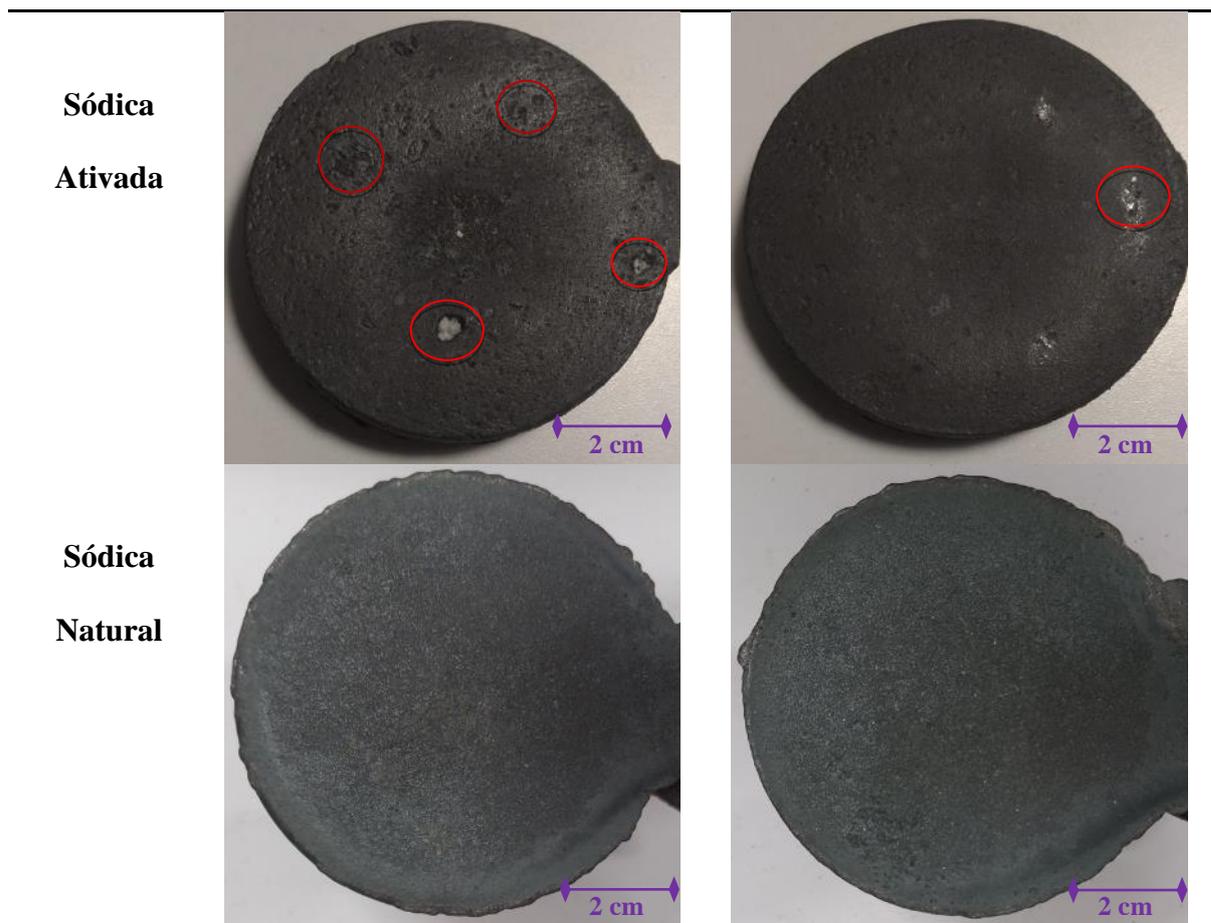
### 5.3 DESEMPENHO PRÁTICO

Preparou-se cinco misturas padrão de moldagem, uma para cada uma delas, sendo: bentonitas A, B, C e as bentonitas sódica natural e sódica ativada, onde se comparou os defeitos gerados na peça, representada por um modelo padrão como mostra a figura 15, após a desmoldagem.

Na Figura 18 apresentam-se os corpos de prova fundidos para avaliar possíveis defeitos de moldagem decorrentes das bentonitas.

Figura 18 – Imagem da face superior dos corpos de provas vazados em ferro fundido, sendo dois Cp's para cada mistura, com a presença de defeitos de inclusão de areia (amarelo) e inclusão de escória (vermelho).





Os corpos de prova produzidos com as bentonitas B e C não apresentaram nenhum defeito relativo à moldagem ou à bentonita usada em sua mistura padrão. Com relação ao acabamento superficial, a bentonita C apresentou melhor resultado entre as três nacionais caracterizadas, isto se deve, possivelmente por apresentar partículas mais finas, que envolvem os grãos de areia com mais eficiência e geram uma melhor coesão. Enquanto as bentonitas A e B apresentaram um aumento da rugosidade.

O primeiro corpo de prova da bentonita A apresentou inclusão de escória (destacados em vermelho) e inclusão de areia (em amarelo) enquanto os corpos de prova da bentonita sódica ativada apresentaram inclusão de escória (destacados em vermelho) conforme a Figura 18, oriundos do não uso de filtro durante o vazamento, bem como a ineficiência na limpeza do escorificante. Portanto, defeitos não atribuídos a bentonita no processo de moldagem.

## 6 CONCLUSÕES

Conforme a caracterização das bentonitas nacionais A, B e C e em comparação com as bentonitas sódica ativada e sódica natural e a recomendação CEMP E-04, pode-se concluir que, na caracterização física e química:

- O teor de umidade e o valor de adsorção de azul de metileno, para todas as bentonitas manteve-se dentro do especificado;
- A bentonita A, conforme o recebimento, apresentou teor de partículas grossas na malha #200 de 22,5%, muito elevado para o critério de aceitabilidade. Enquanto a bentonita B, apresentou o teor de 18,5% na mesma malha, mas ainda assim, fora do valor especificado;
- As bentonitas B e C, conforme o recebimento, apresentaram grau de inchamento não aceitável;
- Após calcinadas à 550°C, a bentonita A apresentou valor conforme o especificado e as bentonitas B e C apresentaram índice de azul de metileno não aceitável. Com relação ao índice de estabilidade térmica apenas a bentonita A, dentre as três bentonitas n, atingiu o valor adequado para o processo de moldagem em areia verde.

Quando comparadas as amostras avaliadas com os resultados das bentonitas sódica natural e sódica ativada, que são amplamente utilizadas pela indústria de fundição, nota-se uma similaridade dos resultados da amostra A com estas bentonitas.

Na caracterização das propriedades mecânicas:

- As bentonitas A, B e C apresentaram propriedades mecânicas de resistências compressão a verde e tração à úmido conforme o especificado;
- Após calcinadas à 550°C, a bentonita A apresentou propriedades de resistência a compressão a verde e a tração à úmido aceitáveis para a moldagem, já as bentonitas B e C apresentaram resultados inadequados.

No desempenho prático:

- Apenas a bentonita A apresentou defeitos de inclusão de areia, cuja causa pode estar ligada com o alto valor no ensaio de teor de partículas grossas devido a uma menor moagem da matéria prima. Essas partículas grosseiras prejudicam a coesão dos grãos;

- O primeiro corpo de prova da bentonita A e os corpos de prova da bentonita sódica ativada apresentaram defeitos oriundos do não uso de filtro durante o vazamento, bem como a ineficiência na limpeza do escorificante.

Portanto conclui-se que nenhuma das bentonitas nacionais (sódicas ativadas) estão aptas para aplicação em processos de moldagem de areia a verde. A bentonita A necessitaria um melhor beneficiamento, ou seja, moagem, para sua aplicabilidade. Enquanto as bentonitas B e C não apresentaram características físicas, químicas e propriedades mecânicas para serem usadas em processo de moldagem de fundição.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

Avaliar o comportamento destas bentonitas em moldagem e fusão de peças de maior complexidade para determinar a repetibilidade nas extrações do modelo bem como na geração de defeitos de solidificação.

Avaliar as bentonitas em questão numa gama maior de ensaios físico-químicos para caracterização e avaliação de seu desempenho, assim como utilizar um número maior de corpos de prova a fim de eliminar problemas e defeitos decorrentes com causas que não a moldagem e a qualidade da bentonita.

Determinar uma aplicabilidade para as bentonitas não aprovadas para o uso em fundição.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIFA. **ABIFA** – Associação Brasileira de Fundição. Área Técnica: Recomendações CEMP. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/recomendacoes-cemp/>>. Acesso em: 16/11/2021.

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012. 218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

BARBOSA, R. et al. Caracterizações de argilas bentoníticas e síntese de argilas organofílicas para uso em nanocompósitos poliméricos: Parte II. **Cerâmica**, v. 58, p. 495-499, 2012.

BAUMER, B. **Influência do teor de finos nas propriedades tecnológicas da areia a verde**. Instituto Superior Tupy. 2004. 45f. Projeto Final de Tecnologia em Materiais. Instituto Superior Tupy, Joinville, 2004.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 2008. 131f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CASOTTI, Bruna Pretti *et al.* Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, n. 33, mar. 2011, p. 121-162, 2011.

CEMP 058. **Bentonita para fundição – Determinação do Inchamento**. ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/058.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 060. **Bentonita para fundição – Determinação da resistência à compressão a verde da mistura padrão**. ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/060.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 062. **Bentonita para fundição – Determinação da resistência à tração a úmido da mistura padrão**. ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/062.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 063. **Bentonita para fundição – Determinação da adsorção de azul de metileno pelo método do pirofosfato de sódio**. ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/063.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 065. **Bentonita para fundição – Determinação da compactabilidade da mistura padrão.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/065.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 068. **Bentonita para fundição – Preparação da mistura padrão.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/068.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 078. **Bentonita para fundição – Determinação da adsorção de azul de metileno e do índice de estabilidade térmica após calcinação a 550°C.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/078.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 116. **Materiais para fundição – Determinação do fator da solução de azul de metileno por titulação com solução de cloreto titanoso (TiCl<sub>3</sub>).** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/116.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 206. **Bentonita para fundição – Determinação do teor de umidade.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/206.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP 208. **Bentonita para fundição – Determinação do teor de partículas grossas.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/208.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP E-04. **Bentonita para fundição.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/E04.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

CEMP E-10. **Corpos de prova – Formas e tipos de ensaios.** ABIFA, Recomendações CEMP, 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/E10.pdf>>. Acesso em: 21/11/2021.

FILHO, P. J. C. M.; ALMAS, C. D. **Fundição em areia a verde: Uma abordagem experimental.** 2016. 60f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

GFQSI - Grupo de físico-química de sólidos e interfaces. **UFJF.** Linhas de pesquisa: Esmeclitas. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/gfqsi/linhas-de-pesquisa/materiais-lamelares/montmorillonitas/>> UFJF. Acesso em: 25/10/2021.

GIULIANO, J. A. S. **Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal.** 2008. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas,

Metalúrgica e de Materiais - PPGEM) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

GUESSER, Wilson Luiz *et al.* **Uma nova bentonita de alto desempenho para uso em fundição.** *In:* Congresso Anual de Fundição, 18., 2019. São Paulo.

GUESSER, Wilson Luiz; MASIERO, I. Masiero. **Bentonitas em areias desmoldagem.** *In:* Congresso Anual de Fundição CONAF-ABIFA, São Paulo. 2003.

HERMENEGILDO, M. K. **Determinação da concentração de metais presentes em areia de fundição:** Estudo de caso da fundição Tupy S.A. 2011. 51f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

ITTIPON, U. **Technical Presentation:** Green sand Molding Management. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Tailândia. Süd-Chemie. 1 nov. 2011. Power Point. 92 slides. color. Disponível em: <[http://meteng.iust.ac.ir/files/mateng/divandari\\_3a69a/files/GREEN\\_SAND.pdf](http://meteng.iust.ac.ir/files/mateng/divandari_3a69a/files/GREEN_SAND.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2021.

MACIEL, Thiago Favoretto. **Regeneração úmida de areia de fundição:** tratamento em areias a verde. 2017. 43f. Trabalho de conclusão de curso (Título de Tecnólogo em Processos de Fabricação Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MAIS, Vanessa *et al.* Estudo da fluxibilidade em areias de moldagem a verde. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 19, p. 94-104, 2014.

MARCO - Assessoria em areia de moldagem a verde. **Areiaverde.** Matérias primas: Areia de Base, c2021. Disponível em: <<https://www.areiaverde.com/areia-de-base/>>. Acesso em: 20 de jul. de 2021.

MARTINS, Maria A. de Barros *et al.* III-020 - **Efeitos do pó de exaustão de ADF nas propriedades mecânicas do concreto convencional.** *In:* Congresso ABES - FENASAN, 2017. São Paulo.

MOREIRA, M. T. de O. T. **Contaminação ambiental associada às areias residuais de fundição.** 2004. 218f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2004.

MORO, N. **Processos de Fabricação:** Fundição. Curso técnico de mecânica industrial. Apostila de aula. CEFET-Santa Catarina, 2007.

OKIDA, José Roberto. **Estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição**. 2006. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2006.

OLIVEIRA, Bianca Baumer de. Estudo de dispersão da bentonita para a adsorção de azul de metileno. **Revista do Instituto Superior Tupy**, Joinville, n.13, nov. 2012. Disponível em: < <https://1library.org/document/zllg09rz-estudo-m%C3%A9todos-dispers%C3%A3o-bentonita-para-adsor%C3%A7%C3%A3o-azul-metileno.html> > Acesso em: 20/10/2021.

PABLOS, Javier M. **Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para aplicação no setor da construção civil**. 2008. 133f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PAREDES, Ramon Cortés. **Defeitos de fundição areia verde**. LABATS/DEMEC/UFPR. 2017. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Arquivos%20FTP%202020/Aulas%20de%20Projetos%20de%20Pe%C3%A7as%20Fundidas/Defeitos%20de%20fundi%C3%A7%C3%A3o.pdf>> Acesso em: 27 out. 2021.

PEREIRA, L. *et al.* **Avaliação da contaminação da areia verde por luva exotérmica**: Propriedades mecânica da areia e defeito superficial no ferro fundido. *In*: Congresso ABIFA de Fundição, 18. São Paulo: CONAF, 2019.

PERRONY, A. S. B.; GUESSER, W. L. **Estabilidade térmica de bentonitas utilizadas como ligante em moldes para fundição**. *In*: Congresso ABIFA de fundição, 18., 2019. São Paulo.

SILVA, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do município de Boa Vista - Estado da Paraíba**. 2011. 282f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SOARES, Glória de Almeida. **Fundição**: Mercado, Processos e Metalurgia. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000. 116 p.

ZILL, Leonardo Dal Vesco. **Otimização do processo de nodularização em ferro fundido**. 2020. 68f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2020.