



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCO CAVALCANTE D'AMICO

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAL REFRAATÓRIO USADO
COMO REVESTIMENTO INTERNO DE CALDEIRAS**

FORTALEZA

2017

MARCO CAVALCANTE D'AMICO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAL REFRAATÁRIO USADO
COMO REVESTIMENTO INTERNO DE CALDEIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial da obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. William Barcelos

FORTALEZA

2017

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

D1a D' Amico, Marco Cavalcante.

Análise de propriedades térmicas de material refratário usado Como revestimento interno de caldeiras / Marco Cavalcante D' Amico. – 2017.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

1. Lodo de águas residuais. 2. Material refratário. 3. Caldeira de leito fluidizado. I. Título.

CDD 620.1

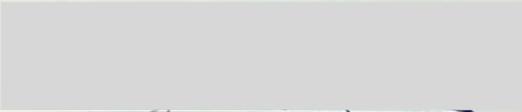
MARCO CAVALCANTE D'AMICO

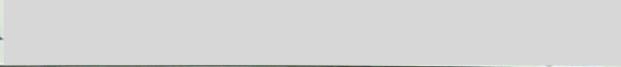
ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAL
REFRATÁRIO USADO COMO REVESTIMENTO INTERNO DE CALDEIRAS

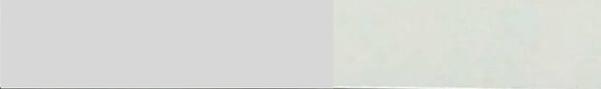
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial da obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 18 / 12 / 2017.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof.^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Msc. Eng. Welkson Carneiro de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha mãe, Anailse.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças e me guiar nos momentos de dificuldade.

Ao Prof. Dr. William Magalhães Barcellos, pela oportunidade de integrar o projeto de sua liderança, pelos ensinamentos e exímia orientação neste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo e disponibilidade.

À minha mãe, pela educação, carinho e motivação, sem as quais não seria possível a conclusão deste trabalho.

Aos atuais e antigos integrantes do LACER, em especial João Diego Moreira Feitosa e Welkson Carneiro de Araújo, por terem me auxiliado com sugestões e colaborações valiosas para a execução deste trabalho.

“Não sou nada. Nunca serei nada. Não posso
querer ser nada. À parte isso, tenho em mim
todos os sonho do mundo.”

(Fernando Pessoa)

RESUMO

Um dos grandes problemas na manutenção de fornos e caldeiras concentra-se no material, aplicado no isolamento térmico interno que constitui a câmara de combustão. As interrupções rotineiras realizadas para reparos em grandes instalações térmicas de vapor, onde a caldeira é o equipamento de maior custo e preocupação, podem representar avarias irreversíveis na instalação, como um todo, com custos que podem inviabilizar a sua reparação. O principal motivo é exatamente o material refratário que reveste a caldeira internamente, porque não suporta processos de dilatação e contração térmica sucessivos, ficando sujeitos ao aparecimento de trincas e deterioração do material refratário. Neste contexto, este projeto teve o propósito de implementar um procedimento de teste do material refratário a ser utilizado na caldeira, de forma a permitir a análise dos seus parâmetros térmicos e mecânicos mais importantes, para assim selecionar o revestimento adequado. Objetivamente, este trabalho de conclusão de curso visa atender à caldeira de leito fluidizado em desenvolvimento no Laboratório de Combustão em Energias Renováveis (LACER), através da parceria com a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), com suporte financeiro do BNDES e contrapartida da própria empresa parceira. Essa caldeira deverá operar utilizando o lodo seco, proveniente de descargas periódicas de reator biológico anaeróbio, o qual degrada a biomassa das águas residuais. Para manter similaridade com as características técnicas do protótipo da caldeira em desenvolvimento, foi concebido um protótipo com formato e dimensões próximas a da câmara de combustão da caldeira, revestindo-o internamente com o material refratário selecionado para o estudo. O protótipo foi preenchido com esferas cerâmicas de alumina e aquecido com resistência elétrica, de forma a garantir uma temperatura dentro do meio poroso semelhante à de operação da caldeira. Assim, foram realizados ensaios que visavam a caracterização da condutividade térmica do material. Para tal, foram utilizados termopares para monitorar as temperaturas e identificar a condutividade térmica do refratário. Por meio desse estudo experimental, foi possível observar a influência dos parâmetros de operação e projeto, permitindo antecipar a percepção quanto a alguns problemas operacionais da caldeira, como surgimento de trincas, o que pode minimizar os riscos à segurança e os custos de operação e manutenção.

Palavras-chave: Lodo de águas residuais. Material Refratário. Caldeira de Leito Fluidizado.

ABSTRACT

One of the major problems in furnace and boiler maintenance is the material applied to the internal thermal insulation that constitutes the combustion chamber. Routine interruptions to repairs large thermal steam installations, where the boiler is the most costly and worrisome equipment, can represent irreversible damage to the installation, with costs that can render repairs infeasible. The main reason is exactly the refractory material that protects the boiler internally, because it does not support successive processes of thermal expansion and contraction, being subject to the appearance of cracks and deterioration of the refractory material. In this context, this project has the purpose of implementing a test procedure of the refractory material to be used in the boiler, in order to allow the analysis of its most important thermal parameters, in order to select the appropriate coating. Objectively, this paper aims to attend to the fluidized bed boiler in development at the Laboratory of Combustion in Renewable Energies (LACER), through a partnership with the Water and Sewage Company of Ceará (CAGECE), with financial support from BNDES. This boiler should operate using dry sludge from periodic discharges of an anaerobic biological reactor, which degrades the biomass of wastewater. To maintain similarity to the technical characteristics of the boiler prototype in development, a test specimen was designed with dimensions close to the combustion chamber of the boiler, coating it internally with the refractory material selected for the study. The prototype was filled with ceramic alumina beads and heated with electrical resistance, in order to guarantee a temperature inside the porous medium similar to that of boiler operation. Thus, tests were carried out to characterize the thermal and mechanical properties of the material. For this, thermocouples were used to monitor the temperatures and to identify the thermal conductivity of the refractory. Through this experimental study, it was possible to observe the influence of the operation and design parameters, allowing to anticipate the perception about some operational problems of the boiler, which can minimize the risks to safety and the costs of operation and maintenance.

Keywords: Sewage sludge. Refractory Material. Fluidized Bed Boiler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caldeira do tipo Flamotubular	21
Figura 2 – Representação Esquemática de uma caldeira aquatubular.....	21
Figura 3 – Classificação dos Materiais.....	24
Figura 4 – Distribuição da aplicação de materiais refratários no mercado brasileiro	25
Figura 5 – Consumo anual de material refratário entre 1998 e 2008	26
Figura 7 – Vista lateral com corte do protótipo.....	31
Figura 8 – Protótipo de testes fabricado	32
Figura 9 – Tampas dos protótipo fabricadas	33
Figura 10 – Protótipo com material refratado inserido.....	34
Figura 11 – Forno utilizado durante o processo de Secagem com Aquecimento.....	35
Figura 12 – Bancada de testes preparada.....	36
Figura 13 – Fio da resistência elétrica utilizada no experimento	36
Figura 14 – Preparação do protótipo antes do experimento	37
Figura 15 – Varivolt utilizado no teste	37
Figura 16 – Multímetro lendo voltagem dos terminais do Varivolt.....	38
Figura 17 – Representação do volume de controle.....	39
Figura 18 – Resistência térmica em paredes compostas.....	41
Figura 19 – Vista superior do protótipo.....	42
Figura 20 – Representação esquemática de POP.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Condutividade térmica em W/mK em função da temperatura.....	44
Gráfico 2: Condutividade térmica em kcal/hm°C em função da temperatura.....	44
Gráfico 3: Condutividade térmica dos concretos refratários IBAR.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre a voltagem e temperaturas lidas nos termopares.	43
Tabela 2: Relação entre a voltagem e as energias geradas e de saída do volume de controle.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LACER	Laboratório de Combustão em Energias Renováveis
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
UFC	Universidade Federal do Ceará
POP	Procedimento Operacional Padrão
NR	Norma Regulamentadora
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
CMP	Combustão em Meios Porosos

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
HR	Dureza Rockwell
HB	Dureza Brinell
HK	Dureza Knoop
HV	Dureza Vickers
Ω	Ohms
K	Kelvin
cal	Calorias
$E_{\text{acumulado}}$	Energia acumulada no volume de controle em regime transiente
E_{gerado}	Energia gerada dentro do volume de controle
E_{entra}	Energia que entra no volume de controle
E_{sai}	Energia que sai do volume de controle
E_{radial}	Energia que sai do volume de controle na direção radial
$E_{\text{perpendicular}}$	Energia que sai do volume de controle na direção perpendicular à radial
U	Diferença de potencial elétrico
L_{1020}	Espessura da parede de aço 1020
$L_{\text{fibracerâmica}}$	Espessura da parede de fibracerâmica
A	Área
R	Resistência elétrica
c	Calor específico
k_{1020}	Condutividade Térmica do aço 1020
$k_{\text{fibracerâmica}}$	Condutividade Térmica da fibra cerâmica
R_T	Resistência térmica total
r1	Raio interno da camada de material refratário
r2	Raio externo da camada de material refratário
q	Taxa de transferência de calor
ΔT_{radial}	Diferença de temperatura na direção radial
$\Delta T_{\text{perpendicular}}$	Diferença de temperatura na direção perpendicular à radial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Caldeiras	20
3.1.1	<i>Tipos de Caldeiras</i>	20
3.1.1.1	<i>Caldeiras Flamotubulares</i>	20
3.1.1.2	<i>Caldeiras Aquatubulares</i>	21
3.1.2	<i>Caldeiras Superadiabáticas</i>	22
3.1.3	<i>Caldeiras de Leito Fluidizado</i>	23
3.2	Materiais Refratários	23
3.3	Normas de Aplicação	26
3.3.1	<i>Norma ABNT NBR 8826: Materiais Refratários – Terminologia</i>	26
3.3.1.1	<i>Objetivo</i>	26
3.3.1.2	<i>Definições</i>	27
3.3.2	<i>Norma Petrobras – N 1617: Aplicação de Concreto Refratário</i>	28
3.3.2.1	<i>Objetivos</i>	28
3.3.2.2	<i>Definições</i>	28
3.3.2.3	<i>Condições gerais</i>	28
3.3.2.4	<i>Métodos de Refratamento</i>	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	Aparato Experimental	31
4.1.1	<i>Desenvolvimento do Protótipo</i>	31
4.1.2	<i>Procedimento do experimento</i>	33
4.1.2.1	<i>Preparação do Material</i>	33
4.1.2.2	<i>Experimento de condutividade térmica</i>	35
4.2	Análise Teórica	38
4.2.1	<i>Balanco de Energia</i>	38
4.2.2	<i>Critério de Identificação de Propriedades</i>	40
4.2.2.1	<i>Condutividade Térmica</i>	40
5	RESULTADOS	43

5.1	Experimento de avaliação de condutividade térmica	43
5.2	Elaboração do POP para aplicação do concreto	45
6	CONCLUSÃO	47
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	48
	APÊNDICE A – POP DE APLICAÇÃO DE CONCRETO REFRACTÁRIO EM CALDEIRAS.....	51
	APÊNDICE B – CÁLCULOS NO EXCEL.....	54
	APÊNDICE C – DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO.....	55

1 INTRODUÇÃO

Em princípio, as caldeiras são equipamentos que visam a produção de vapor sob pressões acima da pressão atmosférica através da queima de um combustível e um elemento comburente. O calor gerado na caldeira, através da combustão, é convertido em trabalho posteriormente, através de uma turbina a vapor, segundo um ciclo termodinâmico Rankine. Entretanto, essa produção de calor, que é significativamente alta, gera temperaturas na câmara de combustão que supera a resistência térmica dos materiais da estrutura da caldeira, a ponto de pôr em risco toda a instalação térmica, razão pela qual torna-se fundamental o revestimento com material refratário para isolar a câmara de combustão.

Quando em temperaturas muito elevadas, o risco de utilizar um isolamento térmico de má qualidade numa caldeira (ou forno) é o fato da estrutura do equipamento poder ser afetada termicamente, reduzindo suas propriedades mecânicas, possibilitando a ocorrência de situações drásticas na instalação térmica. Há vários efeitos negativos desse estresse térmico nos materiais, como por exemplo, o surgimento de trincas ou o escoamento da água, que não foi absorvida adequadamente pelo concreto, para o interior da caldeira.

O material refratário se torna uma excelente opção de revestimento para esse tipo de equipamento, devido a suas propriedades termomecânicas. Entre elas, a principal: a capacidade de suportar, sem se deformar ou fundir, sob temperaturas elevadas (>1500 °C) em condições específicas de uso. Além dessa estabilidade térmica, o material refratário apresenta outras vantagens, como a resistência ao calor, à abrasão, à erosão, ao ataque químico por sólidos, líquidos ou gases, e às variações bruscas de temperatura (HAYASE, 1998). Logo, essas características físico-químicas tornam a aplicação do revestimento com material refratário em fornos e caldeiras bastante interessante, tornando um dos materiais mais utilizados para esse fim.

Todavia, sua aplicação também resulta em alguns problemas e desafios. As interrupções rotineiras (campanhas) realizadas em grandes instalações térmicas de vapor, onde a caldeira é o equipamento de maior custo e preocupação, podem representar avarias irreversíveis na instalação como um todo, com custos que podem inviabilizar a sua reparação. A principal questão em jogo é exatamente o tipo de material refratário que reveste a caldeira, o qual não suporta processos de dilatação e contração térmica sucessivos, deixando-o sujeito ao aparecimento de trincas e deterioração do material refratário.

Este assunto carece de estudos acadêmicos mais aprofundados, sendo que muito se tem focado na eficiência das caldeiras e fornos, e em diferentes formas de utilização de combustíveis renováveis, a fim de uma produção de vapor sustentável, porém pouco se investiga sobre o revestimento que essa caldeira irá apresentar. Levando em conta que este elemento, se mal explorado no equipamento térmico, pode arruinar o projeto inteiro, desperdiçando recurso e tempo. Além disso, pouco se sabe, também, sobre quais biomassas podem afetar o refratário.

Por essa razão justifica-se um estudo sobre as propriedades térmicas de um material refratário a ser aplicado no desenvolvimento de uma caldeira de leito fluidizado, a qual está sendo construída no LACER (Laboratório de Combustão em Energias Renováveis), direcionada ao projeto de Geração de Energia na Estação de Tratamento de Esgoto da CAGECE (Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará) do município de Quixadá, Ceará, conhecida como ETE Herval. Essa caldeira deverá operar a partir do aproveitamento do lodo seco dos reatores de digestão anaeróbia instalados nessa ETE, tratando as águas residuais para degradação da matéria orgânica e produção de biogás.

Desejando-se entender melhor as propriedades térmicas do material refratário operando em temperaturas elevadas, foram realizados experimentos visando simular a geometria, temperatura de operação, dilatação e contração, que o material enfrentará ao ser instalado na caldeira e, também, por meios de equipamentos e instrumentos, validar o revestimento da caldeira real.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar as propriedades térmicas e mecânicas do material refratário a ser utilizado na caldeira de leito fluidizado em desenvolvimento no laboratório LACER da UFC, analisando seus parâmetros mais importantes experimentalmente quanto ao desempenho, sob condições reais de operação.

Quanto aos objetivos específicos, associados ao objetivo principal, ressaltam-se:

- Elaboração de um Procedimento Operacional Padrão (POP), referente a preparação e aplicação do material refratário para seu uso no forno ou caldeira;
- Concepção de um protótipo semelhante à caldeira, porém em escalas menores, que possibilite os testes que simulem a operação da mesma;
- Avaliação da condutividade térmica em função da temperatura no interior do protótipo;
- Análise dos equipamentos e materiais utilizados na preparação do refratário.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Caldeiras

Caldeira é, basicamente, um trocador de calor que produz vapor de água sob pressões superiores a atmosférica a partir da energia térmica obtida da queima de um combustível e de um elemento comburente (ar), estando constituído por diversos equipamentos integrados e perfeitamente associados para possibilitar o alcance do maior rendimento térmico possível (NR 13, 1994).

Para a produção de vapor, a água recebe calor através da superfície de aquecimento da tubulação na qual escoa dentro da fornalha; com o aumento da temperatura até atingir a temperatura de ebulição, ocorre a mudança de estado transformando-se em vapor sob determinada pressão, geralmente superior à atmosférica. O poder calorífico do combustível é transformado em energia potencial no vapor, que por sua vez é convertida em energia mecânica por meio de turbinas a vapor, geralmente acoplada a um gerador de energia elétrica (SHAPIRO, 2009).

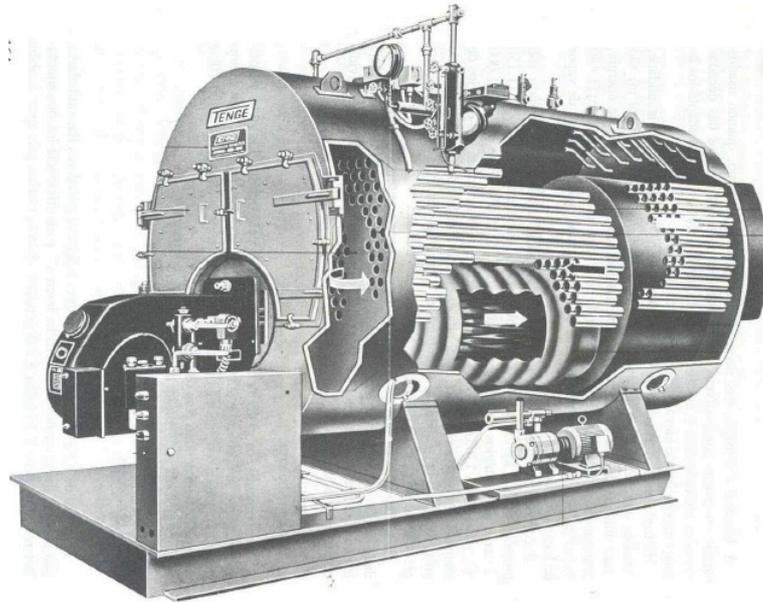
3.1.1 Tipos de Caldeiras

Em geral, não é simples apresentar uma classificação precisa quanto aos tipos de caldeiras, devido a enorme variedade existente. Usualmente, utiliza a classificação simplificada das caldeiras convencionais em *flamotubulares* e *aquatubulares*.

3.1.1.1 Caldeiras Flamotubulares

Nas caldeiras flamotubulares, os gases quentes passam no interior dos tubos, ao redor dos quais está a água a ser aquecida e convertida em vapor. As caldeiras flamotubulares são empregadas apenas para pequenas capacidades e quando se deseja apenas vapor saturado de baixa pressão. (BAZZO, 1995)

Figura 1 – Caldeira do tipo Flamotubular

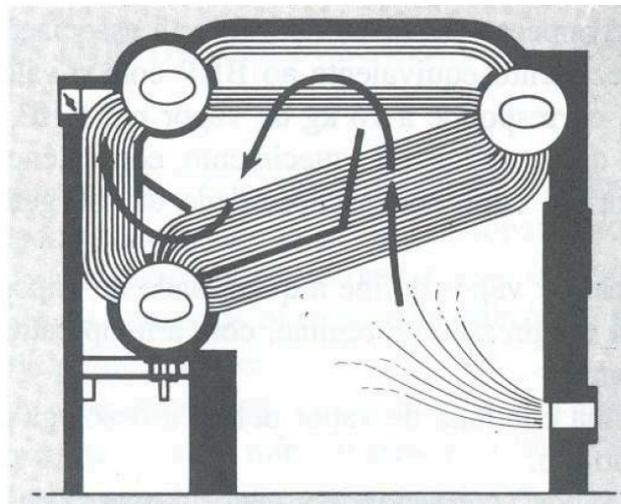


Fonte: Fabricante Tenge Industrial LTDA (2008)

3.1.1.2 Caldeiras Aquatubulares

Tipo mais comum nas indústrias, em geral, as caldeiras aquatubulares, como o próprio nome indica, possui circulação de água pelo interior dos tubos e os gases quentes os envolve. O emprego desse tipo de caldeira é necessário quando almeja-se obter grandes valores de pressão e de capacidade volumétrica. (BAZZO, 1995)

Figura 2 – Representação Esquemática de uma caldeira aquatubular



Fonte: Torreira (1995)

3.1.2 Caldeiras Superadiabáticas

As caldeiras com queimador poroso, também conhecidas como *superadiabáticas*, são caldeiras não convencionais que buscam, além de utilizar combustíveis fósseis (gás natural, gasolina, GLP, querosene, etc. ou a partir de fontes renováveis) para obter energia, produz menores índices de emissões, operando fora dos limites de inflamabilidade dos combustíveis, o que é impossível para as caldeiras convencionais. Devido ao fato de estender os limites de inflamabilidade, torna-se possível a utilização de combustíveis de baixo poder calorífico, como o gás de síntese e o biogás, sendo que esse último normalmente é obtido da conversão de biomassa, por exemplo: casca de coco verde, casca de castanha de caju, entre outros; através da digestão anaeróbia. Nesse sentido, o LACER vem desenvolvendo, nos últimos anos, a tecnologia conhecida como “Combustão em Meios Porosos” (CMP). Tal tecnologia consiste do processo de combustão ocorrendo nos interstícios de uma matriz porosa (inerte ou catalítica), a qual preenche a câmara de combustão total ou parcialmente, o que altera significativamente os fenômenos de seu processo. (SOUZA, 2009).

Segundo Kennedy, Fridman e Saveliev (1995), a CMP é um processo de recuperação de calor internamente auto-organizado, em que a combustão de uma mistura ar-combustível em um meio poroso difere significativamente da chama homogênea. Essa diferença beneficia a transferência de calor entre os gases e a matriz sólida, e pode ser atribuída à difusão efetiva da mistura de gases e à superfície interna altamente desenvolvida do meio poroso.

De acordo com Hanamura e Echigo (1993), os gases de combustão fazem uma intensa troca de calor por convecção ao passar pelo meio poroso. Uma grande quantidade de energia é absorvida por condução e radiação e recircula para a mistura nova que chega a zona de reação, o que ajuda na recuperação do calor que seria liberado na exaustão e na estabilidade da chama.

O termo “Combustão Superadiabática” se deve pela teoria da frente de chama com excesso de entalpia (BARCELLOS *et al.*, 2007). De acordo com Hanamura, Echigo e Zhdanok (1993), a ideia de frente de chama com excesso de entalpia foi proposta para explicar o fato de que a temperatura de combustão em um sistema pode ser maior do que a adiabática teórica se os produtos queimados pré-aquecerem os reagentes. Por consequência, as temperaturas de combustão podem ser significativamente diferentes das previsões adiabáticas e são controladas principalmente pela química da reação e pelo mecanismo de transferência de calor (BARCELLOS *et al.*, 2007).

3.1.3 Caldeiras de Leito Fluidizado

O processo de fluidização acontece por meio de um fluxo de um fluido ascendente que escoar por um leito de partículas sólidas que são sustentadas por uma placa distribuidora (FEITOSA, 2015). De acordo com Oka (2004), quando a força de arraste do fluido é suficiente para sustentar o peso das partículas do leito, estas começam a ser fluidizadas, a partir desse ponto o sistema passa a apresentar algumas características semelhantes a de um fluido.

A tecnologia do leito fluidizado tem várias aplicações como: secagem, mistura, revestimento de partículas, aglomeração de pós, aquecimento, resfriamento. No que se refere a combustão de caldeiras, as aplicações mais notáveis dessa tecnologia são: a gaseificação/combustão de carvão e biomassa, geração de vapor, produção de água quente e além de produção de energia elétrica (FEITOSA, 2015).

De acordo com Oka (2004), caldeiras com essa tecnologia são de longe superiores a caldeiras convencionais de combustão de carvão em termos de emissões de poluentes e das novas tecnologias de combustão é a que maior oferece flexibilidade quanto à utilização de diferentes combustíveis.

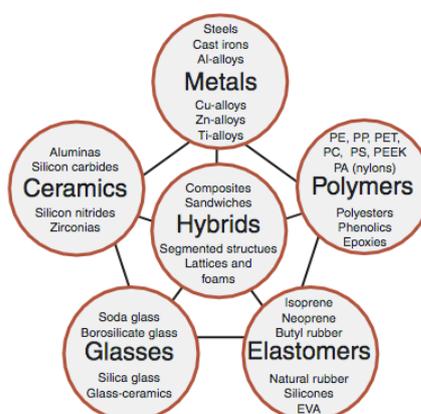
Atualmente, o LACER está desenvolvendo uma caldeira de leito fluidizado que utilizará como leito partículas de sílicas (areia contaminada de águas residuais) e o lodo de esgoto como combustível. Com este projeto deseja-se eliminar o lodo que antes iria pra aterros e ao mesmo tempo gerar energia na forma de calor. Também almeja-se com esse trabalho, purificar a areia contaminada que servirá como leito através do calor e depois comercializa-la para a construção civil.

3.2 Materiais Refratários

É útil classificar os materiais de engenharia em seis grandes famílias, mostradas na Figura 3, quais sejam: metais, polímeros, elastômeros, cerâmicas, vidros e híbridos. Os membros de uma família têm certos recursos em comum: propriedades semelhantes, rotas de processamento semelhantes, e, muitas vezes, aplicações semelhantes. (ASHBY, 2005)

Os materiais refratários estão englobados na família dos materiais cerâmicos. A característica comum a estes materiais é serem constituídos de elementos metálicos e elementos não metálicos, aglutinados entre si por ligações de caráter misto, iônico-covalente. Os materiais cerâmicos apresentam alto ponto de fusão. São geralmente isolantes elétricos, embora possam existir materiais cerâmicos semicondutores, condutores e até mesmo supercondutores (estes dois últimos, em faixas específicas de temperatura). São comumente estáveis sob condições ambientais severas e são geralmente duros e frágeis (ASHBY, 2005).

Figura 3 – Classificação dos Materiais



Fonte: Ashby, 2005.

Assim, materiais refratários pode ser entendidos como todos aqueles naturais ou manufaturados, não metálicos, capazes de resistir a ambientes hostis sob solicitações diversas, tais como: altas temperaturas, altas cargas mecânicas, oscilações de temperaturas, abrasão, erosão, corrosão, impacto e outros. Trata-se de materiais multicomponentes, polifásicos, policristalinos, estáveis volumetricamente (DUARTE, 2012).

A escolha do refratário ideal para cada aplicação depende do mecanismo físico-químico que é predominante no processo (IBAR, 2012). As propriedades e especificações técnicas requeridas ao refratário decorrem basicamente da posição de sua aplicação ao longo do equipamento, do tipo de interação com as matérias-primas e escória, e dos produtos das reações de transformações (DUARTE, 2012). O desempenho dos produtos refratários dependerá do resultado das suas propriedades nas condições de sua utilização (MATOS, 2001).

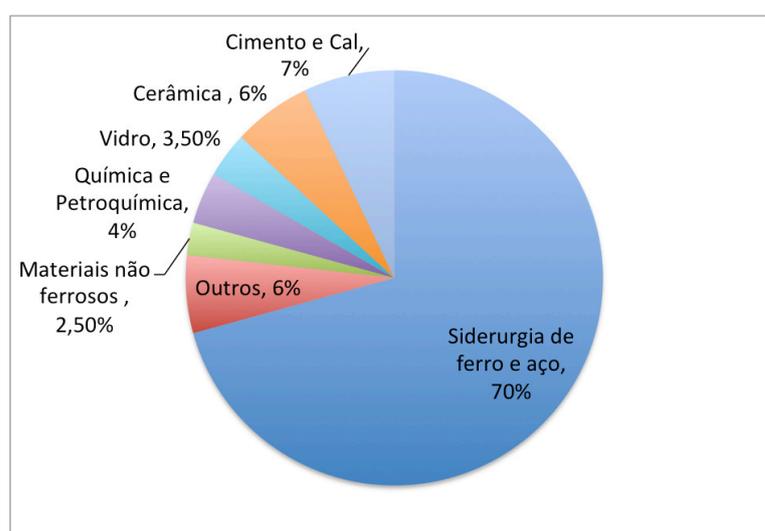
Além disso, os refratários englobam uma vasta gama de compostos, usualmente óxidos ou misturas de óxidos (CAMPOS, 2011). Apresentam propriedades físico-químicas,

termodinâmicas e estruturais superiores em elevadas temperaturas, tais como: elevado ponto de fusão/refratariedade, resistência à corrosão química em meios agressivos, resistência mecânica, resistência às variações ambientais, estabilidade estrutural etc. (LENZ E SILVA 2005).

De um modo geral, as principais funções que um material refratário pode assumir dependem das condições de operação em que está envolvido. Podem ser utilizados para isolar, manter ou transmitir calor (revestimentos isolantes térmicos, trocadores de calor, abóbodas de fornos, parede e teto de fornos elétricos), para suportar cargas (sólida ou líquida, estática ou dinâmica) a elevadas temperaturas, ou ainda para conter, conduzir ou tratar de fluidos (cadinhos de alto-fornos, canais de corrida, painéis de desgaseificação) em elevadas temperaturas.

Os refratários são fabricados a partir de um variado elenco de matérias-primas, em centenas de formatos e composições químicas, viabilizando desta forma os processos de manufatura que utilizam altas temperaturas como os que praticamente envolvem a produção de todos os tipos de metais, aços, vidros, químicos, petroquímicos, cerâmicos, entre outros (CAMPOS, 2011). As Figuras 4 e 5 mostram respectivamente, o mercado brasileiro das indústrias consumidoras de produtos refratários e seu consumo aparente anual.

Figura 4 – Distribuição da aplicação de materiais refratários no mercado brasileiro

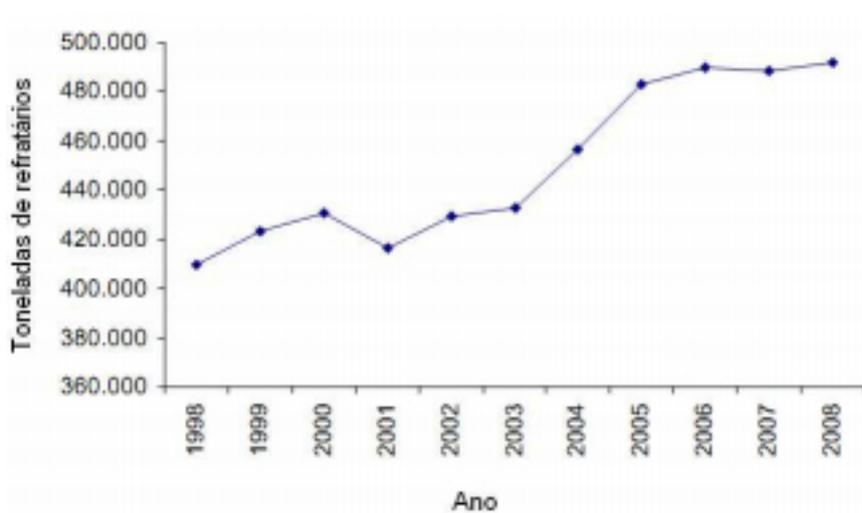


Fonte: Miller, 2000.

O mercado de refratários ainda é decisivamente influenciado pela indústria de ferro e aço, sendo seu maior consumidor, responsável por mais de 70 % do consumo total de refratários (MILLER, 2000). A indústria de cimento e cal representa 7 %, sendo seguida pela

indústria cerâmica, que representa 6 % do consumo de refratários. A indústria de vidro consome 3 % a 4 %, e a indústria química e de petróleo consomem juntas 4 %. A indústria de não ferrosos consome 2 % a 3 % da produção de refratários, enquanto o restante é compartilhado entre desgaseificação de carbono, usinas termelétricas, reciclagem de resíduos térmicos, fornos elétricos e pela indústria de refratários para seus próprios fins (MILLER, 2000).

Figura 5 – Consumo anual de material refratário entre 1998 e 2008



Fonte: Lobato, 2009.

Ao longo da história tem havido uma melhoria contínua dos refratários e inovações que, em combinação com os estudos focados e ações pelas indústrias usuárias, empreiteiros, projetistas, engenheiros e outros, têm resultado em maior durabilidade e vida útil, com grandes benefícios para os usuários, tais como redução de custos, maior tempo de produção (menor tempo de parada dos equipamentos), maior flexibilidade operacional, menor tempo para manutenções/repares, e muito mais (SEMLER, 2005).

3.3 Normas de Aplicação

Para a realização deste projeto foram requeridas algumas normas nacionais e internacionais que serviram de base para o estudo em questão. Os pontos mais importantes das mesmas são relatados a seguir.

3.3.1 Norma ABNT NBR 8826: Materiais Refratários – Terminologia

3.3.1.1 Objetivo

Esta norma 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, elementos construtivos, técnicas e equipamentos para sua aplicação, visando o estabelecimento de uma linguagem uniforme que propicie a compreensão, inclusive, de outras normas relacionadas a materiais refratários.

3.3.1.2 Definições

Para os efeitos deste documentos aplicam-se seguintes termos e definições:

- Concreto Refratário: Mistura de um ou mais agregados refratários, de granulometrias adequadas, com um ligante de pega hidráulica ou química.
- Concreto Isolante: Mistura de cimento refratário com agregados de baixa densidade, obtendo-se uma massa específica aparente final, igual ou inferior a $1\,300\text{ kg/m}^3$, após a secagem a 110 °C .
- Concreto Semi-Isolante: Mistura de cimento refratário com agregados de baixa e média densidade, obtendo-se uma massa específica aparente final, superior a $1\,300\text{ kg/m}^3$ e igual ou inferior a $1\,700\text{ kg/m}^3$, após a secagem a 110 °C .
- Cura: Reações químicas que ocorrem à baixa temperatura, após a adição de água no concreto. O tempo de cura é o intervalo entre o início e o término de tais reações.
- Cura Hidráulica: Tratamento dado ao concreto, após sua aplicação, a fim de garantir a permanência da água visando dar continuidade às reações que se verificam durante a cura.
- Lance: Área que se consegue refratar, antes do material aplicado no início do refratamento tenha alcançado o início da pega.
- Início da pega: Caracteriza-se pela perda da consistência necessária para aplicação do material, após a adição de água à mistura.
- Trabalhabilidade: Propriedade pela qual os materiais refratários, quando umedecidos podem ser moldados e trabalhados com maior facilidade, dependendo de sua consistência e plasticidade.

3.3.2 Norma Petrobras – N 1617: Aplicação de Concreto Refratário

3.3.2.1 Objetivos

Esta norma fixa as condições exigíveis no armazenamento e na aplicação de concreto refratário e se aplica a projetos iniciados a partir da data de sua edição e também em equipamentos já existentes, quando de sua manutenção ou reforma.

3.3.2.2 Definições

Para os propósitos desta Norma são adotados as definições da norma ABNT 8826, citada acima.

3.3.2.3 Condições gerais

- **Armazenamento:**

O concreto deve ser armazenado em local bem ventilado, seco, não sujeito a calor excessivo e protegido de raios diretos do sol. Deve ser obedecido a uma disposição tal, que permita o controle de prazos de validade do material e a prioridade de consumo para os materiais mais antigos no almoxarifado. A movimentação deve ser feita de forma a evitar danos.

- **Homogeneização e Mistura:**

O concreto deve ser perfeitamente homogeneizado a seco antes da adição de água de acordo com as instruções fornecidas pelo fabricante de concreto. O percentual de água de adição também deve ser fornecido pelo fabricante. Deve ser homogeneizado o conteúdo total de cada embalagem, mesmo para quantidades utilizadas inferiores à unidade embalada. Não deve ser adicionado nenhum material ao concreto conforme recebido do fabricante e não deve ser misturado com o concreto de outros fabricantes.

A água usada na mistura e no umedecimento deve ser potável, isenta de sulfatos, com teor de cloretos inferior a 50 ppm e com temperatura de, no máximo, 24 °C. A temperatura da mistura deve ser mantida entre 19 °C e 24 °C, durante a aplicação, podendo-se

variar a temperatura da água ou do concreto para se atingir a esta faixa. O concreto está bem misturado quando: não se notar segregação entre os grãos; não se notar regiões diferentemente umedecidas; e atingir a consistência adequada.

- Secagem ao Ar

Concluída a cura, o revestimento deve ser secado ao ar na temperatura ambiente, por um período mínimo de 24 horas por meio de ventilação natural ou forçada.

- Secagem com Aquecimento

A secagem com aquecimento deve ser feita levando-se em consideração o tipo, a classe, a espessura, o volume e o método de aplicação do concreto, bem como a forma geométrica do equipamento, respeitando-se ainda as recomendações do fabricante do concreto.

Na ausência das recomendações do fabricante do concreto, a secagem com aquecimento deve atender ao seguinte ciclo térmico:

- a) taxa de aquecimento máxima de 30 °C por hora até 120 °C;
- b) permanência mínima de 8 horas na temperatura de 120 °C para espessuras de até 50 mm, devendo-se acrescentar 2 horas para cada acréscimo de 25 mm na espessura;
- c) taxa de aquecimento máxima de 50 °C por hora até 600 °C;
- d) permanência mínima de 6 horas na temperatura de 600 °C;

Caso ocorra interrupção no ciclo térmico, admite-se o retorno à temperatura de interrupção a uma taxa de aquecimento máxima de 50 °C por hora. E caso o equipamento vá entrar em operação imediatamente após a secagem, elevar a temperatura a uma taxa de aquecimento de 50 °C por hora, até a temperatura de operação. Caso o contrário, resfriar o equipamento a uma taxa de 50 °C por hora. Nos equipamentos em que a temperatura de operação for abaixo de 600 °C, o segundo patamar deve ser feito na temperatura de operação, com duração de 6 horas.

3.3.2.4 Métodos de Refratamento

- Forma e Desmoldagem

As formas devem ser de chapas de aço ou de madeira impermeabilizada e com vedação nas emendas, de modo a não perder a água necessária para as reações de hidratação do cimento. Devem ser previstos anéis enrijecedores internos e externos e nervuras na aplicação por vibração externa.

Para a impermeabilização de formas e facilitar a desmoldagem pode ser usado um agente desmoldante na superfície que fica em contato com o concreto, devendo o agente ser compatível com o concreto. Se a superfície do concreto, após a remoção das formas, mostrar-se demasiadamente lisa devido à nata do cimento formada junto

- Compactação

A compactação deve ser feita em camadas sucessivas de modo que o concreto se acomode totalmente, sem deixar vazios, principalmente em locais com cantos vivos. O derramamento e a compactação do concreto devem ser feitos continuamente, não devendo ocorrer interrupção na aplicação. Deve-se prover facilidades para a limpeza interna da forma antes da aplicação.

4 METODOLOGIA

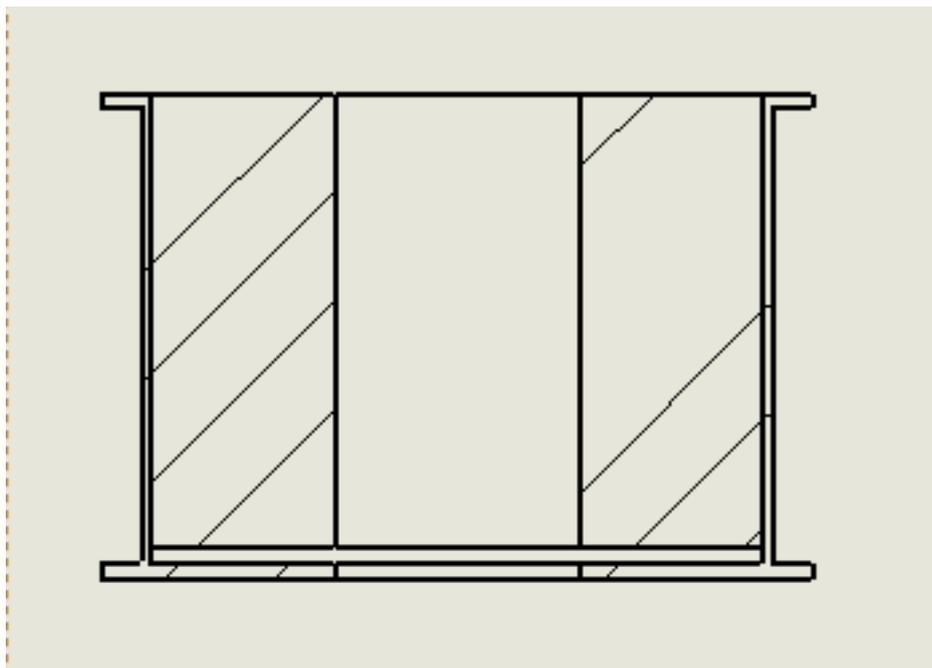
4.1 Aparato Experimental

Ao longo do projeto diversos aparelhos, dispositivos e protótipos foram utilizados, seja na preparação do material ou na prática experimental, com intuito de desenvolver a melhor forma para a realização do trabalho.

4.1.1 Desenvolvimento do Protótipo

Para a realização dos testes requeridos para este trabalho foi necessário a elaboração de um projeto do protótipo em que o material refratário seria derramado. Este protótipo para suprir os objetivos do trabalho deveria possuir semelhanças com a geometria de uma caldeira, porém com dimensões menores, desejando-se utilizar os fornos muflas disponíveis nos laboratórios das proximidades, desejando uma logística apropriada.

Figura 6 – Vista lateral com corte do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

O protótipo constitui-se de uma chapa cilíndrica de aço 1020 com dois flanges soldados: um superior e um inferior, pode se observar na figura 7 uma vista lateral com cortes do protótipo. A parte inferior do protótipo possui um espaço circular vazio em seu centro, projetado justamente para o encaixe do molde que limita as dimensões do material refratário. Enquanto que a parte superior do protótipo é todo aberto, permitindo o derramamento do material em estudo como pode se visualizar na Figura 8.

Além disso, no protótipo é possível observar duas entradas rosqueadas internamente com 1/8 de polegadas NPT, localizadas diametralmente opostas na metade da altura do corpo, onde os termopares serão inseridos. No caso, necessita-se de dois termopares, pois o primeiro mede a temperatura do raio interno da superfície do material refratário enquanto que o segundo mede a temperatura do raio externo, possibilitando o cálculo da condução térmica do material. O fato da entrada ser rosqueada se deve ao fato da utilização de um conector macho para anilha, visando posicionar o termopar de uma maneira que ele fique fixo no ponto que se deseja realizar a medição de temperatura.

Figura 7 – Protótipo de testes fabricado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos flanges, tanto superior quanto inferior, possui furos para o acoplamento de parafusos, que são responsáveis pela união com as tampas que possuem os mesmos furos. Na tampa superior, além dos furos para encaixe com o flange do corpo, há três furos rosqueados

no centro de sua chapa, como pode ser avistado na Figura 9. Desses três furos, dois são justificados pela entrada e saída do fio da resistência elétrica que é responsável pelo aquecimento a temperatura semelhante a que a caldeira operar. E outro furo foi projetado para a inserção de um outro termopar que mede a temperatura na qual a resistência está operando, pois deseja-se coletar dados com temperaturas diferentes para analisar o comportamento do material com a variação de temperatura. E na tampa inferior só há furos para o acoplamento de parafusos.

Figura 8 – Tampas dos protótipo fabricadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Internamente, para a realização dos testes o protótipo será preenchido com esferas cerâmicas de alumina, visando uma retenção maior do calor, pois suas dimensões são pequenas o que ocasiona numa maior perda de calor para o ambiente. Além das esferas de alumina. Para o controle dessa temperatura, utiliza-se o termopar pelo terceiro furo na tampa superior mencionado acima.

4.1.2 Procedimento do experimento

4.1.2.1 Preparação do Material

A fabricação do protótipo teve lugar fora dos domínios da Universidade Federal do Ceará (UFC), e infelizmente, apresentou alterações quanto ao projeto desenhado. As dimensões dos flanges excediam levemente os comprimentos internos do forno mufla dos

laboratórios vizinhos. O que impossibilitou a utilização desses fornos e gerou mais um desafio ao projeto.

Após a retirada do protótipo da fabricação, foi necessário a elaboração do moldes para serem usados durante o derramamento do material. Para o molde no corpo, foi utilizado um tubo oco de aço 1020 de 2 polegadas de diâmetro externo. Foi realizado um passe no tubo para que o mesmo seja fixado no furo da parte inferior do protótipo. Para o molde dos furos onde os termopares foram inseridos foram usinados dois pequenos tarugos de madeira que preencheram o lateralmente o corpo até o molde do corpo.

Foi utilizado um agente desmoldante nos moldes para facilitar a desmontagem dos mesmos, após isso o protótipo estava pronto para receber o material. O material utilizado no trabalho foi o Castibar N da marca IBAR. O material foi, antes do derramamento, misturado e homogeneizado com a utilização de água. O fornecedor do material recomendou a mistura com 13% de volume de água, o que foi seguido corretamente.

Após verificado que a homogeneização ocorreu, seguindo os padrões da norma de aplicação N-1617, o material foi derramado manualmente no protótipo, utilizando o auxílio de uma pá. A compactação do material também foi realizada de forma manualmente, vibrando o corpo a medida que o material preenchia os vazios.

A secagem ao ar do material ocorreu a temperatura ambiente em uma sala que atendia as exigências normativas de ser um local seco e protegido da incidência de raios solares. Esse processo durou 48 horas, como o fornecedor do material recomendou, e ao final desse intervalo os moldes foram retirados.

Figura 9 – Protótipo com material refratado inserido



Fonte: Elaborado pelo autor.

A secagem com aquecimento ocorreu com um forno câmara industrial da marca Jung. Seu modelo era do tipo TB30012, com capacidade volumétrica de 300 litros, dimensões 500mm x 600mm x 1000mm, 800 kg de peso, potência de 30 kW, 380 volts e trifásico. Não foi possível seguir a risca os procedimento recomendado na norma Petrobras N-1617, pois o forno não possuía capacidade de resfriamento, e por possuir dimensões muito grandes seu resfriamento era muito devagar se mantido o ambiente interior fechado. O restante das práticas recomendadas na seção 3.3.2.3 foram seguidas corretamente. Após a retirada do forno o protótipo estava pronto para a realização do teste.

Figura 10 – Forno utilizado durante o processo de Secagem com Aquecimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.2 Experimento de condutividade térmica

Para a realização do experimento foi necessário a utilização de três termopares tipo K, um fio de resistência, miçangas cerâmicas, esferas de alumina, papel de fibra cerâmica, um varivolt, um termômetro digital e um multímetro digital.

O experimento e o armazenamento dos equipamentos para o procedimento aconteceu na bancada de testes localizada no LACER. Em cima dessa bancada foi colocado um suporte de concreto, material termicamente resistente o bastante para não sofrer com as altas temperaturas no teste, onde o protótipo foi colocado durante o experimento.

Figura 11 – Bancada de testes preparada



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fio de resistência utilizado no teste foi da marca Pelican Wire Company do tipo Alloy 875. A resistência elétrica desse fio é de $0,3437 \Omega/\text{pé}$ e foi retirado 115,28 cm de fio, o que convertendo resulta em 3,78 pés de fio, fornecendo $1,3 \Omega$ de resistência elétrica. Tal resultado foi conferido depois por meio do multímetro digital da marca Fluke. A fim de que o fio da resistência não entrasse em contato com outra parte do fio, já que o mesmo estaria em espiral dentro do protótipo, foram usadas miçangas cerâmicas que o revestiam.

Figura 12 – Fio da resistência elétrica utilizada no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente, o fio da resistência elétrica foi inserido dentro do protótipo, e em seguida 295 g de esferas de alumina preencheram o restante do espaço vazio corpo. Só então

o corpo foi tampado em sua parte superior. O protótipo foi revestido externamente com papel de fibra cerâmica da marca Kaowool, por medidas de precaução, levando em conta as altas temperaturas internas do experimento.

Figura 13 – Preparação do protótipo antes do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, os três termopares foram colocados em seus respectivos locais. Para fixá-los corretamente foram utilizados um conector macho para anilha 1/8 de polegada NPT. Para ligar a resistência elétrica foi utilizado um varivolt VM 230 da marca Sociedade Técnica Paulista LTDA. Tal equipamento possui um volante como pode ser visto na figura 15 que define a voltagem da corrente elétrica que alimenta a resistência. Como a medição do volante é analógica, visando apurar a precisão dos resultados foi utilizado um multímetro digital da marca Fluke para medir a diferença de potencial entre os dois terminais do varivolt que alimentavam a resistência.

Figura 14 – Varivolt utilizado no teste



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim foi possível observar o comportamento do material com diferentes voltagens, resultando em diferentes temperaturas, nas quais eram registradas graças a um termômetro digital que ligava era conectado no termopar em questão. Ao perceber que a temperatura do termopar que estava em contato com as esferas de alumina se estabilizava numa determinada voltagem, o que caracterizava o estado de regime permanente no volume de controle, era verificado as temperaturas medidas dos termopares laterais, a fim de que encontrar a diferença de temperatura no raio interno e externo do material de revestimento.

Figura 15 – Multímetro lendo voltagem dos terminais do Varivolt



Fonte: Elaborado pelo autor.

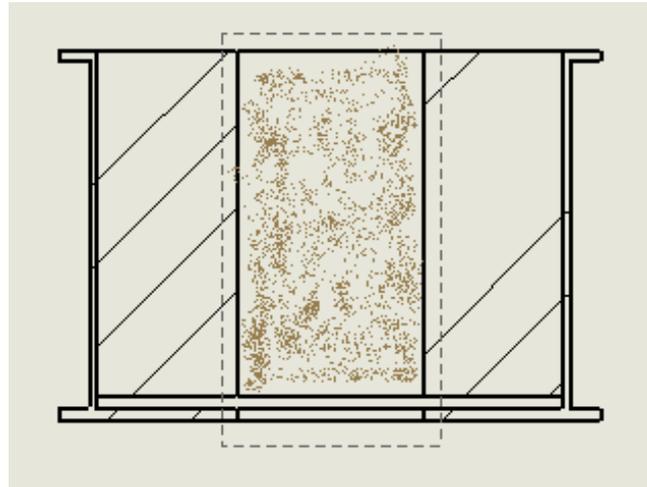
Ao coletar os resultados do experimento foi realizada uma análise dos dados a fim de caracterizar a propriedade térmica chamada condutividade térmica utilizando os conhecimentos de transferência de calor.

4.2 Análise Teórica

4.2.1 *Balanço de Energia*

Adotando como volume de controle o volume limitado pelas paredes do concreto refratário, durante o regime transiente, tem se o seguinte balanço de energia

Figura 16 – Representação do volume de controle



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$E_{\text{acumulado}} = E_{\text{gerado}} + E_{\text{entra}} - E_{\text{sai}} \quad (1)$$

Como a energia gerada dentro do protótipo provém de uma resistência elétrica utiliza-se a equação:

$$E_{\text{gerado}} = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

Sendo U a diferença de potencial elétrico utilizado em Volts, e R a resistência elétrica em ohms (Ω). A energia acumulada no sistema é a que as esferas de alumina absorvem durante o processo, sendo assim:

$$E_{\text{acumulado}} = \frac{mc\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

Sendo m a massa total das esferas de alumina, c seu calor sensível, ΔT a diferença de temperatura entre o interior do corpo e a parede interna do concreto refratário e Δt o

intervalo de tempo durante o processo de aquecimento. Como não há energia entrando no sistema, a energia que sai fica sendo:

$$E_{\text{sai}} = E_{\text{gerado}} - E_{\text{acumulado}} \quad (4)$$

Já no regime permanente, quando a temperatura interna do calor gerado pela resistência se estabiliza, não há acúmulo de energia, pois não há ganho da mesma. Logo:

$$E_{\text{sai}} = E_{\text{gerado}} \quad (5)$$

Porém, a transferência de calor ocorre em direções diferentes, no caso do experimento, ela pode ocorrer radialmente (E_{radial}), trocando calor com o material refratário, e também na direção perpendicular a radial ($E_{\text{perpendicular}}$). Admitindo que a energia que sai pela parte inferior é igual a que sai na parte superior, é fácil perceber que:

$$E_{\text{sai}} = E_{\text{radial}} + 2 * E_{\text{perpendicular}} \quad (6)$$

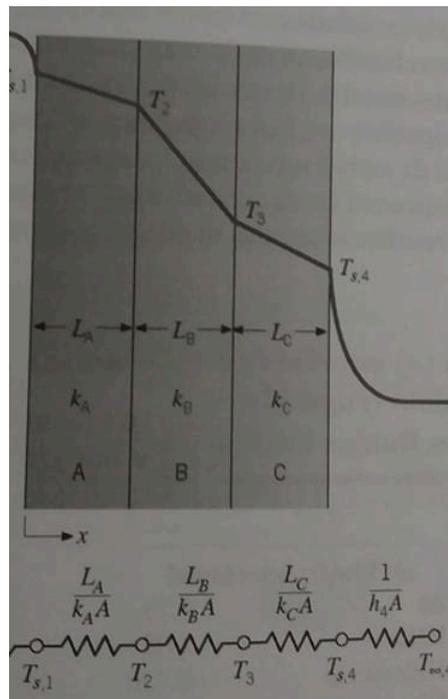
4.2.2 Critério de Identificação de Propriedades

4.2.2.1 Condutividade Térmica

A energia em forma de calor que sai do volume de controle é dividida em dois, pois as vizinhanças do volume são de diferentes geometrias e arranjos. No caso, a chamada $E_{\text{perpendicular}}$ sai do volume de controle e entra na chapa de aço 1020, saindo dela novamente por condução para a camada de fibra cerâmica que se encontra a cima da tampa superior. Após isso, a energia troca calor com o meio pela convecção com o ar. Essa energia pode ser calculado por meio da fórmula da resistência térmica em paredes compostas. Tal formula pode ser transcrita como:

$$R_T = \frac{L_{1020}}{K_{1020}A} + \frac{L_{\text{fibraceramica}}}{K_{\text{fibraceramica}}A} + \frac{1}{hA} \quad (7)$$

Figura 17 – Resistência térmica em paredes compostas



Fonte: Incropera, 2007.

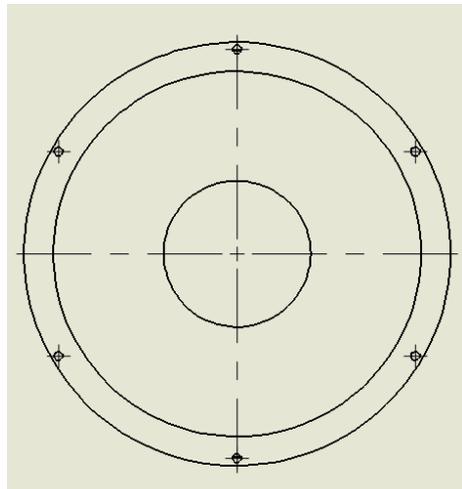
Sendo L o comprimento da camada de parede e K a condutividade térmica dos materiais em questão. O coeficiente convectivo corresponde pela letra “ h ” e A é a área normal a direção na qual a energia está. Considera-se que as propriedades dos materiais aço 1020 e fibra cerâmica e o coeficiente convectivo h do ar são constantes durante o processo. Por meio da resistência térmica é possível descobrir a taxa de transferência de calor “ q ” através da relação entre a diferença de temperatura entre o volume de controle e o final da parede composta, que é a temperatura ambiente do ar, e a resistência térmica total:

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (8)$$

Já a energia que sai da forma de calor na direção radial, chamada de E_{radial} , deve ser aplicada na fórmula da taxa de transferência de calor num sistema radial cilíndrico. Sua fórmula é descrita por:

$$q = \frac{2\pi L k \Delta T}{\ln(r_2/r_1)} \quad (9)$$

Figura 18 – Vista superior do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo ΔT a diferença de temperatura entre a parede interna e a externa do material refratário; r_2 e r_1 o raio externo e interno, respectivamente; k_{ref} a condutividade térmica do material; L a o comprimento da parede, o que no caso, seria a altura do cilindro.

Assim a energia que sai do volume de controle, no regime permanente, resulta em:

$$E_{\text{sai}} = E_{\text{g}} = \frac{U^2}{R} = \frac{2\Delta T_{\text{perpendicular}}}{R_{\text{T}}} + \frac{2\pi L k_{\text{ref}} \Delta T_{\text{radial}}}{\ln(r_2/r_1)} \quad (10)$$

Por meio desses cálculos é possível calcular a condutividade térmica do material refratário, que é um dos objetivos deste trabalho.

5 RESULTADOS

5.1 Experimento de avaliação de condutividade térmica

Durante a realização deste experimento foram medidas as temperaturas nos três termopares citados em 4.1.1 e 4.1.2.2 para as voltagens de 5 V, 7,5 V, 10 V, 12,5 V e 15 V. As temperaturas coletadas estão na Tabela 1:

Tabela 1: Relação entre a voltagem e temperaturas lidas nos termopares.

Voltagem	T_{esferas}	T_{interno}	T_{externo}
5 V	106 °C	96 °C	43 °C
7,5 V	210 °C	194 °C	81 °C
10 V	357 °C	339 °C	138 °C
12,5 V	479 °C	464 °C	197 °C
15 V	669 °C	653 °C	284 °C

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando em termos de energia, tem-se a tabela 2, a seguir:

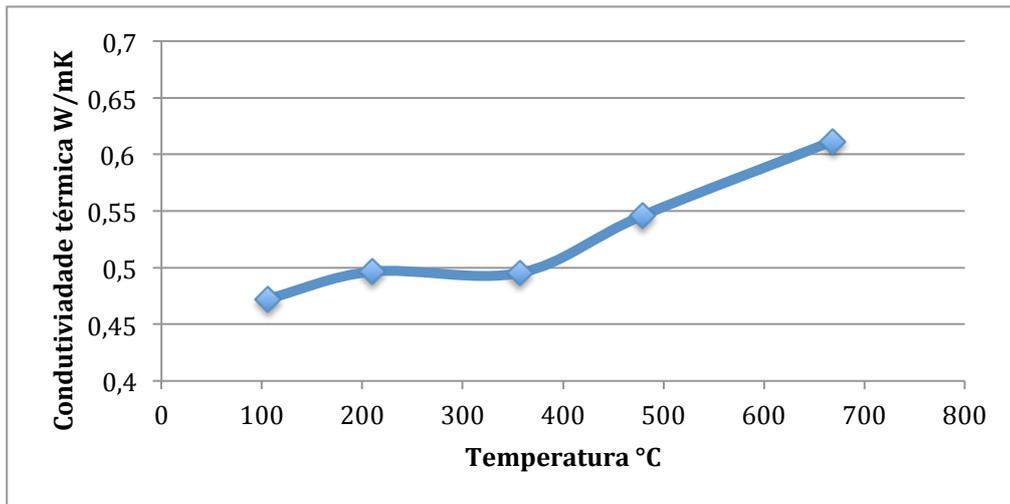
Tabela 2: Relação entre a voltagem e as energias geradas e de saída do volume de controle.

Voltagem	Potência	$E_{\text{perpendicular}}$	E_{radial}
5 V	19,23 W	0,97 W	18,26 W
7,5 V	43,27 W	2,36 W	40,91 W
10 V	76,92 W	4,32 W	72,60 W
12,5 V	120,19 W	5,95 W	114,25 W
15 V	173,08 W	8,48 W	164,60 W

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao relacionar a temperatura interna do protótipo com a condutividade térmica do material refratário, obtém-se o gráfico 1. Os resultados foram bastante coerentes com a realidade, visto que o material refratário de qualidade possui valores reduzidos de condutividade térmica.

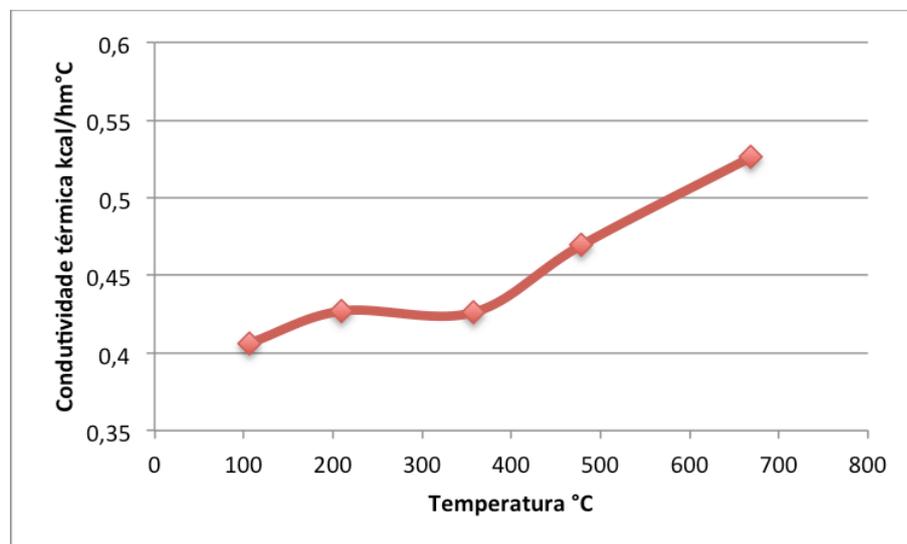
Gráfico 1: Condutividade térmica em W/mK em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No site da IBAR há também uma relação entre a temperatura e a condutividade térmica do material porém em outra unidade (kcal/h no lugar de W/mK), tendo isso em vista, obteve-se o gráfico 2 com as medidas iguais para assim, compara-lo com a especificação.

Gráfico 2: Condutividade térmica em kcal/hm°C em função da temperatura.

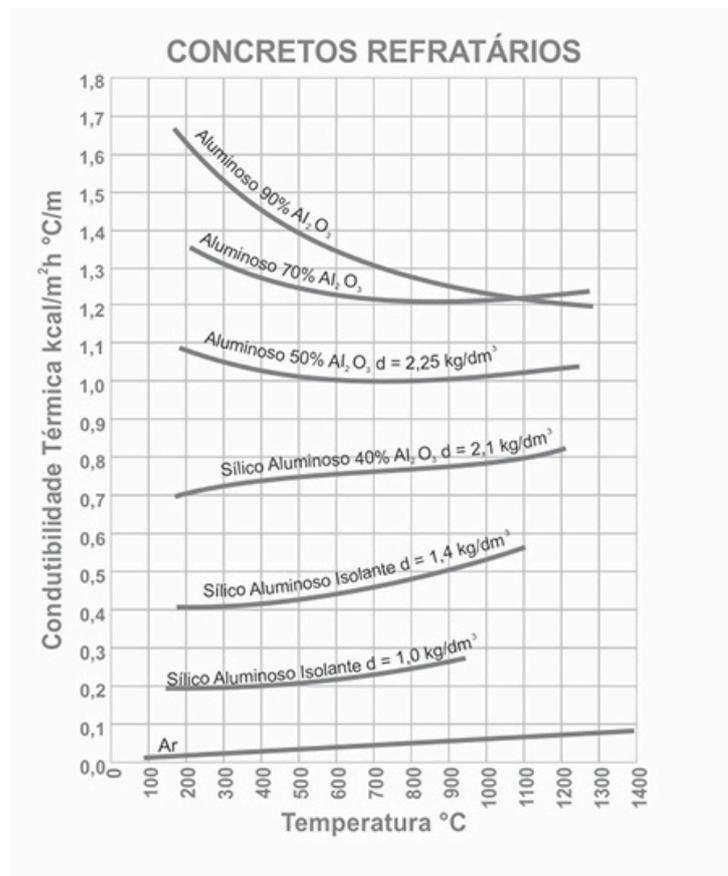


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico 3, sendo o material utilizado o Sílico Aluminoso Isolante com densidade de $1,4 \text{ kg/dm}^3$ o material utilizado neste trabalho, caracterizado pela a penúltima curva de cima para baixo, percebe-se que os valores são muito próximos, pois no gráfico 2 vemos que entre $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e $700 \text{ }^\circ\text{C}$ a condutividade térmica começa com valores

próximos de 0,4 kcal/hm°C e chega ao pico de 0,52 kcal/hm°C, e no gráfico 3 o material em análise também inicia-se com valores muito próximos ao de 0,4 kcal/hm°C e à temperatura de 700°C sua condutividade térmica chega a aproximadamente 0,48. O que representa uma diferença percentual máxima de 7,7%, considerada aceitável devido à algumas considerações realizadas e a impossibilidade de realizar o tratamento no forno como a norma recomenda.

Gráfico 3: Condutividade térmica dos concretos refratários IBAR.



Fonte: IBAR, 2017.

5.2 Elaboração do POP para aplicação do concreto

O Procedimento Operacional Padrão (POP) consiste numa ferramenta de gestão que deriva, geralmente, de fluxogramas organizacionais. Assim, o procedimento operacional padrão (ou do inglês, Standard Operating Procedure) caracteriza-se pelo detalhamento das operações necessárias à execução de uma dada atividade, ou seja, trata-se de um roteiro padronizado que descreve, de modo detalhado, todas as tarefas envolvidas na execução de uma atividade (RODRIGUES, 1999).

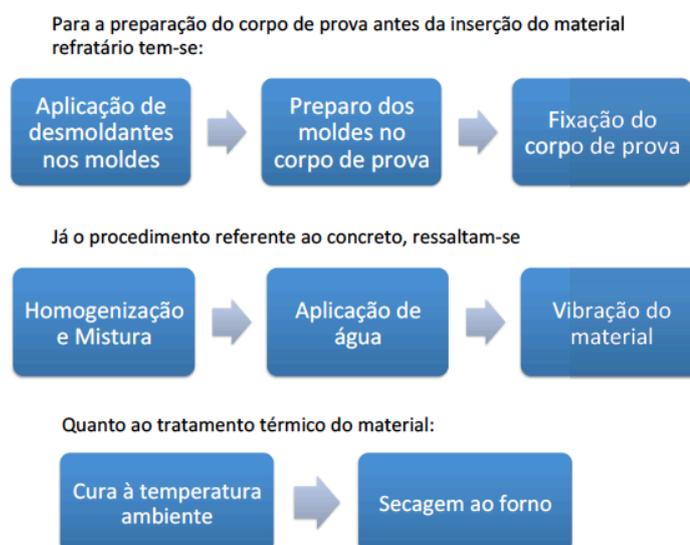
Associado ao conceito do Procedimento Operacional Padrão verifica-se a noção de tarefa crítica, caracterizada pela tarefa que afeta várias unidades, cujos resultados comprometem a Organização, sendo parte do processo e tendo procedimento padronizado. A padronização de tarefas possibilita a previsibilidade do processo, garantindo que as tarefas serão executadas de modo idêntico, independente de quem as execute. Importante, portanto, mencionar, os aspectos do mapeamento de processo, a saber: identificar os objetivos, conhecer os produtos e entender o processo (DAVENPORT, 1994).

O instrumento Procedimento Operacional Padrão está relacionado à Gestão da Qualidade, sendo também conhecido por Instruções de Trabalho ou, ainda, Norma Operacional Padrão, documentos esses que visam à satisfação da rotina pré-determinada (COLENGHI, 1997, p.91)

No caso da aplicação do concreto refratário, viu-se a necessidade da criação de seu POP pois sua prática era terceirizada anteriormente e já apresentou um histórico de resultados insatisfatórios ao LACER. Além do conhecimento adquirido ao corpo técnico do laboratório, há a melhoria da qualidade e redução do custo quanto a esta prática. O POP em questão está disponível no Anexo A deste trabalho.

Na figura 20 pode-se ver uma representação gráfica resumida do POP. No anexo as informações são mais detalhadas e completas, mas com essa representação é possível estabelecer uma ordem dos procedimentos a ser feito.

Figura 19 – Representação esquemática de POP



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

Os testes do material refratário a ser utilizado na caldeira foram realizados com sucesso. Com este trabalho, torna-se possível realizar testes para seleção do revestimento mais adequados ao tipo de caldeira, em questão.

A elaboração de um POP para a aplicação de concreto refratário como revestimento de caldeiras foi realizada e servirá como uma referência para as pessoas que virão a trabalhar nessa atividade futuramente, visando assim garantir uma qualidade adequada ao equipamento.

O protótipo foi projetado e fabricado, com algumas modificações de sua concepção inicial, podendo ser utilizado em futuros testes de condutividade térmica e outros mecânicos, para simular o funcionamento da caldeira, em escala menor. Além disso, pode-se aproveitar seu tamanho e peso práticos para outros projetos.

A condutividade térmica foi medida por meio do balanço de energia do volume de controle e seus resultados se assemelham bastante com os fornecidos pela empresa IBAR, detentora do material em estudo, traduzindo assim o sucesso do teste e de sua análise teórica.

Todos os equipamentos e materiais utilizados durante todo o trabalho foram registrados e podem ser reutilizados em futuros experimentos e análises. Há algumas sugestões de melhoria nesse sentido, como por exemplo, a aquisição de um vibrador de imersão para compactar o refratário de caldeiras de maior porte.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este projeto representa uma nova linha de pesquisa do LACER e uma série de sugestões podem ser propostas para futuros estudos e análises com aplicações em revestimento de caldeiras.

Entre elas pode-se sugerir uma análise transiente do volume de controle, tal estudo seria interessante do ponto de vista do aprendizado e também para a caracterização de outros parâmetros térmicos como: calor específico e difusividade térmica.

Teste com diferentes tipos de materiais são uma ótima sugestão também para fins de selecionar o melhor revestimento para a caldeira de leito fluidizado do LACER. Realização também de testes para analisar a frequência do surgimentos de trincas referentes e a perda do valor de suas propriedades aos processos de contração e dilatação do material de revestimento, no caso, aumentar a temperatura para valores extremos e depois abaixar à temperatura ambiente e repetir inúmeras vezes o processos e analisar como a condutividade térmica é afetada por isso, ou se houve o surgimento de trincas com tantas variações bruscas de temperatura.

Algumas experiências novas podem ser realizadas também como a mistura do material refratário com mulita e também a utilização do líquido de castanha de caju (LCC) como uma camada protetora para a abrasão do meio poroso que terá propriedades de fluido na caldeira de leito fluidizado.

Realização de testes de dureza Knoop para um corpo de prova do mesmo material do revestimento, antes e depois dos tratamentos térmicos, e uma análise da composição química do material por meio de raio-x também seriam análises que agregariam valor a uma futura pesquisa.

REFERÊNCIAS

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. J. Wiley & Sons, USA, 2007.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

ASHBY, M.F. JOHNSON.K. **Materiais e design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto** – RJ, 2011.

BAZZO, E., **Geração de vapor**, Editora da UFSC, 2ª Edição, 1995. 216 p.

BARCELLOS, W. M.; SAVELIEV, A.V.; KENNEDY, L.A., **A Combustão em meios porosos de fluxo recíproco aplicada ao desenvolvimento de caldeira de vapor de baixa emissão e alta eficiência**, I Seminário da Rede Gas Energia Tecnologia e Desenvolvimento, Petrobras, Brasil, 2006.

FEITOSA, J. D. M.; **Aplicação da Tecnologia de Leito Fluidizado em Projeto de Caldeira de Vapor**, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015

SOUZA, L. C. E. O. **Estudo teórico-experimental de uma caldeira de queimador poroso recíproco aplicada ao biogás**. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica com área de concentração em energias renováveis) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

CAMPOS, K. S. **Síntese e Caracterização de Materiais Antioxidantes a Base de Boro via Processo Sol-Gel e Redução Metalotérmica para a Prevenção da Oxidação de Materiais Refratários Contendo Carbono**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2011.

LENZ E SILVA, G. F. B. **Introdução à Siderurgia. Refratários para Siderurgia**, 2005. 428.

MILLER, J. **Today's Refractory Market and the Refractory Market of the future**. Asociacion Latinoamericana de Fabricantes de Refractorios, Diciembre de 2000.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. **Cerâmica Industrial**, v. 5, 2000.

LOBATO, E. **Relatório Técnico 71- Refratários**. [S.l.]. 2009.

SEMLER, C. E. **Continuos improvement of refractories continues**. Refractories Applications and News, v. 10, n. 6, 2005.

MATTOS, L. G. **Efeito das Variáveis Operacionais na Formação de Goma Nafta Craqueada**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2004.

HAYASE, M. **Refractories Handbook**. In: _____ Introduction to Refractories. [S.l.]: Technical Association of Refractories of Japan, 1998.

PETROBRAS. N-1617-Rev. E: **Aplicação de Concreto Refratário**, Rio de Janeiro, 2004.

KENNEDY, L. A.; FRIDMAN, A. A.; SAVELIEV, A. V., **Superadiabatic combustion in porous media: wave propagation, instabilities, new type of chemical reactor**. Fluid Mechanics Research, v. 22, p. 1-26, 1995.

OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcell Dekker, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8826: **Materiais refratários - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2014.

APÊNDICE A – POP DE APLICAÇÃO DE CONCRETO REFRAATÁRIO EM CALDEIRAS

1. OBJETIVO

Padronizar e assegurar a qualidade do procedimento para aplicar o concreto refratário como revestimento de caldeira.

2. PRINCÍPIO

Revestimento de material bem compactado, com baixa condutividade térmica, isolando a caldeira adequadamente.

3. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Para a utilização desta atividade necessita de alguns equipamentos como: agente desmoldantes; formas de aço ou madeira; suporte para moldes e formas; pá para mistura e homogeneização do material; balde para armazenar e misturar o material; medidor de água(seringa para menores valores); vibrador de imersão para compactação do material; forno para tratamento.

4. PROCEDIMENTOS

5.1. Preparação do molde antes da aplicação

A. Fabricação ou aquisição de formas e moldes

É necessário, para que o material se compacte da maneira desejada, a obtenção de formas e de moldes. O material dos mesmos deve ser resistente a temperaturas relativamente altas. É aconselhado materiais como aço ou madeira.

B. Aplicação de agente desmoldante

A fim de evitar problemas na hora de retirar os moldes utiliza-se agente desmoldantes, dificultando a aderência do material da forma ao concreto refratário e facilitando a desmoldagem.

C. Preparo dos moldes no protótipo

O encaixe dos moldes e formas no protótipo que se deseja aplicar o material. Os mesmos deveram estar estáticos durante todo o processo de cura, e então é necessário

assegurar que os mesmos não se moveram por forças internas ou provocadas pela aplicação do material

D. Fixação do protótipo

Para o processo de cura o protótipo deverá estar em local seco e protegido da incidência de raios solares e a fixação do protótipo contendo os moldes e formas nesses locais se torna necessária.

5.2. Aplicação do concreto

A. Homogeneização e Mistura

O concreto deve ser perfeitamente homogeneizado a seco antes da adição de água com o auxílio de uma pá, e não deve ser adicionado nenhum material ao concreto conforme recebido, misturar até que não se note segregações entre grãos; regiões umedecidas diferentes; atingir a consistência adequada.

B. Aplicação de água

A aplicação de água deve ser 10% a 20% em termos volumétricos referente ao concreto utilizado, geralmente a recomendação é feita pelo fornecedor. A água deve ser potável e estar, no máximo, a 24 °C.

C. Compactação

Visando garantir que o concreto se acomode totalmente, sem deixar vazios, o material deve ser vibrado. Em escalas pequenas essa vibração pode ser feita manualmente, porém quando se trata de grandes formas, é recomendável a utilização de um vibrador de imersão.

5.3. Tratamento do concreto

A. Secagem a temperatura ambiente

Também conhecida como cura do concreto, o material precisa absorver a água utilizada previamente. Para isso necessita que o mesmo fique em ambiente seco e protegido de raios solares para evitar sua evaporação. Recomenda-se aproximadamente de um tempo de 48 horas a temperatura ambiente para acabar esse processo. Após isso o molde pode ser retirado do protótipo.

B. Secagem ao forno

Após completado o período de cura, pode ser iniciado o processo de secagem que se dará com a partida do forno. Se o fornecedor não realizar nenhuma recomendação utiliza o

processo descrito na norma Petrobras N-1617 (seção 3.4.2.3.4). Após isso o material está apto para uso operacional.

APÊNDICE B – CÁLCULOS NO EXCEL

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2	Resistência [ohms/ft]	0,3437	A1	0,00206692		Conversão W/mK p/ kcal/h		0,859845					
3	Comprimento[m]	1,2	A2	0,01616472									
4	Comprimento [ft]	3,93700787	A2/(2*A1)	3,91033138									
5	Resistência total [ohms]	1,3	A2/(Atotal)	0,79634776									
6	r1 [m]	0,02565	k1020 [W/mK]	51,9									
7	r2 [m]	0,060725	R1020	0,02959728									
8	ln(r2/r1)	0,8618119	Rkaowol	145,143183									
9	m [kg]	0,301	Rar	4,8381061									
10	T0 [C]	24	Rtotal	150,010886									
11													
12		Eg [W]	Eperpendicular	T esferas	T1	T2	Tchapa	Eradial	k	k kaowool	kcal/h		
13	5	19,2307692	0,973262698	106	96	43	67	18,2575065	0,47249609	0,06	0,4062734		
14	7,5	43,2692308	2,359828732	210	194	81	103	40,909402	0,49656637	0,06	0,42697011		
15	10	76,9230769	4,319686493	357	339	138	190	72,6033904	0,49544273	0,06	0,42600396		
16	12,5	120,192308	5,946235111	479	484	197	205	114,246073	0,5459992	0,06	0,46947468		
17	15	173,076923	8,479384598	669	653	284	164,597538	0,61182834	0,06	0,52607754			
18	12,5	120,192308		520	506	250							
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													

Conductividade térmica kcal/hm°C

Temperatura °C

Conductividade térmica W/mK

Temperatura °C

PI fx = =B5\$8*H13/(2*PI()*0,1*(E13-F13))

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	Resistência [ohms/ft]	0,3437	A1	0,00206692		Conversão W/mK p/ kcal/h		0,859845	
3	Comprimento[m]	1,2	A2	0,01616472					
4	Comprimento [ft]	3,93700787	A2/(2*A1)	3,91033138					
5	Resistência total [ohms]	1,3	A2/(Atotal)	0,79634776					
6	r1 [m]	0,02565	k1020 [W/mK]	51,9					
7	r2 [m]	0,060725	R1020	0,02959728					
8	ln(r2/r1)	0,8618119	Rkaowol	145,143183					
9	m [kg]	0,301	Rar	4,8381061					
10	T0 [C]	24	Rtotal	150,010886					
11									
12	U	Eg [W]	Eperpendicular	T esferas	T1	T2	Tchapa	Eradial	k
13	5	19,2307692	0,973262698	106	96	43	67	18,2575065	=13-F13))
14	7,5	43,2692308	2,359828732	210	194	81	103	40,909402	0,49656637
15	10	76,9230769	4,319686493	357	339	138	190	72,6033904	0,49544273
16	12,5	120,192308	5,946235111	479	484	197	205	114,246073	0,5459992
17	15	173,076923	8,479384598	669	653	284	164,597538	0,61182834	

APÊNDICE C – DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO

Nome da peça: Corpo de Prova

Massa: 1057,7 gramas

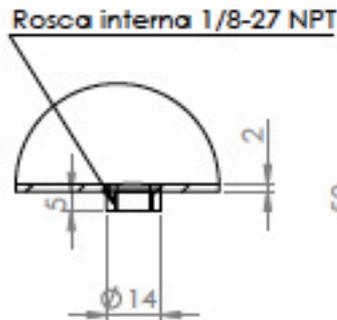
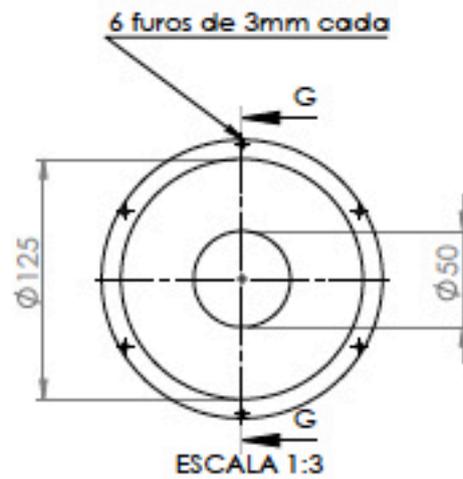
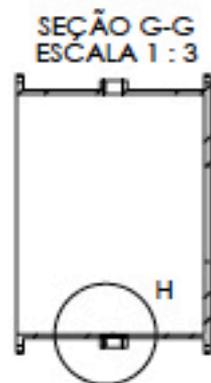
Material: Aço 1020

Volume: 133 885, 79 milímetros cúbicos

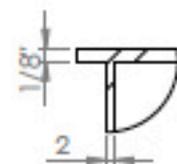
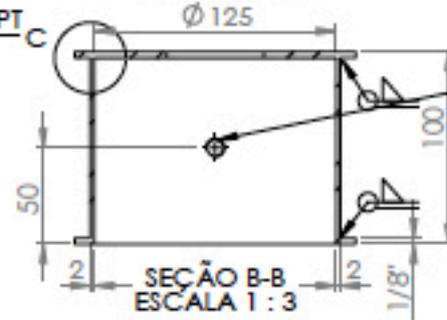
Quantidade: 2



ESCALA 1 : 3

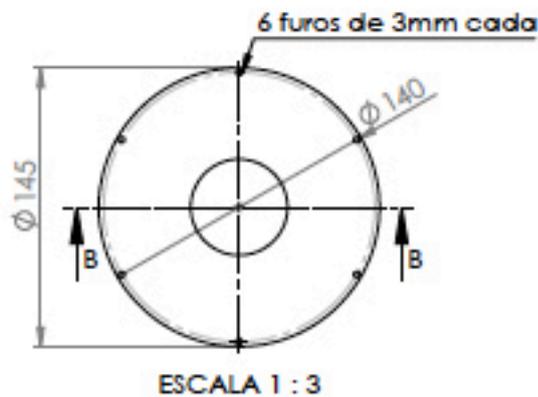


DETALHE H
ESCALA 2 : 3



DETALHE C
ESCALA 2 : 3

Obs.: Há dois furos com rosca interna 1/8-27 NPT no Corpo de Prova, eles são iguais e diametralmente opostos, como se pode ver na seção G-G.



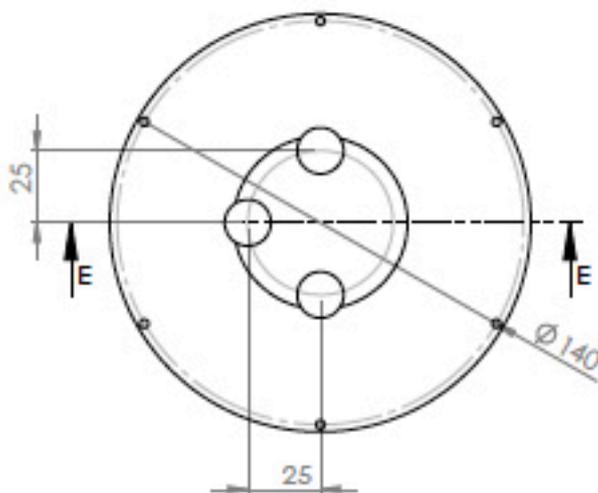
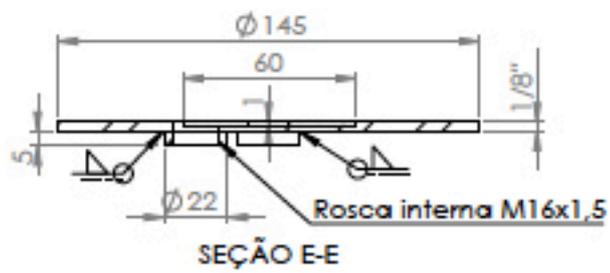
Nome da peça: Tampa Superior

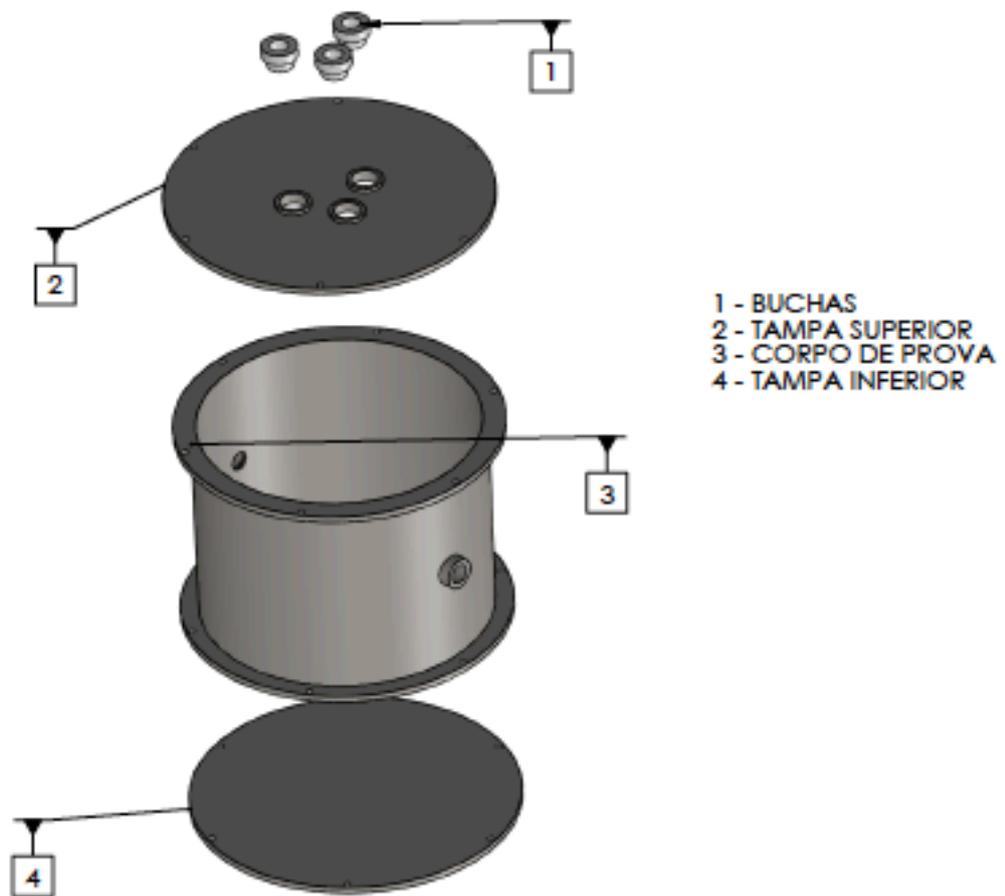
Material: Aço 1020

Massa: 400,95 gramas

Volume: 50753,20 milímetros cúbicos

Quantidade: 2





ESCALA 1 : 2.5

MONTAGEM COMPLETA DO CORPO DE PROVA