

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENDRICKY FASSARELLA CALIARI**

**ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA NA JUNÇÃO METAL/  
CERÂMICA UNS 32304/SÍLICO-ALUMINOSA 45-50**

Vitória  
2018

HENDRICKY FASSARELLA CALIARI

**ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA NA JUNÇÃO METAL/  
CERÂMICA UNS 32304/SÍLICO-ALUMINOSA 45-50**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Materiais Avançados.

Orientador: Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Vitória

2018

HENDRICKY FASSARELLA CALIARI

**ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA NA JUNÇÃO METAL/  
CERÂMICA UNS 32304/SÍLICO-ALUMINOSA 45-50**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Materiais Avançados.

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando  
Universidade Federal do Espírito Santo - Orientador PPGEM

---

PhD Jacyra RamosSoares  
Universidade de São Paulo

---

Dr. Charles de Abreu Martins  
Research Center General Manager - ArcelorMittal

---

Dr. Carlos Augusto Cardoso Passos  
Universidade Federal do Espírito Santo - PPGEM

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando por todo apoio necessário para realização deste trabalho, pela dedicação, motivação e pelo incentivo durante todo o período de mestrado;
- Aos meus amigos e companheiros de trabalho da Saint-Gobain, principalmente ao Leonardo de Souza Muniz, Gustavo de Almeida Rebli e Anderson Tedesco pelo incentivo e por muitas vezes me permitir doar parte do meu tempo a esse trabalho.
- A todos os que participaram diretamente ou indiretamente na realização deste trabalho;
- A minha namorada Paulina que sempre me incentivou e apoiou na realização deste trabalho;
- A minha mãe Rose e irmã Hingridy pelo incansável apoio e por muitas vezes abdicar de benefícios próprios a meu favor;
- A DEUS por tornar possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

Os tijolos cerâmicos sílico-aluminosos são amplamente utilizados nas indústrias onde existe um alto gradiente de temperatura da face de trabalho para face fria do material. Na indústria siderúrgica, por exemplo, esses tijolos são aplicados em: canal de alto forno, carro torpedo, panela de gusa, panela de aço, convertedor LD, etc. Como cerâmicas, esses materiais são geralmente duros e frágeis, possuem baixa resistência à tração e ao impacto. Isto impõe limitações para aplicações quando são submetidos a tensões mecânicas. Para melhorar as qualidades de resistência a tração, propôs-se aqui uma alternativa de combinar as propriedades da cerâmica com as propriedades dos metais. Com este objetivo em mente, nesta dissertação foi investigada a propriedade física da difusividade térmica de uma junção de cerâmica sílico-aluminosa 45-50 em aço inoxidável duplex UNS 32304. As medidas de difusividade térmica foram realizadas com um laser de dióxido de carbono com perfil espacial gaussiano, comprimento de onda  $10\mu\text{m}$ , intensidade  $10\sqrt{2}\text{W}/\text{m}^2$  e diâmetro igual a  $2\text{mm}$ . Utilizando chapas de aço UNS 32304, foram fabricados vários substratos com dimensões de  $70\times 7\times 1,807\text{mm}$ . Posteriormente, esses substratos foram fresados, produzindo canais retangulares de  $2\text{mm}$  de largura por  $1\text{mm}$  de profundidade. Cerâmicas sílico-aluminosa foram cortadas com  $70\times 2\times 3\text{mm}$  e acopladas nesses canais gerados. Foi realizado ensaio de difusividade térmica nas amostras acopladas através do método flash laser. O resultado da medida na junção metal/cerâmica apresentou valores próximos aos estimados teoricamente, considerando a hipótese de aditividade sem interferência entre os compostos.

Palavras chave: difusividade térmica, aço inoxidável duplex UNS 32304, tijolo sílico-aluminoso, flash laser.

## ABSTRACT

Fireclay bricks are widely used in industries where exist high temperature gradient from the working face to the cold face of the material. In the steel industry, for example, they are assembled in: blast furnaces runners, torpedo car, pig iron ladle, steel ladle, LD converter, etc. As ceramics, these materials are generally hard and brittle, have low tensile strength and impact resistance. This imposes limitations for applications when they are under mechanical stresses. In this way, an alternative is to combine the properties of the ceramic with the properties of the metals. With this objective in mind, in this dissertation, the joint of fireclay brick 45-50 in duplex stainless steel UNS 32304 was investigated. The thermal diffusivity measurements were performed with a carbon dioxide laser with Gaussian space profile, wavelength  $10\mu m$ , intensity  $10\sqrt{2}W/m^2$  and diameter equal to  $2mm$ . Using UNS 32304 steel plates, several substrates with dimensions of  $70x7x1,807mm$  were manufactured. Subsequently, these substrates were milled, producing rectangular channels with  $2mm$  wide by  $1mm$  deep. Silica-aluminous ceramics were cut with  $70x2x3mm$  and coupled in these generated channels. Thermal diffusivity was measured with the flash laser method. The measurement results about thermal diffusivity in the metal / ceramic junction were close to those theoretically estimated, considering the hypothesis of additivity without interference between the compounds.

Key words: thermal diffusivity, duplex UNS 32304 stainless steel, fireclay bricks, laser flash.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -(a) seção transversal; (b) seção longitudinal .....	15
Figura 2 -Processo de fabricação de tijolos refratários.. .....	18
Figura 3 -Processo de união metal/cerâmica. ....	22
Figura 4 -Desenho esquemático da junção de um rotor cerâmico com um eixo metálico.....	23
Figura 5 -Suporte mecânico para servir de substrato para cerâmica SiAl.....	24
Figura 6 -Fresadora universal ferramenteira Diplomatsemi-automática modelo FVF 2000.....	24
Figura 7 -Forma de fabricação do rasgo para o encaixe mecânico. Tipo I (“Paralelo”), Tipo II (“Rabo de Andorinha”) e Tipo III (“L”). .....	25
Figura 8 -Processo de aplainamento onde a peça de aço foi adaptada à mesa da fresadora. ....	25
Figura 9 -Substrato com as medidas da cava após processo de usinagem. ...	26
Figura 10 -Tijolo SiAl 45-50 com dimensões 229x114x76 mm. ....	26
Figura 11 -Tijolo cortado pronto para ser acoplado à chapa de aço .....	27
Figura 12 -Esquema de uma chapa de aço utilizada na realização do método flash laser.....	29
Figura 13 -Comportamento da difusividade térmica em um dado material .....	34
Figura 14 -Esquema da bancada de medição para determinação de propriedades termofísicas através do método <i>Flash de laser</i> do PRESLAB – UFES.....	36
Figura 15 -Comportamento de temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento para a amostra de aço conforme recebido..	38
Figura 16 -Comportamento de temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento para a amostra cerâmica.....	40
Figura 17 -Comportamento de temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento para a amostra cerâmica.....	41
Figura 18 -Representação da amostra com material cerâmico depositado (dimensões em milímetros). ....	42
Figura 19 -Dados experimentais de difusividade térmica das amostras analisadas (pontos vermelhos) e dados calculados pela hipótese da aditividade	

sem interferência para diferentes proporções de metal/cerâmica (pontos vazados)..... 44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Composição química do aço <i>lean</i> duplex.....	15
Tabela 2 -Propriedades químicas e físicas dos tijolos SiAl especiais e suas aplicações... ..	19
Tabela 3 -Propriedades químicas e físicas dos tijolos SiAl especiais e suas aplicações .. ..	20
Tabela 4 -Dados do aço duplex UNS 32304 fornecidos pelo fabricante .....	37
Tabela 5 -Dados da cerâmica sílico-aluminosa 45-50 fornecidos pelo fabricante.....	40

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$	Fase Ferrita Delta
$Fe_{\alpha}$	Fase Ferrita alfa
$\gamma$	Fase Austenita
mm	Milímetro
$\kappa$	Condutividade térmica
$\rho$	Massa específica
$c_p$	calor específico
g	Gramas
K	Kelvin
m	Metro
s	Segundo
T	Temperatura
x	Comprimento no eixo x
t	tempo
$l$	Parcela de comprimento
$v$	Constante
$C_0$	Constante
$X$	Função de x
$\Lambda$	Função de t
$\Upsilon$	Constante
cos	Cosseno
sen	Seno
$n$	Número inteiro positivo
$\pi$	3,14159
D	Camada fina da superfície
cm	Centímetro
cal	Caloria
°C	Graus Célsius
$T_{max}$	Máximo acréscimo de temperatura em $x = l$
$T_M$	Máximo acréscimo de temperatura em $x = l$
$t_c$	Tempo característico de difusão

$\alpha_0$	Difusividade térmica sem correção devido aos efeitos de tempo finito de pulso
$L$	Espessura
$t_{\frac{1}{2}}$	Tempo necessário para que o aumento de temperatura na face oposta da amostra atinja metade do seu valor máximo
$\tau$	Tempo de entrega do pulso
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
m	Metros
W	Watts
Pa	Pascal
J	Joule
Kg	Kilograma
$t_{\text{final}}$	Tempo onde a temperatura chega ao seu máximo valor após aumento gradativo
$t_{\text{inicial}}$	Tempo onde a temperatura começa a aumentar de maneira gradativa

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. MATERIAIS, PROCESSOS E APLICAÇÃO.....	14
2.1. Considerações sobre aço inoxidável.....	14
2.1.1. Aço inoxidável duplex.....	14
2.2. Considerações sobre as cerâmicas.....	16
2.2.1. Cerâmicas Sílico-Aluminosas (SiAl).....	17
2.2.1.1. Materiais e fabricação.....	18
2.2.1.2. Classes e características do tijolo refratário sílico-aluminoso.....	18
2.2.1.3. Propriedades típicas dos tijolos sílico-aluminosos especiais.....	19
2.2.1.4. Estrutura.....	21
2.2.1.5. Principais aplicações.....	21
2.3. Processo de junção.....	21
2.3.1. Junção mecânica.....	23
3. METODOLOGIA.....	24
3.1. Preparação da cava no aço UNS 32304.....	24
3.2. Acoplamento da cerâmica no substrato.....	26
3.3. Difusividade Térmica.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1. Difusividade térmica do aço.....	37
4.2. Difusividade térmica da cerâmica.....	39
4.3. Difusividade da junção metal/cerâmica.....	41
4.4. Análise da difusividade térmica da junção metal/cerâmica.....	42
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	45
5.1. Conclusão.....	45
5.2. Trabalhos futuros.....	45
REFERÊNCIAS.....	46

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais cerâmicos sílico-aluminosos são estudados há várias décadas e possuem potencial para aplicações em pequena e grande escala. Uma parte das aplicações está concentrada em revestimento refratário de equipamentos onde se necessita de um alto gradiente de temperatura da face quente para face fria do material em estudo, pois se trabalha com materiais em geral metálicos e não metálicos de altíssima temperatura, como no caso das usinas siderúrgicas, temperaturas que podem chegar até cerca de 1700 ° C. No entanto, as cerâmicas apresentam algumas limitações [1,2].

Os materiais cerâmicos apresentam ligações com forte caráter iônico, pequena condutividade eletrônica e conseqüentemente um bom isolamento térmico. Isso se deve as características dessas ligações, que promovem a baixa mobilidade eletrônica, tornando-os eficientes isolantes térmicos. Outra característica desse material é o módulo de elasticidade elevado, configurando materiais pouco tenazes (baixa ductilidade) [3].

Recentes estudos mostraram que é possível produzir refratários a partir de argila litomárgica, que até então não vinha sendo utilizada para este fim devido à sua baixa plasticidade. Junto aos depósitos de bauxita, esta pode ser usada para produzir refratário sílico-aluminoso [4].

Cerâmicas são em geral sintetizadas em formas pré-definidas, dificultando muito sua interface e montagem em dispositivos. Por este motivo, é recomendada que para montagens complexas e com muitas interfaces se promova a junção da cerâmica refratária com outros materiais. Com montagens híbridas (cerâmica/metal), formam-se dispositivos capazes de minimizar a não ductilidade da cerâmica. Além disso, pode-se também aplicar novos métodos de fabricação para atender às condições de operação [2,5]. Verifica-se ultimamente que existem técnicas de junção de cerâmicas visando ampliar sua utilização, tais como: cerâmica/cerâmica, cerâmica/metal ou metal/cerâmica [6].

É possível encontrar exemplos onde as propriedades de um material são aprimoradas para atender a demanda de serviço [7]. Os motores de combustão interna são um exemplo disso, pois os mesmos são submetidos a elevadas temperaturas de trabalho, movimento cíclico e relativo de uma série de componentes, ambiente quimicamente agressivo, e há necessidade de se reduzir o

peso das partes móveis para melhorar o rendimento e reduzindo assim, o consumo de combustível.

No que se refere aos materiais cerâmicos refratários, um dos desafios é aumentar a resistência as solicitações mecânicas de tração, como já mencionado anteriormente. Além disso, deseja-se implementar uma nova maneira de fixação dos refratários nos equipamentos, uma vez que a aplicação atual é feita de forma "artesanal", como feito na indústria civil, argamassando e montando um a um, fato que demanda bastante tempo e agilidade da operação [8].

Com isso, o objetivo deste trabalho foi preparar um dispositivo composto cerâmica/metal e estudar o comportamento da difusividade térmica nesse dispositivo. Nesta proposta, o material metálico é utilizado como suporte mecânico. Mais especificamente, estudou-se o comportamento do suporte mecânico utilizando um aço inoxidável duplex UNS 32304 conjugado com uma cerâmica refratária sílico-aluminosa 45-50 investigando a viabilidade de utilizar esse dispositivo composto como dispositivo de isolamento de calor. Em especial, verificou-se como um pulso de energia em forma de calor se propaga no conjunto cerâmico/metal.

## 2 MATERIAIS, PROCESSOS E APLICAÇÃO

### 2.1. Considerações sobre aço inoxidável

Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro que contém um mínimo de aproximadamente 11% de cromo como principal elemento de liga [9].

Os aços inoxidáveis são divididos em 5 classes ou famílias principais que de acordo com *AK Steel Corporation*, 2004, são:

- Martensíticos;
- Ferríticos;
- Austeníticos;
- Duplex;
- Endurecíveis por precipitação;

Como essa dissertação descreve uma junção metal/cerâmica, cujo o aço é inoxidável duplex, é apresentado na próxima seção as suas características. A escolha do aço duplex se deve ao fato do mesmo apresentar propriedades conjugadas de resistência à corrosão e resistência mecânica.

#### 2.1.1. Aço inoxidável duplex

A fabricação do duplex se dá através da reação eutetóide:



O Material então é laminado a quente, no campo bifásico acima mencionado, seguido de tratamento de solubilização (que varia entre 1020 a 1100°C) e um resfriamento rápido até a temperatura ambiente [10];

Nas micrografias a seguir pode-se ver a microestrutura do aço duplex, onde a parte mais escura é a ferrita e as mais claras são ilhas de austenita:

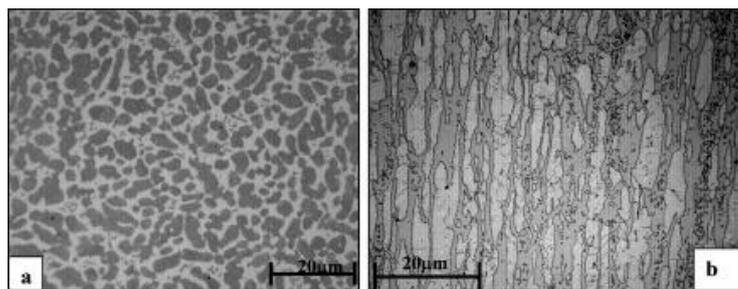


Figura 1 - (a) seção transversal; (b) seção longitudinal [11]

Os aços inoxidáveis duplex são usualmente separados em três grupos [12], a saber:

- Aços inoxidáveis duplex de baixa liga (*lean duplex*): não possuem molibdênio na composição química e por possuírem menor teor de elementos de liga, são economicamente competitivos. Um exemplo é o UNS32304 - SAF2304 [13].
- Aços inoxidáveis duplex de média liga: esses são os duplex mais utilizados, possuem entre 5 a 6% de molibdênio e apresentam resistência à corrosão intermediária entre os austeníticos comuns e aços inoxidáveis superausteníticos.
- Aços inoxidáveis duplex de alta liga: grupo conhecido como superduplex, apresentam elevada resistência à corrosão quando comparados aos superausteníticos.

Na Tabela 1 está descrito a composição química de alguns aços duplex, dando destaque ao aço em estudo (2304).

Tabela 1 - Composição química do aço *lean duplex* [14].

Tipo	UNS No.	EN No.	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Lean										
	S32001	1.4482	0.03	19.5–21.5	1.0–3.0	0.6	0.05–0.17	4.0–6.0	1.0	–
	S32101	1.4162	0.04	21.0–22.0	1.35–1.7	0.1–0.8	0.20–0.25	4.0–6.0	0.1–0.8	–
	S32202	1.4062	0.03	21.5–24.0	1.0–2.8	0.45	0.18–0.26	2.00	–	–
	S82011		0.03	20.5–23.5	1.0–2.0	0.1–1.0	0.15–0.27	2.0–3.0	0.5	–
<b>2304</b>	S32304	1.4362	0.03	21.5–24.5	3.0–5.5	0.05–0.6	0.05–0.20	2.50	0.05–0.60	–
		1.4655	0.03	22.0–24.0	3.5–5.5	0.1–0.6	0.05–0.20	2.00	1.0–3.0	–

Nota-se que a nomenclatura 2304 se dá aos teores em massa de cromo e de níquel que giram em torno de 23% e 4%, respectivamente.

## 2.2. Considerações sobre as cerâmicas

Materiais cerâmicos compreendem todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas [15].

Os primeiros relatos de cerâmicas para revestimento arquitetônico surgiram por volta de 500 a.C., e considerando o seu alto custo, este material ficou sendo por vários séculos de uso restrito. No ano de 1950, aproximadamente, ceramistas italianos introduziram os primeiros avanços neste setor [16,17,18].

A principal função do refratário é facilitar a produção de outros materiais, tais como metais, vidros, produtos petroquímicos e cimentos. Desde a idade do bronze eles permitiram a utilização de grandes quantidades de calor na fabricação desses materiais [19].

Sem os refratários, provavelmente a maior parte da produção científica e a evolução tecnológica dos últimos 100 anos não ocorreriam. A indústria de refratários, por necessidade, tem se desenvolvido em resposta aos avanços na produção de alguns materiais, em particular, os da indústria siderúrgica, que atualmente utilizam mais de 60% de todos os refratários produzidos [20].

Historicamente, a motivação para evolução das cerâmicas refratárias foi o desejo por parte dos consumidores por maior produtividade e por campanhas de utilização mais longas, geralmente em temperaturas mais elevadas, obtidas melhorando a propriedade termomecânica e a resistência à corrosão dos refratários [21].

Os refratários queimados e ligados a base de argila são os tipos mais importantes, do ponto de vista de volume de negócios, e são usados em fornos de caldeiras, altos fornos, fornos de cal, indústria metalúrgica para fornos de fusão, reaquecimento e tratamento ferro, aço ou metais não ferrosos. Para resistência à escória são inferiores à sílica e refratários básicos. Materiais mais densos e com maior teor de alumina resistem melhor à escória. Argila calcinada é adicionada à mistura de tijolos para reduzir a contração pós-queima e com isso dar mais estabilidade nas aplicações [22].

O isolamento térmico é um dos principais requisitos para várias aplicações industriais. O pó de carvão, juntamente com 4-5% em peso de água, foi utilizado

como aditivo em argilas. A combustão do carvão contribui para o aumento da porosidade nos produtos finais, resultando em melhor isolamento térmico. A redução da granulometria do pó de carvão misturado a porcentagem fixa de carvão comumente utilizado na produção da cerâmica melhorou a resistência ao esmagamento e a porosidade da mesma, diminuindo a condutividade térmica do refratário. Em contrapartida, para uma mesma faixa de tamanho de partícula de carvão, a resistência ao esmagamento e a condutividade térmica diminuem e a porosidade aumenta com o aumento da porcentagem de carvão [23].

Muito esforço tem sido feito para produzir tijolos com menor porosidade, a fim de se obter maior resistência à escória, através do cuidadoso dimensionamento de argila calcinada, alta pressão e alta queima [24]. Se o tamanho do grão da argila calcinada usada na preparação do refratário for grande, o resultado é um refratário mais poroso, conseqüentemente mais resistente a mudanças súbitas de temperatura. Por outro lado, se a argila calcinada possui grãos finos, o material final é menos poroso, e com isso mais resistente a escória e ataque químico, e caracteriza-se por maior resistência a esmagamento a frio [25].

Recentemente, outros fatores se tornaram significativos, como a necessidade de proteger o meio ambiente e as pessoas de resíduos e emissões insalubres. Essa necessidade, por exemplo, levou à substituição de revestimentos contendo cromo, particularmente em fornos rotativos de cimento, por refratários sem cromo, devido à geração de  $\text{Cr}^{6+}$  durante a utilização em fornos, que é carcinogênico [21].

Como a cerâmica utilizada no desenvolvimento desta dissertação é do tipo sílico-aluminosa, é apresentada na próxima seção as suas características. Esta cerâmica foi escolhida por possuir grande volume de aplicação em diversas áreas, principalmente em usinas siderúrgicas.

### 2.2.1. Cerâmicas sílico-aluminosas (SiAl)

São produtos densos, prensados e queimados a alta temperatura, contendo teores de Alumina que geralmente variam entre 22% a 46%. Chamotes (argilas refratárias calcinadas) usualmente são utilizados para sua produção, pode ainda conter baixos teores de óxido de ferro e álcalis. A qualidade da matéria-prima, o processo de mistura, a prensagem e a condição de queima influenciam diretamente as propriedades físicas do produto [1,26].

Nesses materiais, a propriedade refratária é influenciada principalmente pelo teor de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mas também é afetada pela porcentagem total de fundentes adicionados. A propriedade refratária aumenta com o incremento do teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nos produtos refratários silico-aluminosos [26,27].

#### 2.2.1.1. Materiais e fabricação

Os principais constituintes químicos do tijolo refratário são a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a alumina. Os materiais brutos usados são: chamote, mistura de argilas refratárias moídas e o ligante. O chamote é usado como agregado de tamanho reduzido junto com a mistura de argilas refratárias moídas a qual promove a sinterização e a ligação durante a queima. Quanto maior o teor de alumina no produto, maior será a temperatura de queima [1,26].

O diagrama, contido na Figura 2 a seguir, mostra o processo de fabricação para tijolos refratários:

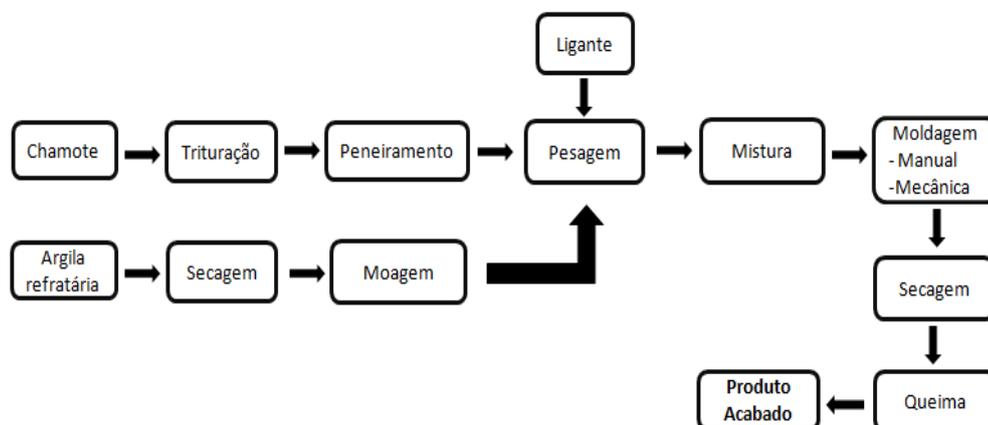


Figura 2 - Processo de fabricação de tijolos refratários, adaptado da ref. [1].

O aquecimento é normalmente realizado em um forno túnel, mas outro forno pode ser utilizado [1].

#### 2.2.1.2. Classes e características do tijolo refratário sílico-aluminoso

A norma JIS R 2304 especifica dez classes de produtos de argila refratária designada como N1 até N10. Tipos N1 até N5 são usadas em aplicações onde é requerido a resistência ao desgaste e a erosão. Esse padrão detalha especificamente a resistência à deformação a altas temperaturas para os produtos

designados como N1 até N2-2. Produtos de argila refratária designada como N6 até N10 tem alta porosidade aparente e baixa resistência ao britamento, quando comparados com os produtos destinados para N1 até N5. Produtos N6 até N10 são aplicados onde requer maior resistência a choque térmico. Quando a alta resistência ao desgaste, lascamento e a refratariedade sob carregamento é requerida, tijolos sílico-aluminosos especiais são fabricados e utilizados [1,28].

### 2.2.1.3. Propriedades típicas dos tijolos sílico-aluminosos especiais

Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentadas as propriedades típicas dos tijolos SiAl especiais que não estão especificadas na norma JIS R 2304.

Tabela 2 - Propriedades químicas e físicas dos tijolos SiAl especiais e suas aplicações [1].

<b>Tipo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Características	Resistência ao amolecimento	Resistência à atmosfera redutora	Correspondente a N1 no JIS R 2304	Correspondente a N2-1 no JIS R 2304
Área de Aplicação	Regenerador de alto forno	Forno de Carvão preto	Fábrica de cimento (pré-aquecedor)	
Refratariedade (resistência ao calor) (SK)	34<	34<	34<	33<
Densidade Volumétrica (g/cm <sup>3</sup> )	2,20~2,25	2,15~2,25	2,05~2,15	2,00~2,15
Porosidade aparente (%)	17,0~20,0	15,0~17,0	20,0~23,0	20,0~23,0
Resistência ao britamento frio (MPa)	44,1<	39,2<	29,4<	24,5<
Refratariedade sob carga T2 (°C)	1420<	1420<	1410<	1390<
Expansão Térmica a 1000 °C (%)	0,4~0,6	0,5~0,6	0,5~0,6	0,5~0,6
Mudança linear permanente (%)	±0,2 em 1400°C	± 0,2 em 1400°C	± 0,2 em 1400°C	± 0,2 em 1400°C

Composição Química (wt%):				
SiO <sub>2</sub>	X	52~56	50~55	56~60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40~45	40~44	40~44	36~40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	0,9~1,4	1,5~2,5	1,5~2,5

Tabela 3 - Propriedades químicas e físicas dos tijolos SiAl especiais e suas aplicações [1].

Tipo	E	F	G
Características	Correspondente a N2-2 no JIS R 2304	Resistência abrasiva	Resistência ao desgaste
Área de Aplicação Refratariedade (resistência ao calor) (SK)	32<	Incinerador 32<	luva 30<
Densidade Volumétrica (g/cm <sup>3</sup> )	2,00~2,10	2,00~2,15	1,90~2,05
Porosidade aparente (%)	20,0~23,0	16,0~20,0	22,0~26,0
Resistência ao britamento frio (MPa)	24,5<	29,4<	14,7<
Refratariedade sob carga T2 (°C)	1370<	1360<	x
Expansão Térmica a 1000 °C (%)	0,5~0,6	0,5~0,6	0,5~0,6
Mudança linear permanente (%)	± 0,2 em 1350°C	± 0,2 em 1350°C	± 0,3 em 1350°C
Composição Química (wt%):			
SiO <sub>2</sub>	60~64	60~64	65~69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32~36	32~36	27~31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5~2,5	1,5~2,0	1,5~2,5

#### 2.2.1.4. Estrutura

Os tijolos de argila refratária são compostos de chamote agregado e agregado fino de argila refratária. Durante a queima, as partículas refratárias são sinterizadas e formam a estrutura do tijolo. A argila reduz de tamanho durante a sinterização, e com isso deixa poros e cavidades ao redor dos grãos de chamote. Também durante a queima ocorre a formação de vidro devido a combinação da sílica oriunda da decomposição da argila com outros óxidos e impurezas. Então, tijolos refratários tendem a se deformar sob carregamento, o que é uma desvantagem do produto [1,26].

#### 2.2.1.5. Principais aplicações

Tijolos SiAl são considerados de baixo custo e utilizados em uma enorme variedade de fornos como, por exemplo, o de calcinação. Algumas das aplicações são: zonas de baixa temperatura em alto fornos, incineradores de resíduos, forno rotativo de cimento (zona de pré-aquecimento e pré-aquecedor), forno de metais não ferrosos, tanques de vidro, etc [1,29].

### 2.3. Processo de junção

A junção entre dois materiais pode ser explicada como sendo a união entre duas ou mais partes por meio da formação de ligações químicas, físicas ou mecânicas, ou ainda uma combinação destas. Metais, cerâmicos, polímeros, madeira e diversos outros materiais ou possíveis associações entre estes, podem ser submetidos a um processo de junção, no intuito de serem empregadas como componentes para aplicações de engenharia [30].

Para a produção de componentes de maiores dimensões e com geometria complexa, é utilizada, principalmente, a junção cerâmico/cerâmico [30]. Porém, alguns entraves aparecem, considerando que quanto maior o volume da peça cerâmica, maiores são as chances de defeitos e com isso sua resistência mecânica e confiabilidade serão reduzidas [31,32,33].

Isto justifica a importância de desenvolver junções que resultem em materiais com alta confiabilidade, quando trabalha-se com implantes ortopédicos,

revestimentos biocompatíveis, válvulas para coração e cateteres. Nestes casos, a falha em uma junta resulta em risco de morte [32,34,35]. A microestrutura da junta está diretamente relacionada com a confiabilidade da junção, assim como com os defeitos inerentes dos materiais de base e do metal de adição, no caso da brasagem [34,35,36].

O recurso de associação de materiais cerâmicos e metálicos é usado quando a intenção é obter componentes híbridos com propriedades individuais ou aditivas, obtendo revestimentos cerâmicos em substratos metálicos, juntas metal/cerâmica, dentre outros [30].

São três os tipos de classificação dos métodos utilizados para produzir uniões envolvendo materiais cerâmicos: junção mecânica, que utiliza parafusos, encaixe mecânico e braçadeira, junção indireta que acontece por processo de adesão e brasagem e junção direta que é realizada pelo processo de soldagem e difusão [37]. Na Figura 3 está apresentado um resumo dessa classificação.

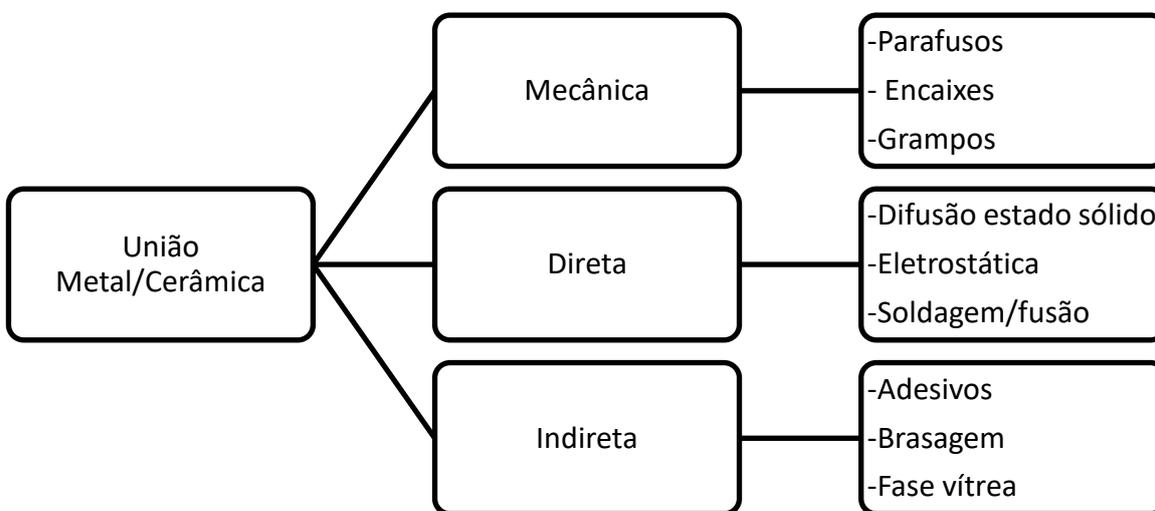


Figura 3 - Processo de união metal/cerâmica, adaptado da ref.[10].

Por utilizar neste trabalho uma junção mecânica, é apresentado na próxima seção as suas principais características.

### 2.3.1. Junção mecânica

É o procedimento mais simples para fazer a junção entre a cerâmica e o metal. Possui um custo bem reduzido pois pode ser realizada através de parafusos, encaixe mecânico e braçadeiras, com isso tem sido amplamente empregada onde a resistência mecânica e as temperaturas precisam ser moderadas [38].

Um exemplo de junção que tem concorrido com a brasagem é a de turbinas de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com eixos metálicos. Tal processo aumenta o rendimento e otimiza o consumo de combustível devido a possibilidade de trabalhar em temperaturas mais elevadas, além de reduzir a inércia do sistema pela redução de peso. Muitas inovações nas técnicas de junção metal/cerâmica foram geradas a partir do aprimoramento dos rotores cerâmicos. A associação do encaixe mecânico através de soldagem por fricção é uma das alternativas mais utilizadas atualmente, pois permite melhor refrigeração dos mancais e redução das tensões residuais associadas à união. Nesta técnica, acontece a adesão de uma luva metálica ao rotor cerâmico por encaixe mecânico e então, o eixo é soldado na luva por fricção [38].

Na Figura 4 pode-se observar a junção de um rotor cerâmico com um eixo metálico, além da soldagem por atrito entre a luva e o eixo metálico.

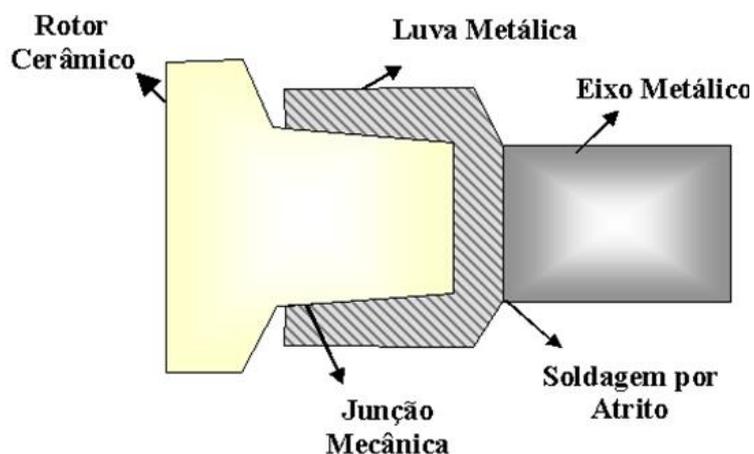


Figura 4 - Desenho esquemático da junção de um rotor cerâmico com um eixo metálico[38].

Dar subsídios para construção de um dispositivo que facilite a aplicação de tijolos refratários  $\text{SiAl}$  fazendo com que a difusividade térmica seja um fator previsto é a finalidade desta pesquisa de mestrado.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1. Preparação da cava no aço UNS 32304

Chapa de aço inoxidável duplex UNS 32304 foi cortada com dimensões de 7x70x1,807mm como representado na Figura 5. Com a finalidade de depositar a cerâmica no aço, foi necessário usinar uma cava.

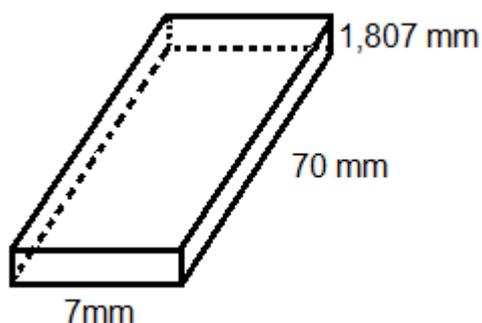


Figura 5 - Suporte mecânico para servir de substrato para cerâmica SiAl.

A cava foi usinada em uma fresadora ferramenta Diplomat semi-automática modelo FVF 2000 conforme Figura 6.



Figura 6 - Fresadora universal ferramenta Diplomat semi-automática modelo FVF 2000.

Para ter melhor encaixe mecânico foram propostas três geometrias do perfil da cava, conforme mostra a Figura 07.

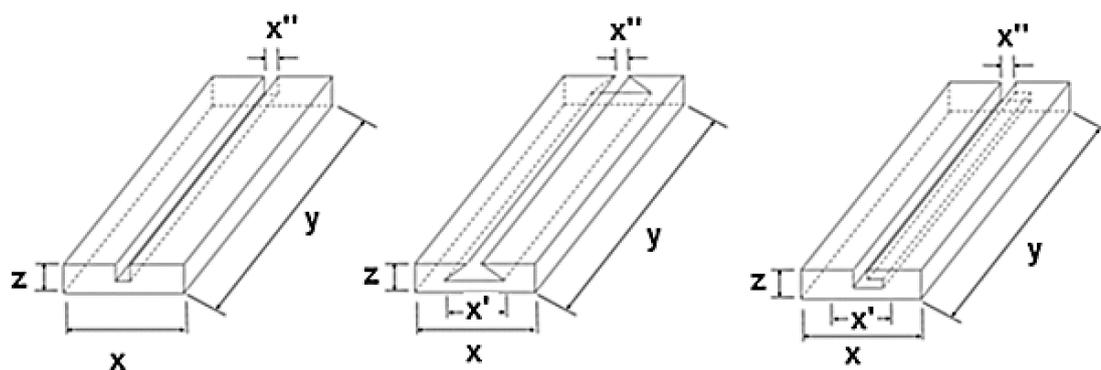


Figura 7 - Forma de fabricação do rasgo para o encaixe mecânico. Tipo I (“Paralelo”), Tipo II (“Rabo de Andorinha”) e Tipo III (“L”).

Dentre estas possibilidades de fabricação da cava, neste trabalho foi adotado o tipo I, com o perfil de forma paralela, cuja largura foi de 2mm e a profundidade foi de 1mm. Para tal finalidade, foi adaptado o movimento da mesa da fresadora. Com isto, foi possível retirar material através do processo de aplainamento, conforme mostra a Figura 8.

Para execução do processo de aplainamento, fixou-se uma ferramenta com dimensão de 2mm de largura na porta ferramenta da fresadora universal e utilizado o avanço para mesa da fresadora.

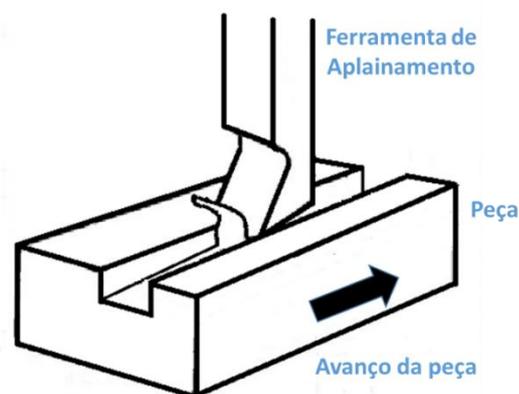


Figura 8 - Processo de aplainamento onde a peça de aço foi adaptada à mesa da fresadora.

O processo teve 40 passes de 0,025mm e o avanço da mesa da fresadora controlado em 1mm por segundo. Depois deste processo de usinagem obteve-se o substrato, conforme a Figura 9, que teve a cava com dimensão de 2x70x1mm. Essas dimensões foram escolhidas de maneira arbitrária.

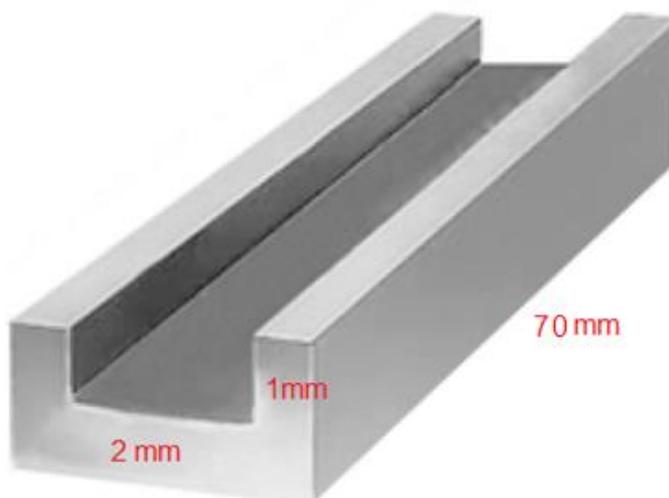


Figura 9 - Substrato com as medidas da cava após processo de usinagem.

### 3.2. Acoplamento da cerâmica no substrato

Para o acoplamento da cerâmica no substrato, utilizou-se a cerâmica SiAl 45-50, onde a nomenclatura 45-50 corresponde respectivamente aos teores de Si e Al no tijolo, que pode ser visto na Figura 10.



Figura 10 - Tijolo SiAl 45-50 com dimensões 229x114x76 mm.

Foi efetuado um corte no tijolo e retirada uma pequena tira de 2x70x3mm de modo que ele pudesse ser acoplado na chapa de aço. A dimensão de 3mm foi escolhida de maneira arbitrária. O resultado do corte é apresentado na Figura 11.



Figura 11 - Tijolo cortado pronto para ser acoplado à chapa de aço

### 3.3. Difusividade Térmica

É a capacidade do material de conduzir a energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la e a condutividade térmica fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão [39].

$$\text{Difusividade térmica} = \frac{\text{Capacidade de conduzir calor}}{\text{Capacidade de armazenar calor}}$$

Matematicamente tem-se:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p} \quad (3.1)$$

onde:

$\alpha$  = difusividade térmica

$\kappa$  = condutividade térmica

$\rho$  = massa específica do material

$c_p$  = calor específico.

Os métodos transientes de troca de calor têm sido os mais utilizados recentemente na determinação das propriedades térmicas de materiais. Neste estudo foi usado o método *flash* [40] ou método do fluxo de energia, que consiste na análise da difusão de calor. As vantagens deste método são:

- Curto tempo para a realização da medição, em torno de 6 segundos;
- Amostras de pequena massa (aproximadamente 1g);
- Processo de aquecimento sem contato;
- Sistema de medição de temperatura sem contato da fonte térmica com a amostra;
- Efeito relativamente pequeno das perdas de calor na amostra;
- Medições em metais, ligas, cerâmicos, semicondutores, filmes e líquidos;
- Dispositivo compostos dispersos e altamente heterogêneos, dispositivo compostos em camadas, resistência de contato térmico entre camadas e materiais nucleares [41];
- Medições de propriedades próximo à região de transição de fase do material;
- Limitação das variações de temperatura da amostra a 1K;
- Elevada exatidão, com erros menores que 0,5% [27];
- Ampla faixa de medição de valores de difusividade térmica (entre  $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-3} m^2/s$ ), abrangendo assim desde materiais altamente condutores a materiais altamente isolantes térmicos;
- Medições de propriedades em uma grande faixa de temperaturas de 80K a 2.500K;
- Medições de propriedades de materiais anisotrópicos (extensão da análise para fluxo bidimensional e tridimensional);
- Possibilidade de medição simultânea da Difusividade Térmica ( $\alpha$ ), da Capacidade Calorífica Volumétrica ( $\rho c_p$ ) e da Condutividade Térmica ( $k$ ).

Desenvolvido por Parker et al. (1961), o método *Flash Laser* é baseado na solução analítica da equação de difusão térmica unidimensional [40,42]. A amostra utilizada é considerada uma placa plana e infinita, ou seja, a dimensão da direção

perpendicular a aplicação do pulso é muito menor que as outras coordenadas, como pode ser visto na Figura 12:

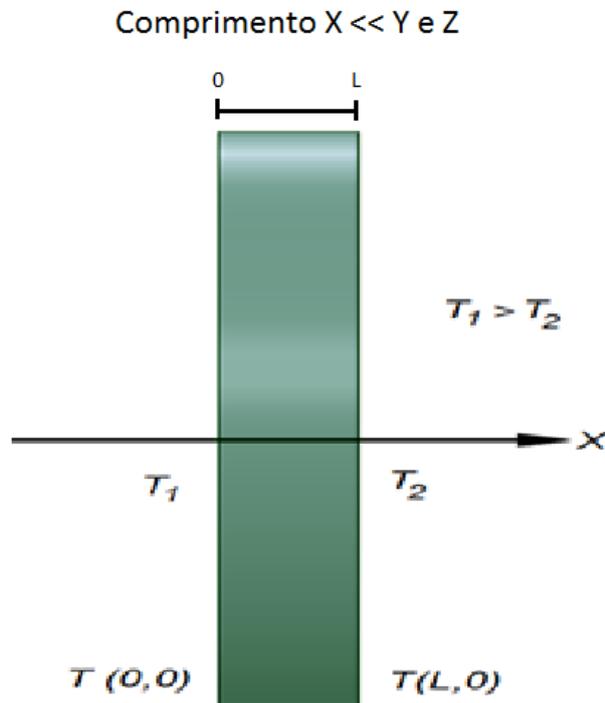


Figura 12 - Esquema de uma chapa de aço utilizada na realização do método *flash laser*.

Sendo assim, o problema consiste do fluxo de calor unidirecional e perpendicular as faces paralelas da amostra, podendo ser resolvido através da Equação de difusão do calor.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_0} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (0 < x < l) \quad (3.2)$$

Considerando a temperatura inicial como uma função  $f(x)$  que descreve o pulso de energia incidindo sobre uma das faces da amostra e que ambos contornos  $x = 0$  e  $x = l$  são isolados termicamente, ou seja, adiabáticas. Assim,

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{quando } x = 0 \text{ e } x = l \quad (3.3)$$

$$T(x, 0) = f(x) \quad (0 < x < l) \quad (3.4)$$

Trata-se o problema espacial, convenientemente, através do seguinte artifício:

$$T(x,t) = v(x) + h(x,t) \quad (3.5)$$

onde  $v(x)$  atua como solução particular, obedecendo as mesmas condições de contorno de  $T(x,t)$ , ou seja, obedece a Equação 3.3. Logo,

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} = 0$$

$$v = \text{Constante} = \frac{A_0}{2}$$

Portanto, substituindo a Equação 3.5 na Equação 3.2,

$$\frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_0} \frac{\partial h(x,t)}{\partial t} \quad (3.6)$$

Derivando parcialmente a Equação 3.5 em relação a  $x$  percebe-se que as condições de contorno de  $h(x,y)$  são as mesmas de  $T(x,y)$ , ou seja,

$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial x} = 0 \text{ quando } x = 0 \text{ e } x = l \quad (3.7)$$

Pode-se escrever  $h(x,t)$ , para usar o método de separação de variáveis, como:

$$h(x,t) = X(x)\Lambda(t) \quad (3.8)$$

onde  $X$  é uma função somente de  $x$  e  $\Lambda$  é uma função somente de  $t$ . Essas funções satisfazem a condição de contorno:

$$\frac{\partial X(0)}{\partial x} = \frac{\partial X(l)}{\partial x} = 0$$

para que  $h(x,t)$  ainda satisfaça as mesmas condições. Substituindo a Equação 3.8 na Equação 3.6 obtém-se:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_0 \Lambda(t)} \frac{\partial \Lambda(t)}{\partial t} = -\gamma^2. \quad (3.9)$$

Nota-se que o lado esquerdo da Equação 3.9 depende somente de  $x$ , enquanto o lado direito depende apenas de  $t$ . Assim, ambos os lados devem ser constantes. Dessa forma, a equação para  $x$  é dada por:

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = -\gamma^2 X(x). \quad (3.10)$$

A solução da Equação 3.10 é dada por:

$$X(x) = A \cos \gamma x + B \sin \gamma x. \quad (3.11)$$

Assim, substituindo as condições de contorno de  $x$ , obtém-se o valor da constante  $\gamma$ . Derivando a equação 3.11 e substituindo as condições de contorno, chega-se à solução espacial.

Para  $x = 0$ :

$$\frac{\partial X(0)}{\partial x} = -A\gamma \sin(0) + B\gamma \cos(0) \rightarrow B\gamma = 0 \rightarrow B = 0$$

Para  $x = l$ :

$$\frac{\partial X(l)}{\partial x} = -A\gamma \sin(\gamma l) + 0 = 0$$

Para a solução não trivial ( $A \neq 0$ ),  $\gamma = \frac{n\pi}{l}$ . Portanto, a solução espacial é dada por:

$$X(x) = A \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right).$$

Ainda resta encontrar a solução temporal, que pode ser feito escrevendo a Equação 3.9 para  $t$ :

$$\frac{\partial \Lambda(t)}{\partial t} = -\alpha_0 \gamma^2 \Lambda(t).$$

A solução para  $\Lambda(t)$  é encontrada facilmente como:

$$\Lambda(t) = \exp\left(-\alpha_0 \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right).$$

Logo,  $h(x,t)$  é o produto das soluções encontradas de  $X(x)$  e  $\Lambda(t)$ , dado por:

$$h(x, t) = X(x)\Lambda(t) = A \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \exp\left(-\alpha_0 \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right).$$

Dessa forma, agora que tanto  $v(x)$  quanto  $h(x, t)$  já foram determinadas, tem-se:

$$T(x, t) = v(x) + h(x, t) = \frac{A_0}{2} + A \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \exp\left(-\alpha_0 \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right)$$

Escrevendo  $T(x, t)$  como uma série infinita, tem-se:

$$T(x, t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \exp\left(-\alpha_0 \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right) \quad (3.12)$$

Usando a condição inicial (Equação 3.4), a Equação 3.12 se reduz a:

$$T(x, 0) = f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \quad (3.13)$$

A Equação 3.13 é a série de Fourier em cosseno de  $f(x)$ , com coeficientes  $A_n$  definidos como:

$$A_n = \frac{2}{l} \int_0^l T(x, 0) \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) dx \quad (3.14)$$

Por fim, substituindo a Equação 3.14 na Equação 3.12, tem-se como resultado:

$$T(x, t) = \frac{1}{l} \int_0^l T(x, 0) dx + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} [\exp\left(-\alpha_0 \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right) \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \int_0^l T(x, 0) \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) dx] \quad (3.15)$$

Outra consideração do modelo de Parker é que no instante inicial ( $t = 0$ ), o pulso de energia  $Q$  é instantaneamente e uniformemente absorvido em uma camada fina  $D$  da superfície ( $x = 0$ ) da amostra.

$$T(x, 0) = \begin{cases} \frac{Q}{\rho c D}, & \text{se } 0 < x < D \\ 0, & \text{se } g < x < l \end{cases}$$

onde,  $\rho$  é a massa específica ( $g/cm^3$ ) do material e  $c_p$  é o calor específico ( $cal/g^\circ C$ ). Aplicando essas condições iniciais na Equação 3.15 e integrando os termos contidos na série de “0 a D” nessa mesma equação, observa-se que:

$$T(x, 0) = \frac{Q}{\rho c D} \left[ 1 + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \exp\left(-\alpha \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right) \frac{l}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi D}{l}\right) \right] \quad (3.16)$$

Como a camada  $D$  é pequena com relação à espessura  $l$  da amostra, é verdadeira a aproximação  $\operatorname{sen}\left(\frac{n\pi D}{l}\right) = \frac{n\pi D}{l}$ . Também é possível notar que para  $x = l = D$ , pode-se escrever  $\cos(n\pi) = (-1)^n$ . Assim, com essas duas substituições na Equação 3.16, pode-se encontrar a função para o acréscimo de temperatura em  $x = l$ , dada por:

$$T(l, t) = \frac{Q}{\rho c D} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\alpha_0 \frac{n^2 \pi^2}{l^2} t\right) \right].$$

Pode-se definir dois parâmetros adimensionais  $V$  e  $\varpi$ .

$$V(l, t) = \frac{T(l, t)}{T_{max}} \quad (3.17)$$

$$\varpi = \frac{t_{1/2}}{t_c} \quad (3.18)$$

onde  $T_{max} = \frac{Q}{\rho c l}$  é o máximo de acréscimo de temperatura em  $x = l = D$  e  $t_c = \frac{l^2}{\alpha_0 \pi^2}$ , chamado de tempo característico de difusão, é aproximadamente o tempo necessário para que o calor se propague através da amostra. Obtém-se então:

$$V_{(L,t)} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \omega) \quad (3.19)$$

E através da Equação 3.19, obtém-se a curva teórica do aumento da temperatura na face oposta da aplicação do laser, como pode ser observado na Figura 13:

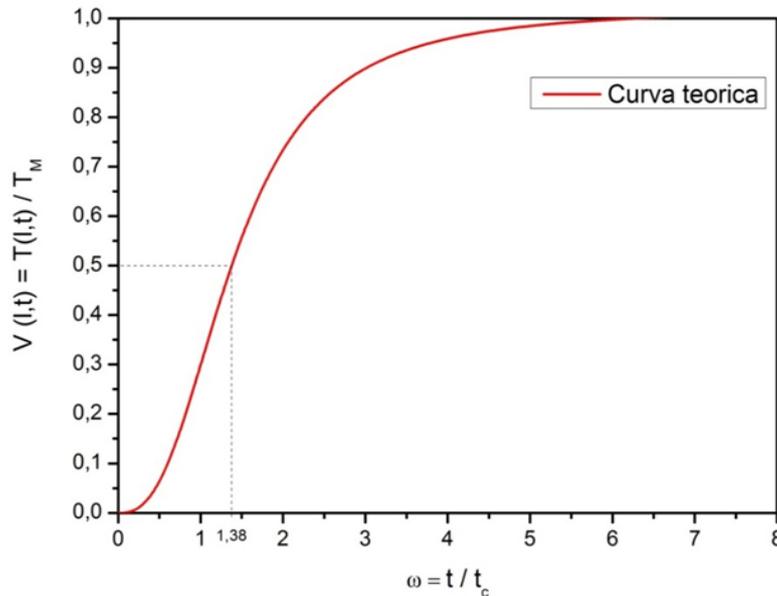


Figura 13 - Comportamento da difusividade térmica em um dado material [40].

Para  $V(L,t) = 0,5$ , chamado de  $t_{1/2}$  (tempo de meia excursão), necessário para que o aumento de temperatura na face oposta a aplicação do laser atinja metade do seu valor máximo, encontra-se através da curva teórica acima que  $t_{1/2}/t_c = 1,38$  [40]. Com isso, pode-se definir a equação para determinação da difusividade térmica:

$$\alpha_0 = \frac{1,38L^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (3.20)$$

onde:

$\alpha_0$  = Difusividade térmica sem correção;

$L$  = espessura da amostra;

$t_{1/2}$  = tempo necessário para que o aumento de temperatura na face oposta da amostra atinja a metade do seu valor máximo.

Considerando que a difusividade térmica não varia nesse regime de temperatura, ou seja, o aumento de temperatura causado pela aplicação do laser é pequeno o suficiente para considerar a condutividade térmica  $k$  constante, é possível obter sem maiores prejuízos a difusividade térmica a partir das dimensões da amostra e do  $t_{1/2}$ .

Para a correção dos resultados gerados pelos efeitos de tempo finito de pulso, deve-se utilizar um fator de correção que é a razão entre o tempo de entrega do pulso de energia do laser ( $\tau$ ) e o tempo necessário para que o aumento de temperatura na face oposta da amostra atinja a metade do seu valor máximo. A correção também deve ser feita em relação à largura temporal do pulso, que no caso deste trabalho foi 4,2 vezes maior que o permitido, influenciando a taxa de aumento de temperatura na face oposta a aplicação do laser [43,44,45]. Assim, o valor real da difusividade térmica deverá sofrer uma correção dada por:

$$\alpha = \alpha_0 \left( 4,2 \frac{\tau}{t_{1/2}} \right) \quad (3.21)$$

onde:

$\tau$  = tempo de entrega do pulso de energia

4,2 = largura temporal do pulso.

No Laboratório de Altas Pressões (PRESLAB) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), as medidas de difusividade térmica foram realizadas com temperaturas fixas e conhecidas. Na sequência, são encontradas as especificações dos equipamentos utilizados na bancada experimental para a realização da medida de difusão térmica através do Método *Flash*:

- *Laser* de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e perfil gaussiano. Este é responsável pela emissão do pulso de energia sobre a superfície da amostra. Possui comprimento de onda igual a  $10^{-6}m$  de intensidade  $10\sqrt{2}w/m^2$  e diâmetro igual 2 *mm*.

- Termopar responsável por realizar a análise da variação de temperatura, é do tipo J, para intervalos de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $480^{\circ}\text{C}$ .
- Placa amplificadora responsável por amplificar o sinal vindo do termopar e enviá-lo ao computador. Modelo BD T422. Possui relação de amplificação 1/1000. O sinal é convertido por um conversor modelo PCI 711 AD 8 *bits* que trabalha com uma variação de tensão de  $\pm 5\text{V}$ .
- Computador da marca IBM, é utilizado para aquisição dos dados e confecção do gráfico: diferença de potencial x tempo. O programa utilizado é o DIFU 3A, produzido pelo PRESLAB/UFES.

O esquema da bancada pode ser visualizado na Figura 14.

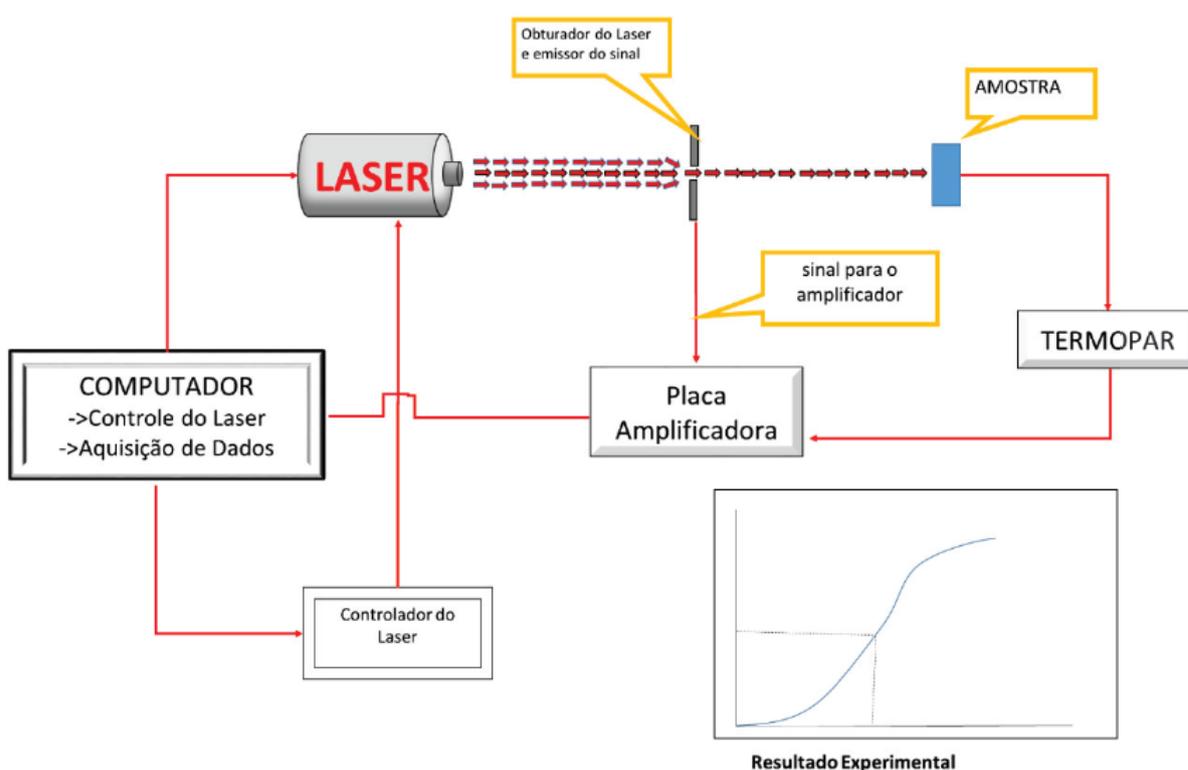


Figura 14 - Esquema da bancada de medição para determinação de propriedades termofísicas através do método *Flash* de *laser* do PRESLAB – UFES, adaptado da ref. [7].

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Difusividade térmica do aço

A priori, de modo a obter um parâmetro para os resultados que se seguem, foi feita uma comparação entre o valor de difusividade térmica calculada através dos dados fornecidos pelo fabricante do material comparando-o com o obtido a partir do ensaio de difusividade térmica do aço inoxidável UNS S32304. A Tabela 4 abaixo mostra os dados relativos ao material, fornecidos pelo fabricante.

Densidade	7,8 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	200 GPa
Coeficiente de expansão térmica médio	
De 0°C a 100°C	13,0 µm/m.°C
De 0°C a 538°C	14,0 µm/m.°C
Condutividade térmica a 100°C	17 W/m.K
Calor específico	450 J/Kg.K
Resistividade elétrica	0,8 µΩm
Ponto de fusão	1465 °C

Tabela 4 - Dados do aço duplex UNS 32304 fornecidos pelo fabricante

Considerando que a difusividade térmica de um dado material é a razão entre sua capacidade de conduzir calor e sua capacidade de armazená-lo, tem-se que:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$$

onde:

$\alpha$  = difusividade térmica

$\kappa$  = condutividade térmica

$\rho$  = massa específica do material

$c_p$  = calor específico

Substituindo os valores da literatura para o aço em questão, tem-se que:

$$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

São apresentados a seguir os gráficos obtidos no experimento, que retrata temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento. Ao analisar o gráfico, é possível obter os tempos inicial e final de aplicação do pulso e a variação da temperatura, com isso pode-se determinar o tempo no qual a temperatura na face oposta atinge metade de seu valor máximo, ou seja,  $t_{1/2}$ . É possível chegar ao valor de difusividade térmica da amostra, conhecendo-se a espessura da amostra.

Para realizar a correção dos efeitos de pulso finito, em todas as equações foi utilizado o valor de  $\tau = 0,5$ . Além disso, foi adotado que  $\pi = 3,14159$ .

Na Figura 15 tem-se o gráfico obtido após o experimento. Este será usado como base para os cálculos de difusividade.

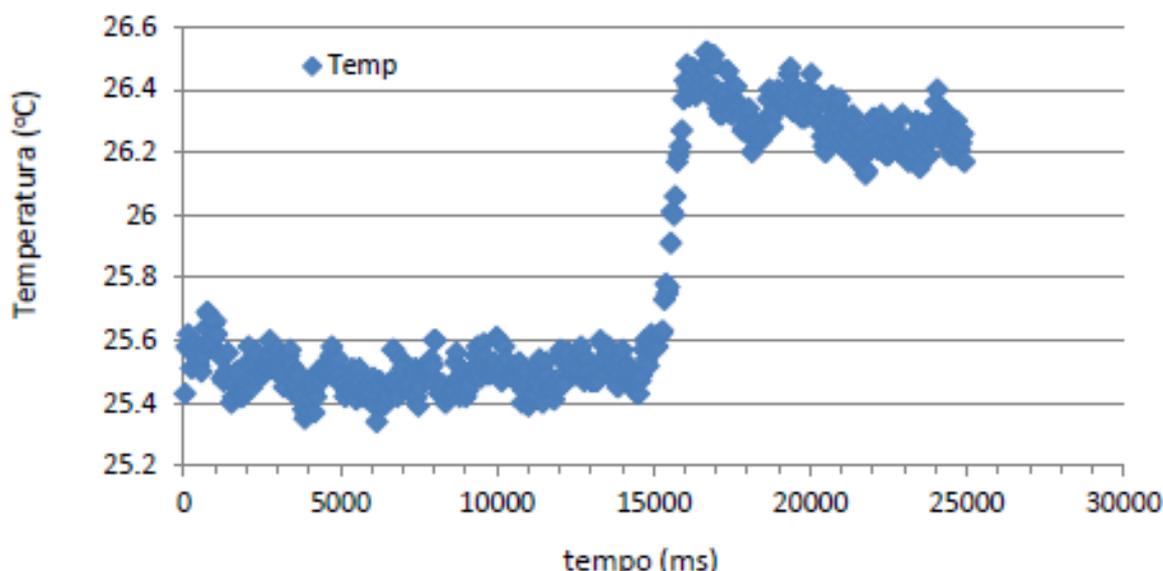


Figura 15 - Comportamento de temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento para a amostra de aço conforme recebido.

Analisando o gráfico, tem-se que  $t_{\text{final}} = 16,014\text{s}$  e  $t_{\text{inicial}} = 15,125\text{s}$ , que são respectivamente os tempos onde a temperatura chega ao seu máximo valor após aumento gradativo e onde a temperatura começa a aumentar. Sabe-se que a espessura da amostra  $l$  é de  $0,001807\text{m}$ , então:

$$\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}} = 0,8890\text{s} \rightarrow t_{1/2} = 0,4445\text{s}$$

$$\alpha_0 = \frac{1,38 \cdot l^2}{\pi^2 \cdot t_{1/2}} = \frac{1,38 \cdot 0,001807^2}{\pi^2 \cdot 0,4445} = 1,0271 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Fazendo a correção do erro de pulso finito, a difusividade térmica será:

$$\alpha = 4,2 \cdot \alpha_0 \cdot \frac{\tau}{t_{1/2}} = 4,2 \cdot 1,0271 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,5}{0,4445} = 4,8526 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Incerteza} = 2,426 \times 10^{-7}$$

A incerteza utilizada neste e nos demais cálculos de difusividade térmica foi de 5% (cinco por cento) devido imprecisões no equipamento e na medição.

Portanto, tem-se como resultado final:

$$\alpha = 4,8(2) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Fazendo um comparativo do resultado do experimento com aquele obtido pelo cálculo teórico baseado nos dados do fabricante, nota-se que os valores são equivalentes, isso valida não somente a eficácia do método *flash laser* como também os resultados subsequentes.

#### 4.2. Difusividade térmica da cerâmica

Foi feito, de modo semelhante ao anterior, uma comparação entre o valor de difusividade térmica calculado através de dados fornecidos pelo fabricante do material e aquele obtido a partir do ensaio de difusividade térmica da cerâmica sílico-aluminosa 45-50. A Tabela 5 abaixo mostra os dados relativos ao material, fornecidos pelo fabricante.

Densidade	2,3 g/cm <sup>3</sup>
Condutividade térmica a 100°C	1,27 W/m.K
Calor específico	1100 J/Kg.K

Tabela 5 - Dados da cerâmica sílico-aluminosa 45-50 fornecidos pelo fabricante.

De maneira similar ao realizado com o aço UNS 32304, utilizando a equação de difusividade térmica (Equação 3.1) e substituindo os valores mencionados na Tabela 5, tem-se o valor da difusividade térmica calculada:

$$\alpha = 5,0 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

A dimensão da cerâmica para o ensaio foi  $del = 3mm$ . Mais uma vez é importante ressaltar que foi realizado a correção dos efeitos de pulso finito para o cálculo da difusividade térmica onde,  $\tau=0,5$ . Além disso, foi adotado  $\pi=3,14159$ . O comportamento encontra-se na Figura 16.

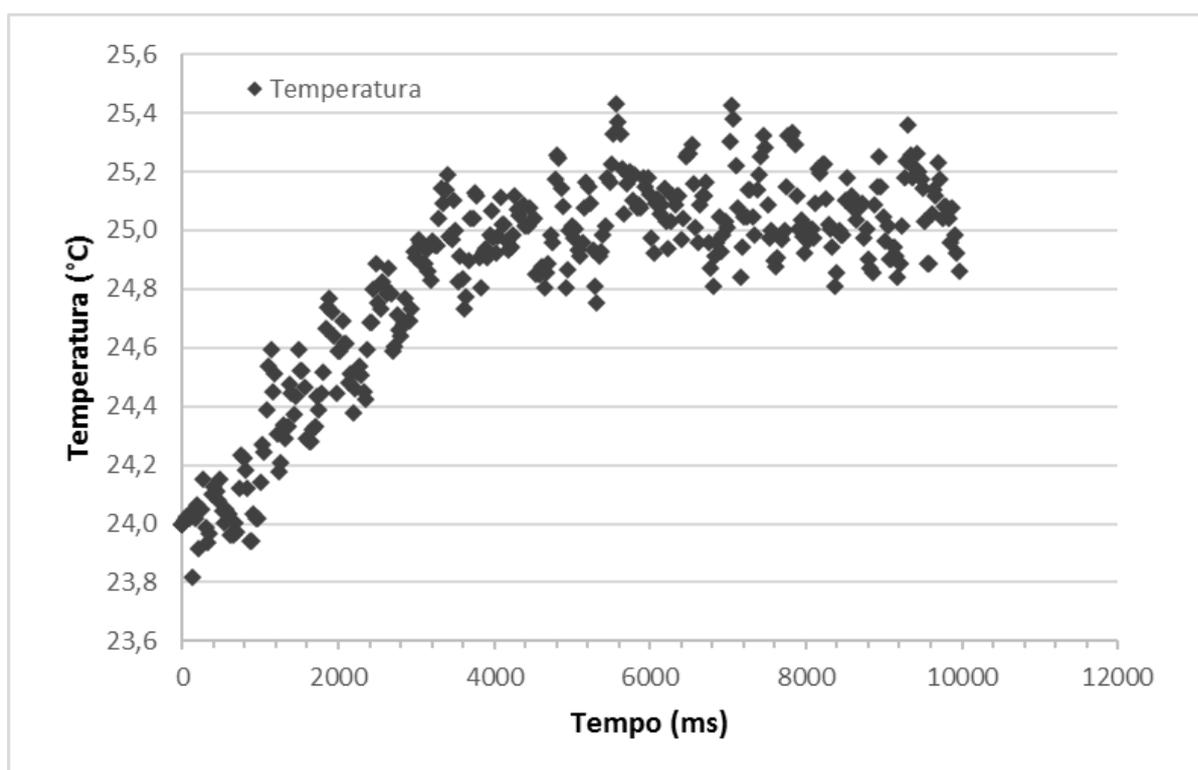


Figura 16 - Comportamento de temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento para a amostra cerâmica.

Analisando o gráfico acima, tem-se que  $t_{final} = 5,408s$  e  $t_{inicial} = 0,785s$ . Sabe-se que a espessura da amostra  $L$  é de  $0,003m$ , então:

$$\Delta t = t_{final} - t_{inicial} = 4,623s \rightarrow t_{1/2} = 2,3115s$$

$$\alpha_0 = \frac{1,38 \cdot l^2}{\pi^2 \cdot t_{1/2}} = \frac{1,38 \cdot 0,003^2}{\pi^2 \cdot 2,3115} = 5,44413 \cdot 10^{-7} m^2/s$$

Fazendo a correção do erro de pulso finito, a difusividade térmica será:

$$\alpha = 4,2 \cdot \alpha_0 \cdot \frac{\tau}{t_{\frac{1}{2}}} = 4,2 \cdot 5,44413 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,5}{2,3115} = 4,946 \cdot 10^{-7} m^2/s$$

$$Incerteza = 2,473 \times 10^{-8}$$

Portanto, tem-se como resultado final:

$$\alpha = 4,9(2) \cdot 10^{-7} m^2/s$$

Comparando o resultado do experimento com aquele obtido pelo cálculo baseado nos dados do fabricante, é possível notar, assim como no aço, os valores encontrados são equivalentes.

#### 4.3. Difusividade da junção metal/cerâmica

O dispositivo composto foi submetido à medida de difusividade térmica seguindo a mesma metodologia. O resultado do perfil de temperatura na face oposta em função do tempo pode ser visto na Figura 17.

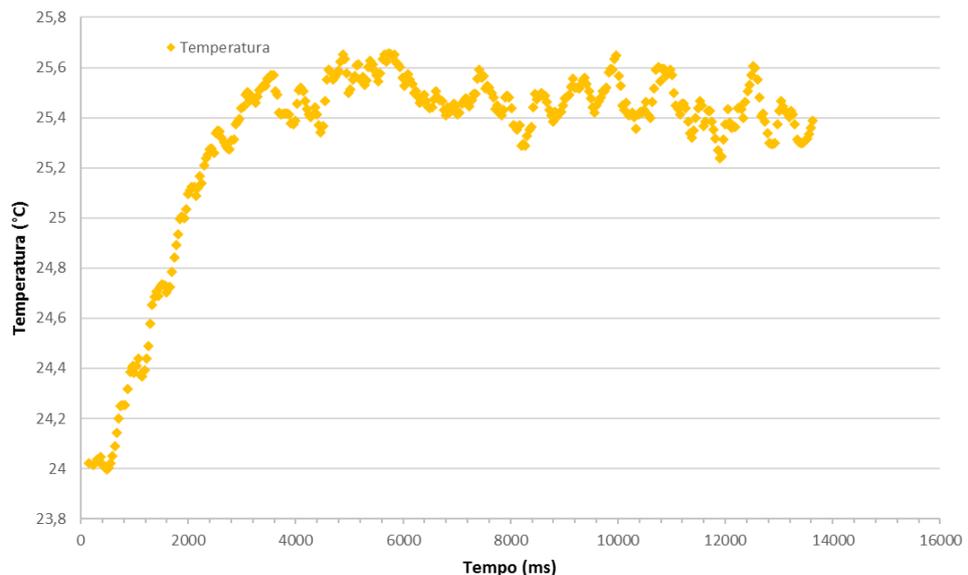


Figura 17 - Comportamento de temperatura da face oposta da amostra em função do tempo de experimento para a amostra cerâmica.

Analisando o gráfico, tem-se que  $t_{final}=3,6567s$  e  $t_{inicial}=0,4802s$ . Sabe-se que a espessura da amostra  $l$  é de  $0,003807m$ . Então:

$$\Delta t = t_{final} - t_{inicial} = 3,1765 s \rightarrow t_{1/2} = 1,58825s$$

$$\alpha_{UNS\ 32304+SiAl\ 45-50} = \frac{1,38 \cdot L^2}{\pi^2 \cdot t_{1/2}} = \frac{1,38 \cdot 0,003807^2}{\pi^2 \cdot 1,58825} = 1,2759 \times 10^{-6} m^2/s$$

Fazendo a correção do erro de pulso finito, a difusividade térmica será:

$$\alpha = 4,2 \cdot \alpha_0 \cdot \frac{\tau}{t_{\frac{1}{2}}} = 4,2 \cdot 1,2759 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,5}{1,58825} = 1,68705 \cdot 10^{-6} m^2/s$$

$$Incerteza = 8,43524 \times 10^{-8}$$

Portanto, tem-se como resultado final:

$$\alpha = 1,68(8) \cdot 10^{-6} m^2/s$$

#### 4.4. Análise da difusividade térmica da junção metal/cerâmica

Para avaliar a difusividade térmica da junção metal/cerâmica formulou-se aqui a hipótese da aditividade sem a interferência dos compostos. Sendo assim, realizou-se uma avaliação da difusividade térmica esperada para a junção metal/cerâmica aqui fabricada. Para efetivar essa avaliação deve-se analisar os detalhes da montagem do sistema cerâmica/metal, como mostrado na Figura 18.

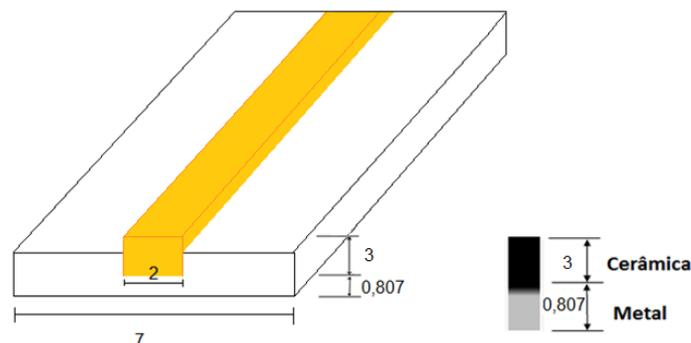


Figura 18 - Representação da amostra com material cerâmico depositado (dimensões em milímetros).

Levando em consideração a hipótese da aditividade sem a interferência dos compostos, estima-se a difusividade teórica da junção metal/cerâmica, de acordo com a seguinte equação:

$$\Lambda_{UNS\ 32304+SiAl\ 45-50} = A \cdot \alpha_{SiAl\ 45-50} + B \cdot \alpha_{UNS\ 32304} \quad (5.4)$$

Sendo os valores de  $A=3/3,807$  e  $B=0,807/3,807$  como os fatores de proporcionalidade associados a cada material, considerando a direção de propagação do fluxo de calor.

$$\begin{aligned} \Lambda_{UNS\ 32304+SiAl\ 45-50} &= A \cdot \alpha_{SiAl\ 45-50} + B \cdot \alpha_{UNS\ 32304} \\ \Lambda_{UNS\ 32304+SiAl\ 45-50} &= \frac{3}{3,807} \cdot 4,9 \cdot 10^{-7} + \frac{0,807}{3,807} \cdot 4,8 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Lambda_{UNS\ 32304+SiAl\ 45-50} &= 1,40362 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \text{Incerteza} &= 7,01812 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

Portanto, tem-se como resultado final:

$$\Lambda_{UNS\ 32304+SiAl\ 45-50} = 1,40(7) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Calculando a difusividade térmica pela hipótese da aditividade sem interferência para o composto metal/cerâmica variando os fatores de proporcionalidade, obtém-se os pontos vazados apresentados no gráfico da Figura 19. Os valores de difusividade térmica medidos experimentalmente da cerâmica e do metal separadamente, bem como o valor medido da junção também se encontram plotados, como pontos vermelhos, no gráfico da Figura 19.

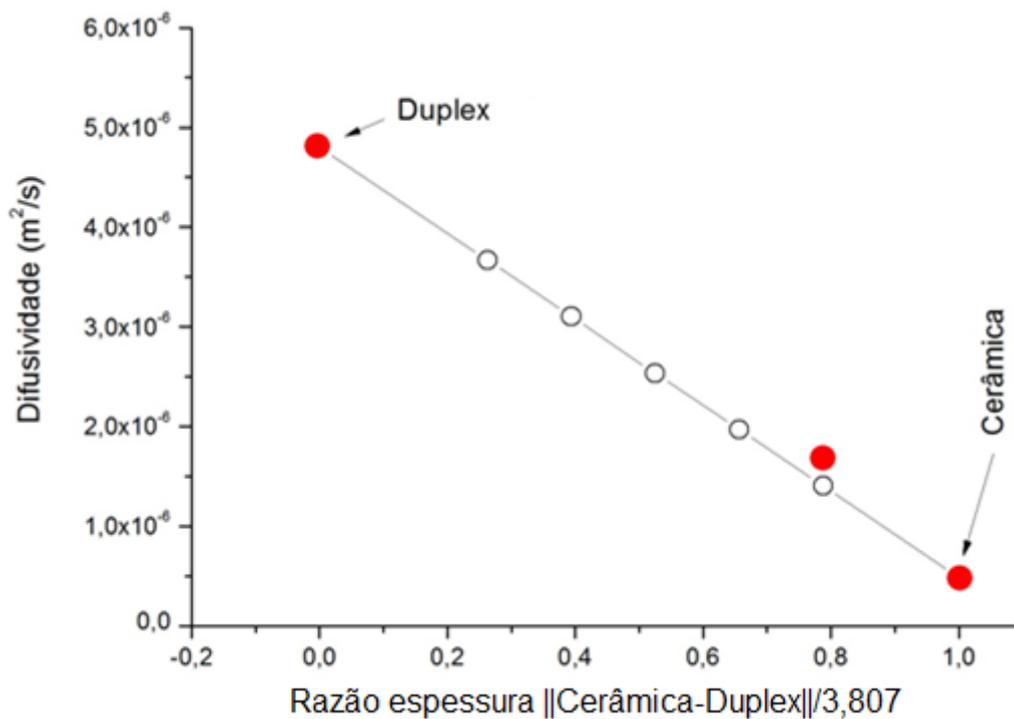


Figura 19 - Dados experimentais de difusividade térmica das amostras analisadas (pontos vermelhos) e dados calculados pela hipótese da aditividade sem interferência para diferentes proporções de metal/cerâmica (pontos vazados).

A partir da análise da Figura 19, são feitas as seguintes observações: a junção metal/cerâmica apresentou difusividade térmica de  $1,68(8) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  e o experimento alcançou valores proporcionais em comparação com o metal base UNS 32304 e a cerâmica SiAl 45-50.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusão

Foi desenvolvida com sucesso a junção do aço UNS 32304 com a cerâmica sílico-aluminosa 45-50.

A difusividade térmica da junção metal/cerâmica, considerando uma hipótese de aditividade sem interferência entre os compostos, apresentou valores próximos aos estimados teoricamente. Tais conclusões são parciais, o que reforça a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a difusividade térmica desta junção metal/cerâmico.

Com base nos resultados, pode-se dizer que é possível estimar a difusividade térmica de dispositivo compostos metal/cerâmica, selecionando-o de acordo com a necessidade de aplicação.

### 5.2. Trabalhos futuros

Têm-se, como proposta de continuidade deste trabalho, as seguintes atividades:

- Realizar mais testes de difusividade em diferentes modelos de junções;
- Realizar ensaios de difusividade térmica em diferentes materiais;
- Desenvolver um padrão no qual seja possível selecionar a difusividade térmica sem alterar o volume em uma junção metal/cerâmica;
- Analisar a difusividade térmica com interferência entre os compostos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Refractories Handbook. **Fireclay bricks**, The Technical Association of Refractories, Japan, 1998.
- [2] HAHN, Sookap. **Os papéis da ciência dos materiais e da engenharia para uma sociedade sustentável**. Estudos Avançados, v. 8, n. 20, p. 36-42, 1994.
- [3] CALLEN, Herbert B. **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics**. 1998.
- [4] ANDREWS, Anthony; ADAM, Joseph; GAWU, Simon KY. **Development of fireclay aluminosilicate refractory from lithomargic clay deposits**. Ceramics International, v. 39, n. 1, p. 779-783, 2013.
- [5] MORI, Ricardo Nishioka et al. **Estudo da metalização e dos parâmetros de brasagem em uniões Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe-Ni-Co**. 2003.
- [6] NASCIMENTO, Rubens M.; MARTINELLI, Antonio E.; BUSCHINELLI Augusto J.; **Novo método de metalização de superfícies cerâmicas para brasagem com ligas de adição sem metal ativo**, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro - SP, 2000.
- [7] OLIVEIRA, P.S. **Investigação sobre a difusividade térmica na junção metal/cerâmica AISI 304L/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- [8] DE SOUSA, Wesley Tiago B. et al. **Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 4, p. 4313, 2012.
- [9] ASM HandBook, Ohio: **Materials Selection and Design**, 1997.
- [10] VAROL, I.; BAESLACK III, W. A.; LIPPOLD, J. C. **Characterization of weld solidification cracking in a duplex stainless steel**. Metallography, v. 23, n. 1, p. 1-19, 1989.
- [11] Infomet. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=207>, acessado em 21/03/2017.
- [12] NILSSON, J.-O. **Super duplex stainless steels**. Materials Science and Technology, v. 8, p.685-700, 1992.
- [13] WESTIN, Elin M. **Corrosion resistance of welded lean duplex stainless steel**. 2008.
- [14] Duplex Stainless Steel. Disponível em: [http://www.imoa.info/download\\_files/stainless-steel/Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_Portuguese](http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_Portuguese), acessado em 25/04/2017.

[15] ABCERAM. **Sítio da Associação Brasileira de Cerâmica**. Disponível em: <http://www.abceram.org.br>, acessado em 30/05/2017.

[16] FERREIRA, Cerâmica Porto. **Análise Crítica das Normas Técnicas de Revestimentos Cerâmicos: Parte 1**. Cerâmica Industrial, v. 5, n. 1, p. 07-22, 2000.

[17] SILVA, JRR. **Caracterização físico-química de massas cerâmicas e suas influências nas propriedades finais dos revestimentos cerâmicos**. 2005. Dissertação de Mestrado. Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

[18] BREIDENBACH, Dieter; OLDENGOTT, Hans; VITT, Burckard. **Roof structure**. U.S. Patent n. 4,929,179, 29 maio 1990.

[19] KRAUSE, Corinne Azen. **Refractories, the Hidden Industry: A History of Refractories in the United States, 1860 to 1985**. American Ceramic Society, 1987.

[20] Lewis, G. **Applications for Traditional Ceramics, Refractories**; pp. 895–918 in Engineered Materials Handbook, Vol. 4, Ceramics and Glasses. ASM International, Metals Park, OH, 1991.

[21] LEE, William E.; MOORE, Robert E. **Evolution of in situ refractories in the 20th century**. Journal of the American Ceramic Society, v. 81, n. 6, p. 1385-1410, 1998.

[22] Norton F.H. **Refractories**. McGraw –Hill Book Company, 1962.

[23] RAHMAN, Md Hamidur et al. **Study of Thermal Conductivity and Mechanical Property of Insulating Firebrick Produced by Local Clay and Petroleum Coal Dust As Raw Materials**. Procedia Engineering, v. 105, p. 121-128, 2015.

[24] Gugel E., Norton F.H. **High density firebrick**. Bull. Am. Ceram. Soc., 41,8, 1962.

[25] ELNGAR, Marwa AG et al. **Factors affected the performance of fire clay refractory bricks**. Górnictwo i Geoinżynieria, v. 33, n. 4, p. 49-61, 2009.

[26] MISRA, Manohar L. **Refractories, their manufacture, properties and uses**. ML Misra, 1961.

[27] MODESTO, C. et al. **Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais**. Cerâmica Industrial, v. 8, n. 4, p. 14-18, 2003.

[28] RUH, Edwin; MCDOWELL, J. SPOTTS. **Thermal conductivity of refractory brick**. Journal of the American Ceramic Society, v. 45, n. 4, p. 189-195, 1962.

[29] CHESTERS, J. H.; HOWIE, T. W. **Fireclay brick for use in iron and steel works**. Trans. Brit. Ceram. Soc., v. 38, n. 2, p. 131-46, 1938.

- [30] NASCIMENTO, Rubens Maribondo do et al. **Metalização mecânica de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para brasagem metal/cerâmica**. 2001.
- [31] RICHERSON, David W. **Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design**. CRC press, 2005.
- [32] CUTLER, R. A.; SCHNEIDER, S. J. **Engineered Materials Handbook, Ceramics and Glasses**. 1991.
- [33] WACHTMAN, John B.; CANNON, W. Roger; MATTHEWSON, M. John. **Mechanical properties of ceramics**. John Wiley & Sons, 2009.
- [34] NASCIMENTO, Rubens Maribondo do et al. **Unões  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  e Fe-Ni-Co/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  produzidas por brasagem com metal ativo**. 1997.
- [35] SUGANUMA, Katsuaki. **Reliability factors in ceramic/metal joining**. MRS Online Proceedings Library Archive, v. 314, 1993.
- [36] SUGANUMA, Katsuaki. **Recent advances in joining technology of ceramics to metals**. Isij International, v. 30, n. 12, p. 1046-1058, 1990.
- [37] MORI, Ricardo Nishioka et al. **Estudo da metalização e dos parâmetros de brasagem em uniões  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe-Ni-Co}$** . 2003.
- [38] VIEIRA, João Dantas Paiva. **Metalização Mecânica com Ti de placas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  utilizando máquina ferramenta computadorizada para Brasagem Metal/Cerâmica**. 2015.
- [39] INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L. **Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa**. Grupo Gen-LTC, 2000.
- [40] PARKER, W. J. et al. **Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity**. Journal of applied physics, v. 32, n. 9, p. 1679-1684, 1961.
- [41] TAYLOR, R. E. **Heat pulse thermal diffusivity measurements**. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana - PRL 154, 1978. 60p.
- [42] Knyazeva, M., and Pohl, M. (2013). **Duplex Steels. Part II: Carbides and Nitrides**. Metallography, Microstructure, and Analysis 2, 343–351.
- [43] Caetano, G. A. et al. **Estudo do comportamento da difusividade térmica do aço inoxidável duplex UNS S32304 submetido a processo de soldagem TIG, em função do tratamento térmico**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- [44] ALMEIDA, L. C. **Estudo da Difusividade Térmica em Amostras Cerâmicas de  $\text{Ca}_{2-x}\text{Y}_x\text{MnReO}_6$** . 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

[45] ROUVER, A. N. **Determinação da influência do contorno de grão na medida de difusividade térmica em cerâmicas supercondutoras  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$** . 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.