

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

KLAILSON CARNEIRO CUTRIM

**APLICABILIDADE ECONÔMICA E TÉCNICA DE CONCRETO REFRAATÓRIO EM
CALCINADORES DE ALUMINA EM INDÚSTRIA DE SÃO LUÍS - MA**

SÃO LUÍS
2017

KLAILSON CARNEIRO CUTRIM

**APLICABILIDADE ECONÔMICA E TÉCNICA DE CONCRETO REFRATÁRIO EM
CALCINADORES DE ALUMINA EM INDÚSTRIA DE SÃO LUÍS - MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Creso Cutrim Demétrio

Coorientadora: Dra. Mariana de Albuquerque Lima Braulio

SÃO LUÍS
2017

Cutrim, Klailson Carneiro.

Aplicabilidade econômica e técnica de concreto refratário em calcinadores de alumina em indústria de São Luís – MA / Klailson Carneiro Cutrim. – São Luís, 2017.

63 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Creso Cutrim Demétrio.

1. Concreto refratário. 2. Calcinadores de alumina. 3. Propriedades.
I. Título.

CDU 624.012.4(812.1)

KLAILSON CARNEIRO CUTRIM

**APLICABILIDADE ECONÔMICA E TÉCNICA DE CONCRETO REFRAATÓRIO EM
CALCINADORES DE ALUMINA EM INDÚSTRIA DE SÃO LUÍS - MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 06 / 12 / 17

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Creso Cutrim Demétrio
Orientador

Dra. Mariana de Albuquerque Lima Braulio
Coorientadora

Prof. Me. Ailton Egydio Petinelli

Prof. Dr. Eduardo Aurelio Barros Aguiar

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me iluminar com a inteligência e sabedoria para que eu pudesse fazer reflexões de maneira técnica e precisa sobre o assunto abordado, além de me dar a bênção da vida, sem a qual não seria possível a conclusão do meu curso de graduação e a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Ana Cláudia Azevedo Carneiro e Gilsomar Cutrim, que sempre buscaram o melhor para seus dois filhos e enxergaram na educação o melhor caminho para torná-los grandes pessoas e cidadãos de bem, que veem todo o seu esforço sendo coroado com seu filho dando os últimos passos em uma das mais difíceis e belas graduações, em uma Universidade de grande tradição.

À minha irmã, Ana Karolina Carneiro Cutrim, que sempre acreditou em mim e no meu potencial para seguir a profissão tão sonhada, estando ao meu lado e me apoiando em qualquer que fosse a situação e que também é para mim um exemplo de esforço e integridade.

À minha namorada, Alessandra Guimarães Almeida, por enxergar em mim o que tenho de melhor, por todo carinho que me dedica, pela alegria de sempre.

À Universidade Estadual do Maranhão e a todos os professores, que me ensinaram mais do que engenharia, mas também como ser um profissional de qualidade e a amar a carreira que escolhi seguir, mesmo com todas as dificuldades enfrentadas pelos Engenheiros Civis. Em especial agradeço ao meu professor e orientador Dr. Jorge Creso Cutrim Demétrio, exemplo de amor pela profissão e pela Universidade que me possibilitou esta graduação para ser um grande profissional.

À minha coorientadora Dra. Mariana de Albuquerque Lima Braulio, ao Engenheiro Civil José de Ribamar Cunha e ao Projetista Charles Souza, por toda ajuda tirando dúvidas e por compartilharem comigo o conhecimento que adquiriram ao longo de sua carreira.

À equipe da KW do Brasil pelo suporte à pesquisa com materiais elaborados pela empresa sobre o assunto e todo tipo de informação.

À todos os meus amigos da Universidade pelo companheirismo e inúmeras horas de estudo que compartilhamos. Que os laços de amizade que foram criados durante a nossa graduação continuem sempre se fortalecendo.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo discutir sobre a utilização de concretos refratários no revestimento interno de calcinadores de alumina, bem como os principais desgastes a que estes estão submetidos, fazendo também um estudo comparativo entre um concreto refratário australiano e outro concreto refratário produzido nacionalmente, ambos aplicados em indústria de São Luís – MA, com o objetivo de confrontar o desempenho de materiais refratários nacionais e importados. A substituição do concreto refratário atualmente em uso (importado), à base de andaluzita, justifica-se pelo elevado desgaste apresentado nos painéis localizados na região mais quente do calcinador e um dos materiais avaliados como possíveis substitutos foi um concreto refratário com ligante de sílica coloidal produzido no Brasil. A metodologia que foi utilizada no estudo baseou-se na realização inicial de pesquisas bibliográficas e da coleta de informações em campo e com empresa especializada em aplicar esse tipo de concreto, para que no final se pudesse avaliar se o desempenho do novo material foi mais satisfatório que o do anteriormente aplicado. Apesar do material nacional apresentar boas propriedades, os resultados encontrados não foram totalmente satisfatórios, o que pode indicar um mau isolamento térmico do conjunto dos concretos denso e isolantes ou mesmo um desgaste na espessura do material, que se mantiverem de forma acentuada inviabilizarão a utilização deste material, mas análises realmente conclusivas só poderão ser tiradas durante a próxima inspeção do calcinador onde o concreto refratário fabricado no Brasil foi aplicado para teste, na qual poderá ser observado o real desgaste do material entendendo as razões para os resultados encontrados no estudo.

Palavras-chave: Calcinadores de Alumina. Concreto refratário. Propriedades.

ABSTRACT

The objective of this work is to discuss the use of refractory concretes in the internal coating of alumina calciners, as well as the main wastes to which they are subjected. This paper also shows a comparative study between Australian refractory concrete and a nationally produced refractory concrete, both applied in a factory in the city of São Luís/MA, with the objective to compare the performance of national and imported refractory materials. The replacement of the refractory concrete currently in use (imported), based on Andalusite, is justified by the high wear presented in the panels located on the warmer region of the calciner and in that way, one of the materials evaluated as possible substitutes was a refractory concrete with colloidal silica binder manufactured nationally. The methodology that was used in this study was based on the achievement of some initial bibliographical researches and on the information collected in the field with a company specialized on applying this type of concrete, so that in the end it would be possible to evaluate if the performance of the new material was more satisfactory than the previously applied one. Despite the fact that the nationally produced material presents good properties, the results were not totally satisfactory, which can indicate poor thermal insulation of the dense and insulated concrete or even a wear on the thickness of the material, which, if remained in an evident way, will make it impossible the use of this material. However, conclusive analyzes can only be taken during the next calcinator inspection, where refractory concrete manufactured in Brazil was applied for testing, where the actual wear of the material could be seen, understanding the reasons for the results found in the study.

Keywords: Alumina calciners. Properties. Refractory concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cadinho refratário para fundir metal	18
Figura 2 – Mecanismo de abrasão	21
Figura 3 – Mecanismo de erosão	21
Figura 4 – Painéis de concreto refratário com desgaste erosivo	23
Figura 5 – Mecanismos de desgaste erosivo para vários tamanhos de partículas abrasivas.	24
Figura 6 – Efeito de Sombreamento	25
Figura 7 – Revestimento refratário com desgaste erosivo	25
Figura 8 – Representação do ensaio de refratariedade simples ou cone pirométrico equivalente (PCE).	28
Figura 9 – Fluxograma e esquema do processo Bayer	32
Figura 10 – Calcinadores de Leito Fluidizado Circulante instalados em indústria no Pará.....	33
Figura 11 – Âncora metálica fabricada em aço incoloy	36
Figura 12 – Âncora cerâmica.....	36
Figura 13 – Âncoras fixadas nas paredes internas de Calcinador modelo Mark 7 ...	37
Figura 14 – Vista planificada de Calcinador Modelo Mark VII estudado.....	43
Figura 15 – Elevado desgaste encontrado na inspeção do refratário da região do cone do forno do Calcinador.	44
Figura 16 – Temperaturas Médias na região do cone do forno do Calcinador	45
Figura 17 – Imagem termográfica da região do cone do Forno do Calcinador.....	46
Figura 18 – Gráfico das temperaturas internas na região do cone do calcinador em 23/06/2015	47
Figura 19 – Gráfico das temperaturas internas na região do cone do calcinador em 02/06/2017	48
Figura 20 – Curva de temperaturas na superfície da região do cone do forno com o concreto refratário importado.	48
Figura 21 – Curva de temperaturas na superfície da região do cone do forno com o concreto refratário nacional.....	49
Figura 22 – Região do cone do forno de calcinador afetada pelo enxarcamento de óleo	51

Figura 23 – Gráfico de condutividade térmica em função da temperatura para diferentes concretos refratários.....	52
Figura 24 – Revestimento refratário e ancoragem da região do cone do forno do calcinador.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Refratariedade de alguns materiais	28
Tabela 2 – Valores dos cones pirométricos Orton e suas respectivas temperaturas (°C).	29
Tabela 3 – Comparativo entre os custos com compra de material para aplicação na região do cone do calcinador dos dois materiais.....	56
Tabela 4 – Comparativo entre os custos dos dois materiais para a quantidade média de aplicação de uma obra de manutenção no revestimento refratário de um calcinador.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
“	Polegadas
%	Porcentagem
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAC	Cimento de aluminato de cálcio
HA	Alumina hidratável
MA	Maranhão
mm	Milímetro
q/dm ³	Quilograma/decímetro cúbico
SC	Sílica coloidal
t/h	Tonelada/hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Materiais Cerâmicos Refratários	15
2.1.1 Evolução Histórica	17
2.1.2 Principais Propriedades dos Concretos Refratários	19
2.2 Processo de Produção de Alumina	30
2.2.1 Processo Bayer	30
2.2.2 Calcinação	31
2.3 Revestimentos Refratário Para Calcinadores de Alumina	33
2.3.1 Dispositivos de Ancoragem	34
3 METODOLOGIA	37
3.1 Pesquisa Bibliográfica	37
3.2 Tipo de Estudo	38
4 ESTUDO COMPARATIVO	41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59
ANEXOS	61

1 INTRODUÇÃO

Uma das primeiras indústrias a surgir no mundo foi a de cerâmicas, viabilizada pelo abastamento do barro associado à facilidade de extração e fabricação. Alguns materiais de natureza cerâmica e que têm a capacidade de suportar altas temperaturas, mantendo as suas propriedades físico-químicas, são chamados de materiais refratários.

Segundo Silva et al. (2010), os materiais refratários são historicamente associados à processos térmicos de manufatura como a metalurgia, desde a descoberta do fogo. Cadinhos rochosos que eram utilizados como recipientes para amolecer metais são alguns dos primeiros refratários a serem utilizados pela humanidade. À medida que o homem aperfeiçoa suas habilidades com o fogo, começa a praticar a queima da argila, produzindo formas estáveis e variadas, com elevada resistência mecânica que são os ancestrais dos refratários atuais.

Destarte, ao passo que a siderurgia desenvolveu-se, os materiais refratários também acompanharam esse desenvolvimento e evoluíram paralelamente, surgindo então refratários de diversas características, para adaptar-se às diversas solicitações e garantir a eficiência dos diversos processos a que esses materiais estão associados. A medida que as áreas de utilização dos materiais refratários se diversificam, estes tem também uma melhora em características como resistência à corrosão e abrasão, além da melhora de sua resistência térmica, a qual é a sua característica mais essencial (SILVA et al., 2010).

Em suma, para que os materiais refratários sejam considerados de boa aplicabilidade, devem apresentar alta refratariedade, estabilidade química, estabilidade dimensional, estabilidade ao choque térmico, baixa condutividade térmica e baixa permeabilidade (TEIDER, 2012).

Atualmente os refratários são produtos fundamentais para uma vasta gama de indústrias, utilizados na maioria dos processos que envolvem altas temperaturas, como nas indústrias de vidro, petroquímicas e de cimento. Na proporção em que há a necessidade de melhoria nesses processos, que impliquem no aumento das temperaturas de trabalho de equipamentos, na eficiência destes, ou de fluxos nesses equipamentos, é preciso que se melhore também o desempenho dos materiais refratários utilizados em meio ao processo.

O Brasil já pode ser considerado um país com destaque na produção de materiais refratários, com tecnologia de fabricação e pesquisa na áreas de materiais cerâmicos reconhecidas internacionalmente. As empresas brasileiras possuem pesquisadores que trazem tecnologias de outros países, além de desenvolver novos materiais para atender às necessidades do mercado nacional. Ainda existem algumas tecnologias na área de refratários de acesso limitado, restritas à fabricantes europeus e japoneses, mas no geral estas são de domínio público, ou não patenteadas.

Em função do vasto número de materiais refratários disponíveis no mercado e da cada vez maior demanda, por melhores desempenhos desses materiais, os métodos de avaliação e caracterização dos refratários se desenvolveram, alcançando um elevado grau de precisão e determinando um número cada vez maior de aspectos destes (TEIDER, 2012).

Os concretos refratários são utilizados em indústrias de alumínio como última barreira física presente dentro dos calcinadores, para garantir que o fluxo do produto fabricado seja constante. Para que se tenha um processo produtivo eficiente, com baixos custos de operação e uma boa confiabilidade dos equipamentos, é necessário que estes concretos apresentem bons desempenhos, resistindo aos diversos desgastes a que estão submetidos dentro dos calcinadores de alumina.

Outra função importante dos revestimentos refratário é o isolamento térmico do equipamento, evitando a propagação de calor para a chapa externa do equipamento e para o meio, minimizando a perda pelo equipamento de energia em forma de calor e consequentemente diminuindo o seu consumo de energia, além de manter o ambiente externo ao calcinador com temperaturas menos elevadas melhorando as condições de trabalho dos operadores que trabalham nas áreas de calcinação.

1.1 Justificativa

Os refratários estão distribuídos em diversas categorias, variando em características como a densidade, modos de aplicação, resistência mecânica e categoria química, que diferem de acordo com a finalidade para que será empregado, ou de acordo com o fabricante. Posto isso, é necessário que se definam critérios de avaliação para a aplicabilidade de cada material, além de ensaios para determinar as

propriedades desses materiais e medir o desempenho de cada um, em condições específicas de uso (CUNHA, 2009).

A primeira análise a ser feita, com relação a utilização dos materiais refratários no Brasil, é a escolha entre os produtos nacionais e importados, já que no Brasil já há empresas que são referência na área, mas que dependendo da finalidade, ainda estão tecnicamente atrás de algumas empresas estrangeiras, ou até mesmo com relação ao custo final de compra, deve-se então fazer um estudo para além de avaliar a diferença de desempenho entre os materiais nacionais e importados, também confrontar as diferenças entre os prazos de entrega e gastos com transporte para ver qual item atende melhor às necessidades da atividade.

Outro fator crucial na escolha de qual material usar, é referente ao método de aplicação do refratário, para cada forma há uma necessidade de mão de obra distinta, além de equipamentos utilizados e preparos diversificados do local de aplicação em meio aos seus procedimentos, cada refratário terá uma temperatura, um tempo de secagem distinto, uma porcentagem de água por quantidade de refratário e outras peculiaridades que irão refletir na escolha de qual material usar.

Em consequência dos fatores já descritos, para cada escolha haverá um orçamento distinto, com diferentes composições que resultarão em custos finais distintos e de maneira similar cronogramas e histogramas díspares, que devem ser analisados de maneira isolada e pontual. Características particulares como o preço da mão de obra local, ou a disponibilidade de tempo para a execução das atividades de aplicação do refratário, farão diferença na hora de escolher o melhor a ser utilizado.

A vida útil das cerâmicas refratárias em determinadas condições de uso é outro item que pesa na hora de escolher qual o melhor refratário para se utilizar, tendo em vista se há fácil possibilidade para realizar o reparo ou a substituição de partes desgastadas, ou se há algum prejuízo associado a necessidade de manutenção no material em questão.

Dessa forma, cabe ao engenheiro responsável pelas atividades relacionadas a utilização do refratário estudar, definir e analisar todas essas informações envolvidas no processo de resultado da melhor escolha, visto que esse é conhecedor das necessidades que a obra deve atender, buscando sempre pesar despesas e benefícios, dosando-os de forma que se alcance à combinação mais satisfatória.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar uso de concreto refratário em calcinadores de alumina.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar os tipos de materiais refratários comumente utilizados em calcinadores de alumina;
- b) Comparar o uso de concretos refratários nacionais e importados aplicados à calcinadores de alumina;
- c) Avaliar a relação custo-benefício na escolha do tipo de concreto refratário;
- d) Discutir vantagens e desvantagens sobre a aplicabilidade do concreto refratário em calcinadores de alumina.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para que se tenha um melhor entendimento sobre a definição dos elementos inerentes ao objeto de estudo deste trabalho, neste capítulo serão apresentadas os conceitos gerais sobre refratários, discorrendo sobre seu histórico e propriedades, além das características dos calcinadores de alumina, os processos que nele ocorrem e que causam algum tipo de solicitação no refratário que o reveste internamente.

2.1 Materiais Cerâmicos Refratários

Materiais cerâmicos refratários são as cerâmicas quem tem propriedades que possibilitam a sua utilização em temperaturas muito elevadas. As cerâmicas são materiais não metálicos, de natureza inorgânica, que passam por algum tipo de síntetização térmica durante sua fabricação ou uso.

De maneira geral, identifica-se um potencial material refratário primeiramente pela sua temperatura de fusão, propriedade cuja origem está relacionada à força das ligações químicas entre os átomos constituintes de cada fase presente. (CARNIGLIA et al., 1992).

Os concretos refratários são materiais normalmente utilizados em locais onde há a incidência de altas temperaturas, como revestimentos de fornos, fabricação de peças e componentes internos de equipamentos. Estes concretos são o resultado da mistura entre agregados e aglomerante, que podem ser de caráter cimentício ou não, nos quais podem ser encontradas duas fases, a primeira é a fase discreta e particulada e a segunda a fase finamente granulada e contínua que envolve a primeira fase, estas são representadas respectivamente pelo agregado e pela matriz (FREITAS apud RAAD, 2008).

A obtenção dos concretos refratário é feita através da mistura de agregados refratários e aditivos especiais, juntamente com cimento aluminoso, sendo a sua matriz formada pela parte mais fina do agregado misturada com água, aditivos e algum tipo de material ligante.

Materiais ligantes são conceituados como qualquer material que, em uma dada mistura, seja apto a reagir com outros compostos presentes na combinação, resultando em um adesivo químico para a massa, ligando inclusive os agregados.

O cimento pode ser citado como um composto ligante, dando destaque ao cimento de aluminato de cálcio (CAC), que é o agente ligante mais utilizado em concretos refratários, pois este possui propriedades que ajudam o material a obter uma resistência mecânica suficiente para a manipulação da peça antes da sinterização: a “resistência a verde”. Apesar disso, em virtude da presença de cálcio na composição do CAC, o uso deste ligante em misturas que contenham microssílica e magnésia é restrito devido à formação de estágios de baixo ponto de fusão. Como alternativa para minimização desta desvantagem, agentes ligantes especiais para concretos refratários como a sílica coloidal (SC) e a alumina hidratável (HA) vem sendo aperfeiçoados (ISMAEL et al., 2007).

De acordo com Raad (2008), a proporção de água no traço do concreto refratário exerce acentuada interferência em suas propriedades, tanto antes quanto após o seu endurecimento. A água é a causadora do fenômeno de hidratação da ligação hidráulica do aglomerante e atua intensamente na consistência da mistura, garantindo também a continuidade dos materiais integrantes das fases do concreto.

Os aditivos são compostos que ao serem adicionados à mistura dos concretos com o intuito de alterar uma ou mais de suas propriedades. Podemos citar:

- O aumento da plasticidade do concreto em estado fresco sem aumentar o teor de água da mistura;
- Retardar ou acelerar o tempo de pega;
- Retardar a evolução do calor proveniente das reações de hidratação;
- Aumentar a durabilidade para condições específicas de uso.

Segundo Freitas (1993), os agregados são elementos que não realizam algum tipo de reação química complexa com a água, os quais são utilizados em geral como fragmentos de enchimento para os concretos refratários. Alguns destes materiais são:

- Tijolos refratários britados;
- Argilas calcinadas;
- Aluminas fundidas ou sinterizadas;
- Escórias de alto-forno.

Algumas das vantagens da utilização de concretos refratários é a sua elevada durabilidade quando submetido a altas temperaturas, uma ressaltada resistência mecânica e a variações bruscas de temperatura, além destes materiais apresentarem mínimas retrações e dilatações em suas dimensões durante estas variações.

2.1.1 Evolução Histórica

Desde a descoberta do fogo já houve a vinculação entre os processos térmicos de manufatura e a tecnologia dos refratários. Os primeiros refratários conhecidos pelo homem foram provenientes da natureza, cadinhos de rocha utilizados como recipiente para amolecer metais que serviam para a confecção de ferramentas primitivas (WALKER, 2005).

Figura 1 - Cadinho refratário para fundir metal



Fonte: Forun-numismatica, 2017

Por volta de 1856, foram produzidos na França por Sainte-Clarie Deville cadinhos a partir da mistura de água, agregados de coríndon e o produto da reação térmica da alumina e cal. Entretanto a ação da ligação hidráulica da cal com alumina, utilizada na fabricação destes cadinhos, já era conhecida pelos egípcios em 2500 a.C. e romanos em 75 a.C., processo que foi aperfeiçoado por John Smeaton em 1756, que percebeu que a calcinação de certas pedras de natureza calcária poderia gerar pós com propriedades hidráulicas (LEE et al., 2005).

No ano de 1950 foram realizados experimentos com materiais puros para implementação na indústria de refratários. A Alcoa e a Lafarge iniciaram a comercialização de cimentos de aluminato de cálcio (CACs) de alta pureza voltados para esta indústria, culminando em uma larga escala de cimento de alta alumina,

resultado da adição de cal e pequenas quantidades de sílica e óxido de ferro à alumina pura (MACZURA et al., 1993).

Segundo Magliano e Pandolfelli (2010), ao longo da história, tijolos e peças pré-formadas eram os principais elementos empregados em indústrias de diversos segmentos como o de produção de aço, que demandam a exposição à elevadas temperaturas, visto que originalmente a geometria dos fornos era simplória, própria para a utilização de tijolos. Outra razão para este fato está relacionada à baixa refratariedade apresentada pelos concretos refratários em comparação com a dos tijolos, resultado do alto teor de cimento de sua constituição.

Argilas calcinadas e pedaços de tijolos refratários queimados foram utilizados como agregados nos primeiros concretos refratários. Em 1940 já havia um restrito uso da alumina tabular como refratário monolítico, que era limitado por conta do alto custo (LEE et al., 2005).

Com o aperfeiçoamento das indústrias e desenvolvimento de processos mais eficientes, em que os equipamentos possuem geometrias mais complexas e que o tempo de parada para reparo dos equipamentos precisa ser reduzido, foi necessário o aperfeiçoamento dos refratários. A falta de flexibilidade de formas apresentada pelos tijolos refratários passou a ser um fator limitante à sua utilização, por estas razões o uso de concretos refratários tornou-se técnica e economicamente mais indicado.

Devido a demanda industrial foram desenvolvidas pesquisas de aperfeiçoamento e criação de novos concretos refratários com maior refratariedade e poder ligante. O desenvolvimento de concretos com baixo teor de cimento representou um marco para a indústria de refratário, viabilizando assim a troca dos tijolos por concretos refratários.

Conforme Magliano e Pandolfelli (2010):

A possibilidade de moldar formas complexas, como cilindros e abóbadas, menor tempo necessário para instalação e maior facilidade de automação, menor custo de produção (pois este não requer pré-queima), ausência de juntas, que são locais favoráveis a corrosão, e maior facilidade de realizar reparos e manutenção, são algumas das vantagens desses materiais. Essa tecnologia permitiu que a indústria do aço utilizasse cada vez mais esses materiais em seus processos produtivos demandando, com isso, maior desenvolvimento dos concretos.

2.1.2 Principais Propriedades dos Concretos Refratários

Segundo Budnikov (1964) apud Raad (2008) as propriedades dos concretos refratários são os fatores determinantes na hora da escolha do tipo mais adequado de material a ser empregado em cada serviço, seja ele em temperaturas muito elevadas, ou em condições severas de desgaste. As características dos refratários estão relacionadas com as propriedades químicas e mineralógicas dos seus constituintes, o que é utilizado como fator de diferenciação dos diversos tipos de concretos refratários existentes. De forma análoga, a distinção entre tipos de concretos está ligada à qualidade dos seus constituintes, seu grau de pureza, além das técnicas empregadas na sua fabricação, preparo e aplicação.

As propriedades de maior importância para os concretos refratários são aquelas que determinam sua capacidade de resistir aos fatores destrutivos, quando estes são utilizados como revestimento no interior de equipamentos, sendo importante ter sempre o cuidado na fabricação e moldagem do revestimento para que se tenham resultados satisfatórios. (BUDNIKOV apud RAAD, 2008).

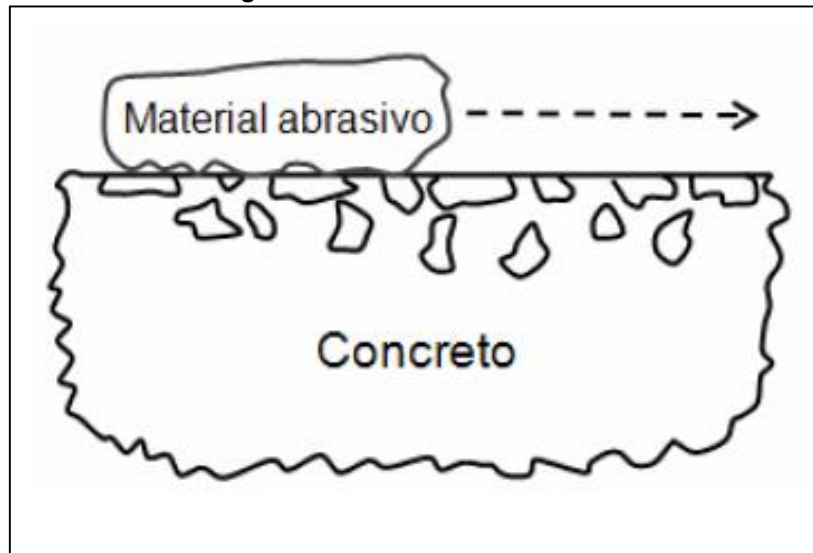
➤ **Resistência à Abrasão e Erosão**

Resistência à abrasão e à erosão são as capacidades que o revestimento refratário tem de suportar o desgaste abrasivo de outros materiais, de aspecto duro, ou em forma de gases, capacidade essa que em alguns casos, onde a solicitação de caráter abrasivo é mais representativa do que a gerada pelas fraturas térmicas dos ciclos de reaquecimento, define a vida útil do material.

Segundo Gonçalves (2011) para um melhor entendimento das diversas formas de desgaste abrasivo, primeiramente deve-se entender as principais diferenças entre o processo de abrasão e de erosão nos materiais refratários. O desgaste por erosão se caracteriza por aquele onde há o impacto de partículas com a superfície do material refratário, partículas estas que incidem em diversas angulações, já o desgaste por abrasão é quando matérias sólidas deslizam paralelamente à face do refratário que sofre solicitação, em outras palavras, este é um desgaste gerado por fricção.

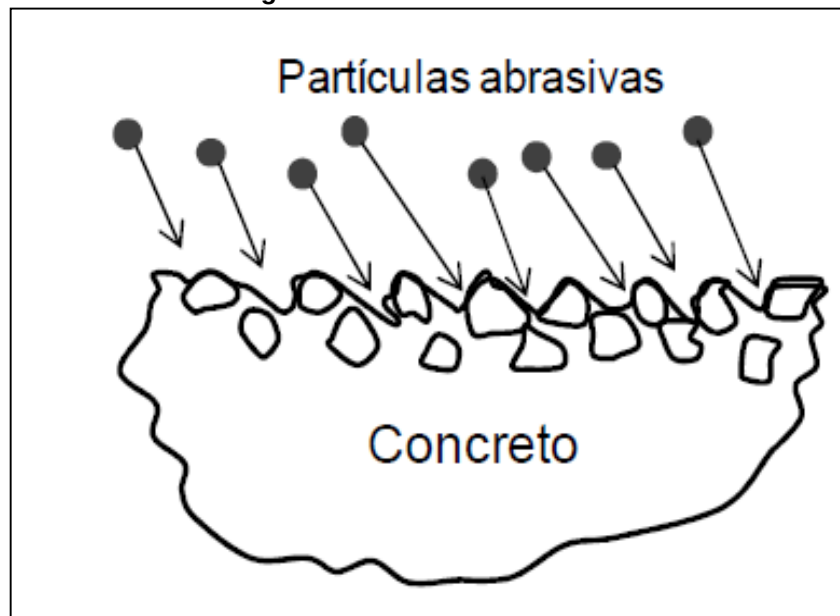
Apesar de em ambos os processos haver a remoção de material, na abrasão há um desgaste continuo da região, enquanto que na erosão as partículas ficam em contato com o revestimento refratário por um curto espaço de tempo.

Figura 2 - Mecanismo de abrasão



Fonte: Gonçalves, 2011

Figura 3 - Mecanismo de erosão



Fonte: Gonçalves, 2011

➤ **Propriedades Anti-Abrasivas**

O desgaste abrasivo, é resultado do atrito de partículas sólidas com a face do refratário, sejam estes provenientes do choque de porções de materiais pesados, corpos metálicos ou não metálicos, por projeção de pós ásperos ou gases com velocidades elevadas (ALVES, 2011).

Segundo Santos (2008) a identificação da resistência à abrasão de um material pode ser feita utilizando ensaios que medem o volume de crateras formadas dentro de um determinado espaço de tempo em que a área superficial de um corpo-de-prova é submetida à ação de um jato de carbeto de sílica em pó, método padronizado pela ASTM.

No geral refratários que possuem alta densidade e resistência térmica têm boa resistência à abrasão, enquanto que concretos com elevados teores de água possuem baixas resistência à abrasão. Concretos com teores de cimento menores que 10%, em que utiliza-se materiais plastificantes, defloculantes, aditivos reguladores de pega e endurecimento, além de materiais finos, possuem maiores densidades e resistência à variações de temperatura e abrasão, além de menor chance de perda de resistência durante o aquecimento. (DENISOV apud SANTOS, 2008).

A resistência à abrasão do refratário não depende somente da resistência deste à esforços de compressão e de sua densidade, além disso, depende também da estrutura e colagem dos grãos do material. Materiais aquecidos à temperaturas entre 700°C e 900°C sofrem redução da resistência à abrasão, em decorrência da formação de fases vítreas com certa viscosidade. Ao atingirem temperaturas superiores, entre 800°C e 1000°C, os refratários recuperam a resistência abrasiva, que em alguns casos é até mesmo superior à que estes apresentam em temperaturas ambientes. Acima destes valores (800°C à 100°C), outra vez há uma redução nesta resistência, devido ao efeito da viscosidade. (BUDNIKOV apud RAAD, 2008).

Figura 4 – Painéis de concreto refratário com desgaste erosivo



Fonte: Autor, 2017

➤ **Propriedades Anti-Erosivas**

Além de apresentarem uma boa resistência à elevadas temperaturas, os materiais refratários apresentam grande vantagem com relação à resistência à erosão quando comparado com outros materiais, de natureza metálica, por exemplo (GONÇALVES, 2011).

O processo erosivo é aquele onde há o desgaste físico e superficial do material, a exemplo do que se pode ser observado em Calcinadores de alumina, onde há um desgaste da superfície do revestimento refratário decorrente do impacto de partículas sólidas.

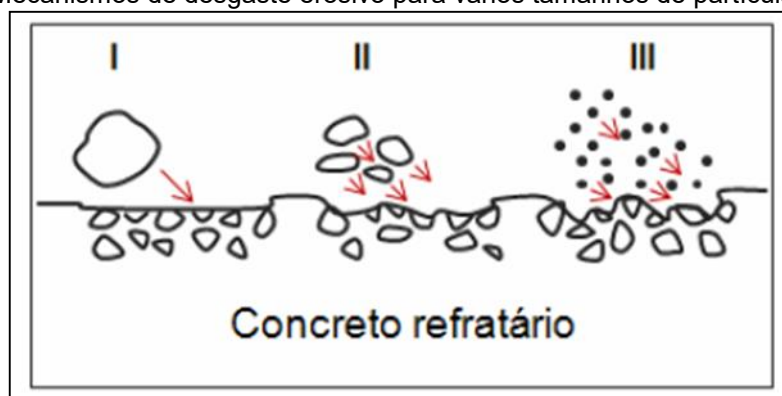
A erosão acontece de forma variada em materiais dúcteis e frágeis, variando principalmente com relação ao ângulo de impacto. A máxima perda erosiva encontrada em materiais dúcteis está entre os ângulos de 20° e 30°, havendo inicialmente a deformação plástica da camada superficial, em seguida a fragilização e a fratura do material (TEIDER, 2012).

Quando submetidos à elevadas temperaturas os refratários comerciais tendem a formar fases líquidas e por consequência apresentem certa plasticidade, apresentando perda máxima por erosão similar aos ângulos anteriormente citados.

Segundo Teider (2012) os ângulos de perda máxima por erosão dos materiais frágeis estão próximo à 90°, com formação e propagação de trincas na superfície do material. Materiais com maior coesão das partículas, por essa razão, apresentam uma maior resistência ao processo erosivo, retardando a geração e propagação de trincas.

Para Gonçalves (2011), com relação ao desgaste por erosão, as partículas incidem pontualmente sobre regiões do concreto e por isso sua superfície não é desgastada uniformemente. Os concretos refratários são compostos por agregados e matriz, os quais apresentam maiores e menores níveis de dureza respectivamente, por isso há uma maior tendência de erosão na região da matriz. Também segundo a autora o tamanho das partículas abrasivas influencia no mecanismo de desgaste do material, caso as partículas abrasivas sejam maiores que os agregados, tanto a matriz quanto os agregados do concreto serão simultaneamente desgastados, ao contrário daquilo que foi anteriormente citado.

Figura 5 - Mecanismos de desgaste erosivo para vários tamanhos de partículas abrasivas.



Fonte: Lídia Gonçalves, 2011

Sobre um refratário composto por múltiplas fases mineralógicas é possível deduzir que os maiores desgaste serão obtidos nas fases com as menores durezas. Também pode-se inferir que um menor desgaste está ligado à uma menor quantidade de defeitos na superfície de incidência das partículas erosivas.

A maior parte dos defeitos microestruturais, como trincas e porosidade, do material refratário estão concentrados em sua matriz, o que acarreta uma maior tendência a desgastes erosivos nessa região. No processo de desgaste preferencial da matriz, onde se expõem os agregados remanescentes, ilustra-se o chamado “efeito sombra” que aproxima os agregados a esferas totalmente resistentes ao desgaste erosivo, sendo assim a área da matriz localizadas entre os agregados (esferas) a única região erodida por impacto direto das partículas. Com a erosão da matriz o agregado acaba por se sobressair da superfície, protegendo a matriz por meio do “efeito sombra” (SANTOS et al., 2006).

Figura 6 - Efeito de Sombreamento



Fonte: V.A.A Santos et al., 2009

Uma alternativa para aumento da resistência ao desgaste é a utilização de matérias-primas com um menor tamanho de partículas, obtendo um melhor empacotamento e redução da porosidade na microestrutura da matriz do refratário. Processos de queima ou sintetização mais efetivos do mesmo modo também garantem um menor desgaste por erosão, melhorando a coesão e minimizando a porosidade do material. (TEIDER, 2012).

Figura 7 – Revestimento refratário com desgaste erosivo



Fonte: Autor, 2017

➤ Propriedades Termomecânicas

O comportamento do material refratário mediante a variações acentuadas de temperatura é de fundamental importância para a integridade estrutural do revestimento e conseqüentemente para a vida útil do equipamento no qual o refratário está aplicado. Como a fratura do material é decorrente da formação e propagação de trincas, a busca por materiais com uma melhor resistência termomecânica se concentra principalmente nestes dois processos, para que estes sejam minimizados (BRADT, 2005).

Segundo Hasselman (1969) apud Teider (2012), destacam-se para o estudo da resistência ao dano por choque térmico de revestimentos refratários, o gradiente térmico exigido para que um material de natureza cerâmica com restrição uniaxial de contração ou expansão atinja a sua tensão de fratura e sofra uma fratura grave. Este parâmetro nos diz que o material deve possuir uma elevada resistência mecânica, baixa expansão térmica e módulo elástico, aspirando minimizar as tensões geradas pela variação de temperatura e conseqüentemente evitando assim a fratura do material.

Outros parâmetros para o estudo da resistência termomecânica dos materiais estão relacionados à prevenção da formação e propagação de trincas na microestrutura, indicando quais propriedades devem ser controladas. Para que ocorra a propagação de uma trinca, precisa haver energia suficiente para fissurar uma estrutura coesa, gerando duas novas superfícies. A energia para que esse processo ocorra é chamada de energia de fratura, γ_{wof} , que corresponde ao resultado da Equação (1.0) (HASSELMAN apud TEIDER, 2012).

$$\gamma_{wof} = \gamma_o + \gamma_p + \Delta\bar{\gamma} \quad (1.0)$$

Sendo γ_o a energia para rompimento das ligações químicas das fases presentes, γ_p a energia para superar as propriedades do refratário e formar duas superfícies de disseminação da fissura. As unidades de grandeza são medidas como energia por unidade de área, J/m², conforme o sistema internacional de unidades.

➤ **Deformações Elásticas e Plásticas**

Devido os materiais refratários apresentarem pequenos valores de deformação elástica e plástica, estas propriedades são de difícil determinação. A medida que se eleva a temperatura, há uma ampliação da capacidade de deformação do material, havendo a possibilidade de um grande efeito em sua termoclasse, durante seu aquecimento acontece o amolecimento das fases vítreas que se formam em seu interior, o que dá a ele a propriedade plástica (NASCIMENTO, 2007).

➤ **Refratariedade**

Segundo Raad (2008) a refratariedade é a capacidade que um material tem de resistir à implicação de altas temperaturas sem se fundir por completo. Essa característica é definida com a utilização de uma amostra de formato tronco-piramidal com três lados, com 30 mm de altura, 2 mm em seus lados da base superior e 8 mm na inferior. Esta amostra é aquecida e quando atinge altas temperaturas perde a sua consistência e devido à sua reduzida, o seu próprio peso provoca um escorregamento de sua estrutura, resultando em um aumento da seção da base inferior. A refratariedade ou ponto de amolecimento padra do material é a temperatura na qual este começa a ceder-se, com o topo do cone descendo ao nível da base. A medição é realizada por um pirômetro ótico.

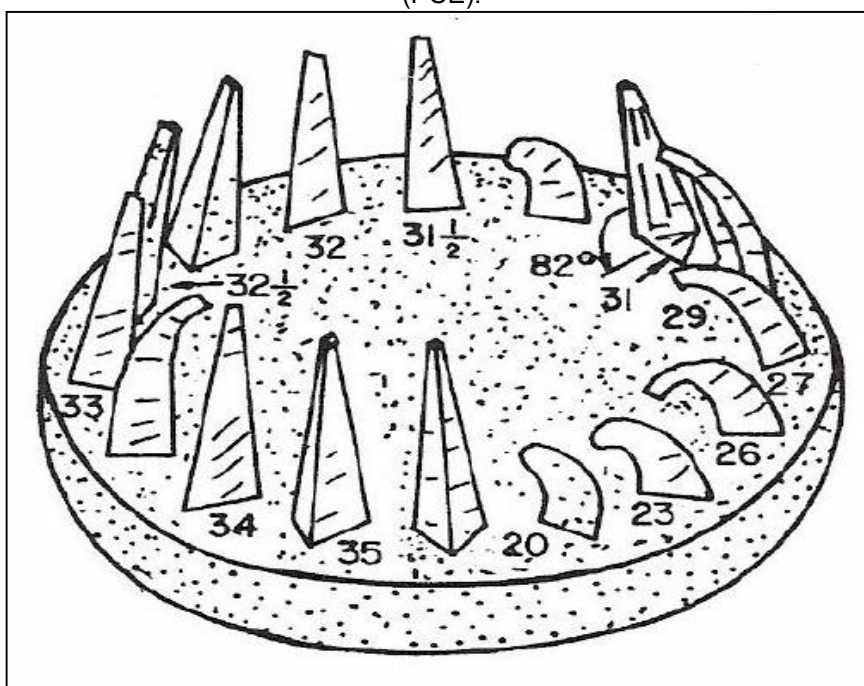
A tabela 1 a seguir, contém os índices de refratariedade de determinados materiais refratários, que têm relação direta com a composição química e a pureza das substâncias primárias constituintes dos mesmos.

Tabela 1 – Refratariedade de alguns materiais

Material Refratário	Refratariedade (°C)
Quartzito	1730-1750
Produtos de Alta Alumina	1780-2000
Produtos de Magnesita	Acima de 2300
Argila Refratária	1580-1750
Caulim	1740-1770
Produtos Semi-ácidos	1610-1710
Produtos de Cromo-magnesita	Acima de 2000
Produtos de Dolomita	Acima de 2000
Produtos de Chamote [v.g.]	1610-1750

Fonte: Raad, 2008

É possível observar na figura 8 e tabela 2 a seguir respectivamente, a representação e os parâmetros utilizados no ensaio do cone pirométrico equivalente (PCE). A refratariedade é determinada de maneira indireta, montando-se o corpo de prova a ser ensaiado ao lado de cones padronizados que fundem em temperaturas específicas. É importante ressaltar que a refratariedade e a temperatura de fusão do material são características distintas.

Figura 8 – Representação do ensaio de refratariedade simples ou cone pirométrico equivalente (PCE).

Fonte: Portal saber livre, 2017

Tabela 2 – Valores dos cones pirométricos Orton e suas respectivas temperaturas (°C).

Cone Orton Nº	Temperatura	Cone Orton Nº	Temperatura
12	1337	31	1683
13	1349	31 1/2	1699
14	1398	32	1717
15	1430	32 1/2	1724
16	1491	33	1743
17	1512	34	1763
18	1512	35	1785
19	1522	36	1804
20	1541	37	1820
23	1564	38	1835
26	1605	39	1865
27	1621	40	1885
28	1640	41	1970
29	1646	42	2015
30	1659		

Fonte: pt.scribd

➤ Refratariedade Sob Cargas

Esta propriedade é determinada pela resistência mecânica apresentada em um material sob a aplicação de altas temperaturas, e é testada através do submetimento de amostras à temperaturas nas quais ocorre o amolecimento de sua estrutura sob a aplicação de uma carga estática de 2 kg/cm², valor abaixo dos que são aplicados na estrutura de revestimento de fornos. Esta característica sofre influência das propriedades químicas e mineralógicas do material, além do aparecimento de fases cristalinas e pela relação entre o seu número de fases vítreas e cristalinas e a viscosidade de sua fase líquida atingida quando as fases vítreas e cristalinas de baixa fusão se liquefazem (BUDNIKOV apud RAAD, 2008).

➤ Condutividade Térmica e Difusividade

De acordo com a NBR 8826 (2014), a condutividade térmica é conceituada como a propriedade que determina a capacidade de um material de transmitir calor atravessando sua extensão de áreas onde há as maiores temperaturas para as de menor temperatura. Os valores referentes a esta propriedade são representados em watts por metro vezes Kelvin ($W/(m.K)$).

A condutibilidade térmica é uma propriedade primordial a ser ponderada durante o funcionamento de estruturas de concreto refratário, sofrendo interferência do teor de água contida na mistura, densidade do refratário, quantidade de poros e condutibilidade térmica dos elementos que o constituem. Bazant e Kaplan (1996) salientam a relevância da condutividade térmica do agregado e do teor de umidade durante o aquecimento.

A condutibilidade térmica dos concretos refratários aumenta à medida que as temperaturas são elevadas. Devido à uma grande quantidade de poros os concretos isolantes leves possuem baixa condutibilidade térmica. Concretos refratários que são empregados na construção de fornos e fornalhas necessitam de valores baixos de condutividade, evitando ao máximo assim a perda de calor para o meio externo (SANTOS, 2008).

Ainda segundo Santos (2008):

Por outro lado, em regiões específicas dos fornos, a presença do calor seria prejudicial e a sua remoção deve ocorrer o mais rápido possível através de materiais que apresentem alta condutividade térmica. Por este motivo, a transferência de calor, necessária para as operações de aquecimento, em alguns casos é obtida através do emprego de agregados de condutibilidade térmica mais elevada. Esta característica é essencial para impedir o surgimento de falhas provocadas pelo choque térmico. A alta condutividade térmica pode ser obtidas através da utilização de refratários densos.

Bazant e Kaplan (1996) explicam que a condutividade térmica de um concreto refratário também resulta dos teores de cimento hidráulico e da existência de ligações cerâmicas. Existem três comportamentos que correspondem à níveis de temperatura, são eles:

- Manutenção do material hidratado;
- Perda de água quimicamente combinada;
- Desenvolvimento de ligações cerâmicas.

2.2 Processo de Produção de Alumina

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, em contrapartida é o metal mais jovem utilizado em escala industrial. Apesar de ser produzido comercialmente há cerca de 160 anos, este já era utilizado milênios atrás. A produção de alumínio já é maior que a de todos os demais metais não ferrosos, este acompanha o desenvolvimento das civilizações, sendo utilizado hoje em larga escala na produção de diversos artigos (MOURA et al., 2008).

A medida que o consumo de alumínio no mundo aumenta, surgem cada vez mais empresas especializadas em produzir esta liga, com isso é cada vez mais importante reduzir os gastos inerentes ao seu processo de produção, garantindo assim a competitividade de suas indústrias produtoras. O Brasil hoje é um dos maiores produtores de alumina calcinada, produto utilizado na produção de alumínio metálico (GONÇALVES, 2011).

Segundo Gonçalves (2011) a elevada concorrência entre as grandes empresas produtoras de alumina do mundo, exige que continuamente o seu processo produtivo seja otimizado, para que se garanta um preço final mais competitivo para o produto final. O revestimento refratário utilizado internamente nos Calcinadores de alumina tem papel fundamental nessas melhorias, pois um bom desempenho deste revestimento garante vantagens como uma menor perda energética no processo, além de uma maior confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, prevenindo também gastos com manutenções não programadas.

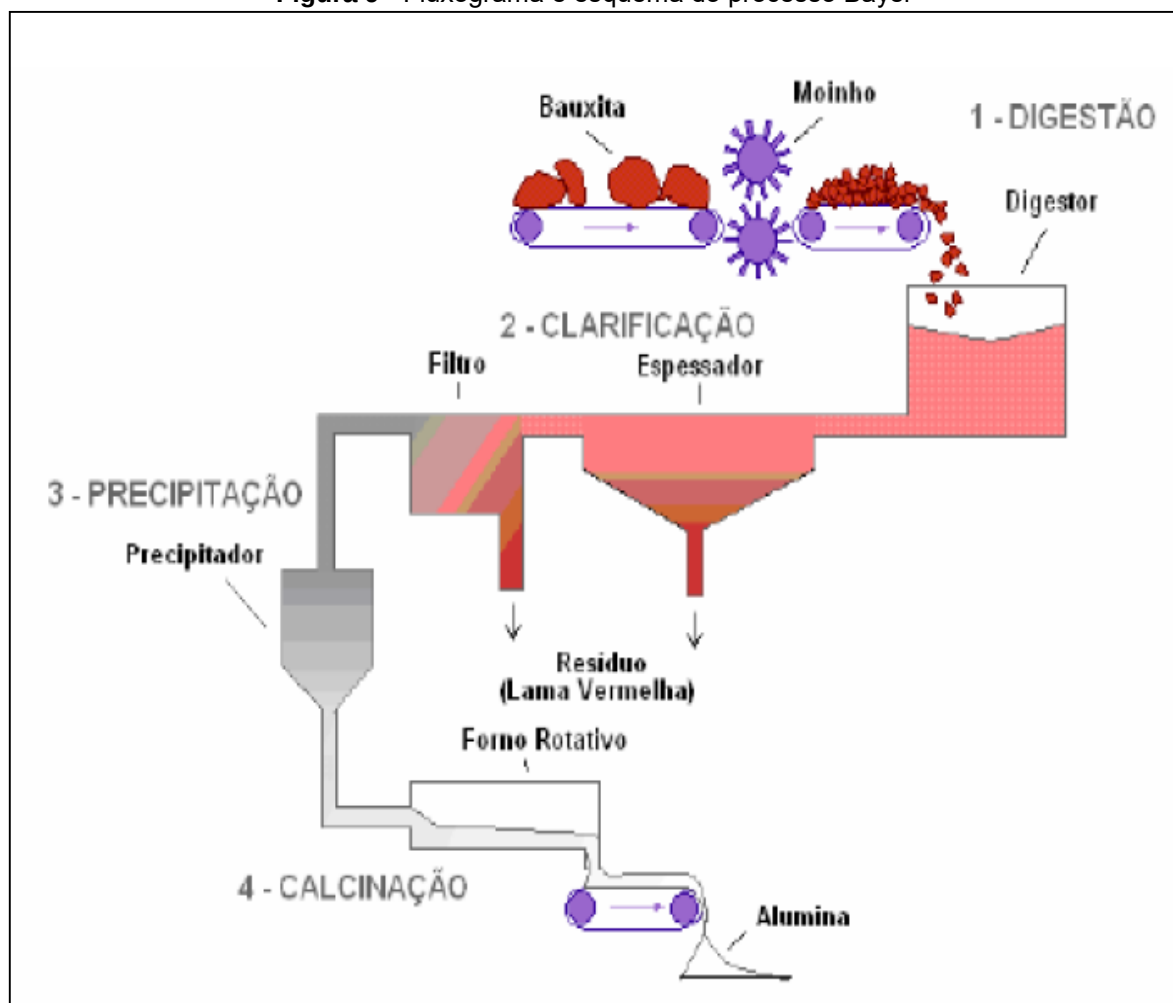
2.2.1 Processo Bayer

Atualmente o método mais econômico para produção de alumina e alumínio é a partir de bauxitos gibbsíticos com baixa porcentagem de sílica é o Processo Bayer.

Utiliza-se uma solução de hidróxido de carbonato de cálcio e sódio e hidróxido de sódio no processo de moagem e digestão da bauxita. A lama vermelha, denominação dada a suspensão e o rejeito, constituída principalmente por óxido de ferro, produtos de desilicação, carbonato de cálcio e titânio, são separados por filtração depois que passam pela digestão e resfriamento, em seguida a suspensão

de aluminato de sódio segue para precipitadores onde é formada $\text{Al}(\text{OH})_3$. Por fim o material que sofre precipitação é lavado e calcinado. Segundo Moura et al. (2008) para cada 2-2,5 toneladas de bauxita que entram no processo Bayer, cerca de 1 tonelada de alumina é produzida.

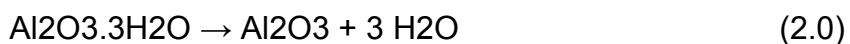
Figura 9 - Fluxograma e esquema do processo Bayer



Fonte: Moura et al., 2008

2.2.2 Calcinação

A conversão do hidrato em alumina ou calcinação, é a última etapa do Processo Bayer, que pode ser representada pela seguinte equação (2.0), que mostra a perda de água de cristalização para que seja formado o óxido de alumínio (GONÇALVES, 2011).



Segundo Outotec (2008) apud Gonçalves (2011) após a finalização de um ciclo de calcinação, o material calcinado juntamente com parte do material não calcinado, seguem por uma série de ciclones e dutos, nos quais são feitas diversas seleções granulométricas, para que as partículas determinadas como finas sejam direcionadas a outros ciclones para que sejam reclassificadas. Caso estas partículas finas não se encaixem nas devidas especificações, serão coletadas por um equipamento eletrostático de onde estas seguirão para a etapa primária de calcinação.

Figura 10 - Calcinadores de Leito Fluidizado Circulante instalados em indústria no Pará.



Fonte: Gonçalves, 2012

2.3 Revestimento Refratário Para Calcinadores de Alumina

Nos diversos vasos dos calcinadores, a alumina transportada atinge elevadas velocidades, que associadas à elevadas temperaturas de operação dos equipamentos dão a alumina um grande potencial de desgaste abrasivo, por esse motivo há a necessidade de proteger os seus cascos metálicos, proteção essa que é conferida pela utilização de um revestimento interno utilizando materiais refratários (CUNHA, 2009).

O revestimento refratário tem então a função de suportar as solicitações que afetariam as chapas do equipamento, estando sujeito às condições adversas de altas temperaturas e abrasividade de alumina, para que a integridade dos Calcinadores seja preservada até que sejam realizadas as suas manutenções programadas.

Os primeiros materiais refratários a serem utilizados para revestir internamente as paredes dos vasos de equipamentos para a calcinação de minerais foram tijolos sílico aluminosos, utilizados massivamente em fornos de reverbero e rotativos até os anos 60. Com a melhora nas características dos refratários monolíticos, estes começaram a ser utilizados de maneira mais abrangente, inicialmente como massas plásticas e em seguida como concretos (TEIDER, 2012).

Com a utilização dos Calcinadores de leito fluidizado a partir da década de 60, as formas de desgaste por erosão se tornaram mais importantes, o que trouxe a necessidade da utilização de refratários formados, podendo ser tijolos ou outras peças prensadas.

Conforme Lee et al. (2005):

A partir da mesma década de 60 que refratários monolíticos começaram a ser utilizados em ambientes erosivos, o que começou a viabilizar este tipo de aplicação. Como referência, massas plásticas que possuíam perda por erosão da ordem de 15 a 20cm³, medidas pela norma ASTM C-704, foram substituídas gradualmente por concretos refratários aluminosos com baixo teor de cimento que atualmente alcançam de 5 a 10cm³.

É importante destacar também um elevado aumento na velocidade do fluxo da alumina dentro dos vasos destas unidades de calcinação (10-30m/s), comparando com os primeiro Calcinadores utilizados (0,5m/s), o que comprova a necessidade da resistência antierosivas do revestimento.

Para Teider (2012) o choque térmico também é uma solicitação sobre o refratário importante a ser considerada, que acontece quando é injetado ar na temperatura ambiente em vasos ainda quentes em meio às etapas onde há o resfriamento da alumina. Quando ocorrem as paradas e retomada das atividades dos equipamentos, seja para manutenção ou para qualquer outro motivo, deve-se ter o cuidado para que o processo de resfriamento e reaquecimento da unidade, respectivamente, não ocorra de forma brusca, para que não haja uma grande solicitação no revestimento refratário por choque térmico.

Em locais onde haja proximidade do revestimento refratário com a chama de queimadores, como é o caso da região do cone do forno de Calcinadores do modelo Mark 7, as temperaturas podem alcançar temperaturas que ultrapassam 1250°C, havendo então a necessidade da utilização de materiais com elevada refratariedade nestes locais.

Para materiais refratários com função de revestimento isolante e revestimento denso há propriedades específicas de maior necessidade. Para o primeiro é essencial que se tenha um refratário com boas propriedades térmicas, enquanto que para o segundo o fundamental é que este tenha uma boa resistência ao choque térmico, à erosão por fragmentos sólidos, além de uma elevada refratariedade em regiões onde hajam altas temperaturas de trabalho (TEIDER, 2012).

2.3.1 Dispositivos de Ancoragem

Devido normalmente não haver aderência entre os concretos refratários e o costado dos equipamentos, são utilizados dispositivos de ancoragem para auxiliar na sua fixação. Essas âncoras são fabricadas geralmente de materiais metálicos de aço carbono, inox austeníticos e ferríticos ou incoloy. Nas situações onde a temperatura não permite a utilização de dispositivos metálicos, utiliza-se âncoras cerâmicas fabricadas de materiais com alto teor de alumina, que possuem um maior custo e dificuldade de aplicação (DINIZ, 2004).

Figura 11 - Âncora metálica fabricada em aço incoloy



Fonte: Autor, 2017

Figura 12 - Âncora cerâmica



Fonte: Autor, 2017

Segundo Diniz (2004) os instrumentos para ancoragem necessitam estar bem soldados ao equipamento, para que estes suportem os esforços provenientes do revestimento e do equipamento, além de possuir formato, dimensões e distribuição de maneira que não provoque qualquer tipo de dano a estes dois.

É importante avaliar a concentração e disposição de âncoras por unidade de área ideais para cada situação, uma baixa quantidade destes instrumentos pode fazer com que o sistema não consiga suportar o peso dos materiais, já um número excessivo pode gerar o trincamento do material e o colapso do revestimento devido à interação entre as tensões geradas. Deve-se também evitar que as pontas das âncoras fiquem alinhadas na mesma direção, para evitar que as trincas internas do material se vinculem, formando assim um defeito no refratário com maiores proporções (TEIDER, 2012).

Figura 13 - Âncoras fixadas nas paredes internas de Calcinador modelo Mark 7



Fonte: Autor, 2017

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi baseado em uma pesquisa bibliográfica inicial, para o levantamento das informações pertinentes ao assunto, que juntamente com o levantamento de dados feito em campo permitiram tirar algumas conclusões sobre o desempenho dos materiais em estudo.

Cronologicamente o trabalho pode então ser dividido em três fases, sendo a primeira, de pesquisas bibliográficas, fundamental para o entendimento do assunto e para a determinação dos principais parâmetros a serem levados em consideração, sendo executadas em seguida as outras duas fases de levantamento de dados em campo e de avaliação dos dados coletados.

3.1 Pesquisa Bibliográfica

A fase inicial de pesquisa bibliográfica fundamentou-se em analisar e definir o que seriam concretos refratários, fazendo um breve histórico sobre o seu aperfeiçoamento e utilização, deixando explícita a importância desses materiais para diversas áreas da indústria, principalmente para a siderúrgica que é o ramo onde foi realizado o estudo.

Também foi objeto da pesquisa bibliográfica definir os principais desgastes a que os materiais refratários são comumente submetidos e quais as propriedades destes materiais que permitem resistir a estas solicitações, bem como o papel de cada camada de concreto instalada dentro de calcinadores de alumina, denso e isolante, para suportar os desgastes a que estão submetidos.

Além das informações acima, também foi pesquisado sobre o processo de produção de alumina, bem como os processos ocorridos dentro dos calcinadores de alumina, para entender as deteriorações mais críticas que ocorrem nestes equipamentos, as quais os concretos refratários utilizados em seu revestimento interno estarão submetidos, garantindo assim uma maior vida útil e confiabilidade para os calcinadores de alumina.

3.2 Tipo de Estudo

Este trabalho faz um estudo comparativo entre dois materiais refratários, são eles:

- Concreto refratário denso com teor de Al_2O_3 de 61% à base de andaluzita, fabricado na Austrália e aplicado por projeção;
- Concreto refratário denso com teor de Al_2O_3 de 72% com ligante de sílica coloidal, fabricado no Brasil e aplicado por projeção;

O segundo material é um concreto refratário que foi aplicado na região dos queimadores do forno do calcinador de alumina de indústria localizada em São Luís – MA, como um possível substituto do primeiro material que vem apresentando um elevado desgaste nesta região.

Para a realização deste estudo foram definidos alguns parâmetro, vistos como os mais importantes para um bom desempenho dos materiais na região. Algumas destas características foram:

- Refratariedade;
- Resistência ao choque térmico;
- Condutividade térmica;
- Isolamento térmico;
- Método de aplicação;
- Traço;
- Porcentagem de alumina;
- Local de fabricação;

A fim de determinar estes parâmetros para cada material foram consultados as fichas técnicas de cada material fornecidas pelos fabricantes, nas quais pode-se encontrar informações relevantes como densidade dos materiais, temperatura máxima de uso, porcentagem de água/aditivo, composição química. De posse destas informações foram feitas pesquisas para entender a influência destas características no desempenho de concretos refratários e de que forma poderiam afetar os resultados do estudo.

Outra fonte importante para a coleta de dados foi a empresa responsável pela manutenção do concreto refratário dos calcinadores da empresa, que forneceu informações relevantes acerca do preparo e aplicação de ambos os materiais, atividades realizadas em conformidade com o procedimento recomendado pelos fabricantes.

A partir de maio deste ano vem sendo feito o acompanhamento, pela equipe de manutenção preditiva da empresa, por meio de imagens termográficas na região onde o material nacional em teste foi aplicado. Os relatórios das inspeções serviram como fonte de dados para realizar um comparativo entre as temperaturas apresentadas na região 140 dias após a aplicação do material australiano atualmente em uso e 140 dias após a aplicação do material nacional que está sendo testado.

O software PHD, utilizado para monitoramento operacional dos calcinadores da empresa serviu como ferramenta para acompanhar a produção da unidade de calcinação em estudo, para filtrar os dados, fazendo a análise comparativa das temperaturas considerando apenas dias em que as produções estivessem faixa para os dois calcinadores.

Além de comparar as temperaturas apresentadas após a aplicação dos dois materiais para mesmos valores de produção, também foi feito um gráfico estimativo das temperaturas para as duas situações, colocando as temperaturas coletadas em campo pelas termografias em uma ordem cronológica de dias após a aplicação de cada material, fazendo um ajuste de retas para gerar a curva de Temperatura X Tempo.

Após a coleta de dados e comparativos entre os dois materiais foram buscadas explicações para os resultados apresentados, podendo ser estas relacionadas com a aplicação dos materiais, questões operacionais e propriedades dos dois materiais.

Para a comparação de custos entre a utilização dos dois materiais, foram utilizados os valores unitários de referência da última compra de cada material feita pela indústria onde o teste foi realizado, o primeiro, do material importado que foi feita no mês de abril de 2017 e o outro preço unitário, correspondente a uma compra do material nacional que foi realizada no mês de setembro de 2017. É importante ressaltar que estes valores podem sofrer alterações, principalmente com a variação do dólar, no caso do concreto refratário importado.

A diferença na densidade dos dois materiais também faz diferença no custo final da compra, visto que um material com a densidade maior, para um mesmo volume de utilização resulta em uma quantidade em kg maior de aplicação, o que influencia no preço final do concreto já que o preço unitário dos matérias é por kg. Os volumes de aplicação tomados como referência são o volume para aplicação dos materiais apenas na região do cone do forno do calcinador, região mais quente na qual o material nacional foi aplicado para teste e também o volume médio total de aplicação que se vem praticando para o concreto refratário importado atualmente em uso.

4 ESTUDO COMPARATIVO

A escolha do concreto refratário mais adequado a ser utilizado para revestimento interno das regiões de um calcinador de alumina é uma tarefa de grande complexidade, devido à variação de tipos e intensidade de desgastes em cada área, resultado de alterações de características como as temperaturas, diâmetros e processos internos de cada vaso.

Para cada local dentro do calcinador é necessário que se identifique o principal tipo de desgaste, em geral de natureza abrasiva, a exemplo das gargantas onde há uma diminuição do diâmetro interno do vaso e por consequência aumento na velocidade do fluxo das partículas ou térmica como é o caso das regiões do forno e pré-aquecedor, que são as regiões mais quentes encontradas.

Além de variações nos materiais também há alterações de região para região na espessura das juntas e dos painéis de concreto refratário, nos tipos de âncoras e em seu material, bem como em seus espaçamentos e disposição, características essas que variam em função de fatores como a temperatura interna da região, esforços sob os quais os materiais estão sendo solicitados, densidade do material, condutividade térmica e número de camadas, bem como o tamanho dos painéis.

O método de aplicação também é outra variável importante a ser levada em consideração na hora da escolha do concreto refratário a ser utilizado, visto que cada um apresenta vantagens e desvantagens, como exemplo do método de vertedora, que garante ao material uma melhor homogeneidade da mistura, mas em contrapartida demanda de uma maior quantidade de tempo de aplicação e de cura, além da necessidade da montagem de formas para a aplicação do material o que aumenta a mão de obra necessária para a aplicação e impossibilita a utilização desse método em regiões onde não há espaço para a montagem de formas.

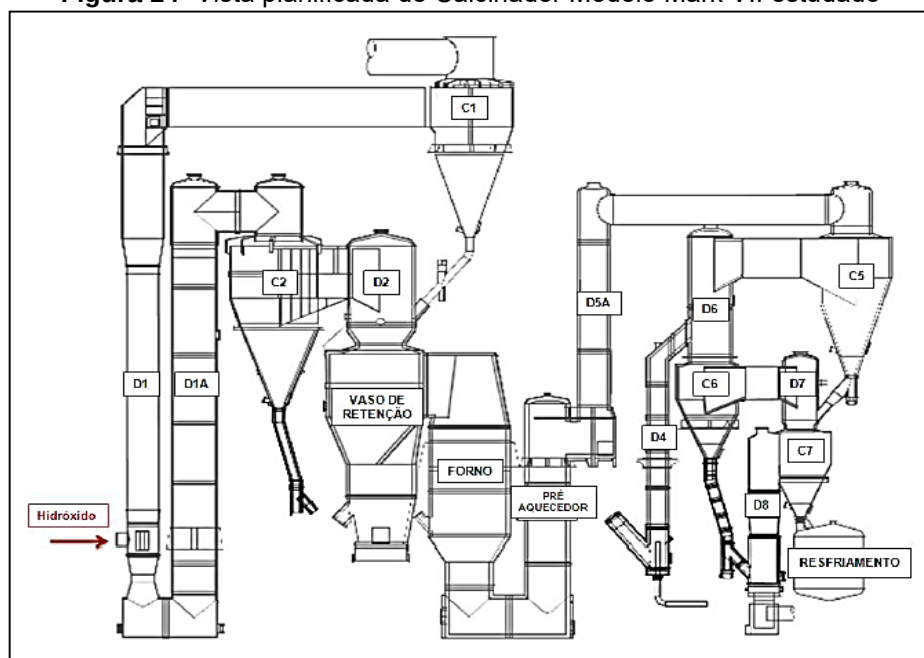
Outra variante envolvida no processo de escolha do material mais adequado a ser utilizado é a perda. Em geral, materiais que são aplicados pelos métodos de projeção e shotcrete possuem uma maior porcentagem de perda (rebote) que os materiais aplicados por vertedura e socagem pneumática, o que implica na necessidade de um maior volume de compra, para compensar a porcentagem de material perdida durante a aplicação e dependendo do preço unitário do material e da

forma como esse material é transportado, isso significa um representativo aumento no custo da manutenção do revestimento interno de um equipamento.

O tempo para aplicação do concreto refratário em geral tem grande peso na escolha do melhor concreto refratário a ser utilizado, principalmente em regiões onde há um grande volume de desgaste no revestimento refratário, pois o tempo em que o equipamento está parado para manutenção significa tempo parado sem produzir, o que implica em perda de produção e consequentemente em perda de lucro para a empresa. Os dois materiais analisados a seguir são aplicados por projeção, principalmente em função do grande volume de reparos na região em que estes são aplicados e por isso o mais indicado é a utilização de métodos que demandem um menor tempo de execução.

Devido ao elevado desgaste no revestimento refratário de uma determinada região do Calcinador de alumina modelo Mark 7 de uma indústria localizada em São Luís – MA, resultado principalmente das altas temperaturas encontradas nessa região, que é a mais quente do Calcinador, há a necessidade da utilização de materiais com uma maior resistência a esse tipo de desgaste para que se tenha uma maior vida útil e confiabilidade do equipamento.

Figura 14- Vista planificada de Calcinador Modelo Mark VII estudado



Fonte: Teider, 2012

Originalmente vem se utilizando nessa região um concreto refratário de baixo cimento, com base em agregados de alumina e silicato proveniente da Austrália, que possuem prática aplicação por meio de projeção, dispensando a necessidade de montagem de formas, sendo aplicado apenas com a montagem de mestras para a divisão dos seus painéis.

Apesar das propriedades do material, principalmente a refratariedade, estarem acima da média da maioria dos produtos que se encontram no mercado, o desempenho deste ainda não é totalmente satisfatório, visto que durante as inspeções realizadas na região do cone do forno dos Calcinadores durante as paradas para sua manutenção sempre é encontrado um grande desgaste no material, o que prejudica a sua capacidade de proteção e isolamento das chapas do equipamento, havendo assim a necessidade de troca do material.

Figura 15 – Elevado desgaste encontrado na inspeção do refratário da região do cone do forno do Calcinador.



Fonte: Autor, 2017

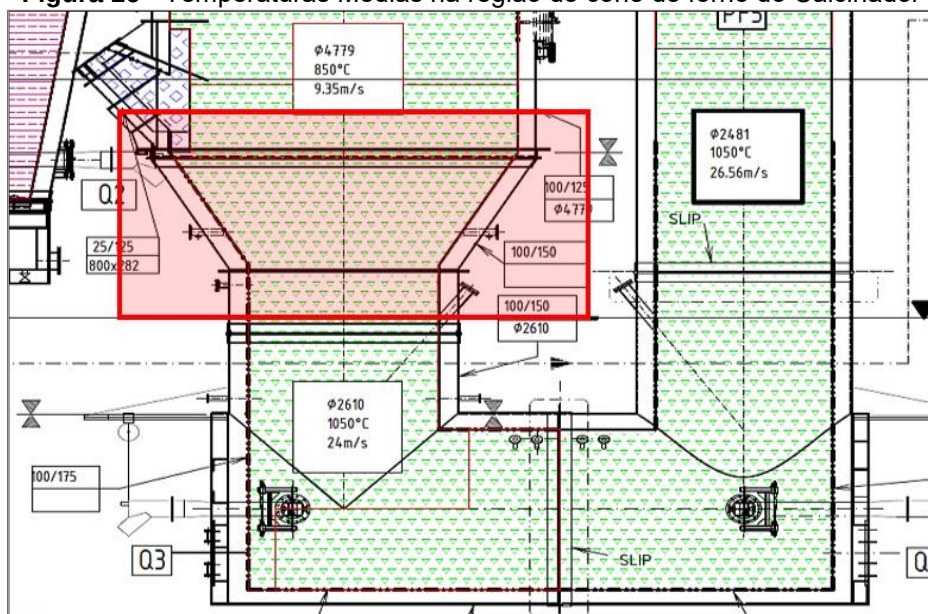
Também existem algumas complicações com relação à logística para a compra deste material, já que a fábrica que fornece o material está situada na Ásia, o que exige uma grande antecedência para a compra deste material, que passa muitos dias viajando de navio o que também acaba encarecendo o preço final do refratário.

Diante destes pontos negativos ligados ao material atualmente utilizado na região em estudo, é recomendável avaliar as vantagens técnicas e econômicas de um outro tipo de material que possa vir a ser um substituto deste concreto refratário,

buscando facilitar o planejamento das manutenções do equipamento com um menor tempo para recebimento do material, além da diminuição de seus escopos, tendo uma menor quantidade de áreas de reparo, demandando assim menos recurso e mantendo o equipamento parado por um tempo menor.

Em maio deste ano (2017) um concreto aluminoso denso sem cimento produzido em indústria nacional foi aplicado na região dos queimadores localizados no cone do forno do Calcinador, onde anteriormente utilizava-se o refratário denso da fábrica australiana, mantendo as duas camadas de refratário isolante anteriormente utilizadas. Na figura 16 foi feita a identificação da área na qual foi aplicado o novo material, além das temperaturas médias encontradas nesta região.

Figura 16 - Temperaturas Médias na região do cone do forno do Calcinador

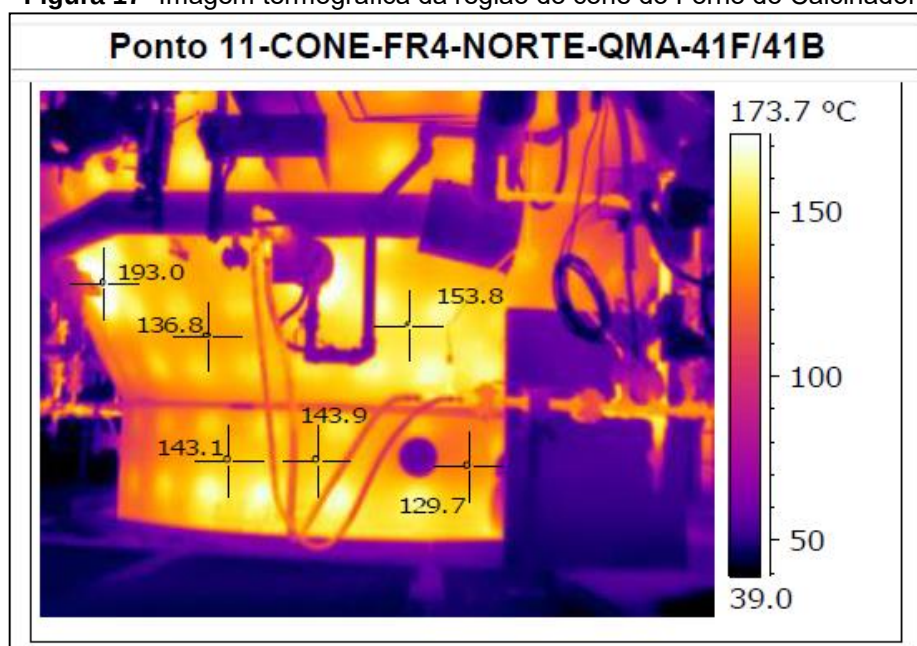


Fonte: Autor, 2017

Rotineiramente são realizadas inspeções termográficas (termovisões) pelo departamento de manutenção preditiva em todos os calcinadores desta refinaria, com a finalidade de identificar pontos quentes (acima de 350°) na superfície externa da chapa dos equipamentos. Nas regiões onde estes pontos são encontrados é realizado algum tipo de intervenção, como a instalação de amplificadores de ar, que ajudam na dispersão do calor na área ou então são construídas externamente caixas quentes revestidas com material refratário para evitar a fuga das partículas que circulam internamente no equipamento.

A partir dos relatórios destas inspeções que são emitidos semanalmente, é possível obter as temperaturas na superfície da região onde o refratário nacional que está sendo testado foi aplicado. Foi constatado que em comparação com as outras áreas do cone do forno onde o concreto refratário denso utilizado ainda é o material importado, houve a incidência de regiões mais quentes na região dos queimadores, fato que pode ser utilizado como parâmetro para o estudo do desempenho do material em teste. Na figura 17 a seguir pode-se observar que o ponto mais quente identificado na termografia está situado na região onde fica um dos queimadores do forno.

Figura 17- Imagem termográfica da região do cone do Forno do Calcinador



Fonte: Equipe de manutenção preditiva, 2017

Para comparar a condição atual com a encontrada após a aplicação do refratário importado logo após a sua aplicação, foram confrontadas as temperaturas superficiais encontradas nas duas ocasiões, usando também como critério a incidência dos mesmos valores de produção e por consequência temperaturas de operação próximas.

A tabela A do anexo contém os valores encontrados nas termografias realizadas 140 dias após a aplicação do refratário australiano no ano de 2015 e 140 dias após a aplicação do material brasileiro no ano de 2017 e faz um comparativo entre as temperaturas encontradas nos dois materiais para um mesmo valor de produção.

À partir dos dados do software PHD, utilizado para monitoramento das condições de operação dos Calcinadores, é possível constatar que os valores atuais de produção na unidade em estudo, em média 124 t/h, são maiores que a dois anos atrás, em média 119 t/h, o que provavelmente iria interferir nas temperaturas internas da região em estudo, influenciando assim nos resultados encontrados nas termografias.

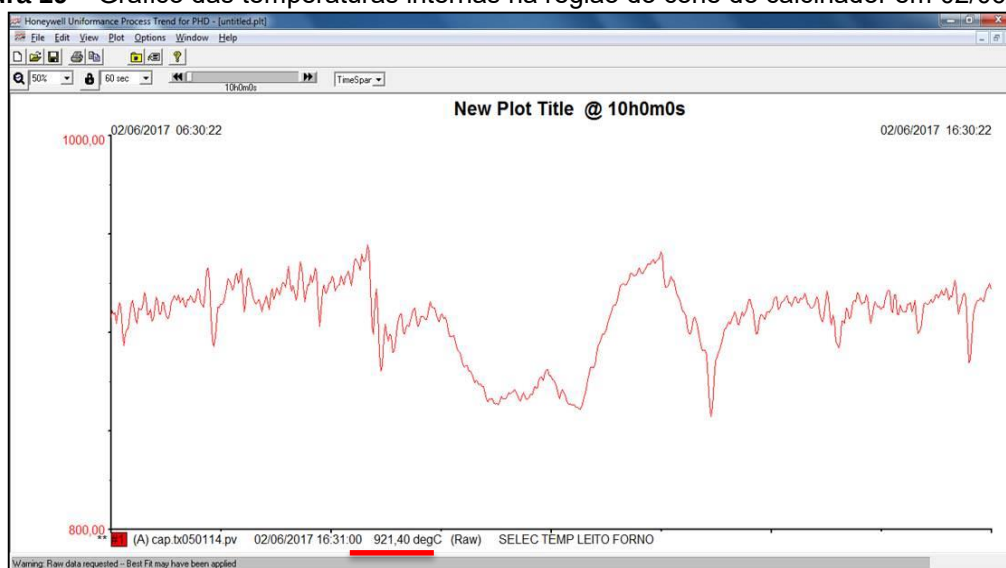
Ao contrário do que era esperado, após analisar os valores das temperaturas internas médias da região encontradas utilizando novamente o software PHD, para uma data no ano de 2015 em que a produção era de 119 t/h e outra em 2017 em que a produção era de 124t/h, constatou-se que as temperaturas eram muito próximas, tendo um valor até maior na data em que a produção era menor.

Figura 18 – Gráfico das temperaturas internas na região do cone do calcinador em 23/06/2015



Fonte: Software PHD, 2017

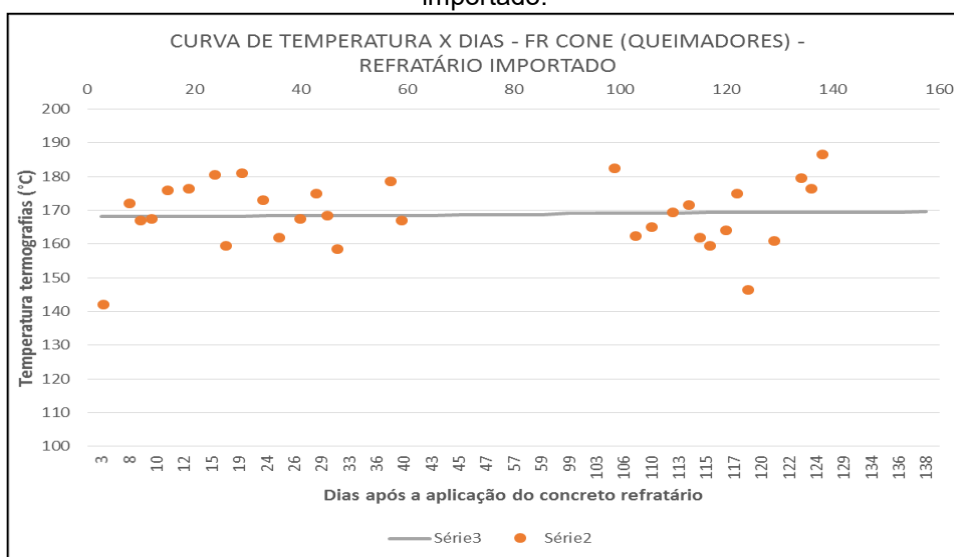
Figura 19 – Gráfico das temperaturas internas na região do cone do calcinador em 02/06/2017



Fonte: Software PHD, 2017

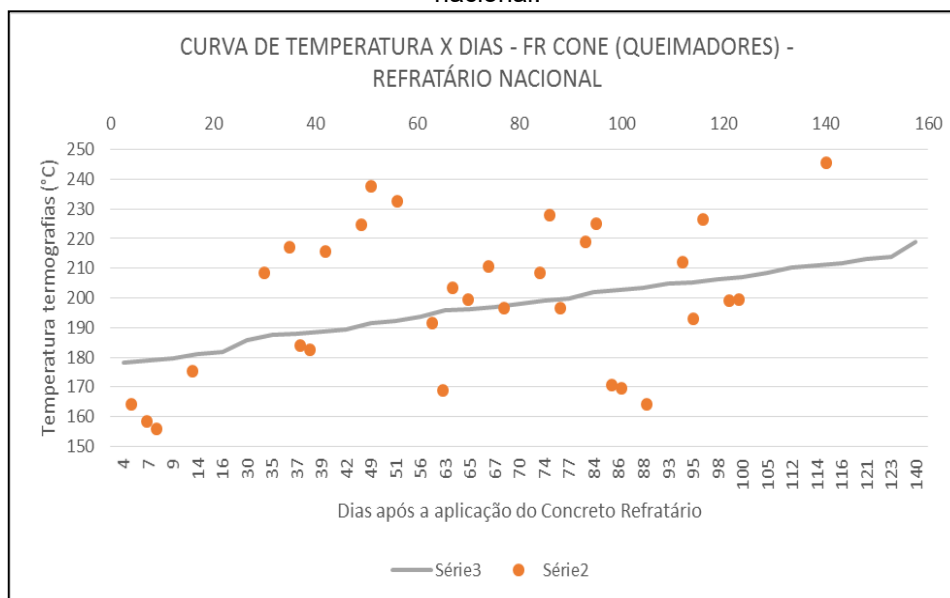
Analisando a tabela A do anexo pode-se constatar que as temperaturas encontradas na maioria das termografias realizadas após a aplicação do novo material indicam maiores temperaturas superficiais na região, mesmo em dias em que a produção estava igual à de dois anos atrás. As figuras 20 e 21 a seguir possuem o gráfico das temperaturas gerados à partir dos dados da tabela A (temperaturas monitoradas 140 dias após a aplicação de cada material), no qual há a curva prevista para a temperatura nos dois casos.

Figura 20 - Curva de temperaturas na superfície da região do cone do forno com o concreto refratário importado.



Fonte: Autor, 2017

Figura 21 - Curva de temperaturas na superfície da região do cone do forno com o concreto refratário nacional.



Fonte: Autor, 2017

Outra informação importante a ser levada em consideração no estudo comparativo dos dois materiais é o fato de que a inclinação do gráfico do novo material é bem acentuado, iniciando em 180°C e chegando à 220°C em apenas 140 dias de aplicação, ao contrário do outro refratário, onde a curva de temperatura inicia em 170°C e se mantém quase que constante em 140 dias.

Mais uma alteração entre os dois concretos está em seus traços e modos de preparos, apesar de ambos serem aplicados por projeção cada um possui peculiaridades que influenciam em seus desempenhos, podendo estes serem outros prováveis motivos para as diferenças nos resultados encontrados.

O concreto importado é comprado em sacos de 25 kg semi-pronto apenas para a adição de água. Durante o seu preparo este é misturado à seco por 30 segundos e em seguida é adicionada água, inicialmente 75% do total de pré-mistura, o restante é adicionado aos poucos por cerca de 2 minutos, ou até que não seja notada segregação entre grãos ou regiões não umedecidas. O valor total de água adicionado à mistura é de 3% da quantidade total do refratário.

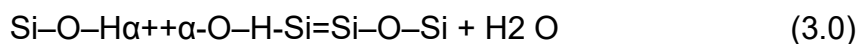
Depois de misturado o material é carregado na bica de alimentação e a máquina de projeção é abastecida. A distância entre o bico da pistola e a superfície que irá receber o revestimento, deve estar entre 0,60 a 1,20 metros. O concreto é aplicado em excesso para garantir a espessura prevista em projeto, o excesso é removido imediatamente após aplicação utilizando réguas metálicas e colheres de

pedreiro, não sendo permitida a obtenção da espessura final do concreto com aplicação em mais de uma camada.

O concreto de fabricação nacional que também é comprado em sacos de 25 kg, possui como principal diferença no preparo em relação ao outro material a substituição da água de mistura por aditivo de sílica coloidal. A quantidade total de aditivo é igual a 9% da quantidade total de refratário, para a pré-umidificação deve-se adicionar apenas 30% da quantidade total de ligante, pois o excesso de pré-umedecimento pode resultar na formação de uma massa que poderá bloquear a mangueira entre o equipamento de projeção e a válvula.

A sílica coloidal, indicada para utilização como ligante em concretos que contem Al_2O_3 e SiO_2 , visto que ajuda na secagem, além de diminuir a porosidade após queima do material, além de inibir a formação de fases de baixo ponto de fusão. O processo de pega nesse modelo acontece através da gelificação da solução, com a reação das nanopartículas de sílica resultando em ligações primárias fortes.

O processo de gelificação é resultado da formação de ligação silanol ($Si-O-Si$) na interação entre as partículas (equação 3.0).



A utilização de sílica coloidal como ligante apresenta um ganho de tempo na secagem do concreto refratário, já que este tipo de ligante garante uma maior permeabilidade do material, facilitando assim a saída da água durante a sua secagem, diminuindo o risco de ocorrência de explosões dentro do material que danificam sua estrutura, o que dá a possibilidade de um aumento mais rápido na temperatura durante a sua secagem. Em contrapartida a utilização deste tipo de ligante significa um aumento no preço do material, que apesar de na maioria dos casos apresentar uma melhor durabilidade em função do aditivo de sílica coloidal, resultando em uma economia com troca de matérias, mas com uma maior custo de aquisição deste.

De posse destas informações é importante buscar a causa raiz que provocou esta variação entre os valores de temperaturas para os dois materiais, que pode estar relacionada às características de cada material, ou até mesmo à condições operacionais diferentes na unidade de calcinação.

Nas inspeções realizadas em outro calcinador da mesma refinaria, foi detectado um problema de enxarcamento de óleo na mesma região de estudo, este óleo deveria sofrer combustão nos queimadores do forno, mas por alguma razão não estão sendo completamente queimado e está infiltrando no concreto refratário que reveste internamente a região.

O enxarcamento de óleo pode ter diversas consequências negativas sobre a eficiência e a vida útil do material. Caso o mesmo problema esteja acontecendo na unidade de calcinação em estudo, é possível que o combustível cause alguma reação química no concreto refratário denso que está sendo testado, afetando propriedades como a sua refratariedade, além de haver a possibilidade desta substância infiltrar nos poros das camadas de refratário isolante, que apesar de continuarem ainda sendo os mesmos materiais anteriormente utilizados, mas tem sua capacidade de isolamento térmico diminuído devido a diminuição de sua porosidade.

Figura 22 – Região do cone do forno de calcinador afetada pelo enxarcamento de óleo



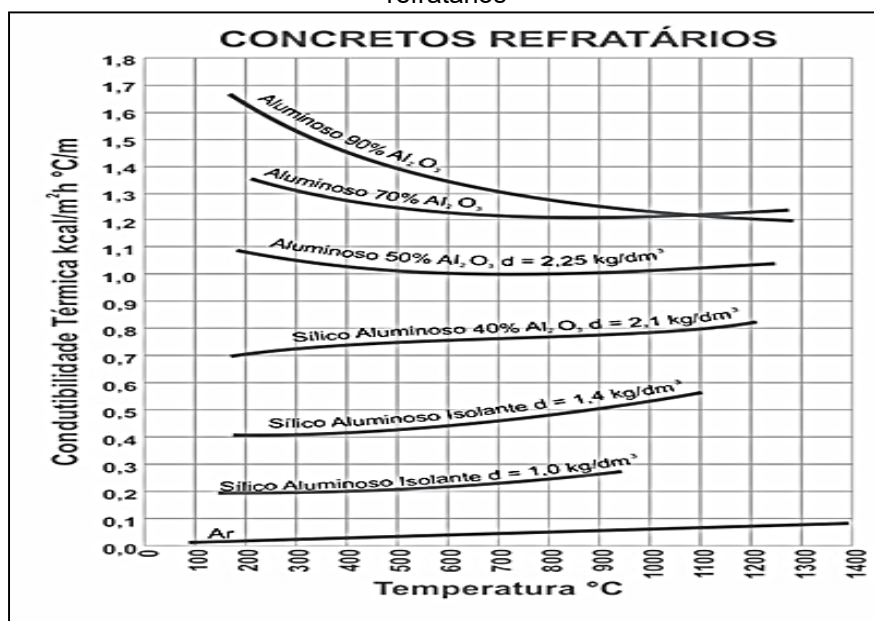
Fonte: Autor, 2017

Outra possível explicação para a divergência entre as temperaturas encontradas nas termovisões dos dois materiais está em suas porcentagens de Al_2O_3 , de 61% para o material fabricado na Austrália e 72% para o fabricado no Brasil. Concretos refratários com elevados teores de alumina em geral apresentam boa condutividade térmica o que auxilia na resistência ao choque térmico, no entanto, para que não haja perda excessiva de calor é preciso de um bom isolamento térmico da camada isolante do revestimento refratário.

Cerâmicas de alta alumina, com teores acima de 70% de alumina em geral apresentam como últimas fases mulita e coríndon, por isso estas podem ser utilizadas em locais com temperaturas muito elevadas (acima de 1800°C) e com fortes cargas mecânicas.

Na região em estudo, como há uma grande variação nas temperaturas, que atingem valores superiores a 1000°C, há uma grande deterioração por choque térmico, necessitando de um material com boa resistência a esse tipo de desgaste, logo um material com boa condutividade térmica seria uma alternativa adequada de utilização. Na figura 23 a seguir é possível observar que concretos com um teor mais elevado de alumina possuem maiores condutividades térmica, então apesar de o isolamento térmico não ser a principal função da camada de concreto refratário denso, mas a utilização de um material com maior teor de alumina implica em uma maior passagem de calor.

Figura 23 – Gráfico de condutividade térmica em função da temperatura para diferentes concretos refratários



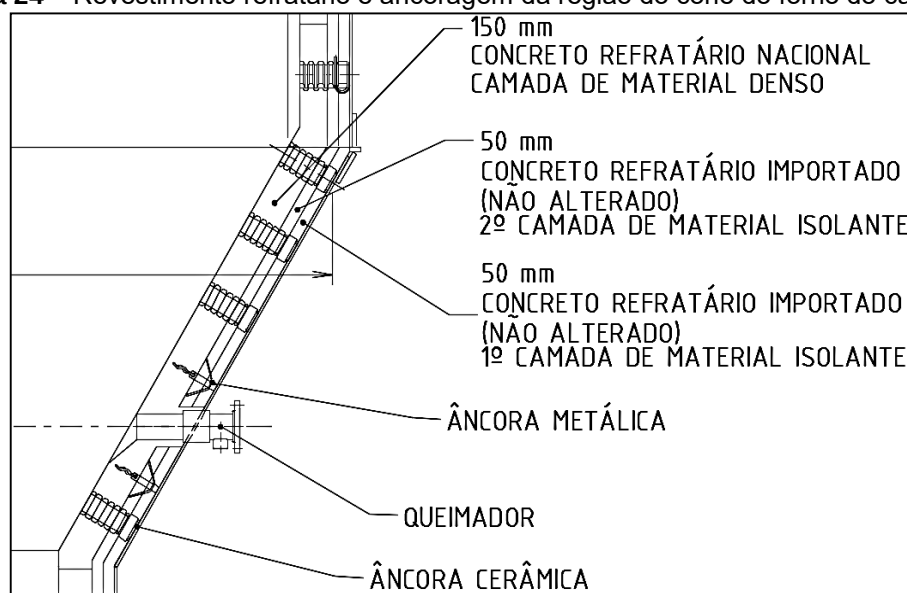
Fonte: Ibar, 2017

Além de possuir uma menor porcentagem de alumina, o concreto refratário denso importado possui agregados de andaluzita na sua composição, estes agregados além de oferecerem uma elevada resistência à deformação também têm uma baixa condutividade térmica, o que faz com que o calor que se propaga para as camadas de refratário isolante no caso do material australiano, seja menor que para

o material brasileiro, além de possuir coeficiente de expansão térmica pequeno e baixa porosidade.

Uma preocupação levantada pelo estudo dos dados coletados é com a temperatura que vem sendo encontrada na superfície externa do equipamento, que além de já apresentarem valores elevados, caso mantenham o mesmo padrão de comportamento tendem a atingir temperaturas ainda maiores, temperaturas essas que caso não sejam dissipadas adequadamente podem gerar problemas como a deformação das chapas do equipamento. Na figura 24 a seguir estão identificadas as duas camadas de material isolante e a camada de material denso localizadas na região do cone do forno do calcinador, bem como as suas respectivas espessuras.

Figura 24 – Revestimento refratário e ancoragem da região do cone do forno do calcinador



Fonte: Autor, 2017

O real desempenho do concreto refratário que está sendo testado só poderá ser de fato analisado durante a inspeção da região na próxima parada do equipamento, quando o desgaste na superfície do material puder ser avaliado, já que a principal função da camada de revestimento denso é resistir ao choque térmico, abrasão e demais desgastes a que este está submetido no interior do calcinador, mas de imediato pode-se deduzir que para que este material tenha um desempenho plenamente satisfatório é necessário realizar melhoras no isolamento térmico da área onde este for aplicado.

O mau isolamento do concreto refratário que reveste internamente um calcinador de alumina é imensamente prejudicial, uma das consequências deste

problema, quando ocorrido de maneira acentuada, além das anteriormente citadas, é a excessiva perda de energia para o meio em forma de calor, o que significa um aumento do consumo energético do equipamento.

Outra consequência seria a elevação das temperaturas na região dos equipamentos, aumentando mais ainda a insalubridade da área de trabalho de seus operadores, o que dificulta a execução de suas tarefas, criando assim problemas como a necessidade de algum tipo climatização com o objetivo de amenizar as temperaturas da área para que os colaboradores possam realizar suas atividades.

É inadequado avaliar o desempenho do concreto refratário denso nacional utilizando apenas o seu isolamento térmico como parâmetro, já que há muitas outras variantes envolvidas, porém é importante que este material atenda à todas as solicitações da região, pois apenas apresentar uma refratariedade elevada, por exemplo, não garante que este seja o material mais adequado para utilizar-se.

Caso seja efetivada a utilização do novo material, substituindo o material que vinha sendo usado, é possível que se resolva o problema de desgaste na espessura dos painéis, já que este novo material apresenta peculiaridades que o permite resistir mais ao desgaste e ao choque térmico, porém seria criado um problema ligado à propagação do calor, levando a um aumento das temperaturas da face fria (face externa) do equipamento, que em valores acentuados acabaria levando à deformações na chapa do equipamento, ou dar a falsa impressão de desgaste no concreto refratário.

Alternativas para melhorar o quadro apresentado seriam aumentar a espessura da camada de concreto refratário isolante, ou utilizar um outro material com melhor isolamento térmico, diminuindo a propagação de calor até a face fria do equipamento. Para a escolha de outro refratário isolante é necessário analisar o perfil térmico dos materiais, levando em consideração a temperatura de operação da região e a temperatura ideal para a face externa do equipamento, em torno de 150°C, ou pelo menos os 170°C que já era a temperatura média apresentada quando o material importada estava sendo utilizado.

Caso a alternativa utilizada para o aumento do isolamento térmico da região seja aumentar a espessura da camada de concreto isolante deve-se levar em conta primeiramente a troca de todas as âncoras da região, visto que o tamanho destas é em função da espessura das camadas de concreto da região. Além disso um

excessivo aumento no peso dos painéis pode fazer com que o espaçamento entre as âncoras não atenda à nova carga de solicitação, gerando possivelmente uma diminuição no espaçamento das âncoras, aumentando a quantidade de âncoras utilizadas, o que pode ser prejudicial para o concreto já que a interação entre as tensões geradas pode levar ao trincamento e colapso do revestimento refratário.

Se de fato a razão para o aumento das temperaturas na chapa externa do equipamento for um problema operacional, a exemplo do vazamento de óleo encontrado na inspeção da outra unidade de calcinação, as análises feitas neste trabalho estariam comprometidas, pois o concreto refratário fabricado no Brasil estaria submetido à condições diferentes da que estava o outro material, que prejudicam o desempenho do conjunto concreto denso e isolante.

Outra variável que tem fundamental importância no desempenho de um concreto refratário é a qualidade de sua aplicação. Em aplicações de revestimentos refratário por projeção é indispensável a precisão dos profissionais que estão executando a atividade, sobretudo do mangoteiro, que é responsável por controlar a quantidade de água e a uniformidade do fluxo de ar, sendo o primeiro a perceber qualquer tipo de problema na aplicação, caso este não desempenhe a sua tarefa de maneira adequada, o concreto refratário poderá sofrer com problemas como a laminação, a reflexão excessiva, o efeito de sombra, a oclusão da reflexão, os deslocamento e as imperfeições superficiais.

No caso em estudo, o risco de ocorrência de algum problema de aplicação é mínimo, em virtude desta ser a aplicação de um material para teste e por esta razão, aconteceu com o mais rigoroso controle possível, evitando que alguma falha de aplicação interferisse no desempenho do material, logo a hipótese de que um problema de aplicação tenha alguma influência sobre os resultados encontrados não é válida.

Tendo em vista todas as informações expostas neste trabalho, entende-se que a seleção e uso dos refratários é uma tarefa de grande complexidade, uma vez que ele não depende somente das propriedades, mas também de diversos parâmetros externos como projeto (espessura, ancoragem, materiais adjacentes, dimensões de painéis, juntas), operação e instalação.

Com relação aos custos de aquisição dos materiais, somando o preço do produto ao preço do frete, há uma expressiva divergência entre os valores

encontrados para os dois materiais, principalmente para grandes quantidades de aplicação.

Apesar da distância de transporte para o concreto importado, o que gera elevados gastos com o frete do produto, a aquisição deste material acaba ainda se tornando mais em conta do que a do concreto refratário produzido no Brasil, já que o aditivo utilizado no seu preparo aumenta consideravelmente o seu valor de compra. Na tabela 3 a seguir é possível ver um comparativo entre o valor total de compra para cada material, considerando a troca do material utilizado apenas a área do cone do forno do calcinador em estudo, área mais quente do equipamento e onde foi aplicado o material em teste.

Tabela 3 – Comparativo entre os custos com compra de material para aplicação na região do cone do calcinador dos dois materiais

	Material Importado	Material Nacional
Densidade (kg/m³)	2.410,00	2.710,00
Volume (m³)	3,50	3,50
Quantidade (kg)	8.435,00	9.485,00
Preço Unitário (R\$)	9,69	10,47
Preço Total (R\$)	81.735,15	99.354,82
Aumento no Preço Total (R\$)	17.619,67	

Fonte: Autor

Na hipótese de substituir completamente a utilização do material australiano, pelo material fabricado no Brasil, para uma aplicação média de 52 m³ para obras de manutenção do revestimento de um calcinador, tem-se o mesmo aumento percentual de 22% no valor final de aquisição de material, porém por se tratar do concreto refratário de maior consumo, representa um aumento significativo no preço final da obra. A tabela 4 a seguir contém o custo da compra de 52 m³ de cada um dos concretos refratários.

Tabela 4 – Comparativo entre os custos dos dois materiais para a quantidade média de aplicação de uma obra de manutenção no revestimento refratário de um calcinador

	Material Importado	Material Nacional
Densidade (kg/m³)	2.410,00	2.710,00
Volume (m³)	52,00	52,00
quantidade (kg)	125.320,00	140.920,00
Preço Unitário (R\$)	9,69	10,47
Preço Total (R\$)	1.214.350,80	1.476.128,71
Aumento no Preço Total (R\$)	261.777,91	

Fonte: Autor

Caso durante durante as inspeções do material em teste, seja detectado que este teve um bom desempenho, resistindo ao elevado desgaste térmico a que o revestimento fica submetido na região, o mais adequado seria a adoção da utilização do material nacional nesta região em específico, porém não de maneira integral, visto que a utilização deste material em toda a região onde o material a base de andaluzita produzido na Austrália é utilizado elevaria muito o custo total da obra, sendo que o custo-benefício em áreas onde o desgaste no concreto refratário é menor não justificaria a utilização do material com o preço de aquisição mais elevado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria nacional de fabricação de refratários atualmente pode ser considerada como referência quando comparada com outras empresas ao redor do mundo. Ao longo deste trabalho foi feito um comparativo entre um concreto refratário brasileiro e outro australiano, no qual foi constatado que as características do primeiro não eram inferiores ao outro material fabricado em um indústria tradicional do segmento e por isso este pode ser aplicado em situações onde hajam grandes solicitações.

Dentro do mercado brasileiro existem indústrias petroquímicas, siderúrgicas e de diversos segmentos que representam consumidores em potencial para os fabricantes nacionais de refratário. Apesar de cada vez mais haver o aperfeiçoamento dos concretos refratário, o que aumenta a vida útil dos materiais e por consequência acaba diminuindo a demanda por estes, mas os refratários são matérias primas de valor elevado, o que representa um mercado rentável para uma quantidade limitada de empresas e por isso é importante que os fabricantes nacionais invistam continuamente em pesquisa e em melhorias nos seus produtos, para que estes mantenham a competitividade com os concretos refratários importados e ter assim a preferência de compra das indústrias nacionais.

A escolha do concreto refratário mais adequado para ser utilizado é uma tarefa que depende de diversas variáveis, não existindo assim uma regra geral para definir o melhor material, cada um apresenta assim vantagens e desvantagens com relação aos demais. Refratariedade, resistência à choque térmico, condutividade térmica, isolamento térmico, tipo de ligante, valor de aquisição, método de aplicação e a logística para fornecimento de cada material são algumas destas variáveis, sendo que mesmo que a utilização de um material se apresente como vantajosa na maioria destes critérios, um desempenho muito ruim dentro de um único critério pode inviabilizar a sua utilização.

No caso do concreto refratário nacional testado como um possível substituto de outro material fabricado na Austrália, em determinada região de um calcinador de alumina localizado em indústria de São Luís – MA, com relação às características do material, este não é inferior ao que historicamente vinha sendo aplicado, porém mesmo sem ter sido feita a inspeção da superfície do concreto

refratário denso para avaliar o seu desgaste, para saber se foi menor que o sofrido no material australiano quando aplicado nesta mesma região, de imediato já se pode constatar que o material nacional propaga mais o calor e por isso as temperaturas apresentadas na face fria do equipamento acabam sendo maiores.

Apesar do isolamento térmico não ser a principal função da camada de revestimento refratário denso, é necessário continuar acompanhando o comportamento das temperaturas apresentadas na região onde está sendo realizado o teste, detectando assim se estas irão gerar algum prejuízo para a vida útil do equipamento. Caso se opte por adotar o uso do novo material, provavelmente será necessário realizar algum tipo de melhoria do isolamento térmico do conjunto concreto isolante e denso, realizando novos estudos e testes, até que se atinja resultados cada vez mais satisfatórios.

Outro fator de peso na hora da escolha de qual material usar é o custo agregado de cada um. Neste caso em específico caso seja optado pela troca do material atualmente em uso pelo que está em teste haverá então um representativo aumento no valor final, por isso só se justifica esta troca em locais onde haja a ocorrência de elevado desgaste.

REFERÊNCIAS

ALVES, Elizeth Oliveira. **Estudo Dos Parâmetros De Desgaste De Refratários: Comparativo De Tijolos Dolomíticos Para Linha De Escória Em Painéis De Aço De Siderurgia**. Marabá – PA: UFPA, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8826**: Define os termos técnicos relativos aos minerais, matérias-primas, processos, tratamentos e equipamentos empregados na fabricação de materiais refratários, bem como sua aplicação, suas propriedades, tipos de produtos. Rio de Janeiro, outubro 2014.

BAZANT, Z. P.; KAPLAN, M. F. **Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models**. Longman Group Limited, 1996.

BRADT, R.C. **Fracture of Refractories**. New York: Marcel Dekker, 2005.

CARNIGLIA, S.C., et al. **Handbook of Industrial Refractories Technology**. Edição re-impressa. Westwood. Noyes Publications, 1992.

CUNHA, José De Ribamar Ferreira Cunha. **Gestão De Parada Aplicada À Manutenção Dos Calcinadores De Alumina Da Refinaria – Alumar - Substituição Do Revestimento Refratário**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

DINIZ, Simone Jovita Diniz. **Caracterização de dois tipos de concretos refratários utilizados em fornos reformadores**. São Paulo: USF, 2004.

FREITAS, A. K. Mecanismos gerais de desgaste em refratários. In: **Programa do Curso de Refratário Equipe do Grupo Gerdau – Magnesita S.A.** Contagem, 1993.

GONÇALVES, G. **A interpretação prática dos testes de qualidade executados pelo GCQ: A interpretação prática dos testes de qualidade executados pelo GCQ**. Belo Horizonte: Atual, 2011.

ISMAEL, F. T. **Sol de sílica como agente ligante para concretos refratários, Cerâmica**. São Paulo: Atual, 2007.

LEE, W.E; et al. Castable Refractory Concretes **Int. Mat. Reviews**, v. 46, n. 3, p. 145-167, 2005.

MACZURA, G., et al. **Refractory Cements: Proceedings of the Raw Materials for Refractories Conference: Ceramic Engineering and Science**. USA: The American Ceramic, 1993.

MAGLIANO, M. V.; M., PANDOLFELLI, V. C. **Sistemas ligantes para concretos refratários multizáveis**. São Paulo: UFSCAR, 2010.

MOURA Filho, et al. **Projeto mecânico de refratários**. São Paulo: REDUC/SETRE, 2008.

NASCIMENTO, Z. D. **Efeito do cálcio no desgaste das placas refratárias de válvula gaveta de distribuidor no processo de lingotamento contínuo**. Disponível em: <http://www.tede.ufop.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=251>. Acesso em: 18 out. 2017.

RAAD, T. **Refractories Handbook**. Tóquio. The Technical Association of Refractories, 2008.

SANTOS, V.A.A. et al. What Affects Erosion Resistance of Refractory Castables? **Refractories Applications and News**, v. 14, n. 6, p. 9-16, 2009.

SILVA, G. **Refratários para siderurgia: Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2010.

TEIDER, Bruno Henrique. **Análise “Post-Mortem” de Refratários para calcinadores de Alumina e a Importância do Processo de Seleção de Materiais**. São Paulo: Convenções Imigrantes, 2012.

WALKER, K. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico**. Brasília: Centro de gestão de estudos estratégicos, 2005.

ANEXOS

ANEXO A – COMPARATIVO ENTRE TEMPERATURAS REGISTRADAS NA SUPERFÍCIE DO EQUIPAMENTO COM OS DOIS CONCRETOS REFRAATÓRIOS APLICADOS.

COMPARATIVO DE TEMP ENCOTRADAS NAS TERMOGRAFIAS				
Produção (t/h)	Refratário Importado		Refratário nacional	
	Data	Temperatura	Data	Temperatura
120			29/09/2017	199,5
122	10/06/2015	142		
123	18/09/2015	163	27/09/2017	199
124	05/08/2015	167	02/06/2017	164
	22/06/2015	176		
	23/10/2015	187		
125	14/09/2015	183	22/09/2017	226,5
			19/07/2017	237,5
126			01/09/2017	225
127	06/07/2015	181		
	17/06/2015	167		
128	26/06/2015	177	24/07/2017	232,5
	19/10/2015	180		
	17/07/2015	168		
129	19/06/2015	168	11/08/2017	210,5
	22/07/2015	169	05/06/2017	158,5
	01/07/2015	181	14/06/2017	175,5
	20/07/2015	175		
	30/09/2015	162		
	10/07/2015	173		
	03/07/2015	160		
130	03/08/2015	179	03/07/2017	217
	07/10/2015	175	07/06/2017	156
	24/07/2015	159		
	21/09/2015	165		
	15/06/2015	172		
	25/09/2015	170		
	28/09/2015	172		
	13/07/2015	162		
	02/10/2015	160		

COMPARATIVO DE TEMP ENCOTRADAS NAS TERMOGRAFIAS				
Produção (t/h)	Refratário Importado		Refratário nacional	
	Data	Temperatura	Data	Temperatura
131	05/10/2015	164	30/08/2017	219
	14/10/2015	161	28/06/2017	208,5
	21/10/2015	177		
132	09/10/2015	147	04/09/2017	170,5
			12/06/2017	138,5
			14/08/2017	196,5
			23/08/2017	228
			07/08/2017	199,5
			02/08/2017	169
133			25/08/2017	196,5
			05/07/2017	184
			31/07/2017	191,5
			21/08/2017	208,5
			04/08/2017	203,5
134			18/09/2017	212
			17/07/2017	224,5
			29/09/2017	245,5
			20/09/2017	193
			11/09/2017	164
			06/09/2017	169,5
135			07/07/2017	182,5
			10/07/2017	215,5

Fonte: Autor, 2017