

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FABIO KENDY PIRATELLI KOBAYASHI

**Comparação da resistência mecânica a verde de tijolos refratários curados  
com diferentes tipos de dextrina como ligante secundário**

São Carlos

2024



FABIO KENDY PIRATELLI KOBAYASHI

**Comparação da resistência mecânica a verde de tijolos refratários curados com diferentes tipos de dextrina como ligante secundário**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

Coorientador: Dr. Carlos Pagliosa Neto

**VERSÃO CORRIGIDA**

São Carlos

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

K75c Kobayashi, Fabio Kendy Piratelli  
Comparação da resistência mecânica a verde de tijolos refratários curados com diferentes tipos de dextrina como ligante secundário / Fabio Kendy Piratelli Kobayashi; orientador Eduardo Bellini Ferreira; coorientador Carlos Pagliosa Neto. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

1. tijolo refratário. 2. resistência mecânica a verde. 3. dextrina. I. Título.

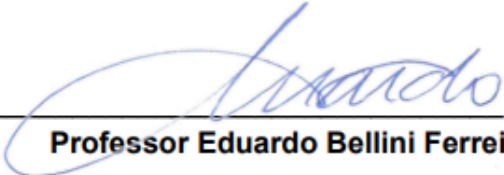
Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE APROVAÇÃO

<b>Candidato / Student:</b> Fabio Kendy Piratelli Kobayashi
<b>Título do TCC / Title:</b> Comparação da resistência mecânica a verde de tijolos refratários curados com diferentes tipos de dextrina como ligante secundário
<b>Data de defesa / Date:</b> 02/07/2024

<b>Comissão Julgadora / Examining committee</b>	<b>Resultado / Result</b>
Professor Eduardo Bellini Ferreira (orientador)	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Professor Rafael Salomão	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Mestre Vital Cruvinel Ferreira Filho	Aprovado
Instituição / Affiliation: Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa - Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee

  
\_\_\_\_\_  
**Professor Eduardo Bellini Ferreira**



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira, e à Universidade de São Paulo (USP), por fornecerem todo o apoio necessário durante a graduação.

Ao meu coorientador, Dr. Carlos Pagliosa Neto, por todo o suporte, aprendizado e ensinamentos durante o meu estágio na RHI Magnesita. Tive muitas oportunidades de aprendizagem durante o estágio, sempre aprendendo algo novo. É também uma pessoa exemplar para mim, tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

À RHI Magnesita que, juntamente do meu coorientador, forneceram a possibilidade de utilizar um estudo interno para o meu Projeto Final de Curso, além de fornecerem possibilidades e oportunidades de pesquisa e estudo.

Aos meus amigos da faculdade, em primário Paola Cristina Barbosa e José Ney Mergulhão Ghelfi, principalmente por toda a paciência que sempre tiveram comigo e por nunca terem me negado ajuda, e pelas trocas de experiência, pela amizade e por toda ajuda.

Aos meus amigos do estágio, por tornarem o ano que passei em Belo Horizonte mais leve e divertido, pelo conhecimento adquirido através das trocas de experiência e pela amizade.

Aos meus pais, Roberto Kiyoshi Kobayashi e Neuza Piratelli Kobayashi, por todo apoio necessário, e por toda a dedicação e amor que sempre tiveram comigo, e aos meus irmãos pelo mesmo motivo.



## RESUMO

**KOBAYASHI, F. K. P. Comparação da resistência mecânica a verde de tijolos refratários curados com diferentes tipos de dextrina como ligante secundário.** 2024. 58 f. Monografia (Projeto Final de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Tijolos refratários são materiais cerâmicos moldados necessários como revestimento interno para a operação de vários equipamentos que requerem alta temperatura, como, por exemplo, os usados na produção de metais, vidros e cimento. Logo, os tijolos refratários devem ser capazes de resistir a solicitações mecânicas, químicas e térmicas em elevadas temperaturas. Além disso, eles devem ter resistência mecânica a verde adequada, isto é, após prensagem e secagem em estufa, para que possam ser manuseados mantendo integridade de seu formato durante o processo pós-conformação, até a montagem final do produto no equipamento, ou até a queima, no caso de produtos queimados. Este estudo foca em refratários curados, ou seja, produtos não queimados cuja queima ocorre durante o aquecimento e uso no próprio processo a que se destina. Tijolos refratários que usam ligante primário hidráulico como ligante principal foram fabricados com diferentes tipos de dextrinas, usadas como ligantes secundários para conferir resistência mecânica a verde. Foram analisados cinco tipos de dextrina em uma mesma composição de tijolo refratário. Corpos de prova foram prensados e, após cura, ensaiados por compressão a frio. Os resultados foram analisados e estão apresentados graficamente, visando indicar qual dextrina proporciona a melhor resistência mecânica a verde em associação com o ligante primário hidráulico. Pela análise dos resultados foi possível concluir que há duas composições satisfatórias com os melhores resultados: uma que combina duas dextrinas diferentes, obtendo as vantagens de ambas nas duas condições de testes, e uma que utiliza somente uma dextrina.

Palavras-chave: tijolo refratário; resistência mecânica a verde; dextrina.



## ABSTRACT

KOBAYASHI, F. K. P. **Comparison of the green mechanical strength of tempered refractory bricks with several dextrans as secondary binder.** 2024. 58 f. Monograph (Final thesis) –São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2024.

Refractory bricks are shaped ceramic materials necessary as internal lining for the operation of many equipments that require high temperatures, such as those used in the production of metals, glass and cement. Therefore, refractory bricks must be able to withstand mechanical, chemical and thermal requirements at high temperatures. In addition, they must have suitable green mechanical strength, i.e. after pressing and drying in oven, so that they can be handled maintaining shape integrity during the post-forming process, until the final assembly of the product in the equipment, or until firing, in the case of fired products. This study focuses on tempered refractories, i.e. those whose firing happens during heating in the process for which they are intended. Refractory bricks that use a special hydraulic binder as the main binder were manufactured with different types of dextrans, used as secondary binders to increase green mechanical resistance. Five types of dextrin were evaluated in the same refractory brick composition. Specimens were pressed and, after tempering, tested by cold compression. The results were analyzed and are presented graphically in order to evaluate which dextrin provides the best green mechanical resistance in association with the special hydraulic binder. By analyzing the results, it was possible to conclude that there are two satisfactory compositions with the best results: one that combines two different dextrans, obtaining the advantages of both in the two tests conditions, and one that uses only one dextrin.

Keywords: refractory brick; green mechanical resistance; dextrin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento da produção global de aço ao longo dos anos.....	2
Figura 2 – Desenho esquemático de uma panela de RH para refino secundário de aço .....	3
Figura 3 – Os dez maiores produtores de aço em 2023.....	4
Figura 4 – Fluxo das de fabricação de tijolos refratários .....	9
Figura 5 – Estrutura molecular da dextrina .....	12
Figura 6 – Ilustração esquemática da ligação cruzada e do mecanismo de interação entre a dextrina e nanopartículas de Si.....	13
Figura 7 – Proporção de produção de tijolos de magnésia-cromita em uma planta de refratários.....	15
Figura 8 – Comparação do combustível consumido na produção de tijolo queimado e não queimado .....	16
Figura 9 – Fluxo de fabricação dos tijolos de magnésia-cromita deste estudo e seus corpos de prova.....	21
Figura 10 – Misturador de rolos utilizado neste trabalho.....	22
Figura 11 – Exemplo de teste manual de plasticidade da massa após mistura.....	23
Figura 12 – Prensa hidráulica utilizada para conformação dos tijolos .....	24
Figura 13 – Imagens exemplares de tijolos utilizados neste estudo .....	25
Figura 14 – Máquina universal de ensaios Kratos ECC 100 MP utilizada nos testes deste trabalho .....	26
Figura 15 – Exemplos de corpos de prova de RCTA .....	27
Figura 16 – Gráfico comparativo entre os resultados de resistência à compressão à temperatura ambiente das composições do primeiro grupo de testes.....	29
Figura 17 – Aumento relativo à REF das propriedades .....	30
Figura 18 – Gráfico comparativo entre os resultados de resistência à compressão à temperatura ambiente das composições do segundo grupo de testes .....	33
Figura 19 – Aumento relativo à REF das propriedades .....	33
Figura 20 – Avaliação visual das dextrinas A, referência e C utilizadas no segundo grupo de testes .....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Refratários classificados quanto à sua basicidade .....	8
Tabela 2 – Principais condições de processamento na obtenção de dextrinas e propriedades.	12
Tabela 3 – Influência das etapas de produção na pegada de carbono .....	17
Tabela 4 – Proporção relativa dos componentes de um tijolo magnésia-cromita .....	19
Tabela 5 – Composições do primeiro grupo de testes .....	20
Tabela 6 – Composições do segundo grupo de testes .....	20
Tabela 7 – Resultados do primeiro grupo de testes .....	29
Tabela 8 – Resultados do segundo grupo de testes .....	32



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCTA	–	Resistência à compressão à temperatura ambiente
t	–	Toneladas
h	–	Horas
°C	–	Graus Celsius
%	–	Porcento
MPa	–	Mega pascal
RH	–	Ruhrstahl Heraeus
MgO-Cr	–	Magnésia-Cromita



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Considerações iniciais.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>4</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Definição de material refratário .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Classificações de materiais refratários.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1. Basicidade .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2. Forma .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3. Processo de fabricação de materiais refratários .....</b>	<b>8</b>
<b>2.4. Matérias-primas.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4.1. Magnésia .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4.2. Cromita .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4.3. Ligantes .....</b>	<b>11</b>
<b>2.5. Tijolo refratário de magnésia-cromita.....</b>	<b>13</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Composições .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. Preparação dos tijolos .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Análise das propriedades físicas .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4. Teste de queima.....</b>	<b>27</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. Primeiro grupo de testes.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2. Segundo grupo de testes .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3. Análise visual e teste de queima das dextrinas.....</b>	<b>34</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>



# 1. INTRODUÇÃO

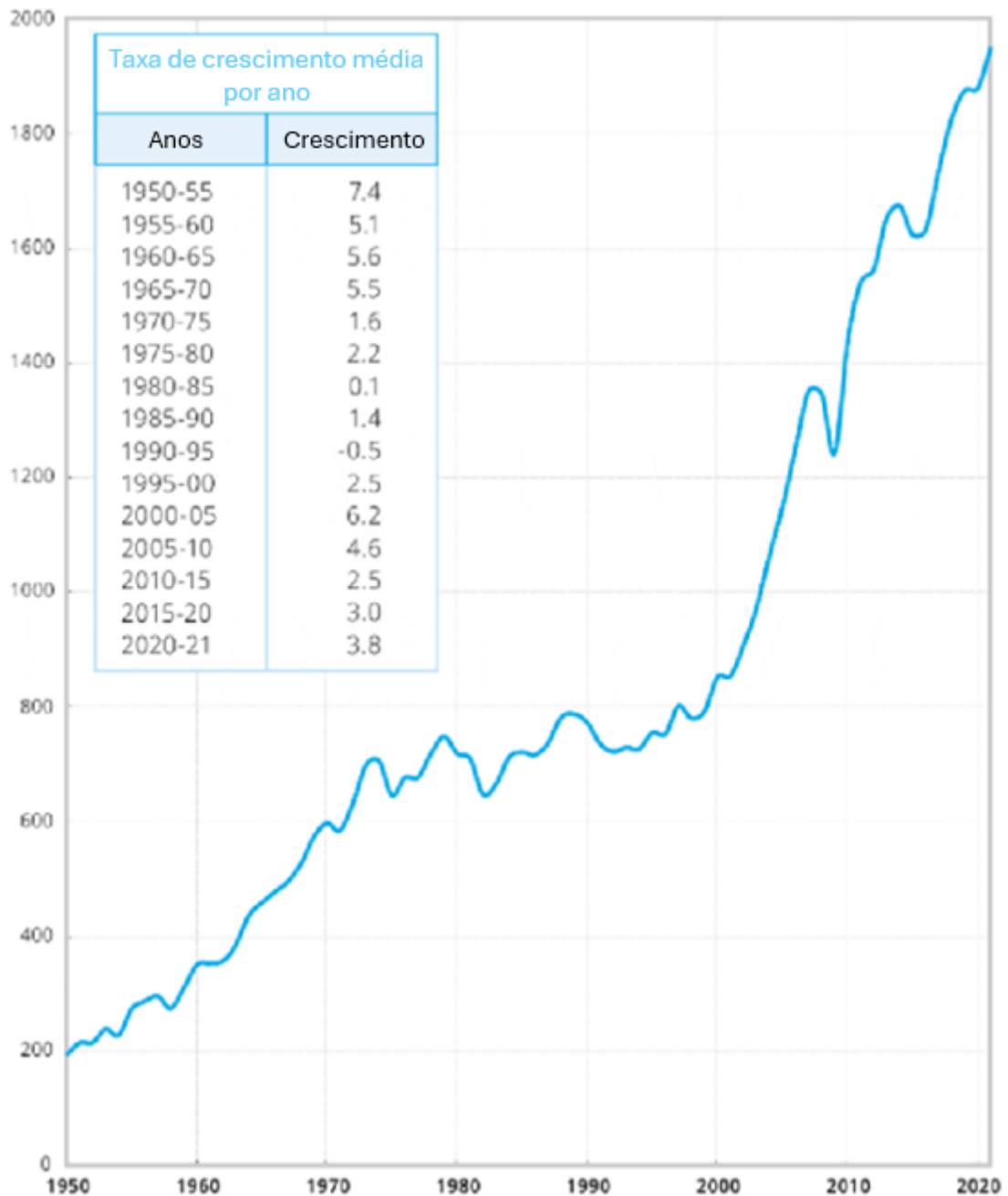
## 1.1. Considerações iniciais

Materiais refratários devem ter resistência à elevadas temperaturas, tanto resistência mecânica (por exemplo, resistência a impacto, compressão) quanto química (sendo inerte e não reativo) e térmica (sem se decompor ou fundir) pois são usados em ambientes severos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Eles são materiais policristalinos, polifásicos, inorgânicos (LANA, 2020) e normalmente são cerâmicos, como o óxido de magnésio, cujo ponto de fusão é 2800 °C (SCHACHT, 2004), mas também podem ser metálicos, como o tungstênio, cujo ponto de fusão é 3380 °C (HABASHI, 2001). Uma das principais aplicações dos materiais refratários é em tijolos refratários, utilizados como revestimento interno de diversos equipamentos (por exemplo, panela de aço, forno rotativo etc.) usados na fabricação e processamento de materiais como metais, vidros e cimentos. Assim, o consumo de tijolos refratários está diretamente ligado à produção desses materiais, que vem crescendo conforme a industrialização e o desenvolvimento da tecnologia aumentam, desta forma agindo como a força motriz para os avanços tecnológicos da indústria refratária (PASCOAL; PANDOLFELLI, 2000).

Dentre as aplicações do uso de refratários, a produção de aço é a que possui maior consumo: cerca de 70 % de todo o consumo de refratários no mundo é devido a produção de aço (RICHTER; SEIFERT, 2012). Assim, as necessidades da indústria siderúrgica têm grande impacto na indústria de refratários. O aumento da produção, redução dos custos e aumento da qualidade do aço influenciam diretamente o desenvolvimento e a produção de refratários que atendam tais necessidades (PASCOAL; PANDOLFELLI, 2000). O crescimento da produção de global aço ao longo dos anos é mostrado na Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Crescimento da produção global de aço ao longo dos anos

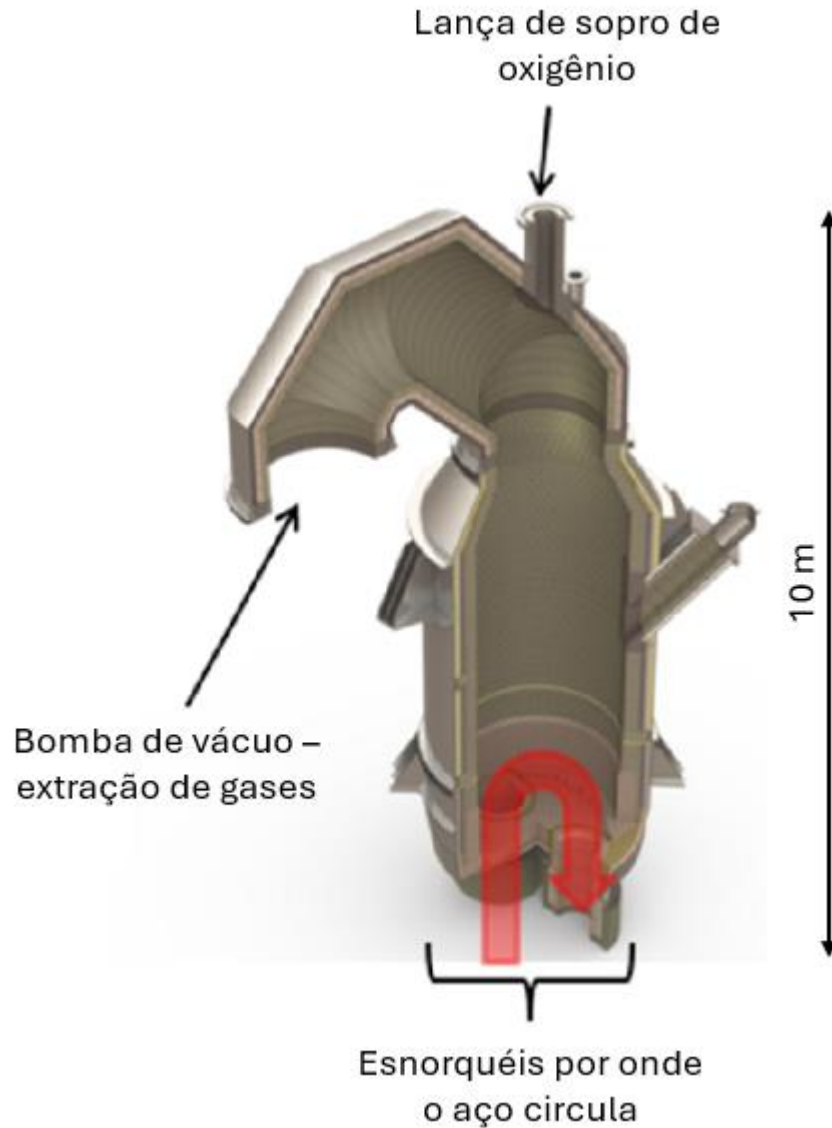
Milhões de toneladas, produção de aço bruto



Fonte: Adaptado de BASSON (2022).

O material de estudo do presente trabalho é um tijolo refratário de magnésia-cromita utilizado na indústria siderúrgica, mais especificamente em painéis de RH (Ruhrstahl Heraeus), que são equipamentos utilizados para realizar o refino secundário do aço (VART, 2016). Um desenho esquemático de uma panela de RH é mostrado na Figura 2.

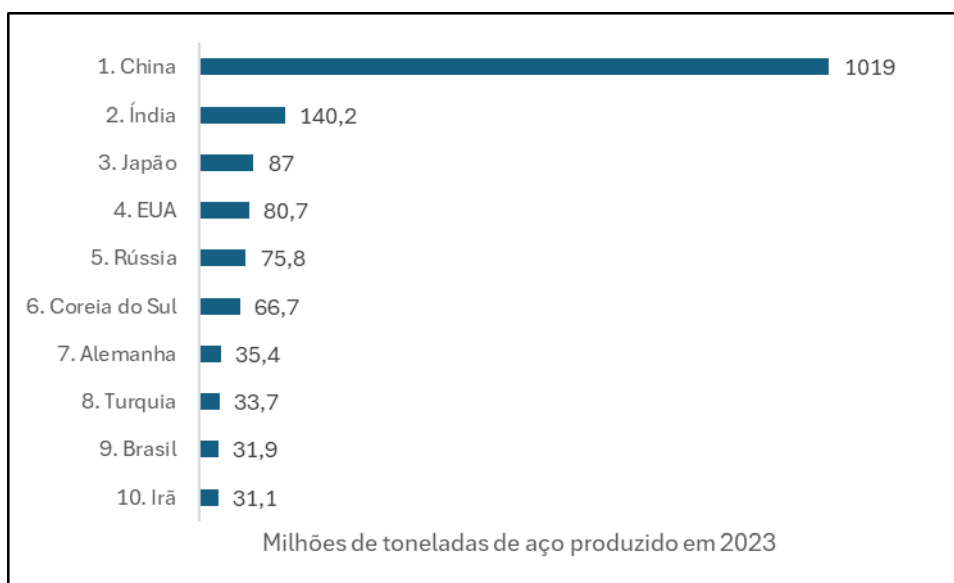
Figura 2 – Desenho esquemático de uma panela de RH para refino secundário de aço



Fonte: Adaptado de VART (2016).

O tamanho do mercado da indústria siderúrgica é grande: 1.888,2 milhões de toneladas de aço foram produzidos no ano de 2023 no mundo todo. No Brasil, 9º país que mais produz aço do mundo, o tamanho desse mercado foi de 31,9 milhões de toneladas nesse mesmo ano (FORDER 2024). A Figura 3 compara a quantidade de aço produzido em 2023 entre os países que produzem maiores quantidades de aço.

Figura 3 – Os dez maiores produtores de aço em 2023



Fonte: Adaptado de KOLISNICHENKO (2024).

Além de demandar resistência em elevadas temperaturas, os tijolos refratários também necessitam de resistência mecânica a verde para que possam ser manuseados desde logo após a prensagem, durante a entrada e saída na estufa para cura ou forno para queima, até a montagem final no equipamento. Tal resistência é necessária para que o tijolo não frature e não sofra danos em sua forma, mantendo sua integridade e os arestas.

Uma das formas de se aumentar a resistência mecânica a verde de um tijolo refratário é adicionando um ligante secundário em sua composição. Os ligantes são utilizados para garantir a coesão entre os diferentes tipos de materiais utilizados na fabricação dos tijolos, principalmente os agregados de maior tamanho e matriz com partículas finas (ALSAQOOR *et al.*, 2022), aumentando a resistência mecânica. Existem diversos tipos de ligantes, como piche, resinas termofixas, alumina hidratada, cimentos de aluminato de cálcio, dextrina etc. (BITTENCOURT; PANDOLFELLI, 2013) Neste estudo, foi estabelecido um produto padrão (ligante primário hidráulico) como ligante principal, e cinco diferentes dextrinas foram avaliadas como ligante secundário.

## 1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi comparar a resistência mecânica a verde de um tipo de tijolo refratário fabricado pela RHI Magnesita utilizando diferentes dextrinas, a fim de se

obter um aumento dessa resistência, pois a atual não vem satisfazendo as solicitações de tijolos de grandes dimensões. Esse material utiliza como ligante principal um produto chamado de ligante primário, que é hidráulico (ou seja, a base de água), e já utiliza dextrina como ligante secundário em sua composição, sendo esta dextrina utilizada como referência. Quatro outras dextrinas foram testadas para comparar seus resultados com os da referência, bem como combinações entre as que apresentaram os melhores resultados para verificar se as suas qualidades se combinavam, obtendo melhores propriedades no tijolo. Para verificar o aumento da resistência mecânica foi utilizado o ensaio de compressão a frio.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Definição de material refratário**

Material refratário é uma classe de materiais cuja principal característica é resistir a altas temperaturas (normalmente até 1700 °C), mantendo-se inerte e sem alterar sua forma (BORGES *et al.*, 2023). Eles são encontrados principalmente na forma de óxidos, carbetos e nitretos (SENGUPTA, 2020). Além disso, eles também precisam resistir a solicitações mecânicas, ataques químicos e choque térmico, pois são usados em ambientes de condições extremas que exigem tais características. Por exemplo, um tijolo refratário usado em uma panela de aço deve resistir ao seu próprio peso e ao peso de todos os outros tijolos acima dele, resistir ao ataque químico do banho metálico e/ou da escória, resistir ao choque térmico que ocorre no aquecimento, carregamento e resfriamento do equipamento, resistir à abrasão causada por líquidos, gases e partículas, resistir ao impacto do carregamento metálico etc. A variedade desses materiais é muito alta, tendo em vista que suas aplicações possuem solicitações bem específicas, variando de equipamento para equipamento, bem como da região desses equipamentos: regiões diferentes podem possuir solicitações diferentes (SCHACHT, 2004).

### **2.2. Classificações de materiais refratários**

Existem diversas classificações de materiais refratários. Algumas delas serão discutidas a seguir: basicidade, forma e tratamento térmico.

#### **2.2.1. Basicidade**

Quanto à basicidade, os materiais refratários podem ser classificados em ácidos, básicos ou anfóteros, dependendo da eletronegatividade do elemento atômico principal (cátion do óxido). Quanto mais eletronegativo é esse elemento, mais ácido ele é, quanto mais eletropositivo, mais básico ele é (SENGUPTA, 2020). A Tabela 1 mostra alguns exemplos de refratários classificados quanto à sua basicidade.

Tabela 1 – Refratários classificados quanto à sua basicidade

Refratários ácidos	Refratários básicos	Refratários anfóteros
SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ZrO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		Carbono

Fonte: SENGUPTA (2020).

A basicidade do refratário é importante pois o produto é escolhido de acordo com o serviço que ele vai ter, para minimizar o ataque químico que o tijolo sofrerá do banho metálico. Por exemplo em um equipamento que possui escória básica faz-se necessário o uso de refratários básicos (SENGUPTA, 2020).

### 2.2.2. Forma

Os refratários podem ser classificados em moldados e não moldados.

Dentre os moldados, destacam-se os tijolos e os pré-moldados. Esses materiais são fabricados de tal forma que possuam forma definida, de acordo com o uso especificado do produto. No caso dos tijolos a massa refratária (mistura das matérias-primas) é prensada no formato do tijolo em uma prensa. Já para os pré-moldados, a massa refratária é vibrada em moldes no formato da peça desejada.

Para os não moldados, destacam-se os monolíticos, argamassas e massas de tamponamento. A principal característica dessa classe é não possuir forma definida. Sendo assim, a massa refratária não passa por uma etapa de moldagem, e o produto é vendido na forma de massa (SENGUPTA, 2020).

### 2.3. Processo de fabricação de materiais refratários

O processo de fabricação dos materiais refratários varia de acordo com o material, mas algumas etapas são comuns à maioria desses produtos. Para os tijolos refratários, o processo consiste nas seguintes etapas:

**Pesagem:** pesa-se a quantidade necessária de cada matéria-prima do produto a ser fabricado, de acordo com a composição elaborada (LANA, 2020).

Mistura: é uma das etapas mais importantes da fabricação do tijolo refratário, pois há muitas variáveis e seu resultado influencia diretamente as etapas seguintes e o produto. Nesta etapa, mistura-se as matérias-primas em uma ordem específica. Essa ordem, bem como o tempo de mistura, são variáveis de acordo com o tipo de material. Ao produto resultante da mistura dá-se o nome de massa refratária (LANA, 2020).

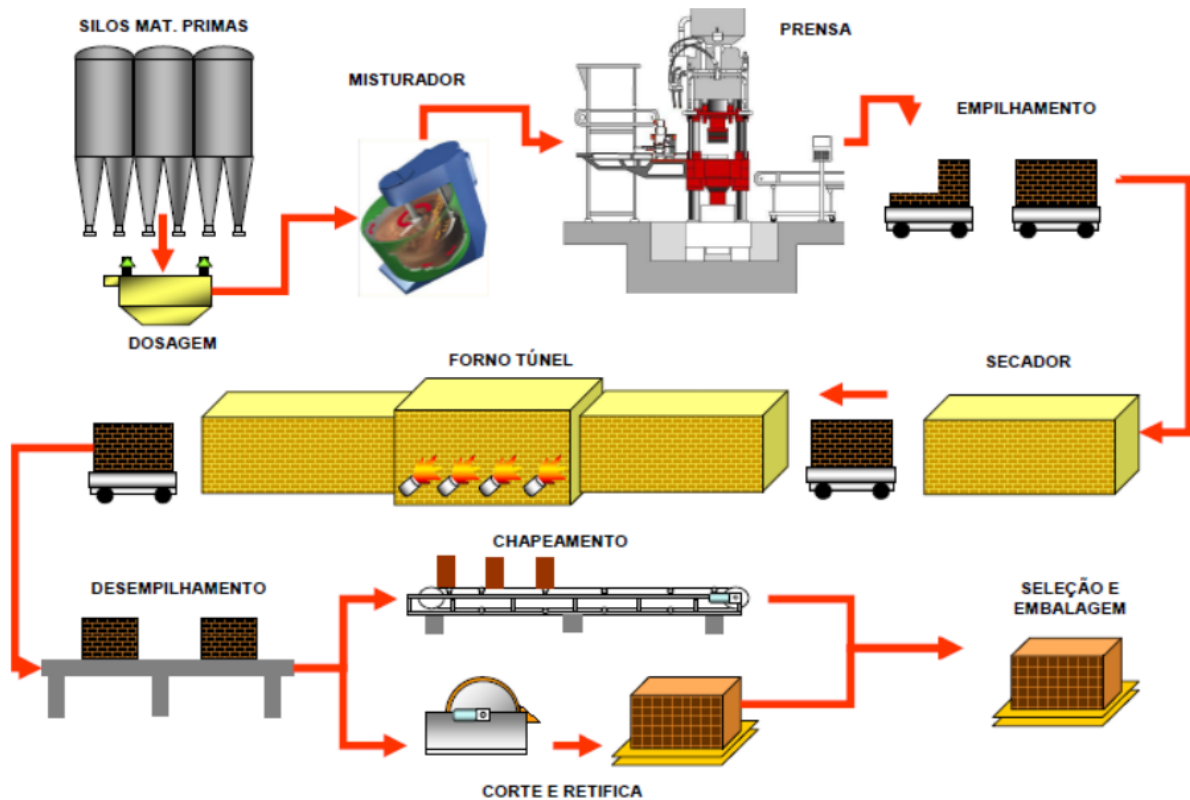
Prensagem: etapa presente apenas na fabricação de materiais refratários moldados, é responsável por dar a forma ao produto, por exemplo, um tijolo refratário.

Tratamento térmico: é a etapa responsável por dar as propriedades finais do material através de reações termicamente ativadas como, por exemplo, a cura da resina, sinterização etc. (LANA, 2020).

Após o tratamento térmico, o tijolo refratário está praticamente pronto para uso. Suas últimas etapas são finalizações como, por exemplo, retífica ou corte, e posteriormente embalagem dos produtos (LANA, 2020).

O fluxo de fabricação de tijolos refratários é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxo das de fabricação de tijolos refratários



Fonte: Cortesia da RHI Magnesita.

## 2.4. Matérias-primas

Existem diversas matérias-primas utilizadas nos materiais refratários. Neste capítulo, são abordadas matérias-primas utilizadas em tijolos de magnésia-cromita.

### 2.4.1. Magnésia

A magnésia (MgO), ou periclásio, é o óxido mais utilizado na indústria dos refratários para siderurgia, uma vez que possui caráter básico, portanto sendo resistente às escórias básicas, e elevado ponto de fusão de 2800°C. Ela pode ser fabricada utilizando como matéria-prima minerais, como por exemplo a magnesita, e água do mar, esta última por sua vez produz magnésias mais puras. Além disso as magnésias podem ser produzidas por sinterização ou por eletrofusão. As magnésias eletrofundidas são mais puras e possuem cristais maiores, sendo, portanto, melhores que as sinterizadas quanto à resistência ao ataque de escória (VERT, 2016).

### 2.4.2. Cromita

A cromita é um mineral fonte de óxido de cromo, que possui como uns dos seus principais constituintes os espinélios  $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgOCr}_2\text{O}_3$ . É considerada como tendo basicidade neutra, ou anfótera, e possui elevado ponto de fusão (2300°C) e boa resistência ao ataque de escória, além de não possuir carbono, o que é uma vantagem para a produção de aços com baixo teor de carbono (VERT, 2016). Seu uso na indústria refratária teve crescimento após 1950, sendo principalmente utilizada em tijolos de magnésia-cromita de convertedores de cobre, fornos rotativos para fabricação de cimento, painéis de aço (SCHACHT, 2004) e painéis de RH para refino secundário de aço (VERT, 2016). Contudo seu uso tem diminuído pois este material ao entrar em contato com álcalis em altas temperaturas pode gerar  $\text{Cr}^{+6}$ , que é tóxico e solúvel em água (SENGUPTA, 2020). Portanto, atualmente há vários estudos que investigam alternativas para evitar seu uso (BORGES *et al.*, 2023).

Outra matéria-prima com óxido de cromo utilizada em refratários são os grãos de magnésia-cromo, ou magnésia-cromita, que nada mais são do que o processamento de grãos de magnésia junto de cromita, onde eles são moídos, misturados e briquetados juntos.

Posteriormente esses grãos vão para sinterização ou para eletrofusão, onde serão enfim produzidos os grãos de magnésia-cromo sinterizados ou eletrofundidos (SCHACHT, 2004).

### **2.4.3. Ligantes**

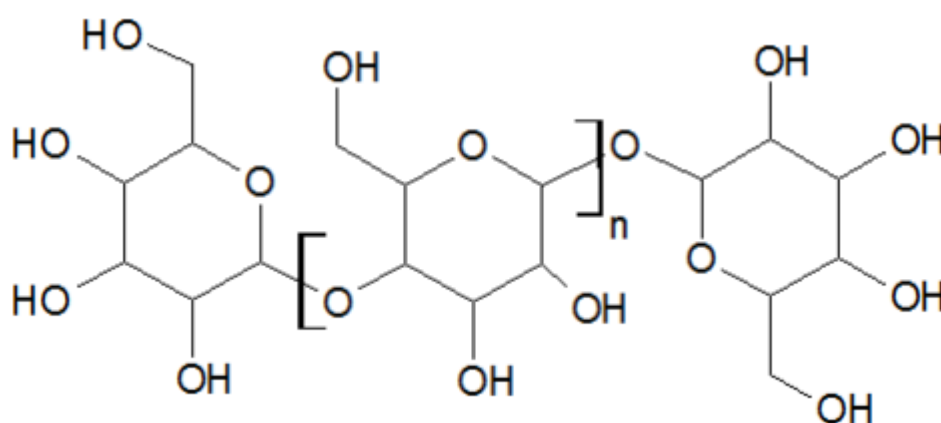
O papel dos ligantes na massa refratária é o de manter a coesão entre as diferentes matérias-primas, agregados e matriz, de tal forma que seja possível manusear adequadamente o produto refratário. No caso de um tijolo refratário, é necessário que este tenha integridade física, evitando defeitos, deformações e quebras. Para que isso ocorra, o ligante deve ser capaz de molhar os agregados e a matriz, revestindo-os da forma mais homogênea possível. Vê-se, então, a necessidade de se realizar uma boa mistura na fabricação do refratário (SCHACHT, 2004). A ligação formada pelo ligante tem impacto direto na densidade do tijolo refratário, pois ligações melhores tenderão a ter uma maior densidade. Em casos em que o refratário possui carbono o ligante também pode ter a função de formar carbono residual (VERT, 2016).

Os ligantes podem ser inorgânicos, como fosfatos, silicatos e cimentos de aluminato de cálcio, ou orgânicos, como piches, resinas, lignosulfonatos, amidos e dextrinas (SCHACHT, 2004).

#### **2.4.3.1. Dextrina**

A dextrina é um polissacarídeo natural, orgânico, de cadeia ramificada com grupamentos hidroxila que deriva da hidrólise parcial do amido, processo esse que é conhecido por dextrinização e ocorre em condições específicas, sendo necessário aquecimento e catalisadores ácidos. Este amido pode ser proveniente de diversas fontes naturais, como, por exemplo, mandioca, milho, batata etc. Tanto o amido quanto a dextrina são solúveis em água, porém como a dextrina é derivada da hidrólise do amido, ela possui cadeia polimérica menor e, portanto, é mais solúvel em água (LUNKES, 2015). A estrutura molecular da dextrina é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Estrutura molecular da dextrina



Fonte: LUNKES (2015).

Dependendo das condições do processamento a dextrina pode ter variações de propriedades, como coloração, solubilidade etc., e podem ser divididas em três classes: a dextrina branca, a canária e a goma britânica. Condições de processamento e propriedades dessas três classes são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais condições de processamento na obtenção de dextrinas e propriedades

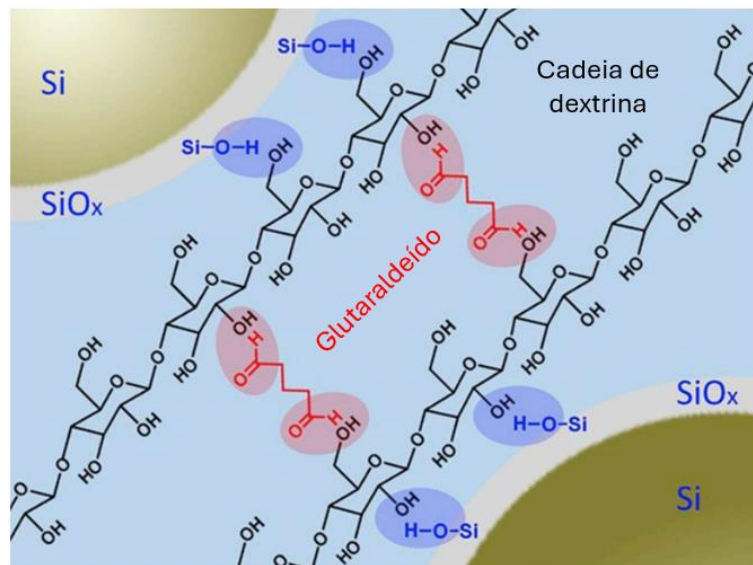
Parâmetro	Branca	Canária	Goma Britânica
Temperatura de torrefação (°C)	110 – 130	135 – 160	150 – 180
Tempo de torrefação (h)	3 – 7	8 – 14	10 – 24
Quantidade de catalisador	Alta	Média	Baixa
Solubilidade em H <sub>2</sub> O	Baixa a alta	Alta	Baixa a alta
Viscosidade	Baixa a alta	Baixa	Baixa a alta
Coloração	Branco ao creme	Amarelo claro e escuro	Clara a amarelo escuro

Fonte: LUNKES (2015).

O uso de polissacarídeos, entre eles a dextrina, para o processamento cerâmico é muito estudado e comum. Devido aos grupamentos hidroxilas, esses materiais são capazes de interagir através de ligações de hidrogênio ou pela formação de complexos pelas hidroxilas, o que os torna potenciais ligantes solúveis em água (LUNKES, 2015).

Chen *et al.* (2020) estudaram dextrinas com ligações cruzadas como ligantes aquosos para ânodos a base de silício, e ilustrou que a ligação da dextrina com o silício e da dextrina com o glutaraldeído pode ser representada conforme indicado na Figura 6. Note que as ligações são formadas pelos grupos hidroxila da dextrina ligando-se com o óxido de silício quando disperso em água, formando ligações de hidrogênio, que também são formadas entre a dextrina e o glutaraldeído. Nesse estudo, o glutaraldeído é adicionado para que faça ligação de hidrogênio com a dextrina, impedindo que ela forme ligação de hidrogênio intramolecular, que é uma ligação mais fraca.

Figura 6 – Ilustração esquemática da ligação cruzada e do mecanismo de interação entre a dextrina e nanopartículas de Si



Fonte: Adaptado de CHEN *et al.* (2020).

## 2.5. Tijolo refratário de magnésia-cromita

Em 1950 um estudo descobriu a existência de uma “ligação direta” entre os grãos de magnésia e de cromita no tijolo refratário de magnésia-cromita. A partir desse momento o uso

desses tijolos começou a crescer bastante, sendo principalmente utilizados em convertedores de cobre e painéis de RH para refino secundário (SCHACHT, 2004).

Quanto ao tipo de ligação entre os grãos de magnésia e cromita, esses tijolos podem ser classificados em quatro tipos:

- Ligação direta: os grãos de magnésia e de cromita são misturados juntos, na massa refratária, e após a prensagem o tijolo é queimado a temperaturas acima de 1700°C para que ocorra a sinterização. Esse processo irá criar uma ligação direta (cerâmica) entre os grãos de magnésia e os de cromita. Diz-se ligação direta pois normalmente esses grãos são ligados através de silicatos (FARRINGTON *et al.*, 1974).
- Religados: considera-se religados os tijolos com grãos de magnésia-cromita eletrofundida. A ligação entre os grãos de magnésia e de cromita ocorre na fusão, processo de fabricação da matéria-prima em questão. Esse material sinteriza melhor após a queima do que o anterior.
- Fundidos: trata-se de tijolos refratários de magnésia-cromita que são fabricados por fusão. As matérias-primas do tijolo são misturadas, fundidas e vertidas no molde do tijolo. Esse processo de fabricação torna esses tijolos muito caros e, além disso, eles possuem poros que são gerados durante o resfriamento do tijolo. Esse tipo de material tem a vantagem de ter excelente resistência à corrosão.
- Não queimados: neste caso o tijolo não é queimado e, portanto, não há sinterização (queima de 1700°C) durante sua fabricação, apenas cura em estufa (200°C a 300°C), e a interação entre os grãos de magnésio e cromita é mais fraca inicialmente se comparado com os sinterizados (RIGAUD *et al.*, 2018). Esses materiais não requerem queima pois são projetados para sinterizarem durante o uso, ou seja, inicialmente sua resistência é menor, mas ela aumenta após a instalação e uso. Portanto, esses tijolos não queimados precisam ter resistência mecânica o suficiente para seu manuseio durante a produção, transporte e montagem no equipamento, sem perder sua integridade. Essa resistência mecânica, que é a verde, é fornecida pelo ligante, que se torna de suma importância pois ele será o responsável pela integridade do produto desde a produção até o início do seu uso, diferente dos queimados que após a fabricação já possuem elevada resistência mecânica, conferida pela sinterização (GOTO, 1997; ISHIHARA, 2023).

A grande maioria dos tijolos magnésia-cromita produzidos são queimados, e apenas uma pequena parcela é não queimada, conforme apresentado na Figura 7.

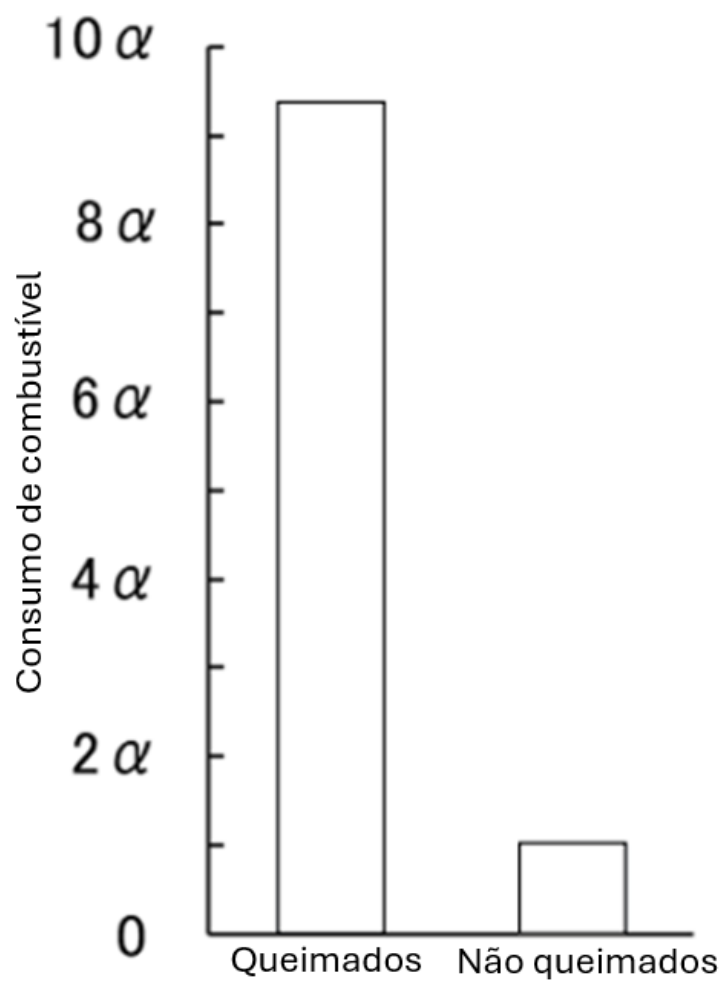
Figura 7 – Proporção de produção de tijolos de magnésia-cromita em uma planta de refratários



Fonte: Adaptado de ISHIHARA (2023).

A vantagem de se produzir um tijolo refratário sem necessitar de queima é a energia gasta: conforme mostrado na Figura 8, tijolos de magnésia-cromita não queimados consomem cerca de nove vezes menos combustível para sua fabricação, por não requererem queima, e isto reflete diretamente na redução do impacto ambiental pois a queima emite  $\text{CO}_2$ . A queima (tratamento térmico) dos tijolos refratários é a segunda etapa do processo de fabricação que mais emite  $\text{CO}_2$ , como pode ser visto na Tabela 3.

Figura 8 – Comparação do combustível consumido na produção de tijolo queimado e não queimado



Fonte: Adaptado de ISHIHARA (2023).

Tabela 3 – Influência das etapas de produção na pegada de carbono

Etapas de produção	Emissão de CO <sub>2</sub> (kg)	Emissão de CO <sub>2</sub> (%)
Matéria-prima	1802,5	59,9
Transporte	211,6	7,0
Preparação do lote	43,4	1,4
Prensagem	18,2	0,6
Tratamento térmico	865,4	28,8
Finalização	9,5	0,3
Embalagem	59,3	2,0
Total	3009,9	100

Fonte: Adaptado de KÖNIGSHOFER (2012).

Feita esta revisão bibliográfica, atesta-se que o material de estudo deste trabalho foi um tijolo refratário curado (não queimado), que utiliza dextrina como um dos seus ligantes, a fim de proporcionar resistência mecânica a verde.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Composições

O material utilizado no estudo se trata de um tipo de tijolo cromo-magnésiano produzido pela RHI Magnesita, e sua composição é esquematizada na Tabela 3, mas otimizada por questão de sigilo. Os sinais de adição denotam a proporção relativa de uso da matéria-prima: maior quantidade de sinais de adição significa maior concentração dessa matéria-prima no material, menor quantidade de sinais significa menor concentração.

Tabela 4 – Proporção relativa dos componentes de um tijolo magnésia-cromita

<b>Matéria-prima</b>	<b>(%)</b>
Magnésia-cromita eletrofundida	+ + + + +
Magnésia sinterizada	+
Cromita	+ +
Ligante primário a base de água	+
Dextrina	+

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para atingir o objetivo do estudo algumas composições diferentes foram testadas, variando apenas a dextrina utilizada, bem como sua quantidade. Para verificar qual dextrina proporcionava a melhor resistência mecânica a verde foi realizado o ensaio de resistência à compressão à temperatura ambiente. É importante ressaltar que a dextrina nesse material é o ligante secundário, responsável apenas pelo aumento da resistência mecânica a verde do material; o ligante primário do tijolo é um ligante a base de água.

Dois grupos de testes foram realizadas:

O primeiro grupo de testes teve como objetivo comparar o material (tijolo) com 5 diferentes dextrinas, bem como verificar se o aumento da porcentagem de dextrina utilizada seria benéfico para a resistência mecânica a verde. As composições testadas estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 5 – Composições do primeiro grupo de testes

<b>Composições</b>	<b>Dextrina usada</b>	<b>% de dextrina</b>
<b>REF</b>	Dextrina referência	2
<b>REF+</b>	Dextrina referência	3
<b>A</b>	Dextrina amostra A	2
<b>B</b>	Dextrina amostra B	2
<b>C</b>	Dextrina amostra C	2
<b>D</b>	Dextrina amostra D	2

Fonte: Elaborada pelo autor.

O segundo grupo de testes teve por objetivo verificar se a união de diferentes dextrinas e se o aumento da porcentagem de dextrina seria benéfico para o objetivo do estudo. As composições testadas estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 6 – Composições do segundo grupo de testes

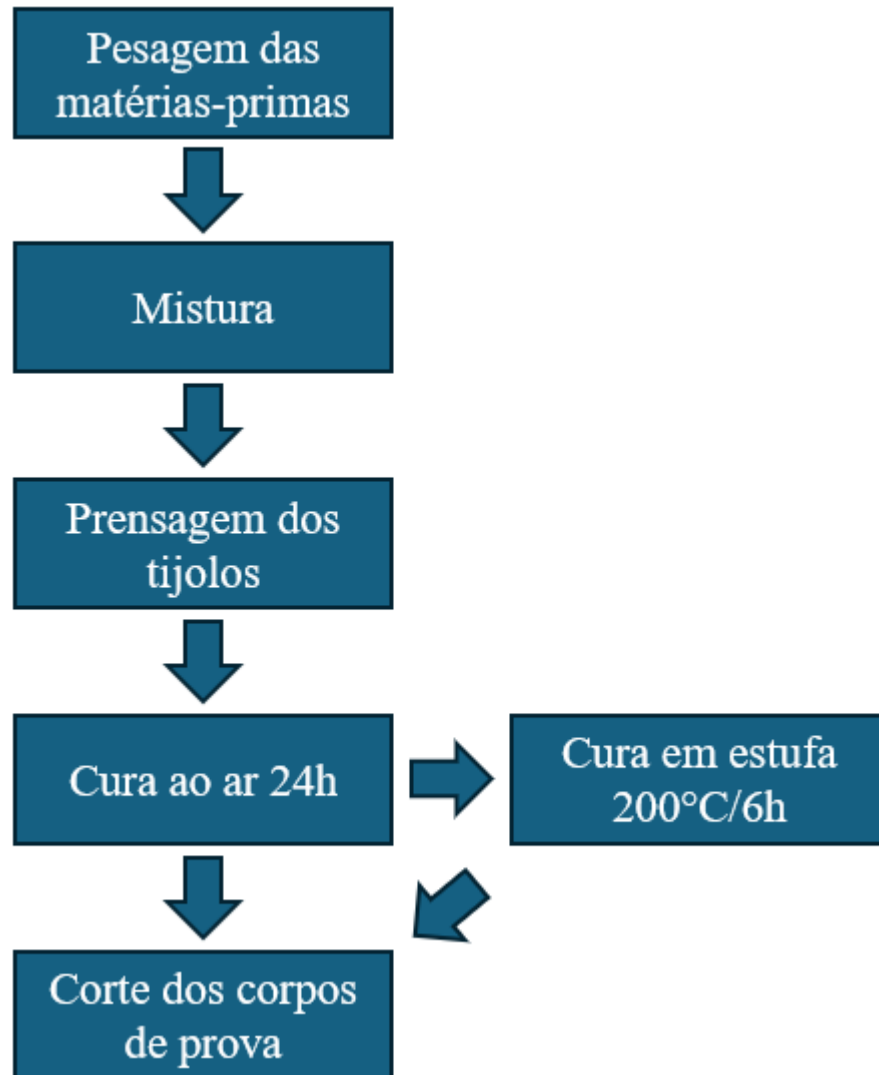
<b>Composições</b>	<b>Dextrina usada</b>
<b>REF</b>	Dextrina referência (2 %)
<b>AC</b>	Dextrina amostra A (1 %) + Dextrina amostra C (1 %)
<b>AC+</b>	Dextrina amostra A (1 %) + Dextrina amostra C (2 %)

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2. Preparação dos tijolos

O fluxo de fabricação dos tijolos de magnésia-cromita deste trabalho é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxo de fabricação dos tijolos de magnésia-cromita deste estudo e seus corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente as matérias-primas secas foram pesadas e separadas em sacos plásticos de acordo com a programação das composições. O ligante principal é pesado somente na hora da mistura, por ser a base de água. O próximo passo foi levar as matérias-primas para a área de mistura e prensagem.

A forma de mistura e de prensagem utilizada foi a mesma para todas as composições. As misturas foram feitas em um misturador de rolos, mostrado na Figura 10, com capacidade de 10 kg da seguinte forma: a mistura foi iniciada adicionando-se apenas a fração fina no misturador e, após um minuto de mistura, foi adicionado o ligante primário e misturou-se por 7 minutos. Posteriormente adicionou-se a dextrina e misturou-se por 6 minutos. Por fim, as

frações média e grossa foram adicionadas e misturou-se por 7 minutos. Realizada a mistura para a homogeneização das matérias-primas na massa, ela foi descarregada em um recipiente para ser transportada para a prensa. Entre a mistura e a prensagem é realizado um teste da plasticidade da massa, pegando-se uma pequena quantidade da massa com a mão e apertando-se manualmente para verificar se a plasticidade da massa está satisfatória, isto é, se ela mantém sua forma em vez de se desmanchar. Um exemplo desse teste é mostrado na Figura 11.

Figura 10 – Misturador de rolos utilizado neste trabalho



Fonte: Próprio autor.

Figura 11 – Exemplo de teste manual de plasticidade da massa após mistura



Fonte: Próprio autor.

Os tijolos foram prensados em uma prensa hidráulica FKL 420 TF, mostrada na Figura 12, no formato 160x85x50 mm<sup>3</sup>, e a sequência de prensagem utilizada foi 100 t, 150 t, 300 t e 420 t, que, em termos de pressão, correspondem a aproximadamente 72 MPa, 108 MPa, 216 MPa e 303 MPa, respectivamente.

Figura 12 – Prensa hidráulica utilizada para conformação dos tijolos



Fonte: Próprio autor.

Imediatamente após a prensagem mediu-se densidade aparente geométrica do primeiro tijolo de cada composição dividindo seu peso pelo seu volume. O peso foi medido com uma balança digital, e o volume foi calculado considerando o tijolo como um prisma perfeito, e suas dimensões foram medidas utilizando um paquímetro digital. Isto é realizado pois a densidade aparente geométrica é um dos métodos de controle de qualidade do processo, ou seja, se este resultado estiver dentro de um intervalo de valores específico, o processo de prensagem pode ser continuado normalmente. Posteriormente, os tijolos foram colocados em uma bancada para cura ao ar durante 24 h. Após a cura ao ar, metade dos tijolos foi encaminhada para testes e a outra metade para cura na estufa elétrica a 200 °C por 6 horas.

Após isso os tijolos foram enviados para corte, utilizando-se uma serra diamantada para cortá-los nos formatos dos corpos de prova para os ensaios. Imagens exemplares dos tijolos utilizados estão mostradas na Figura 13. Note que os tijolos são paralelepípedos de dimensões 160x85x50 mm<sup>3</sup>, e são densos, pesando cerca de 2,3 kg.

Figura 13 – Imagens exemplares de tijolos utilizados neste estudo



Fonte: Próprio autor.

### 3.3. Análise das propriedades físicas

Os testes foram realizados nas condições após cura ao ar durante 24 h e após cura ao ar durante 24 h mais cura na estufa por 200 °C/6h.

Todos os corpos de prova dos ensaios de propriedades físicas passam por medições dimensionais utilizando-se um paquímetro digital para assegurar que estão dentro da norma do ensaio a que se destina e para eventuais cálculos, como o da resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA).

O ensaio de resistência à compressão à temperatura ambiente foi realizado em uma máquina universal de ensaios Kratos ECC 100 MP, mostrada na Figura 13, utilizando três corpos de prova no formato cúbico de 50x50x50 mm<sup>3</sup> de acordo com a norma JIS R 2206.

Figura 14 – Máquina universal de ensaios Kratos ECC 100 MP utilizada nos testes deste trabalho



Fonte: Próprio autor.

A taxa de aumento da carga vertical compressiva utilizada foi de  $200,0 \pm 0,1$  kgf/s e, assim, o ensaio foi feito até que ocorresse a ruptura da amostra. O valor considerado utilizado para a medição da resistência à compressão à temperatura ambiente é o máximo valor obtido durante o ensaio, que é medido em kgf. O RCTA então é medido dividindo-se o máximo valor de força obtido ( $F$ , em kgf) pela área medida ( $A$ , em  $\text{mm}^2$ ) multiplicado pela gravidade  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , obtendo-se o resultado de RCTA em MPa conforme a Equação 1.

$$RCTA = g \cdot \frac{F}{A} \quad (1)$$

Exemplos de corpos de prova de RCTA são mostrados na Figura 14.

Figura 15 – Exemplos de corpos de prova de RCTA



Fonte: Próprio autor.

### 3.4. Teste de queima

O teste de queima das dextrinas foi realizado colocando-se uma quantidade fixa de dextrina sobre uma superfície pré-aquecida a 800°C. Observou-se, então, quanto tempo cada dextrina levava para queimar por completo, a coloração da fumaça liberada (fuligem) e a altura das chamas. O objetivo deste teste é comparar as emissões atmosféricas liberadas pela queima das dextrinas, sendo importante para ter uma breve noção do impacto ambiental causado pela queima da dextrina durante o uso do tijolo refratário em elevadas temperaturas.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Primeiro grupo de testes

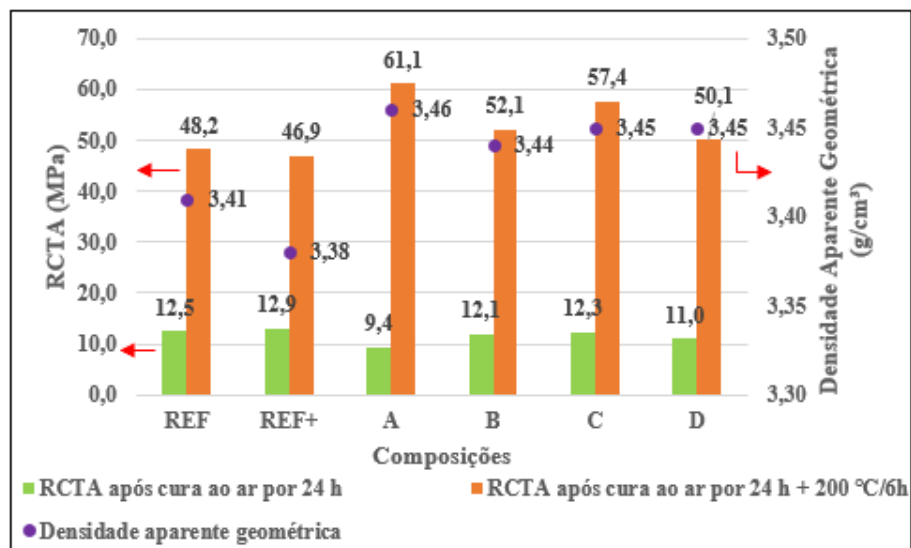
Os resultados do primeiro grupo de testes estão presentes na Tabela 6 e nas Figuras 15 e 16. Como foram utilizados três corpos de prova por ensaio, esta tabela mostra as médias e seus respectivos desvios-padrão. Note que a densidade aparente geométrica não possui desvio padrão, pois é calculada utilizando-se apenas o primeiro tijolo prensado.

Tabela 7 – Resultados do primeiro grupo de testes

Composições	Densidade aparente geométrica (g/cm <sup>3</sup> )	RCTA cura ao ar 24 h (MPa)	RCTA cura ao ar 24 h + 200 °C/6h (MPa)
REF	3,41	12,5 ± 0,3	48,2 ± 3,1
REF+	3,38	12,9 ± 0,2	46,9 ± 4,5
A	3,46	9,4 ± 0,3	61,1 ± 5,0
B	3,44	12,1 ± 0,6	52,1 ± 6,0
C	3,45	12,3 ± 0,9	57,4 ± 5,1
D	3,45	11,0 ± 0,8	50,1 ± 0,9

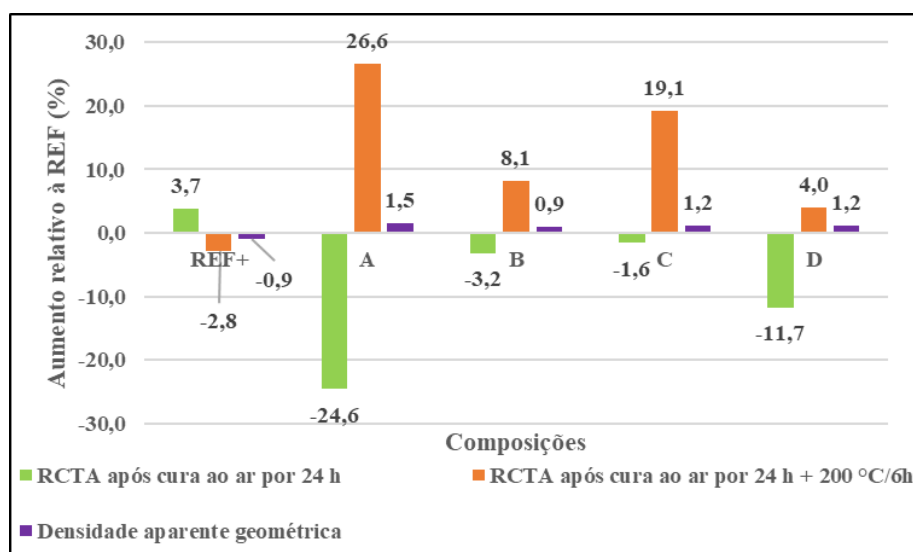
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Gráfico comparativo entre os resultados de resistência à compressão à temperatura ambiente das composições do primeiro grupo de testes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Aumento relativo à REF das propriedades



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um dado importante que não é medido em valores: as misturas de todas as composições apresentaram boa plasticidade, sendo essa uma importante característica para que a prensagem seja bem-sucedida. Entretanto, a composição REF+ apresentou um aspecto ligeiramente mais seco em relação às demais, o que é esperado pois essa composição possuía mais dextrina, que absorve a água, reduzindo a plasticidade total da massa. Pode-se notar que embora isso não tenha afetado significativamente a prensagem (foi possível prensar o tijolo sem lascamento nas quinas dos tijolos), a densidade aparente geométrica foi afetada negativamente. Todas as densidades aparentes geométricas deram satisfatórias, ou seja, todas estavam dentro do intervalo de valores especificado pelo processo de controle de qualidade, intervalo esse que não será revelado por questões de sigilo industrial, bastando apenas saber que os resultados foram satisfatórios quanto à sua demanda.

A primeira coisa que se nota nos resultados é que a adição de mais dextrina não melhora significativamente os resultados, gerando um leve aumento de 3 % da resistência à compressão à temperatura ambiente após cura ao ar por 24 h, e diminuição de 0,9 % da densidade aparente geométrica e de 2,8 % da resistência à compressão à temperatura ambiente após estufa. Isto significa que o aumento da porcentagem de dextrina no tijolo, sem adicionar mais água, não produz melhoria significativa na resistência mecânica, pois há mais dextrina solubilizando-se na água e conseqüentemente ocorre um aumento da viscosidade (da dextrina com a água), o que resulta em uma piora na capacidade da ligação gerada pela dextrina com as demais matérias-primas do tijolo.

Embora a REF+ tenha obtido a maior resistência à compressão à temperatura ambiente na primeira condição, ressalta-se que todos os resultados para esta condição estão muito próximos, com exceção das composições A e D que deram diferença relativa maior que 10 %, diferença essa que, além de ser alta, é negativa.

Curiosamente a composição A obteve os resultados mais extremos: a menor resistência à compressão à temperatura ambiente na primeira condição, sendo essa muito menor do que a da REF, e a maior na segunda condição, muito maior que a REF. Isso nos indica que esta dextrina possui um alto potencial para a capacidade de ligar as diferentes partículas das matérias-primas do tijolo, mas que esse potencial não é de imediato, ele demanda tempo e temperatura. Esta dextrina gerou a menor resistência ao ar, mas a maior após cura em estufa, ou seja, possivelmente seu aumento da coesão entre diferentes partículas é ativado termicamente. Tendo em vista essa dificuldade de se ligar mais rapidamente, uma hipótese é que essa dextrina possui cadeias moleculares maiores, que a torna menos solúvel em água e mais viscosa (SUN; KANG; SHI, 2021; SUN *et al*, 2010), o que dificulta que a solução aquosa molhe toda a massa de forma homogênea, reduzindo sua capacidade de manter a coesão entre os diferentes materiais.

Nota-se também que todas as composições com dextrinas diferentes da dextrina REF obtiveram maiores valores de densidade aparente geométrica (demonstrando uma boa compactação de partículas) e RCTA após estufa se comparados com as composições com a dextrina REF. Entretanto, o contrário ocorre para a RCTA após cura ao ar por 24 h.

Fato interessante de se comentar é que resultados pouco discrepantes não possuem muita relevância pois os materiais cerâmicos naturalmente possuem alta variação nos resultados medidos de suas propriedades. Assim, resultados muito próximos podem ser “imprecisos” no que tange à afirmação de um material ser melhor ou pior que outro, pois há inúmeras variáveis que podem influenciar esses resultados que, sendo muito próximos, essa mínima influência pode causar imprecisão na leitura dos resultados, ainda mais quando se trata de resistência mecânica de cerâmicas, que possuem fratura frágil e são altamente afetadas por micro defeitos (ZANOTTO; MIGLIORE, 1991).

Portanto, pode-se dizer que a composição C tem potencial para substituir a REF por promover a maior resistência mecânica a verde. Embora a resistência à compressão à temperatura ambiente na primeira condição tenha resultado ligeiramente abaixo da REF, na segunda condição seu resultado foi significativamente mais positivo. Ao comparar a RCTA na primeira condição da composição C com as demais (exceto a REF), é possível supor que ela possui cadeia molecular menor, pois possui o maior resultado.

As duas dextrinas que apresentaram os melhores resultados foram escolhidas para o segundo grupo de testes, que consistiu em verificar se seria possível combinar a boa resistência mecânica após cura ao ar da dextrina C (a maior de todas com exceção da das dextrinas REF) e sua boa resistência mecânica após estufa (segunda maior de todas) com a alta resistência mecânica após estufa da dextrina A (a maior de todas), a fim de se obter uma composição com resultados melhores que a composição REF de RCTA após cura ao ar por 24 h e após estufa.

#### 4.2. Segundo grupo de testes

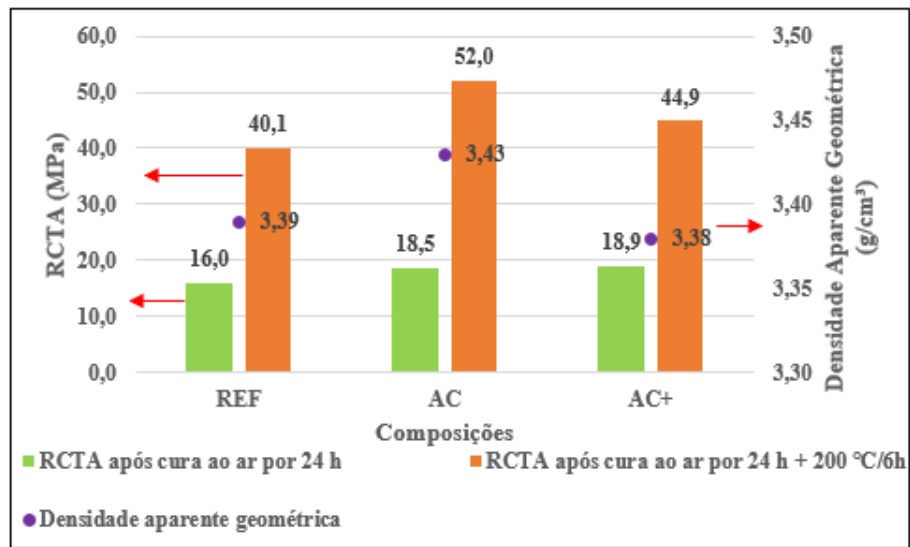
Os resultados do segundo grupo de testes estão presentes na Tabela 7 e nas Figuras 17 e 18.

Tabela 8 – Resultados do segundo grupo de testes

<b>Composições</b>	<b>Densidade aparente geométrica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>RCTA cura ao ar 24 h (MPa)</b>	<b>RCTA cura ao ar 24 h + 200 °C/6h (MPa)</b>
<b>REF</b>	3,39	16,0 ± 1,7	40,1 ± 2,7
<b>AC</b>	3,43	18,5 ± 0,2	52,0 ± 0,9
<b>AC+</b>	3,38	18,9 ± 0,3	44,9 ± 1,2

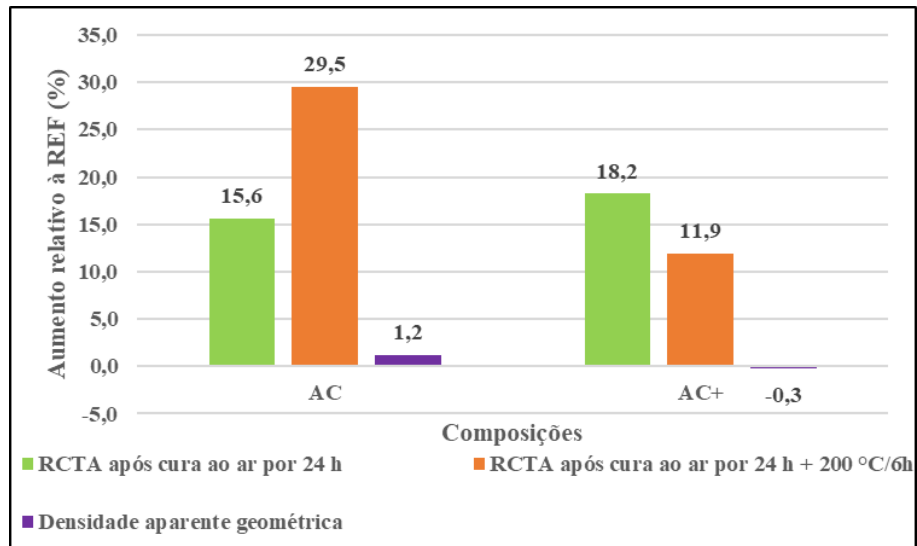
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Gráfico comparativo entre os resultados de resistência à compressão à temperatura ambiente das composições do segundo grupo de testes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Aumento relativo à REF das propriedades



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como no teste anterior, as misturas de todas as composições apresentaram boa plasticidade e, novamente, a composição com mais dextrina obteve uma plasticidade um pouco pior em relação às demais. Todas as densidades aparentes geométricas também atenderam ao intervalo especificado pelo controle de qualidade, sendo, portanto, satisfatórias.

Através destes resultados é possível verificar que a união das dextrinas de fato combinou o melhor de ambas: melhor resistência mecânica tanto após cura ao ar por 24 h quanto após a estufa, quando comparada com a REF. Nota-se que a resistência mecânica após estufa não chegou a atingir o valor obtido pela composição A, mas a melhora ainda assim foi muito significativa. Além disso, verifica-se novamente que a adição de mais dextrina não é benéfica.

Outra coisa interessante de se notar é a variação dos resultados, quando comparados com a primeiro grupo de testes. Observa-se isso nos resultados da REF, que é a mesma em ambos os grupos, mas seus resultados foram diferentes, mostrando que de fato a variação nos resultados de materiais cerâmicos é elevada e pode ser afetada por diversas variáveis, como discutido na seção anterior.

### 4.3. Análise visual e teste de queima das dextrinas

Após os dois grupos de testes, uma avaliação visual das três dextrinas utilizadas nesse grupo de testes foi realizada. Através dela foi possível verificar uma diferença na coloração das dextrinas. A Figura 19 mostra essas três dextrinas, onde nota-se uma coloração mais escura na dextrina da esquerda (dextrina amostra A), mais clara na da direita (dextrina amostra C) e de coloração intermediária no meio (dextrina referência).

Figura 20 – Avaliação visual das dextrinas A, referência e C utilizadas no segundo grupo de testes



Fonte: Próprio autor.

Além dessa avaliação visual, também foi analisada a queima dessas dextrinas. Foi possível verificar que quanto mais escura a dextrina, mais escura a fumaça gerada por sua

queima (possuindo, portanto, mais fuligem), mais altas as suas chamas produzidas e mais demorada a sua queima. E, quanto mais clara a dextrina, mais clara a fumaça gerada por sua queima (menos fuligem), menores suas chamas e mais rápida sua queima. A importância desses resultados é devido ao fato de existir uma constante busca por produtos e processos cada vez menos agressivos ao meio ambiente. Exemplo disso na indústria refratária é a busca por materiais capazes de substituir o piche utilizado nos refratários. O piche possui propriedades muito satisfatórias para aplicação em materiais refratários, porém é altamente nocivo ao meio ambiente (BITTENCOURT; PANDOLFELLI, 2013). Portanto, das dextrinas utilizadas neste estudo, a dextrina amostra C é a menos agressiva ao meio ambiente, pois a fumaça liberada em sua queima é mais clara e sua queima é mais rápida, liberando assim menos emissões atmosféricas do que as demais dextrinas testadas.

Assim, é possível supor que a coloração das dextrinas pode ser um indicativo do tamanho da cadeia molecular (maior a cadeia, mais tempo para queimar pois, quanto maior a cadeia, maior o peso molecular, ou seja, mais massa para queimar, demandando maior tempo para que a queima ocorra por completo). Isso vai de encontro direto com a suposição feita na seção anterior de que a dextrina A possui cadeias moleculares maiores, que possuem boa capacidade de realizar a coesão entre as diferentes partículas, mas que tem maior dificuldade de realizar tal coesão rapidamente, sendo necessário tempo e temperatura para que suas ligações formadas entre as partículas se fortaleçam.



## 5. CONCLUSÕES

A fim de aumentar a resistência mecânica a verde de tijolos refratários de magnésia-cromita, diferentes dextrinas foram testadas neste trabalho, bem como o aumento da quantidade de dextrina e a combinação de dextrinas diferentes.

Pelo primeiro grupo de testes, é possível averiguar que as dextrinas que promoveram as melhores resistências mecânicas foram a dextrina C, que obteve a melhor resistência à compressão à temperatura ambiente após cura ao ar por 24 h (depois da REF), e a dextrina A, que obteve a melhor RCTA após cura ao ar por 24 h mais cura na estufa 200°C/6h.

Já no segundo grupo de testes, verificou-se que de fato é possível combinar o melhor de cada dextrina, obtendo um tijolo com uma melhoria em sua resistência mecânica tanto após cura ao ar por 24 h quanto após cura na estufa 200°C/6h. Em ambos os grupos de testes foi possível verificar que adicionar maior porcentagem de dextrina não produz melhorias significativas.

Adicionalmente, é possível supor que o tamanho da cadeia molecular (e consequentemente, o peso molecular) influencia diretamente na capacidade da dextrina de ligar diferentes partículas: quanto maior o tamanho da cadeia molecular, menor sua solubilidade em água, maior a viscosidade da solução aquosa, dificultando que esta solução molhe a massa de forma homogênea, resultando em maior dificuldade de realizar a coesão entre as diferentes partículas. Caso essa suposição seja verdadeira, pode-se dizer que cadeias menores são preferíveis caso se deseje obter resistência mecânica a verde mais rápido (sem a necessidade de estufa), pois dentre as dextrinas testadas (com exceção da REF), a que obteve melhor resultado de RCTA na primeira condição foi a dextrina C, que era a dextrina mais clara.

Além disso, também se observou que a coloração da dextrina pode estar relacionada com o tamanho da cadeia molecular (quanto mais escura, maior seu tamanho de cadeia molecular), e foi observado que dextrinas mais escuras produziram mais fuligem (liberação de fumaça mais escura) na queima e queimam por mais tempo e, por queimarem por mais tempo, acabam por liberar mais emissões atmosféricas.

Concluindo, de todas as composições testadas a que apresentou melhores resultados foi a AC, combinação de 1 % da dextrina A com 1 % da dextrina C. Porém dentre as dextrinas do primeiro grupo de testes, ou seja, sem combinar dextrinas, a que apresentou resultados mais satisfatórios foi a dextrina C, tendo em vista que a dextrina A teve o menor resultado de RCTA na primeira condição, além de que a dextrina C é a menos agressiva ao meio ambiente.

**REFERÊNCIAS**

ALSAQOOR, S. *et al.* Using of Adhesives and Binders for Agglomeration of Particle Waste Resources. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, v. 16, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.12913/22998624/149456>. Acesso em: 05 jun. 2024.

BASSON, E. *World Steel in Figures 2022*. Worldsteel Association, 2022. Disponível em: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2022/#steel-production-and-use-geographical-distribution-2011>. Acesso em: 05 jun. 2024.

BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C. Refratários contendo carbono: propriedades, características e variáveis em sua composição. *Cerâmica*, v. 59, p. 84-114, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000100011>. Acesso em: 05 jun. 2024.

BORGES, O. H. *et al.* Eco-friendly design of complex refractory aggregates as alternatives to the magnesia-chromite ones. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 43, n. 14, p. 6536-6549, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.023>. Acesso em 05 jun. 2024.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 8ª edição, LTC. Rio de Janeiro, 2012.

CHEN, S. *et al.* Development of cross-linked dextrin as aqueous binders for silicon based anodes. *Journal of Power Sources*, v. 450, p. 227671, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227671>. Acesso em: 05 jun. 2024.

FARRINGTON, Jr. *et al.* Direct bonded refractory bricks. Depositante: General Refractories Company. US n. 3829541. Depósito: 19 abr. 1972. Concessão: 13 ago. 1974. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/60/24/cf/a3c0dab4cfb5c6/US3829541.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2024.

FORDER, B. December 2023 crude steel production and 2023 global crude steel production totals. Worldsteel Association, 2024. Disponível em: <https://worldsteel.org/media/press-releases/2024/december-2023-crude-steel-production-and-2023-global-totals/>. Acesso em 05 jun. 2024.

GOTO, K. Chromite in Refractories. *Shigen-Chishitsu*, v. 47, n. 4, p. 223-229, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu1992.47.223>. Acesso em 05 jun. 2024.

- HABASHI, F. Historical Introduction to Refractory Metals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, Quebec, v. 22, n. 1, p. 25–53. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08827509808962488>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ISHIHARA, E. Development of unfired magnésia-chrome refractory brick. In: 76° Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo, p. 803-815. 2023.
- KOLISNICHENKO, V. Global steel production in 2023 decreased by 0.1% y/y. GMK CENTER, 2024. Disponível em: <https://gmk.center/en/news/global-steel-production-in-2023-decreased-by-0-1-y-y/>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- KÖNIGSHOFER, Sandra. Developing a model to calculate the carbon footprint of refractory products. Tese (Mestrado) – Universidade de Leoben. Leoben, 2012. Disponível em: <https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/2456309/AC09018822n01vt.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2024.
- LANA, H. V. Aumento da resistência a verde em produtos moldados, com adição de ligante secundário para linha de tijolos curados com ligante primário. Tese (Pós-graduação *lato sensu* em Engenharia de Refratários e Soluções) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.
- LUNKES, M. S. Avaliação da dextrina como ligante das partículas de alumina para impressão 3D. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1099>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. Bauxitas refratárias: composição química, fases e propriedades-Parte I. *Cerâmica*, v. 46, p. 76-82, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132000000200005>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- RICHTER, Frank; SEIFERT, Harald. Refractory raw materials from the steel industry. *Keramische Zeitschrift*, v. 64, p. 212-215, 2012.
- RIGAUD, M. *et al.* Corrosion of Refractories: The Impact of Corrosion. Goller Verlag, 2018.
- SCHACHT, C. Refractories handbook. CRC Press, 2004.
- SENGUPTA, P. Refractories for the Chemical Industries. Springer International Publishing, 2020.

SUN, J. *et al.* Characterization of destrins with different dextrose equivalents. *Molecules*, v. 15, n. 8, p. 5162-5173, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules15085162>. Acesso em: 05 jun. 2024.

SUN, Z.; KANG, J.; SHI, Y. Changes in molecular size and shape of waxy maize starch during dextrinization. *Food Chemistry*, v. 348, p. 128983, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128983>. Acesso em: 05 jun. 2024.

VERT, T. *Refractory material selection for steelmaking*. John Wiley & Sons, 2016.

ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE JR, A. R. *Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução*. 1991.