



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

JEFFSON FERREIRA GOMES

**PRODUÇÃO DE CADINHO DE ALUMINA A PARTIR DE BORRA DE ALUMÍNIO
DO PROCESSO HALL-HÉROULT COM VISTAS À FUSÃO DE LIGAS
METÁLICAS EM FORNO DE INDUÇÃO**

FORTALEZA

2022

JEFFSON FERREIRA GOMES

PRODUÇÃO DE CADINHO DE ALUMINA A PARTIR DE BORRA DE ALUMÍNIO DO
PROCESSO HALL-HÉROULT COM VISTAS À FUSÃO DE LIGAS METÁLICAS EM
FORNO DE INDUÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

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

FORTALEZA

2022

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)

- G614p Gomes, Jeffson Ferreira.
Produção de cadinho de alumina a partir de borra de alumínio do processo Hall-Héroult com vistas à fusão de ligas metálicas em forno de indução / Jeffson Ferreira Gomes. – 2022.
38 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.
1. refratário de alumina. 2. borra de alumínio. 3. forno de indução. 4. fundição. I. Título.

CDD 669

JEFFSON FERREIRA GOMES

PRODUÇÃO DE CADINHO DE ALUMINA A PARTIR DE BORRA DE ALUMÍNIO DO
PROCESSO HALL-HÉROULT COM VISTAS À FUSÃO DE LIGAS METÁLICAS EM
FORNO DE INDUÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia
Metalúrgica do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Metalúrgico.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

MSc Eng. Civil Pedro Henrique Nogueira Garcia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Otacílio e Sandra.

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida e por ter me protegido, guiado, dado força e saúde para que eu pudesse enfrentar e vencer todas as etapas dessa jornada.

Ao meu pai Otacílio (*In memorian*), que me deu todo o suporte necessário para eu obter êxito em toda a minha formação.

A minha mãe Sandra, que sempre me apoiou e se dedicou para eu ter o conforto indispensável, me fazendo sempre seguir mesmo em meio as dificuldades da vida.

Aos meus familiares e amigos, os quais são porto seguro para mim.

A Tailany Dávila por ter me suportado e dado apoio em todos os dias de estresse devido a trabalhos e provas nas disciplinas do curso.

Ao professor Jeferson Klug pela orientação e disponibilidade, ao Professor Ricardo Emilio e ao Técnico de Laboratório Samuel Medeiros por todo o suporte técnico na realização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram na minha formação estudantil.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

“Somos o que fazemos para mudar o que fomos.”

Guilherme de Sá

RESUMO

No processo produtivo do alumínio primário, ou seja, no processo Hall-Héroult, é gerado um resíduo, sendo conhecido por borra de alumínio. Por conservar óxidos de alto ponto de fusão é potencial insumo na produção de refratários. O objetivo desse trabalho é fabricar cadinho refratário maior em dimensões e capacidade volumétrica que o de trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Fundição da UFC, utilizando a borra de alumínio e melão de cana como ligante, visando empregá-lo no forno de indução para fundir ligas metálicas, sendo necessário que apresente propriedades específicas, em especial resistência mecânica, à abrasão e ao choque térmico. Foram produzidos cadinhos maiores, e o processo de produção dos cadinhos foi melhorado, considerando o comportamento do melão de cana em altas temperaturas, e modificando a etapa de moldagem, tornando mais fácil a sua fabricação. Concluiu-se que o cadinho maior produzido com borra de alumínio e melão de cana é viável para uso em forno de indução, possibilitando a produção de peças fundidas maiores, com um processo de produção de cadinho mais simples.

Palavras-chave: refratário de alumina; borra de alumínio; forno de indução; fundição.

ABSTRACT

In the primary aluminum production process, that is, in the Hall-Héroult process, a residue is generated, known as aluminum sludge. As it conserves high melting point oxides, it is a potential input in the production of refractories. The objective of this work is to manufacture a refractory crucible larger greater in dimensions and volumetric capacity than previous works carried out at the UFC Foundry Laboratory, using aluminum sludge and cane molasses as a binder, aiming to use it in the induction furnace to melt metal alloys, being necessary that has specific properties, in particular mechanical, abrasion and thermal shock resistance. Larger crucibles were produced, and the crucible production process was improved, considering the behavior of cane molasses at high temperatures, and modifying the molding step, making its manufacture easier. It was concluded that the larger crucible produced with aluminum sludge and cane molasses is viable for use in an induction furnace, allowing the production of larger castings, with a simpler crucible production process.

Keywords: alumina refractory; aluminum dross; induction furnace; casting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de fases sílica-alumina -----	22
Figura 2 – Melaço de cana -----	25
Figura 3 – Conjunto molde com 20,8 cm de altura e disco com 11,3 cm de diâmetro-----	25
Figura 4 – Pontas de desbaste-----	27
Figura 5 – Aspecto homogêneo e úmido da mistura após adição do melaço-----	29
Figura 6 – Bloco teste com 25% de ligante desmoldado a quente e usinado-----	31
Figura 7 – Coloração do bloco verde após retirada do molde a quente -----	31
Figura 8 – Perfil de escavação da usinagem-----	32
Figura 9 – Coloração do cadinho após pré-sinterização a 900°C-----	32
Figura 10 – Grau de sinterização da alumina-----	33
Figura 11 – Cadinho após sinterização a 1.400°C -----	33
Figura 12 – Comparação com cadinho produzido anteriormente -----	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação técnica do melaço de cana líquido -----	21
Tabela 2 – Análise química por fluorescência de raios X da borra após calcinação-----	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	Ceará
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

- ° Graus
- % Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos gerais	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Sustentabilidade ambiental na indústria	17
3.2	Reciclagem de resíduos sólidos	17
3.2.1	<i>Resíduos classe I – Perigosos:</i>	18
3.2.2	<i>Resíduos classe II – Não perigosos</i>	18
3.2.2.1	<i>Resíduos classe II A – Não inertes</i>	18
3.2.2.2	<i>Resíduos classe II B – inertes</i>	18
3.3	Produção de alumínio	18
3.4	Borra de alumínio	19
3.4.1	<i>Classificação da borra</i>	19
3.4.1.1	<i>Borra branca</i>	19
3.4.1.2	<i>Borra preta</i>	20
3.4.1.3	<i>Borra salina</i>	20
3.4.2	<i>O problema do nitreto de alumínio</i>	20
3.5	Melaço de cana	20
3.6	Refratários	21
3.7	Forno de indução	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.2	Procedimentos	25
4.2.1	<i>Inertização da borra de alumínio</i>	25
4.2.2	<i>Mistura e homogeneização das matérias primas</i>	26

4.2.3	<i>Adição do ligante</i>	26
4.2.4	<i>Moldagem e prensagem</i>	26
4.2.5	<i>Tratamento térmico</i>	27
4.2.6	<i>Desmoldagem</i>	27
4.2.7	<i>Usinagem</i>	27
4.2.8	<i>Pré sinterização e sinterização</i>	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1	Procedimento de inertização da borra	29
5.2	Desempenho do ligante de melaço de cana	29
5.3	Etapas de moldagem e prensagem	30
5.4	Tratamento térmico e desmoldagem	30
5.5	Usinagem	31
5.6	Pré sinterização e sinterização	32
5.7	Aplicabilidade	34
6	CONCLUSÃO	35
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sempre foram uma problemática, desde os primórdios, resultante de algo natural como o ciclo da vida ou quanto a processos necessários para a evolução humana, que visam a utilização de bens naturais para adquirir e produzir itens e objetos. Intuitivamente, as primeiras medidas da sociedade quanto ao descarte de resíduos foi enviá-los a locais distantes, ao subsolo ou em rios, contudo, a poluição desses ecossistemas foi rapidamente perceptível (PEREIRA, 2019).

A produção do alumínio primário pelo processo Hall-Héroult, para suprir necessidades de desenvolvimento humano, gera um resíduo sólido, conhecido como borra de alumínio, que por apresentar considerável grau tóxico, não pode ser descartado de qualquer forma ou em qualquer local. Por possuir dentre seus constituintes grande percentual de óxidos que apresentam elevado ponto de fusão, a borra de alumínio possui potencial para ser empregada no processo de produção de materiais refratários para uso industrial, não devendo ser vista como um mero rejeito.

À vista disso, neste trabalho, faz-se uso da borra de alumínio como parte majoritária da mistura de matérias primas, utilizando um conceito de molde simples de prensagem uniaxial para produzir cadinho refratário maior em dimensões e capacidade volumétrica que o de trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Fundição da UFC, que permita a fusão de ligas metálicas em forno de indução.

Esse tipo de forno tem características próprias do seu princípio de funcionamento que devem ser levadas em consideração, no sentido de que podem influenciar na estrutura física e desempenho do cadinho.

A resistência ao choque térmico é uma particularidade essencial dos cadinhos que operam nesse tipo de forno. Isso ocorre porque são elevadíssimos os gradientes térmicos impostos a esses refratários, devido à celeridade com que o metal aquece e eleva sua temperatura. Resistência mecânica e à abrasão, são outras características indispensáveis para suportar a turbulência que o banho de metal fundido impõe (UCHOA, 2017).

Nogueira et al. (2014) menciona a proporção de 7:3 de borra de alumínio e mulita, respectivamente, para refratários que atendiam bem essas características desejáveis. Seguindo a mesma proporção, mas optando por alumina 60 mesh no lugar de mulita, foi analisada a aplicabilidade e o comportamento de cadinho com essa composição em operação.

O melaço de cana utilizado como ligante possui açúcar como constituinte, grande parte como sacarose, que ao ser aquecida e submetida a pirólise confere resistência mecânica. Os

efeitos do tempo e da temperatura no tratamento térmico que visa realizar a pirólise da sacarose também foram investigados.

Foi desenvolvido um método novo e simplificado na fabricação de cadinhos, que possibilitou a produção de cadinhos maiores, com a implementação de um processo de usinagem manual para desbaste de material vindo a conferir seu formato final e usual.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

- Produzir cadinho de alumina maior em dimensões e capacidade volumétrica, comparado com os que já foram produzidos no Laboratório de Fundição da UFC, a partir da borra de alumínio e melaço de cana e utilizá-lo para fundir ligas metálicas em forno de indução.

2.2 Objetivos específicos

- Atestar a aplicabilidade da mistura de borra de alumínio mais alumina 60 mesh.
- Desenvolver um método para prensagem da borra de alumínio com melaço de cana, a partir de tubo de alumínio e disco de prensagem produzido em fundição por areia verde.
- Propor metodologia que facilite a etapa de desmoldagem.
- Verificar a aplicabilidade do cadinho para a fusão de ligas metálicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sustentabilidade ambiental na indústria

Uma questão que ganhou notoriedade e relevância nos últimos anos, foi sem dúvidas o despertar da população mundial quanto à finitude dos recursos naturais. A preservação do meio ambiente para garantir matérias primas e bem estar social a futuras gerações, tornou-se pauta das autoridades mundiais em reuniões e conferências, com imposição de medidas para alcançar metas ousadas em um futuro breve.

A sustentabilidade passou a ser vetor na sociedade, em especial a propagação de conceitos e práticas que visam uma proteção do meio ambiente. O setor industrial foi um dos mais pressionados a se adequar para atender a essa necessidade. As empresas devem buscar a ecoeficiência, de modo a tomar decisões, cumprir normas e produzir com eficiência e responsabilidade (ALMEIDA, 2002).

3.2 Reciclagem de resíduos sólidos

Uma das ações implementadas pela gestão ambiental nas empresas se dá pela reciclagem de seus produtos, matérias primas ou rejeitos. Em 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS a partir da lei 12.305/10, vindo a ampliar a definição de resíduo sólido, outrora definida pela NBR 10.004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Segundo a PNRS, no tocante de seu capítulo II, artigo 3º, define-se:

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

A reciclagem de resíduos sólidos é uma alternativa para dar continuidade a vida útil desses materiais, transformando suas características para que possam servir de insumo em outras cadeias produtivas. Esse artifício sugere investimento em pesquisas para buscar opções

de aplicabilidade desse rejeito, pois a depender de qual classe este se enquadra, seu despejo pode até gerar ônus à indústria que o produz.

De acordo com a norma da ABNT, NBR 10.004:2004, pode-se classificar os resíduos tendo por base a atividade que lhe originou, suas características, composição, constituição e sua devida comparação com substâncias que conhecidamente são nocivas à saúde e ao ambiente, como exposto:

3.2.1 Resíduos classe I – Perigosos:

Apresentam periculosidade, tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.

3.2.2 Resíduos classe II – Não perigosos

Divide-se nas subclasses de não inertes e inertes, sendo exemplos, os que seguem no anexo H, como restos de alimentos, papéis e papelão, plástico e borracha.

3.2.2.1 Resíduos classe II A – Não inertes

Não se encaixam nos resíduos classe I ou classe II B. Em geral podem ser biodegradáveis, combustíveis ou solúveis em água.

3.2.2.2 Resíduos classe II B – inertes

Aqueles que quando coletadas amostras segundo a norma ABNT NBR 10.007, em contato com água destilada ou desionizada, não apresentarem solubilidade de seus componentes de modo a superar os padrões da água potável, segundo suas características de cor, sabor, turbidez, entre outros.

3.3 Produção de alumínio

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio – ABAL a bauxita é o principal minério para a produção de alumínio primário, sendo necessário um percentual mínimo de alumina (Al_2O_3) superior a 30% de maneira que sua produção passe a ser viável. O Brasil desponta como

o quarto produtor mundial desse minério, muito também por conta de sua abundância na natureza estar atrelada principalmente a alguns grupos climáticos, como no nosso caso o tropical. A produção da bauxita se assemelha a de outros minérios, desde a remoção de vegetação, remoção do solo, extração, britagem, lavagem para remover o excesso de sílica e pôr fim à secagem.

Em seguida, o minério já beneficiado é dissolvido em soda cáustica em atmosfera aquecida e pressurizada, sedimentando a alumina que é filtrada e concentrada, seus cristais são secados e calcinados dando origem a um pó branco de alumina pura. Essa alumina calcinada e pura é base para a obtenção do alumínio através de um processo conhecido como Hall-Héroult, onde dissolve-se alumina em uma mistura de criolita e fluoreto de alumínio em baixa tensão para decompor oxigênio, que se combina com um ânodo de carbono formando CO_2 e libera o alumínio primário líquido na cuba eletrolítica.

3.4 Borra de alumínio

Borra de alumínio é o termo utilizado para denominar a escória formada na superfície durante o processo de fusão desse metal, devido a sua reação com o meio, sendo seu principal subproduto, classificada como resíduo classe I – perigoso devido a sua toxicidade. Cerca de até 5% de borra é formada durante a fusão, podendo conter até 75% de gotículas bem pequenas do metal livre em meio a óxidos quando se dá a fusão de alumínio primário, como também a possível presença de chumbo, cádmio e cromo para a fusão de alumínio secundário oriundo de sucata. Esse alumínio presente na borra é normalmente recuperado com a adição de sais dentro de fornos, originando uma borra com menor quantidade de gotículas metálicas, alumina, sais e impurezas. (TOTTON, 2003).

3.4.1 Classificação da borra

Ainda segundo Totton (2003, p. 124), a borra pode ser diferenciada em três classes de acordo com sua composição:

3.4.1.1 Borra branca

É produzida a partir da fusão do alumínio primário, obtido pela extração e beneficiamento da bauxita, possui alta pureza, geralmente na cor branca ou cinza. Nela não há nenhum ou percentual baixíssimo de sais, podendo conter de 15% a 70% de alumínio metálico.

3.4.1.2 Borra preta

Produzida a partir do alumínio secundário, obtida pela recuperação das gotículas metálicas na borra branca, vindo a apresentar cores escuras. Há maior presença de sais e menor percentual de alumínio metálico.

3.4.1.3 Borra salina

Produzida a partir da recuperação de alguma gotícula de alumínio metálico na borra preta, apresentando com escura. Há alta concentração de sais e contém no máximo 7% de alumínio metálico.

3.4.2 O problema do nitreto de alumínio

A presença de nitreto de alumínio (AlN) na composição borra pode ser problemática, inclusive para os processos de reciclagem e seu manuseio. Isso ocorre pois, em contato com a umidade, há formação de amônia (NH₃), gás conhecidamente tóxico, o que pode resultar em inviabilidade de seu uso na indústria. A partir disso, existe a necessidade de inertizar a borra de alumínio caso venha a ser necessário que em algum momento, ela seja submetida a presença de água (SIGILIANO, 2013).

3.5 Melaço de cana

O melaço de cana resulta do processo de centrifugação durante a fabricação de açúcar, tem odor aromático e possui composição complicada e variada, com características particulares de acordo com o seu aspecto agrícola e de preparo. É constituído principalmente por açúcares, sendo a sacarose o que possui maior percentual, seguido por glicose e frutose respectivamente. Quando líquido, é comercializado para a indústria de produção de álcool, cachaça, fermentos e rações para animais (MELAÇOS BRASILEIROS, 2022). A tabela 1 apresenta a especificação técnica do melaço de cana.

No Brasil, o melaço de cana é o principal subproduto da indústria do açúcar (ARAÚJO, 2017). Os coeficientes de expansão e contração, que estão relacionados com a diminuição ou aumento de volume do material com a variação de temperatura não tem dados substancialmente conclusivos na literatura.

Tabela 1 – Especificação técnica do melaço de cana líquido.

Constituinte	Resultado
Umidade (%)	18,40
Açúcares (%)	52,37
<i>Sacarose (%)</i>	<i>39,41</i>
<i>Glicose (%)</i>	<i>7,66</i>
<i>Frutose (%)</i>	<i>5,30</i>
Cinzas(%m/v)	9,8
pH	5,7
Acidez(g/Kg)	1,3
Outros	4374,3
<i>Mg (mg/kg)</i>	<i>4270,0</i>
<i>Fe (mg/kg)</i>	<i>64,0</i>
<i>Mn (mg/kg)</i>	<i>27,1</i>
<i>Zn (mg/kg)</i>	<i>6,3</i>
<i>Cu (mg/kg)</i>	<i>3,8</i>
<i>Co (mg/kg)</i>	<i>3,1</i>

Fonte: Melaços Brasileiros (2022).

3.6 Refratários

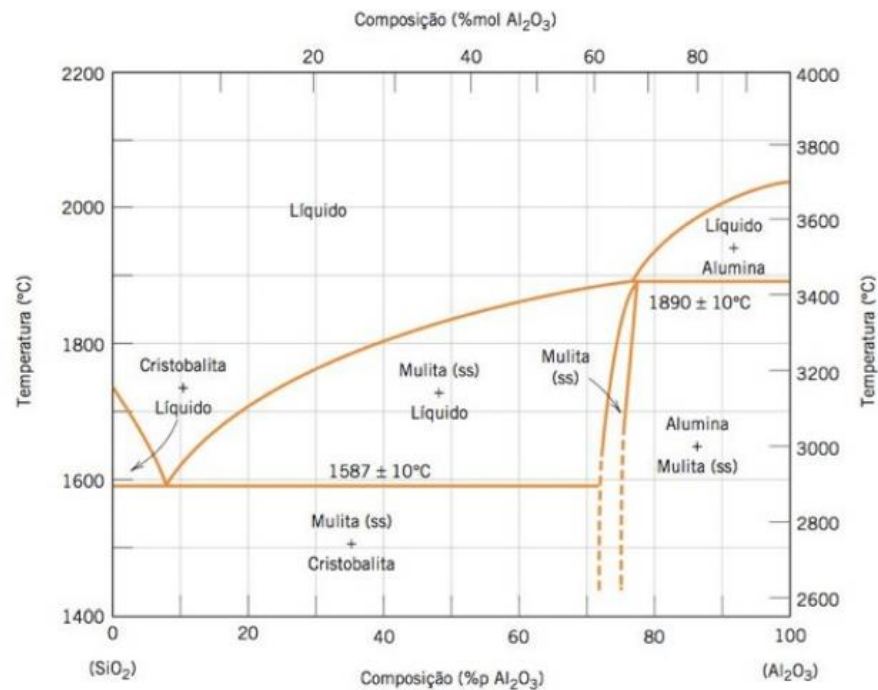
Refratários são materiais que possuem, em especial, aptidão para suportar elevadas temperaturas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2022). As cerâmicas são entre os refratários, os que exercem o termo com excelência, sem se decompor, fundir ou reagir em ambientes extremos. Seu desempenho está bastante atrelado a sua composição e processamento. A porosidade é uma propriedade muito importante pois com sua diminuição, propriedades como resistência mecânica e ao ataque corrosivo melhoram e, isolamento térmico e resistência ao choque térmico diminuem (CALLISTER, 2012).

Ainda de acordo com Callister (2012), a depender da composição, os refratários podem ser *argilosos*, com predominância de argila e alumina (25%p a 45%p) com as fases mulita e cristobalita em altas temperaturas; *à base de sílica* que são muitas vezes chamados de refratários ácidos, possuindo baixos teores de alumina para não se aproximar da composição eutética o

que reduz a temperatura líquidos; *básicos* podem ser ricos em periclásio ou magnésio, altamente resistentes ao ataque de escórias básicas; *especiais* que são utilizados quando se requer aplicações bem específicas, considerados caros quando comparados com os demais.

Os principais constituintes das cerâmicas refratárias comerciais, em abundância, são sílica e alumina. Torna-se, portanto, importantíssima a análise do diagrama de fases em equilíbrio $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Figura 1). Podemos observar a presença da forma estável da sílica em altas temperaturas que é a cristobalita, assim como o composto intermediário das dos dois constituintes, a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$). O eutético está presente na composição 7,7%p de alumina a 1587°C . Para elevados percentuais de alumina, a linha líquidus alcança patamares próximos aos 1900°C .

Figura 1 – Diagrama de fases sílica-alumina.



Fonte: Callister (2012).

3.7 Forno de indução

A indução eletromagnética é o princípio básico de funcionamento para os fornos de indução. Para Faraday que investigou a fundo esse campo de conhecimento, existe um fenômeno em que um condutor elétrico ao ser sujeito a um fluxo magnético com variação, há o surgimento de uma força eletromotriz cada vez maior à medida em que essa variação aumenta. Isso faz com que nesses materiais condutores, seja formada uma corrente elétrica, conhecidas

como correntes de Foucault, onde a resistência a passagem dessa corrente eleva a temperatura do material (LEME, 2011).

O forno a indução utiliza este princípio, vindo a processar e alimentar uma bobina com corrente elétrica que a percorre dando origem a um campo magnético no seu entorno. A presença desse campo magnético variável induz tensão sobre o metal no interior do forno, onde essa tensão estabelece nele um fluxo de corrente. A resistência natural à passagem dessa corrente induzida gera calor devido ao efeito Joule e a elevação de temperatura é tamanha que ocasiona a fusão do material.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Como matérias primas para este trabalho, foram utilizadas a borra branca de alumínio em finos, concedida por uma empresa de recuperação de alumínio, situada no município de Maracanaú – CE, além de alumina (Al_2O_3) 60 mesh (abertura da peneira com 250 μm), adquirida de um fornecedor localizado no estado de São Paulo. A proporção da mistura foi de 70% de borra de alumínio e 30% de alumina. A Tabela 2 apresenta a análise química da borra de alumínio com o % em peso de seus constituintes (MOTA, 2010).

Tabela 2 – Análise química por fluorescência de raios X da borra após calcinação.

Constituinte	(%p)
Al_2O_3	77,63
SiO_2	6,60
Cl	4,11
CaO	2,46
TiO_2	2,04
MgO	1,65
Fe_2O_3	1,28
CuO	1,13
V_2O_5	1,11
K_2O	0,79
ZnO	0,18
ZrO_2	0,04

Fonte: Mota (2010)

O ligante utilizado (Figura 2) foi melão de cana proveniente de um engenho no município de Pindoretama - CE, adquirido no comércio local. Para que fosse possível realizar prensagem, foi utilizado um conjunto formado por um tubo de liga de alumínio com 11,4 cm de diâmetro interno e 20,8 cm de altura, e um disco que possui 11,3 cm de diâmetro e 1,3cm de espessura também de liga de alumínio, produzido por método de fundição em molde de areia verde (Figura 3).

Figura 2 – Melaço de cana.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 – Conjunto molde com 20,8 cm de altura e disco com 11,3cm de diâmetro.



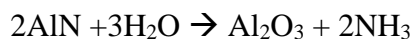
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Procedimentos

4.2.1 Inertização da borra de alumínio

Por ser um resíduo perigoso, há a necessidade de impor um processo de inertização à borra de alumínio no estado como recebido. O processo utilizado foi a calcinação, fazendo uso

de um forno mufla a temperatura de 600°C por um período de tempo de 2 horas, com o objetivo de eliminar impurezas e voláteis, em especial favorecer a reação do AlN com a umidade do ar, eliminando assim amônia (NH₃), como exposto:



4.2.2 Mistura e homogeneização das matérias primas

Se busca nesta etapa promover a adequada mistura da borra de alumínio calcinada com a alumina 60 mesh, na proporção de 70% e 30% respectivamente. De posse de uma balança de precisão, foram inicialmente pesadas a borra de alumínio calcinada e a alumina 60 mesh. Após realizar a mistura inicial dos compostos, esta deve ser alocada em um recipiente fechado para que se agite e garanta a homogeneização indispensável, com a finalidade de garantir a distribuição igualitária das diferentes partículas no material.

4.2.3 Adição do ligante

O ligante utilizado foi o melaço de cana, totalizando um percentual de 25% do peso total da mistura de borra mais alumina. Ele é adicionado manualmente em um recipiente grande e aberto com o uso de luvas. O ligante promove a melhor união entre as partículas, que será fundamental para facilitar o manuseio nas etapas posteriores. A homogeneização completa é obtida quando o aspecto de toda a mistura é uniforme, aparentemente úmida e sem a presença do pó seco característico inicial.

4.2.4 Moldagem e prensagem

Depois da adição do ligante, o material já pode ser levado ao molde, que possui agora em sua extremidade inferior, uma chapa de aço para garantir a permanência da mistura em seu interior. Com o uso de luvas, o molde é preenchido manualmente, em pequenas quantidades, para que a devida ocupação de toda a circunferência seja alcançada, até que esteja completamente cheio a uma altura de interesse. Vale ressaltar que na etapa de prensagem haverá a redução da altura do material dentro do molde, devido à compactação imposta pelo deslocamento do disco, portanto a moldagem deve requerer um nível de grandeza um pouco maior que a desejável para o cadinho finalizado.

O disco de prensagem é acondicionado por sobre a mistura dentro do molde e levado à prensa, onde se utilizou uma força de 5 toneladas.

4.2.5 Tratamento térmico

Devido ao uso do melaço de cana como ligante, se faz necessária a aplicação de um tratamento térmico após a prensagem, a 200°C por 2 horas, em todo o conjunto do molde. Com a elevação da temperatura a este patamar, promove-se a pirólise da sacarose, um dos constituintes mais abundantes do melaço, conferindo a resistência mecânica necessária para sua desmoldagem segura.

4.2.6 Desmoldagem

Após o tratamento térmico, resfria-se o conjunto lentamente dentro da estufa até a temperatura ambiente para que se possa manusear o molde com maior segurança. Para desmoldagem se aplica força sobre o disco, desta vez, sem a chapa de aço na extremidade inferior possibilitando assim, a retirada de um bloco verde bastante resistente.

4.2.7 Usinagem

De posse do bloco verde, faz-se necessário um procedimento manual de usinagem, utilizando furadeira e pontas de desbaste (Figura 4), para formar uma cavidade em seu centro, com o intuito de abrigar os metais que por ventura venham a ser fundidos no cadinho durante a sua utilização.

Figura 4 – Pontas de desbaste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.8 Pré sinterização e sinterização

Após a realização da usinagem, e com o formato característico do cadinho sendo obtido, ele é levado à queima. Primeiramente o cadinho verde é submetido a um tratamento de pré-sinterização, onde inicialmente, em forno mufla, a temperatura é elevada até 600°C por 1 hora, em seguida, elevada novamente agora a uma temperatura de 900°C e o resfriamento feito dentro do forno.

Posteriormente se dá a sinterização, elevando a temperatura do forno, neste caso, ao patamar de 1.400°C por 1 hora, para que ocorra a ligação química e metalúrgica das partículas do pó e a porosidade seja reduzida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir dos materiais e métodos utilizados para a fabricação de cadinho de borra de alumínio mais alumina 60 mesh e melaço de cana de açúcar, além de discuti-los e compara-los com a literatura e trabalhos anteriores.

5.1 Procedimento de inertização da borra

O processo de calcinação mostrou-se bem eficiente, sendo uma escolha acertada para tornar a borra não reagente. O aquecimento a 600°C por 2 horas, eliminou gás amônia (NH₃), que pôde ser sentido no ambiente do laboratório, permanecendo este isolado por todo o período de tempo. Apesar de não ser realizado experimento que afirmasse a ausência de produção de amônia pela borra, tanto após o período de calcinação, quanto nos demais processos de produção do cadinho, não foi perceptível qualquer cheiro forte ou outro mal estar característico de NH₃. NÃO

5.2 Desempenho do ligante de melaço de cana

O melaço de cana foi utilizado como ligante para o melhor manuseio e adesão do material na produção do cadinho. Se obteve uma mistura homogênea, aparentemente úmida e coesa (Figura 5), que possibilitou uma maior facilidade em aglomerar e acomodar o material no molde. Entretanto, para formar um bloco verde com boa resistência mecânica, um tratamento térmico é imprescindível depois da prensagem.

Figura 5 – Aspecto homogêneo e úmido da mistura após adição do melaço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Etapas de moldagem e prensagem

A moldagem foi realizada manualmente, acomodando a mistura em pequenas quantidades no interior do molde para que o espaço fosse preenchido igualmente até que estivesse sido disposto de todo o material disponível, resultando uma altura final de 11,3 cm, acomodando por sobre este o disco de prensagem.

A prensagem foi realizada no Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, utilizando 5 toneladas durante 1 minuto sobre o disco. A prensa utilizada foi manual, originalmente com capacidade de 15 toneladas e regulagem de altura, que possibilitou a boa acomodação do molde relativamente grande, o que dificultou o uso de outras prensas menores outrora. Após a prensagem com a carga descrita, a altura do bloco prensado foi compactada e diminuída de 11,3 cm para 8,5 cm, o que representa uma redução de aproximadamente 24,8% da grandeza inicial.

5.4 Tratamento térmico e desmoldagem

Para o tamanho do conjunto do molde e quantidade de material utilizado, o tratamento térmico proposto não foi satisfatório. Ao aquecer o conjunto a 200°C por 2 horas e resfriar até a temperatura ambiente, observou-se a grande aderência do bloco verde às paredes internas do molde, apresentando uma cor escura bem intensificada nesta região. Mesmo levando para desmoldagem na prensa, utilizando 6 toneladas de força, ainda não foi suficiente para que se pudesse destacar o bloco verde do molde.

Foram realizados testes em escala menor em um copo pequeno de aço, para avaliar a mudança dos parâmetros adotados, considerando alterações no procedimento como a desmoldagem a quente e a mudança de percentual de ligante utilizado. Para 10% de ligante, a quantidade de melão de cana foi insuficiente para possibilitar a aglutinação do material e a prensagem adequada. Para 15% de ligante a aglutinação já foi possível, assim como a prensagem, mas não foi suficiente para retirar o bloco sem avarias a frio ou a quente. A melhor metodologia encontrada que culminou no bloco usinado da figura 6, foi utilizado realmente a desmoldagem a quente, com 25% de ligante, o que exigiu bem menos força para retirar o bloco de teste, contribuindo para apresentar uma possível solução.

Figura 6 – Bloco teste com 25% de ligante desmoldado a quente e usinado.



Fonte: Elaborado pelo autor

Enfim, foi aplicada a elevação da temperatura a patamares ainda maiores, pois como indicada por Santos (2011), a pirólise da sacarose é dependente não só da temperatura, mas também do tempo, e que para temperaturas mais baixas o tempo necessário para a degradação da sacarose é maior, assim como para temperaturas mais altas esse tempo é menor.

Ao realizar o aquecimento do conjunto maior, dessa vez a uma temperatura de 450°C e retirar o molde do forno ao se passar apenas 30 minutos, o bloco verde se destacou sem a necessidade de se aplicar força alguma. Sua coloração apresentou uma tonalidade bem escura (Figura 7), que foi para uma cor quase marrom depois de resfriar.

Figura 7 – Coloração do bloco verde após retirada do molde a quente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Usinagem

A usinagem foi realizada manualmente utilizando furadeira equipada com ponteiros que promovessem o desbaste e retirada de material. Essa etapa foi realizada com moderada dificuldade, em virtude da necessidade de bom grau de habilidade no uso da ferramenta, para

promover as dimensões adequadas para a abertura. Houve grande formação de poeira que se espalhou bastante pelo ambiente, além da produção excessiva de pó que não seria utilizado verdadeiramente na composição final do cadinho. O perfil da escavação promovida após o processo de usinagem pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Perfil de escavação da usinagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Pré sinterização e sinterização

A pré-sinterização foi realizada seguindo o procedimento proposto. A taxa de aquecimento foi de 5°C por minuto, tanto para a temperatura de 600°C que permaneceu por 1 hora, quanto para a temperatura de 900°C, onde o forno foi desligado no momento em que a atingiu. Novamente observou-se uma mudança de coloração, onde o cadinho passou a apresentar tons claros voltados à cor branca (Figura 9). Neste momento, devido à queima de toda a matéria orgânica e de todo o melado de cana que garantia boa resistência mecânica, o cadinho apresenta maior fragilidade e seu manuseio requer cautela.

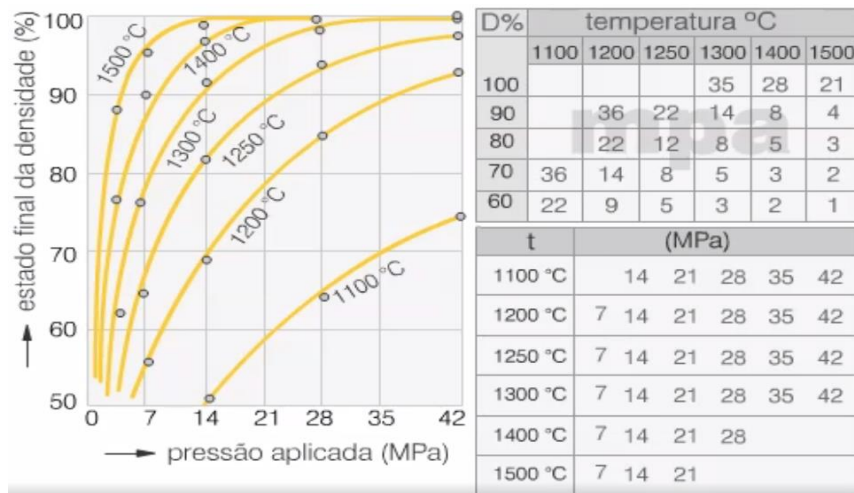
Figura 9 – Coloração do cadinho após pré-sinterização a 900°C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de sinterização foi realizado levando o cadinho, já pré-sinterizado, ao forno em uma temperatura de 1.400°C. Essa temperatura não é a mais indicada para promover a sinterização completa do material, como indica a Figura 10 (CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA, 2022), mesmo tendo Uchôa (2017) afirmado já identificar estágios iniciais de sinterização a partir dos 1.000°C. A coloração do cadinho mais uma vez é alterada, agora para uma tonalidade de amarelo claro (Figura 11).

Figura 10 – Grau de sinterização da alumina.



Fonte: Ciência dos materiais multimídia (2022).

Figura 11 – Cadinho após sinterização a 1.400°C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 Aplicabilidade

Liga metálica de latão foi utilizada para comprovar a aplicabilidade do cadinho em forno de indução, e foi fundida utilizando o aquecimento gerado pela resistência à passagem de corrente induzida pelo campo eletromagnético. Todavia, após o uso, o cadinho apresentou algumas marcas de desgaste, trincas e aparente fragilidade nas bordas. Assim como as propriedades físicas, as causas da fragilidade não foram investigadas com maior profundidade, mas podem estar relacionadas com o elevado percentual de Al_2O_3 e baixo de sílica (SiO_2), diferentes das utilizadas por Uchôa (2017) e Brito (2018), além da baixa carga de prensagem e temperatura de sinterização abaixo da necessária. Pode-se afirmar que o cadinho é usual, mas a vida útil será menor que a esperada ao examinar os potenciais geradores de falhas. A Figura 12 compara o cadinho maior atual (11,4 cm de diâmetro externo e 8,5 cm de altura), produzido neste trabalho, e o cadinho menor (7,3 cm de diâmetro externo e 5,0 cm de altura) fabricado em trabalho anterior.

Figura 12 – Comparação com cadinho produzido anteriormente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

Em virtude dos fatos apresentados, fica comprovado que foi produzido cadinho maior que os anteriores a partir da borra de alumínio, mais alumina 60 mesh e melado de cana de açúcar, podendo ser considerado processo possível e viável, para ser aplicado em fornos de indução.

O método desenvolvido para prensar a matéria prima a partir de molde formado por tubo de alumínio e disco de prensagem produzido em fundição por areia verde, se mostrou usual realizando prensa uniaxial. Todavia, a necessidade de se adicionar uma etapa para usinar o bloco verde é desfavorável ao processo produtivo, assim como o grande desperdício de matéria prima retirada que, caso esta não seja reaproveitável nas fases do processo, contradiz a vertente sustentável de reciclagem da borra de alumínio.

A desmoldagem foi impossibilitada quando seguido os parâmetros de pirólise da sacarose propostos inicialmente por trabalhos anteriores. Isso ocorreu devido a grande quantidade de matéria prima utilizada e as grandes dimensões do molde, afetando o tempo e a temperatura ideais. Em contrapartida, o aquecimento a uma temperatura mais elevada no valor de 450°C foi suficiente para desmoldar o bloco verde sem dificuldades, em um período de tempo quatro vezes menor que o anterior.

Liga de latão foi fundida utilizando o cadinho, constatando sua aplicabilidade e a maior capacidade volumétrica deste. Marcas de desgaste foram observadas, mas as causas não foram investigadas neste trabalho.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Produzir cadinho utilizando o conjunto de molde deste trabalho, fazendo uso de carga de prensagem mais elevada e temperatura de sinterização a 1.500°C.

Avaliar melhor as propriedades do cadinho fabricado com a mistura de borra de alumínio e alumina 60 mesh mais melação de cana de açúcar.

Verificar a possibilidade de se incluir o pó do bloco verde proveniente da etapa de usinagem novamente no processo de produção do cadinho, para minimizar as perdas e maximizar a quantidade de material reciclado.

Adicionar ao conjunto de molde uma peça macho, que insira o orifício do cadinho dispensando a etapa de usinagem.

Buscar o entendimento sobre a relação da quantidade de matéria prima utilizada, com os parâmetros de temperatura e tempo da etapa de tratamento térmico.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Fernando. **O bom negócio da sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2002.
- ARAÚJO, Luan Maia de. **Avaliação físico-química de melão e melado**. 2017, 33p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação – Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – CTDB/UFPB, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABC). **Informações técnicas**. Disponível em: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 30 de jun. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Cadeia primária**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em: 30 de jun. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 29 de jun. 2022.
- BRITO, Francisco Narain Viana, **Produção de aço ligado ao manganês em forno de indução utilizando cadinho de alumina a partir de borra de alumínio e melão de cana**. 2018. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- CALLISTER, William. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes d’Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA. **Sinterização**. Disponível em: <http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=22&top=154>. Acesso em: 30 de junho de 2022.
- LEME, Rodrigo Moraes. **Características dos fornos a indução com conversores IGBTs**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.
- MELAÇOS BRASILEIROS. **Especificação técnica do melão de cana líquido**. Disponível em: <http://melacos.com.br/especificacoes-tecnicas>. Acesso em: 19 de julho de 2022.
- MOTA, Rejane Carneiro; ARGONZ, Raquel; NOGUEIRA, Ricardo Emílio Ferreira Quevedo; SASAKI, José Marcos; OLIVEIRA, Leonardo Rodrigues de. **Utilização da borra do alumínio como matéria-prima para a produção de cerâmicas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 54^o, 30 maio a 02 jun. 2010, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Anais [...] Foz do Iguaçu, Paraná, 2010. Disponível em: <http://www.repositório.ufc.br/handle/riufc/55874>. Acesso em: 29 de junho de 2022.

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

PEREIRA, Eduardo Vinícius. **Resíduos sólidos**. Editora Senac, São Paulo, 2019.

SANTOS, Lídy Beatriz dos. **Caracterização térmica de sacarose de cana-de-açúcar: amostras de padrão de referência, comercial e purificada**. 2011. 117 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/97779>. Acesso em 02 de julho de 2022.

SIGILIANO, D. M. **Estudo e desenvolvimento de um novo insumo para fabricação de escórias 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 of aluminum: alloy production and materials manufacturing**. Taylor Print, USA, 2003.

UCHOA, Lucas, **Fabricação de cadinho para fusão de aço em forno de indução a partir da borra de alumínio**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. Comissão de Normalização. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2022. 88 p.: il. color.