



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**FRANCISCO NARAIN VIANA DE BRITO**

**PRODUÇÃO DE AÇO LIGADO AO MANGANÊS EM FORNO DE INDUÇÃO**  
**UTILIZANDO CADINHO DE ALUMINA A PARTIR DE BORRA DE**  
**ALUMÍNIO E MELAÇO DE CANA**

**FORTALEZA**

**2018**

FRANCISCO NARAIN VIANA DE BRITO

PRODUÇÃO DE AÇO LIGADO AO MANGANÊS EM FORNO DE INDUÇÃO  
UTILIZANDO CADINHO DE ALUMINA A PARTIR DE BORRA DE ALUMÍNIO E  
MELAÇO DE CANA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B875p Brito, Francisco Narain Viana de.  
Produção de aço ligado ao manganês em forno de indução utilizando cadinho de alumina a partir de borra de alumínio e melaço de cana / Francisco Narain Viana de Brito. – 2018.  
40 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

1. Borra de alumínio. 2. Refratário. 3. Melaço de cana. I. Título.

CDD 669

---

FRANCISCO NARAIN VIANA DE BRITO

PRODUÇÃO DE AÇO LIGADO AO MANGANÊS EM FORNO DE INDUÇÃO  
UTILIZANDO CADINHO DE ALUMINA A PARTIR DE BORRA DE ALUMÍNIO E  
MELAÇO DE CANA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A meus pais, Eduardo e Francisca.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida e por ter guiado, protegido, iluminado e dado força para que eu conseguisse vencer cada passo dessa jornada.

A minha família, por ter me dado todo o suporte necessário para que eu pudesse ter chegado até aqui.

Aos meus amigos de universidade e intercâmbio, pelos estresses, alegrias, viagens e conhecimentos compartilhados.

A todos os professores responsáveis pela minha formação estudantil.

Ao professor Jeferson Klug pela orientação acadêmica e por todo o suporte dado e aos professores Hamilton Gomes e Ricardo Emílio pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFC.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, ria, dance, chore e viva intensamente cada momento de sua vida, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

## **RESUMO**

Na produção do alumínio é gerado um resíduo chamado borra de alumínio, que apresenta grande potencial como matéria prima na fabricação de refratários. Nesse trabalho busca-se produzir cadinhos refratários, a partir da borra de alumínio e melaço de cana, para produção de aço ligado ao manganês em fornos de indução, com o intuito de obter uma solução mais econômica e mais fácil em relação às existentes no mercado. Os cadinhos, para serem usados no forno de indução, devem apresentar uma elevada resistência ao choque térmico, boa resistência mecânica e boa resistência à abrasão devido às características impostas pelo forno. Foram obtidos cadinhos a partir de uma mistura de borra de alumínio, mulita e melaço de cana. Os cadinhos produzidos foram testados fundindo esferas de aço e adicionando carbono puro e manganês puro. Concluiu-se que os cadinhos produzidos apresentam propriedades adequadas para a utilização no forno de indução, pois foi possível a fusão e manutenção do aço em estado líquido por tempo suficiente para que houvesse adição de elementos de liga, como o manganês.

**Palavras-chave:** Borra de Alumínio; Refratário; Forno de Indução.



## **ABSTRACT**

In the production of aluminum a waste called aluminum dross is generated, which presents great potential as raw material for the manufacture of refractories. This work seeks to produce refractory crucibles, from the aluminum dross and sugar cane molasses, for the production of manganese steel in induction furnace. The crucibles, for use in the induction furnace, must exhibit high resistance to thermal shock, good mechanical resistance and good resistance to wear under the conditions imposed for furnace. Crucibles were obtained from a mixture of aluminum dross, mullite and molasse. The crucibles produced were tested by melting steel balls and adding pure carbon and pure manganese. It was concluded that the crucibles produced have suitable properties for use in the induction furnace, because it was possible to melt and maintain the steel in a liquid state long enough for addition of alloying elements.

**Keywords:** Aluminum dross; Refractory; Induction Furnace.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Melaço de cana .....	24
Figura 2	- Conjunto molde e macho .....	28
Figura 3	- Borra de alumínio no forno mufla para tratamento de Calcinação .....	31
Figura 4	- Prensa manual do laboratório Mossbauer .....	32
Figura 5	- Perfil térmico do forno de indução .....	33
Figura 6	- Grau de sinterização da $Al_2O_3$ por pressão aplicada .....	33
Figura 7	- Cadinho após tratamento térmico .....	34
Figura 8	- Cadinho + aço fundido resfriado .....	37
Figura 9	- Esferas de aço após a espectrometria de emissão ótica .....	37
Figura 10	- Aço fundido após o lixamento .....	38
Figura 11	- Processo de fundição do aço no forno de indução .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição química dos tipos de borras de alumínio .....	21
Tabela 2	– Composição média do melaço de cana .....	25
Tabela 3	– Análise química por fluorescência de raios X das matérias primas .....	27
Tabela 4	– Composição química do aço feita por espectrometria de emissão ótica antes da adição de grafita .....	36
Tabela 5	– Composição química do aço feita por espectrometria de emissão ótica antes da adição de grafita .....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EDX	Energy Dispersive X-ray
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

- ° Graus
- % Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos gerais .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Reciclagem dos resíduos sólidos .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Classificação dos resíduos sólidos .....</b>	<b>19</b>
3.2.1	<i>Resíduos classe I – perigosos .....</i>	20
3.2.2	<i>Resíduos classe II – não inertes .....</i>	20
3.2.3	<i>Resíduos classe III – inertes .....</i>	20
<b>3.3</b>	<b>Borra de alumínio .....</b>	<b>21</b>
3.3.1	<i>Compostos presentes na borra de alumínio .....</i>	22
3.3.1.1	<i>Alumínio metálico .....</i>	22
3.3.1.2	<i>Alumina .....</i>	22
3.3.1.3	<i>Sílica .....</i>	23
3.3.1.4	<i>Nitreto de alumínio .....</i>	23
<b>3.4</b>	<b>Melaço de cana .....</b>	<b>24</b>
<b>3.5</b>	<b>Mulita .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Procedimentos .....</b>	<b>28</b>
4.2.1	<i>Determinação do processo de inertização da borra de alumínio .....</i>	28
4.2.1.1	<i>Calcinação .....</i>	28
4.2.1.2	<i>Encharque .....</i>	29
4.2.2	<i>Mistura e homogeneização .....</i>	29
4.2.3	<i>Ligante utilizado .....</i>	29
4.2.4	<i>Moldagem e prensagem .....</i>	29
4.2.5	<i>Tratamento térmico .....</i>	30
4.2.6	<i>Sinterização .....</i>	30
4.2.7	<i>Aplicação .....</i>	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>

<b>5.1</b>	<b>Processo de inertização da borra de alumínio .....</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>Ligante utilizado .....</b>	<b>32</b>
<b>5.3</b>	<b>Moldagem e prensagem .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4</b>	<b>Sinterização .....</b>	<b>33</b>
<b>5.5</b>	<b>Aplicação .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de produção de alumínio produz um resíduo, a borra de alumínio, que apresenta uma grande quantidade de óxidos de elevado ponto de fusão, que faz com que ela se torne uma fonte de grande potencial para a fabricação de produtos refratários.

A borra branca é o principal resíduo gerado pelos processos que envolvem alumínio fundido, ela pode conter até 75% de alumínio metálico livre em forma de gotículas muito pequenas aprisionadas entre as partículas de óxidos de alumínio. Se o alumínio for fundido a partir de sucata, a borra pode conter também chumbo, cádmio e cromo (TOTTON, 2003).

O alumínio da borra branca é recuperado em fornos com a adição de sais para aumentar a eficiência de recuperação. Após esse processo é formada uma nova borra que apresenta pouco alumínio metálico e que contem sais e contaminantes, chamada de borra preta (TOTTON, 2003).

Utilizou-se a borra como principal componente para a fabricação de cadinhos refratários que suportassem a fusão de aço em fornos de indução, objetivando buscar alternativas mais baratas do que as existentes no mercado.

O cadinho para fusão de aço em um forno de indução deve possuir certas características especiais, devido aos elevados gradientes térmicos presentes neste tipo de forno, onde o aço rapidamente é aquecido até sua completa fusão. O cadinho deve apresentar uma elevada resistência ao choque térmico. Além disso, o cadinho não deve apresentar carbono em sua constituição, já que ele é facilmente incorporado ao aço líquido, mudando sua composição. E ainda, o cadinho deve possuir resistência mecânica e à abrasão adequadas em contato com o banho líquido turbulento. (UCHOA, 2016)

Com o intuito da produção de cadinhos que atendam às necessidades requeridas para a aplicação foi escolhida uma mistura de borra de alumínio com mulita, na proporção em peso de 7:3, respectivamente, que é citada na patente NOGUEIRA et al. (2014).



No presente trabalho foi criado um novo processo de fabricação de cadinhos utilizando um método de preparação da borra (calcinação), um tipo de ligante (melaço de cana) e a temperatura de pré-sinterização de 900 °C.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

- Produzir cadinho de alumina a partir de borra de alumínio e melaço de cana e aplicar na produção de aço ligado ao Mn em forno de indução.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Criar uma nova metodologia de produção de cadinhos de alumina a partir de borra de alumínio e melaço de cana.
- Produzir aço ligado ao manganês, a partir de manganês eletrolítico (Mn puro), grafite (C puro) e aço.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Reciclagem dos resíduos industriais**

A reciclagem é um processo de transformação de materiais previamente separados para posterior utilização, envolvendo economia de energia, no qual o resíduo que seria jogado fora é usado novamente como matéria prima.

Um dos grandes desafios do século XXI é a eliminação de resíduos industriais provenientes das empresas mineradoras. Pesquisas sobre reciclagem de resíduos vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo. As razões que motivam esses países em geral são: esgotamento das matérias-primas não renováveis, redução do consumo de energia, menores emissões de poluentes, redução de custos, melhoria da saúde e segurança da população.

A reciclagem do alumínio é uma importante atividade industrial responsável pelo suprimento de cerca de 30% do alumínio comercializado no Brasil atualmente.

Os resíduos industriais são geralmente dispostos em locais distantes da área industrial, não havendo preocupação por parte dos geradores quanto a adequabilidade do seu destino final. Dessa forma, os resíduos são recuperados através de uma série de operações, permitindo que materiais já processados sejam aproveitados como matéria prima no processo gerador ou em outros processos.

#### **3.2 Classificação dos resíduos sólidos**

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, através da NBR 10.004:2004 define que os resíduos são “resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Entretanto, os resíduos sólidos podem ser classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, excluindo-se desta norma os resíduos radioativos.

Os riscos potenciais ao meio ambiente dividem-se em:

#### *3.2.1 Resíduos Classe I – Perigosos:*

Resíduos que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública ou efeitos adversos ao meio ambiente. São exemplos de lixo classe I, as baterias e produtos químicos que geram um forte impacto sobre o meio ambiente;

#### *3.2.2 Resíduos Classe II – Não Inertes:*

Resíduos que não se enquadram na Classe I – perigosos ou Classe III – inertes. Podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;

#### *3.2.3 Resíduos Classe III – Inertes:*

Resíduos que não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas significativas a ponto de acarretar risco à saúde e ao meio ambiente (restos de construção, vidros, certos plásticos e borrachas de difícil decomposição).

A borra de alumínio é um resíduo industrial de classe I, pois os efeitos do alumínio no organismo humano vão desde anemia por deficiência de ferro a intoxicação crônica (AMBIENTE BRASIL, 2010). Segundo a norma NBR 10.004/2004, os materiais classificados neste grupo devem ser tratados adequadamente e destinados em locais próprios. Para o recebimento deste tipo de resíduo, os aterros industriais devem conter mantas impermeáveis e camadas a fim de proteger o solo e a água da contaminação.

### 3.3 Borra de Alumínio

A borra de alumínio é a escória formada na produção do alumínio e pode ser classificada em três tipos: borra branca, borra preta e borra salina. E apresentam composição conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos tipos de borras de alumínio

Tipo de Borra	% de Alumínio	% de Óxidos	% de Sais
Borra Branca	25 – 80	20 – 85	0 – 1
Borra Preta	7 – 50	30 – 50	30 – 50
Borra Salina	3 – 10	20 – 60	20 – 80

Fonte: Guidelines and Definitions. By-Products of Aluminum melting process.

A borra branca é formada por óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e alumínio metálico, cujo teor pode variar de 25 a 80%. Esse resíduo é gerado na produção de alumínio primário, produção de alumínio a partir do minério, e apresenta uma elevada pureza, apresentando coloração cinza ou branca.

A borra preta é formada por óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e alumínio metálico, cujo teor pode variar de 7 a 50%, e uma mistura de sais, com teor variando de 30 a 50%. Esse resíduo é gerado na produção de alumínio a partir da borra branca, em fornos que utilizam uma pequena quantidade de sais com o objetivo de proteger o banho, atuar como fundente e retirar impurezas.

A borra salina é composta por óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e alumínio metálico, cujo teor pode variar de 3 a 10%, e uma mistura de sais, com teor variando de 20 a 80%. Esse resíduo é gerado na produção de alumínio a partir da borra preta, em fornos que utilizam grandes quantidades de sais como camada protetora e fundentes.

Devido à grande quantidade de óxido de alumínio, que apresenta um elevado ponto de fusão, além de alguns compostos que atuam como fundentes, esses resíduos apresentam grande potencial para serem aplicados na produção de refratários.

### ***3.3.1 Compostos presentes na borra de alumínio***

A borra de alumínio apresenta em sua composição vários compostos, alguns que conferem importância à utilização desse resíduo e outros que conferem dificuldade à sua utilização.

#### ***3.3.1.1 Alumínio Metálico***

Metal descoberto em 1809, porém foi isolado pela primeira vez em 1825, e apenas em 1886 foi desenvolvido um processo industrial econômico, o processo Hall-Héroult foi desenvolvido e é, até hoje, o único processo utilizado para a produção de alumínio a partir do óxido de alumínio, alumina. O alumínio é um elemento abundante, principalmente encontrado na forma de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Seu principal minério é a bauxita, a qual apresenta uma reserva mundial na casa dos 25 bilhões de toneladas. O Brasil apresenta uma reserva expressiva deste elemento, na casa das 700 milhões de toneladas, sendo o sexto maior em reservas. Além de uma expressiva reserva, o Brasil também é um dos principais produtores de minério de alumínio, bauxita (DNPM, 2013).

#### ***3.3.1.2 Alumina***

A alumina é um composto presente em grandes quantidades na borra de alumínio, é resultado da oxidação do alumínio metálico, apresenta em sua composição 52,9% de alumínio e 47,1% de oxigênio. Sua principal forma cristalina é conhecida como coríndon, é um material isolante elétrico, mas apresenta uma condutividade térmica relativamente alta em comparação com a maioria dos materiais cerâmicos, possui uma elevada dureza, alta temperatura de fusão e é aplicada desde material abrasivo a matéria prima para fabricação de revestimentos de fornos.

### *3.3.1.3 Sílica*

É um composto que apresenta formula molecular  $\text{SiO}_2$ . O mineral formado por esse composto é o mais abundante na terra, o quartzo. Esse composto apresenta elevada temperatura de fusão, na casa de  $1700^\circ\text{C}$ , e uma grande capacidade suportar cargas em elevadas temperaturas. Essas características o tornam um composto de grande importância para a indústria de refratários.

### *3.3.1.4 Nitreto de alumínio*

O nitreto de alumínio,  $\text{AlN}$ , apresenta uma estrutura hexagonal compacta, apresenta uma alta dureza, uma alta temperatura de fusão, aproximadamente  $2200^\circ\text{C}$ , junto com boa resistência mecânica e estabilidade estrutural em altas temperaturas. Apresenta também uma alta condutividade térmica e uma alta resistividade elétrica, o que promovem ao nitreto de alumínio um grande potencial para uso em aplicações de microeletrônica e energia, como um material semicondutor ou dissipador de calor.

Na borra de alumínio esse composto é responsável pela formação de amônia,  $\text{NH}_3$ , quando em contado com água,  $\text{H}_2\text{O}$  (Sigiliano, 2013).

### 3.4 Melaço de cana

O melaço de cana é considerado um subproduto da etapa de centrifugação no processo de fabricação de açúcar, trata-se de um líquido viscoso, de cor escura, não cristalizável (Figura 1).

Figura 1- Melaço de cana



Fonte: Usina Mendonça (2016).

A composição do melaço de cana-de-açúcar é muito variável, pois depende de fatores agrícolas e industriais. Os principais componentes do melaço são a água, carboidratos, compostos de origem orgânica como os aminoácidos, ácidos carboxílicos, proteínas, vitaminas, fenóis e outros (Woiciechowski et al., 2013). De acordo com Olbrich (1963), o melaço possui composição média de 20% de água, 62% de açúcar, 10% de material nitrogenado e 8% de constituintes inorgânicos (Tabela 2).



Tabela 2 - Composição média do melaço de cana.

Constituintes	(%)
<b>Água</b>	20,0
<b>Constituintes orgânicos</b>	
<i>Açúcares: Sacarose</i>	32,0
<i>Glicose</i>	14,0
<i>Frutose</i>	16,0
<i>Materiais nitrogenados, ácidos livres e ligados, substâncias solúveis</i>	10,0
<b>Constituintes inorgânicos</b>	
<i>SiO<sub>2</sub></i>	0,5
<i>K<sub>2</sub>O</i>	3,5
<i>CaO</i>	1,5
<i>MgO</i>	0,1
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,2
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0,2
<i>Resíduos de sulfato</i>	1,6
<i>Cloretos</i>	0,4

Fonte: Olbrich (1963).

### 3.5 Mulita

A mulita é um aluminossilicato ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), correspondendo a 71,6% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 28,4% de  $\text{SiO}_2$  (SCHACHT, 2004). Portanto, é obtida artificialmente a partir de seus constituintes sílica e alumina, argila e alumina, etc; seja por fusão da mistura em forno elétrico (mulita eletrofundida), seja pela reação em estado sólido (sinterização) (CRUZ, 1979).

A mulita é excelente material refratário apresentando propriedades como baixo coeficiente de expansão térmica ( $5,62 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  na faixa de temperatura entre 25 e  $1500^\circ\text{C}$ ), baixa condutividade térmica ( $0,0093 \text{ cal/s/cm}^2/\text{C/cm}$  a  $1400^\circ\text{C}$ ), baixa reatividade química, resistência a altas temperaturas e a compressão mecânica, alta dureza e tenacidade (KIM et al, 2003); (KANSAL et al, 1997). Seu modo de cristalização permite que seja formada uma massa de grãos interligados, produz um forte corpo cerâmico com boas resistências à fluência, além de se manter estável até  $1850^\circ\text{C}$  (SCHACHT, 2004).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizadas como matérias primas a borra de alumínio e mulita eletrofundida, cujas composições químicas estão apresentadas na Tabela 3, misturadas em uma proporção estabelecida de 70% borra de alumínio e 30% mulita.

Tabela 3 - Análise química por fluorescência de raios X das matérias primas.

<i>(% em peso)</i>	<i>Borra</i>	<i>Mulita</i>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	79,62	65,36
<b>SiO<sub>2</sub></b>	6,60	33,34
<b>MgO</b>	1,64	-
<b>Cl</b>	4,11	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,79	-
<b>CaO</b>	2,46	0,72
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2,04	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,28	0,39
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,11	-
<b>CuO</b>	1,13	-
<b>ZnO</b>	1,18	-
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,04	0,09
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,3282	-

Fonte: MOTA, R.C.

Como ligante foi utilizado melaço de cana, e para a prensagem foi desenvolvido um molde de aço constituído de duas partes, molde e macho, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Conjunto molde e macho.



Fonte: UCHOA, 2016

## 4.2 Procedimentos

### *4.2.1 Determinação do processo de inertização da borra de alumínio*

A borra de alumínio é classificada como um resíduo perigoso e havia a necessidade de determinar um processo de inertização eficiente da mesma. Dois processos foram utilizados para esta finalidade: o de calcinação e o de encharque com água.

#### *4.2.1.1 Calcinação*

Consiste em levar a borra de alumínio ao forno mufla para um tratamento térmico a 600°C por um período de 1 hora, para que ocorra a eliminação de materiais voláteis e impurezas de baixo ponto de fusão, porém o principal objetivo é promover a reação de AlN presente na borra, com a umidade, presente no ar, para que haja a formação e eliminação de NH<sub>3</sub> para a atmosfera.

#### ***4.2.1.2 Encharque***

Consiste em colocar a borra em um reservatório e encharcar a mesma com água, em seguida misturar para que toda a borra entre em contato com a água, deixando a mistura descansar por algumas horas, tendo como objetivo a eliminação de  $\text{NH}_3$ .

#### ***4.2.2 Mistura e homogeneização***

Consiste na mistura de borra de alumínio tratada com mulita, proporção mássica de 70% de borra de alumínio tratada e 30% de mulita. Essa mistura é no moinho de bolas, sem as bolas, durante aproximadamente 20 minutos, com a finalidade de promover uma homogeneização da mistura, a fim de evitar heterogeneidades nas propriedades das peças produzidas.

#### ***4.2.3 Ligante utilizado***

Após a homogeneização da mistura, é necessária a adição de um material ligante para promover uma melhor união das partículas, favorecendo assim a sinterização e o manuseio.

Neste trabalho foi utilizado o melaço de cana. A proporção em massa de melaço utilizada foi de aproximadamente 25%.

#### ***4.2.4 Moldagem e Prensagem***

Após a mistura ser feita num determinado recipiente, fez-se a moldagem seguida de uma prensagem uniaxial. Devido à geometria do molde e da fluidez da mistura, foi necessário pré-moldar manualmente a mistura no molde. Em seguida, o conjunto molde e mistura foi levado para ser submetido a uma prensagem uniaxial, variando a pressão máxima, a fim de determinar o efeito da pressão aplicada sobre as características mecânicas da peça, tendo como força utilizada de aproximadamente 100 KN, utilizando uma máquina de prensagem manual.

#### ***4.2.5 Tratamento térmico***

Após a prensagem foi necessária aplicar um tratamento térmico, na estufa a 200°C por 2 horas, no conjunto molde e mistura, para que ocorra a pirólise da sacarose presente no melaço, com isso promovendo um aumento na resistência mecânica da peça, tornando possível sua desmoldagem. A Figura 3 mostra um cadinho verde produzido utilizando melaço de cana como material ligante.

#### ***4.2.6 Sinterização***

Após a desmoldagem, a peça produzida foi levada a um forno mufla e aquecida a uma temperatura de aproximadamente 900°C.

#### ***4.2.7 Aplicação***

A aplicação foi realizada fundindo-se uma esfera de aço. A composição química da esfera foi feita por espectrometria de emissão ótica. A esfera foi pesada e através do seu peso, calculou-se a quantidade de grafita e manganês que seria adicionada durante o processo de fundição.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no desenvolvimento do processo de produção de um cadinho feito a partir da borra de alumínio, mulita e melaço de cana.

### 5.1 Processo de inertização da borra de alumínio

Foram utilizados dois processos para a inertização da borra de alumínio. O primeiro processo foi o encharque com água. Este mostrou-se menos eficiente, pois verificou-se, depois de algumas horas, que o  $\text{NH}_3$  ainda continuava presente na borra de alumínio, apesar de que observou-se a liberação parcial da mesma neste processo, devido ao forte cheiro existente no local.

O segundo processo utilizado, a calcinação, mostrou-se mais eficiente. Como já era esperado, o aquecimento da borra a  $600\text{ }^\circ\text{C}$  durante um período de 2 horas, eliminou grande parte do  $\text{NH}_3$  existente na mesma. Grande parte, pois não foi feita uma análise mais detalhada pra verificar se ainda havia algum teor de  $\text{NH}_3$  presente na borra. Observou-se a ausência do cheiro forte de  $\text{NH}_3$  na borra após este processo.

Figura 3 - Borra de alumínio no forno mufla para tratamento de calcinação.



Fonte: UCHOA, 2016

## 5.2 Material ligante utilizado

O melaço de cana foi o material ligante utilizado na fabricação do cadinho. O mesmo mostrou-se eficiente na finalidade desejada. Houve uma ótima consistência da mistura, porém percebeu-se que havia a necessidade de um tratamento térmico após a etapa de prensagem, com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do cadinho.

## 5.2 Moldagem e prensagem

Após a mistura com o ligante escolhido, foi feita uma moldagem manual da mesma antes da prensagem. Na etapa de prensagem, utilizou-se uma prensa manual, diferentemente de outras fabricações já efetuadas anteriormente. A prensa, de fácil manuseio, foi fornecida pelo laboratório Mossbauer.

O desejo era obter a maior pressão possível, pois era sabido que a mesma exercia grande influência na qualidade do cadinho. Depois de várias tentativas, conseguiu-se atingir uma força de aproximadamente 100 KN. Após a aplicação da mesma, esperou-se um intervalo de tempo de 30 minutos. Após este intervalo, retirou-se o conjunto (mistura + molde) da prensa para efetuar a etapa de tratamento térmico.

Figura 4 - Prensa manual do laboratório Mossbauer



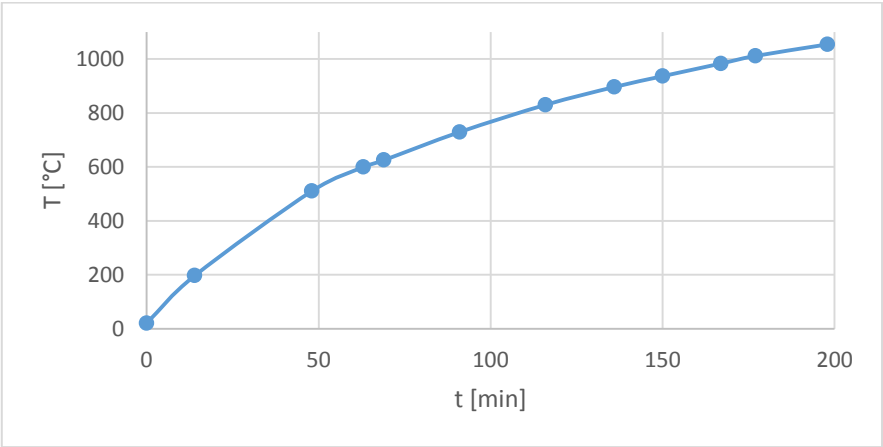
Fonte: elaborada pelo autor



### 5.3 Sinterização

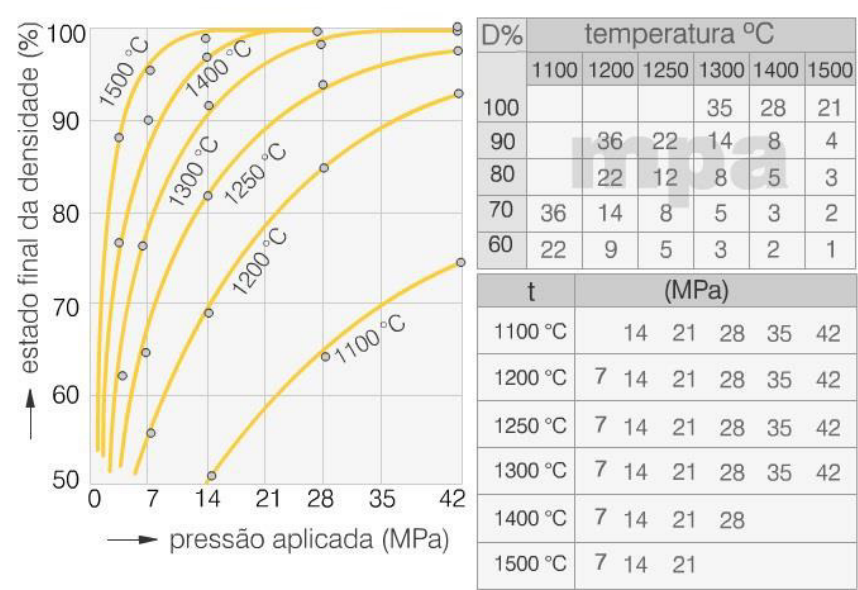
Os cadinhos foram submetidos a uma temperatura de 900 °C, com um perfil térmico como o mostrado na figura 4 e resfriamento lento, dentro do forno mufla. Não ocorreu o processo de sinterização completa nesta temperatura, visto que a temperatura ideal para esse tipo de material é em torno de 1500°C, conforme a Figura 6, mas estágios iniciais já foram identificados na temperatura de 900°C.

Figura 5 - Perfil térmico do forno de indução



Fonte : Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug, 2018

Figura 6 - Grau de sinterização da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por pressão aplicada.



Efeito da pressão e da temperatura na sinterização da alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  INFO+

Fonte: Ciência dos materiais multimídia.

Figura 7 - Cadinhos após o tratamento térmico



Fonte: elaborado pelo autor

#### 5.4 Aplicação

Após a fabricação do cadinho com os materiais desejados, foi possível fundir aço no forno de indução. Buscou-se uma peça que possuísse uma geometria totalmente simétrica, no caso uma esfera de aço, pois este seria levado, juntamente com o cadinho, ao forno de indução e necessitava-se de tal simetria para maior eficiência do processo de fundição.

Após o processo de fundição, verificou-se uma certa resistência do cadinho ao mesmo. As paredes e o fundo do refratário em uso, suportaram a alta temperatura atingida pelo forno de indução. O que era um dos objetivos do trabalho.

Depois de fundir os aços com sucesso, pensou-se na possibilidade de manipular a composição química dos mesmos usando os cadinhos fabricados através do processo de fundição no forno de indução.

Primeiramente, selecionou-se uma esfera de aço com composição química desconhecida e submeteu-se a mesma a uma espectrometria de emissão ótica no LACAM (laboratório de caracterização de materiais). Após a identificação da composição química do aço em questão, desejou-se alterar a composição de carbono do mesmo. A priori, viu-se que a composição de carbono era de aproximadamente de 1,0509% e de manganês de aproximadamente de 0,06%. O objetivo era aumentar esses teores, de carbono para 1,2% e manganês para 8%. Para isso foi feito um cálculo de balanço de massa e viu-se o quanto de grafita e manganês que seriam adicionados para atingir esses teores.

A massa da esfera de aço pesada foi de 216,88 g. Pelo teor de carbono inicial, é possível perceber que em 100 g de aço, temos 1,0509 g de carbono e a partir disso, calculou-se 1,0509% da massa da esfera, cujo resultado deu 2,2792 g, ou seja, na esfera em análise tínhamos essa massa de carbono. O teor de carbono desejado era de 1,2%, ou seja, para 100 g de aço, teríamos 1,2 g de carbono. A massa de carbono desejada para 100 g de aço seria a diferença (1,2 – 1,0509), cujo resultado deu 0,1491 g. Em cima dessa relação, calculou-se a massa de carbono desejada para a massa de aço medida (216,88 g), cujo resultado deu 0,3234 g de carbono. Resolve-se colocar uma quantidade quase cinco vezes maior do que a calculada, pois poderia haver queima da grafita durante o processo de fundição, fato comprovado pela presença de faíscas. A massa total que seria fundida foi de 218,37 g. Em cima disso, resolveu-se adicionar em torno de 9 % de manganês, que ficou em torno de 21,24 g.

Após os cálculos feitos e quantidade de grafita e manganês definidas, levou-se a esfera de aço e as quantidades de grafita e manganês, juntamente com o cadinho fabricado, ao forno de indução. A fusão ocorreu e a mistura foi resfriada dentro do próprio forno.

O material fundido foi levado para uma nova espectrometria de emissão ótica, mas antes necessitou-se prepará-lo para tal. O mesmo foi levado para o lixamento. Utilizou-se apenas a lixa de 80 para deixar a superfície plana e com o tamanho ideal para ser levada ao espectrômetro. Após a análise feita através da espectrometria de emissão ótica, percebeu-se que os teores de carbono e manganês aumentaram como desejado. O teor de carbono foi maior do que o estipulado (tabela 5), o que era esperado, devido a adição de uma quantidade maior de grafita.

Tabela 4 - Composição química do aço feita por espectrometria de emissão ótica antes da adição de grafita e manganês.

<b>Elementos</b>	<b>% Peso</b>
C	1,0509
Si	0,22913
Mn	0,06183
Mo	0,01854
Cr	1,4700
S	0,00334
Fe	97,050

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5 - Composição química do aço feita por espectrometria de emissão ótica após a adição de grafita e manganês.

<b>Elementos</b>	<b>% Peso</b>
C	1,4837
Si	-
Mn	6,7973
Mo	-
Cr	1,5310
S	-
Fe	-

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 8 - Cadinho + aço fundido resfriado



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 9 - Esferas de aço após a espectrometria de emissão ótica



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10 - Aço fundido após o lixamento



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 11 - Processo de fundição do aço no forno de indução



Fonte: Elaborado pelo autor

## **6 CONCLUSÃO**

As matérias-primas, borra de alumínio, mulita e melaço, mostraram grande eficiência na produção de cadinhos refratários para fundição de aços em fornos de indução, em escala laboratorial. Os cadinhos produzidos comportaram-se de maneira satisfatória, considerando as condições existentes. A utilização de uma prensa manual foi considerada um progresso, pois em processos anteriores, utilizavam-se uma complexa máquina de ensaios mecânicos. Viu-se que o método de calcinação a 600 °C por 2 horas foi mais eficiente comparando-se ao método de encharque com água.

O processo de fundição nos cadinhos fabricados foi analisado e concluiu-se que é possível manipular a composição química de aços, adicionando elementos de liga, pois o aço permanece fundido por um bom período, porém precisa-se de mais ajustes, ainda não determinados, para um controle mais preciso da composição química dos mesmos.

Verificou-se que o Mn que foi adicionado na forma de pequenas placas, dissolveu-se completamente no aço líquido, mantendo-se em solução sólida após a solidificação do aço, fato este verificado por espectrometria de emissão ótica.

Este modelo de fabricação, já estudado anteriormente, mostrou-se mais uma vez eficiente e promissor. Necessita-se de mais estudos para analisar a produção em grande escala, mas as proporções e parâmetros ideais já foram determinados, o que certamente facilitará análises futuras.

## **7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Produzir mais peças utilizando essa mistura refratária, buscando avaliar melhor suas propriedades.

Fazer testes, adicionando diversos elementos de liga, utilizando o processo de fundição no forno de indução, buscando um controle mais preciso da composição química dos aços em análise.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Definição de materiais refratários**. NBR 8826. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – Classificação**. NBR 10004. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Relatório de sustentabilidade da indústria do alumínio**. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABC). **Informações técnicas**. Disponível em: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acessado em: 06 de dezembro de 2016.

CALLISTER JR, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos. 2002.

CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA. **Sinterização**. Disponível em: <http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=22&top=154>.

COSTA, B.J. **Importância do pó no processamento das cerâmicas avançadas**. 38º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 1994.

UCHOA, Lucas, **FABRICAÇÃO DE CADINHO PARA FUSÃO DE AÇO EM FORNO DE INDUÇÃO A PARTIR DA BORRA DE ALUMÍNIO**. 2017

DAVID, E., KOPAC, J. **Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste**. Journal of hazardous materials 209 – 2010. 2012.

GOMES, A., DE LIMA, N.B., TENORIO, J.S. **Comparação entre o método padrão interno e o método Rietveld para análise do teor de alumínio em uma borra branca**



**de alumínio.** Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 2649. 2005.

MOTA, R.C. **Influência da adição de cargas inorgânicas no desempenho de produtos refratários obtidos a partir de borras de alumínio.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. CE. 2010.

NOGUEIRA, R.E.F.Q., Sasaki, J.M., Mota, R.C., Argonz, R. Patente: Privilegio de innoação BR 1020140319808. **Processo de fabricação de refratários utilizando a borra de alumínio com adições de cargas inorgânicas.** 2014.

RICHERSON, D.W. **Modern ceramic engineering.** Properties, processing and use in design. 2ª Edição. Editora Marcel Dekker. 1992.

SIGILIANO, D.M. **Estudo e desenvolvimento de um novo insumo para fabricação de escorias sintéticas briquetadas dessulfurantes para produção de aço de alta pureza.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Rede temática de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. 2013.

TOTTON, G.E., SCOTT MACKENZIE, D. **Handbook os aluminum:** alloy production and materials manufacturing. Taylor Print, USA, 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará.** Fortaleza, 2013.

