

# UTILIZAÇÃO DE TESTES DE RECEBIMENTO E ACOMPANHAMENTO COMO FERRAMENTAS DE CONTROLE DE QUALIDADE DO REVESTIMENTO REFRAATÓRIO APLICADO EM CALCINADORES: UM ESTUDO DE CASO

[\[ver artigo online\]](#)

Lucas de Brito Nascimento<sup>1</sup>

Cynthia Leonis Dias Cintra<sup>2</sup>

## RESUMO

Os refratários são materiais cerâmicos, fabricados a partir de argilominerais que possuem óxidos inorgânicos de alto ponto de fusão, geralmente utilizados como revestimento interno de calcinadores de alumina por serem capazes de suportar diversos tipos de solicitações, quando submetidos a altas temperaturas, como as tensões térmicas e mecânicas. Contudo, vários aspectos podem comprometer a integridade desse material, que por sua vez pode levar a paradas inesperadas e emergenciais do equipamento, impactando na produção e nos custos de manutenção das refinarias. Portanto, este trabalho propõe a implementação de uma nova metodologia de testes que busca comparar as propriedades especificadas pelos fabricantes nas fichas de dados técnicos (FDT) com as propriedades do material recebido, e, conseqüentemente, aperfeiçoar o controle de qualidade. Dessa forma, foram realizados ensaios de caracterização para quatro concretos refratários densos utilizados em um calcinador de alumina. Os corpos de prova foram submetidos a dois tipos de testes no intuito de avaliar as propriedades e o desempenho do material como recebido e aplicado dentro do equipamento. No teste de recebimento, os ensaios realizados foram os seguintes: absorção de água, porosidade e densidade aparente (110°C); resistência à erosão (após queima a 1000°C por 5 horas, assim como os demais a seguir para as suas respectivas temperaturas); e variação linear dimensional (1000°C). Quanto ao teste de aplicação, os ensaios considerados foram: resistência à erosão (1250 °C); variação linear dimensional (1250°C); resistência ao choque térmico (1250°C); módulo de ruptura a quente (1250°C); e refratariedade sob carga (1600°C). Após análise dos resultados, constatou-se um desvio em relação as propriedades analisadas – como a resistência mecânica e refratariedade -, pois apresentaram valores abaixo daqueles especificados pelos fornecedores em suas fichas técnicas. Dessa forma, fica evidente a importância dos testes de recebimento e acompanhamento como ferramentas eficientes no controle de qualidade do refratário utilizado, a partir da necessidade da especificação de materiais que satisfaçam as condições operacionais e/ou exigências de projeto, com foco em desempenho, segurança e disponibilidade operacional (produção).

**Palavras-chave:** concreto refratário. metodologia. qualidade. desempenho. calcinadores.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil (IFMA) e Mestrando do curso de Ciência e Engenharia de Materiais na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - SP. Email: [lucas.brito@acad.ifma.edu.br](mailto:lucas.brito@acad.ifma.edu.br).

<sup>2</sup> Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais (UFSCar) e docente do curso de Engenharia Civil no Instituto Federal do Maranhão (IFMA). mail: [cynthia@ifma.edu.br](mailto:cynthia@ifma.edu.br).



## THE USE OF RECEIVING AND INSTALLATION TESTS AS QUALITY CONTROL TOOLS FOR CALCINERS' REFRACTORY LINING: A CASE STUDY

### ABSTRACT

Refractories are ceramic materials, made from clay minerals that have high melting point inorganic oxides, generally used as internal lining of alumina calciners because they can withstand many types of wear mechanisms when subjected to high temperatures, such as mechanical and thermal stresses. However, several aspects can compromise the integrity of this material, which in turn can lead to unexpected and emergency equipment shutdowns, affecting the production and maintenance costs of refineries. Therefore, this work proposes the implementation of a new testing methodology that seeks to compare the properties specified by the manufacturers in the technical data sheets (FDT) with the properties of the material received, and consequently improve the quality control. Thus, characterization tests were carried out for four dense refractory castable installed in an alumina calciner. The samples were subjected to two types of tests in order to evaluate the properties and performance of the material received and applied. In the receiving test, the tests performed were as follows: liquid absorption, porosity and apparent density (110°C); erosion resistance (after firing at 1000 °C for 5 hours, as well as the others tests followed by their respective temperatures); and permanent linear change (1000°C). As for the installation test, the tests considered were: erosion resistance (1250°C); permanent linear change (1250°C); thermal shock resistance (1250°C); hot modulus of rupture (1250°C); and refractoriness under load (1600 °C). After analyzing the results, a deviation was found in relation to the analyzed properties - such as mechanical strength and refractoriness -, as they presented values below those specified by the suppliers in their technical data sheets. Thus, the importance of receiving and monitoring tests as efficient tools in the quality control of the refractory used is evident, based on the need to specify materials that meet operational conditions and/or project requirements, with a focus on performance, safety and operational availability (production).

**Keywords:** refractory concrete. methodology. quality. performance. calciners.

## INTRODUÇÃO

Os materiais sempre desempenharam um papel essencial e decisivo no decorrer da História. Desde a Idade da Pedra até o mundo contemporâneo atual, a evolução e o surgimento de novos materiais contribuíram diretamente para o desenvolvimento da sociedade. A Engenharia de Materiais, campo da ciência que surgiu no intuito de efetuar análises e permitir o desenvolvimento de novos materiais, classifica-os em três categorias principais: metais, polímeros e cerâmicas. Este último grupo, o dos materiais cerâmicos, possui a sua terminologia proveniente do grego *keramikos*, que significa “matéria queimada”, demonstrando que para alcançar suas propriedades principais, esses materiais precisam passar por um processo de tratamento térmico a alta temperatura, frequentemente denominado de cozimento (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (Abceram), o setor cerâmico, bastante amplo e heterogêneo, é atualmente classificado em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e finalidade de utilização. Entre os exemplos desse grupo, destacam-se a cerâmica vermelha, os materiais de revestimento (placas cerâmicas), a cerâmica branca, o vidro, os abrasivos, os cimentos e os materiais refratários.

O refratário é um material cerâmico que possui, dentre suas propriedades fundamentais, um elevado ponto de fusão, além de sua capacidade de manter, quando exposto a elevadas temperaturas, suas características físicas e químicas sem se deformar (ABCERAM, 2019). Entre as inúmeras aplicações, os refratários são bastante utilizados no setor metalúrgico, sobretudo em calcinadores, onde a alumina é obtida através do processo de calcinação.

Em termos gerais, a calcinação pode ser definida como o processo de transformação do hidróxido de alumínio  $[Al(OH)_3]$  em óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) através de equipamentos específicos – os calcinadores de leito fluidizado – que são compostos por vasos e dutos, comumente revestidos com material refratário (GONÇALVES; PANDOLFELLI, 2011). Essa prática tem por objetivo prolongar a vida útil do equipamento (chaparria) através do uso de materiais que satisfaçam as condições operacionais (variações de temperaturas, solicitações mecânicas, velocidade das partículas) e que sejam resistentes aos inúmeros desgastes que possam ocorrer (abrasão, erosão, choque térmico, entre outros). Todavia, há uma série de fatores que interferem no desempenho e vida útil do revestimento refratário. Esses fatores acabam

influenciando o plano de manutenção dos calcinadores, até mesmo ocasionando interrupções inesperadas (paradas de emergência), as quais resultam na indisponibilidade de todo processo produtivo, no aumento dos custos de manutenção e na diminuição da confiabilidade dos equipamentos.

Portanto, este trabalho propõe avaliar as propriedades de diferentes materiais refratários aplicados como revestimento interno de um calcinador de alumina, utilizando-se a metodologia de testes de recebimento e acompanhamento (aplicação) como ferramentas de controle de qualidade.

## **2. MATERIAIS CERÂMICOS REFRAATÓRIOS**

### **2.1 Aspectos iniciais**

O processo de obtenção do alumínio depende de várias etapas de processamento, pois esse elemento não é encontrado isoladamente na crosta terrestre. Para que seja economicamente viável, a produção desse metal requer, entre os vários requisitos, que os seus minérios geradores – sendo a bauxita o principal – possuam pelo menos 30% de alumina. Esta, também conhecida como óxido de alumínio de alta pureza, é obtida através do processamento da bauxita, por meio do processo Bayer, o qual envolve temperaturas em torno de 1000°C (SENAI, 2018). Dessa forma, o uso de refratários cerâmicos nesse processo se faz necessário, uma vez que são materiais capazes de suportar altas temperaturas, além de resistirem às solicitações químicas e mecânicas (MENEZES, 1989). Esses materiais são aplicados entre a superfície metálica (chapa do equipamento) e o meio solicitante (DUARTE, 2003).

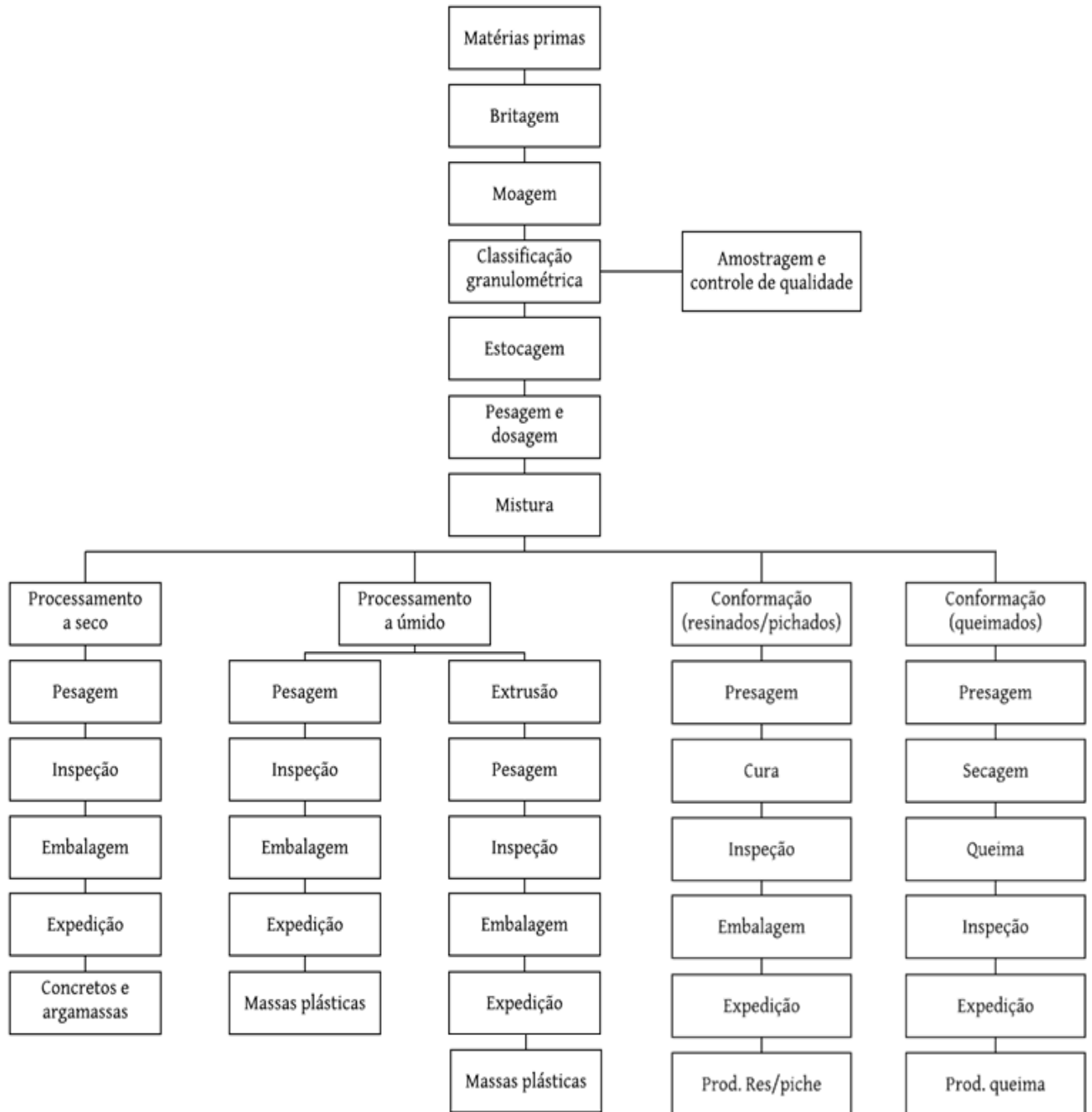
De acordo com Cannio e Hanusková (2011), e conforme a Norma NBR 8826 (ABNT, 1997), refratários são produtos cerâmicos naturais ou manufaturados, conformados ou não, e capazes de minimizar as perdas térmicas nos sistemas em que são utilizados. Além disso, são materiais polifásicos, policristalinos e de volume estável, cuja característica principal é a de manterem suas propriedades estruturais e físico-químicas mesmo quando aplicados em temperaturas extremas e em ambientes corrosivos (DUARTE, 2012).

Para Hancock (1988), essas características exclusivas dos materiais refratários estão relacionadas à sua composição química. Isso acontece devido ao fato de que as propriedades físico-químicas específicas das matérias-primas desse material cerâmico definem as

propriedades finais do produto. Este, por sua vez, é composto por seis óxidos principais: alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), magnésia ( $\text{MgO}$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) e óxido crômico ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

O processo de produção de refratários envolve diversas etapas. Inicialmente, as matérias-primas selecionadas são britadas, moídas e classificadas. Em seguida, elas podem ser estocadas, para posterior pesagem e dosagem, de acordo com as especificações de cada produto. Na etapa seguinte, essas matérias-primas são misturadas, podendo ainda, de acordo com a classe de refratário a ser produzida, serem: prensadas, no caso daquelas que necessitam de conformação, curadas ou queimadas, para posteriormente serem embaladas; misturadas e embaladas, no caso dos produtos monolíticos. A Figura 1 apresenta um esquema sobre o processo produtivo dos materiais refratários.

### **Figura 1 – Processo de produção de refratários**



Fonte: Adaptado de Cotta e Rodrigues (2014)

## 2.2 Classificação dos materiais refratários

Os materiais refratários podem ser classificados sob diversos aspectos, dada a complexidade de combinação das muitas fases presentes nesses materiais. Segundo Medeiros (2012), a correta classificação de materiais refratários precisa abranger aspectos como composição química, método de aplicação, serviço, refratariedade, entre outros. Uma classificação básica, muito utilizada pela indústria petroquímica, é a que se baseia em sua função (ver Quadro 1).

**Quadro 1 - Classificação de refratários a partir de suas funções**

<b>FUNÇÃO</b>	<b>PROPRIEDADES</b>
Isolamento Térmico	Baixa condutividade térmica
	Baixa massa específica
	Estabilidade mecânica às tensões térmicas
	Estabilidade dimensional
Antierosivo / Densos	Estabilidade mecânica à erosão e abrasão
	Massa específica elevada
	Estabilidade dimensional
Antiácido	Estabilidade química ao ataque de gases
	Baixa permeabilidade
	Estabilidade dimensional

Fonte: Adaptado de Petróleo Brasileiro S.A. (2005)

A norma brasileira NBR 10237 (ABNT, 1989) também estabelece uma classificação de materiais refratários quanto à forma, processo de fabricação, processo de conformação, natureza química e mineralógica, e massa específica. Quanto à forma, os refratários podem ser agrupados em conformados – moldados e queimados, possuindo formas pré-definidas, como é o caso dos tijolos refratários – e não conformados, os quais são aplicados diretamente nos componentes onde serão instalados e se amoldam a formas (concretos).

Já em relação à natureza química ou mineralógica, os refratários são classificados conforme o Quadro 2.

**Quadro 2 - Classificação de refratários quanto à natureza química e mineralógica**

<b>GRUPO</b>	<b>CLASSE</b>
Ácidos	Silicosos ou de sílica
	Silicoaluminosos ou de sílica-alumina
Básicos	Magnesianos de magnésia
	Magnesiano-cromíticos ou de magnésia-cromita
	Cromomagnesianos ou de cromita-magnésia
	Dolomíticos ou de dolomita
	De magnésia-carbono
Neutros	Aluminosos ou de alumina
	De alumina-carbono
	De alumina-carbeto-carbono, de silício carbono
	Aluminosos-cromíticos ou de alumina-cromita
	Cromíticos ou de cromita
	De carbono
	Grafíticos ou de grafita
Especiais	De carbeto de silício
	De cordierita
	De mulita

Fonte: Adaptado de ABNT (1989)

Os concretos ainda podem ser classificados como: argamassas, para assentamento de tijolos; massas de socar; massas plásticas; massas de projeção; massas granuladas secas; etc. (MEDEIROS, 2012). Podem ainda ser conformados ou aplicados (no caso dos concretos) por: prensagem, extrusão, moldagem manual, projeção, bombeio e vertimento. Este último pode ainda ser aplicado por compactação manual, vibração interna ou externa ou por fluência livre (autoadensáveis) (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2005).

Uma outra classificação estabelecida pela norma ASTM C-401 91 (ASTM, 1995) divide os concretos refratários em quatro grupos, conforme a Tabela 1.



**Tabela 1 - Classificação dos concretos refratários conforme norma ASTM C-401 91**

<b>Classificação dos concretos refratários</b>	<b>Teor de óxido de cálcio (CaO) (%)</b>
Convencional	$> 2,5$
Baixo Teor de Cimento	$1,0 < \text{CaO} \leq 2,5$
Ultrabaixo Teor de Cimento	$0,2 \leq \text{CaO} \leq 1,0$
Sem Cimento	$< 0,2$

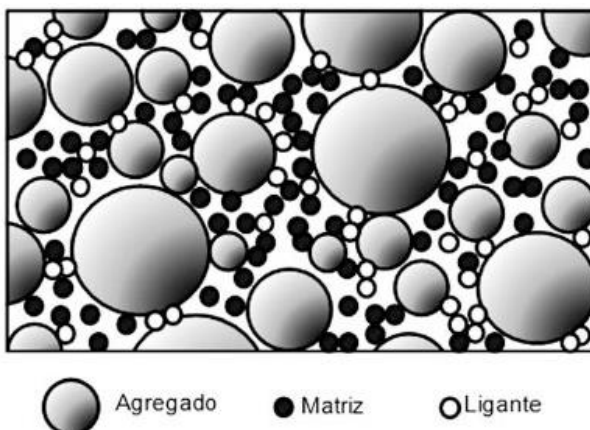
Fonte: Adaptado de Raad (2008)

Apesar das diversas classificações apresentadas, a classificação mais utilizada dentro da indústria brasileira foi estabelecida através da norma Petrobras NTP-1728 (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2005). Esta norma agrupou as diversas formulações de refratários, levando em consideração as classificações anteriormente citadas e as características físicas e mecânicas dos concretos, além dos métodos de aplicação. Essa classificação é apresentada no Quadro 3.

### **2.3 O concreto refratário**

Segundo a NBR 8826 (ABNT, 1997), o concreto refratário pode ser definido como um material refratário da classe dos monolíticos, geralmente de pega hidráulica, e que consiste na mistura de agregados e aglomerados refratários de granulometria adequada. Este concreto possui uma matriz finamente granulada, com grãos de diâmetros menores que 100  $\mu\text{m}$ , e agregados grossos, podendo alcançar a ordem de centímetros, conforme esquematizado na Figura 2 (SANTOS, 2011). A Figura 2 apresenta os três elementos principais que compõem a estrutura de um refratário.

### **Figura 1 – Elementos presentes na composição de concretos refratários**



Fonte: Sako e Pandolfelli (2014)

**Quadro 2 - Classificação dos refratários estabelecida pela Petrobrás**

Características	Densos						Semi Isolantes	Isolantes			Unidade	Normas
	Antierrosivos			Regulares		Alta Alumina (Nota 6)		Classe A	Classe B	Classe C		
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B							
Análise Química:												
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mínimo);	80,0	80,0	-	70,0	-	94,0	-	-	-	-	%	ABNT NBR 8828
- SiO <sub>2</sub> (máximo);	8,0	(Nota 3)	-	-	-	-	-	-	-	-		ABNT NBR 9644
- CaO (máximo);	5,0	8,0	-	10,0	7,0	4,0	12,0	12,0	15,0	20,0		ABNT NBR 11302
- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (máximo);	1,0	1,0	1,5	1,5	3,0	0,4	3,0	8,0	10,0	10,0		ABNT NBR 11303
Temperatura Máx. de Utilização	1 650	1 650	1 400	1 600	1 400	1700	1 300	1 100	1 100	800	°C	-
Massa Específica Aparente: - seco a 110 °C	≥ 2 600	≥ 2 600	≤ 2 400	≥ 2 300	≤ 2 300	≥ 2 600	≤ 1 700	≤ 1 300	≤ 1 000	≤ 750	kg/m <sup>3</sup>	ABNT NBR 6115 ABNT NBR 11221 ou ASTM C 134
Resistência Mínima de Compressão:												
- seco a 110 °C;	49,1 (500)	44,2 (450)	34,3 (350)	39,2 (400)	19,6 (200)	34,3 (350)	6,9 (70)	5,4 (55)	2,4 (25)	0,7 (7)	MPa  (kgf/cm <sup>2</sup> )	ABNT NBR 6224 ABNT NBR 10955 ABNT NBR 11222 ou ASTM C 133
- queimado 815 °C.	49,1 (500)	39,2 (400)	29,4 (300)	34,3 (350)	11,7 (120)	39,2 (400)	4,4 (45)	2,9 (30)	1,2 (12)	0,3 (3)		
Variação Dimensional Linear Máxima: - queimado	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,30	0,50	0,50	1,20	1,50	%	ABNT NBR 8385 ou ASTM C 113
Condutividade Térmica à Temperatura Média de:												
200 °C;	-	-	1,29 (1,11)	-	-	-	0,45 (0,39)	0,38 (0,33)	0,26 (0,22)	0,17 (0,15)	W/m.K.  (kcal/m.h.°C)	ASTM C 201
400 °C;	-	-	1,27 (1,09)	-	-	-	0,47 (0,41)	0,42 (0,36)	0,29 (0,25)	0,20 (0,17)		
600 °C.	-	-	1,24 (1,07)	-	-	-	0,50 (0,43)	0,45 (0,39)	0,33 (0,28)	0,22 (0,19)		
Perda Máxima por Erosão: - queimado 815 °C	6,0	12,0	12,0 (Nota 4) 20,0 (Nota 5)	-	-	-	-	-	-	-	cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 13185 ou ASTM C 704

Fonte: Petróleo Brasileiro S.A. (2005)

A matriz abrange as partículas finas, agentes ligantes, aditivos e água, tendo-se o controle dos fenômenos de superfície. Os agentes ligantes, compostos em sua maioria por óxidos,

promovem a coesão da mistura e resistência mecânica a verde. Entre os exemplos de aglomerantes mais utilizados, destacam-se os cimentos de aluminato de cálcio (CAC), amplamente utilizados no setor industrial devido à sua disponibilidade, pelo baixo custo e pela sua capacidade de proporcionar ao concreto uma resistência mecânica a verde e resistência ao ataque químico (OLIVEIRA; PANDOLFELLI, 2007). De acordo com Raad (2008), os aditivos são acrescentados à mistura a fim de otimizar o desempenho e as propriedades do concreto, de modo a influenciar suas características químicas, físicas, microestruturais e reológicas. Por esse motivo, a escolha do tipo de aditivo adequado a ser utilizado é de fundamental importância.

Os agregados, constituídos por partículas maiores do que 100  $\mu\text{m}$ , são materiais que formam a estrutura do concreto, geralmente inertes, e representam a maior parte do volume total. No caso dos concretos refratários, entre os agregados mais utilizados tem-se: chamote (argila calcinada), aluminas, magnésia, espinélio, escórias de alto forno e agregados reciclados (tijolos refratários britados). Além disso, os agregados possuem a capacidade de influenciar os concretos conforme suas características, quanto à dimensão, granulometria, porosidade, resistência, presença de impurezas etc. (RAAD, 2008).

Além dos agentes ligantes, agregados e aditivos, adiciona-se água no preparo da mistura do concreto refratário. A água tem a função de promover a hidratação dos agentes ligantes (aglomerantes), além de aumentar a fluidez do concreto fresco, propiciando um melhor contato entre a matriz e o agregado (RAAD, 2008). Contudo, há ainda outros tipos de concretos refratários ligados quimicamente sem adição de cimento aluminoso, onde o endurecimento (pega) é devido a reações químicas. É o caso dos materiais a base de sílica coloidal e de liga fosfática, os quais dispensam a adição de água pois possuem aditivos especiais que são adicionados na mistura antes da preparação do concreto.

O concreto refratário é um dos tipos de refratários mais utilizados em construções complexas, as quais geralmente apresentam limitação de acesso e elevadas temperaturas (MARTINOVIC et al., 2013). Para Maczura et al. (1993), o destaque desse material está nas diversas vantagens apresentadas em relação à sua aplicação, tais como: baixo custo de produção; rápida instalação; boa resistência a choque térmico; fácil disponibilidade; e manutenção simplificada, com tempo mais reduzido. Diante do exposto, a aplicação do concreto refratário como revestimento de equipamentos industriais vem aumentando cada vez mais e,

consequentemente, a indústria passou a exigir e a investir mais no desenvolvimento de técnicas que melhorem o desempenho deste material (GUNGOR; CELIKCIOGLU; SAHIN, 2012).

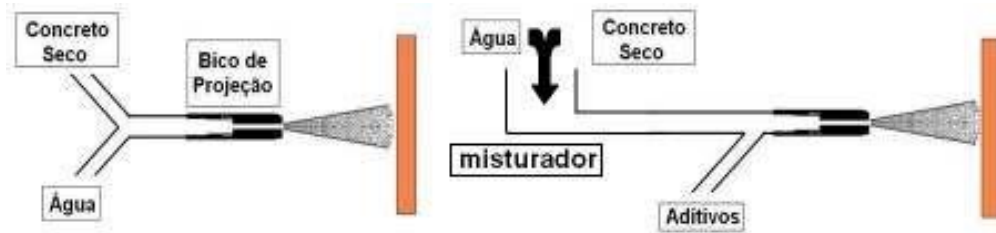
### 2.3.1 *Aplicação de concretos refratários*

A aplicação de concretos refratários é dividida em diversas etapas. Primeiramente, inicia-se a mistura do pó seco no intuito de se promover a homogeneização e quebra dos aglomerados. Posteriormente, adiciona-se água à mistura e é nesse momento que o concreto passa do estado particulado para o estado fluido; essa transição é conhecida por “virada do concreto”. Em seguida, já com a quantidade de água adicionada, o misturador homogeneiza e estabiliza seu estado de dispersão. Finalmente, ocorre a aplicação do concreto refratário, uma vez que ele já cumpriu todos os pré-requisitos de aplicação (STUDART; PILEGGI; PANDOLFELLI, 2001).

Esse tipo de aplicação, conhecida como método de vertimento ou derramamento, é feita com o material em seu estado viscoso, assim, o estudo do comportamento reológico do refratário, a partir de sua fluidez, é que define o modo de moldagem. Segundo Ramal Jr. et al. (2002), variando-se o teor de água utilizado, assim como a composição do concreto, pode-se obter uma moldagem por fluência-livre (os moldes são preenchidos pela ação do próprio peso), vibração de baixa ou alta frequência etc.

Há ainda um outro método de aplicação de refratários, conhecido por bombeamento ou projeção, podendo ser encontrado no mercado em duas versões diferentes: por projeção à seco (ROSBON, 1978) e por projeção à úmido (COOK et al., 1963). No primeiro caso, também denominado de dry gunning, a mistura entre o material seco e a água ocorre no interior do bico de projeção, com a ocorrência de dispersão dos finos do concreto que não misturaram com a água. Esse método de aplicação apresenta taxa de rebote próxima a 15%. Já a projeção à úmido (wet gunning ou shotcrete), a mistura entre o concreto e a água ocorre antes do bico de projeção, o qual recebe aditivos (coagulantes) capazes de alterar propriedades como a reologia do material aplicado, resultando em taxas de rebote mínimas (em torno de 5%) (SAITO, 2009). A Figura 3 demonstra a aplicação de um refratário nos métodos dry gunning e shotcrete.

**Figura 2 – Esquema de aplicação: (a) por dry gunning e (b) shotcrete**



Fonte: Lee (1998) adaptado por Saito (2009)

### 2.3.2 Processo de cura, secagem e queima

O desempenho do concreto refratário está diretamente relacionado as etapas de cura, secagem inicial e queima.

Uma cura adequada é fundamental para as propriedades do concreto refratário. Essa fase, que deve ser iniciada logo após a preparação do concreto, requer que a superfície exposta do material permaneça úmida por um período de 24 horas, de tal forma que a quantidade de água seja suficiente para o processo de hidratação (ALMEIDA, 2009). Segundo Holterhoff Jr. (2001), a temperatura ideal para a cura de concretos refratários é de 22 °C, tendo em vista que curas acima de 30 °C podem afetar a resistência do material.

Após permanecer úmido por 24 horas, o concreto precisa ser seco, a partir de baixas taxas de aquecimento, antes de ser submetido às temperaturas de serviço. Almeida (2009) ressalta que a secagem tem como objetivo principal permitir que o concreto atinja elevada resistência mecânica durante a temperatura de operação. Além disso, a secagem deve ser feita em patamares, no intuito de remover gradativamente toda água existente. Para que isso aconteça, primeiramente é necessário que ocorra um aquecimento inicial até 100 °C com o objetivo de se eliminar a água livre por evaporação. Em seguida, com o aumento da temperatura, há a ebulição da água livre e formação de vapor. Por fim, há a decomposição da água combinada na forma de hidretos (SANTOS, 2008).

Durante o processo de secagem, se a geração de vapor d'água no interior do material for maior que a liberação para a superfície, a tensão interna dos poros poderá ocasionar fissuras no concreto ou explosões, caso a pressurização seja superior à resistência mecânica do material. Contudo, há dois fatores que contribuem diretamente para a otimização e segurança desse processo: a permeabilidade do material – corpos mais permeáveis não acumulam vapores em sua estrutura; e processos mais longos de secagem (INNOCENTINI et al., 2001).

De acordo com Pandolfelli et al. (2006), a secagem é uma etapa de suma importância para o concreto refratário, uma vez que é nessa fase que as características estruturais do material começam a se definir. A água adicionada durante o processo de produção do concreto deve ser eliminada no aquecimento de forma controlada e a sua curva de secagem deve ser lenta o suficiente para não provocar danos à estrutura do material. Uma secagem inadequada pode causar diversas alterações em virtude das dilatações térmicas, além do fenômeno da retração que pode ocorrer.

Após a secagem, os concretos são sinterizados. Nessa etapa, ocorre a queima do refratário no intuito de substituir suas ligações hidráulicas por ligações cerâmicas. Em geral, a sinterização ocorre em temperaturas na ordem de 2/3 ou 3/4 da temperatura de fusão do material refratário (MORAIS, 2012).

Uma peça refratária é composta por três zonas distintas (no caso de revestimento com grandes espessuras, geralmente maior do que 200mm): a face quente, na qual a alta temperatura contribui para que ocorram as ligações cerâmicas entre as fases do concreto; a camada intermediária da seção, onde há uma ligação cerâmica de fraca intensidade entre as fases; e a face fria, na qual as fases estão hidraulicamente ligadas entre si (ALMEIDA, 2009).

### 2.3.3 Propriedades dos concretos refratários

#### a) Densidade de massa aparente

De acordo com a NBR 6220 (ABNT, 2011), a densidade de massa aparente pode ser expressa através da relação entre a massa e o volume ocupado por um determinado refratário ( $\text{kg/m}^3$ ). Esta propriedade indica a medida indireta da capacidade térmica de um refratário em armazenar calor, além de fornecer uma informação também indireta quanto à resistência à corrosão e à resistência mecânica dos materiais – quanto maior a densidade, menor o volume de vazios e, portanto, há um aumento significativo na resistência à corrosão, na resistência mecânica e na condutividade térmica do material (DUARTE, 2005).

Schneider, Diederichs e Ehm (1982) ressaltam que a temperatura pode influenciar a densidade de concretos refratários. A diminuição na densidade inicial desses materiais pode ocorrer devido à eliminação de água, mas quando o material é submetido a altas temperaturas, a redução na densidade é decorrente do aumento do volume causado pela expansão térmica do

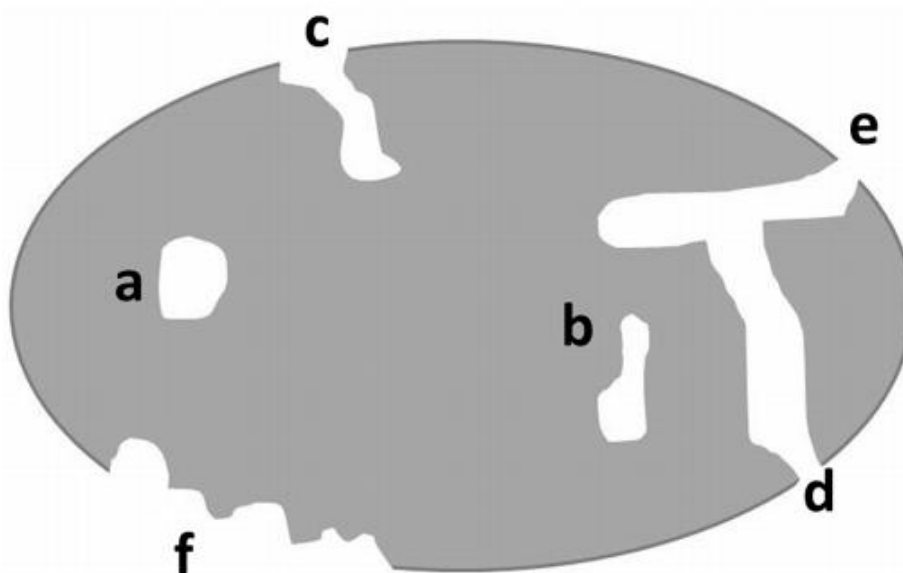
agregado. Em contrapartida, quando o processo de sinterização é iniciado, por volta de 1400 °C, há um aumento na densidade do refratário analisado.

Além disso, a densidade de massa aparente é um fator fundamental que influencia nas outras propriedades do refratário, entre elas a compressão e a resistência ao impacto (BUDNIKOV, 1964).

#### b) Porosidade aparente

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) classifica a porosidade da seguinte forma: poros abertos, os quais permitem a comunicação entre os poros; poros fechados, caracterizados pelo isolamento dos vazios; e poros interconectados. A Figura 4 apresenta os principais tipos de porosidade.

**Figura 3 – Esquema com os tipos de porosidade: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície**



Fonte: Santos (2016)

A porosidade é um fator crucial que influencia no desempenho dos materiais refratários, pois impacta direta ou indiretamente em outras propriedades, entre elas: a resistência à compressão e a resistência à abrasão. Assim, a porosidade aparente, também chamada de porosidade aberta, é a medida de poros abertos presentes no refratário. Dessa forma, a absorção

de água está relacionada com essa propriedade, pois a diminuição dessa absorção indica a redução da porosidade aparente do material cerâmico. Já a porosidade fechada apresenta maior complexidade em sua determinação, uma vez que os poros fechados, localizados no interior da partícula, estão isolados e não interagem com o exterior (DUARTE 2005).

De acordo com Pascoal e Pandolfelli (2000), à medida que se aumenta a porosidade do material, há uma diminuição nas seguintes propriedades: refratariedade sob carga, resistência mecânica e resistência à penetração por escória. Além disso, ao aumentar-se a porosidade de um material, acaba-se tornando mais fácil a penetração de líquidos e vapores, os quais estão geralmente associados ao desgaste no revestimento, exceto no caso de materiais isolantes, em que a porosidade é útil, pois exerce forte influência sobre a condutividade térmica desses materiais (JONES et al., 1985 apud TALLINI JUNIOR, 2009). Assim, quanto mais poroso for um material, maior será sua capacidade isolante e, conseqüentemente, menor será sua condutividade térmica.

Há diversos fatores que influenciam a porosidade de um material cerâmico refratário, sendo os principais: a exposição a altas temperaturas que podem gerar trincas na estrutura; empacotamento de partículas e teor de água adicionado na mistura. Através do fenômeno da desidratação, o aumento de temperatura do refratário ocasiona um aumento do volume dos poros, diminuindo, assim, a densidade da mistura, o que acarreta a redução da resistência mecânica do concreto (ALMEIDA, 2009).

#### c) Resistência à compressão e à flexão

Estas características mecânicas podem ser identificadas durante o processo de aquecimento dos materiais refratários, os quais sofrem os efeitos da dilatação térmica que acaba influenciando diretamente no aparecimento de tensões de tração ou de compressão. Em geral, os materiais cerâmicos possuem pouca ou nenhuma deformação plástica, aliada a uma ruptura de maneira frágil, demonstrando maior resistência à compressão, cuja tendência é fechar os defeitos, do que à tração, a qual tende a abrir os defeitos (AMARAL, 2016).

Duarte (2005) ressalta que essas propriedades podem ser medidas em diferentes temperaturas, inclusive na temperatura ambiente. Dessa forma, a medida da resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) é geralmente utilizada como um parâmetro de controle de qualidade que visa a garantir a conformidade do lote e analisar a homogeneidade



dos tratamentos térmicos de produtos queimados, bem como dar uma indicação indireta de outras propriedades como a resistência à abrasão (SILVA, 2011). Todavia, a resistência à compressão obtida na temperatura ambiente por si só não fornece um parecer completo sobre a performance do refratário analisado, servindo apenas como referência do desempenho do material (SOBROSA, 2014).

Entre os fatores que mais afetam a resistência mecânica a frio, destacam-se: a ligação química; a temperatura de queima utilizada; e a porosidade. Segundo Cotta e Rodrigues (2014), a relação entre a porosidade e a RCTA é inversamente proporcional, tendo em vista que, de forma geral, as fraturas surgem a partir de falhas estruturais superficiais. De fato, a presença de vazios no concreto refratário acaba reduzindo sua resistência. Por exemplo, 5% de vazios podem representar uma redução de até 30% da sua resistência. Esses vazios são oriundos da formação de bolhas de ar que acabam aprisionadas e dos espaços decorrentes da remoção de excesso de água (NEVILLE, 2016).

Ainda assim, é importante manter a medida da resistência à compressão dentro de uma faixa admissível, principalmente no caso do transporte de peças refratárias, evitando-se perdas durante o processo. Os refratários que estão em contato com cargas erosivas também devem possuir alta RCTA (GONÇALVES, 2009).

Já a resistência à flexão à temperatura ambiente (RFTA), também conhecida como módulo de ruptura à temperatura ambiente (MRTA), é uma propriedade importante no desenvolvimento e especificações de materiais refratários, os quais estão sujeitos a esforços de carregamentos mais complexos (SILVA, 2011). Na maior parte dos casos, afirma Gonçalves (2009), a RFTA chega a ser cerca de cinco a sete vezes menor que a RCTA. Isso significa que quanto maior for o valor de RFTA, mais ceramizado será o refratário. Em contrapartida, se a medida da RFTA estiver abaixo da faixa de controle especificada para o material, há indícios da presença de microtrincas, oriundas do processo de queima, que podem comprometer o desempenho do refratário.

Os ensaios de compressão uniaxial e o módulo de ruptura à flexão em três pontos à temperatura ambiente têm como base a norma ASTM (American Society for Testing and Materials) C133, enquanto o módulo de ruptura à flexão em três pontos a quente segue a norma ASTM C583. As Figuras 5 e 6 apresentam exemplos dos ensaios de RCTA e RFTA.

**Figura 4 – Exemplo de amostra de refratário submetida ao ensaio de RCTA: (a) início e (b) fim do teste, com a ruptura do corpo de prova.**



Fonte: Svendsen (2011)

**Figura 5 – Exemplo de amostra de refratário submetida ao ensaio de RFTA**



Fonte: Svendsen (2011)

d) Resistência à abrasão e erosão

A resistência à abrasão e erosão é uma das características cruciais para o revestimento refratário de calcinadores de alumina. Em calcinadores de leito fluidizado, por exemplo, o hidróxido de alumínio é transportado por dutos a altas velocidades e temperaturas. Como resultado, os materiais refratários acabam sendo expostos a desgastes por erosão, sobretudo devido às mudanças bruscas na direção dos efluentes gasosos que propiciam o impacto de partículas em alta velocidade nas paredes internas dos dutos (PANDOLFELLI et al., 2006). Dessa forma, o uso de concretos refratários com altas propriedades erosivas tornou-se necessário para a diminuição do número de paradas emergenciais (não programadas), para a redução dos custos de manutenção e para o aumento da confiabilidade do equipamento.

Nesse contexto, o revestimento refratário pode estar sujeito a dois fenômenos principais: abrasão e erosão. De acordo com Pandolfelli et al. (2006), a abrasão ocorre quando partículas sólidas, por meio do atrito com a superfície do revestimento refratário, causam a remoção do material, através de um movimento paralelo a essa superfície. A erosão, em contrapartida, está relacionada à perda progressiva do material de uma superfície devido ao impacto causado por líquidos e/ou partículas sólidas. Além disso, esse desgaste acarreta a perda de espessura do

revestimento refratário devido à remoção da matriz do cimento, deixando, assim, a chapa metálica do casco interno do calcinador exposta. O fenômeno erosivo se agrava ainda mais quando a velocidade de fluxo ultrapassa 3 m/s (RESEN, 1957 apud PANDOLFELLI et al., 2006).

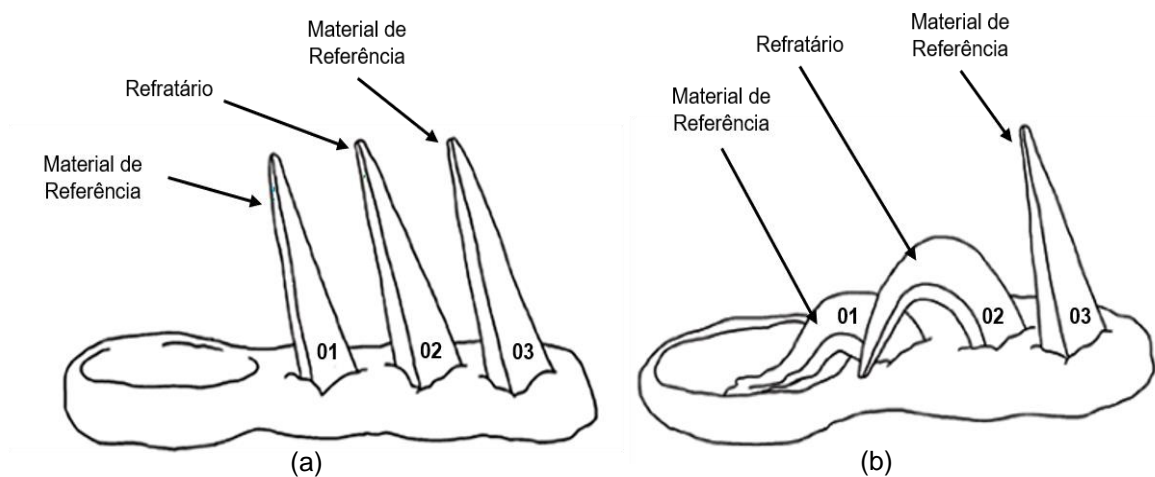
A velocidade, dureza e formato das partículas, além do ângulo de incidência entre o jato erosivo e o material, são fatores fundamentais na determinação da taxa de erosão. Esse desgaste atinge seu valor máximo quando o ângulo de incidência é de 90° e decresce até o ângulo de 30° (PANDOLFELLI et al., 2006).

#### e) Refratariedade

A refratariedade é uma propriedade que indica a capacidade do material de resistir aos efeitos das altas temperaturas sem que este se deforme ou se desintegre. Os materiais refratários não possuem um ponto de fusão constante, pois sua estrutura é complexa e pode apresentar alta variação granulométrica e de composição química; definem-se, assim, como estruturas heterogêneas (NAKAGAWA, 1998).

A refratariedade simples pode ser determinada através do ensaio do Cone Pirométrico Equivalente (PCE). Nesse ensaio, o corpo de prova é comparado com o comportamento de cones padronizados com pontos de fusão conhecidos. O teste termina quando o cone do material, ao ser aquecido, cai e encosta o vértice à base. O resultado é dado como o número do cone pirométrico equivalente que apresenta comportamento semelhante, ou a temperatura de queda correspondente (COTTA; RODRIGUES, 2014). A Figura 7 apresenta um esquema representativo do ensaio do cone pirométrico equivalente.

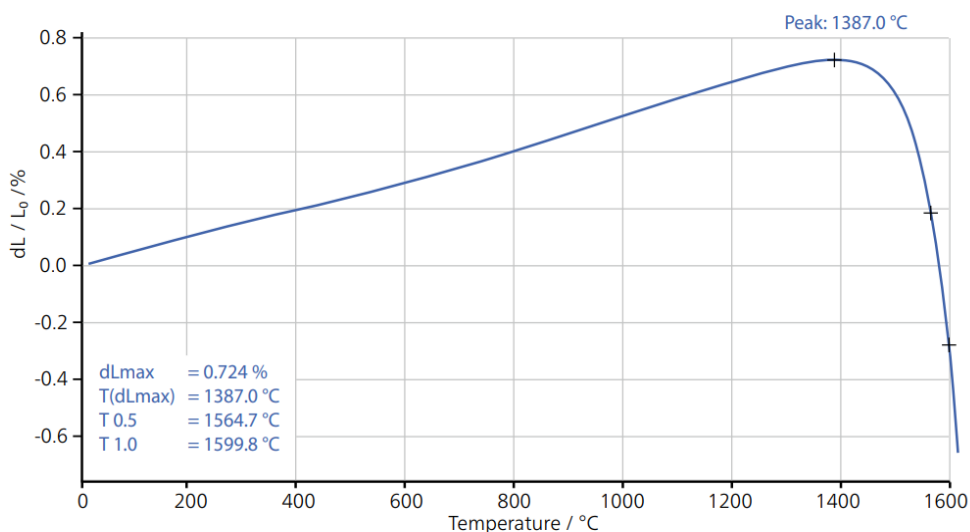
**Figura 6 – Esquema do ensaio do PCE: a) início e (b) fim do teste**



Fonte: Adaptado de Ceramic Arts Network (2019)

Outro teste utilizado na determinação da refratariedade de um material é a Refratariedade sob Carga (RSC). Esse teste é uma medida do comportamento da deformação de materiais refratários quando submetidos a uma carga constante e a um aumento de temperatura e tem maior significado prático do que a refratariedade simples. Além disso, a RSC verifica a adequação de refratários especificados para ambientes com alta temperatura, como os fornos de alumina, além de indicar a temperatura na qual o material entrará em colapso, nas condições de serviço, com uma carga semelhante. As Figuras 8 e 9 apresentam uma curva típica de RSC de um material refratário e exemplos de amostras cilíndricas utilizadas nesse tipo ensaio, respectivamente.

**Figura 7 – Curva típica de RSC de um material refratário: 1387°C corresponde à temperatura de amolecimento enquanto 1564.7°C é a temperatura máxima de trabalho**



Fonte: Netzsch (2020)

**Figura 8 – Exemplo de amostras cilíndricas utilizadas nos ensaios de RSC**



Fonte: Netzsch (2020)

f) Expansão e retração térmica

Quando submetidos a altas temperaturas ou resfriados, os materiais refratários sofrem variações na composição de suas fases, cristalizações e sinterizações. Isso porque ao receber energia, as ligações entre os átomos desses materiais se distanciam devido ao aumento das vibrações atômicas. Esse fato provoca variações no volume do material que podem vir a afetar seu comportamento durante seu uso (SOBROSA, 2014). Além disso, Cotta e Rodrigues (2014)

ressaltam que o coeficiente de expansão de um material é de extrema importância no dimensionamento das juntas de dilatação do revestimento refratário em calcinadores.

Quando a expansão ocorre de maneira excessiva, há alterações na forma e na distribuição das tensões do refratário; por outro lado, a retração pode ocasionar o colapso da estrutura e até mesmo sua desintegração prematura. Além disso, quando um desses dois fenômenos ocorre por um tempo prolongado, o material acaba sujeito a deformações permanentes devido à formação de fases estáveis em sua estrutura (BUDNIKOV, 1964).

De acordo com Alcântara (2008), materiais plásticos apresentam elevada retração. Em geral, refratários que apresentam alta plasticidade estão sujeitos a trincas ou empenamentos, os quais podem comprometer a integridade do material na etapa de secagem ou queima.

Na expansão térmica reversível, os refratários aquecidos abaixo de sua temperatura de queima tendem a voltar à sua dimensão original. Esse fenômeno ocorre porque, durante o processo de aquecimento do refratário, não ocorre nenhuma alteração em sua estrutura, tendo em vista que todas as mudanças já aconteceram durante o processo de queima. Essa dilatação térmica reversível é determinada através da NBR 6637 (ABNT, 1995), caracterizada por um parâmetro denominado coeficiente de expansão térmica, válido para aqueles materiais cuja expansão térmica ocorra de forma linear (SOBROSA, 2014).

Na análise dilatométrica, a expansão térmica é determinada através das variações dimensionais sofridas pelo refratário quando submetido a um processo de aquecimento definido, com uma curva preestabelecida. A dilatação do material é calculada em função de seu comprimento inicial ( $L_i$ ) e do comprimento na temperatura considerada ( $L_f$ ), sendo que esse fenômeno é expresso pela equação  $(L_f - L_i)/L_i$  (COTTA; RODRIGUES, 2014).

#### g) Resistência ao choque térmico

Quando um corpo sólido passa por um processo de aquecimento ou resfriamento, a distribuição de sua temperatura interna dependerá de vários fatores, entre eles: tamanho e forma do corpo; condutibilidade térmica do material; e taxa de variação de temperatura. Como resultado de gradientes de temperatura através de um corpo, há o estabelecimento de tensões térmicas, as quais são geralmente causadas devido ao rápido aquecimento ou resfriamento (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

A resistência ao choque térmico é uma propriedade que caracteriza materiais que possuem a capacidade de resistir a essas tensões internas ocasionadas pelo aquecimento e resfriamento. Essas tensões são responsáveis pelo aparecimento de fissuras e trincas, as quais deixam o material mais frágil, reduzindo, assim, sua vida útil. Além disso, a resistência ao choque térmico permite que o refratário sofra repetidas variações na temperatura sem se romper ou sofrer fraturas, além de ser uma propriedade diretamente influenciada pela condutividade térmica do material. Assim, quanto maior a condutividade, melhor será a distribuição de tensões e, conseqüentemente, menor será a tensão máxima do sistema (RAAD, 2008).

Um dos métodos principais utilizados para se quantificar a resistência ao choque térmico de refratários leva em consideração o gradiente térmico necessário para que um material cerâmico com restrição uniaxial de contração ou expansão alcance sua tensão de fratura (TEIDER, 2012). Este parâmetro, denominado R, é determinado conforme a Equação 1, sendo que R corresponde à resistência à fratura por choque térmico em °C,  $\sigma_f$  é a tensão de ruptura do refratário em Mpa, E é o módulo elástico do material em Mpa e  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica reversível em °C<sup>-1</sup>.

$$R = \frac{\sigma_f}{E \cdot \alpha} \quad (1)$$

Teider (2012) ressalta que esse parâmetro R indica que para se evitar a fratura, o refratário deve possuir alta resistência mecânica, além de valores baixos para o módulo elástico e expansão térmica – o suficiente para atenuar as tensões geradas pela variação de temperatura.

Há outras técnicas utilizadas na determinação da resistência ao choque térmico. Elas podem ser realizadas tanto através de equipamentos com grande sensibilidade à propagação de trincas quanto por meio de ensaios simples, os quais analisam a interação e evolução de defeitos internos através do módulo de elasticidade em materiais submetidos a diversos ciclos de choque térmico (COTTA; RODRIGUES, 2014).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste estudo foi desenvolvida por meio de um processo de seleção e caracterização dos materiais refratários utilizados em um calcinador de leito fluidizado.

Na primeira fase, foi feita a seleção dos concretos refratários levando em consideração as áreas mais críticas do calcinador. Além disso, os refratários escolhidos foram inseridos em



duas categorias de teste: testes de recebimento, os quais atestam se os refratários adquiridos estão em conformidade com suas respectivas fichas técnicas; e os testes de acompanhamento, que demonstram se as propriedades desses materiais foram mantidas durante a aplicação dentro do equipamento. Por fim, foram definidos os tipos de ensaios a serem realizados para cada teste e as dimensões das amostras, bem como as seções do calcinador com maior representatividade em relação às solicitações que ocorrem no revestimento refratário.

A segunda parte da pesquisa tratou da caracterização das amostras de refratários para os testes de recebimento e acompanhamento. Para tal, os refratários coletados foram submetidos a uma série de ensaios físicos de acordo com as normas da ASTM (American Society for Testing and Materials) e DIN (Instituto Alemão para Normatização ou Deutsches Institut für Normung). A Figura 20 demonstra as etapas adotadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

**Figura 9 – Etapas consideradas no desenvolvimento deste trabalho**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### 3.1 Seleção de materiais refratários

Os materiais escolhidos para a caracterização neste estudo foram quatro concretos refratários densos (RD), de pega hidráulica, aplicados em um calcinador de alumina durante uma parada de manutenção. A formulação química de cada refratário denso encontra-se na Tabela 2.

Esses materiais foram escolhidos por fazerem parte do revestimento refratário de vasos quentes (temperaturas superiores a 900 °C – refratários A, B e D) e frios (em torno de 230 °C – refratário C) do calcinador analisado.

**Tabela 2 – Formulação química dos quatro tipos de refratário denso analisados**

Composto químico	Composto químico (%) por tipo de refratário			
	RD (A)	RD (B)	RD (C)	RD (D)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	72,0	73,0	56,1	31,1
SiO <sub>2</sub>	23,0	24,0	36,7	65,5
CaO	1,4	1,2	4,1	2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,5	0,8	0,3
Alk	-	-	0,6	0,2
TiO <sub>2</sub>	-	-	1,5	0,3
MgO	-	-	0,1	0,1

Fonte: Fichas Técnicas dos Fabricantes

Além da formulação química, há outras informações importantes à respeito dos refratários selecionados, tais como: massa específica; método de aplicação; sistema ligante; e máxima temperatura de serviço recomendada (Tabela 3).

**Tabela 3 – Dados complementares dos refratários escolhidos (informações de fichas técnicas)**

Tipo de refratário	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Método de aplicação	Sistema ligante	Máxima temperatura de serviço (°C)
RD (A)	2.650,0	Vertimento	Cimento de aluminato de cálcio	1.750,0

RD (B)	2.700,0	Projetado	Cimento de aluminato de cálcio	1.750,0
RD (C)	2.163,0	Vertimento	Cimento de aluminato de cálcio	1.650,0
RD (D)	2.035,0	Vertimento	Sílica fundida	1.370,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### 3.2 Critérios de preparo e coleta das amostras

A coleta das amostras e a confecção dos corpos de prova (tijolos) levaram em consideração os testes de recebimento e acompanhamento, além do tipo de material analisado, conforme a seguir.

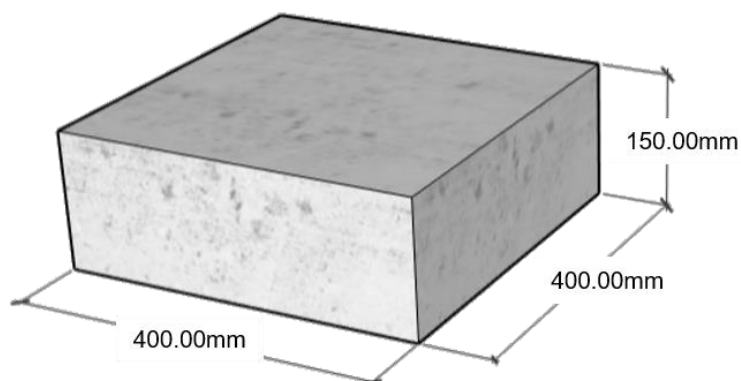
#### 3.2.1 Amostras para o teste de recebimento

Os testes de recebimento referem-se aos ensaios feitos a partir dos lotes de material adquiridos (recebidos) para a manutenção civil do calcinador. O objetivo principal dessa coleta foi identificar, através dos ensaios de caracterização, se os materiais recebidos estavam em conformidade com suas respectivas fichas técnicas.

#### 3.2.2 Concretos refratários projetáveis

Para os materiais aplicados pelo método de projeção, retirou-se uma amostra de cada lote com até 20 toneladas do mesmo material, para obtenção dos corpos de prova. As amostras foram coletadas em moldes de 400 mm x 400 mm x 150 mm, após a aplicação do refratário e o seu respectivo tempo de cura (24 horas). A Figura 22 apresenta as dimensões do molde, enquanto a Figura 23 demonstra exemplos de painéis nos quais o material RD (B) foi projetado.

**Figura 10 – Dimensões do molde de refratário após projeção**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

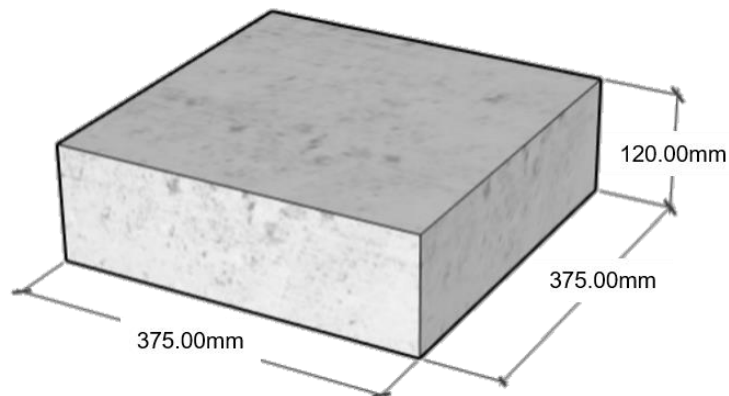
**Figura 11 – Painéis com o material RD (B) aplicado por shotcrete**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Em seguida, em preparação para obtenção dos tijolos, foi feito ainda um corte de 2,5 cm nas bordas da superfície (400 mm x 400 mm) do bloco de refratário para a retirada de regiões possivelmente menos compactadas, efetuando-se o descarte dessas partes. Assim, estas foram as dimensões finais do bloco: 375 mm x 375 mm x 120 mm, conforme pode-se verificar na Figura 24.

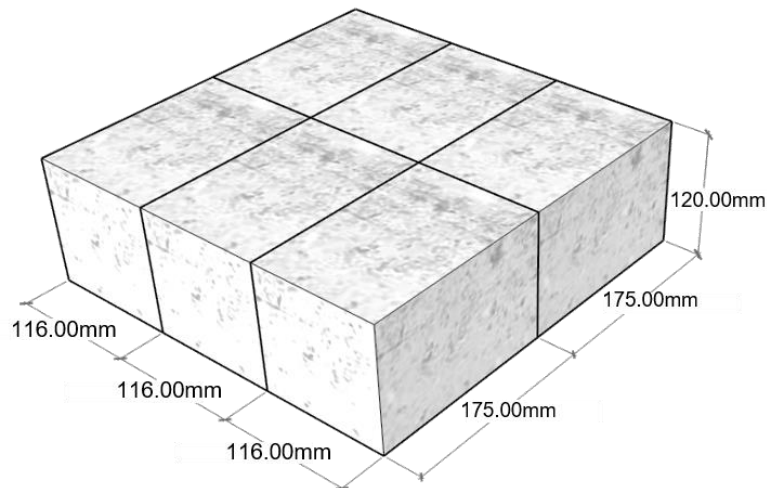
**Figura 12 – Dimensões finais do bloco de refratário após corte nas bordas da superfície**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A partir desse bloco, efetuou-se o corte de seis tijolos de refratário (corpos de prova), com as seguintes dimensões: 116 mm x 175 mm x 120 mm, para os eventuais ensaios de caracterização, conforme Figura 25.

**Figura 13 – Bloco de refratário dividido em seis tijolos (corpos de prova)**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### 3.2.3 Concretos refratários vertidos

Em relação aos materiais aplicados pelo método de vertimento, retirou-se uma amostra de cada lote com até 20 toneladas do mesmo material, para obtenção dos corpos de prova. As

amostras foram coletadas em painéis de 400 mm x 400 mm x 150 mm, após a aplicação e cura do refratário, conforme apresentado na Figura 26.

**Figura 14 – Exemplo de painel com o material RD (A) aplicado**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A preparação (corte) dos corpos de prova foi realizada desprezando-se a largura de 25 mm em volta das bordas dos painéis, ficando o painel, assim, com as dimensões finais de 375 mm x 375 mm x 120 mm. Por fim, efetuou-se o corte de seis tijolos de refratário, com as seguintes dimensões: 116 mm x 175 mm x 120 mm, para os eventuais ensaios de caracterização. A Figura 27 apresenta exemplos dos tijolos após corte dos painéis.

**Figura 15 – Exemplo de tijolos cortados a partir do painel com concreto refratário**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### 3.2.4 Amostras para os testes de acompanhamento

Os testes de acompanhamento referem-se aos ensaios que foram feitos a partir das amostras de refratário coletadas durante a aplicação no interior dos vasos do calcinador. A finalidade principal dessa coleta foi analisar se a aplicação desses materiais ocorreu dentro dos parâmetros estabelecidos, de modo que não venha a afetar o desempenho dos refratários aplicados.

#### a) Concretos refratários projetáveis

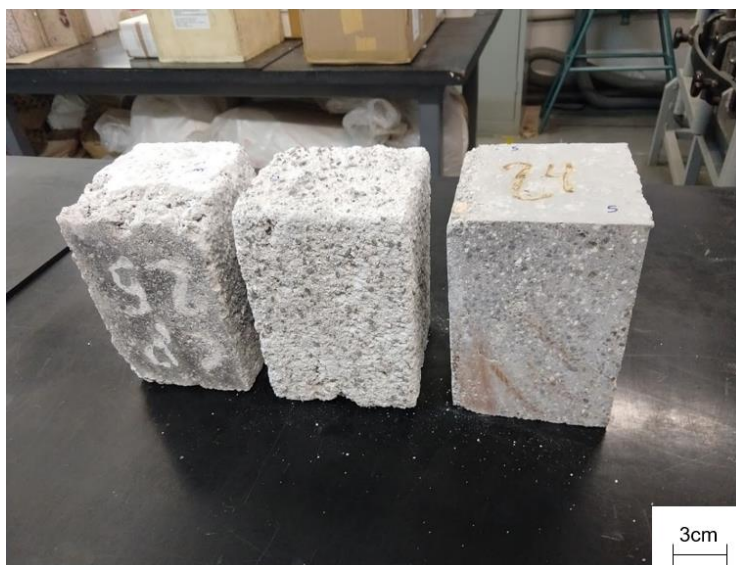
Durante as aplicações dentro do calcinador, projetaram-se os refratários nos painéis de teste para coleta das amostras por tipo de material e por seção de cada vaso. Os painéis de teste tinham 400 mm x 400 mm x 150 mm de dimensão e a partir deles foram preparados cinco tijolos, com 116 mm x 175 mm x 120 mm, para posterior realização dos ensaios físicos. Essa preparação para obtenção desses tijolos foi feita desprezando-se a largura de 25 mm em volta das bordas dos painéis.

#### b) Concretos refratários vertidos

Os concretos refratários foram vertidos em um painel de 400 mm x 400 mm x 120 mm para coleta das amostras, por tipo de material e por seção de cada vaso. A partir desses painéis de teste, foram preparados cinco tijolos, com 116 mm x 175 mm x 120 mm, para realização de ensaios físicos nos materiais aplicados, levando em consideração as seções críticas de cada vaso.

A Figura 28 apresenta três tijolos, com dimensões de 116 mm x 175 mm x 120 mm cada. Da esquerda para a direita, os dois primeiros corpos de prova correspondem ao material projetado, enquanto o último corresponde ao concreto refratário vertido. É possível identificar a influência do tipo de aplicação de refratário - e seu respectivo grau de compactação - no acabamento do tijolo obtido, o que pode ter implicações sobretudo nos resultados para as propriedades físicas e mecânicas.

**Figura 16 – Tijolos obtidos a partir do painel com concreto refratário**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### **3.3 Ensaios de caracterização dos materiais refratários**

A partir dos tijolos obtidos na etapa anterior, uma cortadeira e uma retífica foram utilizadas para extrair e preparar os corpos de prova para cada tipo de ensaio. Além disso, fez-se a divisão dos ensaios de caracterização dos materiais refratários a partir dos tipos de testes a serem realizados: o teste de recebimento e o teste de acompanhamento. A Tabela 5 resume a sistemática adotada para cada tipo de teste.



### *3.3.1 Absorção de Água, porosidade e densidade de massa aparente*

Os ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade de massa aparente (DMA) foram realizados por meio do método baseado no princípio de Arquimedes, utilizando-se querosene como fluido de imersão, conforme procedimentos da norma ASTM C830. A partir dos tijolos obtidos na etapa anterior, obteve-se cinco corpos de prova, por material, com as seguintes dimensões: 114 mm x 114 mm x 30 mm (Figura 29).

**Tabela 4 – Divisão dos ensaios a partir do teste de recebimento e de acompanhamento**

Tipo de teste	Local de Realização	Ensaio realizado/ temperatura	Dimensões das amostras (mm)	Refratário	Finalidade do teste
Teste de Recebimento	Laboratório de Materiais Refratários (ALCOA) – DEMa/UFSCar	Absorção de água, porosidade e densidade aparente (110 °C)	114 x 114 x 30	RD (A) RD (B) RD (C) RD (D)	Verificar se todos os materiais adquiridos estão de acordo com as especificações repassadas pelo fabricante.
	Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC) - UFS-Car	Resistência à compressão uniaxial (110 °C)	50 x 50 x 50		
	Laboratório de Materiais Refratários (ALCOA) – DEMa/UFSCar	Resistência à erosão (1000 °C)	114 x 114 x 30		
		Variação linear dimensional (1000 °C)	160 x 40 x 40		
Teste de Acompanha- mento		Resistência à erosão (1250 °C)	114 x 114 x 30	RD (A) RD (B)	Verificar o desempenho do material aplicado durante as paradas de manutenção do calcinador, levando em considera-
		Variação linear dimensional (1250 °C)	160 x 40 x 40		

Laboratório de Materiais Refratários (ALCOA) – DEMa/UFSCar	Resistência ao choque térmico (1250 °C)	148 x 25 x 25	ção os principais mecanismos de desgastes dos vasos mais críticos.
	Módulo de ruptura a quente (1250 °C)	25 x 25 x 150	
	Refratariedade sob carga (1600 °C)	Øext 50 x Øint 12,7 x 50	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

**Figura 17 – Corpos de prova obtidos a partir dos tijolos para o ensaio de PA e DA**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Primeiramente, todos os corpos de prova foram secos em estufa a 110 °C por 24 horas antes de serem ensaiados. Em seguida, pesou-se cada corpo de prova, determinando-se assim o peso seco ( $P_s$ ) das amostras. Posteriormente, imergiu-se as amostras na bomba a vácuo com 700 mmHg durante uma hora e meia. Ao fim desse tempo, foram retirados o vácuo da bomba e as amostras. Depois, as mesmas amostras, uma por vez, foram submersas em um recipiente com querosene (no intuito de evitar qualquer reação com algum material da composição) dentro de uma cesta fixada em uma balança, a qual já havia sido tarada, obtendo-se, assim, as leituras do peso do corpo de prova imerso ( $P_i$ ). Após recolher-se a amostra do líquido e com o auxílio de uma flanela, retirou-se o excesso de querosene e determinou-se o peso do corpo de prova saturado ( $P_u$ ). A Figura 30 apresenta a bomba de vácuo utilizada no ensaio, bem como o aparato montado para pesar as amostras submersas em querosene.

**Figura 18 – (a) Bomba de vácuo e (b) aparato metálico utilizados no ensaio de PA e DA**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A absorção de água é obtida da seguinte forma (Equação 3):

$$AA = \left( \frac{P_u - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad (03)$$

A porosidade aparente é determinada através da Equação 4:

$$PA = \left( \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \right) \times 100 \quad (04)$$

Onde:

PA = porosidade aparente (%)

Pu = peso do corpo de prova saturado (g)

Ps = peso do corpo de prova seco (g)

Pi = peso do corpo de prova imerso (g)

Já a densidade de massa aparente do material foi avaliada a partir da imersão da cerâmica em querosene ( $\rho=0,79 \text{ g/cm}^3$ ), seguindo as orientações da norma brasileira NBR 6220 (ABNT, 2011), de acordo com a Equação 5:

$$D.M.A = \left( \frac{P_s}{P_u - P_i} \right) \times \rho \quad (05)$$

Onde:

D.M.A = densidade de massa aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

$P_s$  = peso do corpo de prova seco (em g)

$P_u$  = peso do corpo de prova saturado (g)

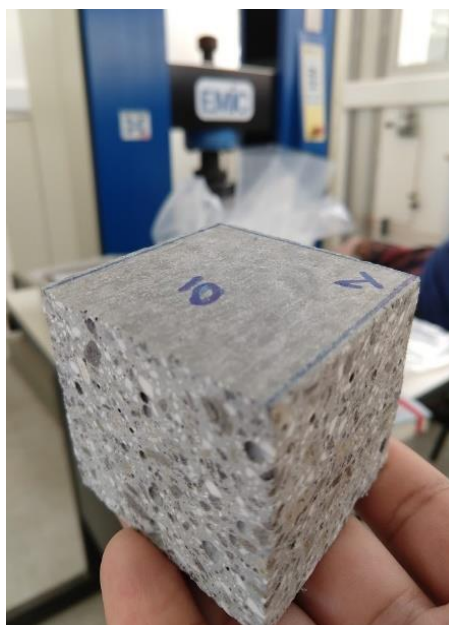
$P_i$  = peso do corpo de prova imerso (g)

$\rho$  = imersão da cerâmica em querosene ( $\text{g/cm}^3$ )

### 3.3.2 Resistência à compressão uniaxial

Este ensaio foi realizado seguindo as orientações da norma ASTM C133-97. Dessa forma, a partir dos tijolos obtidos, foram extraídos 10 corpos de prova de seção quadrada por tipo de material, com dimensões de 50 mm x 50 mm x 50 mm (Figura 31). Além disso, essas amostras passaram por um processo de secagem a 110 °C.

**Figura 19 – Corpo de prova utilizado no ensaio de compressão uniaxial**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Para a realização do ensaio, utilizou-se uma máquina universal, modelo EMIC DL 6000, com capacidade de 600kN (60000 kgf) e taxa de deslocamento de 1,3 mm/min, conforme apresentado na Figura 32.

**Figura 20 – Máquina Universal EMIC DL 60000 utilizada no ensaio de compressão uniaxial**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Após ser identificada por tipo de material, cada amostra foi centralizada na base da prensa da máquina (EMIC). O equipamento é acionado comprimindo a amostra até a detecção da ruptura do material. Posteriormente, o equipamento registra e fornece dados como a tensão (Mpa) e a força (N) necessárias para a ruptura.

A resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) é determinada através da Equação 6:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (06)$$

Sendo que:

$\sigma_c$  = resistência à compressão à temperatura ambiente (em MPa)

P = carga alcançada no momento da ruptura (em N)

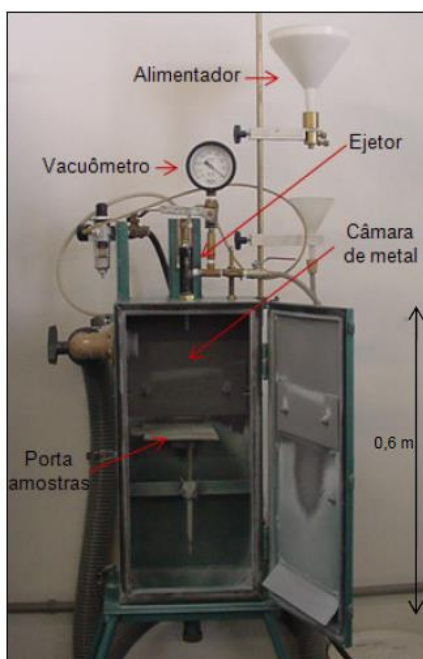
$A$  = seção transversal do corpo de prova (em  $\text{mm}^2$ )

### 3.3.3 Resistência à erosão

O ensaio de erosão foi realizado em três lajotas de 114 mm x 114 mm x 30 mm, para cada tipo de material analisado, e teve seus procedimentos experimentais baseados na norma ASTM C704M-15e1. As amostras foram calcinadas a 1000 °C e 1250 °C, conforme os critérios estabelecidos para os testes de recebimento e acompanhamento. Para cada temperatura selecionada, as lajotas foram pré-queimadas a 5 °C/min com 5 horas de patamar. Ainda foram determinadas as massas de cada corpo de prova antes do início do ensaio.

O equipamento utilizado foi um erosímetro a frio (Figura 33), o qual consiste essencialmente de uma câmara de metal, um porta-amostras, um vacuômetro, um alimentador de partículas abrasivas e um ejetor de material erosivo. Este último possui diversos elementos, sendo eles: entrada de ar (A); entrada de material abrasivo (B); o guia do tubo de vidro (C); o tubo de vidro (D); e o Venturi (E) (Figura 34).

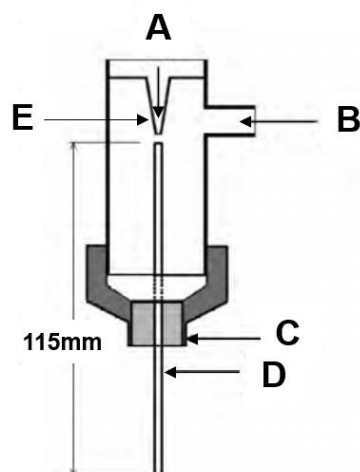
**Figura 21 – Erosímetro a frio utilizado**



Fonte: Gonçalves (2011)

**Figura 22 – Elementos principais do ejetor de partículas abrasivas**





Fonte: Santos e Pandolfelli (2007).

O ensaio é iniciado com a incidência de um jato de partículas de carbetto de silício, previamente pesado e armazenado em sacos de 1 kg (Figura 35), na superfície dos corpos de prova de refratário. Esse corpo de prova é colocado previamente dentro da câmara, cerca de 20 cm abaixo do bico ejetor. Nesse bico, o carbetto de silício é transportado em vácuo a 400 mmHg de pressão. O ângulo de incidência do abrasivo em relação aos corpos de prova é de 90°. Além disso, é feita uma pressurização de 3 cm de coluna d'água de pressão no interior da câmara.

**Figura 23 – Carbetto de silício separado em sacos de 1 kg para o ensaio de erosão**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com os valores de massa iniciais coletados, determinou-se a massa de cada corpo de prova após o ensaio. Dessa forma, a perda de material refratário por erosão foi determinada através da sua variação volumétrica ( $\Delta V$ ) e obtida através da Equação 7:

$$\Delta V = \frac{M_1 - M_2}{D.M.A} \quad (07)$$

Onde:

$\Delta V$  = perda volumétrica de material após o ensaio ( $\text{cm}^3$ )

$M_1$  = massa do corpo antes do ensaio de erosão (g)

$M_2$  = massa do corpo após o ensaio de erosão (g)

D.M.A = densidade de massa aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 3.3.4 *Variação linear dimensional (VLD)*

O teste de variação linear dimensional serve para avaliar as variações ocorridas linear ou volumetricamente no refratário curado. Durante a queima do refratário, podem ocorrer variações permanentes em suas dimensões, modificando o seu tamanho em relação ao inicial. A temperatura e o tempo influenciam estas variações dimensionais.

Para o ensaio, os corpos de prova foram moldados nas dimensões de 160 mm x 40 mm x 40 mm, em conformidade com a norma ASTM C113-14. Nesse ensaio, os corpos de prova foram aquecidos a diferentes temperaturas (1000 °C e 1250 °C), de acordo com o tipo de teste (recebimento ou acompanhamento), durante 5h. O objetivo da realização do ensaio após diferentes temperaturas de queima é analisar o comportamento dos concretos em estudo com relação à mudança de suas propriedades e estabilidade. Assim, o cálculo da variação linear dimensional foi obtido através da determinação do comprimento inicial ( $L_i$ ) da amostra antes da queima (110°C) e do comprimento final ( $L_f$ ) do corpo de prova (após sinterização), de acordo com a Equação 8.

$$VLD = \left( \frac{L_f - L_i}{L_i} \right) \times 100 \quad (08)$$

Onde:

VLD = variação linear dimensional (%)

$L_f$  = comprimento linear final (mm)

$L_i$  = comprimento linear inicial (mm)

### 3.3.5 Choque térmico

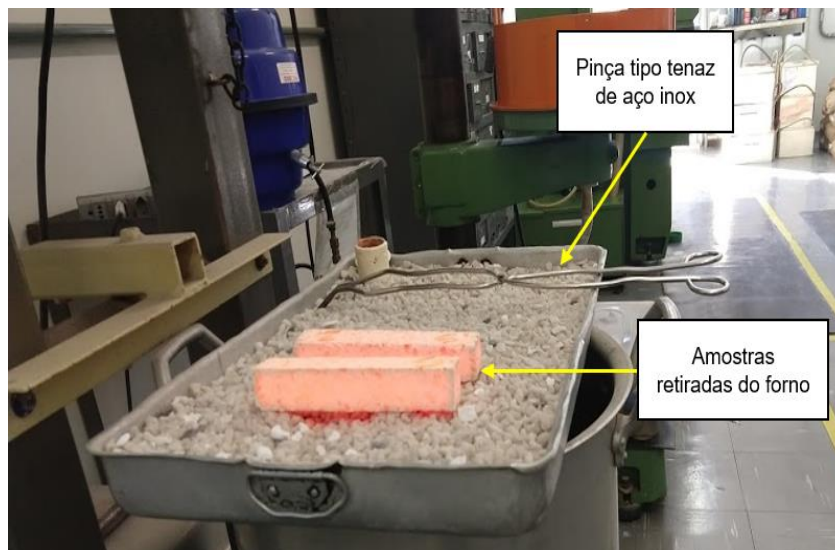
O ensaio de choque térmico foi realizado em dois pares de barras com as dimensões de 148 mm x 25 mm x 25 mm, sendo quatro pares de amostras por material, tendo como base a norma ASTM C1171-16. Essas amostras foram colocadas dentro de um forno tipo mufla modelo FDG 3P-S previamente em patamar de 1250 °C, permanecendo em seu interior por 15 minutos, sendo posteriormente retiradas e expostas ao ar (temperatura ambiente de 25°C) por mais 15 minutos, completando assim um ciclo térmico. Enquanto o primeiro par de barras resfria depois de aquecido, o segundo par é colocado ao forno para aquecer. Dessa forma, sempre se tem duas amostras dentro e duas amostras fora do forno. Foram realizados no total oito ciclos térmicos por corpo de prova. Por fim, a inserção ou a retirada do concreto do forno foi feita manualmente utilizando-se uma pinça tipo tenaz de aço inox. As Figuras 36 e 37 apresentam o equipamento utilizado durante o ensaio e as amostras retiradas do forno, com o auxílio de uma pinça tipo tenaz, após serem submetidas a uma temperatura de 1250°C por 15min.

**Figura 24 – Forno utilizado para aquecer as amostras durante o ensaio**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

**Figura 25 – Amostras retiradas do forno com o auxílio de uma pinça**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Antes e após o ciclo de choque térmico de cada material, efetuou-se medidas do módulo elástico para obtenção do valor percentual retido do módulo de Young, conforme Equação 9:

$$E(\%) = \left( \frac{E_{CT}}{E} \right) (09)$$

Onde:

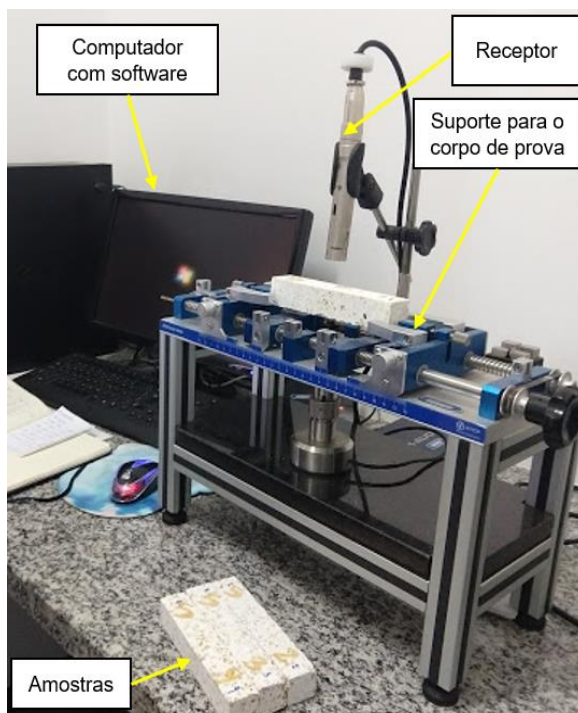
$E(\%)$  = percentual retido de  $E$

$E_{CT}$  = módulo de Young do corpo após o choque térmico (GPa)

$E$  = módulo de Young inicial (GPa)

Para a medida do módulo elástico, utilizou-se o método de ressonância de barras. Através do equipamento “Sonelastic” da marca ATCP, o qual funciona baseado no método de excitação por impulso, as frequências de ressonância e o cálculo do módulo foram efetuados, conforme apresentado na Figura 38. O dano sofrido por choque térmico foi identificado pela queda do módulo elástico ( $E$ ) em função do número de ciclos aplicados. Foram realizadas medidas de  $E$  a cada dois ciclos.

**Figura 26 – Equipamento Sonelastic utilizado para medir o módulo elástico**

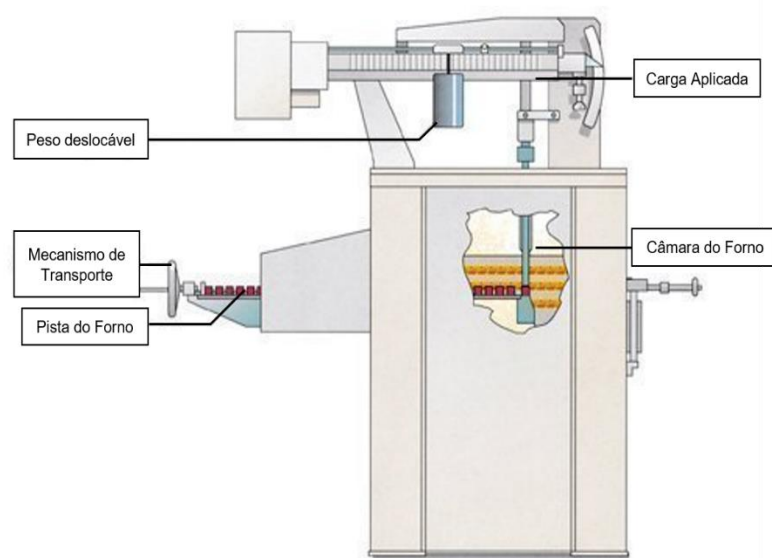


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### 3.3.6 Módulo de ruptura a quente (MRQ)

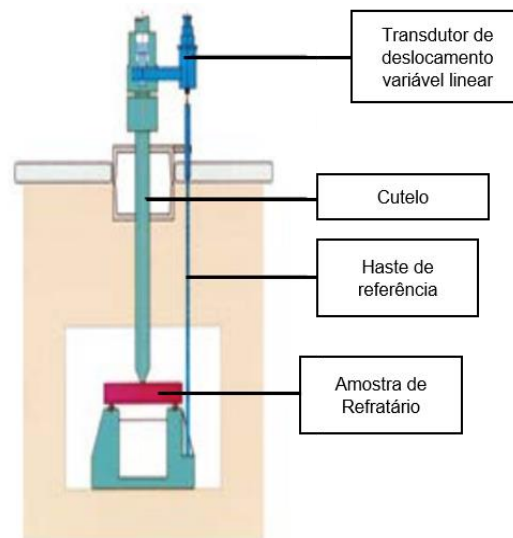
O módulo de ruptura a quente por flexão em três pontos foi realizado de acordo com a norma ASTM C583. Nesse ensaio, cinco amostras de dimensões 25 mm x 25 mm x 150 mm, agrupadas por tipo de material refratário, foram ensaiadas a 1250 °C (teste de acompanhamento), utilizando-se uma taxa de carregamento de 4,42 kN/min e distância entre os apoios de 178 mm. O equipamento utilizado durante o procedimento experimental foi o modelo HBST (High Bending Strength Tester), 422 D/3, da Netzsch. Detalhes desse equipamento são apresentados nas Figuras 39, 40 e 41.

**Figura 27 – Principais componentes do equipamento HBST 422 D/3**



Fonte: Adaptado de Netzsch (2020)

**Figura 28 – Detalhe (corte transversal) do sistema de ruptura do equipamento HBST 422**



Fonte: Adaptado de Netzsch (2020)

**Figura 29 – Equipamento HBST 422 utilizado no ensaio de MRQ**



Fonte: Netzsch (2020)

No início do ensaio, as amostras são inseridas na pista do forno (interior) e são empurradas e direcionadas a uma espécie de limitador de curso, que deixa o corpo de prova posicionado sob o cutelo (ferramenta que causa a ruptura). Uma vez posicionada a amostra, retira-se o limitador, e então o forno é programado para ser aquecido até a temperatura desejada (1250 °C), que depois de atingida é mantida, a fim de que se obtenha estabilidade. Depois de se estabilizar a temperatura, o botão start da máquina é pressionado fazendo com que o cutelo desça e rompa a amostra. A força exercida pelo cutelo é medida pela máquina através de uma escada de força.

Para o cálculo da tensão de fratura, utilizou-se a Equação 10:

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \left( \frac{P_{max} \cdot L}{b \cdot h^2} \right) \quad (10)$$

Onde:

$P_{max}$  = carregamento máximo sofrido pelo corpo (N)

L = distância entre os dois apoios (mm)

b = largura do corpo (mm)

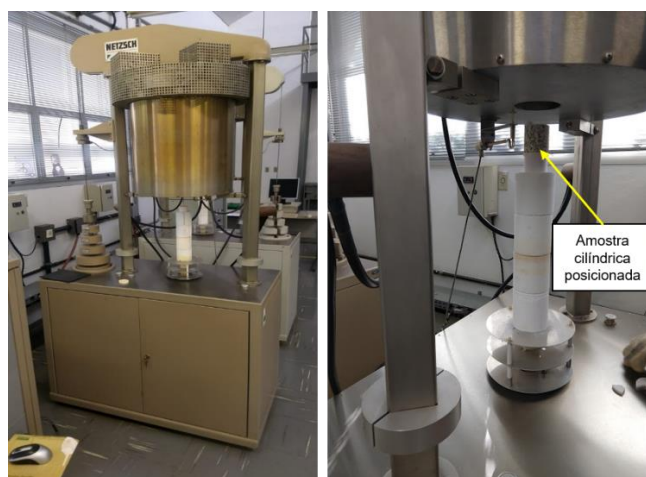
$h$  = altura do corpo (mm)

$\sigma_f$  = tensão de ruptura (MPa)

### 3.3.7 Refratariedade sob carga (RSC)

O ensaio de refratariedade sob carga seguiu as orientações da norma DIN 51053 e foi realizado através do equipamento Netzsch, modelo RUL 421E, com capacidade de aplicação de carga de 1000 N. O objetivo deste ensaio foi medir a expansão ou retração dos materiais analisados, quando submetidos a tensão compressiva e aquecidos a uma taxa constante até a temperatura de 1600°C. As Figuras 42 e 43 apresentam detalhes do equipamento utilizado, posicionamento da amostra e principais componentes do RUL 421E.

**Figura 30 – Ensaio de RSC: (a) Equipamento Netzsch modelo RUL 421E e (b) posicionamento da amostra cilíndrica de refratário**



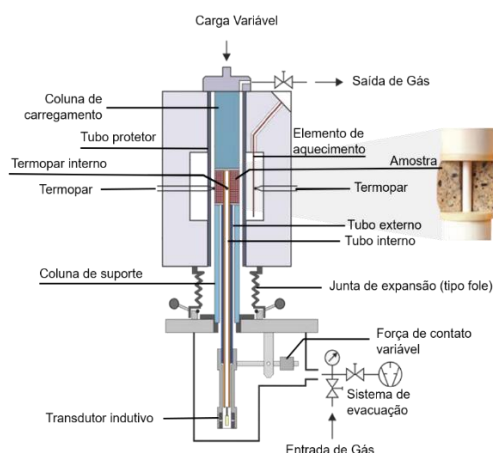
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

**Figura 31 - Principais elementos do Equipamento Netzsch modelo RUL 421E**





Fonte: Adaptado de Netzsch (2020)

Antes do início do ensaio, através do software Netzsch Proteus – Thermal Analysis fornecido junto com o equipamento, foram inseridos os dados da amostra, tais como: altura, diâmetro externo, diâmetro interno, temperatura atual, temperatura final, e taxa de aquecimento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Assim, foram utilizadas duas amostras cilíndricas por tipo de material, com as seguintes dimensões: 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura, com um orifício central passante (Figura 35). Essas amostras foram submetidas a um aquecimento de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $1600^{\circ}\text{C}$  sob compressão de 0,2 MPa, e suas deformações foram registradas durante o ensaio. Além disso, esse programa gera um gráfico de expansão em função da temperatura da amostra, sendo que o ponto máximo da curva corresponde à temperatura de amolecimento,  $T_{soft}$ ; a temperatura em que a amostra retrai 0,5% em relação a suas dimensões iniciais a partir do ponto de amolecimento está relacionado à temperatura máxima de trabalho,  $T_{0,5\%}$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas

#### 4.1.1 Porosidade aparente (PA) e Absorção de Água (AA)

Os resultados de porosidade aparente e absorção de água, obtidos a partir da média dos valores das cinco amostras analisadas por material, foram relacionados aos resultados da resistência mecânica dessas amostras secas a  $110^{\circ}\text{C}$  e estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 5 – Comparação entre a AA, PA e a RCTA das amostras secas a  $110^{\circ}\text{C}$**

<b>Material</b>	<b>Método de aplicação</b>	<b>PA (%)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>RCTA (Mpa)</b>
RD (A)	Vertimento	13,46 ± 0,63	3.95 ± 0,20	44,29 ± 10.47
RD (B)	Projeção	16,80 ± 0.36	5.02 ± 0,09	32,65 ± 5.60
RD (C)	Vertimento	11,81 ± 0.51	4.07 ± 0,20	52,19 ± 10.62
RD (D)	Vertimento	12,33 ± 0.73	3.62 ± 0,23	36,30 ± 8.27

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A partir desses valores, percebe-se que, em geral, à medida que a porosidade do material cerâmico refratário aumenta, há uma diminuição na sua resistência mecânica. No caso do RD (C) e RD (D) percebe-se que apesar desses materiais apresentarem valores de PA bem próximos, o material RD (C) apresentou maior resistência mecânica. Uma possível explicação para esse fenômeno está no teor de cimento presente nesses materiais: RD (C) possui cerca de 4,1% de teor de óxido de cálcio (CaO), sendo, portanto, considerado um concreto refratário convencional, enquanto os demais refratários analisados apresentam teores de CaO entre 1,0% e 2,5%, sendo caracterizados como concretos refratários com baixo teor de cimento.

A determinação da porosidade aparente de um refratário é fundamental e deve ser levada em consideração no momento da especificação do tipo de material a ser utilizado em calcinadores de alumina, uma vez que refratários altamente porosos, excetuando-se os materiais isolantes, acabam afetando a resistência mecânica e eventualmente a resistência à erosão, contribuindo, assim, para o desgaste no revestimento. Portanto, as amostras com menor porosidade possuem maior probabilidade de boa performance durante a operação do equipamento, sem necessidade de constantes manutenções.

#### 4.1.2 Densidade aparente (DMA)

Os valores médios obtidos para a densidade aparente foram comparados com a densidade especificada na ficha técnica de cada material, a 110 °C, além de associados aos resultados da resistência mecânica à temperatura ambiente das amostras analisadas, e estão disponíveis na Tabela 7.

**Tabela 6 – Comparação entre a DA, DA (ficha técnica) e RCTA das amostras secas a 110°C**

<b>Material</b>	<b>Método de aplicação</b>	<b>DA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DA (g/cm<sup>3</sup>) ficha técnica</b>	<b>RCTA (Mpa)</b>
RD (A)	Vertimento	2,69 ± 0,01	2,65	44,29 ± 10.47
RD (B)	Projeção	2,65 ± 0,02	2,70	32,65 ± 5.60
RD (C)	Vertimento	2,29 ± 0,02	2,16	52,19 ± 10.62
RD (D)	Vertimento	2,69 ± 0,01	2,03	36,30 ± 8.27

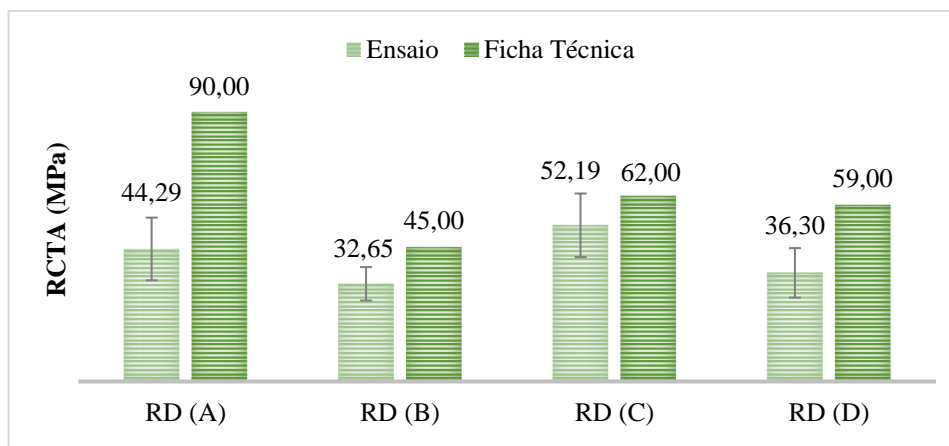
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Os resultados acima podem ser analisados a partir de duas perspectivas. A primeira, em relação aos testes de recebimento, demonstra que a maioria dos materiais recebidos e analisados apresentou densidade aparente maior que o especificado em suas fichas técnicas de aplicação. Em geral, quanto maior a densidade, menor será o volume de vazios e, assim, maior será a resistência à corrosão e a resistência mecânica do material. Já quanto ao segundo aspecto, percebe-se que o material RD (C), mesmo possuindo densidade menor que os demais materiais analisados, apresentou a maior resistência à compressão. Esse fenômeno pode ter ocorrido devido a influência de outros fatores, tais como empacotamento, matérias-primas utilizadas e tipo de ligante.

#### 4.1.3 Resistência à compressão (RCTA)

A Figura 44 apresenta os valores obtidos para o ensaio de resistência à compressão à temperatura ambiente das amostras secas a 110 °C.

#### **Figura 32 – Comparação entre a RCTA obtida no ensaio e os valores da ficha técnica**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

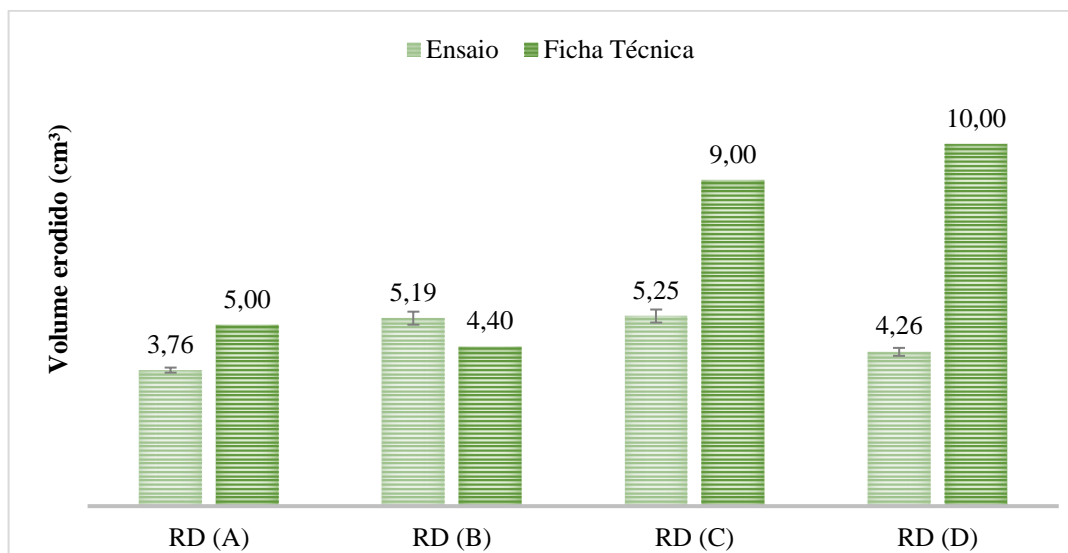
Ao se comparar os resultados obtidos por meio do ensaio de RCTA com os valores apresentados nas fichas técnicas de cada material, percebe-se que todos os materiais apresentaram valores médios de resistência mecânica abaixo do valor estipulado pelos fabricantes. Todavia, a amplitude dos desvios identificados entre os valores de ensaio obtidos e àqueles informados nas fichas técnicas dos materiais pode evidenciar a possibilidade de variações ou instabilidade durante a aplicação, por parte dos fabricantes, bem como a utilização de procedimentos inadequados para a preparação de corpos de prova ou para a execução de ensaios, como por exemplo, o uso de prensas manuais na determinação da resistência à compressão à temperatura ambiente, fato que dificulta o controle da taxa de carregamento durante o ensaio.

Dessa forma, evidencia-se que os valores informados pelas fichas técnicas dos refratários devem ser utilizados apenas como referências e jamais como resultados absolutos, principalmente na etapa de seleção e projetos. Portanto, os ensaios provenientes do teste de recebimento são fundamentais no processo de qualificação dos materiais refratários.

#### 4.1.4 Resistência à erosão

A Figura 45 apresenta os valores obtidos para o ensaio de resistência à erosão após tratamento térmico a 1000 °C, em conformidade com os critérios estabelecidos para os testes de recebimento.

**Figura 33 – Resistência à erosão a 1000 °C**

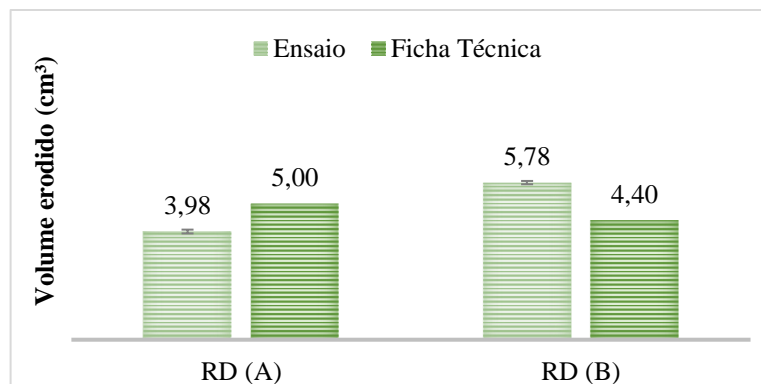


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Nos resultados expostos acima, fica perceptível que os concretos refratários RD (A), RD (B), RD (C) e RD (D) apresentaram boa resistência à erosão, uma vez que o volume de material perdido por eles foi baixo. Percebe-se, ainda, que comparando-se os valores obtidos desses concretos com os valores fornecidos pelas fichas técnicas, os materiais possuem resistência à erosão dentro do especificado, apresentando valores melhores do que aqueles expostos em suas fichas de aplicação, com a exceção do material RD (B) que apresentou volume erodido (5,19 cm<sup>3</sup>) um pouco maior em relação à sua especificação técnica (4,40 cm<sup>3</sup>). Essa diferença no volume erodido de RD (B) pode estar relacionada à resistência mecânica de sua matriz e agregados, assim como a coesão dos grãos que compõem o concreto. Tendo em vista a indisponibilidade de informações técnicas por parte dos fornecedores, não foi possível a realização de um estudo mais aprofundado.

Já em relação ao teste de acompanhamento, a determinação da resistência à erosão foi realizada com amostras queimadas a 1250 °C, que é a temperatura típica de operação do calcinador. Nesse caso, verificou-se a resistência à erosão nessa temperatura somente para RD (A) e RD (B), pois esses materiais são aplicados nos dois vasos críticos do calcinador (pré-aquecedor e forno, respectivamente). Os resultados estão apresentados na Figura 46.

Figura 34 – Resistência à erosão a 1250 °C



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Dessa forma, com o aumento da temperatura, percebe-se que também houve o aumento do volume erodido. Conseqüentemente, a resistência à erosão de ambos os materiais foi reduzida em relação aos valores obtidos para 1000 °C. Ainda assim, o material RD (A) apresentou resistência à erosão superior àquela especificada em ficha técnica; apesar de RD (B) demonstrar um volume erodido um pouco superior ao da ficha técnica, o material apresentou um valor médio aceitável se comparado aos demais materiais.

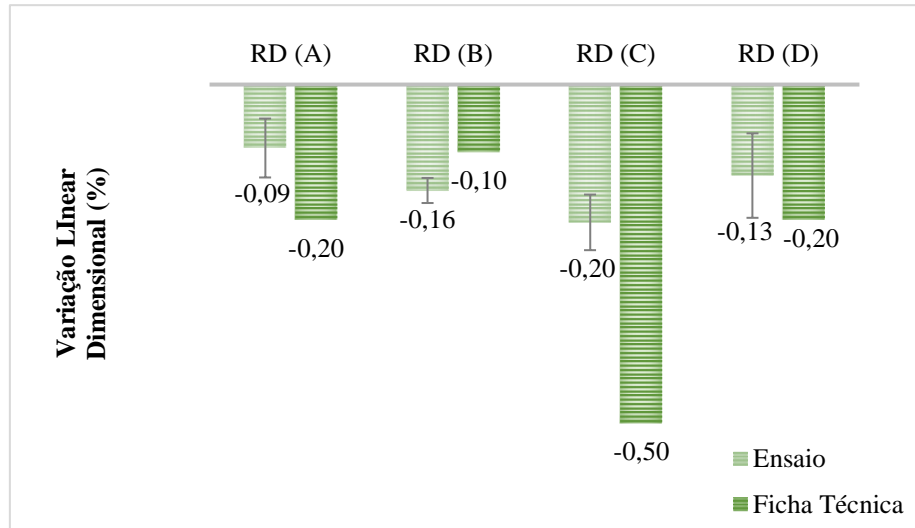
A análise dos resultados de erosão para o material RD (B), aplicado no forno do calcinador, evidencia que esse material pode não apresentar um bom desempenho no tempo total de serviço esperado para esse equipamento, devido ao desgaste à erosão oriundo da presença de alumina calcinada a altas temperaturas e velocidades.

#### 4.1.5 Variação linear dimensional (VLD)

A Figura 47 mostra a variação linear dimensional para os corpos de prova sinterizados a 1000 °C por 5 horas, no caso dos testes de recebimento.

Os resultados desse ensaio demonstram que RD (A), RD (B) e RD (D) apresentaram valores de VLD próximos àqueles especificados em suas fichas técnicas para a mesma temperatura considerada. O RD (C), por outro lado, apresentou uma variação linear dimensional maior quando comparada ao valor informado pelo fabricante.

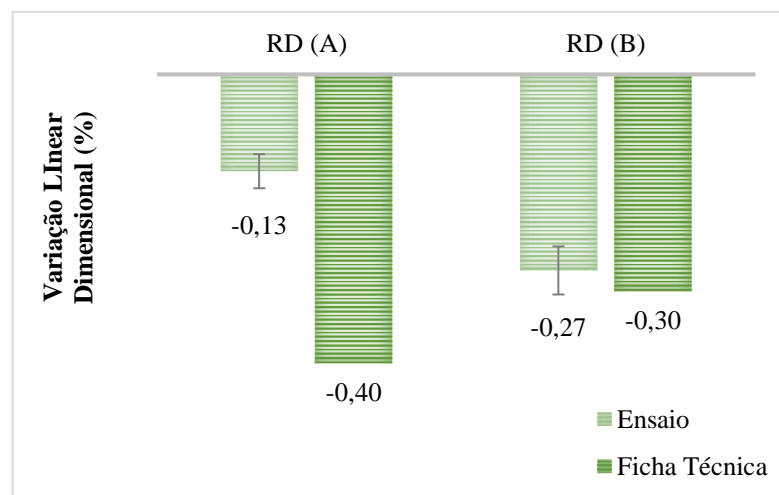
**Figura 35 – Variação linear dimensional a 1000 °C**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Quanto ao teste de acompanhamento, a variação linear dimensional foi determinada a partir de amostras queimadas a 1250 °C para o RD (A) e o RD (B), aplicados no pré-aquecedor e forno do calcinador. Os resultados estão apresentados na Figura 48.

**Figura 36 – Variação linear dimensional a 1250 °C**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Nota-se que o aumento de temperatura propiciou o aumento da variação linear dimensional dos dois materiais analisados. Mesmo assim, os materiais RD (A) e RD (B) apresentaram VLD dentro dos parâmetros estabelecidos pelo fabricante. Esse aumento significativo na variação linear dimensional pode indicar futuras fissuras no revestimento refratário. As tensões geradas pelas mudanças dimensionais e pela exposição a ciclos térmicos acabam provocando essas fissuras, as quais exercem grande influência sobre a integridade do material e, conseqüentemente, afetam a vida útil do próprio equipamento.

#### 4.1.6 Resistência ao choque térmico

A resistência ao choque térmico, um importante parâmetro em relação ao desempenho dos materiais aplicados nos vasos críticos do calcinador (forno e pré-aquecedor), foi medida através da variação do módulo de elasticidade em função do número de ciclos com  $\Delta T$  de 1250 °C. A Tabela 8 apresenta os valores iniciais e finais do módulo elástico de cada material analisado após 8 ciclos de choque térmico.

**Tabela 7 – Módulo elástico antes e após 8 ciclos de choque térmico ( $\Delta T = 1250^{\circ}\text{C}$ )**

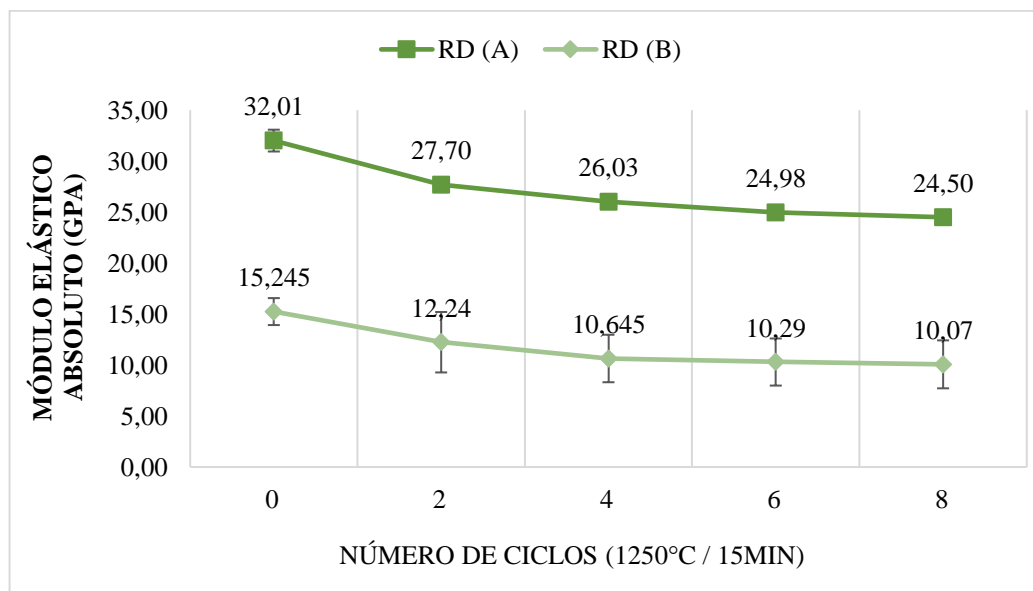
<b>Material Refratário</b>	<b>Módulo Elástico Inicial (GPa)</b>	<b>Módulo Elástico após 8 ciclos (GPa)</b>
RD (A)	32.01	24.50
RD (B)	15.24	10.07

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Primeiramente, maiores valores iniciais de módulo elástico indicam maior rigidez e superior resistência mecânica. Dessa forma, o material RD (A) por apresentar maior módulo elástico inicial seria, portanto, superior em relação ao refratário RD (B) no parâmetro resistência mecânica. Essa análise preliminar confirma os resultados obtidos no ensaio de RCTA: a resistência mecânica média obtida para RD (A) foi de 44.29 MPa enquanto o valor obtido para RD (B) foi 32.65 MPa. Todavia, em relação à resistência ao choque térmico, ainda se torna necessário a análise da queda percentual do módulo elástico entre os materiais. As Figuras 49 e 50 apresentam a variação e queda percentual do módulo elástico dos refratários analisados.

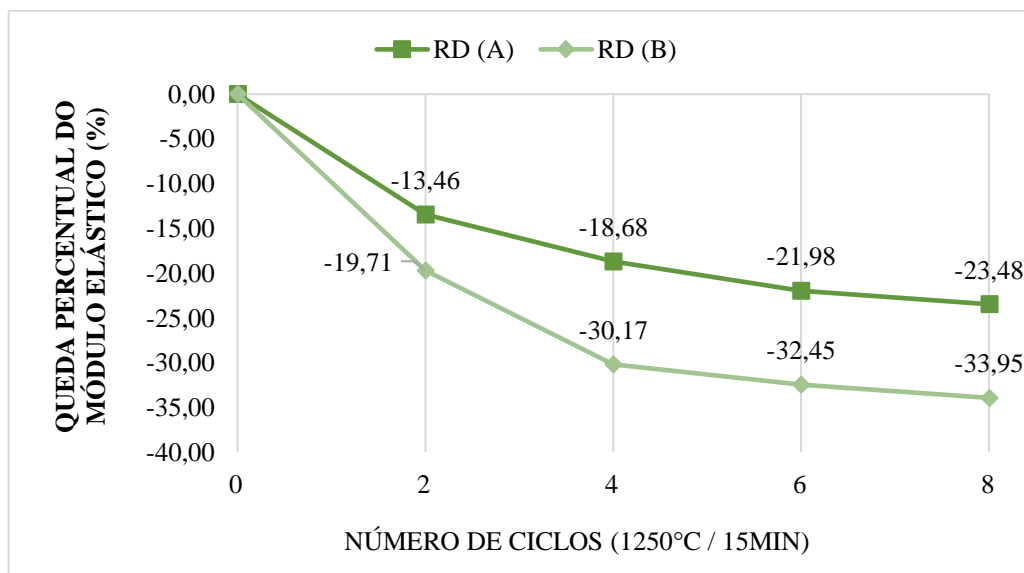


Figura 37 – Variação do módulo de elasticidade em função dos números de ciclos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 38 – Queda percentual do módulo elástico em função dos números de ciclos



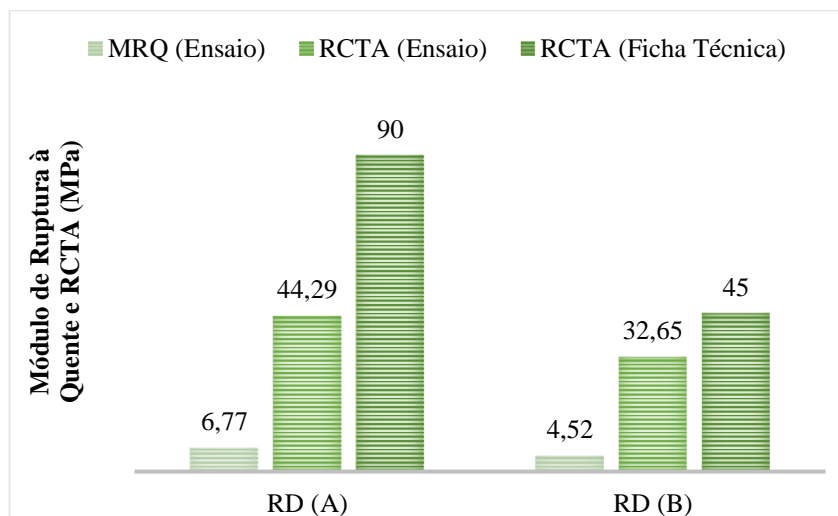
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A partir dos resultados expostos, percebe-se que o material RD (A), além de possuir maior módulo de elasticidade final, apresentou menor queda percentual de E em relação ao material RD (B). Além disso, a análise da queda percentual do módulo elástico de RD (A) demonstra uma queda menos acentuada, o que evidencia que esse material formou menos trincas durante os ciclos de choque térmico, perdendo pouco de sua propriedade elástica. Portanto, RD (A) apresentou maior resistência ao choque térmico, fato que pode ser associado a um melhor desempenho em serviço, considerando os ciclos térmicos inerentes sobretudo nos vasos quentes dos calcinadores de alumina.

#### 4.1.7 Módulo de ruptura à quente (MRQ)

A Figura 51 mostra os valores do módulo de ruptura a quente, em MPa, obtidos a partir dos corpos de prova sinterizados a 1250 °C. Os resultados demonstram uma queda no valor do módulo de ruptura à quente dos refratários RD (A) e RD (B) em relação aos valores obtidos para RCTA. Contudo, os valores alcançados estão condizentes com aqueles obtidos no ensaio de erosão na mesma temperatura (1250°C), uma vez que ambas as propriedades estão relacionadas. Dessa forma, o material RD (A) apresentou maior valor médio de MRQ e menor volume erodido (3.98 cm<sup>3</sup>) enquanto RD (B), além de apresentar MRQ médio de 4.52 Mpa, teve um volume erodido de 5.78 cm<sup>3</sup>.

**Figura 39 – Valores médios do módulo de ruptura à quente e RCTA por tipo de refratário**



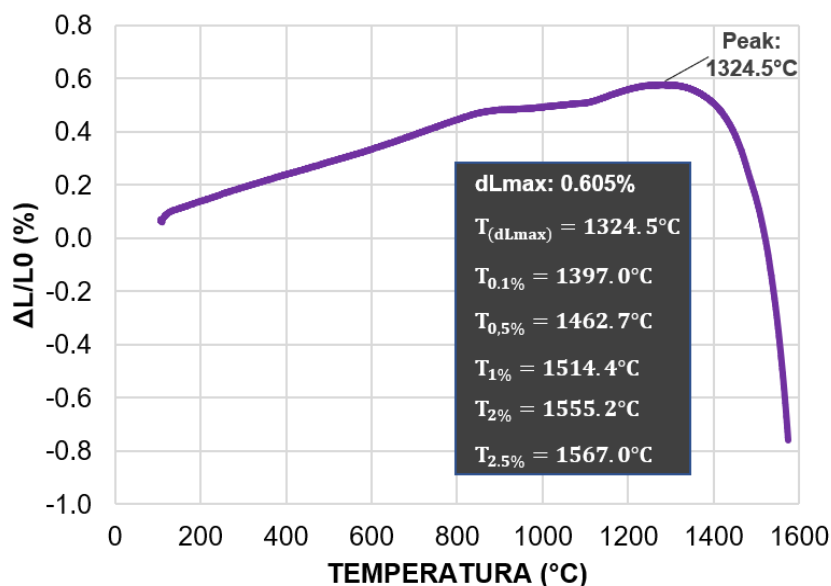
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tendo em vista que o teste de flexão a quente indica a capacidade do material resistir a tensões causadas por cargas mecânicas à alta temperatura, o MRQ pode ser ainda um importante parâmetro no monitoramento da resistência ao choque térmico de um material. Em geral, durante o ensaio de choque térmico, os materiais são submetidos à ciclos térmicos, os quais podem contribuir para a formação de trincas e microtrincas que são responsáveis pela diminuição da resistência à flexão. Portanto, ao se comparar os resultados obtidos no ensaio de choque térmico com os valores de MRQ, fica evidente que o refratário RD (A) apresentou melhor resistência ao choque térmico, com uma queda menos acentuada de E (menor formação de trincas durante o ciclo térmico), e, conseqüentemente, alcançou maior valor médio para módulo de ruptura à quente.

#### 4.1.8 Refratariedade sob carga (RSC)

A refratariedade sob carga dos concretos refratários densos foi avaliada pela deformação com o aumento da temperatura sob uma carga constante. A Figura 52 apresenta o resultado do ensaio de RSC para o material RD (A) até 1600 °C, conforme estabelecido para o teste de acompanhamento.

**Figura 40 – Informações do software Proteus (RSC) com a curva para o material RD (A)**

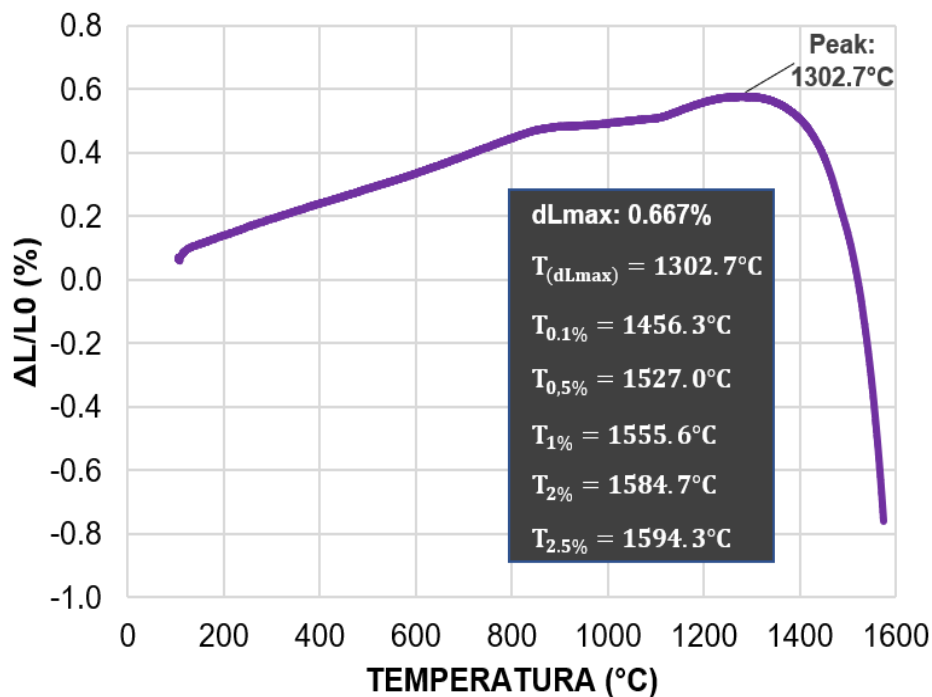


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com a temperatura crescente entre a temperatura ambiente e 1400  $^{\circ}\text{C}$ , o refratário RD (A) apresentou, inicialmente, uma expansão, ou seja, um alongamento, que é devido à expansão térmica. Além disso, no ponto máximo da curva, sua temperatura de amolecimento ( $T_{\text{soft}}$ ) alcançou cerca de 1.324,5  $^{\circ}\text{C}$ , enquanto a temperatura máxima de trabalho ( $T_{0,5\%}$ ) – a qual corresponde ao valor máximo em que a amostra retrai 0,5% em relação a suas dimensões iniciais a partir do ponto de amolecimento – foi de 1.462,7  $^{\circ}\text{C}$ .

Em relação ao material RD (B), seu gráfico de expansão em função da temperatura (Figura 53) apresentou uma temperatura de amolecimento ( $T_{\text{soft}}$ ) de 1.302,7  $^{\circ}\text{C}$  e temperatura máxima de trabalho ( $T_{0,5\%}$ ) de 1.527,0  $^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 41 – Informações do software Proteus (RSC) com a curva para o material RD (B)**



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Comparando-se esses resultados com os dados fornecidos pela ficha técnica de cada material (Tabela 9), nota-se que as temperaturas máximas de serviço obtidas através do ensaio foram inferiores àquelas especificadas pelos fabricantes. Isso pode ocasionar a redução da vida útil do revestimento e exposição do equipamento à paradas inesperadas, tendo em vista que a refratariedade do material será ultrapassada, contribuindo para a formação de fase líquida e perda das demais propriedades do revestimento refratário.

**Tabela 8 – Comparação entre as temperaturas de serviço obtidas através do ensaio e os valores informados pelos fornecedores**

Tipo de refratário	Máx. temp. de serviço ( $^{\circ}\text{C}$ ) – ensaio	Máx. temp. de serviço ( $^{\circ}\text{C}$ ) – ficha técnica
RD (A)	1.462,7	1.750
RD (B)	1.527,0	1.750

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios de caracterização para os testes de recebimento e acompanhamento demonstraram que as propriedades dos materiais analisados não estavam totalmente em consonância com os valores informados pelos fornecedores em suas fichas técnicas. Dessa forma, os resultados permitiram a seguinte análise:

- ✓ *O material RD (B), de projeção, apresentou alta porosidade aparente e baixa resistência à compressão em relação aos demais materiais e à sua ficha técnica;*
- ✓ *Todos os materiais apresentaram valores de resistência à compressão menores do que aqueles especificados, indicando baixa resistência mecânica;*
- ✓ *Todos os materiais, exceto o material RD (B), apresentaram valores para a resistência à erosão e variação linear dimensional melhores do que o esperado;*
- ✓ *O material RD (A) demonstrou melhor resistência ao choque térmico e melhor módulo de ruptura a quente do que o material RD (B);*
- ✓ *No teste de refratariedade sob carga, RD (A) e o RD (B) apresentaram temperatura máxima de serviço menor do que aquela especificada pelo fabricante, indicando uma refratariedade menor para as condições operacionais do processo.*

Analisando os resultados acima, fica evidente a importância dos testes de recebimento e acompanhamento como ferramentas eficientes de controle de qualidade do refratário a ser aplicado. A correta análise sistêmica das propriedades dos materiais refratários recebidos e aplicados influencia diretamente no desempenho e vida útil do equipamento, tendo em vista que as condições operacionais exigem propriedades superiores às especificadas em projeto, levando-se em consideração a relação existente entre desempenho, segurança e disponibilidade operacional (produção).

## REFERÊNCIAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas – definição e classificação**. 2019. Disponível em: <<https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 2 fev. 2020.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6220 – Materiais refratários densos conformados**: determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 6637 – Materiais refratários**: determinação da dilatação térmica linear reversível. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 6946 – Material refratário**: determinação granulométrica por peneiramento de matérias-primas refratárias e refratários não conformados – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 8826 – Materiais refratários**: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 10237 – Materiais refratários**: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ALCÂNTARA, M.A.M. **Materiais de construção civil**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2008.

ALMEIDA, V.G.O. **Caracterização física e mecânica a altas temperaturas de concretos refratários reforçados com fibras de aço**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ALUMAR. **Projeto de Expansão da Refinaria de Alumina**. 2019. Disponível em: <<http://www.alumar.com.br>>. Acesso em: 15 set. 2019.

AMARAL, E.M. **Análise da influência da granulometria e dispersão das partículas nas propriedades de concretos refratários**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ASTM International. **ASTM C113-14**. Standard test method for reheat change of refractory brick. ASTM International: West Conshohocken, 2019. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 23 mar. 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM C133-97**. Standard test methods for cold crushing strength and modulus of rupture of refractories. ASTM International: West Conshohocken, 2015. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 23 mar. 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM C583-15**. Standard test method for modulus of rupture of refractory materials

at elevated temperatures. ASTM International: West Conshohocken, 2015. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 10 mar. 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM C704 / C704M-15e1**. Standard test method for abrasion resistance of refractory materials at room temperature. ASTM International: West Conshohocken, 2015. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 23 mar. 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM C830-00**. Standard test methods for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure. ASTM International: West Conshohocken, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 23 mar. 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1171-16**. Standard test methods for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure. ASTM International: West Conshohocken, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 12 jan. 2020.

BHILOTRA, K.R.K. **Curso Processo Bayer – Calcinação**. Canadá: Alcan, 1993. p. 31.

BRAULIO, M.A.L. et al. **Improving the reliability of fluidized bed alumina calciners by suitable refractory lining selection**. In: TMS – The Minerals, Metals & Materials Society. Light metals, 2019. Nova York: Springer, 2019. p. 27-32.

BUDNIKOV, P.P. **The technology of ceramics and refractories**. Londres: Edward Arnold Ltd, 1964.

CALLISTER JR., W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012.

CANNIO, M.; HANUSKOVÁ, M. **Os materiais refratários**. Revista Cerâmica: Informação, Florianópolis, n. 63, p. 24-29, 2011.

CERAMIC ARTS NETWORK. **How to Make a Cone Pack for Your Kiln Firing**. 2019. Disponível em: <<https://ceramicartsnetwork.org/daily/clay-tools/ceramic-kilns/how-to-make-a-cone-pack-for-your-kiln-firing/#>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

COOK, M.D; COOK, C.P.; KING, D.F. **Pneumatic placement of refractory castable, part I**, American ceramic. Society Bulletin, v. 42, n. 9, p. 486-89, 1963.

COTTA, L.S.; RODRIGUES, C.G. **Avaliação de revestimento refratário no processo siderúrgico**. Revista E-xacta, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p. 185-203, 2014. Disponível em: <<https://revistas.unibh.br/dcet/article/view/1178>>. Acesso em: 18 jan. 2020.

DUARTE, A. **Definição de refratários**. In: CURSO FUNDAMENTOS DE REFRAATÓRIOS, 2012, Belo Horizonte.



\_\_\_\_\_. **Encapsulamento cerâmico de resíduos de materiais refratários.** Programa de Pós-Graduação de Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2005.

\_\_\_\_\_. **Propriedades dos materiais refratários.** In: CURSO DE REFRAATÓRIOS, 2003, Belo Horizonte.

DIN - DEUSTCHES INSTITUT FUR NURMING. **Determination of Creep or Refractoriness Under Load - DIN 51053.** Germany, 1973. Disponível em: <<https://www.ortonceramic.com/dir.cfm//en/DIN%2051053,%20ISO%203187//>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

FERNANDES, N.G. **Desenvolvimento de concreto refratário multifuncional utilizando sílica coloidal como ligante para aplicações na indústria cimenteira.** 2015. 54 f. TCC (Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FISH, W.M. **Alumina calcination in the fluid-flash calciner.** In: LIGHT METALS, 103., 1974, Dallas. Warrendale: TMS/AIME, 1974. p. 673-682.

FREITAS, V.; TORRES, M. **Humidade ascensional.** Porto: FEUP, 2008.

GONÇALVES, G. A interpretação prática dos testes de qualidade executados pelo GCQ. In: PALESTRA GCQ, 2009, Belo Horizonte. In: \_\_\_\_\_. **A interpretação prática dos testes de qualidade executados pelo GCQ.** Belo Horizonte: [s.n.], 2009.

GONÇALVES FILHO, E.L. **Modelagem e Simulação de Calcinadores de Hidróxido de Alumínio em Leito Fluidizado.** Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, UFRN. Rio de Janeiro. 2012.

GONÇALVES, L.R.G. **Erosimetria a quente: equipamento, adequações e correlações dos valores obtidos com as propriedades de concretos refratários.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

GONÇALVES, L.R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Avaliação de erosão a quente de concretos refratários para calcinadores de leito fluidizado.** Cerâmica, v. 57, p. 193-198, 2011.

GREEN, J. **Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability.** Ohio: ASM International, 2007.

GUNGOR, A.; CELIKCIOGLU, O.; SAHIN, S. **The physical and mechanical properties of alumina-based ultralow cement castable refractories.** Ceramics International, v. 38, p. 4189-4194, 2012.

HANCOCK, J.D. **Practical refractories.** Huddersfield: Cartworth Industries, 1988.

- HILTUNEN, P. et al. **How to achieve high availability with large calciners and avoid unforeseen downtime**. In: LIGHT METALS, 2008, New Orleans. Warrendale: TMS, 2008. p. 63-68.
- HIND, R.A.; BHARGAVA, S.K.; GROCCOTT, S.C. **The surface chemistry of Bayer process solids: a review**. Colloids and Surfaces – A: Physicochemical and Engineering Aspects, n. 146, p. 359-374, 1999.
- HOLTERHOFF JR, A.G. **Fire training facilities: materials and methods**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), jul. 2001, Edinburgh. p. 169-180.
- HUDSON, L.K. (Ed.). **Alumina production**. Pittsburgh: Alcoa Research Laboratories, 1982. cap. 8, p. 288.
- INNOCENTINI, M.D.M. et al. **Efeito da distribuição granulométrica na secagem de concretos refratários**. Cerâmica, v. 47, n. 304, p. 212-218, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v47n304/7815.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- IOM<sup>3</sup> – Institute of Materials, Minerals and Mining. **IOM<sup>3</sup>**. 2005. Disponível em: <<http://www.iom3.org>>. Acesso em: 14 set. 2020.
- IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry. **IUPAC**. 2020. Disponível em: <[www.iupac.org](http://www.iupac.org)>. Acesso em: 23 out. 2019.
- LEE, W.E; MOORE, R.E. **Evolution of in situ refractories in the 20th century**. Journal of American Ceramic Society, v. 81, n. 6, p. 1385-1410, 1998.
- LOPES, J.T.B. **Ensaio mecânico dos materiais**. [Notas de Aula]. In: \_\_\_\_\_. Curso de Estrutura e Propriedades dos Materiais. Belém: Universidade Federal do Pará (UFPA), 28 ago. 2018.
- MACFIE, R. **Curso processo Bayer: noções gerais sobre o processo Bayer**. Burntisland: Alcan, 1988. p. 42.
- MACZURA, G. et al. Refractory cements. In: SMOTHERS, W.J. **Proceedings of the raw materials for refractories conference: ceramic engineering and science**. USA: The American Ceramic, 1993. p. 46-67.
- MARTINOVIC, S. et al. **Cavitation resistance of refractory concrete: Influence of sintering temperature**. Journal of the European Ceramic Society, v. 33, n. 1, p. 7-14, jan. 2013.
- MEDEIROS, J. **Refratários de elevada tenacidade para uso em aplicações críticas na indústria do refino de petróleo**. 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MENEZES, I. **Refratários: propriedades mecânicas, fratura e efeitos termomecânicos**. In: SEMINÁRIO SOBRE ACIARIA E REFRAATÁRIOS, 1989, Vitória.

MISSALA, M. et al. **Significant improvement of energy efficiency at alunorte's calcination facility**. In: TMS – The Minerals, Metals & Materials Society. Light metals, 2011. [S.l.]: TMS, 2011.

MIYAJI, D.Y. **Refratários para transporte de alumínio líquido: fundamentos, simulação e prática industrial**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. p. 32.

MORAIS, G.A. **Desenvolvimento da metalurgia do pó**. Natal: EDUFRN, 2012.

MORAIS, S. **Curso de refratário – prática**. [Notas de aula]. In: \_\_\_\_\_. Curso Ciência dos Materiais, 2011, p. 13. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/139600471/Curso-Refratarios-Pratica-1>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

NAKAGAWA, Z. **Refractories Handbook: testing of refractories**. Japão: [s.n.], 1998. p. 577.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016. p. 575.

NETZSCH. **Instruments for Testing Refractories**. 2020. Disponível em: <[https://www.netzsch-thermal-analysis.com/media/thermal-analysis/brochures/Refractories\\_en\\_web.pdf](https://www.netzsch-thermal-analysis.com/media/thermal-analysis/brochures/Refractories_en_web.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2020.

OLIVEIRA, I.R.; PANDOLFELLI, V.C. **Reologia de concretos refratários na presença de diferentes tipos de aditivo e ligante hidráulico**. Cerâmica, v. 57, p. 263-269, 2007.

PANDOLFELLI, V.C. et al. **Erosion resistance of refractory castables**. Cerâmica, São Paulo, v. 52, n. 323, 2006.

PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V.C. **Bauxitas refratárias: composição química, fases e propriedades – parte II**. São Carlos: UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, 2000.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. Comissão de Normas Técnicas (Petrobras/Contec). **NTP-1728 – Concreto refratário**. [S.l.]: Petrobras, 2005.

PICANÇO, F. **Implantação do sistema de gestão Lean em refinaria de alumina e os impactos operacionais na performance da empresa**. Revista Gestão Industrial, v. 13, n. 3, 2017.

PILEGGI, R.; PANDOLFELLI, V. **Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis**. Cerâmica, v. 48, 2002.

QINGJIE, Z. et al. **Fundamental research on alumina production of the future**. In: LIGHT METALS, 2005. São Francisco. Warrendale: TMS, 2005. p. 29-32.

RAAD, H.J. **Influência das condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos**. 2008. 151 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ISMS-7NHKUG>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

RAMAL JR., F.T. et al. **A curva de distribuição granulométrica e sua influência na reologia de concretos refratários**. Cerâmica, São Paulo, v. 48, n. 308, p. 212-216, dez. 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132002000400008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132002000400008&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 17 mar. 2020.

ROBSON, T.D. **Refractory concretes: past, present, and future**. American Concrete Institute, v. 57, p. 1-10, 1978.

SAKO, E.Y.; PANDOLFELLI, V.C. **Artigo revisão: a relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho**. Cerâmica, São Carlos, v. 60, p. 127-143, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n353/18.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

SAITO, E. **Caracterização de concretos refratários bombeáveis para aplicação em canais de corrida e carros torpedo e determinação dos mecanismos de desgaste**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena.

SANTOS, A.V. et al. **O incrível mundo dos materiais porosos: características, propriedades e aplicações**. Química Nova na Escola, v. 38, n. 1, p. 4-11, fev. 2016.

SANTOS, E.M.B. **Avaliação experimental do comportamento de fratura e de erosão de concreto refratário antierosivo**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena.

SANTOS, K.P.B. **Mecanismos de degradação em concretos refratários – estudo de caso**. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2008.

SANTOS, V.A.A. et al. **Resistência à erosão de concreto refratário de alta alumina nanoligado**. Cerâmica, v. 57, n. 342, p. 231-236, abr. 2011.

SANTOS, V.A.A.; PANDOLFELLI, V.C. **Resistência à erosão em concretos refratários**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SCHNEIDER, U.; DIEDERICHS, U.; EHM, C. Effect of temperature on steel and concrete for PCRVs. **Nuclear Engineering and Design**, v. 67, n. 2, p. 245-258, 1982.

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Serralheiro de alumínio (construção civil)**. [S.l.]: SESI & SENAI, 2018.

SILVA, G. Refratários para siderurgia. In: MOURÃO, M. et al. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2011. cap. 9, p. 257-307.

SILVA FILHO, E.; ALVES, M.; MOTTA, M. **Red mud: an environmental problem in alumina industry**. Matéria, Rio de Janeiro, 2006.

SOBROSA, F.Z. **Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz**. 2014. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete. p. 44-47.

STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Desenvolvimento de concretos refratários multifuncionais**. Cerâmica, São Paulo, v. 47, n. 301, p. 40-44, mar. 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132001000100008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132001000100008&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 17 mar. 2020.

SVENDSEN, T.S. **Properties of Refractory Castables**. HASLE REFRACTORIES, 2011. Disponível em: <<https://www.slideserve.com/dysis/properties-of-refractory-castables-tina-stendal-svensen-product-manager>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

TALLINI JUNIOR, V.M. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água, microesferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de baterias e areias de fundição**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TEIDER, B.H. **O revestimento refratário e seu efeito na vida útil e no consumo energético de calcinadores de alumina**. 2012. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. p. 5-37.

WAO – World Aluminium Organization. **World Aluminium**. 2019. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org>>. Acesso em: 10 set. 2019.

WEER, P.H. **Operating cost – issues and opportunities**. In: LIGHT METALS, 2006. San Antonio. Warrendale: TMS, 2006. p. 109-114.