



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
Centro Universitário de Volta Redonda



Defesa de Mestrado

**Desenvolvimento de um compósito cerâmico para otimizar a radiação  
térmica em materiais refratários  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiC-Ca}(\text{AlO}_2)_2$**

Aluno: Joaquim de Paula Pereira

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
Centro Universitário de Volta Redonda



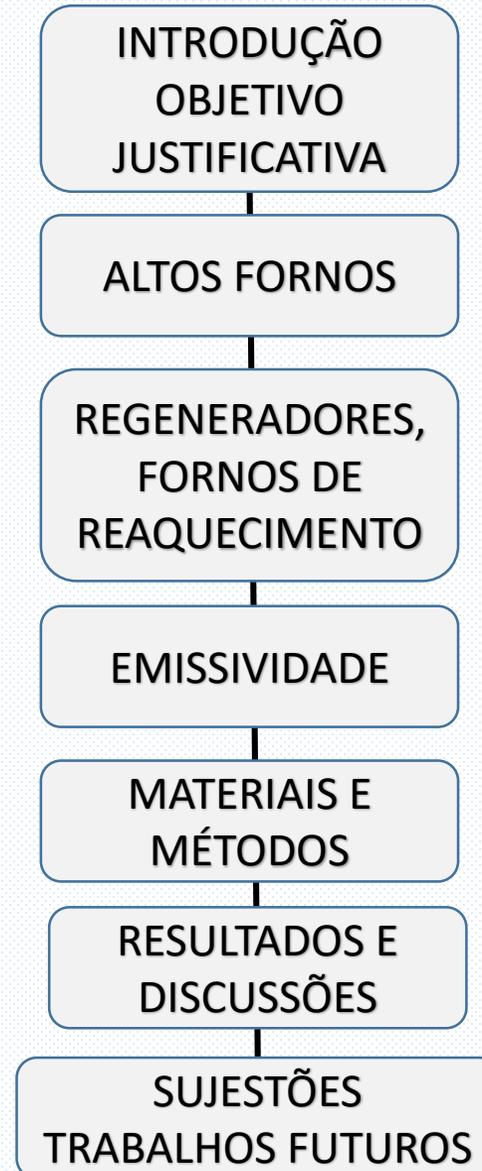
# **Desenvolvimento de um compósito cerâmico para otimizar a radiação térmica em materiais refratários $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-SiC-Ca}(\text{AlO}_2)_2$**

Banca Avaliadora:

Prof. Dr. Sebastião Ribeiro

Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho

# SEQUÊNCIA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO



# 1. INTRODUÇÃO

Todos os materiais refratários submetidos a altas taxas de temperatura possuem suas respectivas taxas de irradiação térmica que podem ser medidas através de sua emissividade.

Quando devolvemos mais energia e de forma mais rápida para o interior dos fornos aquecidos, em forma de radiação térmica, essa energia é reabsorvida pelos corpos sólidos.

Com a comprovação do aumento da emissividade através 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 taxas de temperaturas.

Esse compósito deve suportar temperaturas de até  $1450^{\circ}\text{C}$  e manter-se agregado à peça refratária sem perder suas características de refratariedade.

### 3. JUSTIFICATIVA

Segundo relatório da ONU, 348 EJ de energia foram produzidos no mundo em 1994. É esperado que as reservas naturais não renováveis durem, em média, mais 113 anos (CEPA, 2016).

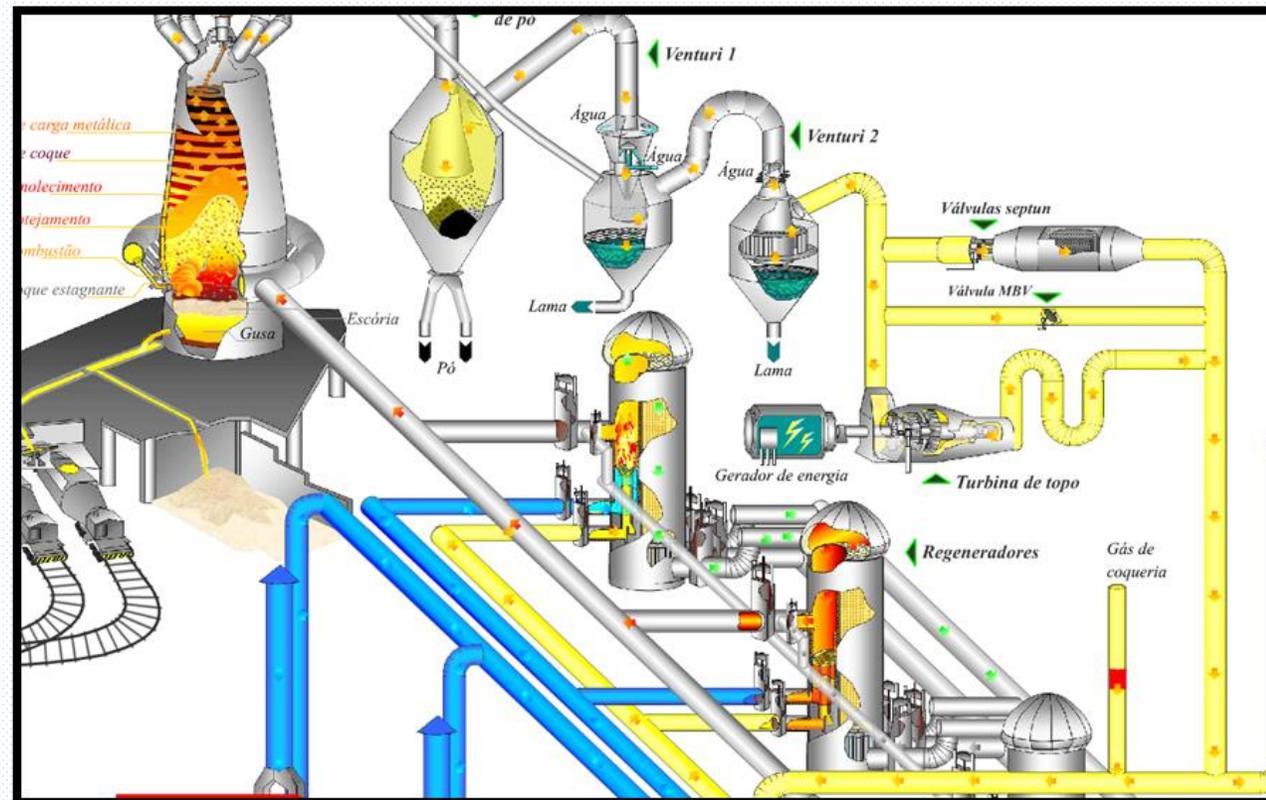
O desenvolvimento desse revestimento refratário possibilitou o aumento da emissividade nos materiais refratários, característica que está diretamente relacionada ao aumento da radiação térmica e conseqüentemente à conservação de energia.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 4.1.1. Altos fornos a coque

De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), em 2010 os altos-fornos a coque foram responsáveis por cerca de 93% do total da produção.

Esquemático de altos fornos.



Fonte: Gerdau S.A.

## 4.1.2 Regeneradores de Altos Fornos

Os regeneradores são responsáveis pelo aquecimento do ar de processo que alimenta as ventaneiras dos altos-fornos, são grandes trocadores de calor. A temperatura do ar aquecido fica entre  $900^{\circ}\text{C}$  e  $1250^{\circ}\text{C}$ . São fabricados com tijolos cerâmicos refratários.

Regeneradores

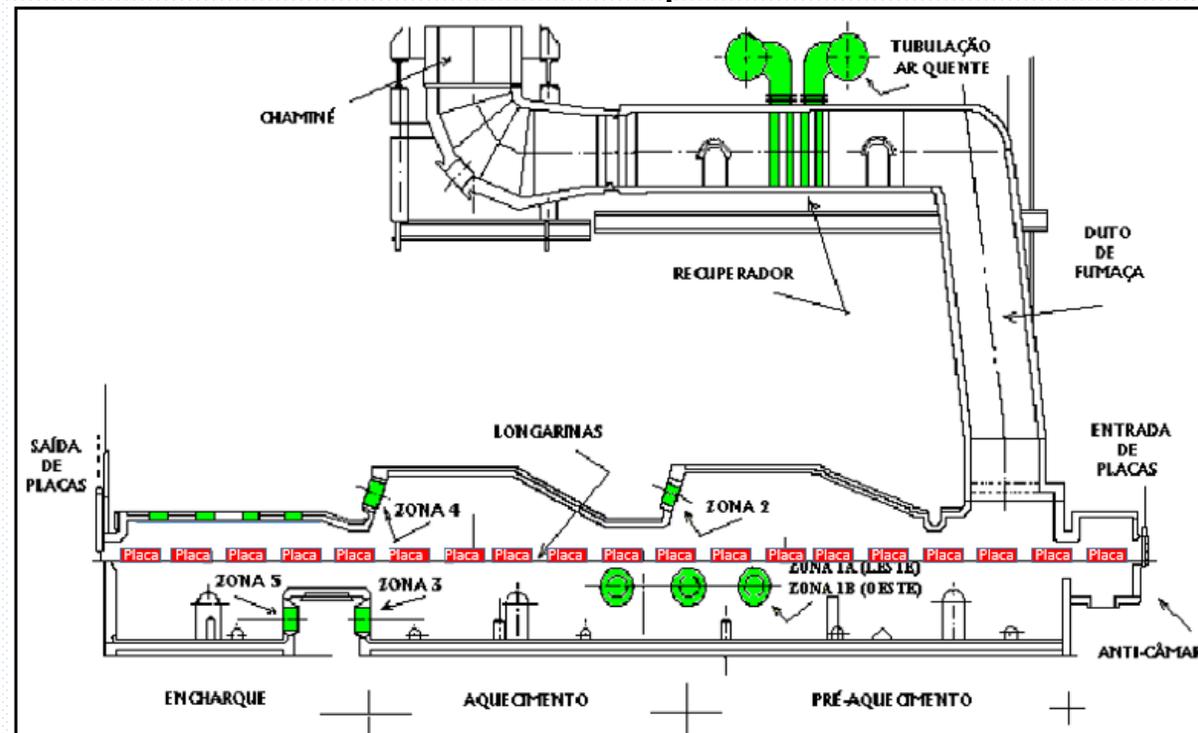


Fonte: Paul Wurth.

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

Sua função é elevar a temperatura dos produtos semiacabados, (placas ou tarugos), até que o material esteja suficientemente plástico para ser laminado. São totalmente revestidos com materiais refratários.

Fornos de reaquecimento

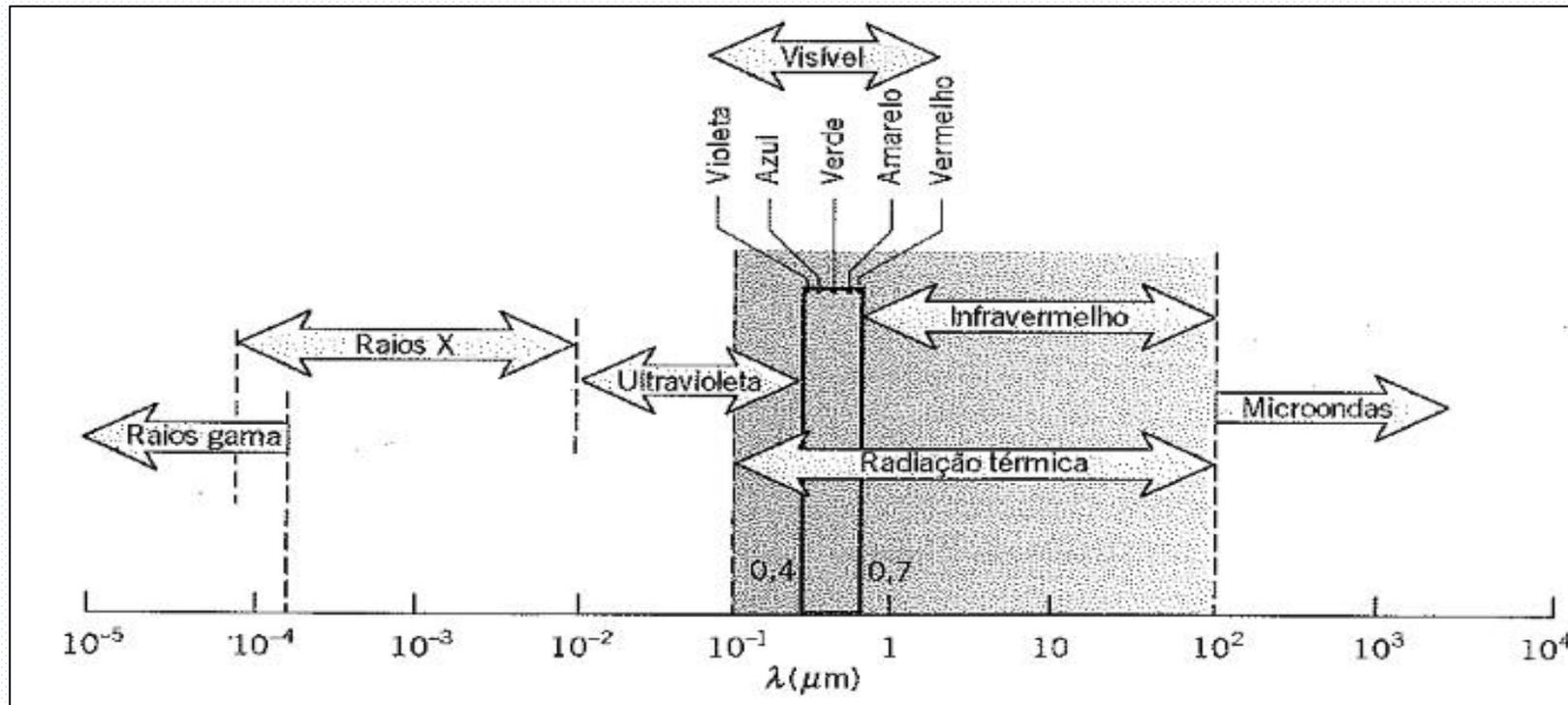


Fonte: Adaptação Autor .

## 4.4. Teoria da emissividade.

Para entendermos o funcionamento básico da emissividade, é necessário conhecer o espectro da radiação eletromagnética. A porção do espectro, entre 0,1 e 100  $\mu\text{m}$ , é chamada de radiação térmica, porque afeta o estado térmico da matéria.

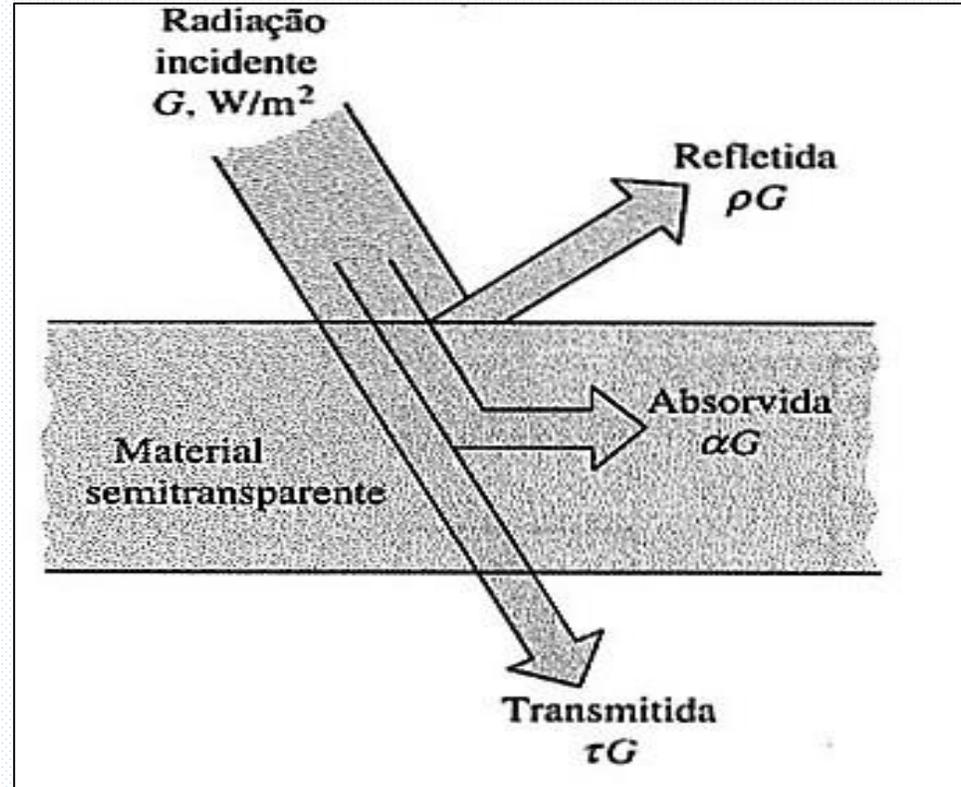
Espectro da radiação eletromagnética.



Fonte: INCROPERA, 2008.

Precisamos considerar as conclusões de SIEGEL onde diz que as frações de radiações refletidas, absorvidas e transmitidas dependem diretamente da rugosidade superficial, temperatura, comprimento da onda e o ângulo de incidência da radiação.

Figura 23 - Absorção da radiação incidente



Fonte: Yunus, 2009.

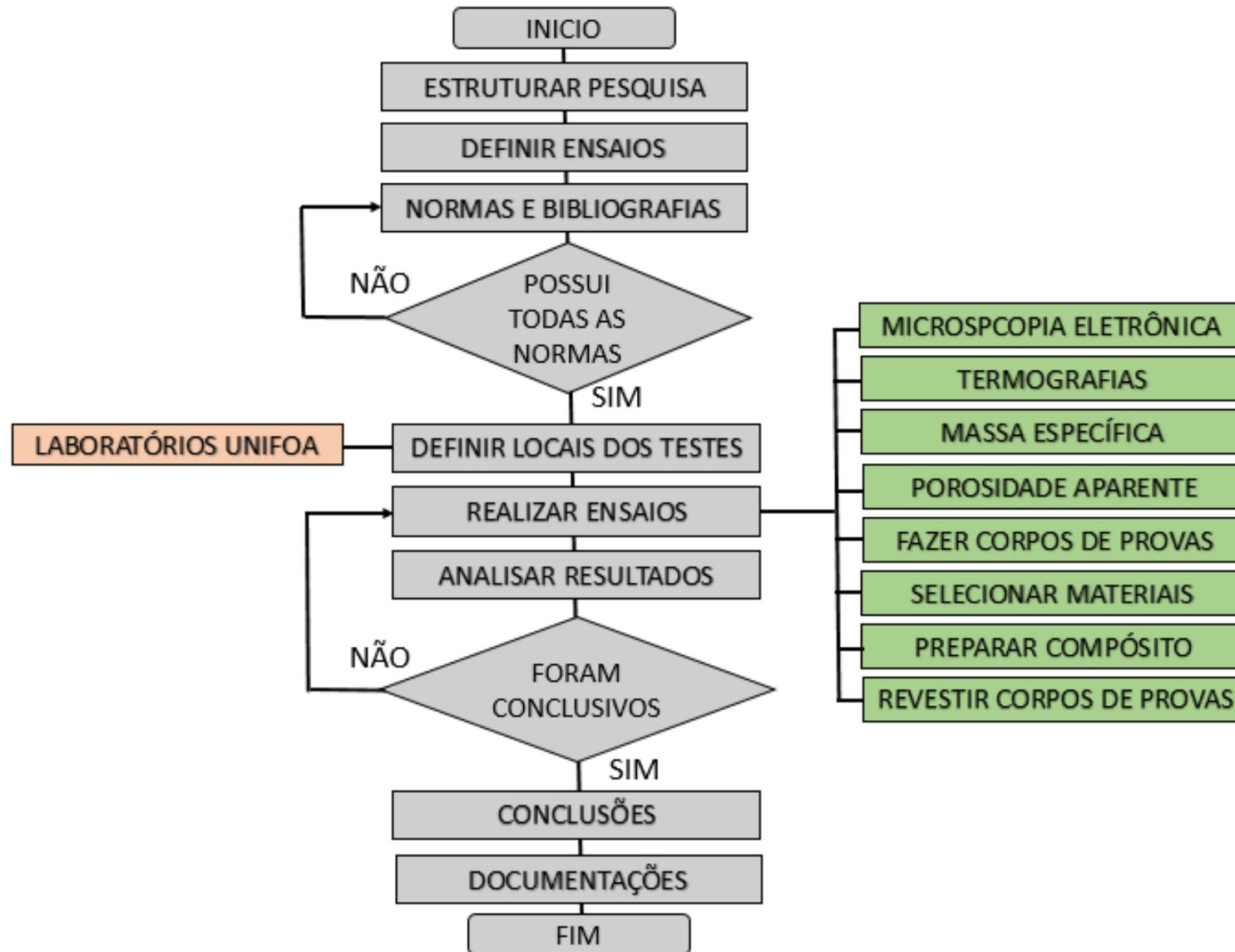
Tabela 5. Valores típicos de emissividade para alguns materiais

<b>Descrição/Composição</b>	<b>Emissividade (<math>\epsilon</math>)*</b>
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: Incropera e Dewitt, 2003.

# MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 25 – Organograma do trabalho.



### 5.1.1. Tijolo ALUKOR 85

Os corpos de prova foram retirados de tijolos refratários ALUKOR 85 fabricados pela Empresa Magnesita.

Tijolo ALUKOR 85, Magnesita.



Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.2. Checker

As peças de Checker utilizadas como corpos de provas, foram fabricadas pela Empresa IBAR Ltda.

Vista lateral de um checker.

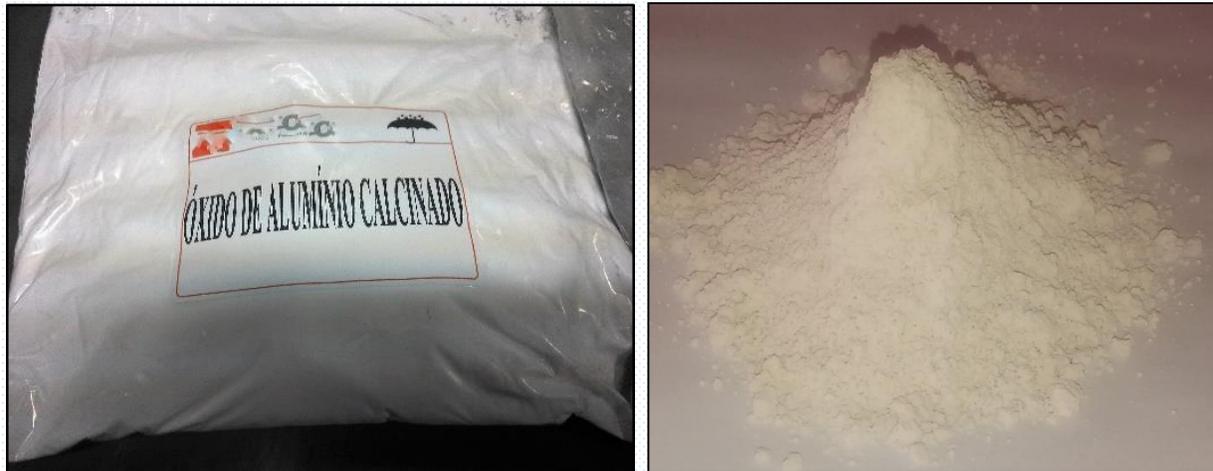


Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.3. Óxido de alumínio calcinado

Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com pureza de 98,5%, grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ .

Óxido de alumínio calcinado.

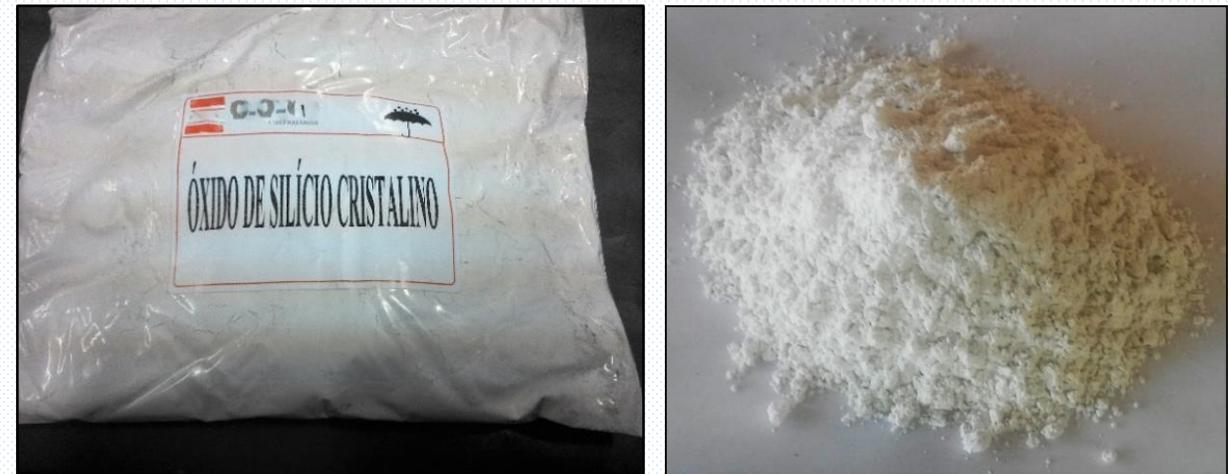


Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.4. Óxido de silício cristalino

Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com pureza de 99,0% e grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ .

Óxido de silício cristalino (Quartzo).



Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.5. Carbeto de silício

Grãos com tamanho 100% abaixo de 90  $\mu\text{m}$ , e com 98,0% de pureza.

Carbeto de silício.



Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.6. Óxido de cromo

Utilizou-se 98,5% de pureza e grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ .

Óxido de cromo.



Fonte: Autor, 2015.

### 5.1.7. Aluminato de cálcio

O agente aglutinante foi o Aluminato de cálcio a 70% de alumina com pureza de 97,5% e tamanho dos grãos 100% abaixo de 45  $\mu\text{m}$ .

Aluminato de cálcio (70% Alumina).



Fonte: Autor, 2015.

## 5.2. MÉTODOS

Estabeleceu-se um parâmetro para comparar as taxas de emissividades dos revestimentos fabricados. Os corpos de provas sem o compósito serviram como ponto de partida para medir aumento da emissividade.

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

O tijolo ALUKOR 85 foi cortado em oito cubos com dimensões de 50 x 50 x 50 (mm).

Tijolo ALUKOR 85 cortado.



Fonte: Autor, 2015.

## 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 pode variar em função da quantidade aplicada de cada componente.

Quantidades do compósito 1.

COMPONENTES	FÓRMULA	% EM PESO	PESO EM GRAMAS
ALUMINA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70%	1000
SÍLICA	SiO <sub>2</sub>	4%	57
CROMO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8%	114
CARBETO DE SILÍCIO	SiC	10%	143
ALUMINATO DE CÁLCIO	CaO	8%	114
<b>PESO TOTAL</b>		<b>100%</b>	<b>1429</b>
ÁGUA	H <sub>2</sub> O	10%	143

Fonte: Autor, 2015.

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.

Quantidades do compósito 2.

COMPONENTES	FÓRMULA	% EM PESO	PESO EM GRAMAS
ALUMINA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,8%	424
SÍLICA	SiO <sub>2</sub>	40,8%	424
CROMO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,9%	61
CARBETO DE SILÍCIO	SiC	4,6%	48
ALUMINATO DE CÁLCIO	CaO	8,0%	83
<b>PESO TOTAL</b>		<b>100,0%</b>	1040
ÁGUA	H <sub>2</sub> O	10%	104

Fonte: Autor, 2015.

As figuras mostram os componentes antes da mistura, misturados e após a adição de água. Imediatamente após a adição de água o aluminato de cálcio começa a reagir iniciando o processo de endurecimento.

Componentes e suas fases de misturas.



Fonte: Autor,2015.

Componentes hidratados com 10% de água.



Fonte: Autor,2015.

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

Após a adição de água, o compósito deve ser aplicado em um tempo máximo de 30 minutos.

Peças de Checker 50% pintadas com coating.



Fonte: Autor, 2015.

✓ **Corpos de provas**

Cubo 1: 50mm x 50mm x 50mm - Compósito 1.

Cubo 2: 50mm x 50mm x 50mm - Compósito 2.

Placa 1: 150mm x 50 mm x 15mm - Compósitos 1 e 2.

Placa 2: 100mm x 50mm x 15mm - Compósito 1.

Corpos de provas revestidos emissiva.

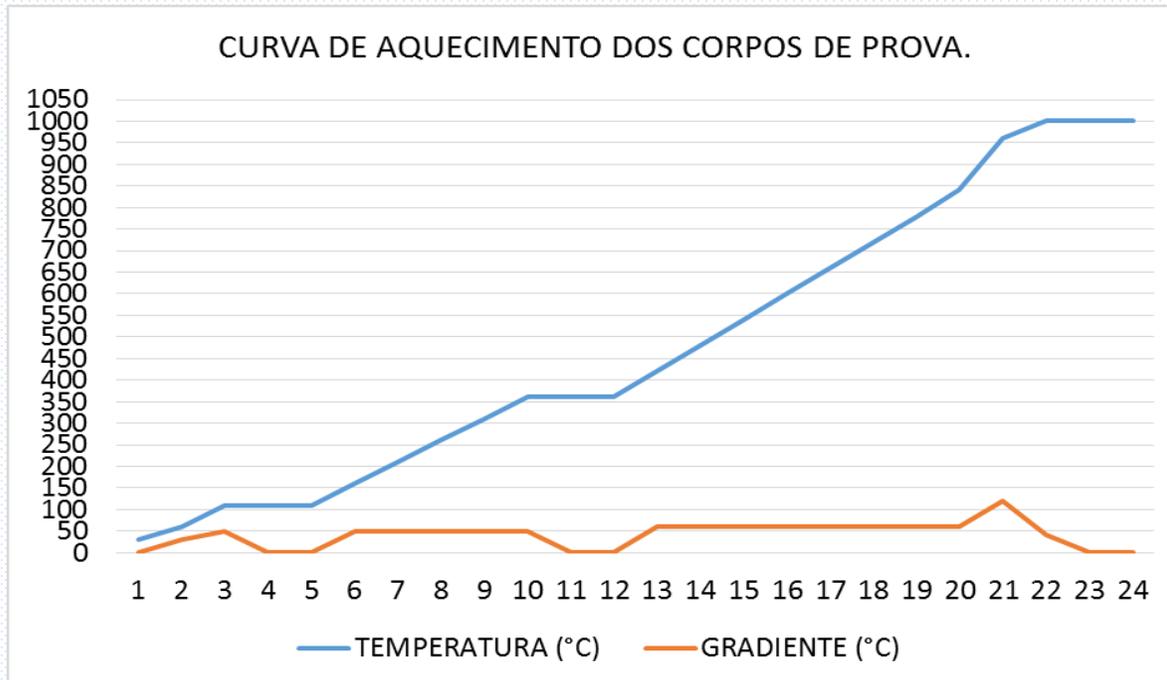


Fonte: Autor, 2015.

## 5.2.6. Secagem dos corpos de provas revestidos

Os corpos de provas revestidos foram colocados para secar em uma estufa do laboratório da UniFOA, a curva de aquecimento foi de 24 horas e patamar de 1000°C.

Curva de aquecimento aplicada.



Fonte: Autor, 2015.

Corpos de prova na estufa antes de secar.



Fonte: Autor, 2015

### 5.2.7. Termografia

Termografia é a ciência que trata da reprodução de imagens a partir da emissão de radiação infravermelha.

Máquina termográfica Flir.



Fonte: Autor, 2016.

### 5.2.8. Microscopia Eletrônica de Varredura

A técnica possibilita investigar a superfície de amostras com magnificações da ordem de centenas de milhares de vezes.

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 50mm, 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.

Corpo de provas preparado para testes (Placa 1).



## 5.2.10. Preparação dos cubos – Peças separadas.

O mesmo procedimento foi realizado para os cubos, e os testes realizados separadamente.

corpos de provas preparados para testes (Cubos).

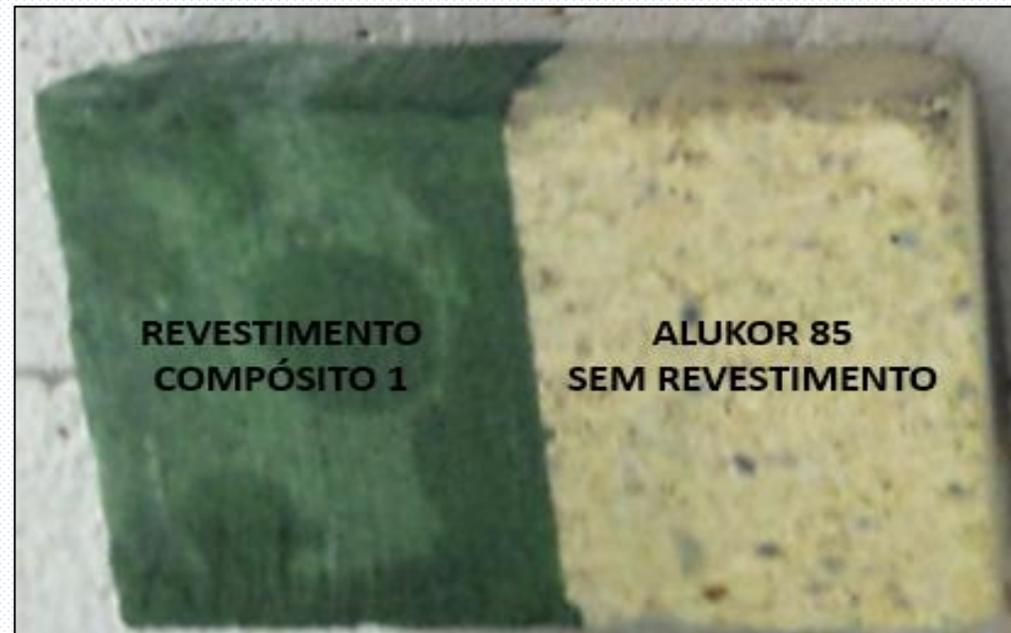


Fonte: Autor, 2015.

### 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 revestidas estavam nas laterais da peça e, portanto, mais sujeitos a perdas de temperaturas, fizemos os mesmos testes na Placa 2.

Corpo de provas preparado para testes (Placa 2).



Fonte: Autor, 2015.

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 6.1. Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente.

Após a aplicação dos compósitos 1 e 2, foi estudado o impacto que causaria na massa específica aparente – MEA e na porosidade aparente – PA.

MEA e Porosidade Aparente sem revestimento.

CORPOS DE PROVA SEM COATING							
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.

MEA e Porosidade Aparente com revestimento.

CORPOS DE PROVA COM COATING							
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	50,5	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 espessura do compósito aplicado é determinante para os resultados finais.

Quanto maior a espessura aplicada, menor seria sua interação com a peça refratária, ocasionando trincas, descolamentos e prejudicando sua aderência. Esses efeitos estão ligados às dilatações e contrações térmicas dos refratários .

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 ocorre desperdício de material, além de influenciar diretamente em sua performance.

### 6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

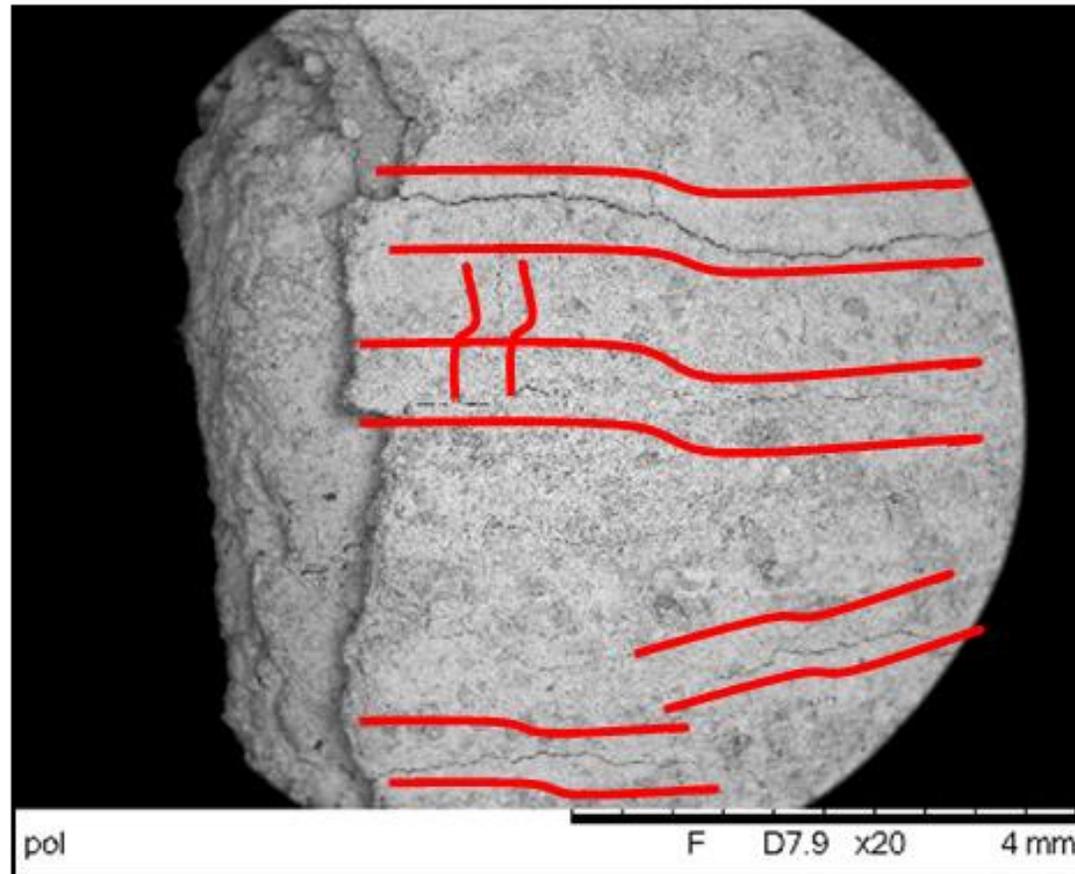
Os compósitos 1 e 2 são formados pelos conglomerados dos óxidos que compõem o revestimento, resultado da sinterização ocorrida até a temperatura de 1000°C.

Pode-se observar nitidamente nas figuras seguintes que o revestimento está totalmente agregado ao substrato e que a diferença entre os compósitos não alterou essa característica.

A imagem mostra uma diferença entre a granulometria do compósito e o substrato, confirmando os resultados obtidos nos testes de porosidade aparente que indicaram apenas 13,0% de porosidade no compósito, contra 20,1% no substrato.

Na imagem 20x aparecem as microfissuras causadas por expansão e contração durante o processo de aquecimento e resfriamento do corpo de provas.

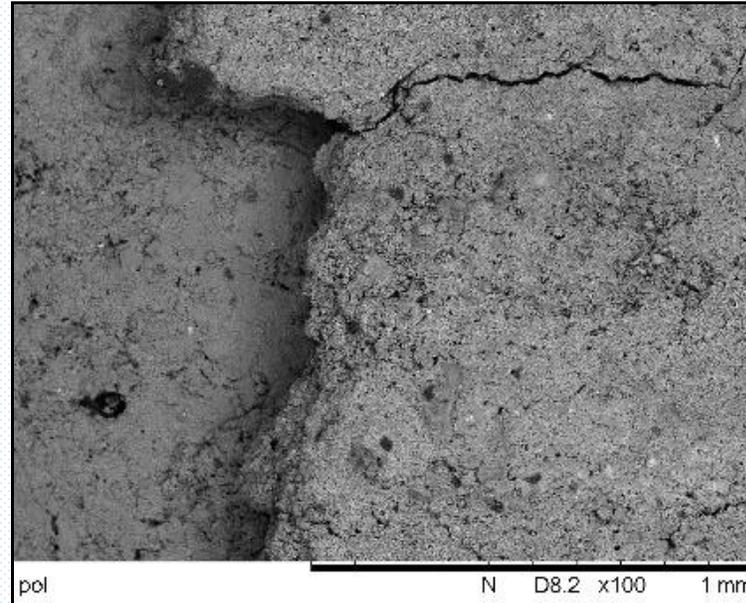
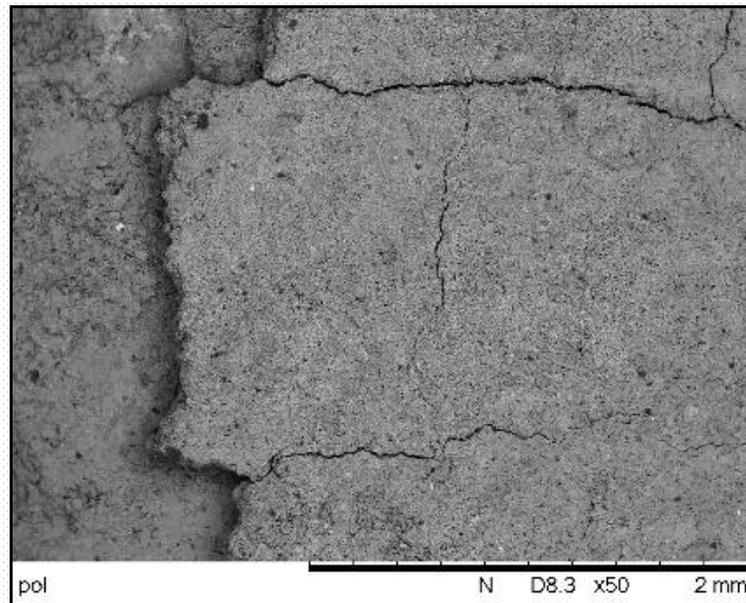
Micrografia do compósito 1, imagem a 20x.



Fonte: Laboratório UNIFOA, 2015.

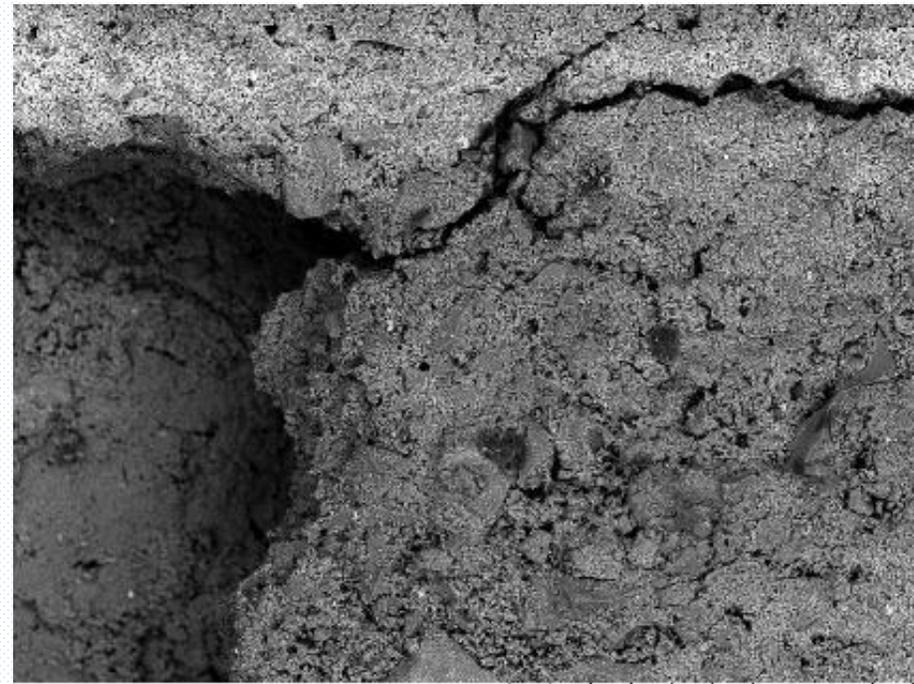
Nas imagens de 50x e 100x é possível distinguir a interface, e observar que a camada aplicada de 0,3 mm ficou totalmente integrada à peça. Esse é o efeito esperado, uma vez que o revestimento deve suportar as expansões e retrações do substrato. As microfissuras apresentadas não influenciaram no desempenho.

Micrografia do compósito 1, imagens a 50x e 100x.



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.

Micrografia do compósito 1, imagem a 250x.



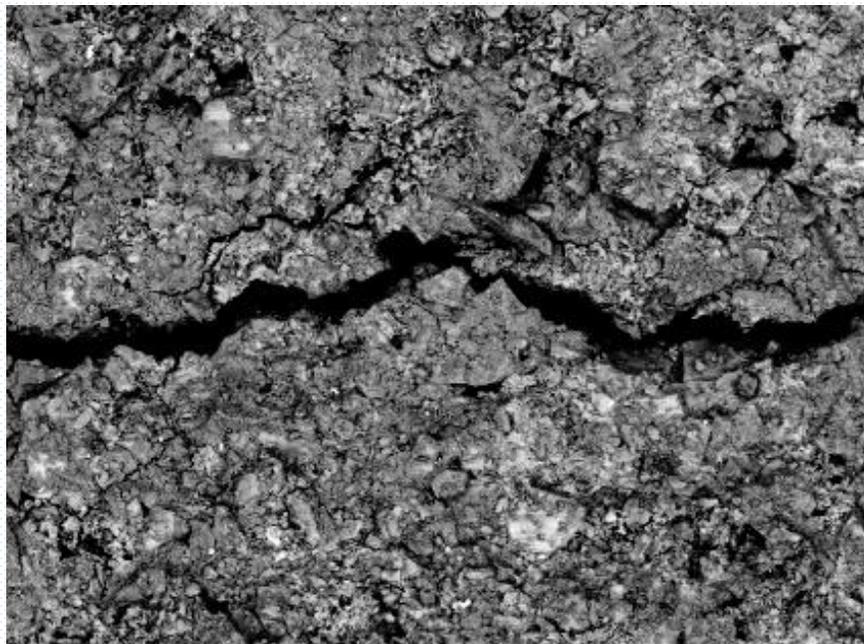
pol

N D8.2 x250 300 um

Fonte: Laboratório UNIFOA, 2015.

As micrografias abaixo 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.

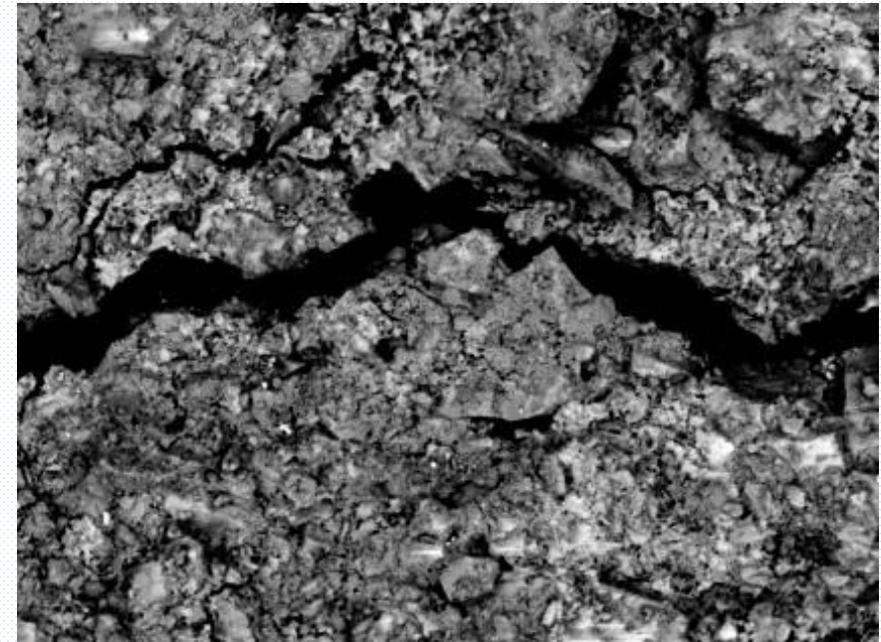
Micrografia do compósito 1, imagem 500x.



pol F D7.9 x500 200 um

Fonte: Laboratório UNIFOA, 2015.

Micrografia do compósito 1, Imagem a 800x.



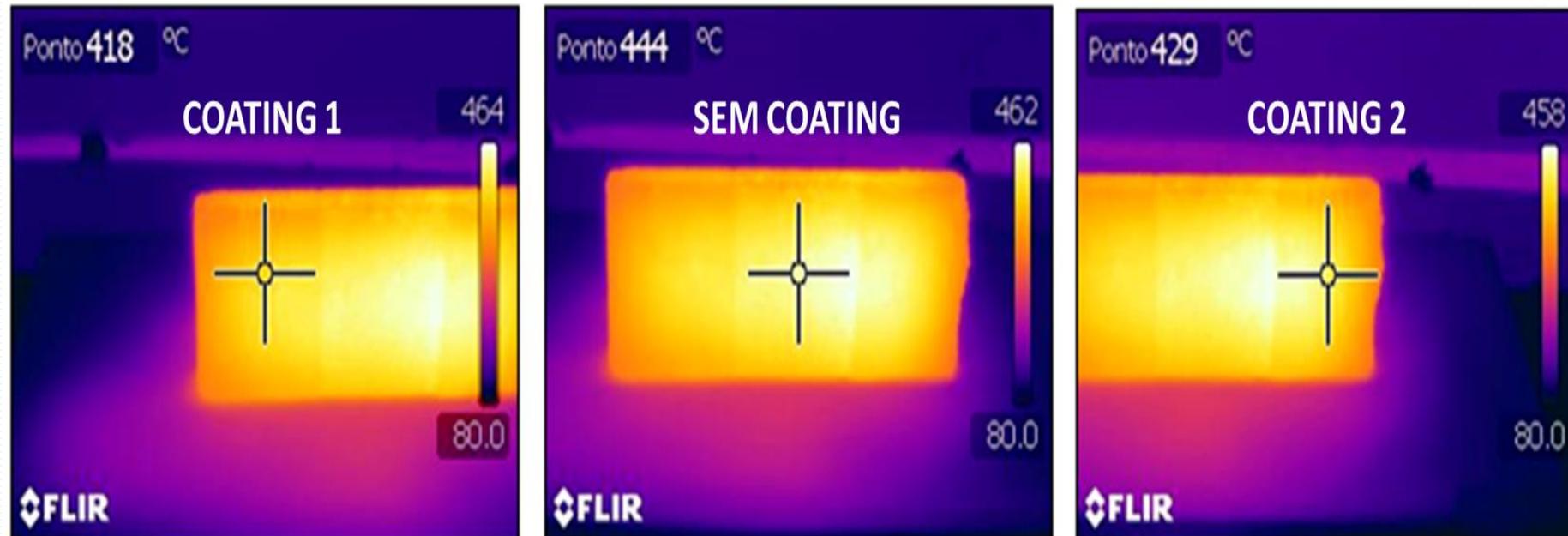
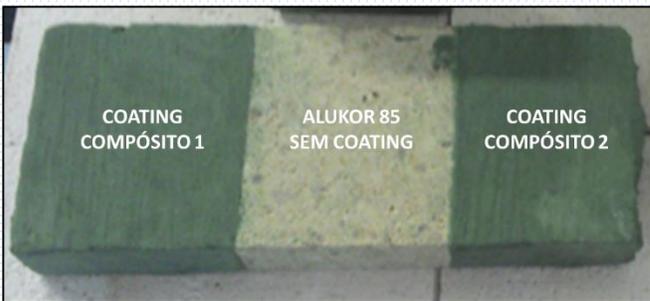
pol F D8.0 x800 100 um

Fonte: Laboratório UNIFOA, 2015.

### 6.4.1. Termogramas Placa 1 – Peça única.

A máquina termográfica foi configurada com uma emissividade 0,83 e observou-se que as partes revestidas apresentavam menores temperaturas, provando que as propriedades de reemitir energia auxiliou na redução do calor absorvido.

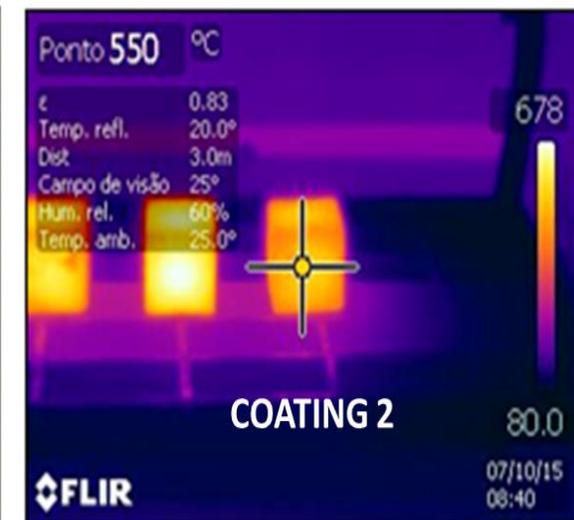
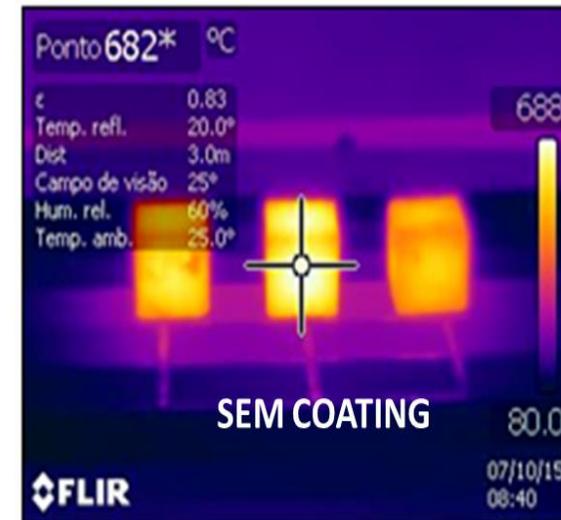
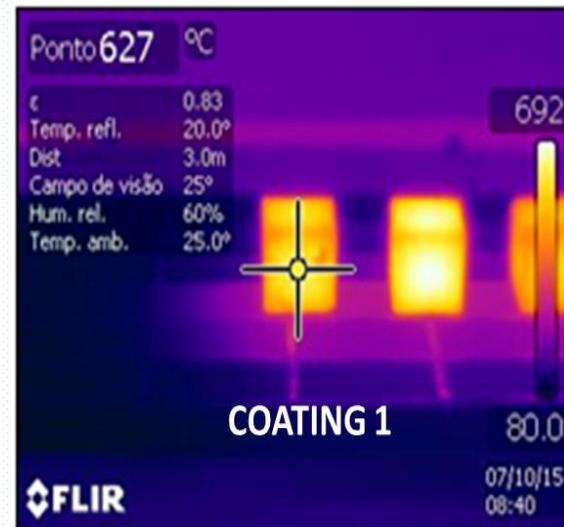
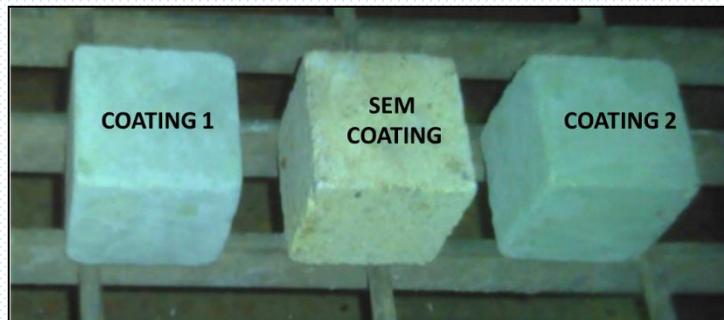
Termogramas da placa 1.



## 6.4.2. Termográficos dos cubos – Peças separadas

Os termogramas das figuras mostram que a experiência foi conclusiva e obteve-se o resultado esperado. Os corpos de provas revestidos apresentaram menor temperatura em um mesmo momento, evidência de que o compósito está emitindo maior energia, logo retendo menor calor.

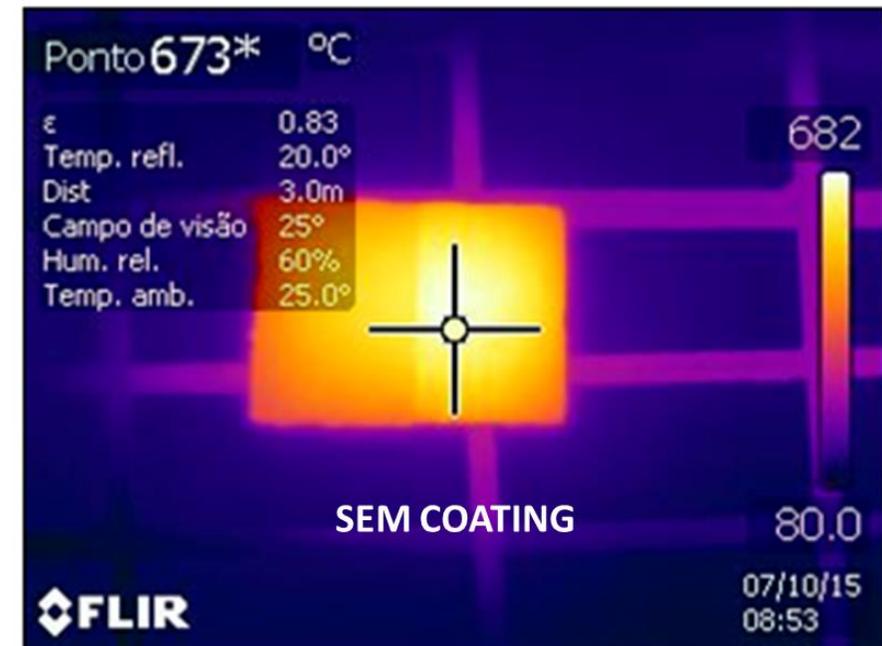
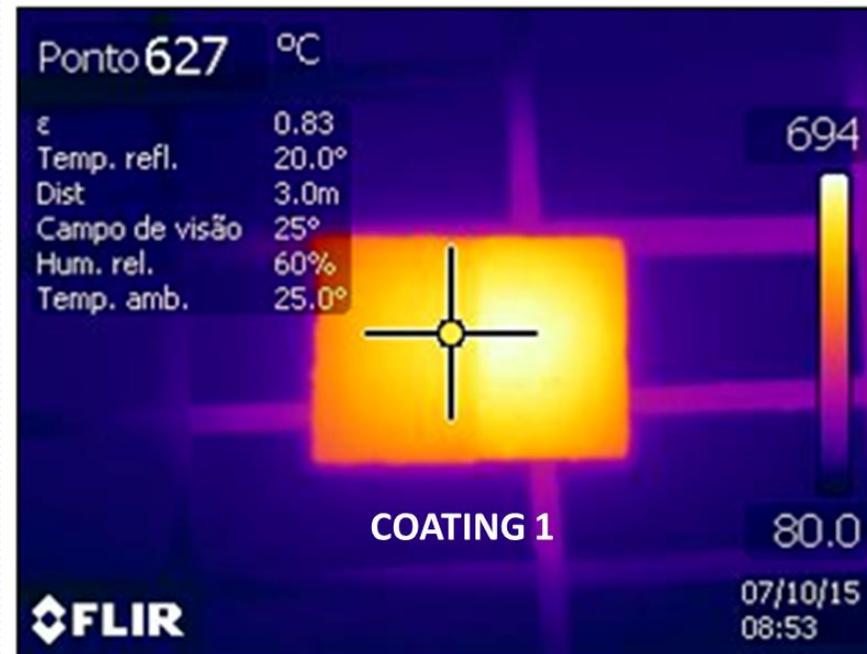
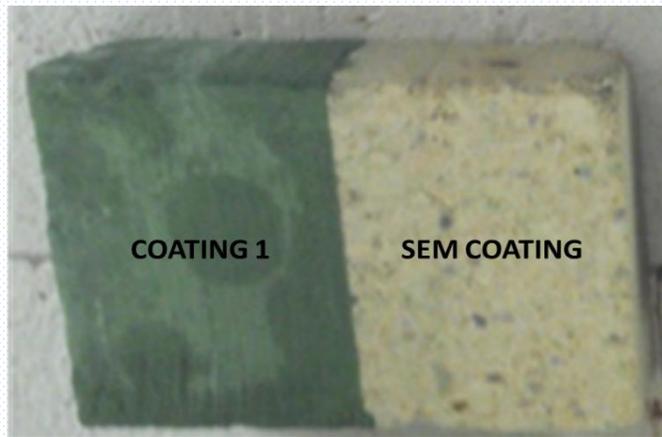
Termogramas dos cubos.



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

Os resultados encontrados confirmaram sua eficiência pois a parte da peça revestida estava com uma temperatura de  $627^{\circ}\text{C}$ , enquanto a parte não revestida apresentou temperatura de  $673^{\circ}\text{C}$ , resultado de uma menor reflexão.

Termogramas da placa 2.



# CONCLUSÕES

## 7. CONCLUSÕES

- ✓ A massa específica aparente (MEA) não apresentou variações significativas com a aplicação dos compósitos 1 ou 2;
- ✓ A porosidade aparente reduziu da média de 20,1% para 13,0%. O compósito mostrou-se bastante elástico e altamente agregado ao substrato propiciando uma camada mais homogênea e estável;
- ✓ A espessura variando de 0,2mm a 0,5mm desenvolveu sua função de aumentar a emissividade superficial, além de não apresentar oxidações.

- ✓ As micrografias por MEV foram decisivas para o entendimento de como os diversos componentes se organizam nos compósitos, e evidenciou que a porosidade do substrato foi um dos agentes que permitiu a coesão entre as partes, servindo como ancoras naturais.
- ✓ Os três corpos de provas foram aquecidos à mesma temperatura, e onde havia o revestimento, a temperatura foi mais baixa devido à maior emissividade.
- ✓ Quanto maior a radiação refletida em função de uma maior emissividade, menor será a temperatura do objeto, provando que a energia refletida será absorvida novamente pelo processo.

# SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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  $1450^{\circ}\text{C}$  e sua relação com a oxidação superficial;
- Relação entre a durabilidade do revestimento e o declínio do poder emissivo do compósito;