

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONALEM MATERIAIS**

**JOAQUIM DE PAULA PEREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO CERÂMICO PARA  
OTIMIZAR A RADIAÇÃO TÉRMICA EM MATERIAIS REFRAATÓRIOS  
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiC-Ca}(\text{AlO}_2)_2$**

**VOLTA REDONDA  
2016**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONALEM MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO CERÂMICO PARA  
OTIMIZAR A RADIAÇÃO TÉRMICA EM MATERIAIS REFRAATÓRIOS  
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiC-Ca}(\text{AlO}_2)_2$**

Dissertação apresentada no Centro Universitário de Volta Redonda, como requisito obrigatório, para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral, na área de concentração de processamentos e caracterização de materiais, linha de pesquisa de materiais cerâmicos.

Aluno:

Joaquim de Paula Pereira

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

**VOLTA REDONDA**

**2016**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

P436d Pereira, Joaquim de Paula.

Desenvolvimento de um compósito cerâmico para otimizar a radiação  
térmica em materiais refratários Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-Ca(AIO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. /

Joaquim de Paula Pereira. - Volta Redonda: UniFOA, 2016.

82 p. : II

Orientador(a): Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em  
Materiais, 2016

1. Materiais - dissertação. 2. Refratário. 3. Emissividade. 4. Radiação térmica. I. Cabral, Ricardo de Freitas. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

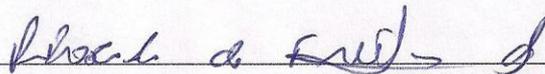
**Aluno: Joaquim de Paula Pereira**

**DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO CERÂMICO PARA OTIMIZAR A  
RADIAÇÃO TÉRMICA EM MATERIAIS REFRACTÓRIOS  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiC-}$   
 $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$**

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

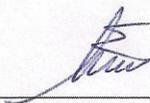
Banca Examinadora



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho



Prof. Dr. Sebastião Ribeiro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho e me manter fiel aos seus ensinamentos, permitindo assim que eu vencesse mais essa etapa da minha vida.

À minha família, especialmente à minha esposa Sônia e meus filhos Lucas e Leonardo que sempre estiveram do meu lado com seu apoio e dedicação.

E ao meu Orientador Professor Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral, pelos ensinamentos e dedicação dispensados no auxílio à concretização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, por sua decisiva atuação na realização deste trabalho.

À Ana Maria Oliveira Carvalho que sempre nos orientou nos assuntos administrativos.

## RESUMO

Atualmente, grande parte dos recursos disponíveis para pesquisas estão sendo direcionados para o setor de energia. A demanda atual por energia leva a humanidade a desenvolver mecanismos e soluções que gerem reduções nos consumos e melhores aproveitamentos dos recursos energéticos.

A indústria de transformação, principalmente as siderúrgicas são grandes consumidoras de energia. Essa energia é consumida na transformação do minério de ferro em gusa, na transformação do gusa em aço e em processos de laminação a quente. Nesse universo siderúrgico destacam-se dois equipamentos que são grandes consumidores de energia em forma de gases combustíveis: Os regeneradores dos altos fornos e os fornos de reaquecimento de placas ou tarugos. A função básica dos refratários nesses equipamentos é suportar as altas temperaturas exigidas pelo processo e manter o calor gerado pelos gases combustíveis no interior do equipamento. Estudos recentes indicam que os materiais refratários que apresentam maior taxa de emissividade quando aquecidos a altas temperaturas, conseguem aumentar a taxa de transferência de calor por radiação, propiciando economia de energia durante os ciclos de aquecimento e permanência.

Seguindo essa linha de pesquisa e objetivando economizar energia, foi desenvolvido um compósito refratário dopado com carbeto de silício (SiC) e óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), tendo como base alumina calcinada ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Utilizou-se esse compósito como revestimento superficial para os refratários e obteve-se um aumento em sua emissividade térmica. Os experimentos confirmaram que os corpos de provas revestidos com o compósito, apresentaram uma temperatura menor em relação aos que não foram revestidos, demonstrando que houve aumento da radiação térmica.

Palavras-Chave: Refratário, emissividade, radiação térmica, economia de energia.

## ABSTRACT

Currently, most of the resources available for research are being directed to the energy sector. The current demand for energy leads humanity to develop mechanisms and solutions that generate reductions in fuel consumption and best uses of energy resources. The manufacturing industry, especially steel mills are large consumers of energy. This energy is consumed in the transformation of iron ore into pig iron, the conversion of pig iron into steel and rolling processes hot.

In this steel universe highlights are two devices which are major consumers of energy in the form of combustible gases: The hot stoves of the blast furnaces and reheating furnaces plates or billets. The basic function of these refractories is withstand the high temperatures required by the process and keep the heat generated by the fuel gas inside the oven. Recent studies indicate that refractory materials having higher emissivity ratio when heated to high temperatures, can increase the rate of radiative heat transfer, allowing power savings during the heating cycles and permanence.

Following this line of research and aiming to save energy, it developed a refractory composite doped silicon carbide (SiC) and chromium oxide ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), with the calcined alumina base ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ ). This composite used as a surface coating for refractory and obtained an increase in its thermal emissivity. The experiments confirmed that the bodies of evidence coated with the composite showed, a lower temperature than those who were not coated, showing that there was an increase of thermal radiation.

Keywords: refractory, emissivity, thermal radiation, energy saving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parque produtor de aço no Brasil.....	19
Figura 2 – Distribuição setorial do consumo de produtos siderúrgicos – 2012.....	20
Figura 3 – Esquemático de altos fornos.....	21
Figura 4 – Regeneradores de altos fornos.....	22
Figura 5 – Regenerador com câmara de combustão interna (Aquecimento) .....	23
Figura 6 – Domo de um regenerador.....	24
Figura 7 – Detalhe do <i>checker</i> .....	24
Figura 8 – Regenerador com câmara de combustão interna (Sopro) .....	25
Figura 9 – Domo de um regenerador.....	26
Figura 10 – Vista do topo da câmara de combustão.....	26
Figura 11 – Esquemático de forno contínuo.....	28
Figura 12 – Corte transversal e longitudinal do forno contínuo.....	28
Figura 13 – Classe de refratários quanto à forma.....	30
Figura 14 – Materiais refratários densos.....	30
Figura 15 – Classificação dos refratários quanto ao comportamento químico.....	31
Figura 16 – Classe quanto à natureza química e mineralógica dos constituintes ...	32
Figura 17 – Ponto de fusão dos óxidos mais refratários.....	33
Figura 18 – Óxido de alumínio.....	33
Figura 19 – Modos de transferência de calor.....	34
Figura 20 – Transferência de calor dentro de um alto forno.....	34
Figura 21 – Transferência de calor por condução.....	35
Figura 22 – Transferência de calor por convecção.....	36
Figura 23 – Transferência de calor por radiação.....	37
Figura 24 – Espectro da radiação eletromagnética.....	38
Figura 25 – Demonstração da incidência da energia radiante em um corpo sólido .	39
Figura 26 – Cavidade negra.....	40
Figura 27 – Comparação entre um corpo negro e um corpo real.....	41
Figura 28 – Valores típicos de emissividade.....	41
Figura 29 – Absorção da radiação incidente em superfície opaca.....	42
Figura 30 – Absorção da radiação incidente.....	43
Figura 31 – Comparação entre corpos de provas B, e EM01 pintados com tinta de alta emissividade em diferentes temperaturas do forno.....	44

Figura 32 – Fluxograma do trabalho.....	45
Figura 33 – Tijolo ALUKOR 85, Magnesita.....	46
Figura 34 – Ficha de dados técnicos (FDT) ALUKOR 85.....	47
Figura 35 – Vista superior de um <i>checker</i> .....	48
Figura 36 – Vista lateral de um <i>checker</i> .....	48
Figura 37 – Ficha de dados técnicos – ANDIBAR 60 <i>CHECKER</i> .....	49
Figura 38 – Óxido de alumínio calcinado (Alumina) .....	50
Figura 39 – Óxido de silício cristalino (Quartzo) .....	50
Figura 40 – Carbetto de silício.....	51
Figura 41 – Óxido de cromo.....	52
Figura 42 – Aluminato de cálcio (70% alumina).....	53
Figura 43 – Tijolo ALUKOR 85 cortado.....	55
Figura 44 – Pesagem dos componentes.....	58
Figura 45 – Componentes e suas fases de mistura.....	59
Figura 46 – Componentes hidratados com 10% de água.....	59
Figura 47 – Peças de <i>checker</i> com 50% de revestimento.....	60
Figura 48 – Corpos de provas com revestimento.....	61
Figura 49 – Curva de aquecimento aplicada no forno.....	62
Figura 50 – Corpos de prova no forno antes de aquecer.....	64
Figura 51 – Corpos de provas após aquecimento.....	64
Figura 52 – Máquina termográfica Flir.....	65
Figura 53 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) .....	66
Figura 54 – Corpo de provas preparado para testes (Placa 1) .....	67
Figura 55 – Corpos de provas preparados para testes (Cubos) .....	68
Figura 56 – Corpo de provas preparado para testes (Placa 2) .....	68
Figura 57 – Camada de revestimento no corpo de provas.....	71
Figura 58 – Micrografia do compósito 1, imagem a 20X.....	72
Figura 59 – Micrografia do compósito 1, imagens a 50X e 100X.....	73
Figura 60 – Micrografia do compósito 1, imagens a 250X.....	73
Figura 61 – Micrografia do compósito 1, imagens a 500X.....	74
Figura 62 – Micrografia do compósito 1, imagens a 800X.....	74
Figura 63 – Termogramas da placa 1.....	75
Figura 64 – Termogramas dos cubos.....	76
Figura 65 – Termogramas da placa 2.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais do projeto.....	54
Tabela 2 – Dimensões reais dos corpos de provas.....	55
Tabela 3 – Composição do compósito 1.....	57
Tabela 4 – Composição do compósito 2.....	58
Tabela 5 – Dados do aquecimento no forno.....	63
Tabela 6 – MEA e porosidade aparente sem revestimento.....	69
Tabela 7 – MEA e porosidade aparente com revestimento.....	70
Tabela 8 – Comparação entre temperaturas.....	77

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Lei de Fourier da condução térmica.....	35
Equação 2 – Lei de Stefan-Boltzmann.....	40
Equação 3 – Lei de Kirchhoff.....	42
Equação 4 – Fórmula de obtenção do Aluminato de cálcio.....	53
Equação 5 – Massa específica aparente.....	56
Equação 6 – Porosidade aparente.....	56

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

DRX – Difração de Raios X

g/cm<sup>3</sup> – Grama por centímetro cúbico

µm - Micrometro

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IR – Infravermelho

IAB – Instituto Aço Brasil

m<sup>3</sup> – Metro cúbico

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MO – Microscopia ótica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

FDT – Ficha de dados técnicos

MPa – Mega Pascal

CAC – Cimento de Aluminato de Cálcio

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Fig. – Figura.

SI – Sistema Internacional de Unidades

kg – Quilograma

kgf – Quilograma força

kN – Quilo Newton

N – Newton

Pa – Pascal – Unidade de Pressão ou Tensão

P.A. – Porosidade Aparente, de acordo com NBR 6220

MEA – Massa Específica Aparente, de acordo com NBR 6220

AA – Absorção de água, de acordo com NBR 6220

EJ – Exajoules

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVO.....	16
3. JUSTIFICATIVA.....	17
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1. Contexto da siderurgia no Brasil.....	18
4.1.1. Altos fornos a coque - contexto internacional.....	20
4.1.2. Regeneradores de altos fornos.....	22
4.1.3. Fornos de reaquecimento de placas ou tarugos.....	27
4.2. Materiais refratários.....	29
4.2.1. Classificação dos refratários de acordo com a forma física.....	30
4.2.2. Quanto à natureza química e mineralógica dos constituintes.....	31
4.3. Transferência de calor.....	34
4.3.1 Condução.....	35
4.3.2. Convecção.....	36
4.3.3. Radiação.....	37
4.4. Teoria da emissividade.....	38
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
5.1. MATERIAIS.....	46
5.1.1. Tijolo ALUKOR 85.....	46
5.1.2. <i>Checker</i> .....	48
5.1.3. Óxido de alumínio calcinado.....	50
5.1.4. Óxido de silício cristalino.....	50
5.1.5. Carbetto de silício.....	51
5.1.6. Óxido de cromo.....	52
5.1.7. Aluminato de cálcio.....	53
5.1.8. Água.....	54
5.2. MÉTODOS.....	55
5.2.1. Corte dos corpos de provas e determinação do volume.....	55
5.2.2. Massa Específica Aparente (MEA).....	56
5.2.3. Porosidade Aparente (P.A.).....	56
5.2.4. Preparação dos compósitos.....	57
5.2.5. Aplicação do revestimento nos corpos de provas.....	60
5.2.6. Secagem dos corpos de provas com revestimento.....	62
5.2.7. Termografia.....	65
5.2.9. Preparação da Placa 1 – Peça única.....	67

5.2.10. Preparação dos cubos – Peças separadas .....	68
5.2.11. Preparação da Placa 2 – Peça única .....	68
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	69
6.1. Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente.....	69
6.2. Camada de aplicação do revestimento .....	71
6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	72
6.4. Termográficos.....	75
6.4.1. Termogramas Placa 1 – Peça única .....	75
6.4.2. Termográficos dos cubos – Peças separadas.....	76
6.4.3. Termográficos da Placa 2 – Peça única .....	77
7. CONCLUSÕES.....	78
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	79
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

## 1. INTRODUÇÃO

Todos os materiais refratários, submetidos a altas temperaturas, possuem suas respectivas taxas de radiação térmica que podem ser medidas por meio de sua emissividade. A intensidade da radiação incidente pode ser relacionada com um importante fluxo radiante, conhecido por irradiação. (INCROPERA, 2008).

O desenvolvimento de um compósito cerâmico que suporte altas temperaturas e aumente a emissividade superficial das peças refratárias, foram as metas desse trabalho. Quanto mais energia é devolvida, e de forma mais rápida para o interior dos fornos aquecidos, em forma de radiação térmica, essa energia é reabsorvida pelos corpos sólidos que estão em seu interior resultando em economia e conservação de energia. As escolhas dos materiais utilizados para compor o produto final, foram baseadas na literatura disponível e nas características de cada componente, pois deveriam atender às solicitações térmicas, físicas e químicas a que seriam submetidos nos equipamentos, sem se deteriorar ou oxidar.

Serão explicadas as funções e características dos materiais refratários, sua utilização prática em equipamentos industriais, e quais são as solicitações a que o material é submetido. Com a comprovação do aumento da emissividade por meio do compósito fabricado, espera-se o benefício em economia e conservação de energia em fornos de reaquecimento de placas e regeneradores.

## 2. OBJETIVO

Desenvolver um compósito que aumente a radiação térmica dos materiais refratários quando aplicado em sua superfície e submetidos a altas temperaturas. Esse compósito deve suportar temperaturas de até 1450°C e manteve-se agregado à peça refratária sem perder suas características de refratariedade.

É esperado que, o aumento da emissividade superficial dos refratários, possa ajudar na economia de energia dos regeneradores dos altos fornos ou nos fornos de reaquecimento de placas. A economia gerada pode ser reinvestida em novos processos, em benefícios para empresas, pessoas ou meio ambiente.

### 3. JUSTIFICATIVA

Desde a antiguidade o homem busca fontes de energias capazes de suprir suas necessidades. Iniciou-se com o controle do fogo, a queima da madeira e de qualquer outra substância que pudesse gerar calor. Com a chegada da era industrial os desafios aumentaram, as buscas por recursos energéticos tornaram-se intensos e em algumas regiões, escassos. Segundo relatório da ONU, 348 EJ de energia foram produzidos no mundo em 1994. Os combustíveis fósseis respondem por quase 90% da energia gerada no mundo, além de que a exploração das fontes renováveis tem crescido nos últimos anos. Além de contar com recursos sempre disponíveis no meio ambiente, a produção de energia a partir das fontes renováveis provoca danos ambientais bem menores. De acordo com o Centro de Estudo e Pesquisa Aplicada da USP, é esperado que as reservas naturais não renováveis durem, em média, mais 113 anos (CEPA, 2016). O desenvolvimento tecnológico está descobrindo novos métodos para economizar energia e um deles é a preservação e potencialização da energia térmica gerada.

O desenvolvimento desse revestimento refratário possibilitou o aumento da emissividade nos materiais refratários, característica que está diretamente relacionada ao aumento da radiação térmica e conseqüentemente à conservação de energia. Segundo Novo (2012), do ponto de vista industrial um forno de fusão e espera, por exemplo, o revestimento de alta emissividade poderia favorecer uma conservação de energia mais eficiente, pois haveria redução de perdas térmicas pelo refratário.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Contexto da siderurgia no Brasil

O Produto Interno Bruto (PIB) – soma de todos os bens e serviços produzidos no país – teve queda de 3,8% em 2015, a maior desde o início da série histórica atual, iniciada em 1996, na série sem ajuste sazonal. A retração da economia em 2015 que reflete em praticamente todos os setores da economia, com destaque para Formação Bruta de Capital Fixo (investimento em bens de capital), com queda de 14,1%. Além dos setores de bens e serviços os dados divulgados indicam também quedas significativas na Indústria (6,2%) e nos serviços (2,7%), fatos que causam impactos diretos na economia, segundo dados de 2016 ([agenciabrasil.ebc.com.br](http://agenciabrasil.ebc.com.br))

Em 2016, o Instituto Aço Brasil publicou seu relatório de sustentabilidade sobre o consumo aparente de aço no Brasil onde mostrava que no mês de janeiro de 2016 foi de 1,3 milhão de toneladas. Quanto às vendas internas, o resultado de janeiro de 2016 foi de 1,2 milhão de toneladas de produtos, redução de 26,8% se comparado a janeiro de 2015. A produção brasileira de aço bruto em janeiro de 2016 foi de 2,5 milhões de toneladas, queda de 17,9% quando comparada com o mesmo mês em 2015. Em relação aos laminados, a produção de janeiro, de 1,6 milhão de toneladas, apresentou uma redução de 18,7% quando comparada com janeiro do ano passado.

O Ministério das Minas e Energia – (MME, 2009), em seu relatório de Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, mostra que o consumo de refratários no Brasil, está diretamente vinculado à indústria metalúrgica, em especial a siderúrgica e em menor grau indústria de cimento, vidro e outros. O aprimoramento dos produtos e processos nessa área, tem levado a uma redução do consumo específico de refratários. Para produzir uma tonelada de aço consumia-se 30 Kg de refratários, na década de 60. Em 1985 eram necessários 20 kg para produzir a mesma tonelada de aço, sendo que desde então essa relação vem diminuindo chegando a valores abaixo de 10kg de refratário/t aço. Atualmente essa relação vem se estabilizando num patamar próximo a 9 kg/t.

A figura 1 relaciona os produtores de aço no Brasil e os produtos oferecidos aos mercados nacionais e internacionais.

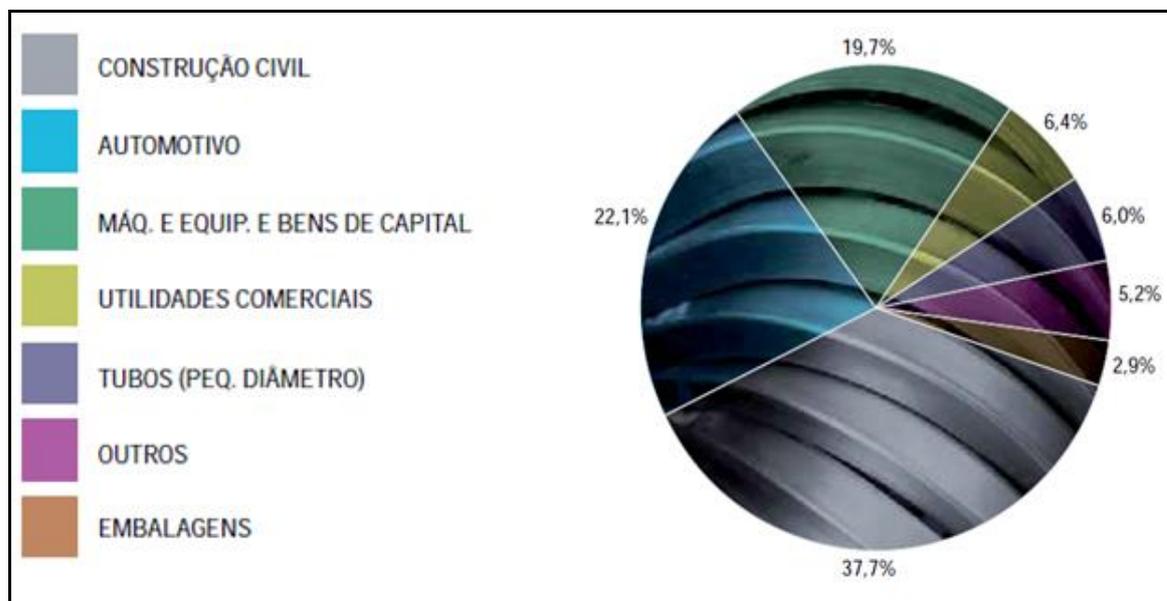
Figura 1 – Parque produtor de aço no Brasil.

TIPO	PRODUTO	USINAS SIDERÚRGICAS
USINAS INTEGRADAS	LAMINADOS PLANOS	Aperam South América (MG), ArcelorMittal Tubarão (ES), CSN (RJ), ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico (RJ), Usiminas (Ipatinga/MG e Cubatão/SP)
	LAMINADOS LONGOS	ArcelorMittal Aços Longos (Monlevade/MG, Juiz de Fora/MG), Gerdau Aços Longos (Barão de Cocais/MG, Divinópolis/MG), Sinobrás (Marabá/PA), Vallourec (Barreiro/MG), VSB (Jeceaba/MG)
	LAMINADOS PLANOS E LONGOS	Gerdau Açominas (Ouro Branco/MG)
USINAS SEMI INTEGRADAS	LAMINADOS LONGOS	Gerdau Aços Especiais (Pindamonhangaba/SP, Mogi das Cruzes/SP, Piratini/RS), Votorantim Siderurgia (Barra Mansa/RJ, Resende/RJ), ArcelorMittal Aços Longos (Piracicaba/SP, Cariacica/ES), Gerdau Aços Longos (Açonorte/PE, Cearense/CE, Cosigua/RJ, Usiba/BA, Guaíra/PR, São Paulo/ SP, Riograndense/RS), Villares Metals (SP).

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2014.

O Instituto Aço Brasil faz um relatório anual sobre o consumo e utilização dos produtos siderúrgicos no mundo e no Brasil. A figura 2 apresenta a distribuição dos produtos siderúrgicos no mercado brasileiro de acordo com sua utilização.

Figura 2 – Distribuição setorial do consumo de produtos siderúrgicos – 2012.



Fonte: Instituto Aço Brasil, relatório de sustentabilidade 2014.

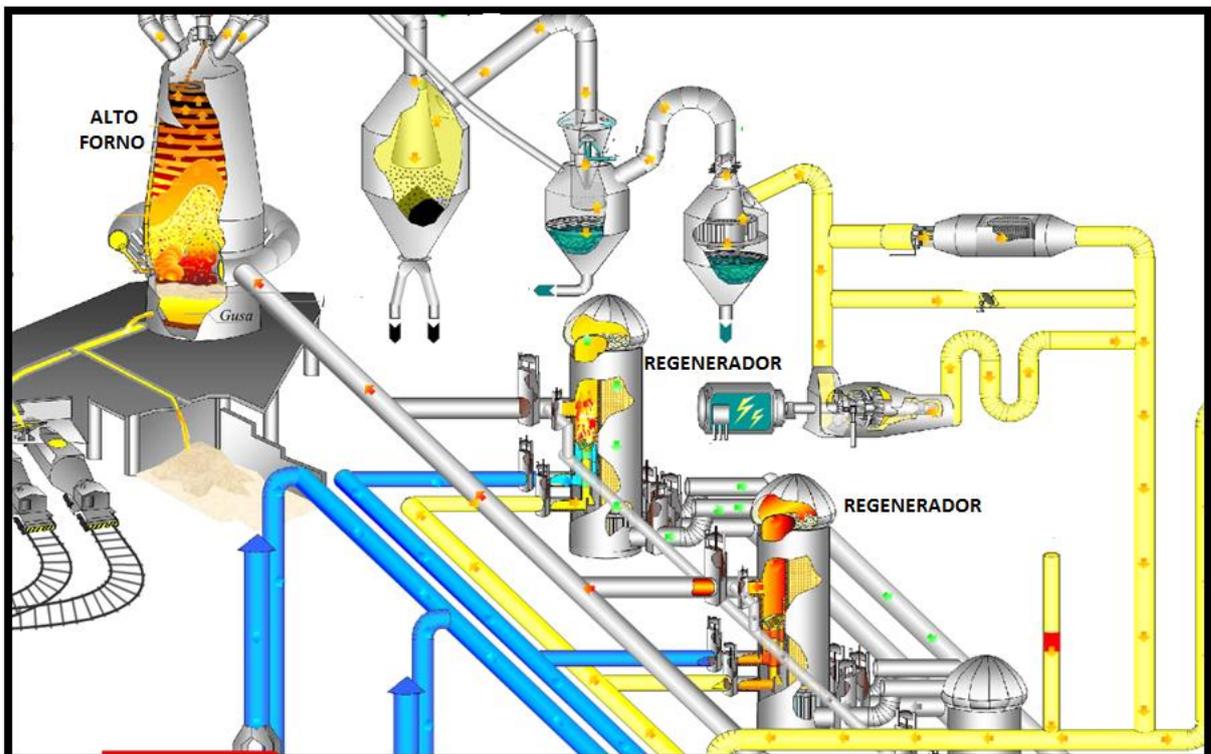
#### 4.1.1. Altos fornos a coque - contexto internacional

De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos do Ministério da Ciência e Tecnologia, o ano de 2010 em termos da produção mundial de ferro primário, os altos-fornos a coque são responsáveis por cerca de 93% a 94% do total, sendo seguido pelos módulos de redução direta (5% a 6%) e altos fornos a carvão vegetal (1%). A tecnologia de redução de minérios de ferro (e seus aglomerados) em altos-fornos a coque é avançada e otimizada. Os seus desenvolvimentos, na atualidade, são incrementais, não passando de 1% ao ano. O estado-da-arte da tecnologia de uso dos redutores fósseis é muito satisfatório, não havendo muito espaço para ganhos adicionais de eficiência superiores a 10% frente aos níveis atuais (CGEE, 2010).

No âmbito das inovações incrementais em altos-fornos a coque (Figura 3), merecem destaque (CGEE, 2010):

- O aumento das campanhas (acima de 20 anos), em função da melhoria dos revestimentos refratários, do uso de painéis (staves) e do controle do desgaste dos cadinhos;
- as injeções de carvão, gás natural, óleo, plásticos, entre outros, pelas ventaneiras dos altos fornos (co-injeção e PCI);
- O incremento da produtividade, como decorrência de instrumentação e automação e sistema de distribuição de carga (topo sem cone/bell-less top);
- O aproveitamento energético do gás de topo (cogeração);
- A granulação de escória (coproduto);
- Melhoria operacional dos regeneradores;
- Melhoria no controle de qualidade do coque e introdução do conceito de frações menores de coque (small coke).
- Melhoria no controle de qualidade das matérias-primas.

Figura 3 – Esquemático de altos fornos.



Fonte: Gerdau S.A.

#### 4.1.2. Regeneradores de altos fornos

O regenerador é um dos meios existentes para fornecer continuamente ar quente a um alto-forno. Antes de o ar de sopro ser entregue para as ventaneiras do alto-forno, ele é pré-aquecido por passagem através de câmaras regenerativas chamadas de tijolos *checkers*, que são aquecidos principalmente pela combustão do gás de alto-forno (SATYENDRA, 2015).

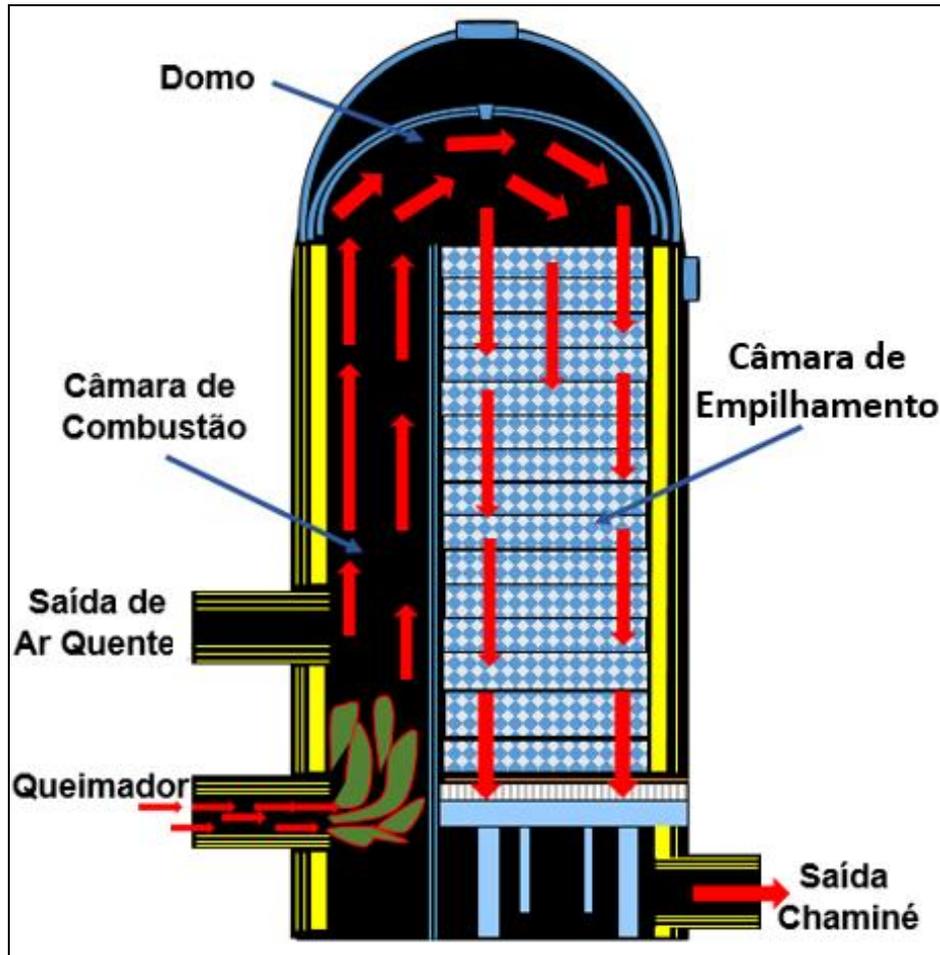
Os regeneradores são as instalações responsáveis pelo aquecimento do ar de processo que alimenta os altos-fornos, são grandes trocadores de calor. A temperatura do ar aquecido fica entre 900°C e 1250°C. São compostos de carcaça metálica, tijolos cerâmicos refratários aluminosos, sílico-aluminosos e de sílica e podem possuir câmaras de combustão internas ou externas. Altos fornos com capacidade de até 4000 toneladas/dia possuem 3 regeneradores. Acima desta capacidade são empregados 4 regeneradores. O combustível empregado nos regeneradores é uma mistura do gás resultante da operação de coqueificação do carvão (gás de coqueria) e do gás que sai pelo topo do alto-forno (gás de alto-forno). Esses regeneradores operam em bateladas, primeiramente são aquecidos e guardam energia térmica nos empilhamentos de refratários, chamados chekers. Quando atingem a temperatura desejada, inicia-se o sopro do ar quente nos altos fornos. Esse processo de armazenamento de calor só é possível graças à imensa massa de refratários que compõem os regeneradores. A figura 4 é de um conjunto de regeneradores (PAUL WURTH, 2016).

Figura 4 – Regeneradores de altos fornos



Fonte: Website Paul Wurth, SMS group, 2016.

Figura 5 – Regenerador com câmara de combustão interna (Aquecimento).



Fonte: Autor, 2014.

A figura 5 nos mostra um regenerador com câmara de combustão interna durante o ciclo de aquecimento. Na abertura do queimador existe um difusor que pode ser metálico ou cerâmico, sua função é misturar os gases combustíveis com o ar de combustão, fornecendo a chama necessária para o aquecimento de todo o refratário. O calor proveniente do queimador sobe pela câmara de combustão chegando até o domo, a partir desse momento o fluxo de ar segue em corrente descendente forçado pela injeção de ar do queimador e pela tiragem da chaminé, aquecendo todo o refratário do empilhamento composto por peças de *checkers*. Os *checkers* são tijolos refratários moldados e queimados a 1450°C, eles possuem diversos furos centrais por onde passam os gases quentes. Após aquecidos pelo queimador funcionarão como uma reserva térmica para ser utilizada durante o ciclo de sopro (DIDIER, 1990).

As figuras 6 e 7 são de um domo de regenerador de câmara de combustão interna, nesse espaço está a parte de cima do empilhamento, formado por tijolos refratários chamados de *checkers*. Essa região do regenerador composta pelo domo e a camada superior do *checker* pode atingir temperaturas de até 1450°C, fato que favorece a utilização do compósito de alta emissividade pois tem-se alta temperatura e carga a ser aquecida (DIDIER, 1990).

Figura 6 – Domo de um regenerador.



Fonte: Autor, 2015.

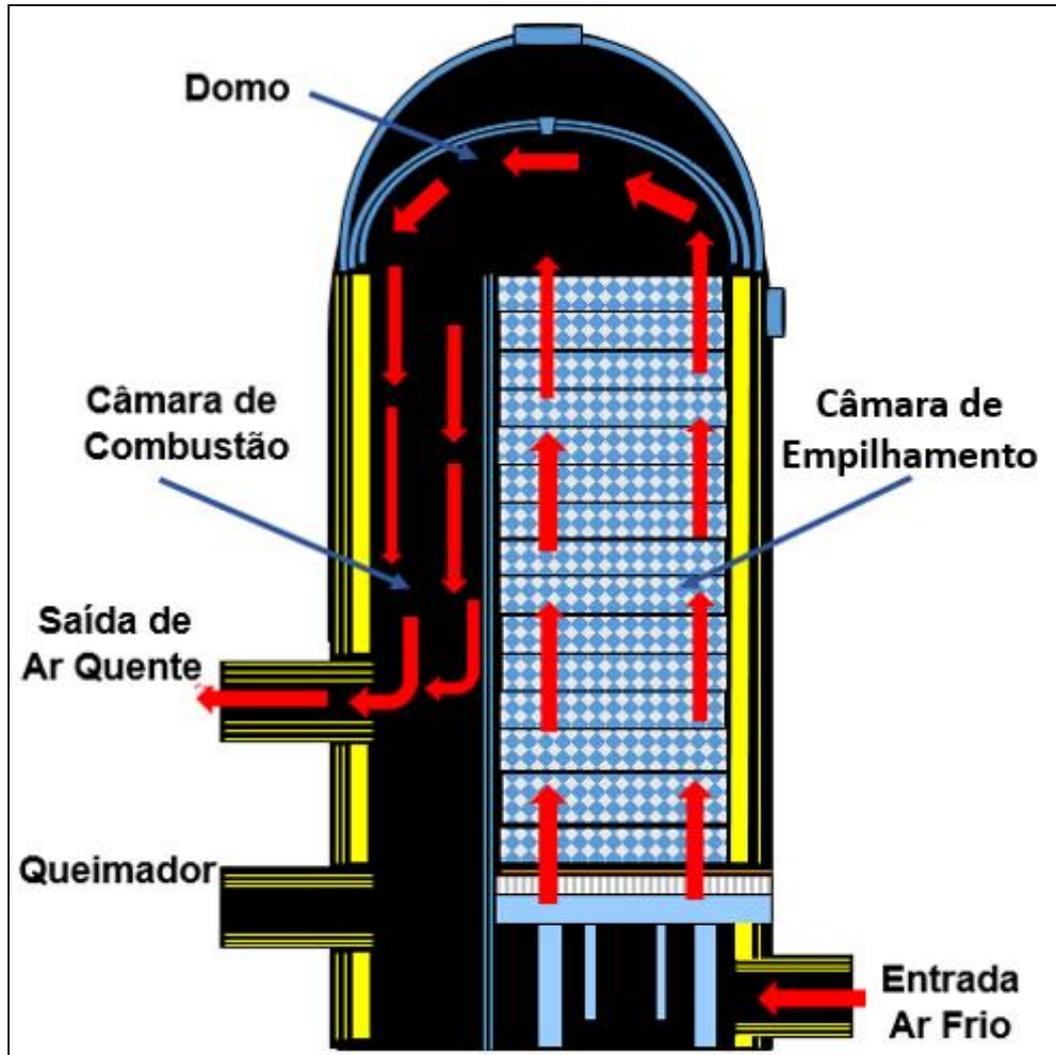
Figura 7 – Detalhe do *checker*.



Fonte: Autor, 2015.

Os detalhes dos tijolos refratários dos chekers, eles são os responsáveis por armazenar calor durante o ciclo de aquecimento, e desprender calor durante o ciclo de sopro para o Alto Forno (DIDIER, 1990).

Figura 8 – Regenerador com câmara de combustão interna (Sopro).



Fonte: Autor, 2014.

A figura 8 apresenta um regenerador com câmara de combustão interna durante o ciclo de sopro. Nessa etapa do processo ocorre a inversão do fluxo, o ar é impulsionado pela entrada de ar frio por potentes moto-sopradores forçando sua passagem pela câmara de empilhamento. Ao passar por todo o empilhamento de *checkers* o ar frio rouba calor do refratário até chegar no domo, quando então entra em corrente descendente pela câmara de combustão até sair pela saída de ar quente em direção ao alto forno. Nesse momento do processo o ar frio que entrou com temperatura em torno de 150°C, sairá com temperatura em torno de 1100°C para os altos fornos. A troca térmica é feita por condução, convecção e radiação (DIDIÉ, 1990).

Nas figuras 9 e 10 pode-se ver o domo e o topo da câmara de combustão de um regenerador. Essa câmara é responsável por conduzir o ar quente do queimador até o domo, quando está em processo de aquecimento. Quando o regenerador passa para o ciclo de sopro, essa mesma câmara conduz o ar quente proveniente da câmara de empilhamento até a linha de ar quente (DIDIER, 1990).

Figura 9 – Domo de um regenerador.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 10 – Vista do topo da câmara de combustão.



Fonte: Autor, 2015.

### 4.1.3. Fornos de reaquecimento de placas ou tarugos

Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semiacabados, (tarugos ou placas}, até que o material esteja suficientemente plástico para ser laminado. Os fornos de reaquecimento são divididos em dois grupos principais, a saber: intermitentes e contínuos.

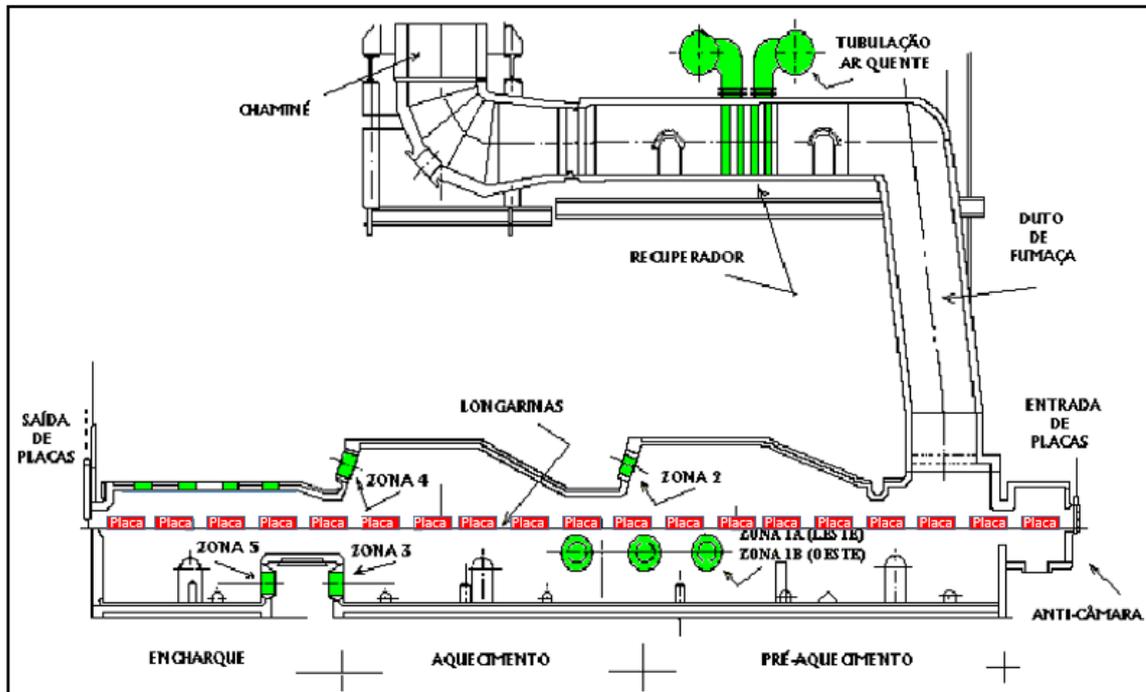
Intermitentes: São aqueles em que o material a ser aquecido é carregado e permanece estacionário sobre a soleira até atingir a temperatura de laminação ou forjamento. Trabalham segundo uma curva determinada de aquecimento e de resfriamento.

Contínuos: Têm aplicação para placas ou tarugos, em grandes quantidades repetitivas. Estes fornos possuem, em geral, várias zonas e o material é carregado em uma extremidade, sendo forçado a atravessar o forno pela ação de um empurrador.

Os fornos contínuos possuem, em geral, várias zonas de aquecimento em seu interior. O material é carregado em uma extremidade, sendo forçado a caminhar pelo interior do forno pela ação de empurradores ou vigas. Nos fornos contínuos, tanto a carga como a descarga, se realizam de maneira periódica durante a operação. Os fornos contínuos podem ser classificados quanto a maneira como as peças são aquecidas e conduzidas no interior do forno em: fornos de empurrar e fornos de vigas caminhantes. Uma das vantagens dos fornos de vigas caminhantes é a possibilidade de esvaziamento ao final da jornada, visto que os fornos de empurrar não apresentam esta possibilidade, o material permanece inativo dentro do forno a altas temperaturas várias horas (MACHADO, 2016).

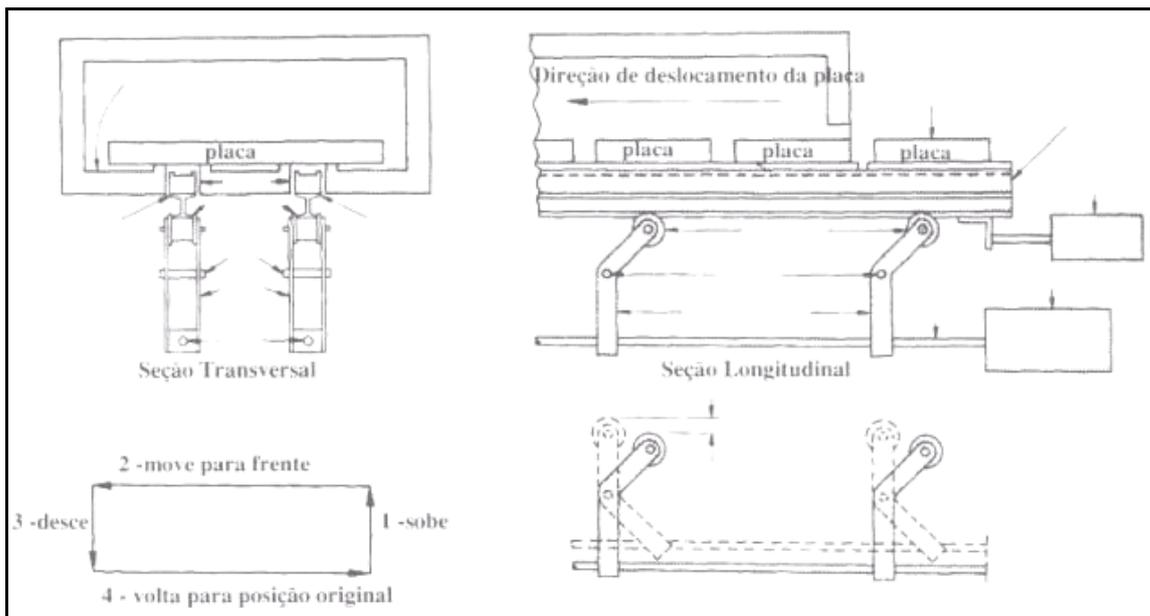
As figuras 11 e 12 mostram o esquema de um forno de reaquecimento de placas contínuo de vigas caminhantes.

Figura 11 – Esquemático de forno contínuo.



Fonte: Adaptação autor, 2015.

Figura 12 – Corte transversal e longitudinal do forno contínuo.



Fonte: Machado, 2016.

## 4.2. Materiais refratários

Os refratários são materiais que apresentam, dentre as propriedades mais importantes, a capacidade de resistir às altas temperaturas sem entrar em fusão ou se decompor, além de manter as características de material inerte e não-reativo quando submetidos a ambientes agressivos. (CALLISTER, 2002)

A NBR 8826 da ABNT, de abril de 1997 define refratário como sendo: Um material que pertence ao grupo dos materiais cerâmicos, podendo ser natural ou artificial, conformado ou não, geralmente não metálico, que retém a forma física e a identidade química quando submetido a elevadas temperaturas.

Os refratários também devem apresentar:

- Resistência mecânica a frio e em altas temperaturas;
- Resistência a choques térmicos;
- Porosidade de acordo com a aplicação;
- Resistência à erosão e abrasão;
- Resistência ao ataque de agentes químicos;
- Condutibilidade térmica;
- Dilatação térmica expansiva e reversível;
- Densidade adequada;
- E outras.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, os materiais refratários podem ser classificados de diversas formas. É preciso se atentar aos diversos tipos de materiais refratários existentes pois, para cada tipo, há uma aplicação distinta. Como o objetivo do trabalho é utilizar um compósito de alta emissividade sobre o refratário, é preciso conhecer suas características físico/químicas e de aplicação.

#### 4.2.1. Classificação dos refratários de acordo com a forma física

A ABNT – NBR 10237 (2001), classifica os materiais refratários em conformados e não conformados, de acordo com sua forma física. Os materiais conformados são aqueles que possuem dimensões e formatos definidos durante a fabricação. Já os materiais não conformados são aqueles que possuem sua forma final moldados no local da aplicação, como cimentos, argamassas, concretos e outros. A figura 13 é o resumo quanto à forma física, e na figura 14 alguns exemplos de materiais moldados.

Figura 13 – Classe de refratários quanto à forma

Grupo	Classe	
Conformados	Formatos padronizados	Arco
		Cunha
		Paralelos
		Radiais
	Formatos especiais	
Não conformados	Argamassas	
	Concretos densos e isolantes	
	Massas de socar	
	Massas plásticas	
	Massas de projeção	
	Massas granuladas secas	

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10237, 2001.

Figura 14 – Materiais refratários densos.



Fonte: IBAR Ltda., 2015.

#### 4.2.2. Quanto à natureza química e mineralógica dos constituintes

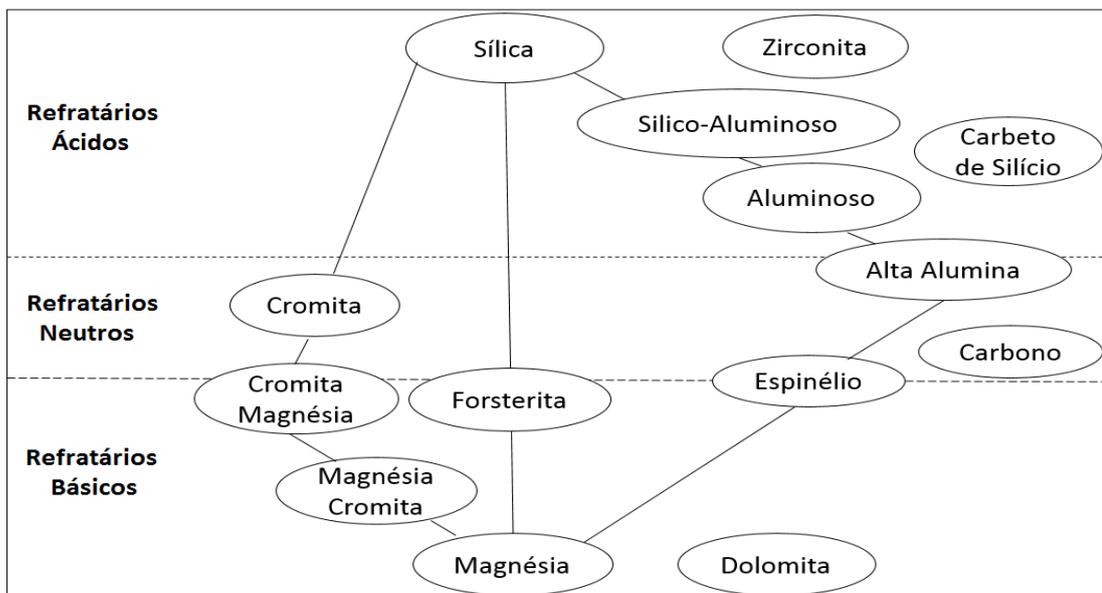
Os refratários estão classificados em função da composição químicas e mineralógica da matéria-prima predominante na mistura que os constitui. É preciso saber exatamente a qual grupo químico o material refratário pertence pois isso é essencial quando for estabelecer sua aplicação, a figura 15 mostra um resumo (TECNOFIRE, 2012).

As matérias-primas normalmente empregadas na fabricação dos refratários são classificadas em três grupos:

- Refratários ácidos
- Refratários básicos
- Refratários neutros

Nota – Observar nesta classificação a inclusão de alguns refratários que, por não se enquadrarem satisfatoriamente em nenhum dos três grupos mencionados, constituem-se nos chamados refratários especiais. (ABNT – NBR 10237, 2001).

Figura 15 – Classificação dos refratários quanto ao comportamento químico.



Fonte: TecnoFire, 2012.

A figura 16 representa a classe dos refratários quanto à sua natureza química e mineralógica, e também a relação entre refratários ácidos, básicos e neutros divididos por suas respectivas classes. É de suma importância a correta identificação química dos materiais durante a preparação dos refratários, sejam eles moldados ou não. Assim torna-se necessária fazer uma análise entre o local onde serão instalados (equipamento) e os agentes presentes no processo que poderão causar desgastes, erosão, choques térmicos ou ataques químicos, levando ao colapso do revestimento refratário (TECNOFIRE, 2012).

Figura 16 – Classe quanto à natureza química e mineralógica dos constituintes.

<b>Grupo</b>	<b>Classe</b>	
Ácidos	Silicosos ou de sílica.	$\text{SiO}_2 > 65,00\%$
	Sílico-aluminosos ou de sílica-alumina.	$22,00\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 45,99\%$
Básicos	Magnesianos ou de magnésia	$\text{MgO} > 81,00\%$
	Magnesiano-cromíticos ou de	$55,00\% < \text{MgO} < 80,99\%$
	Cromomagnesianos ou de cromita-	$35,00 < \text{MgO} < 54,99\%$
	Dolomíticos ou de dolomita	$\text{MgO} > 25,00\%$
	De magnésia-carbono	$\text{C} > 0\%$
Neutros	Aluminosos ou de alumina	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 46,00\%$
	De alumina-carbono	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 46,00\% + \% \text{C}$
	De alumina-carbeto de silício-carbono, de silício carbono	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 46,00\% + \% \text{SiC} + \% \text{C}$
	Aluminosos-cromíticos ou de alumina-	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 46,00\% + \% \text{Cr}_2\text{O}_3$
	Cromíticos ou de cromita	$\text{Cr}_2\text{O}_3 > 25,00\%$
	De carbono	Eletrografite $> 0\%$
	Grafíticos ou de grafita	$\% \text{ Grafita conf. aplicação}$
Especiais	De carbeto de silício	$\text{SiC} > 50,00\%$
	De cordierita	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{MgO}$
	De mulita	$56,00\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 79,00\%$

Fonte: Barros, 2013.

Todos os materiais refratários possuem restrições quanto a sua utilização em altas temperaturas e para cada circunstância existe um material mais apropriado ao processo. Como exemplo, o carbeto de háfnio (HfC) é o que apresenta maior ponto de fusão entre os compósitos, fundindo-se a 3890°C. O carbono destaca-se como elemento químico com seu ponto de fusão ocorrendo em 3700°C. Não há substância em estado sólido quando submetida a pressão normal e temperatura acima de 4000°C. (SEGADÃES, 1997). A figura 17 cita alguns óxidos refratários e seus respectivos pontos de fusão.

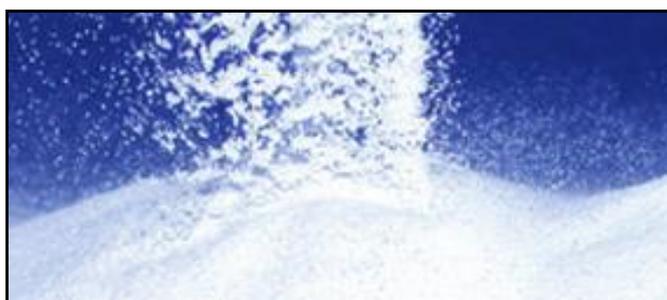
Figura 17 – Ponto de fusão dos óxidos mais refratários.

Classe	Ponto de fusão (°C)	Observações
Sílica, SiO <sub>2</sub>	1726	
Alumina, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2054	
Mulita, 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	1828	
Magnésia, MgO	2800	
Espinélio, MgO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2135	
Cromia, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2400	Muito cara
Cal, Cao	2570	Hidrata
Zircônia, ZrO <sub>2</sub>	2700	
Berília, BeO	2600	Tóxica
Tória, ThO <sub>2</sub>	3000	Radioativa

Fonte: SEGADÃES,1997.

Exemplo da forma pura de óxido de alumínio (Figura 18), também conhecido como alumina calcinada. Ela é produzida por meio da calcinação do hidróxido de alumínio (ALCOA, 2015).

Figura 18 – Óxido de alumínio.

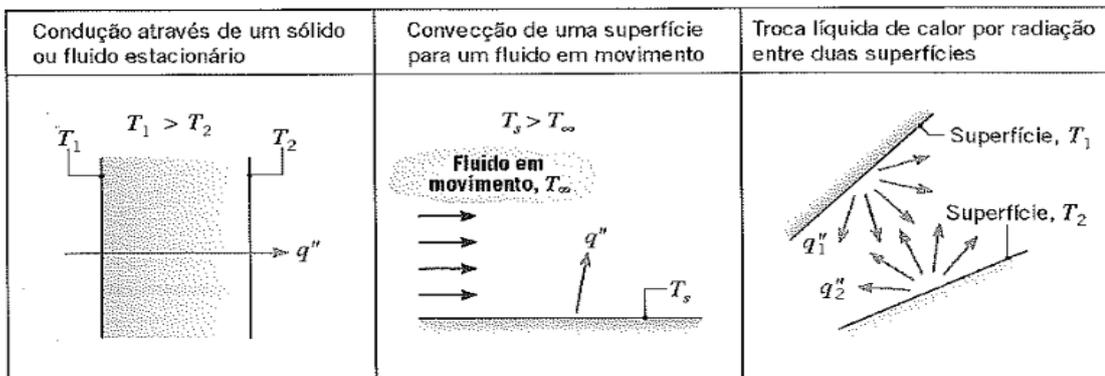


Fonte: Alcoa, 2016.

### 4.3. Transferência de calor

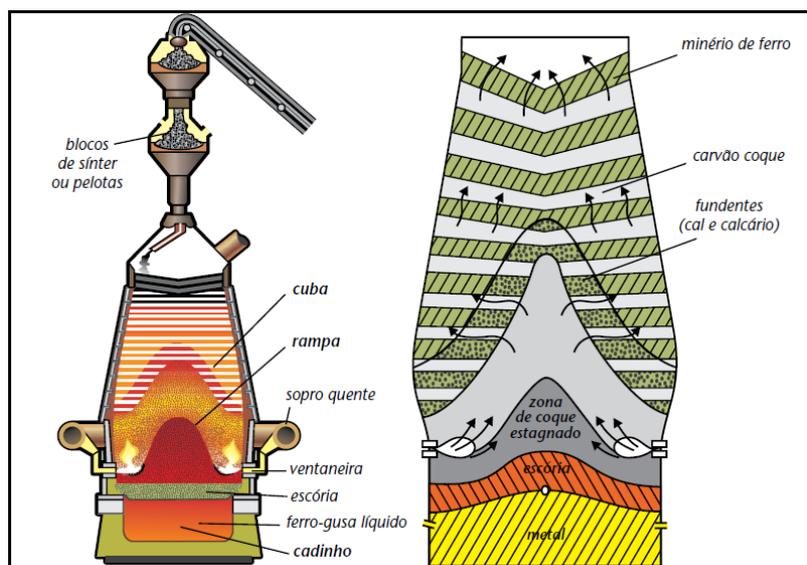
Para que Altos fornos, regeneradores, fornos de reaquecimento de placas ou quaisquer outros tipos de equipamentos siderúrgicos possam concluir seus processos, eles necessitam e utilizam todos os modos de transferência de calor. Os três tipos existentes de transferência de calor e suas relações com as leis físicas serão aqui tratadas e serão estudados os fenômenos de condução, convecção e radiação, a figura 19 exemplifica os três modos de transferência de calor e a figura 20 mostra o interior de um Alto Forno (SENAI, 2015).

Figura 19 – Modos de transferência de calor.



Fonte: INCROPERA, 2008.

Figura 20 – Transferência de calor dentro de um alto forno.



Fonte: SENAI, 2015.

### 4.3.1 Condução

A condução pode ser vista como a transferência de energia de partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas (Figura 21). Essa energia está relacionada ao movimento de translação aleatório, assim como aos movimentos internos de rotação e de vibração das moléculas (INCROPERA, 2008). É bom lembrar que o calor flui sempre das temperaturas mais altas (moléculas com maior energia cinética) para as temperaturas mais baixas (moléculas com menor energia cinética). Os materiais sólidos são melhores condutores que líquidos, e líquidos são melhores condutores que gases. Os metais são excelentes condutores de calor, e no outro extremo, o ar é um péssimo condutor de calor. A lei de Fourier da condução térmica, mostrada na equação 1 (INCROPERA, 2008), foi que a expressou pela primeira vez em seu livro sobre transferência de calor em 1822.

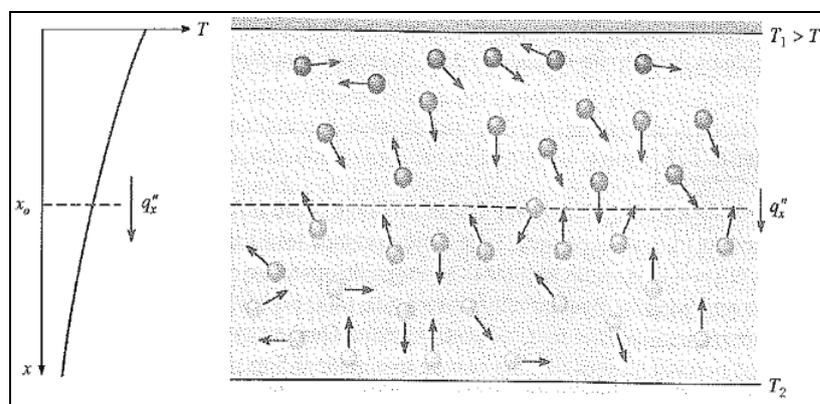
$$Q_{\text{cond}} = -kA \cdot (dT/dx) \quad (1)$$

Onde:  $k$  - é a condutividade térmica do material, que é a medida da capacidade do material de conduzir calor; ( $W / (m \cdot K)$ )

$dT/dx$  - é o gradiente de temperatura ( $K/m$ ).

$A$  - Área da seção transversal. ( $m^2$ )

Figura 21 – Transferência de calor por condução.



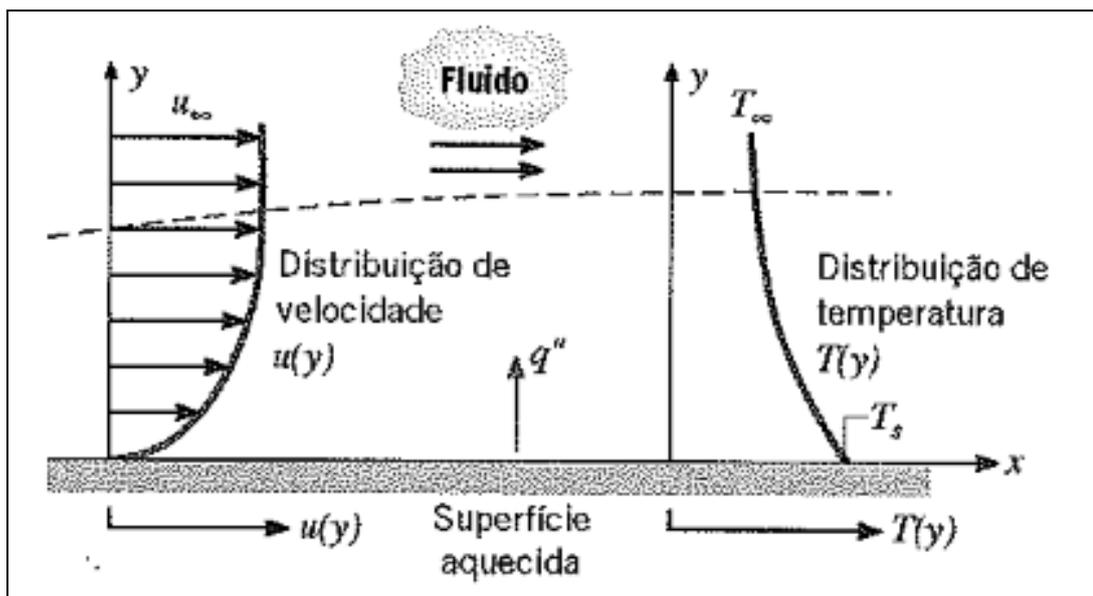
Fonte: INCROPERA, 2008.

### 4.3.2. Convecção

A transferência de calor por convecção possui dois mecanismos. A transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), e a energia também são transferidas pelo movimento global, ou macroscópico, do fluido. O modo de transferência de calor por convecção é mantido pelo movimento molecular aleatório e pelo movimento global do fluido no interior da camada limite. A contribuição devido ao movimento molecular aleatório (difusão) é dominante próximo à superfície, onde a velocidade do fluido é baixa (INCROPERA, 2008).

Esse tipo de transferência de calor ocorre somente em líquidos e gases. Consiste na transferência de calor dentro de um fluido, utilizando movimentos do próprio fluido. O exemplo que acontece na atmosfera ilustra o fenômeno, o calor ganho na camada mais baixa por radiação ou condução da terra é frequentemente transferido por convecção, como o exemplo da figura 22. A convecção ocorre como consequência de diferenças na densidade do ar. Ar quente por ser menos denso que o ar frio sobe forçando o ar frio a descer. O ar mais frio é então aquecido pela superfície e o processo é repetido (INCROPERA, 2008).

Figura 22 – Transferência de calor por convecção.



Fonte: INCROPERA, 2008.

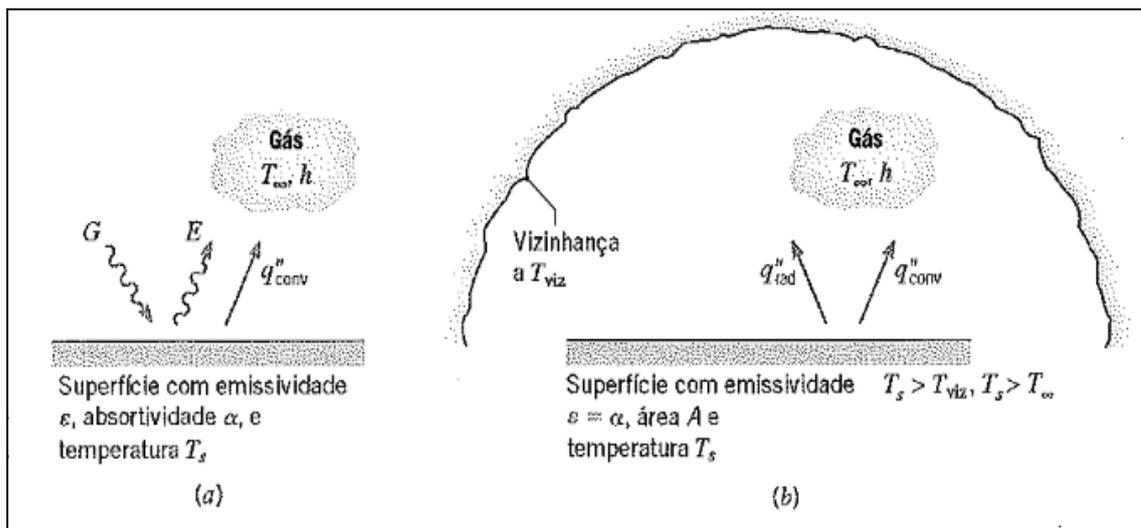
### 4.3.3. Radiação

A figura 23 ilustra o terceiro modo de transferência de calor é a radiação. A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula. Ainda que todas as atenções sejam para a radiação a partir de superfícies sólidas, a emissão ocorre também a partir de gases e líquidos. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria (INCROPERA, 2008).

Pode-se dizer que a radiação consiste de ondas eletromagnéticas viajando com a velocidade da luz. Entre os três tipos de condução existentes, a radiação é a única que pode ocorrer no espaço vazio, como essas ondas podem propagar-se no vácuo, não é necessário que haja contato entre os corpos para haver transferência de calor. Esta é a principal forma pela qual a Terra recebe energia do Sol e libera energia para o espaço. (INCROPERA, 2008).

Todos os corpos emitem radiações térmicas que são proporcionais à sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de calor que o objeto irradia.

Figura 23 – Transferência de calor por radiação.



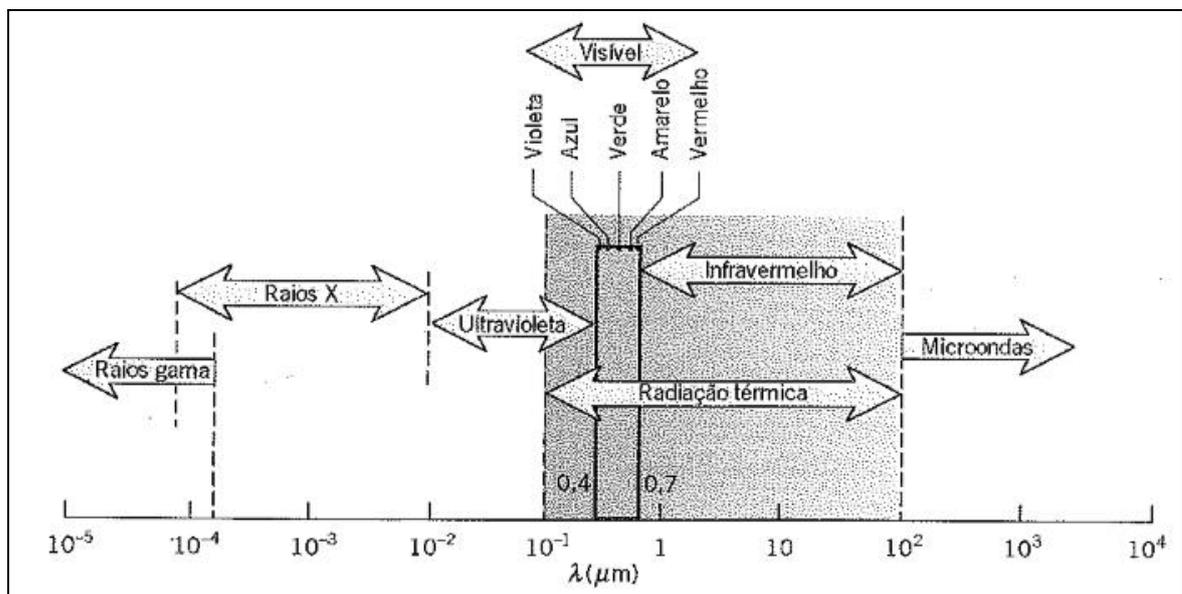
Fonte: INCROPERA, 2008.

#### 4.4. Teoria da emissividade

Para entender o funcionamento básico da emissividade, é necessário conhecer o espectro da radiação eletromagnética.

Em INCROPERA (2008) e YUNUS (2009), os estudos mostram que as radiações de pequeno comprimento de onda raios gama, raios X e ultravioleta (UV) são principalmente de interesse dos físicos de altas energias e engenheiros nucleares, enquanto que as micro-ondas e as ondas de rádio, que possuem grandes comprimentos de ondas são de interesse dos engenheiros eletricitas. É a porção intermediária do espectro, que se estende de 01 até 100  $\mu\text{m}$  e que inclui uma fração da UV e todo o visível e o infravermelho, que é chamada de radiação térmica, porque é causada por e afeta o estado térmico ou a temperatura da matéria. Por essa razão a radiação térmica é pertinente à transferência de calor (Figura 24).

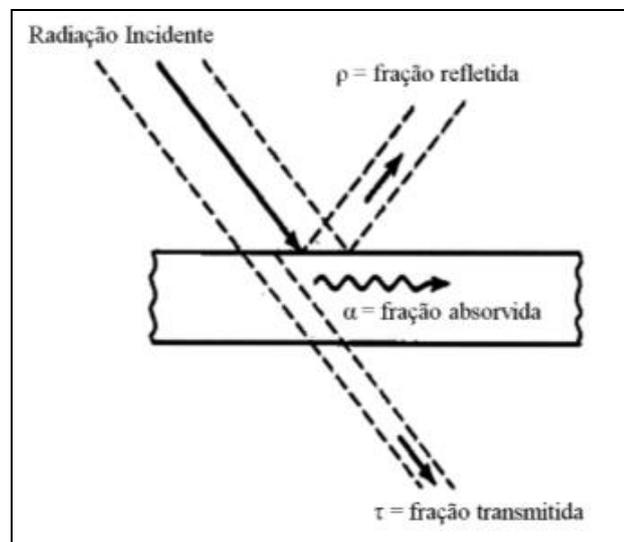
Figura 24 – Espectro da radiação eletromagnética.



Fonte: INCROPERA, 2008.

Siegel (2008) disse que as radiações dependem diretamente do comprimento da onda da radiação incidente e seu comportamento são diferentes para materiais sólidos, líquidos e gasosos. Como o estudo visa a aplicação do revestimento em materiais sólidos, é preciso considerar as conclusões que dizem sobre as frações de radiações refletidas, absorvidas e transmitidas dependem diretamente da rugosidade superficial, temperatura, comprimento da onda e o ângulo que a radiação incide na superfície sólida, vide figura 25.

Figura 25 – Demonstração da incidência da energia radiante em um corpo sólido.



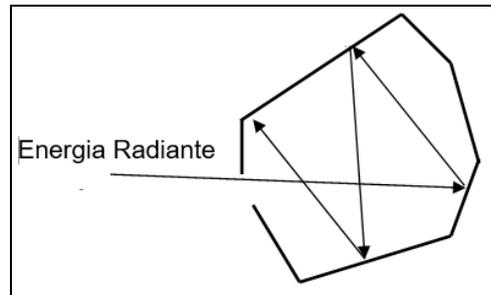
Fonte: Holman, 1983.

Um dos parâmetros utilizados para medir a reflexão ou absorção de radiação, é o corpo negro. Todo corpo emite um espectro de radiação universal que depende apenas de sua temperatura, não de sua composição. Um corpo negro é um corpo hipotético que emite (ou absorve) radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda, de forma que (UFPR, 2015):

- 1) Absorve toda a radiação incidente, independentemente de seu comprimento de onda ou de sua direção;
- 2) Para uma dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia que um corpo negro;
- 3) Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção.

É correto afirmar que o corpo negro é um emissor e absorvedor perfeito e serve como padrão para comparação das propriedades radiantes dos corpos reais. A figura 26 ilustra uma cavidade negra onde teoricamente existe a absorção completa.

Figura 26 – Cavidade negra, absorção completa.



Fonte: adaptado de Yunus, 2009.

O corpo negro é o emissor e absorvedor perfeito, para tanto considera-se que sua emissividade  $\epsilon$  é igual a 1, a figura 27 apresenta uma comparação entre um corpo negro e um corpo real. A equação 2 resume o que Stefan-Boltzmann concluiu indicando que a intensidade de energia radiada nos corpos negros é proporcional à temperatura elevada quarta potência. Esse fenômeno é conhecido como Lei de Stefan-Boltzmann e é representada pela equação 2 (YUNUS, 2009):

$$I = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

Onde:

$I$  – É o potencial emissivo de um corpo negro ( $W/m^2$ );

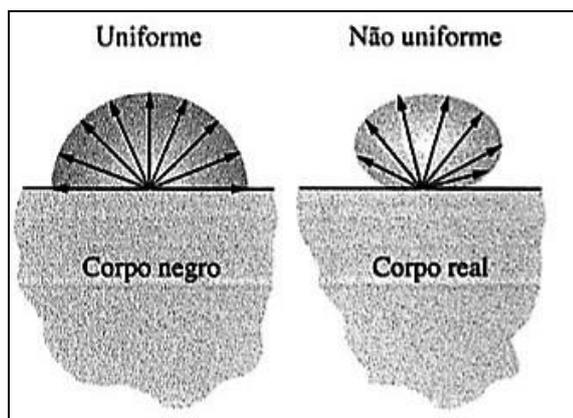
$\sigma$  – É a constante de Stefan-Boltzmann; ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}k^{-4}$ )

$T$  – Temperatura absoluta (K);

$\epsilon$  – 1 para corpos negros.

Pode-se, então, dizer que todo material com temperatura acima de zero Kelvin (zero absoluto) emite radiação eletromagnética, esta emissão depende de uma propriedade denominada emissividade. Com valores na faixa  $0 < \epsilon < 1$ , essa propriedade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento. (DEWITTT, 2003).

Figura 27 – Comparação entre um corpo negro e um corpo real.



Fonte: Yunus A. Çengel, 2009.

Alguns valores típicos de emissividade são mostrados na figura 28, esses valores foram medidos e em alguns casos são utilizados como parâmetros para a identificação de emissividades desconhecidas.

Figura 28 - Valores típicos de emissividade para alguns materiais

Descrição/Composição	Emissividade ( $\epsilon$ )*
Aço inoxidável – típico, polido	0,17
Alumínio – altamente polido, película	0,04
Água	0,96
Areia	0,90
Concreto	0,88 – 0,93
Janela de vidro	0,90 – 0,95
Materiais de construção – placas de amianto	0,93 – 0,96
Materiais de construção – tijolo, vermelho	0,93 – 0,96
Materiais de construção – estuque ou placa de gesso	0,90 – 0,92
Materiais de construção - madeira	0,82 – 0,92
Papel, branco	0,92 – 0,97
Pavimentação de asfalto	0,85 – 0,93
Rochas	0,88 – 0,95
Solo	0,93 – 0,96
Tecido	0,75 – 0,90
Tintas – pretas (Parsons)	0,98
Tintas – branca acrílica	0,90
Tintas – branca óxido de zinco	0,92
Vegetação	0,92 – 0,96

Fonte: DeWitt, 2003.

A lei de Kirchhoff da radiação indica que a emissividade e a absorptância de uma superfície a uma determinada temperatura e comprimento de onda são iguais. Em muitas aplicações práticas, a temperatura superficial e a temperatura da fonte de radiação incidente são da mesma ordem de grandeza, e a absorptância média de uma superfície é igual à sua emissividade média, equação 3 (YUNUS, 2009), figura 29.

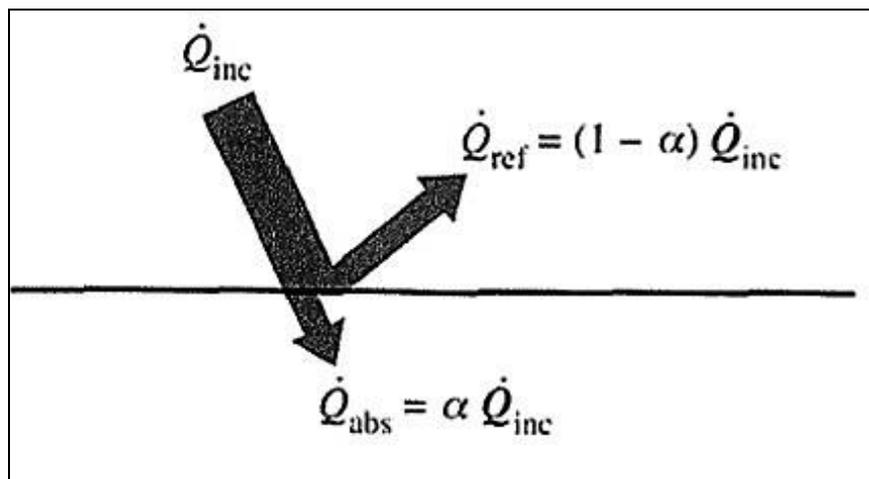
$$Q_{\text{abs}} = \alpha Q_{\text{inc}} \quad (3)$$

Onde:

- $Q_{\text{inc}}$  é a taxa em que a radiação incidente sobre a superfície e;
- $\alpha$  é a absorptância da superfície.

Para superfícies opacas (não-transparentes), a porção da radiação incidente não absorvida pela superfície é refletida de volta.

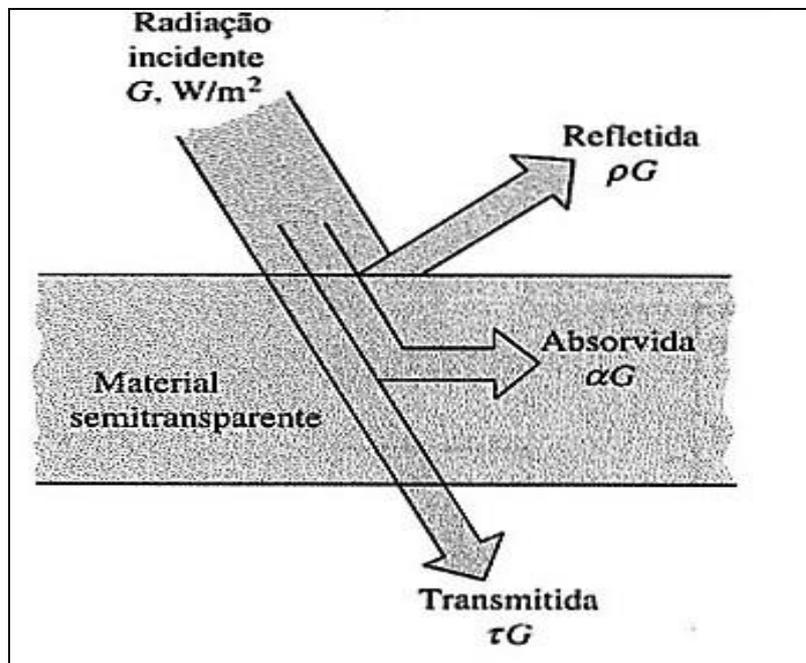
Figura 29 - Absorção da radiação incidente em superfície opaca de absorptância  $\alpha$ .



Fonte: Yunus, 2009.

Tudo que nos rodeia emite radiação e a emissividade representa as características de emissão desses corpos. O fluxo de radiação incidente sobre uma superfície é chamado de irradiação e é denotado por  $G$ . Quando a radiação atinge uma superfície, parte dela é absorvida, parte dela é refletida, sendo que a parte restante, se houver, é transmitida, conforme ilustrado na Figura 30. A fração de irradiação absorvida pela superfície é chamada de absorvância  $\alpha$ , a fração refletida pela superfície é chamada de refletividade  $\rho$  e a fração transmitida é chamada de transmissividade  $\tau$  (YUNUS, 2009).

Figura 30 - Absorção da radiação incidente



Fonte: Yunus,2009.

A absorvidade é a divisão da radiação absorvida pela radiação incidente.

$$\alpha = \text{Radiação absorvida} / \text{Radiação incidente} = G_{\text{abs}} / G \quad \text{para } 0 \leq \alpha \leq 1$$

A refletividade é a divisão da radiação refletida pela radiação incidente.

$$\rho = \text{Radiação refletida} / \text{Radiação incidente} = G_{\text{ref}} / G \quad \text{para } 0 \leq \rho \leq 1$$

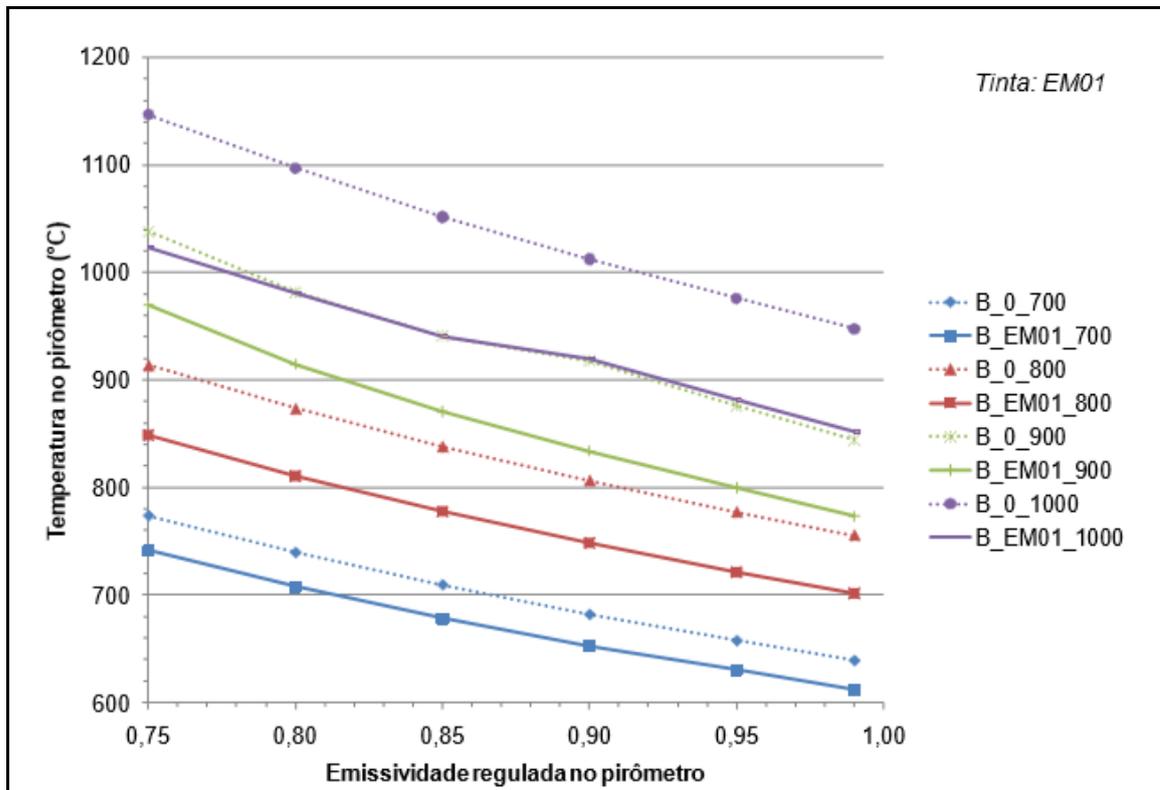
A transmissividade é a divisão da radiação transmitida pela radiação incidente.

$$\tau = \text{Radiação transmitida} / \text{Radiação incidente} = G_{\text{tr}} / G \quad \text{para } 0 \leq \tau \leq 1$$

Nos estudos de Novo (2012), observou-se a eficiência dos revestimentos emissivos, os corpos de provas recobertos apresentaram uma mesma temperatura quando comparados com corpos de prova sem o revestimento, para uma emissividade inferior. Como a proposta do revestimento é reemitir mais rapidamente o calor de volta ao sistema, dessa maneira o substrato se torna menos suscetível à absorção de calor, ou seja, os materiais pintados apresentam redução na temperatura para a mesma emissividade regulada no equipamento.

Ainda segundo Novo (2012), do ponto de vista industrial um forno de fusão e espera, por exemplo, o revestimento de alta emissividade poderia favorecer uma conservação de energia mais eficiente, pois haveria redução de perdas térmicas pelo refratário. A figura 31 apresenta o comparativo entre corpos de provas pintados.

Figura 31 – Comparação entre corpos de provas B, e EM01 pintados com tinta de alta emissividade em diferentes temperaturas do forno.



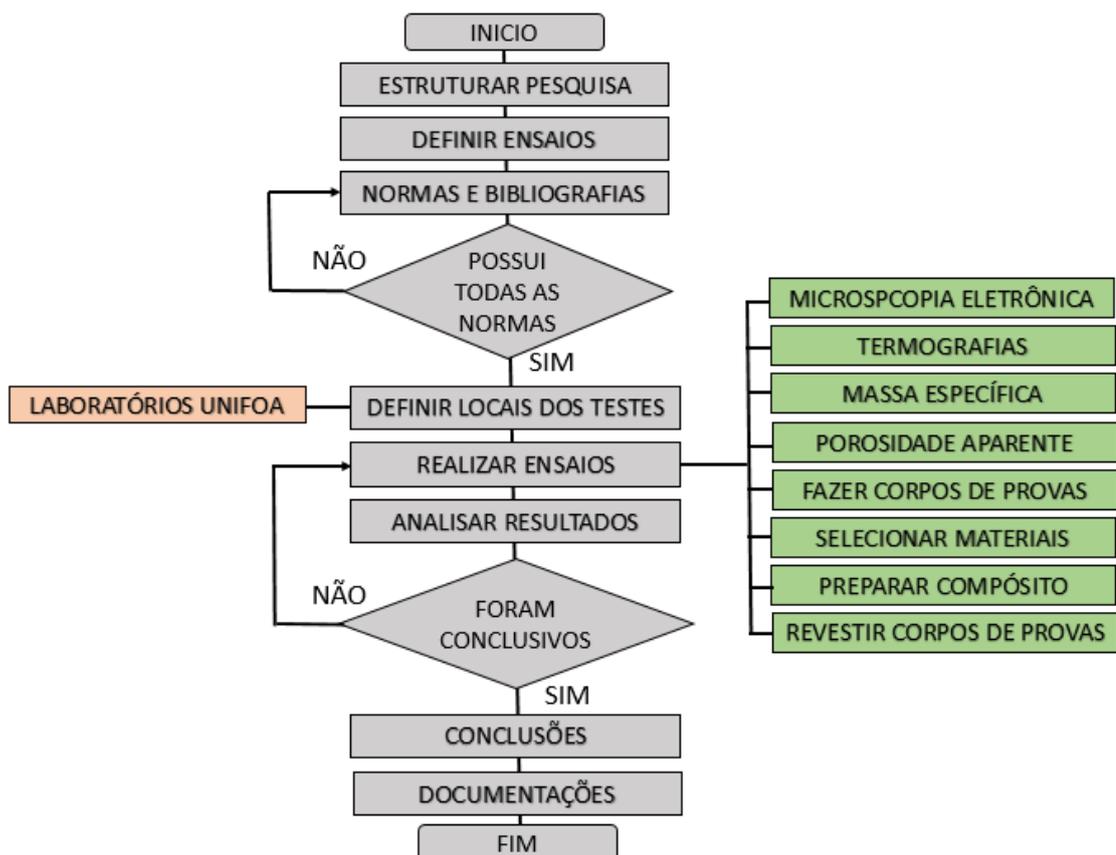
Fonte: Novo, 2012.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida para o cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho foi otimizada e realizada para avaliar a viabilidade técnico-científica da proposta.

Todos os materiais utilizados para o desenvolvimento do compósito são listados nesse tópico além dos tijolos refratários utilizados como corpos de provas. Os métodos utilizados seguiram rigorosamente o prescrito nas normas brasileiras, e a figura 32 apresenta o organograma do trabalho em forma de blocos.

Figura 32 – Fluxograma do trabalho.



Fonte: Autor, 2016.

## 5.1. MATERIAIS

Os regeneradores e fornos de reaquecimento de placas são revestidos internamente com tijolos refratários densos, além das diversas camadas de isolantes, esse mesmo material é utilizado no empilhamento dos *checkers*. As escolhas desses materiais estão ligadas diretamente às suas características de alta refratariedade, resistência ao choque térmico e tolerância química. Como o objetivo do trabalho foi desenvolver um compósito que aumente a taxa de irradiação térmica dos refratários, foram utilizados como corpos de provas o tijolo ALUKOR 85 e uma peça de Checker, pois esses são materiais que revestem e compõem internamente os regeneradores e os fornos de reaquecimento de placas. Esses corpos de provas foram a base para a aplicação dos revestimentos e serviram para comprovar os resultados.

### 5.1.1. Tijolo ALUKOR 85

Os corpos de prova foram retirados de tijolos refratários ALUKOR 85 fabricados pela Empresa Magnesita S.A., esses tijolos são utilizados na parte superior dos regeneradores e nas paredes dos fornos de reaquecimento de placas onde as temperaturas podem alcançar patamares de até 1450°C. São caracterizados por serem densos e de alta alumina com dimensões de 229 mm x 114 mm x 76 mm. A figura 33 é do tijolo que foi utilizado para os experimentos. Trata-se de uma peça refratária de alta alumina, queimada e resistente a choques térmicos. Essas são algumas das características dos revestimentos refratários, outro indicativo importante é a resistência à compressão a frio que nesse caso é de 75MPa.

Figura 33 – Tijolo ALUKOR 85, Magnesita.



Fonte: Autor, 2015.

Os dados completos e suas características físico-químicas estão na ficha de dados técnicos (FDT) da figura 34:

Figura 34 – Ficha de Dados Técnicos (FDT) ALUKOR 85.

				
Praça Louis Ensch, 240 CEP: 32210-902 Cidade Industrial   Contagem   MG   Brasil				
Telefone: +55 31 3388-1147 qualidade@magnesita.com.br www.magnesita.com.br				
FOLHA DE DADOS TÉCNICOS				
<b>ALUKOR-85</b>	EDIÇÃO: 23/7/2013			
<b>CÓDIGO DA MARCA</b>	<b>718</b>			
<b>DESCRIÇÃO DO PRODUTO</b>	Tijolos e peças refratárias aluminosas, queimadas. Resistente ao choque térmico.			
<b>APLICAÇÕES PRINCIPAIS</b>	Fornos rotativos: zona de transição, cabeçote, pré-resfriamento e resfriadores. Abóbodas de fornos elétricos. Painéis de aço.			
PROPRIEDADES QUÍMICAS (%)				
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$
78,2	16,4	3,2	1,4	0,4
PROPRIEDADES FÍSICAS				
	Valor Típico	Unidade		
Densidade de massa aparente	2,71	(g/cm <sup>3</sup> )		
Porosidade Aparente	17,8	(%)		
Resistência a compressão a temperatura ambiente	75	(MPa)		
Resistência ao choque térmico (Ciclos 950° C x 15 min)	30	(Ciclos)		
NOTAS				
1 Os ensaios são realizados de acordo com as normas: ABNT, ASTM, EN, DIN e procedimentos internos.				
2 Para informações adicionais sobre segurança recomenda-se consultar a Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ da marca				
3 As análises químicas foram realizadas conforme metodologia da Magnesita Refratários, utilizando amostra em base calcinada.				
4 A análise química e ensaios especiais seguem o plano de amostragem da Gerência de Processos segundo o sistema da qualidade ISO 9001.				
5 Os dados técnicos foram obtidos a partir de corpos-de-prova desta marca, provenientes de produções industriais.				

Fonte: Magnesita, 2013.

### 5.1.2. *Checker*

Os *checkers* são as peças refratárias que compõem a câmara de empilhamento, e são responsáveis por guardar calor durante o ciclo de aquecimento dos regeneradores e desprender calor durante o ciclo de sopro. Quando o ar frio passa entre os furos dos *checkers* ocorre a transferência de calor do material refratário para o ar frio. As principais características dessas peças devem ser de resistência ao choque térmico e resistência à compressão. As figuras 35 e 36 mostram as peças de *checker* utilizadas como corpos de provas, elas foram fabricadas pela Empresa IBAR – Indústria Brasileira de Artigos Refratários Ltda. E na figura 37 são apresentadas suas características físico/químicas.

Figura 35 – Vista superior de um *checker*.



Fonte: Autor, 2015.

A figura 36 é de uma peça de *checker* empilhada, esse tipo de montagem pode chegar a 40 metros de altura e as aberturas internas são combinadas e alinhadas de modo a permitir a passagem plena do ar.

Figura 36 – Vista lateral de um *checker*.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 37 – Ficha de Dados Técnicos – ANDIBAR 60 CHECKER.

<b>IBAR</b>		Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários IBAR Ltda.		
<b>ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA – CSN</b>				
<b>NOME DO PRODUTO</b>	<b>ANDIBAR 60 CHECKER – QUALITY CODE HS (CHECKERS)</b>			
<b>DESCRIÇÃO DO PRODUTO</b>	Refratário aluminoso, a base de andalusita, conformado.			
<b>PRINCIPAL APLICAÇÃO</b>	Uso Geral			
<b>EMBALAGEM</b>	Padiola de madeira revestido com polietileno.			
<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	Rótulo contendo: nome do produto/cliente, formato/dimensão, quantidade, peso (bruto e líquido), nº de lote, data de fabricação e prazo de estocagem.			
<b>PRAZO DE ESTOCAGEM</b>	Indeterminado (se armazenado em condições adequadas)			
<hr/>				
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>	unit	Quality Code HS Checkers	Andibar 60 CHECKER	
			nominal	garantido
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≥57	63,0	≥57,0
SiO <sub>2</sub>	%		34,0	≤37,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≤1,5	1,0	≤1,5
Álcalis	%	≤0,6	0,4	≤0,6
TiO <sub>2</sub>	%	≤0,5	0,4	≤0,5
Impurezas	%	≤0,7	0,5	
<hr/>				
<b>PROPRIEDADES</b>	unit	Quality Code HS Checkers	Andibar 60 CHECKER	
			nominal	garantido
Densidade de massa aparente	g/cm <sup>3</sup>	>2,35	2,50	≥2,35
Porosidade Aparente	%	<22	20,0	≤22,0
Variação Linear Dimensional 1500°Cx4h	%	<0,2 / >-0,2	0,1	-0,2/0,2
Resistência a compressão	MPa	≥30	40,0	≥30,0
Creep 1400°C / 20-50h / 0,2MPa	%	≤0,2	0,1	≤0,2
Refratariedade sob carga 0,5%	°C	≥1420	1550	
Refratariedade sob carga 2,0%	°C	≥1580	1620	≥1580
Refratariedade sob carga 5,0%	°C	≥1600	1680	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Os ensaios são executados conforme método interno Ibar, que são baseados nas normas ABNT, ASTM, DIN e/ou normas de cliente.</li> <li>Estes valores estão sujeitos a variação e não deve ser usada para fins de especificação.</li> <li>Para aplicação e manuseio, consultar a folha de aplicação e segurança do produto.</li> </ol>				
Rev. 2-09/06/16				
<hr/> IBAR - Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários Ltda - Av. Ibar, 2 - 08559-470 - Poá - S.P. Fone: 11 4634-6600 Fax: 11 4636-2710 - C.N.P.J. 61.442.737/0002-30				

Fonte: IBAR, 2016.

### 5.1.3. Óxido de alumínio calcinado

A figura 38 mostra o primeiro componente utilizado na preparação do revestimento de alta emissividade. Trata-se da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com pureza de 98,5% e tamanhos dos grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ , fabricado pela Alcoa. O óxido de alumínio, também conhecido como alumina calcinada, é produzido por meio da calcinação do hidróxido de alumínio. É um material sintético e apresenta elevada pureza, elevada consistência química e granulométrica. Os óxidos de alumínio são fundamentais na produção de vidros, fibras de vidro, refratários, concretos refratários, alumina eletro fundida branca e outros.

Figura 38 – Óxido de alumínio calcinado (Alumina).

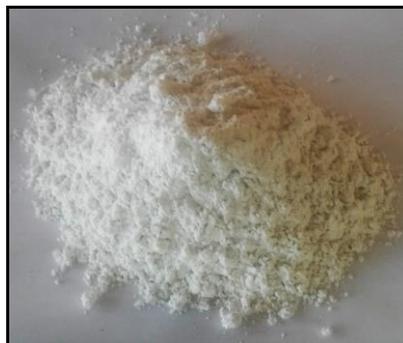


Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.4. Óxido de silício cristalino

O óxido de silício cristalino ( $\text{SiO}_2$ ), foi utilizado com pureza de 99,0% e tamanho dos grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ , fornecido pela Z-Tech, figura 39.

Figura 39 – Óxido de silício cristalino (Quartzo).



Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.5. Carbetto de silício

O carbeto de silício foi utilizado como um dos principais componentes para o aumento da taxa de irradiação térmica. Utilizam-se grãos com tamanho 100% abaixo de 90  $\mu\text{m}$ , e com 98,0% de pureza, fabricado pela Empresa Saint Gobain possui emissividade de 0,9, figura 40.

O Carbetto de Silício é um material de elevada resistência a erosão, corrosão e alta ciclagem térmica, possui alta dureza, leveza, pureza, alta condutibilidade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica. Tem resistência à compressão 10 vezes superior à sua resistência a tração. É 50% mais duro que o Carbetto de Tungstênio e 10 vezes mais do que aços inoxidáveis tratados. Esta extrema dureza combinada com alta pureza e microestrutura fina faz com que o Carbetto de Silício seja altamente resistente ao desgaste erosivo. Sua baixa porosidade e inércia química propicia trabalhar muito bem em ambientes de gases e líquidos quentes, atmosferas oxidantes e corrosivas como ácidos fortes e álcalis, mesmo em temperaturas extremamente altas (1.900°C).

Figura 40 – Carbetto de silício.



Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.6. Óxido de cromo

Outro componente importante na fabricação foi o óxido de cromo com 98,5% de pureza, emissividade de 0,81 e tamanho dos grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ , fornecido pela Empresa Z-Tech.

O  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  assume a estrutura de coríndon, que consiste de uma matriz hexagonal compacta de ânions óxidos com dois terços dos buracos octaédricos ocupados por cromo. Semelhante ao coríndon, o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  é um material duro, frágil (dureza Mohs 8-8,5). Não é facilmente atacado por ácidos ou bases, embora alcalinos fundidos deem cromita (sais com o  $24\text{-Cr}_2\text{O}$  ânion, para não serem confundidos com o mineral cromita). Fica marrom, quando aquecido, mas retorna à sua cor verde escuro quando resfriado. Também é higroscópico e a figura 41 mostra sua cor verde característica.

Figura 41 – Óxido de cromo.



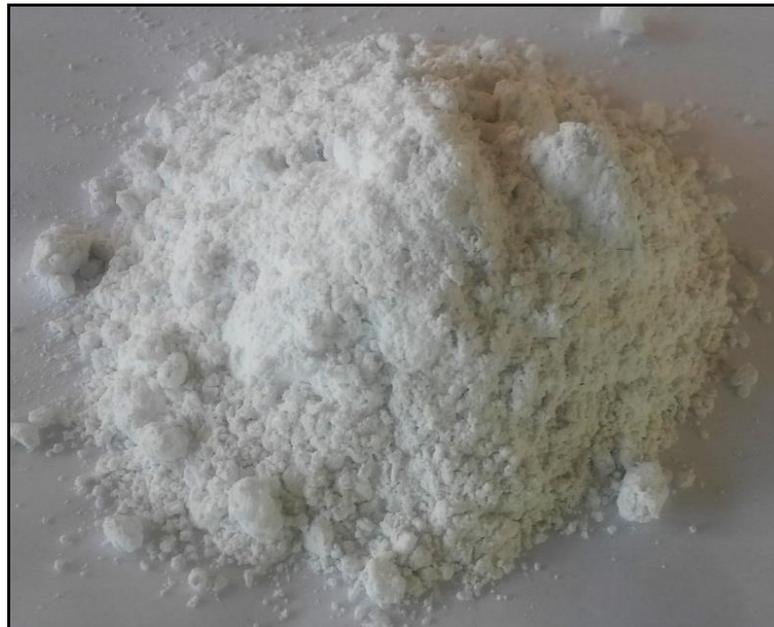
Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.7. Aluminato de cálcio

O agente ligante foi o Aluminato de cálcio a 70% de alumina com pureza de 97,5% e tamanho dos grãos 100% abaixo de 45 µm, fornecidos pela Empresa Z-Tech e mostrado na figura 42.

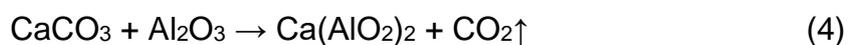
O CAC pode ser produzido por meio da fusão de uma mistura de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaCO}_3$ , ou pelo processo de calcinação dessa mistura a temperaturas entre 1315 e 1425°C, sendo esse último método o mais viável para a produção de CACs com composição uniforme. No método de fusão, o  $\text{CaCO}_3$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (DRISCOLL, 2000) são submetidos a temperaturas entre 1450 e 1550°C em fornos elétricos a arco. O aluminato de cálcio formado é resfriado e então moído na granulometria desejada.

Figura 42 – Aluminato de cálcio (70% Alumina).



Fonte: Autor, 2015.

De uma forma geral a formação do CAC pode ser descrita por meio da reação química mostrada na equação 4 (GARCIA, 2007):



A Tabela 1 apresenta um resumo de todos os materiais utilizados na preparação dos compósitos e utilizados como corpos de provas.

Tabela 1 – Materiais do projeto.

MATERIAL	FORNECEDOR	COMPOSIÇÃO	QUANTIDADE	EMISSIVIDADE
Tijolo Aluminoso	Magnesita S.A.	$Al_2O_3 + SiO_2$	2,0	0,83
Tijolo <i>Checker</i>	IBAR Ltda.	$Al_2O_3 + SiO_2$	2,0	0,80
Aluminato de Cálcio	Z-Tech	$Ca(AlO_2)_2$	1,0 Kg	-
Óxido de alumínio	Alcoa	$Al_2O_3$	1,0 Kg	0,90
Óxido de silício	Z-Tech	$SiO_2$	1,0 Kg	0,80
Óxido de cromo	Z-Tech	$Cr_2O_3$	1,0 Kg	0,81
Carbeto de silício	Saint Gobain	SiC	1,0 Kg	0,90

Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.8. Água

A água é fundamental no preparo do compósito, é responsável pelas reações que ocorrerão decorrentes de sua mistura com o aluminato de cálcio. O compósito utilizou 10% de água para o peso total do compósito seco. A água utilizada para a produção e mistura não deverá conter impurezas que possam prejudicar as reações dos componentes que a integram, pois, a água está diretamente atrelada às reações responsáveis pelo endurecimento. (BAUER, 2011). De acordo com Petrucci (1968) o excesso de água pode ser prejudicial, pelo fato de provocar uma redução considerável na resistência final de compressão. Foi utilizada água mineral e potável com temperatura de  $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , sem cloro.

## 5.2. MÉTODOS

Foi preciso estabelecer um parâmetro para comparar as emissividades dos revestimentos fabricados. Os corpos de provas sem o compósito serviram como ponto de partida uma vez que era esperado um aumento da emissividade para os corpos de provas com compósito.

### 5.2.1. Corte dos corpos de provas e determinação do volume

O tijolo ALUKOR 85 foi cortado em oito cubos com dimensões teóricas de 50 mm x 50 mm x 50 mm conforme figura 43, para isso foi utilizada uma serra de grande porte modelo Schaly 3020B com disco diamantado. Após o corte os corpos de prova foram devidamente medidos com paquímetro digital marca Mitutoyo de 150 mm modelo 500-196-30B, para que fossem determinadas corretamente suas dimensões e os resultados reais estão na tabela 2.

Figura 43 – Tijolo ALUKOR 85 cortado.



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 2 – Dimensões reais dos corpos de prova.

CORPOS DE PROVA SEM COMPÓSITO				
AMOSTRA CÚBICA	DIMENSÕES (mm)			VOLUME (cm <sup>3</sup> )
	A	B	C	
1	50	50	50	125,0
2	50	50	50	125,0
3	49	50	50	122,5
4	49	50	51	125,0
5	50	50	50	125,0
6	51	50	49	125,0
7	50	50	50	125,0
8	51	50	50	127,5

Fonte: Autor, 2015.

### 5.2.2. Massa Específica Aparente (MEA)

É uma importante propriedade a ser conhecida para o cálculo da resistência à compressão e sua correlação com outras propriedades mecânicas. Seus resultados são expressos normalmente em  $\text{g/cm}^3$ . De acordo com a NBR-6220 a equação 5 foi utilizada para a determinação da MEA. Após determinar o volume aparente os corpos de prova foram colocados na estufa Quimis do laboratório do UniFOA, para secagem por 4 horas a uma temperatura de  $110^\circ\text{C}$ .

$$\text{MEA} = \text{Ms} / \text{Va} \quad (5)$$

Onde:

MEA – Massa específica aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

Ms – Massa seca (g)

Va – Volume Aparente ( $\text{cm}^3$ )

### 5.2.3. Porosidade Aparente (P.A.)

É definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. Sua medição é feita pelo método gravimétrico, segundo a equação 6 da NBR 6220. O volume total da amostra é representado pelo contorno da amostra. O volume da porosidade é a soma dos volumes de poros abertos e fechados. A determinação da porosidade foi importante no nosso trabalho para a determinação da quantidade de poros abertos que seriam preenchidos com o compósito, além da camada superficial de revestimento.

$$\text{Pa} = ((\text{Mu} - \text{Ms}) / (\text{Me}_{\text{líquido}} \times \text{Va})) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

Pa - Porosidade aparente (%)

Mu – Massa saturada (g)

Ms – Massa seca (g)

Me – Massa específica da água ( $\text{g/cm}^3$ )

Va – Volume aparente ( $\text{cm}^3$ )

#### 5.2.4. Preparação dos compósitos

Foram preparados dois compósitos com formulações diferentes, o objetivo foi comparar a eficiência entre eles e provar que a emissividade aumenta e pode variar em função da quantidade aplicada de cada componente. Para o compósito 1 utilizou-se 70% de alumina e apenas 4% de sílica cujo objetivo foi de elevar a temperatura final de uso para patamares acima de 1500°C e o efeito de aumento da emissividade ficaria por conta da inserção do óxido de cromo e carbeto de silício, tabela 3.

A quantidade de água adequada foi em função da quantidade de aluminato de cálcio, estabelecido em 10% do peso total. De forma genérica, a falta de água na mistura poderia causar reações incompletas do aluminato de cálcio, diminuindo seu poder de agregar os grãos. Também pode-se citar que água em excesso aumentaria a quantidade de poros internos e externos (GARCIA, 2007), alterando a porosidade final do compósito.

Tabela 3 – Composição do compósito 1.

COMPONENTES	FÓRMULA	% EM PESO	PESO EM GRAMAS
ALUMINA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70,01%	1000
SÍLICA	SiO <sub>2</sub>	3,99%	57
CROMIA	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,99%	114
CARBETO DE SILÍCIO	SiC	10,01%	143
ALUMINATO DE CÁLCIO	Ca(AlO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	7,98%	114
<b>PESO TOTAL</b>		<b>100,00%</b>	<b>1428</b>
ÁGUA	H <sub>2</sub> O	10%	142

Fonte: Autor, 2015.

Já para o compósito 2 foi utilizado 40,8% de alumina e 40,8% de sílica, com essa especificação esse compósito somente suportaria temperaturas abaixo de 1400°C. Diminuímos os percentuais de cromo e carbeto de silício para comparar o efeito nas emissões térmicas, o resumo das proporções estão na tabela 4.

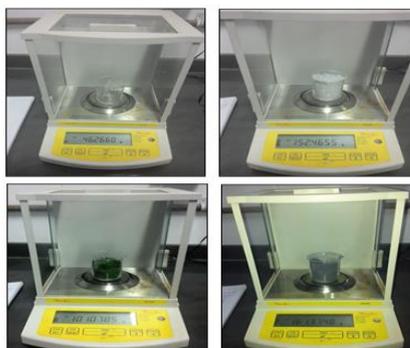
Tabela 4 – Composição do compósito 2.

COMPONENTES	FÓRMULA	% EM PESO	PESO EM GRAMAS
ALUMINA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,77%	424
SÍLICA	SiO <sub>2</sub>	40,77%	424
CROMO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,87%	61
CARBETO DE SILÍCIO	SiC	4,61%	48
ALUMINATO DE CÁLCIO	Ca(AIO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	7,98%	83
<b>PESO TOTAL</b>		<b>100,00%</b>	<b>1040</b>
ÁGUA	H <sub>2</sub> O	10%	104

Fonte: Autor, 2015.

Os componentes e seus respectivos percentuais foram pesados no laboratório do UNIFOA em uma balança eletrônica com precisão de 0,0001g, do fabricante Marte-modelo AV220. As precisões das medidas foram importantes para que as medidas e conclusões dos experimentos fossem diretamente ligadas às quantidades utilizadas nos compósitos. A figura 44 mostra a pesagem de alguns componentes.

Figura 44 – Pesagem dos componentes.



Fonte: Autor, 2015.

Nas figuras 45 e 46 os três passos seguidos após a pesagem, onde os componentes aparecem separados. Para garantir a homogeneidade um Becker de 2 litros de capacidade onde foram misturados os componentes e adicionado 10% de água. Para a mistura 1 foram adicionados 142 mililitros de água, e para a mistura 2, 104 mililitros. As figuras mostram os componentes antes da mistura, misturados e após a adição de água. Inicialmente foram adicionadas e misturadas manualmente no Becker, a alumina e a sílica. O carbeto de silício, o óxido de cromo e o aluminato de cálcio foram colocados e misturados na sequência apresentada. A água deve ser o último componente a ser adicionado, e é importante salientar que imediatamente após a adição da água o aluminato de cálcio começa a reagir iniciando o processo de endurecimento.

Figura 45 – Componentes e suas fases de misturas.



Fonte: Autor,2015.

Figura 46 – Componentes hidratados com 10% de água.



Fonte: Autor,2015.

### 5.2.5. Aplicação do revestimento nos corpos de provas

O revestimento foi preparado e aplicado sobre os corpos de provas previamente cortados. Utilizou-se três métodos de aplicação sendo que para os cubos e placas foram utilizados pincéis ou pulverização, e os *checkers* foram por imersão. A aplicação por pincel ou pulverização foi mais eficiente garantindo a espessura adequada, enquanto que por imersão não foi possível o controle adequado da espessura desejada do revestimento. Imediatamente após a adição de água, que é o agente que desencadeia a reação do aluminato de cálcio, o revestimento deve ser aplicado, nunca excedendo o tempo máximo de 30 minutos entre a adição de água e a aplicação. Com esse procedimento consegue-se garantir uma perfeita aderência do compósito à peça de refratário.

Uma das formas que o compósito poderá ser usado em escala industrial, é no completo cobrimento das peças de *checkers* de regeneradores de altos fornos. Nota-se nitidamente o revestimento aplicado, devido a sua coloração esverdeada causada pelo óxido de cromo. A figura 47 mostra apenas metade do *checker* pintado pois o objetivo é apenas diferenciar a área pintada da remanescente. Para utilização industrial as peças são totalmente pintadas.

Figura 47 – Peças de *checker* com 50% de revestimento.

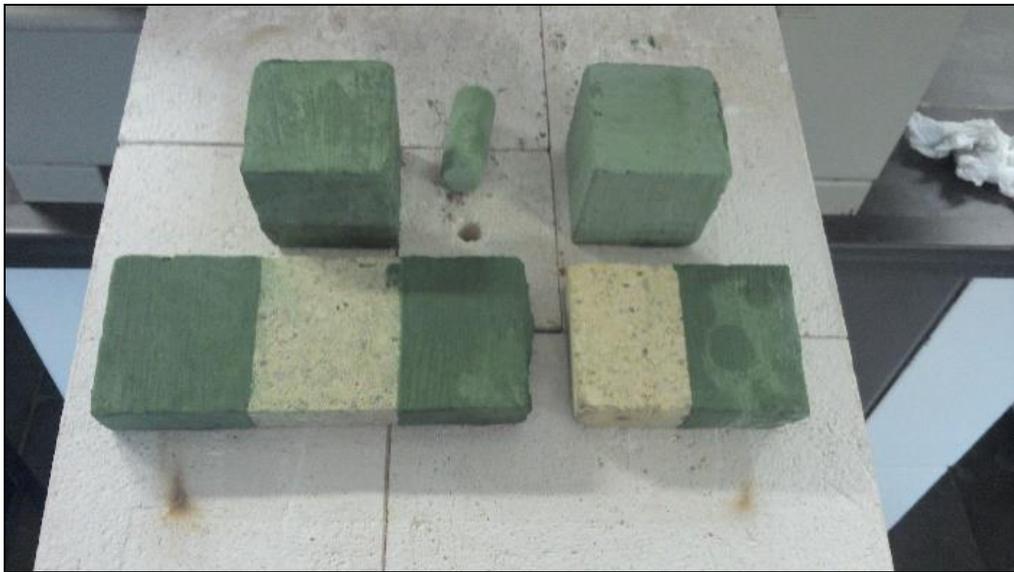


Fonte: Autor, 2015.

As mesmas técnicas e cuidados foram tomados com os corpos de provas retirados dos tijolos ALUKOR 85 e apresentados na figura 48. Além dos oito cubos com medidas de 50 mm x 50 mm x 50 mm, foi cortado também um corpo de prova com dimensões de 150 mm x 50 mm x 15 mm ao qual foi dado o nome de placa 1. O outro de 100 mm x 50 mm x 15 mm, de placa 2.

Era preciso ter certeza que nada influenciaria nas medidas das emissividades, para isso o cubo número 1, foi pintado com o compósito 1. No cubo número 2 o compósito 2, e as placas refratárias com os compósitos 1 e 2 deixando o meio sem pintar, o que serviu de parâmetro para comparação.

Figura 48 – Corpos de provas com revestimento.

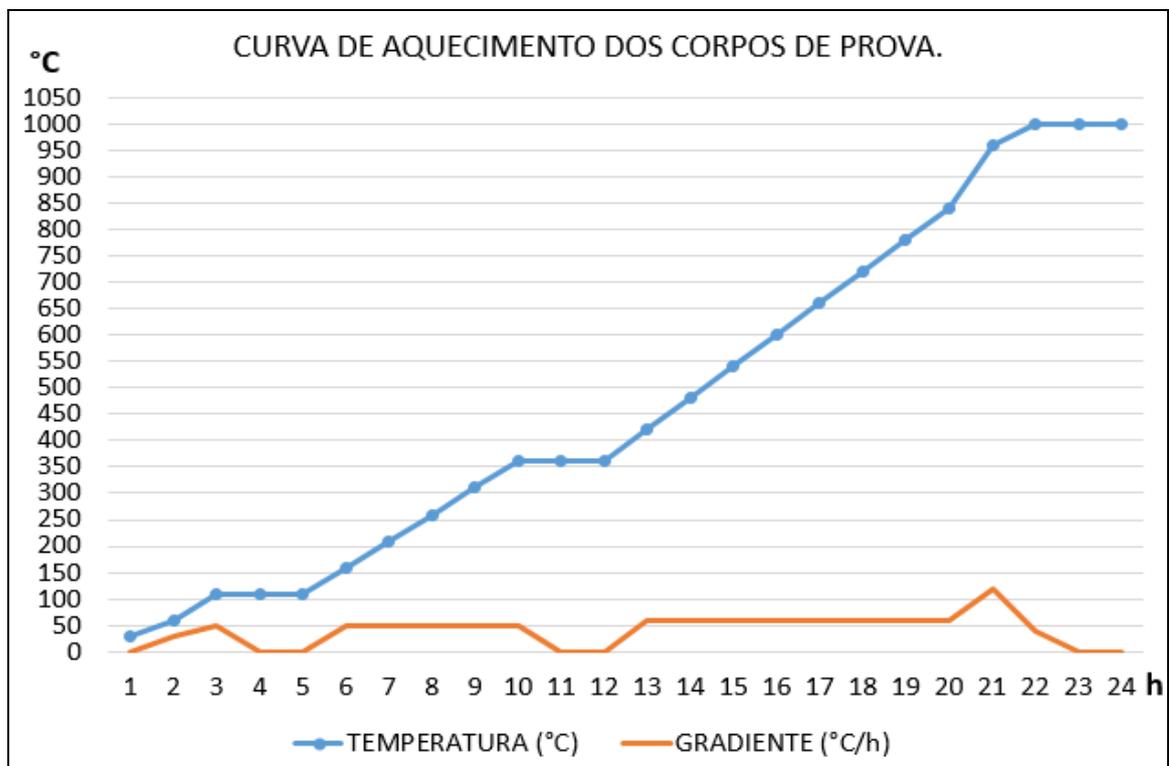


Fonte: Autor, 2015.

### 5.2.6. Secagem dos corpos de provas com revestimento

Os corpos de provas já preparados e pintados foram colocados para secar e sinterizar em um forno da marca Quimis e modelo Mufla do laboratório da Unifoa, a curva de aquecimento foi de 24 horas e chegou-se ao patamar de 1000°C, figura 49. Essa curva proporcionou a secagem gradual do revestimento e permitiu uma alta aderência entre as partes. Seguir a curva de aquecimento é importante para que não haja fissuras, trincas ou descolamento do revestimento causado por expansões diferenciais entre o tijolo refratário e o composto aplicado. Foi feito um patamar de duas horas em 110°C para secar as amostras, outro de duas horas em 360°C e o último de duas horas em 1000°C, a tabela 5 exibe os dados da curva e do gradiente executado. O gradiente apresentado indica a taxa de aquecimento praticado, em graus Celsius por hora.

Figura 49 – Curva de aquecimento aplicada no forno.



Fone: Autor, 2015.

Tabela 5 – Dados do aquecimento no forno.

<b>DADOS DO AQUECIMENTO</b>		
<b>HORAS</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>GRADIENTE (°C/h)</b>
1	30	0
2	60	30
3	110	50
4	110	0
5	110	0
6	160	50
7	210	50
8	260	50
9	310	50
10	360	50
11	360	0
12	360	0
13	420	60
14	480	60
15	540	60
16	600	60
17	660	60
18	720	60
19	780	60
20	840	60
21	960	120
22	1000	40
23	1000	0
24	1000	0

Fone: Autor, 2015.

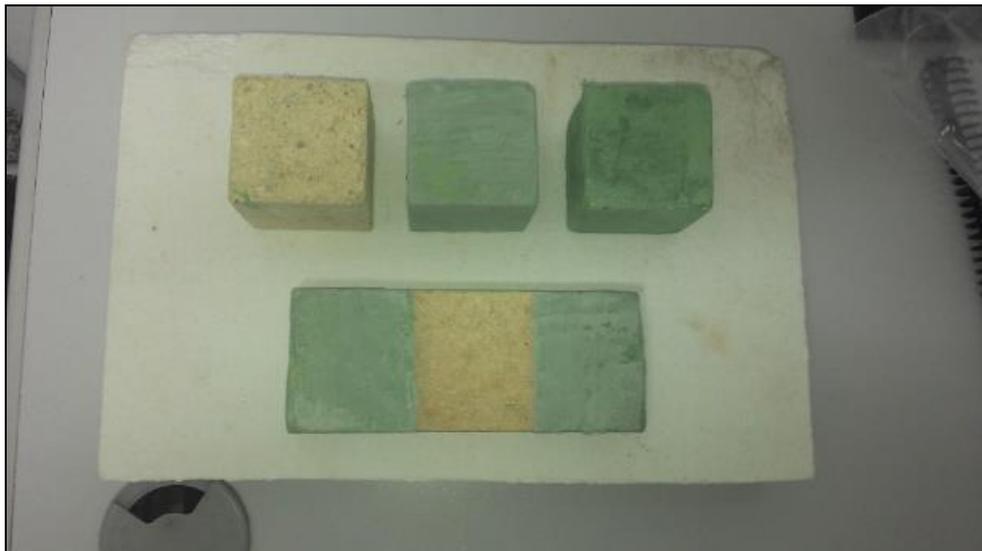
A figura 50 exibe os corpos de provas antes de serem aquecidos, após o aquecimento observa-se na figura 51 que a cor verde proveniente do óxido de cromo permanece, apesar de estar mais clara. Para o experimento foi suficiente o aquecimento até 1000°C pois permitiu que ocorresse a secagem e aderência do revestimento no tijolo refratário.

Figura 50 – Corpos de prova no forno antes de aquecer.



Fonte: Autor,2015

Figura 51 – Corpos de provas após aquecimento.



Fonte: Autor, 2015.

### 5.2.7. Termografia

A termografia é a ciência que trata da reprodução de imagens a partir da emissão de radiação infravermelha. Os termogramas são os resultados obtidos quando as câmeras termográficas detectam o espectro eletromagnético e reproduzem a imagem dessa radiação. Qualquer objeto de acordo com a lei da radiação do corpo negro emite radiação infravermelha, e a termografia torna possível ver e analisar os corpos e os ambientes de acordo com sua temperatura. A radiação emitida por um objeto é proporcional a sua temperatura. É importante perceber que as reproduções de imagens térmicas mostram, na verdade, a quantidade de energia infravermelha emitida, transmitida e refletida por determinado objeto. Essas informações foram obtidas no site dos engenheiros associados (Website Engenheiros associados, 2015. <http://www.engenheirosassociados.com.br/termografia.php>).

Foi utilizada a máquina termográfica do fabricante FLIR System modelo T300, figura 52. As variações de resolução de imagem infravermelha da Série-T vão dos 320x240 até os 640x480 pixels, dependendo do modelo da câmera. Quanto mais pixels melhor a resolução. Todos os modelos na Série-T de FLIR incluem uma câmera digital de 1.3 megapixels, a qual fará que a observação e a inspeção sejam mais rápidas e mais fáceis, além de proporcionar imagens em Fusão Térmica (FLIR SYSTEM, 2016).

Figura 52 – Máquina termográfica Flir.



Fonte: Autor, 2016.

### 5.2.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica possibilita investigar a superfície de amostras com ampliações da ordem de milhares de vezes. Além disso, a técnica permite a realização de microanálises por espectroscopia de energia dispersiva, que possibilita a identificação e mapeamento dos elementos químicos presentes no material. O funcionamento básico consiste de um feixe de elétrons varre a superfície da amostra e sua interação com o material analisado gera diversos tipos de sinal que são utilizados para a formação de imagens ou análise da composição da amostra. As imagens podem fornecer informações referentes à morfologia e topografia (CETENE, 2016).

As micrografias foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura Hitachi-TM-3000, disponível no Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda, usando elétrons secundários, a fim de obter informações quanto à morfologia dos compósitos. A fotografia da figura 53 foi tirada no laboratório do UNIFOA.

Figura 53 – Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV)



Autor: Autor, 2015.

### 5.2.9. Preparação da Placa 1 – Peça única

A Placa 1 foi dividida em três partes de 50 mm x 50 mm x 15 mm, sem, contudo, ser cortada. A parte 1 foi revestida com o compósito 1, a parte central ficou sem revestimento para servir de parâmetro nas medições e a parte 3 foi revestida com o compósito 2, conforme figura 54. Esse procedimento garantiu que a peça refratária estivesse submetida às mesmas condições.

Figura 54 – Corpo de provas preparado para testes (Placa 1).



Fonte: Autor, 2015.

O processo de aquecimento do corpo de prova chamado de Placa 1, ocorreu no forno do laboratório da UNIFOA e a curva de aquecimento utilizada foi de 24 horas atingindo uma temperatura final de 750°C. O equipamento utilizado para efetuar as medições térmicas foi na máquina FLIR modelo T300, preparada para efetuar medições até 750°C.

Quando a temperatura do forno atingiu 750°C o corpo de prova permaneceu por mais duas horas em seu interior, a fim de garantir que a temperatura fosse a mesma em todas as regiões da peça. Após esse intervalo de tempo a peça foi retirada, colocada em uma estufa isolada com mantas de fibras cerâmicas afim de garantir uniformidade na temperatura, então iniciaram-se as medições de temperaturas.

### 5.2.10. Preparação dos cubos – Peças separadas

O mesmo procedimento foi realizado para os cubos, após serem aquecidos até 750°C e permanecerem por mais duas horas no forno, foram retirados e colocados na estufa para as medições das temperaturas. Com os corpos de provas separados (Figura 55), as temperaturas individuais foram aferidas.

Figura 55 – corpos de provas preparados para testes (Cubos).



Fonte: Autor, 2015.

### 5.2.11. Preparação da Placa 2 – Peça única

Para evitar o efeito de lateralidade que poderia ser causado na placa 1 onde as partes com revestimento estavam nas laterais da peça e, portanto, mais sujeitos a perdas de temperaturas, os testes foram repetidos na Placa 2 (Figura 56), onde o mesmo efeito de lateralidade não se aplica, pois, a peça é simétrica.

Figura 56 – Corpo de provas preparado para testes (Placa 2).



Fonte: Autor, 2015.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente

Após a preparação dos compósitos 1 e 2 nas devidas proporções, foi necessário estudar o impacto que a aplicação do revestimento causaria na massa específica aparente – MEA e na porosidade aparente – PA. O aumento considerável da MEA poderia causar excesso de peso nas paredes refratárias e consequentemente esforços de compressão acima das estabelecidas em projeto, uma vez que ao material refratário seria agregada a camada do revestimento.

A tabela 6 mostra os resultados dos corpos de provas obtidos sem a aplicação do revestimento. Esses dados foram aferidos nos laboratórios do UNIFOA e após passarem pelo processo de secagem a média da massa específica aparente dos oito cubos ficaram em  $(2,93 \pm 0,02)$  g/cm<sup>3</sup>, em relação à ficha de dados técnicos (FDT) fornecida pelo fabricante do tijolo ALUKOR 85 foi encontrada uma diferença de 0,22 g/cm<sup>3</sup>, fato que não altera o resultado dos testes de emissividade pois os valores da FDT são médias de amostras escolhidas aleatoriamente.

Após os cortes dos corpos de provas, os testes apresentaram uma porosidade aparente média de  $(20,1 \pm 2,0)$  % contra 17,8 % informado na ficha de dados técnicos do fabricante.

Tabela 6 – MEA e Porosidade Aparente sem revestimento.

CORPOS DE PROVAS SEM REVESTIMENTO							
AMOSTRA CÚBICA	DIMENSÕES (mm)			VOLUME (cm <sup>3</sup> )	PESO SÊCO A 110°C (gramas)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	POROSIDADE APARENTE (%)
	A	B	C				
1	50	50	50	125,0	362	2,90	22,40
2	50	50	50	125,0	370	2,96	19,20
3	49	50	50	122,5	360	2,94	21,22
4	49	50	51	125,0	366	2,93	19,21
5	50	50	50	125,0	366	2,93	19,20
6	51	50	49	125,0	368	2,95	17,61
7	50	50	50	125,0	370	2,96	20,00
8	51	50	50	127,5	370	2,90	21,96

Fonte: Autor, 2015.

A tabela 7 apresenta os dados da massa específica aparente e porosidade aparente dos corpos de prova com revestimento. A média encontrada da MEA foi de  $(2,92 \pm 0,03)$  g/cm<sup>3</sup> e a porosidade aparente de  $(13,0 \pm 3,0)$  %. Nota-se que a massa específica praticamente não se alterou com a adição do revestimento ao corpo de prova, principalmente por ter sido utilizado uma fina camada. Essa é a vantagem do revestimento quando adere totalmente ao substrato, praticamente não interfere na MEA e produz o resultado esperado.

O mesmo não pode ser dito sobre a porosidade que foi drasticamente reduzida, passou de 20,1% para 13,0%, incluindo os desvios informados. Quanto menor for a rugosidade e a quantidade de poros abertos, menor será o depósito de poeiras e fumos metálicos na superfície pintada. Como o efeito esperado é aumentar a emissividade do material e esse fenômeno está ligado diretamente à área revestida e à exposição do compósito às altas temperaturas, é preciso que a superfície permaneça isenta de poeiras. Outra característica importante é a flexibilidade que o revestimento apresentou, evitando trincas.

Tabela 7 – MEA e Porosidade Aparente com revestimento.

AMOSTRA CÚBICA	CORPOS DE PROVAS COM REVESTIMENTO						
	DIMENSÕES (mm)			VOLUME (cm <sup>3</sup> )	PESO SÊCO A 110°C (gramas)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	POROSIDADE APARENTE (%)
	A	B	C				
1	50,5	51	51	131,4	381	2,90	15,23
2	51	51	51	132,7	390	2,94	15,08
3	50	51	50,5	128,8	377	2,93	10,87
4	49,5	51	51,5	130,0	379	2,92	12,31
5	51	50,5	50,5	130,1	379	2,91	13,07
6	51,5	50,5	50	130,0	382	2,94	15,38
7	50,5	50,5	51	130,1	384	2,95	11,53
8	51,5	50,5	51	132,6	384	2,90	10,56

Fonte: Autor, 2015.

## 6.2. Camada de aplicação do revestimento

Foi comprovado que a quantidade de revestimento aplicado sobre a superfície do refratário é determinante para os resultados finais. Foram utilizados componentes com pureza próxima de 100% e tamanhos dos grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$  com exceção do carbetto de silício cujo tamanho dos grãos foi abaixo de 90  $\mu\text{m}$ . Os tamanhos dos grãos e o empacotamento final é importante pois influencia diretamente na rugosidade do revestimento. Nos estudos verificou-se que quanto maior a espessura aplicada, menor seria a interação do revestimento com a peça refratária, ocasionando trincas, descolamento e prejudicando a aderência ao substrato. Esses efeitos estão ligados às dilatações e contrações dos refratários que influenciam diretamente no compósito aplicado. Tomou-se o cuidado e analisar como o revestimento absorveria esses efeitos e foi confirmado que, com as duas composições utilizadas os resultados mostraram-se viáveis.

Como o efeito do aumento da emissividade é superficial, a espessura aplicada deve variar entre 0,2 mm e 0,5 mm, acima dessa espessura existe a perda e desperdício de material, além de influenciar diretamente em sua performance (Figura 57).

Um ponto importante observado foi que os compósitos não apresentaram oxidações superficiais, em alguns casos as oxidações nos refratários não causam grandes problemas, mas em se tratando de emissividade, essa poderia ser reduzida devido ao bloqueio superficial que esse fenômeno causaria.

Figura 57 – Camada de revestimento no corpo de prova.



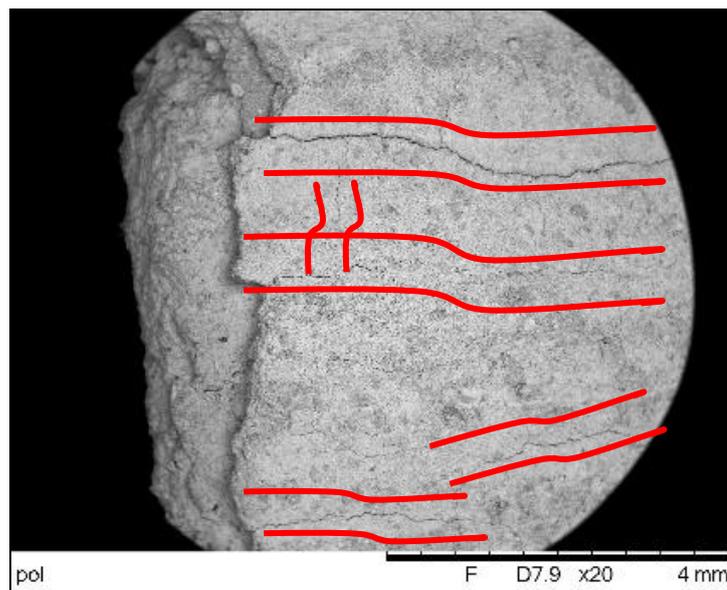
Fonte: Autor, 2015.

### 6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

Os dois compósitos foram submetidos à micrografia por MEV. As amostras dos compósitos 1 e 2 são formados pelas misturas dos óxidos que compõem o revestimento, resultado do aquecimento que ocorreu até a temperatura de 1000°C. A digitalização foi feita até a magnitude de 2000X, mas a qualidade ficou satisfatória apenas no intervalo de 20X a 800X.

Pode-se observar na figura 58 que o revestimento está totalmente aderido ao substrato refratário e que a diferença entre os compósitos 1 e 2 não alterou essa característica. A imagem mostra uma diferença entre a granulometria do revestimento e o substrato, confirmando os resultados obtidos nos testes de porosidade aparente que indicaram apenas 13,0% de porosidade no revestimento contra 20,1% no substrato. Um dos componentes que contribuiu para a diminuição da porosidade foi o aluminato de cálcio que funcionou como ligante para os demais componentes que estavam com granulometria abaixo de 45 µm e o cromo abaixo de 90 µm. Na imagem ampliada com 20X ficam claras as microfissuras causadas por expansão e contração durante o processo de aquecimento e resfriamento do corpo de provas.

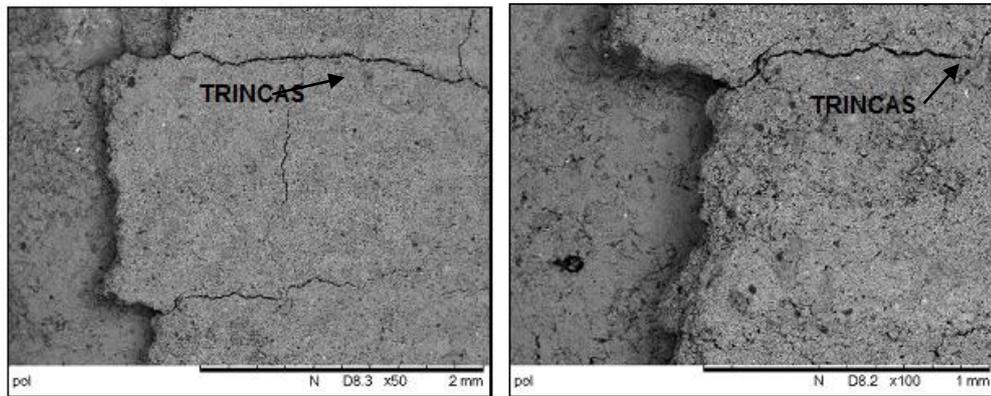
Figura 58 – Micrografia do compósito 1, imagem a 20X.



Fonte: Autor, 2015.

A figura 59 mostra a imagem da interseção entre o substrato refratário e a camada de revestimento, nessa ampliação de 50X e 100X é possível distinguir visualmente a interface e observar que a camada aplicada de 0,3 mm ficou totalmente integrada ao substrato após secagem e sinterização. As microfissuras não influenciaram no desempenho do compósito uma vez que as partes não se desagregaram.

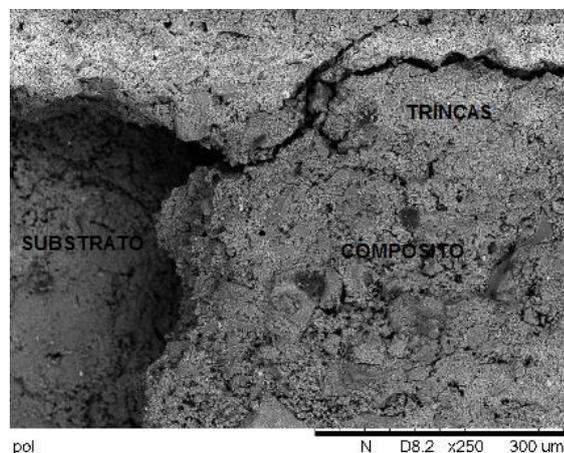
Figura 59 – Micrografia do compósito 1, imagens a 50X e 100X.



Fonte: Autor, 2015.

A aderência entre os materiais sofre influência direta da porosidade, pois aumentam a superfície de contato e criam ancoragens naturais promovendo maior aderência e resistência mecânica ao compósito, vide figura 60.

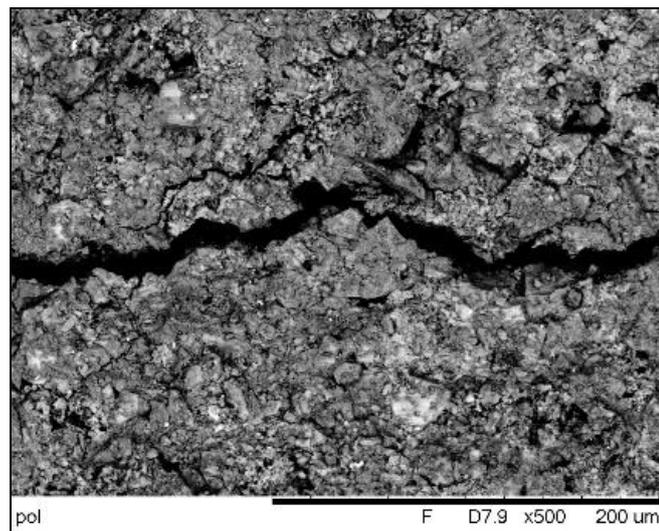
Figura 60 – Micrografia do compósito 1, imagem a 250X.



Fonte: Autor, 2015.

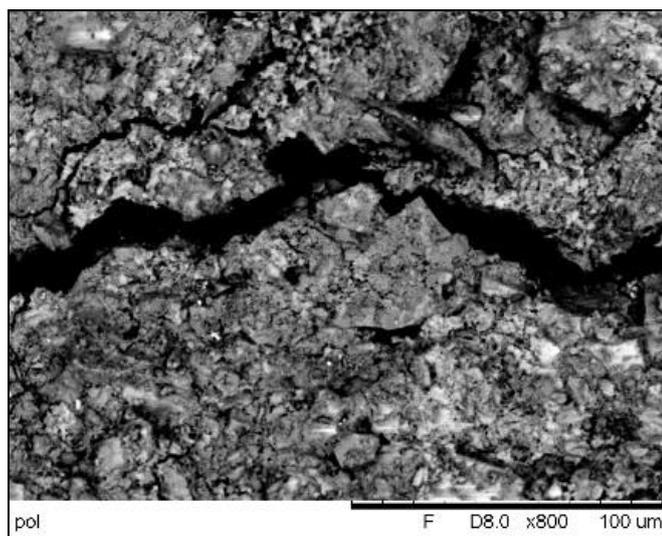
As micrografias (Figuras 61 e 62) são do compósito 1, tem-se aparência rochosa e maciça, de fácil distinção entre seus componentes, bem consolidada revelando que teve boa aderência promovida pelo aluminato de cálcio e coerente com a porosidade obtida. Essas trincas foram provocadas pelo aquecimento e resfriamento da peça refratária.

Figura 61 – Micrografia do compósito 1, imagem 500X.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 62 – Micrografia do compósito 1, imagem a 800X.



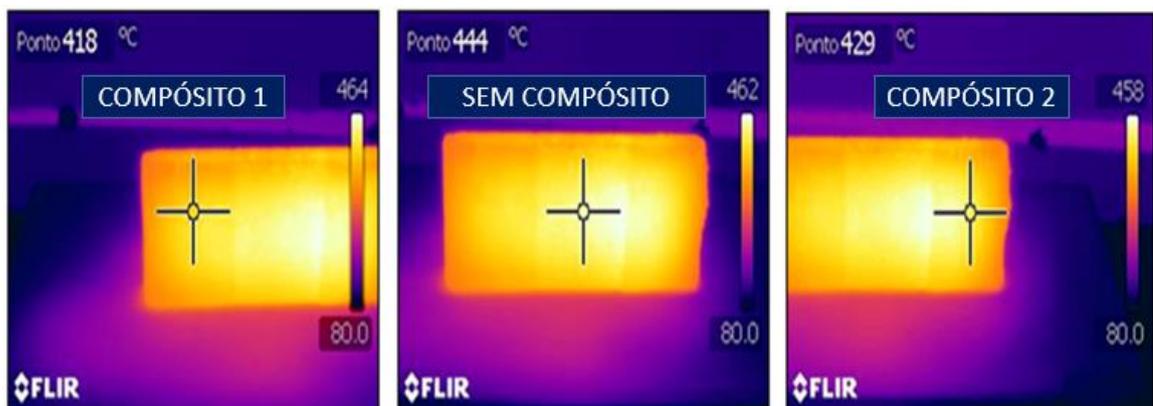
Fonte: Autor, 2015.

## 6.4. Termográficos

### 6.4.1. Termogramas Placa 1 – Peça única

A máquina termográfica foi configurada para trabalhar com uma emissividade de 0,83, pois no processo de aferição foi confirmada essa emissividade para o tijolo refratário usado como substrato. Observou-se que as partes que estavam revestidas com os compósitos 1 e 2 apresentavam menores temperaturas, provando que a propriedade dos compósitos em reemitir energia auxiliou na redução do calor absorvido pelos corpos de provas. A figura 63 mostra no primeiro termograma a temperatura de 418°C medida no revestimento feito com o compósito 1. A temperatura no refratário sem o revestimento chegou a 444°C e o terceiro termograma que estava revestido com o compósito 2, apresentou 429°C. As partes da mesma peça que estavam com os revestimentos, independente da formulação apresentaram redução da temperatura causada pela reemissão da energia recebida. Foi constatado que além dos compósitos aumentarem a emissividade, o compósito 1 teve uma melhor performance pois o corpo de prova permaneceu com uma temperatura menor. Esse fenômeno está associado às quantidades de óxido de cromo e carbeto de silício presentes nos compósitos.

Figura 63 – Termogramas da placa 1.



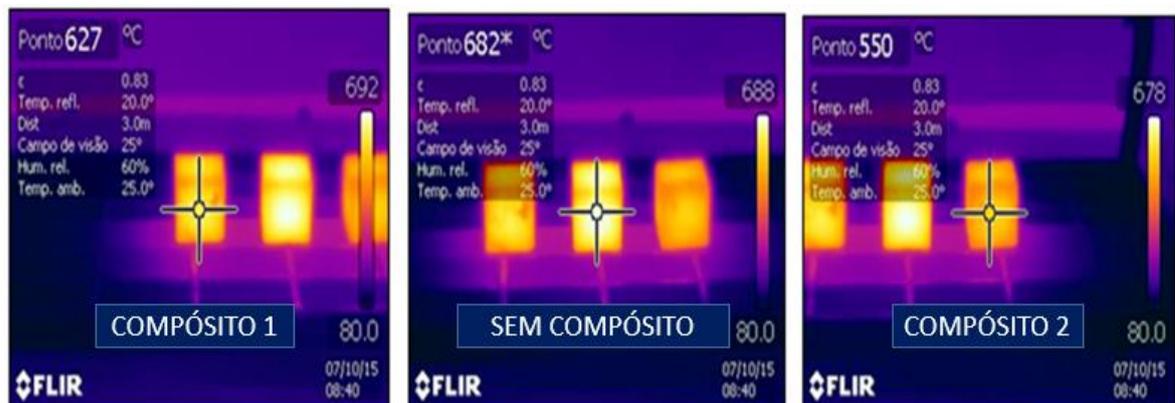
Fonte: Autor, 2015.

#### 6.4.2. Termográficos dos cubos – Peças separadas

Os termogramas da figura 64 mostram que a experiência foi conclusiva e obteve-se o resultado esperado. Os corpos de provas que haviam sido revestidos apresentaram menor temperatura em um mesmo momento, evidência de que o revestimento está emitindo maior energia. Pode-se ver nos termogramas a data e a hora em que foram feitas as medidas, confirmando as seguintes temperaturas:

- Revestimento compósito 1: 627°C
- Sem revestimento: 682°C
- Revestimento compósito 2: 550°C

Figura 64 – Termogramas dos cubos.

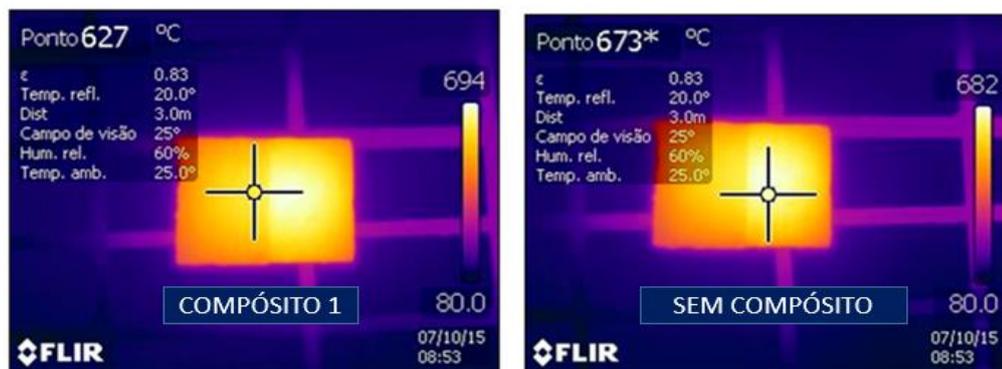


Fonte: Autor, 2015.

### 6.4.3. Termográficos da Placa 2 – Peça única

Os resultados encontrados confirmaram a eficiência do revestimento pois a parte da peça pintada estava com uma temperatura de 627°C, enquanto a parte não pintada apresentou temperatura de 673°C (Figura 65), resultado de uma maior emissão de energia. É importante frisar que todos os corpos de provas estavam na mesma temperatura no momento da medição uma vez que foram aquecidos e passaram por um período de permanência dentro do forno para igualar por completo sua temperatura.

Figura 65 – Termogramas da placa 2.



Fonte: Autor, 2015.

A tabela 8 compara as temperaturas encontradas nos corpos de provas representados nas figuras 63, 64 e 65. Observa-se que em todos os casos as temperaturas medidas diretamente sobre os revestimentos foram menores que as temperaturas do substrato.

Tabela 8 – Comparação entre temperaturas.

TEMPERATURAS DOS CORPOS DE PROVAS			
	COMPÓSITO 1	SEM COMPÓSITO	COMPÓSITO 2
FIGURA 63	418°C	444°C	429°C
FIGURA 64	627°C	682°C	550°C
FIGURA 65	627°C	673°C	

Fonte: Autor, 2015.

## 7. CONCLUSÕES

Os ensaios de massa específica aparente (MEA) não demonstraram variações significativas na densidade com a aplicação dos compósitos 1 ou 2, porém a porosidade aparente sofreu uma redução drástica de 20,1% para 13,0%. O compósito com porosidade de 13,0% mostrou-se bastante elástico e altamente aderido ao substrato propiciando uma camada mais homogênea e estável.

A espessura do revestimento variando de 0,1 mm a 0,3 mm desenvolveu sua função de aumentar a emissividade superficial dos corpos de provas, além de não apresentar oxidações resultantes do processo. Qualquer oxidação ou acúmulo de poeiras poderia diminuir o efeito emissivo do revestimento.

Os resultados das micrografias por MEV foram decisivos para o entendimento das formas que os diversos componentes se organizam dentro dos compósitos e evidenciou que a porosidade do substrato foi um dos agentes que permitiu a coesão entre as partes, servindo como ancoras naturais.

O trabalho conseguiu provar que os compósitos 1 e 2 aumentam a emissividade dos refratários quando aplicados da forma correta e com as técnicas apropriadas. Todos os três tipos de corpos de provas utilizados foram aquecidos à mesma temperatura e medidos imediatamente em estufa preparada especialmente para os testes. Onde havia o revestimento aplicado, sem exceção, a temperatura foi mais baixa devido à maior emissividade.

Quanto maior a radiação refletida em função de uma maior emissividade do revestimento, menor será a temperatura do objeto aquecido, provando que a energia refletida será absorvida novamente pelo processo.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse estudo provou que alguns materiais cerâmicos aumentam a emissividade dos refratários, devolvendo uma quantidade maior de calor para o interior dos fornos. O avanço tecnológico dos equipamentos de medições termográficas tem possibilitado comprovar essas variações e ajudado nas interpretações e confirmações dos resultados.

Uma vez que o aumento da emissividade está confirmado, fica como sugestão para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Pesquisa que associe o aumento da emissividade à economia de energia utilizada para aquecimento dos fornos nos processos siderúrgicos;
- Inclusão de outros componentes refratários que auxiliem no aumento da emissividade;
- Avaliação do compósito em temperaturas acima e 1450°C e sua relação com a oxidação superficial;
- Relação entre a durabilidade do revestimento e o declínio do poder emissivo do compósito;
- Relação custo benefício, levando-se em consideração o custo do compósito e sua aplicação;

A economia de energia obtida pelo aumento da emissividade poderá revolucionar o conceito de revestimentos refratários e proporcionar o desenvolvimento de novas tecnologias associadas ao tema.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8826: Materiais Refratários – Terminologia, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10237: Materiais refratários – Classificação. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6220: Materiais refratários densos conformados — Determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro, 2011.
- ALCOA, 2015. Site da Alcoa - <http://www.alcoa.com/global/en/what-we-do/alumina/default.asp>
- BARROS, João Alfredo de Almeida Barros. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2013.
- BAUER, L.A.F. Materiais de Construção. 5ª ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- CALLISTER JR, W.D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- CEPA – Centro de Estudo e Pesquisa Aplicada, <http://www.cepa.if.usp.br>, 2016.
- CETENE Centro de tecnologias estratégicas do Nordeste, [www.cetene.gov.br](http://www.cetene.gov.br), 2016.
- DIDIER-WERKE – Apostila de características técnicas de regeneradores, 1990.
- Engenheiros Associados, <http://www.engenheirosassociados.com.br/termografia.php>, 2015.
- FLIR Systems, <http://www.flir.com.br/home/>, 2016.
- GARCIA, J.R., Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade, Universidade Federal de S. Carlos, S. Carlos, SP.
- HOLMAN, J.P. Transferência de calor. Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil, 1983.
- <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-03/ibge-pib-fecha-2015-com-queda-de-38>, Rio de Janeiro, 2016.
- IAB, Instituto Aço Brasil, Estatísticas, [www.acobrasil.org.br](http://www.acobrasil.org.br), 2016.

- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. Transferência de Calor e Massa. 6ª Edição, editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários – IBAR Ltda., [www.ibar.com.br](http://www.ibar.com.br), 2016.
- KREITH, F.; BOHN, M.S. Princípios da transmissão de calor, 6ª edição, Editora Thomson, São Paulo, 2003.
- Luísa Melo, Revista Exame, <http://exame.abril.com.br>, 19/04/2016.
- M. O'Driscoll, "Alumina Cements - Lining up Against Steel and Sewage", Ind. Min. (2000) 35-45.
- Machado, MLP. Marcelo Lucas P. Machado - [scholar.google.com.br/citations?User=l7If\\_oUAAAAJ&hl=em](http://scholar.google.com.br/citations?User=l7If_oUAAAAJ&hl=em), 2016.
- MAGNESITA refratários, Folha de dados técnicos – 2013.
- Ministério das Minas e Energia – MME, Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009. - [www.mme.gov.br/documents/](http://www.mme.gov.br/documents/)
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Siderurgia no Brasil 2010 - 2025, [www.cgEE.org.br](http://www.cgEE.org.br), 2010.
- NOVO, M.M.M. Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade - Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- PETRUCCI, E.G. Concreto de cimento portland. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1968.
- SEGADÃES, Ana Maria. Refractários. 1ª ed. Aveiro: Fundação João Jacinto de Magalhães, 1997.
- SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2015.
- SIEGEL, R.; HOWELL, J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. 3ª Edição, Cambridge, MA, 2008.
- TecnoFire Tecnologia e Refratários, Apostila, Noções básicas para fabricação e aplicação de materiais refratários, 2012.
- UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório central de microscopia eletrônica, 2015.
- UFPR – Universidade Federal do Paraná, 2015.
- Websites GERDAU S.A., [www.gerdau.com.br](http://www.gerdau.com.br).

- Website Paul Wurth, SMS group, 2016, [www.paulwurth.com/pt](http://www.paulwurth.com/pt)
- Satyendra, Website [ispatguru.com](http://ispatguru.com), SATYENDRA IN TECHNICAL, 2015.
- Yunus A. Çengel, Transferência de calor e massa: uma abordagem prática, Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil, 2009.