

**UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO.
PROGRAMA DE PROCESSOS TECNOLÓGICOS E AMBIENTAIS**

Eduardo Frank Yoneda Suzuki

**Blindagem de Radiação Térmica Aplicando Zircônia Níquel
em compósito Cerâmica-metal.**

**Sorocaba/SP
2020**

Eduardo Frank Yoneda Suzuki

**Blindagem de Radiação Térmica Aplicando Zircônia Níquel
em compósito Cerâmica-metal.**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência Parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guizardo Restivo

**Sorocaba/SP
2020**

Eduardo Frank Yoneda Suzuki

**Blindagem de Radiação Térmica Aplicando Zircônia Níquel
em compósito Cerâmica-metal.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós
Graduação em Processos Tecnológicos e
Ambientais da Universidade de Sorocaba.

Aprovado em: 27/03/2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof.(a). Dr.(a). Thomaz Augusto Guizardo Restivo
Universidade de Sorocaba

Prof.(a) Dr.(a) Daniel Bertoli Gonçalves
Universidade de Sorocaba

Prof.(a) Dr.(a) Rossana Cristina Rossoni Figueira
Universidade de Sorocaba

Dedico À Deus, pois sem Ele eu não teria Força para essa longa caminhada. Agradeço aos meus Professores pelo incentivo e dedicação e a minha querida Esposa Renata que me ajudou e incentivou durante essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço À Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À Universidade de Sorocaba – UNISO e seu corpo docente, direção e administração, agradeço muito a oportunidade por obter esse conhecimento.

Ao grande amigo e Professor, orientador Doutor Thomaz Augusto Guizardo Restivo pela orientação e suporte de todo tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos e a Paciência. À Capes que tem nos orientado a cada dia ao aprendizado Aos meus filhos Anaísa e Brunno que compreenderam minha ausência, sempre me desafiaram a buscar novas informações e me incentivaram ao aprendizado contínuo. A minha família meus Irmãos e a minha Mãe que sempre estiveram ao meu lado e me dá referência como ser um educador, ao meu querido Pai in Memoriam que se sempre me apoiou, como estudante e como um filho em aprendizagem.

Aos queridos amigos professores e apoiadores que convivo diariamente, e que a cada dia compartilho informações e que por muitas considerações e respeito venho aprendendo e convivendo nessa jornada de trabalho.

“O desenvolvimento humano depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de seu cérebro criativo. Seu objetivo final é o completo domínio da mente sobre o mundo material e o aproveitamento das forças da natureza em favor das necessidades humanas.”

Nikola Tesla

RESUMO

As aplicações de compósitos de cerâmica e metal, usando zircônia e níquel no processo de sinterização, transformam os materiais em “hiper cermet”. Com as novas técnicas de sinterização que se formam em suas estruturas, as lamelas metálicas encapsuladas em regiões densas e cercadas por porosidade o tornaram muito interessante na termodinâmica, o comportamento do Hyper-cermet como isolante térmico foi uma surpresa. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo provar a blindagem térmica usando esses hiper cermets. A blindagem da radiação térmica associada à condução térmica comprova a mitigação com a alta refletância do metal encapsulado e a baixa condutividade térmica conduzida pela estrutura dos poros, a altas temperaturas. Um dispositivo eletromecânico foi desenvolvido para realizar os testes com os hipercermets, com métodos comparativos, foram encontrados vários resultados, onde foi possível comprovar a blindagem térmica dos hiper cermets, atingindo 37% mais eficiência do que o material comercial já estabelecido como isolante. no mercado.

Palavras-chave: Cermet, Zircônia, sinterização, blindagem térmica.

ABSTRACT

The applications of ceramic-metal composites, using Zirconia and Nickel in the sintering process transform the materials into "hyper-cermet". With the new sintering techniques that form in their structures, the metal lamellae encapsulated in dense regions and surrounded by porosity, have made the behavior of Hyper-cermet very interesting in thermodynamics as a thermal insulator. Therefore, the present work aims to prove the thermal shielding using these hyper-cermets. The shielding of thermal radiation associated with thermal conduction, proves the mitigation with the high reflectance of the encapsulated metal, and the low thermal conductivity conducted by the pore structure, at high temperatures. An electromechanical device was developed to perform the tests with the hyper-cermets, with comparative methods, we found several results, where it is possible to prove the thermal shielding of the hyper-cermets, reaching 37% more efficient than the commercial material already established as thermal insulator. in the market.

Keywords: Cermet, Zirconia, sintering, thermal shielding

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Aço inox
As	Area superficial
ASTM	American Society for Testing and Materials
α	Absorvidade
B	Campo Magnético
C	Velocidade da luz $3 \times 10^8 m/s$
°C	Graus Celsius
CERMET	Ceramica metal poroso
E	Emitância Espectral
ϵ	Emissividade
INNER	Material interno encapsulante
J	Joules
K	Condutividade térmica
°K	Graus Kelvin
λ	Comprimento de onda
L	comprimento
Ln	Logaritmo Neperiano
NEAS	Núcleo de Estudos Ambientais
Outer	Forma granulada ou disco de pequeno diâmetro
PID	Controlador proporcional integral e derivativo
PVA	Alcool poli-vinilico
ρ	reflectividade
Q	Taxa de transferência de calor
Rth	Resistencia Térmica
δ	Transmissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann é $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$
YTZ	Itria tetragonal estabilizada
ZrO₂	Zircônia, (óxido de zircônio)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Inspiração do material projetado hiper-cerâmica.....	20
Figura 2 - Esquema do material hiper-cermet	21
Figura 3 - Transferência de calor de uma placa plana	22
Figura 4 -Tubos cilíndricos concêntricos com dimensões, densidades e materiais definidos.....	24
Figura 5 - Transferência de calor por condução, entre tubos cilíndricos concêntricos radiais	27
Figura 6 - Diagrama de representação das resistências térmicas com a transferência de calor.....	28
Figura 7 - Onda Eletromagnética e comprimento de onda.....	29
Figura 8 - Lei do deslocamento de Wein para um corpo negro.....	29
Figura 9 - O Espectro Eletromagnético comparativo por seu comprimento de Onda.....	32
Figura 10 - Lei do deslocamento de Wein relacionando a emissão dos corpos	33
Figura 11 - Radiação no corpo mostrando α , ρ , τ	34
Figura 12 - Blindagem de radiação térmica com discos hiper-cermets.....	36
Figura 13 - Fluxo de calor por radiação de cilindros radiais com $T_1 > T_2$	37
Figura 14 - Cermets Flakes (a) , pó sinterizados(b).....	40
Figura 15 - Moinho de alta energia	41
Figura 16 - Micrografia do pó de níquel antes(a) e depois(b) da moagem.....	41
Figura 17 - Processo de tape casting	43
Figura 18 - Processo detalhado para obter Hipercermets.....	44
Figura 19 – Desenho Ilustrativo de um dispositivo cilíndrico conforme norma ASTM C335/335-10e1(a), corte do protótipo apresentando termopares(b).....	45
Figura 20 - Dispositivo Eletromecânico montado no conjunto com termopares, com controlador de temperatura, e fonte dissipativa.....	47
Figura 21 - Camisas cilíndricas em corte longitudinal apresentando os termopares a resistência elétrica e o hiper-cermet.....	49

Figura 22 - Controlador TH-90 marca Therma e Relê de estado sólido TH-45 modelo 2810 marca Therma.	50
Figura 23 - Equipamento de aquisição de dados LYNX.....	50
Figura 24 - Exemplo de termograma obtido no difusímetro.....	52
Figura 25 - (a) Difusímetro e (b) porta amostra e porta Sensor.....	53
Figura 26 - Difusímetro Quadruflash 1200.....	54
Figura 27 - Capa de Apresentação do software ORIGIN	55
Figura 28 - Gráfico da temperatura do primeiro experimento sem blindagem ou usando o ar como isolante °C x Seg	56
Figura 29 - Gráfico da temperatura do segundo experimento com blindagem da manta de lã e alta alumina. °C x Seg.....	57
Figura 30 - Gráfico da temperatura do terceiro experimento com blindagem Cermet L8 YTZ- 20%Ni . °C x Seg.	57
Figura 31 - Comparativo do hiper-cermets com materiais comerciais.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - temperaturas dos cilindros Internos e externos nos 3 testes.....	58
Tabela 2 - Cálculo da transferência de calor para o ensaio em branco por Transferência de condução.....	60
Tabela 3 - Cálculo da transferência de calor para as três etapas do processo, o ensaio em com a manta isolante de Alta alumina.....	61
Tabela 4 - Cálculo da transferência de calor para o ensaio da amostra hiper- cermet YZT20% Ni	62
Tabela 5 - mostra o comparativo dos 3 ensaios.....	62
Tabela 6 Transferência de calor por radiação nos 3 testes experimentados..	63
Tabela 7 – Condutividade térmica aparente.....	63
Tabela 8 Condutividade térmica 15%Ni.....	64
Tabela 9 Condutividade térmica 20%Ni.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
	OBJETIVO.....	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivo específico.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	18
3.1	Cermets.....	17
3.2	Transferência de calor	21
3.2.1	Transferência de calor por condução.	23
3.2.2	Convecção de calor.....	28
3.2.3	Transferência de calor por radiação.....	29
3.2.3.1	A blindagem de radiação	29
3.2.3.2	Absortividade (α).....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	O Hiper-Cermet.....	39
4.2	Dispositivo Eletromecânico.....	44
4.3	Placa de aquisição de dados.....	50
4.4	Difusímetro.....	51
4.5	Software Origin tratamentos de sinais.....	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5.1	Transferência de Calor por condução e radiação.....	56
5.2	Ensaio de Difusividade e Condutividade térmica.....	64
6	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS.....	69
	ANEXO A.....	71

1 INTRODUÇÃO

A sinterização foi considerada como o símbolo da civilização humana, que começou com o fogo e a cerâmica de barro. Atualmente, a sinterização é amplamente utilizada para fazer peças úteis de pó de metal ou de cerâmica (SHAIKH; *et al.*, 2015; UPADHYAYA, G.S,1995).

A ligação das partículas de pó durante o aquecimento envolve o transporte de matéria. Os poros são eliminados e a peça torna-se mais densa e mais resistente. Uma grande variedade de produtos tecnologicamente importantes são feitos por sinterização, como ferramentas de corte de carboneto de tungstênio com alumina. Outros materiais são ligados com silicato e utilizados extensivamente em componentes eletrônicos, os quais usam uma fase líquida durante a sinterização (HAUSNERN,1979). Outros exemplos de materiais com sinterização em estado sólido são os ímãs de ferrite, envelopes de alumina translúcida para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, combustível de dióxido de urânio para reator nuclear e peças de desgaste de carboneto de silício duro. Como material de blindagem de radiação térmica, há uma vasta área de aplicação, assim como em sistemas e reatores aquecidos em altas temperaturas, atuando através de múltiplas reflexões de lamelas metálicas de baixa emissividade.

Os compósitos cerâmica-metal, aqui descritos, contêm uma fase metálica de formato lamelar encapsulada em fase cerâmica densa internamente ao corpo cerâmico, enquanto que a camada externa do corpo cerâmico é porosa, compondo um material isolante térmico (RESTIVO; *et al.*, 2019). O material é preparado de forma a manter todos os seus constituintes orientados na direção de um plano, sejam eles metálicos, cerâmicos ou poros orientados e alongados, podendo ser apresentado pelo menos em duas formas básicas: corpos cermets na forma de discos ou outra geometria planar e pós micrométricos com aspecto de escamas “*FLAKE*”.

A zircônia combinada com níquel, ZrO₂-Ni, apresenta como propriedades principais; baixa condutividade térmica, refratariedade e estabilidade química. Devido a estas propriedades e suas características físicas (distribuição granulométrica, superfície específica e fases) e químicas (pureza) distintas, o Cermet é um material cerâmico que além de ser usado em cerâmica de alta tecnologia está presente em um número muito grande de aplicações, tais como: indústria química, têxtil, farmacêutica, mecânica, automotiva, eletrônica, na área biológica e muitos outros (ROSOLOWSKI;

BURKE,1995). A utilização desses materiais no experimento que irá ser apresentado, mostrará a estabilidade das escamas (flake) de sólidos sinterizados depositados entre as câmaras separadas por ar, com isso irá se comprovar a atenuação térmica entre os pontos internos, blindando a fonte de calor com o ponto externo, onde foram executados as coletas dos dados para os experimentos. A Blindagem de radiação, conhecida pelas componentes de isolamento térmica, têm sido empregados em fornos e reatores de alta temperatura (MIYAKE, 2016). Na maioria das vezes, essas blindagens de radiação são compostas de várias placas finas metálicas paralelas interpostas por isolantes cerâmicos de baixa condutividade. O fluxo de radiação térmica, através dessas blindagens podem ser reduzido $N+1$ vezes, onde N é o número de placas.

Este trabalho tem como meta encontrar nos hiper-cermets, a possibilidade de novas aplicações como isolante térmico, podendo combinar com outros materiais já comercializados, associando a um isolante térmico mais eficaz, com menor custo de energia e com menos impacto ambiental.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Comprovar a Blindagem térmica proporcionado pelos Hiper-cermets.

2.2 Objetivo específico

- Estudar as características físicas dos ensaios.
- Observar o comportamento da temperatura da fonte de calor com a blindagem que foram feitos nos ensaios.
- Calcular as transferências de calor por condução e radiação com os dados adquiridos dos ensaios.
- Comparar os resultados dos ensaios com amostra do ar e com materiais isolantes comerciais existente no mercado.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 CERMETS

Quando a energia térmica é aplicada a um pó compacto, o mesmo é densificado e o tamanho médio do grão aumenta. Os fenômenos básicos que ocorrem durante esse processo, chamados de sinterização, são a densificação e o crescimento de grãos. A sinterização é uma técnica de processamento utilizada para produzir materiais e os componentes são controlados por densidade a partir de pós metálicos e ou cerâmicos, com aplicação da energia térmica. Assim, a sinterização é categorizada no elemento síntese processamento entre os quatro elementos básicos da ciência e engenharia de materiais.

Como a síntese e o processamento de materiais se tornaram cruciais nos últimos anos para o desenvolvimento de materiais, a importância da sinterização está aumentando como uma tecnologia de processamento de materiais. A sinterização é, de fato, uma das mais antigas tecnologias humanas, originária da era pré-histórica com o disparo de cerâmica. A produção de ferramentas a partir de esponja de ferro também foi possibilitada pela sinterização. No entanto, foi somente após a década de 1940 que a sinterização foi estudada e fundamentada cientificamente.

Desde então, notáveis desenvolvimentos na ciência da sinterização foram descobertos. Um dos usos mais importantes e benéficos da sinterização na era moderna é a fabricação de peças sinterizadas de todos os tipos, incluindo peças de metalurgia do pó e componentes cerâmicos.

Ao contrário de outras tecnologias de processamento, várias etapas e variáveis de processamento precisam ser consideradas para a produção de tais peças. Por exemplo, na etapa de modelagem, pode-se usar compactação de matriz simples, prensagem isostática, moldagem por injeção, etc., de acordo com a forma e propriedades requeridas para o produto final. Dependendo das técnicas de modelagem usadas, não apenas as condições de sinterização, mas também as propriedades sinterizadas podem variar consideravelmente.

Na etapa de sinterização, também existem várias técnicas e variáveis de processamento; variações na microestrutura sinterizada e várias propriedades resultantes. Entretanto, a sinterização visa, em geral, a produção de peças sinterizadas com microestrutura reprodutível e, se possível, projetada através do controle de variáveis de sinterização.

O Controle microestrutural significa o controle do tamanho de grão, densidade sinterizada e tamanho e distribuição de outras fases incluindo poros (KANG, 2005).

Os Cermets ou compósitos cerâmica-metal são materiais sinterizados que combinam as propriedades de ambas as classes dos materiais.

O presente trabalho trata do processo da utilização desses compósitos cerâmica-metal contendo cerne denso e envoltório poroso para formação de corpos cerâmicos que otimizam o aproveitamento térmico de sistemas como queimadores, fornos, reatores e exaustores. Esses cermets apresentam uma estrutura contendo uma fase metálica de formato lamelar encapsulada em fase cerâmica densa, também lamelar, internamente ao corpo cerâmico, enquanto que a camada externa do corpo cerâmico é porosa e isolante térmica.

Os cermets empregados atualmente possuem propriedades de tenacidade e condutividade que formam um conjunto com uma elevada dureza e a estabilidade das cerâmicas. Muitos materiais cermets tem sido aplicados em diversas áreas uma vez que possuem propriedades combinadas entre metais e cerâmicas. Este é o caso de diversos produtos tradicionais, como ferramentas e matrizes de metal duro (PRAKASH 2014). Além disso, as características eletroquímicas e de atividade superficial de metais como Ni e Cu suportados em cerâmicos tem gerado uma ampla gama de catalisadores utilizados em geração de energia e plantas industriais (KANG,2005)

Em geral, os materiais cerâmicos possuem baixa condutividade térmica e elevada refratariedade, sendo assim uma escolha conveniente como material isolante térmico em altas temperaturas. Entretanto, grande parte das cerâmicas são translúcidas à radiação infravermelha emitida por corpos aquecidos, o que afeta negativamente o desempenho como isolante térmico. As perdas e o baixo perfil térmico nesses casos reduz a eficiência de dispositivos no uso de reatores ou motores, tubulações aquecidas e queimadores a gás.

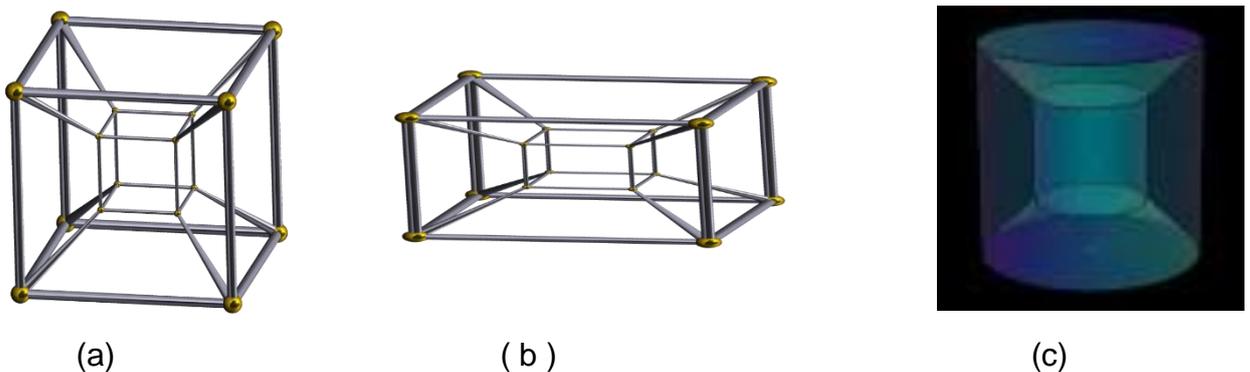
No presente trabalho, microplacas alinhadas conformam materiais de blindagens de radiação, onde o metal refletor se encontra embutido numa microestrutura cerâmica.

O material utilizado nesse trabalho, como blindagem térmica propõe uma nova abordagem para aumentar a isolamento térmica em altas temperaturas. A incorporação de lamelas ou microplacas metálicas dispersas e orientadas na matriz

cerâmica, sendo encapsuladas em regiões cerâmicas densas para não haver a possibilidade das microplacas sofrerem oxidação em altas temperaturas, constituem um novo design implementado nesse cermet.

Este material laminar é disposto internamente e circundado por outra camada cerâmica porosa. Desta forma, esse novo cermet, designado como hiper-cermet, tem uma geometria hipotética de hipercubo. Muito embora esta comparação seja meramente baseada nos aspectos do desenho geométrico, ela carrega um grande significado no sentido de que um hipercubo pode ser visto como contendo um cubo interno que é expandido, gerando um cubo externo. Assim, uma pastilha interna densa (contendo metal encapsulado), quando expandida, gera uma pastilha circundante menos densa, ou seja, porosa. A Figura 1 mostra o novo material hiper-cermet baseado no traço de um hipercubo 4-D projetado em 3-D, assumindo formas de retângulo ou cilindro. Outro aspecto do material é a estrutura de poros composta de poros achatados e orientados, o que reduz adicionalmente a condutividade térmica. Desta forma, o novo material projetado é denominado “hiper-cerâmico” ou “hiper-cermet”.

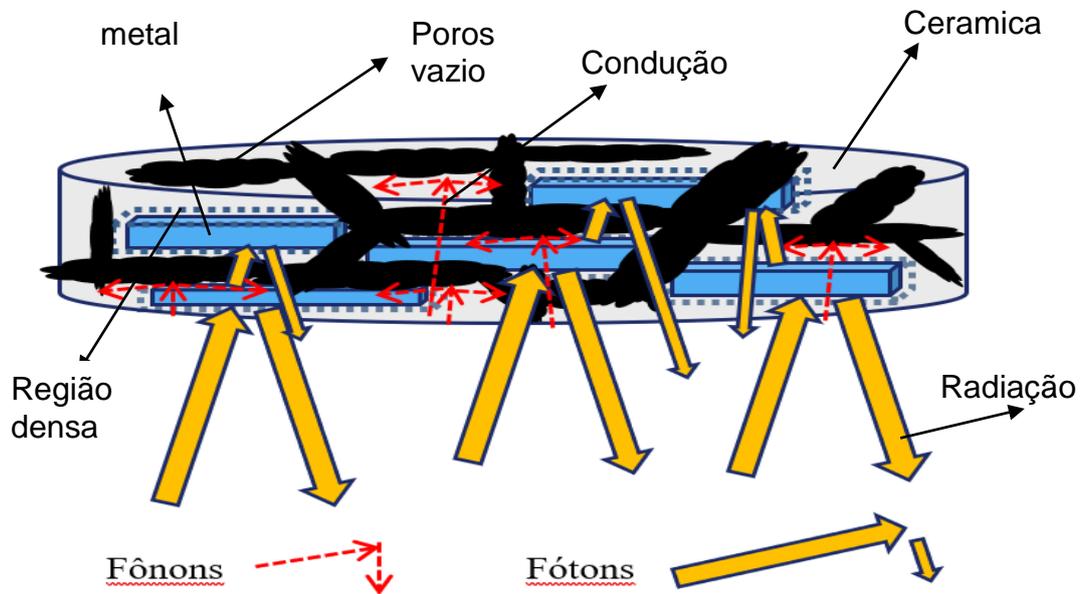
Figura 1- Inspiração do material projetado hiper-cerâmica: (a, b) projeções 3-D de hipercubo (achatado) e (c) hiper-cilindro.



Fonte: Elaboração própria

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático do material, onde se salienta o espalhamento de fônons em poros achatados, promovendo a atenuação da condução térmica pelos poros e também direcionando a blindagem da radiação térmica para cada lamela envolvida na região densa.

Figura 2- Esquema do material hiper-cermet : regiões densas internas contendo lamelas metálicas encapsuladas com exterior contendo poros achatados; fônons são espalhados sem conseguir progredir pelo material.



Fonte : Elaboração própria

3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sempre que há uma diferença de temperatura entre dois meios, ou entre regiões diferentes do mesmo meio, a transferência de calor deverá ocorrer. E essa transferência ocorrerá do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura. A transferência de calor (ou calor propriamente dito) é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura, cujo conceito é definido na Termodinâmica. (BERGMAN;LAVINE, 2019).

A taxa de transferência de calor (\dot{Q}), é a razão de transferência de calor com uma unidade de tempo.

Portanto desenvolvendo o conceito de \dot{Q} com unidade de tempo,

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\text{tempo}} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \left[\frac{\text{Joule}}{\text{segundo}} \right] = [\text{Watt}] \quad \text{equação 1}$$

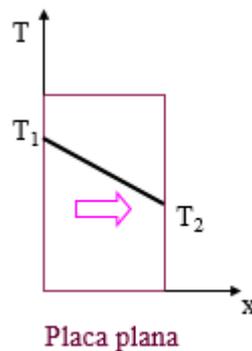
Na condução de calor encontramos:

$$\frac{J}{A} = -Kth \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot s} \right] \quad \text{equação 2}$$

Onde J é o fluxo, A é a área [m²], ΔT a diferença de temperatura e x a distância [m], na figura 3 mostra essa transferência de calor.

Kth é a condutividade térmica do meio [W/mK].

Figura 3 - Transferência de calor de uma placa plana



Fonte: Elaboração própria

Todo elemento químico é formado por átomos e estes, por sua vez, se agrupam formando moléculas. Pela Termodinâmica, os átomos ou moléculas estão em constante movimento (energia cinética), vibrando e se deslocando a uma determinada velocidade. Através do conceito de temperatura é associado à velocidade de movimentação destas moléculas, ou seja, quanto maior a temperatura, mais velozmente as moléculas estão vibrando (se movimentando).

Com essas afirmações podemos analisar os três modos de transferência de calor:

- Transferência de calor por condução.
- Transferência de calor por Convecção.
- Transferência de calor por Radiação.

3.2.1 Transferência de Calor por condução

Este modo de transferência de calor está fundamentalmente associado ao choque entre moléculas com diferentes velocidades de vibração, com a molécula mais veloz chocando-se com a molécula menos veloz, "passando" energia cinética. Isto se denomina, difusão de energia.

Esta forma de transferência de calor ocorre basicamente nos corpos sólidos. Um detalhe importante é que não ocorre alteração da posição das moléculas ao se chocarem. Ou seja, as moléculas trocam energia entre si, mas não mudam de lugar no espaço. Isto porque nos sólidos, as moléculas apresentam uma forte ligação entre si. Os mecanismos de condução de calor envolvem a transferência térmica por meio de elétrons e por vibrações (ondas) da estrutura conhecidas como fônons. Ambos os mecanismos são afetados pela presença de defeitos no material, de ordem atômica, molecular ou micro e macro-defeitos como poros e vazios. Assim, elétrons e fônons portadores de calor são espalhados ao longo do transporte pelo material, causando uma redução da taxa de transferência de calor (BERGMAN; LAVINE, 2019). O trabalho faz uso desses conceitos, procurando gerar uma microestrutura que aumente o espalhamento dos portadores de calor.

Condução de calor é a transferência de calor de uma molécula para outra em um corpo, esse efeito ocorre principalmente nos corpos sólidos.

Pela Equação de Fourier

$$Q = -K A \frac{dT}{dx} \quad \left[\frac{J}{s} \right] = \left[\frac{W}{mK} \right] [m^2] \left[\frac{K}{m} \right] = [W]$$

equação 3

K não varia na faixa de temperatura

Condução unidirecional

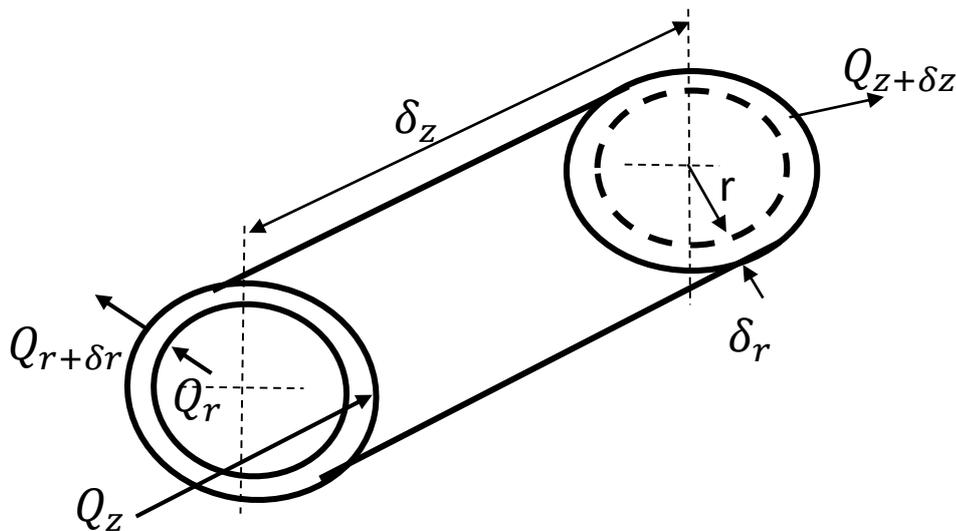
$$\int Q = \int K A \frac{dT}{dx}$$

temos:
$$Q = K A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$

ou
$$T(x) = -\left(\frac{Q}{KA}\right)x + T_1$$
 teremos uma função linear.

Na figura 4, mostra os tubos cilíndricos concêntricos com suas dimensões, densidades e materiais já definidos, para qual foi desenvolvido as equações que foram calculadas no respectivo trabalho.

Figura 4 - Tubos cilíndricos concêntricos com dimensões, densidades e materiais definidos.



Fonte : Elaboração própria

Considere um tubo cilíndrico com as propriedades volumétricas, propriedades térmicas e o tipo de material conhecidos, será analisado a transferência de calor em função do tempo. Considerando os termos materiais com condutividade térmica, e as densidade conhecidas, com a utilização de coordenadas cilíndricas desenvolveremos a transferência de calor:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{l}{r} \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} \quad \text{equação 4}$$

Onde $\alpha = \frac{K}{\rho c}$ difusidade térmica

Considerando o equilíbrio térmico sobre o volume dos cilindros concêntricos, considere a equação 5 abaixo:

Calor de entrada + calor de saída = taxa de troca de calor da energia interna

$$Q_r + Q_z - Q_{r+\delta r} - Q_{z+\delta z} = \frac{\delta u}{\delta t} \quad \text{equação 5}$$

$$Q_{r+\delta r} = Q_r + \frac{\delta Q}{\delta r} \delta r$$

$$Q_{z+\delta z} = Q_z + \frac{\delta Q}{\delta z} \delta z$$

Sendo $u = mcT$ substituindo na equação 5 temos :

$$-\frac{\delta Q}{\delta r} \delta r - \frac{\delta Q}{\delta z} \delta z = \frac{\delta mcT}{\delta t}$$

Pela lei de Fourier na direção exterior normal externa n temos:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\delta T}{\delta n}$$

$$Q_r = -KA \frac{\delta T}{\delta r} = -K \times 2\pi r \delta z = \frac{\delta T}{\delta r} \quad (A = 2\pi r \delta z) \quad \text{equação 8}$$

$$Q_z = -KA \frac{\delta T}{\delta z} = -K \times 2\pi r \delta r = \frac{\delta T}{\delta z} \quad (A = 2\pi r \delta r)$$

A equação ... será :

$$-\frac{\delta Q}{\delta r} \left\{ -K \times 2\pi r \delta z \frac{\delta T}{\delta r} \right\} \delta r - \frac{\delta Q}{\delta z} \left\{ -K \times 2\pi r \delta r \frac{\delta T}{\delta z} \right\} \delta z = mc \frac{\delta T}{\delta t} \quad \text{equação 9}$$

Considerando massa $m = \rho 2\pi r \delta r \delta z$ a equação 10 torna-se:

$$\frac{\delta Q}{\delta r} \left\{ Kr \frac{\delta T}{\delta r} \right\} \delta r - \frac{\delta Q}{\delta z} \left\{ Kr \frac{\delta T}{\delta z} \right\} \delta z = \rho cr \frac{\delta T}{\delta t}$$

Dividindo por r ambos os termos da equação podendo estar fora da chave, como não é função de z, e dividindo por K considerando a condutividade térmica constante teremos;

$$\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left\{ r \frac{\delta T}{\delta r} \right\} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{\delta T}{\delta t}$$

Utilizando a difusividade térmica sendo $\alpha = \frac{K}{\rho c}$ e expandindo o primeiro termo com a regra do produto temos:

$$\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left\{ r \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \frac{\delta T}{\delta r} \frac{\delta r}{\delta r} \right\} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t}$$

Então teremos como resultado:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} \quad \text{equação 11}$$

Pode-se, considerar para tubos cilíndricos concêntricos, que o calor é transmitido na direção radial, se a temperatura do cilindro interno for maior em relação ao cilindro externo, ocorrerá um gradiente de temperatura ocasionando uma transferência de calor (BERGMAN; LAVINE, 2019).

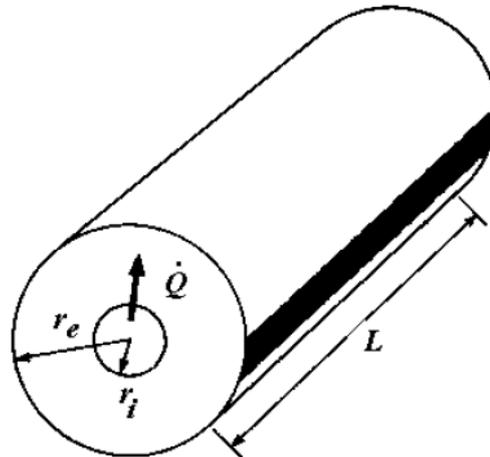
Para calcular essa taxa de transferência de calor nesta situação física, utiliza-se a Lei de Fourier, onde se observa que, neste caso, a área da seção através da qual flui o calor varia continuamente com o raio. Interpolando a equação 11 e aplicando alguns procedimentos matemáticos, chega-se a seguinte equação:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L \cdot (T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad \text{equação 12}$$

Onde essa equação 12 é a transferência de calor por condução entre cilindros concêntricos que utilizaremos nos cálculos adiante.

Na figura 5 mostra o tubo cilíndrico concêntricos com os devidos raios interno e externo mostrando a transferência de calor \dot{Q} .

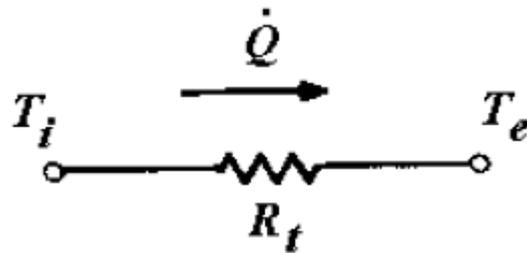
Figura 5 - Transferência de calor por condução, entre tubos cilíndricos concêntricos radiais.



Fonte : Elaboração própria

Na figura 6 temos a representação da Resistencia térmica mostrando a direção do fluxo de calor.

Figura 6 - Diagrama de representação da resistência térmica com a transferência de calor.



Fonte: Elaboração própria

Sabemos que $\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e)}{R_t}$, sendo R_t a resistência térmica do sistema.

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e)}{R_{aço} + R_{inox} + R_{ar}} \quad \text{equação 13}$$

No Anexo A encontraremos todos cálculos da transferência de calor para os testes executados, onde são utilizadas as equação 12 e 13..

3.2.2 Convecção de calor

A convecção de calor tem como modo de transferência de calor a ocorrência em fluidos (líquidos e gases), consistindo na superposição de dois mecanismos distintos: a difusão de energia entre as moléculas, e a movimentação destas moléculas. (BERGMAN; LAVINE, 2019).

Nos fluidos, as moléculas não apresentam uma ligação tão forte entre si, não estão rigidamente presas, como nos sólidos. Ou seja, elas podem mudar livremente de lugar no espaço. Como exemplo citamos as moléculas de um fluido que entrem em contato com uma superfície sólida aquecida, recebem energia térmica por difusão, isto é, pelo choque entre as moléculas mais superficiais do sólido e as moléculas do fluido coladas à placa. Porém, como elas são livres para se movimentar (movimento do fluido), ao se deslocarem elas "carregam" consigo a energia térmica adquirida. Ao mesmo tempo, novas moléculas de fluido irão entrar em contato com a

superfície sólida, aquecendo-se e reiniciando o processo, no experimento desse estudo não aplicaremos o estudo da convecção, devido ao pequeno volume entre as camisas cilíndricas estarem preenchidas de material sólido, nos testes experimentais aplicado a este estudo, será desprezado o efeito do calor de convecção, devido a ausência de líquido e gases..

3.2.3 Transferência de calor por Radiação

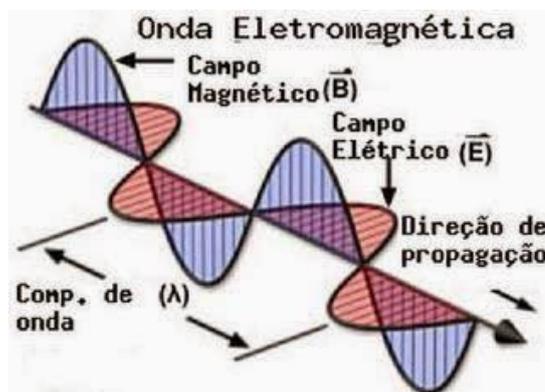
Para a radiação de calor, que tem como modo de transferência de calor a relação com a propriedade que existe em toda matéria, a emissão desta energia na forma de radiação (ondas eletromagnéticas), é tanto proporcional quanto maior for a temperatura da matéria (isso é, sua agitação molecular).

Este tipo de transferência de calor não necessita de um meio material para se realizar, Podemos comparar com a energia do Sol, no espaço entre o Sol e a Terra praticamente não existe matéria (vácuo), entretanto assim a energia do Sol alcança nosso planeta. Essa transferência de energia (calor) se dá por meio de ondas eletromagnéticas (radiação). Portanto Radiação é a transferência de calor por intermédio de ondas eletromagnéticas.

3.2.3.1 A Blindagem de radiação

A transferência de calor por radiação se dá por meio de ondas eletromagnéticas na figura 7 é mostrado a composição da onda, os campos magnéticos e elétricos, através da radiação térmica (BERGMAN; LAVINE, 2019).

Figura 7 - Onda Eletromagnética e comprimento de onda (λ)



$$v = \lambda \cdot f$$

$$f = c/\lambda$$

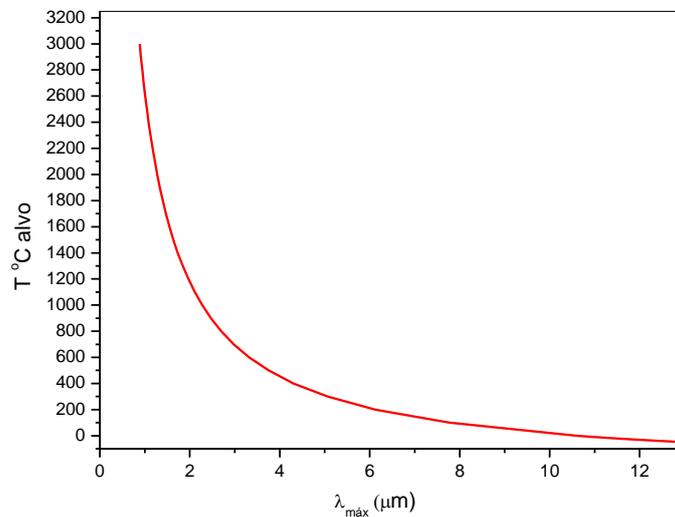
Fonte : Incropera (2019)

Todos os corpos acima do zero absoluto emitem radiação eletromagnética, dentro de um certo intervalo de frequências, cujo pico máximo é dado pela Lei do Deslocamento de Wein (equação 14) para um corpo negro, sendo T [°K] :

$$\lambda_{\max} = 2897,8/T \quad \text{equação 14}$$

A Figura 8 mostra um gráfico $\lambda \times T$ (°C) construído com base na equação 14.

Figura 8 - Lei do deslocamento de Wein para um corpo negro



Fonte : Incropera modificado

Durante a interação da radiação eletromagnética-matéria (propriedade térmica dos materiais), vários fenômenos podem ocorrer, conforme a equação:

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad \text{com } \alpha = \varepsilon \quad \text{equação 15}$$

Os três símbolos α, ρ, τ são, respectivamente: absorvidade (fração de energia absorvida), refletividade (fração de energia refletiva) e transmissividade (fração de energia transmitida através do corpo), enquanto que ε é a emissividade.

3.2.3.2 Absortividade (α)

Em uma lâmina metálica de espessura de alguns microns, $\tau = 0$ (corpos sólidos de materiais que não transmitem Radiação térmica) o que implica em $\alpha + \rho = 1$. Assim, o material de elevada reflexão quanto ao fluxo de fótons deve possuir baixa emissividade. Neste trabalho utiliza-se Ni metálico e zircônia tetragonal para compor o hiper-cermet, onde a emissividade do Ni varia de 0,12 a 0,40, dependendo do estado de oxidação. A transmissividade da zircônia, conforme mencionado, é elevada em comprimentos de onda de infravermelho, atingindo $\tau = 0,7$. Ou seja, a zircônia não reflete radiação mas o Ni metálico reflete. (BERGMAN; LAVINE, 2019)

A aplicação do material isolante térmico com blindagem de radiação em relação a fonte de calor deve se dar perpendicularmente ao fluxo de calor. A Figura 5 esquematiza este fato e mostra parcialmente uma disposição de discos isolantes em tubo aquecido de camisa dupla.

A Emitância Espectral ou intensidade radiante:

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)}$$

No SI :

$$C_1 = 2\pi^5 h c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \qquad C_2 = \frac{hc}{K} = 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

h ou \hbar é a constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s

$$\int E d\lambda = \sigma \cdot T^4$$

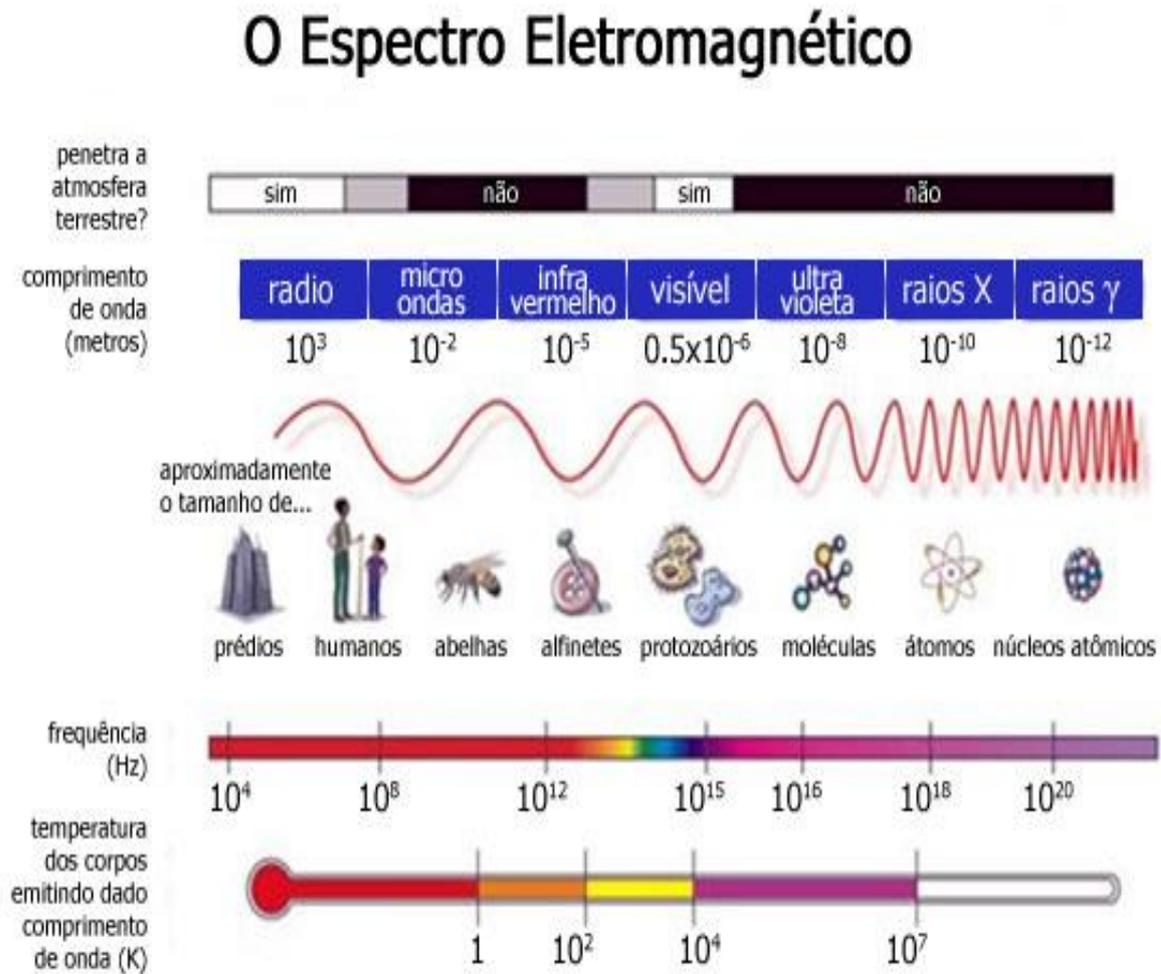
$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

equação 16

A menor energia que uma onda pode ter é $E = \hbar \cdot f = \hbar \cdot c / \lambda =$ energia de um fóton. O espectro eletromagnético é mostrado na figura 10 e as temperaturas emitidas

em função do comprimento de onda. Na figura 11 r a emissão de radiação dos corpos com a lei de Deslocamento de Wein $\lambda_{\max} = 0,002898/T$

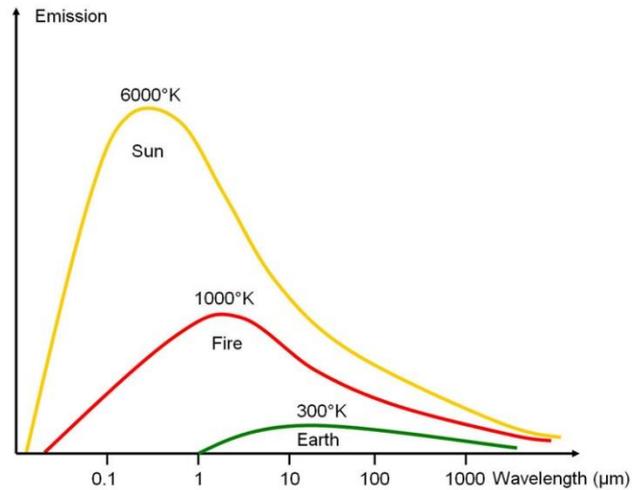
Figura 9 - O Espectro Eletromagnético comparativo por seu comprimento de Onda.



Fonte: Incropera modificado

Na figura 10 mostra a Lei de deslocamento de Wein, comparando com o sol a, fogo e a terra.

Figura 10 - Lei de deslocamento de Wein relacionando a emissão dos corpos.



Fonte: Incropera (2019)

O Fluxo de transferência de calor por radiação é dado por:

$$Q = A_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

σ = cte de Boltzman = $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Isto vale para um corpo negro onde a emissividade $\varepsilon = 1$

Sabendo que $\varepsilon = \alpha$, a absorvidade do corpo negro é $= 1$

Para corpos reais, α tem um valor diferente de 1.

Então o fluxo é:

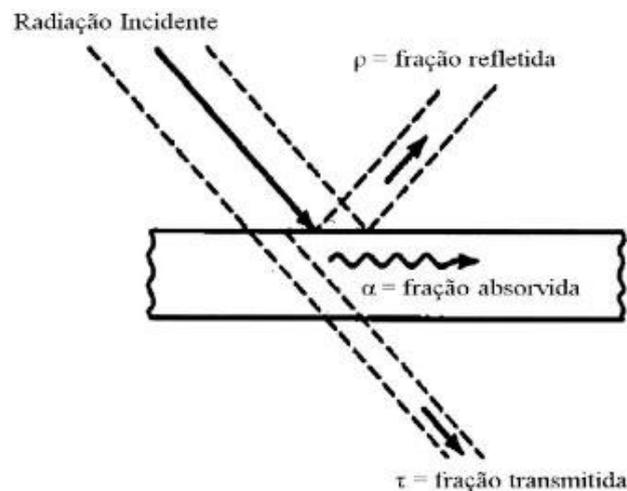
$$Q = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

equação 17

Quando a radiação atinge a matéria, parte é absorvida, outra é transmitida e outra é refletida, a equação 1 mostra essa somatória de condições e a figura 11 ilustra o fenômeno.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.0)$$

Figura 11 - Radiação no corpo mostrando α , ρ , τ



Fonte: Incropera (2019)

Observamos que para o material de blindagem térmica, como os hipercermets do experimento, a fração transmitida (τ) será próxima de zero, conforme a equação 2

$$\alpha + \rho = 1 \quad (\text{Equação 17})$$

Sendo α a fração absorvida (absorbância), ρ a fração refletida (reflectância),

“Uma microestrutura do material foi projetada para oferecer baixa condutividade térmica e emissividade, a transferência de calor por radiação através de um material depende de suas propriedades óticas .” (RESTIVO,2018)

Sendo assim, um metal é o material ideal para blindagem radiante. O alinhamento de constituintes lamelares e vazios planares gerados por formadores de poros é conseguida naturalmente pelo processo de colagem de fitas ou *tape casting*. Entretanto, caso oxidado, o metal perde sua capacidade de reflexão de fótons. Desta feita, é fundamental evitar a oxidação do metal encapsulado no material cerâmico. Supondo que se estabeleça uma estrutura de poros na forma de planos orientados, a propagação de fônons será prejudicada e a condutividade térmica reduzida. Para se evitar a condução de calor por elétrons no cermet, este deve conter até 30% em

volume de Ni, permanecendo, assim, abaixo do limite de percolação elétrica. (RESTIVO, 2018)

Pela formula dos sistemas de blindagem de radiação térmica considera duas superfícies de área A em temperaturas T1 e T2, sendo T1 maior que T2 . A taxa de transferência de calor por radiação Q12 entre essas duas superfícies é dada pela equação (1):

$$Q_{12} = \frac{AC\sigma(T1^4 - T2^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} \quad (\text{equação 18})$$

onde σ é a constante de Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

A equação (1) é válida caso as emissividades ε de todas as superfícies são iguais e fator de forma unitário, o que é uma boa aproximação de casos reais. Introduzindo algumas placas paralelas interpostas às superfícies, assinaladas de 3 a N, a equação resultante é:

$$Q_{1,2,N} = \frac{AC\sigma(T1^4 - T2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1\right)_1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1\right)_2 + \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1\right)_3 + \dots + \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1\right)_N} \quad (\text{equação 19})$$

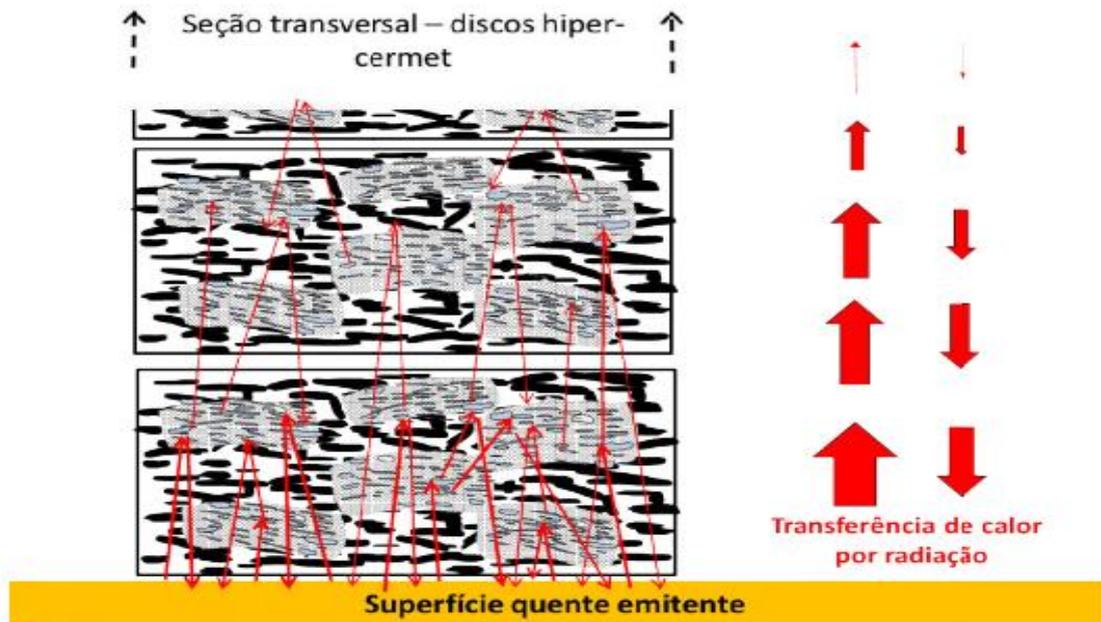
Conclui-se que a taxa de transferência de calor por radiação é reduzida N+1 vezes pela interposição de N placas metálicas no espaço entre a superfície aquecida e o exterior.

A baixa emissividade dos metais com transmissividade nula implica em alta reflectividade.

A figura 12 mostra a blindagem da radiação térmica com os hiper-cermets, mostrando o efeito da reflexão provocado pelo níquel lamelar , e também a atenuação da onda eletromagnética, através das sucessivas reflexões, encontrando as N+1

lamelas, o fluxo de calor é retornado a superfície quente emitente, formando assim a blindagem térmica da radiação das ondas eletromagnéticas.

Figura 12 Blindagem de radiação térmica com discos hiper-cermet



Fonte: Elaboração própria

O Fluxo de transferência de calor por radiação é:

$$Q = A_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

σ = cte de Boltzman = $5,669 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴

Considerando a emissividade $\varepsilon = 1$ para um corpo negro, se $\varepsilon = \alpha$, a absorvidade para o corpo negro é = 1.

Para corpos reais, α tem um valor diferente de 1.

Então o fluxo é:

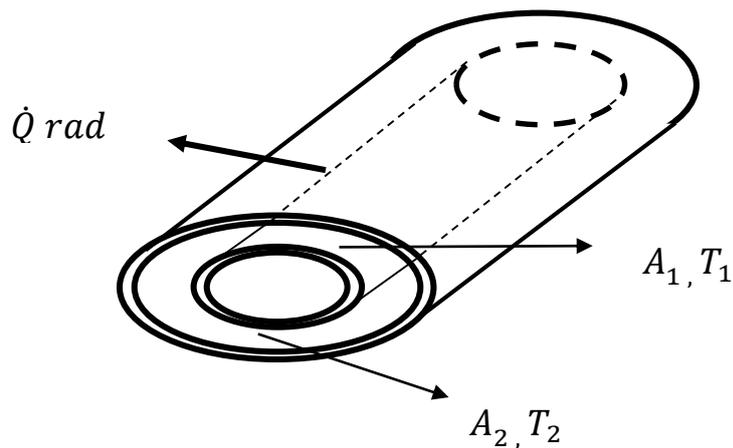
$$Q = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

A equação 20 abaixo, nos mostra a transferência de calor por irradiação para tubos radiantes, consideramos que o tubo interno é Aisi 316 $\epsilon_1 = 0,24$, e o externo é aço carbono $\epsilon_2 = 0,066$, a área externa A_1 e área interna A_2 , foram limitadas em 100mm de comprimentos onde foram preenchidos as blindagens.

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{\sigma \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad \text{equação 20}$$

Na figura13, mostra a ação da transferências de calor por radiação nos tubos cilíndricos coplanares, com áreas internas A_1 , A_2 , e temperaturas T_1 e T_2 .

Figura 13 - Fluxo de calor por radiação de cilindros radiais com $T_1 > T_2$



Fonte: Elaboração própria

O Anexo A mostra todos cálculos e resultados do fluxo de calor por radiação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho de pesquisa foi elaborado de forma experimental foram elaborados testes de condução de calor em um dispositivo eletromecânico construído em aço inox e carbono na forma cilíndrica, com dupla camisa especialmente projetado e construído para esse fim, onde foram realizados de modo a comprovar as características de transporte de calor. No volume formado entre as camisas do dispositivo, foram realizados todos ensaios nas mesmas condições experimentais.

O primeiro ensaio foi utilizando o ar como isolante térmico para a nossa referência, o segundo com uma manta térmica de lã de alta alumina, conhecida como isolante térmica comercialmente, na sequencia foram realizados vários ensaios com os hiper-Cermets YTZ Ni,. Todos ensaios foram padronizados, utilizando sempre os mesmos parâmetros de inserção de energia no controle da fonte de calor.

Primeiramente será feito um ensaio para aquisição das temperaturas de condução (“teste em branco”) de um cilindro para outro não contendo material isolante (*flakes* cermets e manta térmica) entre as duas camisas, teremos apenas ar como isolante térmico, todas as medições foram, armazenadas na memória de um computador com um software específico para tratamento de sinais e interface gráfica, nos outros ensaios serão depositados o material de blindagem (manta térmica, flakes e pó, hiper-cermet), foram realizadas todas as medidas comparativas com os dois ensaios. Na aquisição dessas leituras foram coletados por termopares do tipo K que estão acoplados nos dois tubos cilíndricos, seis canais de medição distribuídos nos dois tubos que utilizou como interface uma placa de aquisição de dados para tratamento dos sinais , três termopares para a primeira camisa cilíndrica que estarão em contato com a fonte de calor, e outros 3 termopares foram acoplados na camisa cilíndrica externa, também foi utilizado mais um termopar em contato direto com a fonte de calor conectado diretamente na resistência, (contato direto com a fonte de calor), a propósito do controlador, administrou a energia aplicada a resistência elétrica do experimento. No segundo ensaio foi inserido a manta térmica, essa manta posicionou entre os dois cilindros, o preenchimento desse material foi criteriosamente, na mesma área superficial onde estão localizados os termopares e foram alinhados de forma que fiquem paralelo a superfície e por análise comparativa, foi controlada as

temperaturas e repetidas o mesmo procedimento do teste em branco. Como os ensaios atingiram temperaturas na ordem de 1000°C , a avaria dos termopares foi relevante, no protótipo foi considerado seis termopares na mesma região nos dois tubos cilíndricos, onde garantimos a leitura das temperaturas interna e externa, após vários ensaios houve a necessidade de trocar os termopares, mas utilizamos do mesmo material do mesmo lote para a segurança da leitura, dos mesmo valores das temperaturas. As medições de todos ensaios coletados tem como objetivo principal a comparação através da análise e da interpretação do comportamento da blindagem. As temperaturas nas duas superfícies das camisas, foram aferidos e comparadas instantaneamente, com diferentes composições de hiper-Cermets, permitindo analisar e comparar a condutividade térmica entre as superfícies. Com isso obtém-se de fato a análise da qualidade da blindagem térmica.

4.1 O Hiper-Cermet

O compósito cerâmica-metal (hiper-cermet), é uma classe de materiais de microestrutura projetada contendo camadas micrométricas metálicas de baixa emissividade, micro-placas ou lamelas metálicas, encapsuladas em material cerâmico de baixa condutividade térmica na faixa 1 a 3 W/mK. Conforme a sua produção, esses materiais podem ser preparados em pó, granulado ou flocos a granel, cujas faces têm dimensões muito superiores em relação à espessura, desde 5 a 100 vezes, portanto, com morfologia de escamas. Esta morfologia de partículas planares se orienta por si só paralelamente às superfícies a serem isoladas termicamente, ou seja, na direção perpendicular ao fluxo térmico. Assim, o pó ou granulado plano pode ser aplicado através de simples preenchimento por gravidade do volume isolante, ou mesmo pela sua fluidização em meios gasosos ou aplicado na forma de dispersão em veículos líquidos, como tintas e *primers* ou outros veículos. O desenho do compósito cerâmica-metal (hiper-cermet) reduz a transferência de calor por irradiação e a condutividade térmica aparente em altas temperaturas, conduzindo à diminuição de perdas térmicas e maior eficiência energética (Figuras 1 e 2). O material compósito cerâmica-metal (hiper-cermet) pode ser confeccionado em duas formas principais, não excluindo outros formatos possíveis: discos e pó granulado em escamas (*FLAKE*). No caso de discos, as dimensões são: diâmetro 1 a 6 mm e espessura 0,1 a 2 mm, em função do volume a ser isolado termicamente. Tipicamente, os discos preparados possuem

diâmetro de 3-4 mm e espessuras de 100-400 microns. No caso de *FLAKES*, as dimensões das partículas podem ser menores, com espessuras desde 10 microns até 1000 microns, e larguras de 30 microns até 2000 microns, recomendando que largura das partículas seja superior à espessura em pelo menos 5 vezes.

A microestrutura resultante do material compósito cerâmica-metal (hipercermet) é especialmente útil para blindar radiação térmica de superfícies aquecidas, reduzindo a transferência de calor entre componentes aquecidos e o ambiente exterior. A grande quantidade de lamelas metálicas encapsuladas no material, sobrepostas entre si ao longo da espessura de discos ou *flakes*, causa uma redução no fluxo de calor por radiação térmica mediante múltiplas reflexões.

Na figura 14 é mostrado os discos e os *flakes*, material *YTZ-20%níquel*

Figura 14 - (a) Cermets discos , (b) Cermets pó sinterizados “Flakes”



(a) Discos



(b) Pó sinterizado, Flak

Fonte: Elaboração própria

O Cermet (compósito cerâmica-metal) é formulado com níquel e zircônia tetragonal estabilizado com 3 moles de ítria (YTZ). YTZ é translúcido para a radiação térmica, e o níquel opaco e refletor. Entretanto, o Ni sofre oxidação em alta temperatura, havendo a necessidade de encapsulamento.

Tape casting é o processo que tem como meta o alinhamento dos Cermets, com isso obtendo um alinhamento horizontal e a reflexão dos fótons pelas lamelas de níquel, que irão refletir a onda eletromagnética.

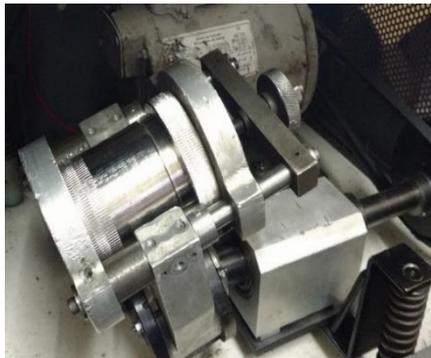
O processo de fabricação, consta basicamente de 12 etapas principais, sendo:

Etapa 1: onde se faz o processamento do Ni metálico por moagem de alta energia ou equivalente, (Figura 15). A figura 17 mostra o níquel antes do moinho de alta energia e após acrescentado 3% de moles de YTZ; a figura 15 mostra o moinho de alta energia onde são adicionados o níquel e a zircônia , já na figura 16 é mostrado na micrografia como fica o níquel antes e após a o moinho de alta energia.

Etapa 2: onde se faz a adição de partículas cerâmicas de revestimento do pó metálico, a matriz cerâmica é composta de zircônia em pó, com tamanhos de partícula de 0,5 microns.

Etapa 3: onde ocorre a formação das micro-placas ou lamelas metálicas; tetragonal (YTZ), para formação do níquel lamelar.

Figura 15 – Moinho de alta energia



Fonte : Elaboração do própria

Figura 16(a) Micrografia do pó de níquel antes da moagem

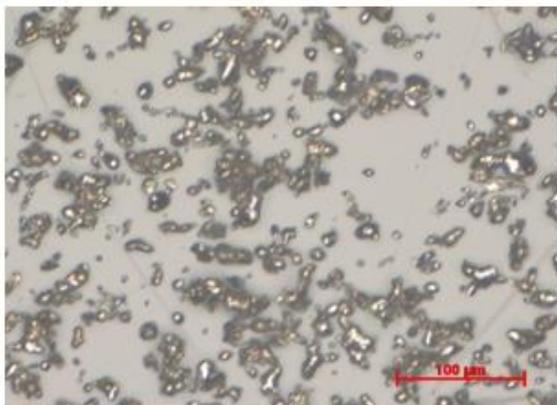
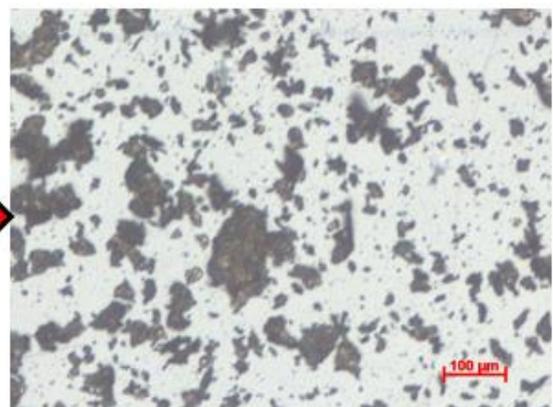


Figura 16(b) Micrografia do pó de níquel após a moagem de alta energia, produzindo níquel lamelar.



Fonte : Elaboração própria

Etapa 4: onde se faz a primeira suspensão com adição de etanol e aditivos orgânicos para formar a camada interna (INNER) com teor metálico desde 15 e 20% em volume, sendo o restante o pó da matriz cerâmica, onde os tipos de aditivos empregados são aglomerantes, lubrificantes, dispersantes e agentes antiaderentes e antiespumantes, que incluem poli vinil butiral (PVB), polietileno glicol (PEG), ácido para-aminobenzóico (PABA), ácido esteárico, álcool poli-vinílico (PVA), onde o veículo empregado é o álcool etílico;

Etapa 4a: paralelamente, uma suspensão auxiliar, preferencialmente com o mesmo tipo de cerâmica da primeira suspensão, e aditivos descritos e selecionados é preparada, isenta de metais, denominada "CAP";

Etapa 5: realização da primeira colagem de fitas por *tape casting* em mesa plana com aplicador regulável na forma de régua (*doctor blade*), realizada em 3 camadas sobre um substrato, como um filme de poliéster, polietileno ou outra fita larga, ou equivalente;

Etapa 6: granulação com raspadores realizada no material depositado em camadas seco durante 24 horas, em temperatura ambiente, obtendo escamas ou pós escamosos, cujas partículas tenham larguras médias de 20 a 250 microns e espessuras entre 5 e 50 microns;

Etapa 7: Pré-sinterização, o material seco e calcinado, que é levado a forno de sinterização, onde se estabelece um ciclo térmico com taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera oxidante ou ar até 800°C, seguido de aquecimento até a faixa 1300 °C sob atmosfera inerte ou redutora. Após o período de pré-sinterização o material é resfriado;

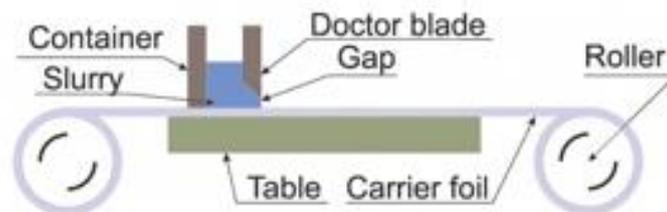
Etapa 8: realização da segunda suspensão cerâmica formulada com o pó compósito YTZ-Ni pré-sinterizado, onde se adiciona mais pó cerâmico matriz atingindo o teor final de metais dispersos de 15 e 20% em volume, onde os aditivos citados e outros aditivos formadores de poros alongados e veículos fluídos são novamente adicionados para compor a suspensão;

Etapa 9: realiza-se uma segunda colagem de fita, de modo semelhante à primeira, com uma camada única de espessuras de cerca de 400 microns, dando origem a fita ou camada final do produto;

Etapa 10: formação de escamas *flake* (hiper-cermet) e discos ou corpos cerâmicos compósitos YTZ-Ni (hiper-cermet);

Na figura 17 apresenta a mesa de *Tape Casting*, formação de escamas flakes e discos e compósitos.

Figura 17 - O Processo *Tape Casting*



Fonte: KANG, 2005

Etapa 11: sinterização final na mesma forma na pré-sinterização, com os *flakes* e os discos ou corpos cerâmicos compósitos YTZ-Ni com colagem de fitas final, onde é realizada sobre molde de chapa perfurada, sendo calcinados e depois resfriados;

Etapa 12: obtenção do material final.

A figura 18 mostra o processo detalhado de sinterização do hiper-cermet .

Figura 18 Processo detalhado para obtenção do hiper-cermet



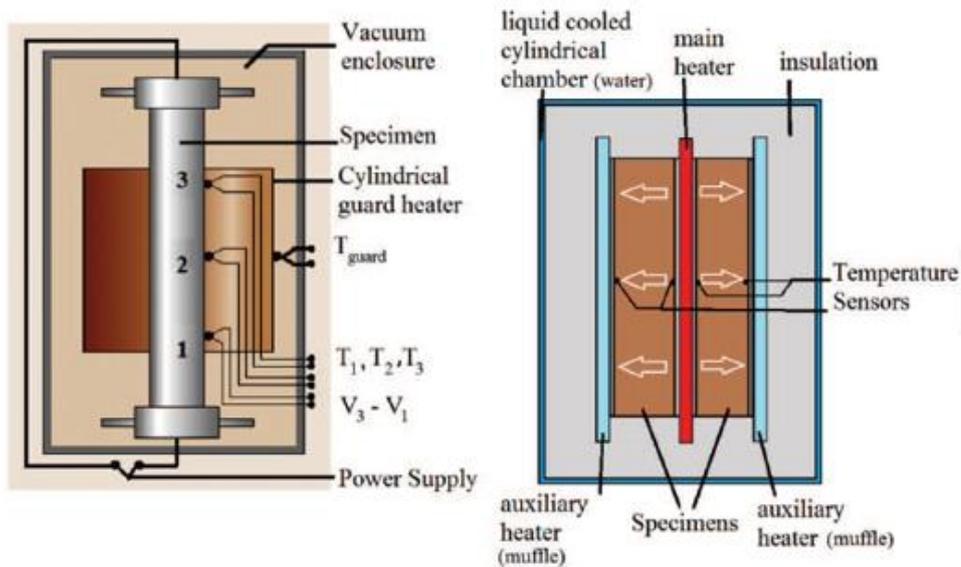
Fonte :Elaboração própria

4.2 Dispositivo Eletromecânico

O dispositivo protótipo eletromecânico que foi confeccionado e usado em nossos laboratórios, conforme a norma ASTM C335 / 335-10 e 1, este método de teste padrão para propriedades de transferência de calor em estado estacionário de tubos de isolamento.

O método de tubo aproveita o fluxo de calor radial em uma amostra cilíndrica. Um aquecedor central, que é um tubo, que pode conter uma resistência, é inserido no eixo central da amostra em forma de tubo. Lá são aquecidos em ambas as extremidades da (amostra a ser mensurada). O conjunto com as camisas cilíndricas e aquecimento, é separado com um isolamento térmico e, em seguida, uma camisa de água ou um dissipador de calor com refrigeração líquida. A Figura 19(a) mostra o esquema e os componentes do método de tubos. Na figura 19(b) temos em corte o aquecimento as proteções de segurança e o diagrama a ser utilizado para minimizar as perdas de calor Axial e também o controle de segurança.

Figura 19 - Desenho ilustrativo de um dispositivo cilíndrico eletromecânico, conforme norma ASTM C335 / 335-10e1 (a), corte do protótipo apresentando os termopares internos e a blindagem térmica (b).



(a)

Fonte: Norma ASTM C335 / 335-10e1 (2017)

A condutividade térmica é obtida medindo o fluxo de calor radial ϕ [7]:

$$K = \frac{\phi \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi(T_1 - T_2)}$$

Segue abaixo algumas vantagens dos métodos de estado estacionário, por tubos:

- Expressão Matemática simples , método absoluto e primário para amostras de baixa condutividade.
- Consumo de tempo aceitável, adequado para formas de pó, granulares ou sólidas, incertezas de 1 a 2% para isolamentos perto da temperatura ambiente, amostras de teste pequenas aceitáveis (exceto para esferas concêntricas)
- Facilidade na troca de termopares devido a sucessivos ensaios.
- Segue algumas desvantagens desse método:
- Complexidade do aparelho dando alta precisão.
- Dificuldade de medir corpos de prova geométricos (cilindro concêntrico ou esferas concêntrica), não ocorre em nossas amostras do experimento.
- Perdas de calor, especialmente por placas paralelas e de cilindros concêntricos.
- Dificuldade de medição do valor do fluxo de calor para duas amostras diferentes, (também não ocorreu em nossos experimentos).
- Haveria erro nas medições com amostras úmidas.

Associado com um controlador programável de temperatura e interfaces de aquisição de dados, o dispositivo foi especialmente desenvolvido para os experimentos deste trabalho e realizou a comprovação da eficiência da blindagem térmica com os Cermets, utilizado como isolante térmico.

O conjunto eletromecânico experimental, é composto por dois cilindros concêntricos com diâmetros diferentes acoplados por duas flanges presas por 4 parafusos prisioneiros e rosca borboleta.

Nessa composição da estrutura mecânica, foi introduzido internamente entre as duas camisas cilíndricas, os materiais analisados.

Internamente nas paredes do tubo cilíndrico de aço inox foi acoplado uma “resistência elétrica térmica”, composta por fios de Kanthal que com a passagem de corrente elétrica, por efeito Joule ficará incandescente, havendo muita dissipação de energia, onde gerou uma fonte de energia dissipativa de calor.

Na figura 20 apresenta o dispositivo eletromecânico desenvolvido no Laboratório NEAS da Uniso, onde o conjunto com o controlador e os sensores de temperaturas possibilitaram as medições para comprovação da blindagem térmica dos ensaios.

Figura 20: Dispositivo Eletromecânico montado no conjunto com termopares, com controlador de temperatura, e fonte dissipativa.



Fonte: Elaboração do próprio autor

O fornecimento de energia para a resistência dissipadora de calor é controlado por um programa que fica armazenado na memória de um dispositivo chamado controlador de temperatura, sendo o escopo de fornecimento de energia controlado por vários sensores e um programa interno desse controlador PID (controle proporcional integral e derivativo), que executa aos comandos de leitura dos sensores, controlando a rampa de subida da temperatura da fonte interna de calor. Assim, há um controle da quantidade de energia dissipada na resistência através da leitura dos patamares de temperaturas na resistência. Todos os ensaios foram comandados pelo mesmo controlador, com o mesmo programa, onde as etapas de elevação de temperatura são temporizadas e garantem as repetições do processo para que as amostras utilizadas estejam padronizadas para a blindagem. Com isso há a garantia que todos patamares do processo serão atingidos e estabilizados em função do tempo, visando a garantia de segurança, do pesquisador, do controle total da energia fornecida ao conjunto, sem danificar os sensores e as camisas cilíndricas do protótipo, e também sem alterar as características do material a serem amostrados.

O controlador de temperatura com controle PID, tem funções de sintonia e parametrizações, disponibilizando uma harmonia no controle dessa energia

fornecida, evitando overshoot e erros muito distante dos setup programados e a segurança no controle de energia aplicada. Com isso tem-se uma sintonia fina e exata para o controle desejado das rampas de temperaturas em questão. Enfim, a programação do controlador é a mesma para todos os ensaios.

O dispositivo contém sete sensores para a coleta de temperaturas (termopar tipo K), cujo processo é comparativo em meio da leitura destes sensores, onde o controlador trabalha em função da programação do sensor de leitura da temperatura da resistência.

Um equipamento de aquisição de sinais, também irá fazer o tratamentos destes sinais elétricos que são transferidos para um software específico (Origin) permitindo a separação e aquisição dos dados, armazenando em planilhas do excell.

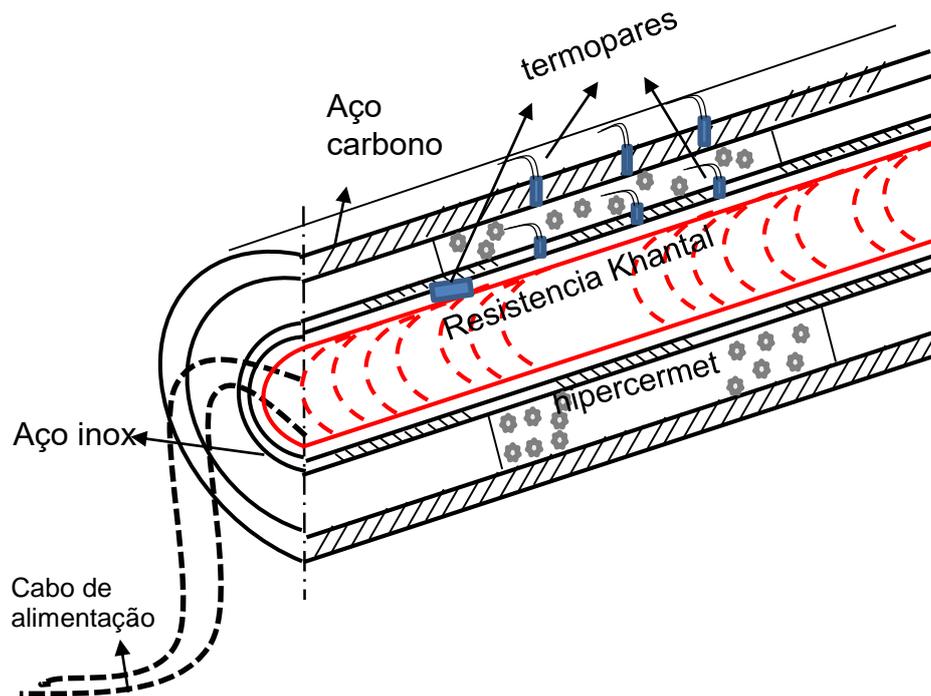
Durante a execução dos testes foram observadas, mal contato dos termopares ou mesmo durante o processo devido a alta temperatura, a abertura física dos termopares deixando de medir um dos 7 canais mas trabalhamos para cada área analisada , a redundância de três termopares.

A estrutura mecânica desse dispositivo é formada por dois cilindros concêntricos em aço inox e em aço carbono, apoiados por duas flanges interligadas por quatro parafusos, com controle da tração Figura 15. A fonte de calor é uma resistência cartucho cilíndrica de 200mm de comprimento e 25mm de diâmetro, feita de liga Ni-Cr (kanthal) com uma resistência de 50Ω , para 220V de tensão nominal, posicionada internamente ao cilindro de aço inox Aisi 316 com 210mm de comprimento e 33,5mm de diâmetro externo e parede de 3,0mm.

O cilindro externo é composto de aço carbono com 190mm de comprimento e diâmetro de 47,67 mm e parede de 3mm. Cada cilindro tem 3 furos colineares de 1,5mm de diâmetro, onde serão alocadas as miçangas cerâmicas isoladoras elétricas para posicionar a junta quente do termopar acoplando os termopares na parede cilíndrica, com distancias de 30mm entre elas localizadas na parte central. Um fato relevante impõe que os dois cilindros tem as mesmas cotas de localização de posicionamentos dos termopares as medidas e procedimento foram executadas nos dois ensaios. Deste modo, certificou-se que os termopares dos dois cilindros estão na mesma área superficial, tanto no cilindro interno como no externo, onde haverá a coleta da emissão de calor. Os termopares utilizados são do tipo K compostos por dois fios (ligas Chromel e alumel) com isolamento em lã de vidro,

com espessura de 0,125mm cada, a figura 21 ilustra os cilindros em corte longitudinal a posição dos termopares a fonte de aquecimento (resistência de khantal).

Figura 21 Dispositivo eletromecânico em corte mostrando os cilindros concêntricos, a localização dos hiper-cermetes, termopares e resistência de aquecimento .



Fonte: Elaboração própria

O controlador programável TH-90 DP 202-000 , gerencia o fluxo de energia dissipada pela resistência, que também controla em conjunto com o relê de estado sólido TH45, todo fluxo de energia, a Figura 22 apresenta o controlador e o rele de estado sólido que controlará o fluxo de energia para a resistência térmica de Khantal. Com a tecnologia PWM esse controlador da Therma emitirá quantidade de energia para a resistência, procurando os set-points definido pelo software programado.

As leituras variáveis no experimento foram realizadas por um termopar do tipo K exclusivo, em contato direto com a resistência de kanthal. O controlador foi programado para ter um ciclo de processo por rampa ficando o aquecimento de 0 a 850°C por rampa, em intervalos de 20 em 20 minutos.

Figura 22 : controlador TH-90 marca Therma e Relê de estado sólido TH-45 modelo2810 marca Therma.



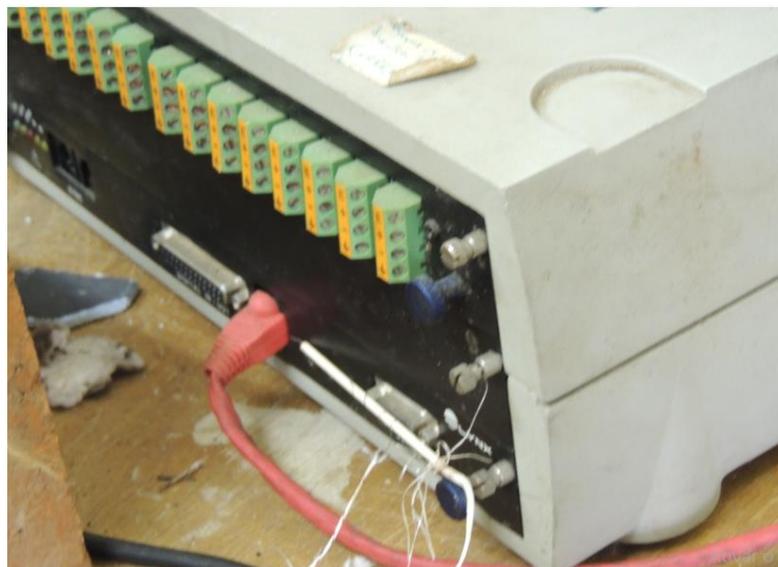
Fonte: Elaboração própria

4.3 Placa de aquisição de dados

O equipamento de aquisição de dados de alta velocidade (placa de aquisição),é um conversor analógico-digital, que contém 8 canais 1Hz de aquisição, o modelo ADS2000 da marca Lynx (figura 21) fará a coleta de dados dos termopares instalados nas duas camisas do protótipo, o software utilizados para essa aquisição é o Aqdados, da própria Lynx.

Na Figura 23 equipamento de aquisição de dados, modelo ADS2000 marca Lynx aquisição de 1Hz.

FIGURA 23 - Equipamento de Aquisição de dados, modelo ADS2000 Lynx



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.4 Difusímetro

Projetado, desenvolvido e construído por Thomaz A G Restivo; 2010 esse equipamento é um instrumento comercial avançado baseado no método flash (ASTM E1461) que permite medir a difusividade e condutividade térmica em materiais sólidos, líquidos e pós, de 10 a 1200°C. A tecnologia foi obtida na França – Institut National Polytechnique de Lorraine, onde, além dos princípios construtivos do aparelho, o método analítico avançado do quadrupolo térmico foi apreendido e implantado. Este instrumento possui um projeto integrado e componentes exclusivos:

Software de aquisição Difusímetro v1.0; aquisição de dados ganho 10000x frequência 2000 Hz; autor Software analítico DifCalc v3.0; determinação de difusividade térmica pelo método do quadrupolo térmico, Parker e momentos temporais.

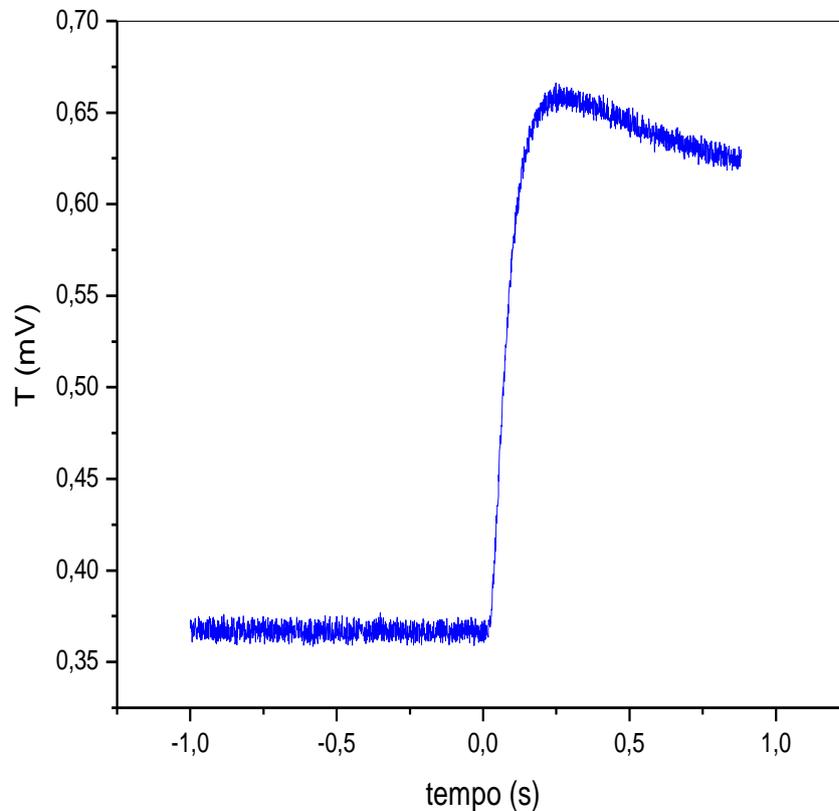
O método do pulso de energia, conhecido como método flash, foi inicialmente concebido por Parker . Consiste basicamente em submeter uma das faces de uma amostra discóide a um pulso de luz de curta duração, que é absorvido. Simultaneamente mede-se a resposta de temperatura em função do tempo na face oposta através de um termopar ou detetor infravermelho. A difusividade térmica pode ser então calculada a partir do termograma resultante, através da relação:

$$a = 1,38 \cdot e^2 / \pi^2 t_{50} \quad [\text{cm}^2/\text{seg}]$$

onde **a** é a difusividade térmica, **e** a espessura da amostra e **t₅₀** é o tempo necessário para que a face oposta atinja 50% da temperatura máxima (100%).

Na figura 24 mostra um exemplo de termograma para o material alumina $e=0,198\text{mm}$; pré-aquisição de 1 s. após aplicado um pulso de 5000J pelo método Park.

Figura 24 Exemplo de termograma obtido no difusivímetro;



Fonte: Elaboração própria

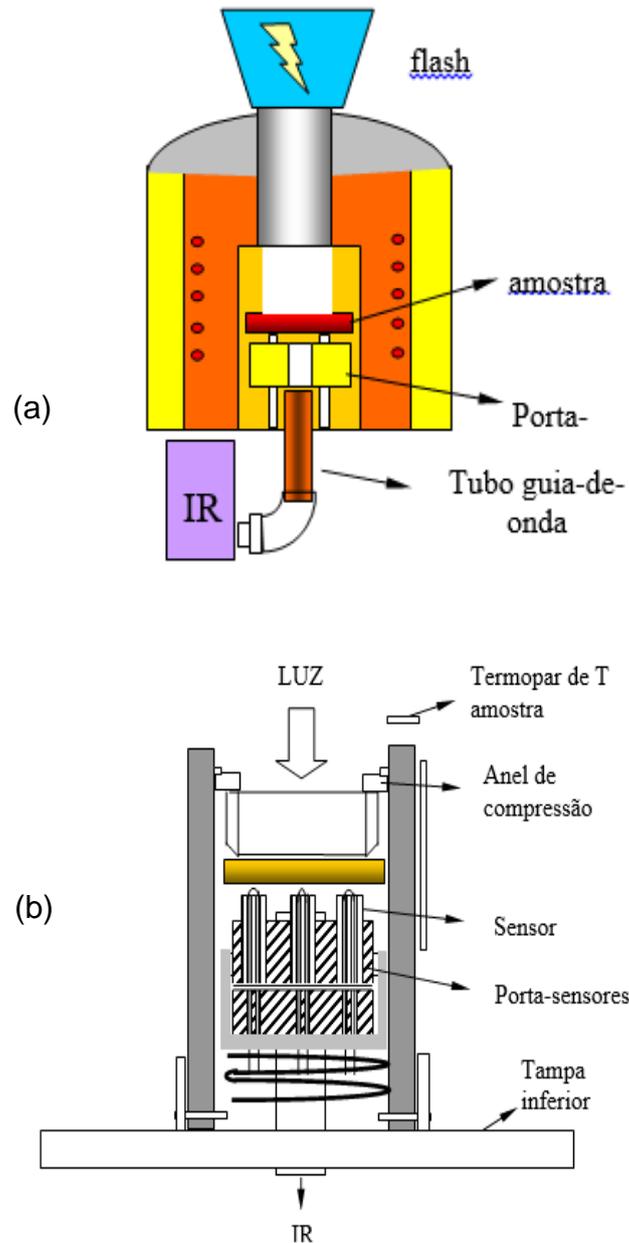
O difusivímetro foi desenvolvido para realizar ensaios confiáveis, com um forno de aquecimento adaptado, com atmosfera controlada ou vácuo, num ambiente a 1200°C. Com a flexibilidade de porta amostras para diâmetros desde 13 até 50mm, na espessuras 1 a 15mm, possui sensor múltiplo termopilha digital e infravermelho, monitorado por uma placa de aquisição de dados com 8 canais.

O seu disparo Flash de 5000 Joules nas amostras, e supervisionado pelo detetor infravermelho HgCdTe com sistema ótico guia-de-onda e filtros.

Diversos subsistemas e componentes: “shutter” para a proteção do flash, sistemas de refrigeração com camisas d’água superior e inferior, banho termocriostático, bomba de vácuo, etc. Todo calculo da difusidade é feito por um software chamado de DifCalc v1.0, foi desenvolvido durante a sua construção, determinando a

difusividade via quadrupolos térmicos. As figuras 25 (a) e (b) mostra o difusímetro seus componentes.

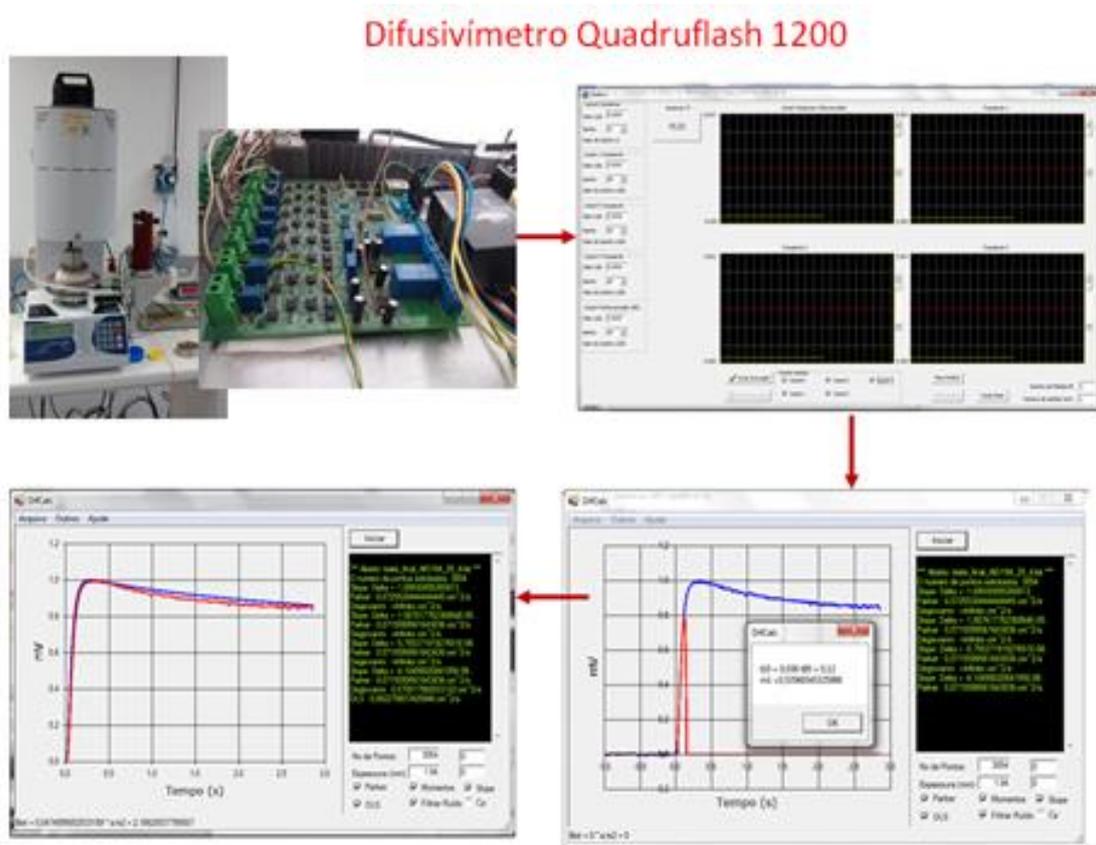
Figura 25 (a) Conjunto difusímetro térmico, (b) Porta amostra e porta sensor



Fonte :Elaboração própria

Na figura 26 mostra o equipamento Difusímetro Quadrufish 1200 completo mostrando a atuação do Dif.Calc. v.1.0

Figura 26 - Difusivímetro Quadrufish 1200 e seus componentes integrados



Fonte: Elaboração própria

4.5 Software ORIGIN tratamento de Sinais

Após a coleta dos sinais dos termopares o sinal é transportado para uma placa de aquisição de dados (8 canais 1Hz de modelo ADS2000 da marca Lynx) que recebe um tratamento com filtros passa-baixa e alta eliminando as interferências, que podem alterar os valores lidos. O sinal já limpo e sem interferências é armazenado em arquivos TXT e será transportado para um planilha em excell. O ORIGIN versão 7.0 é um software dedicado, que tem a finalidade de fazer a interface das tabelas para os gráficos 20 ,21 e 22, onde interpreta através de suas plataformas, relacionando temperatura em função do tempo, na figura 27 apresenta a capa do ORIGIN.

Figura 27 Capa de Apresentação do software ORIGIN



Fonte : ORIGIN (2017)

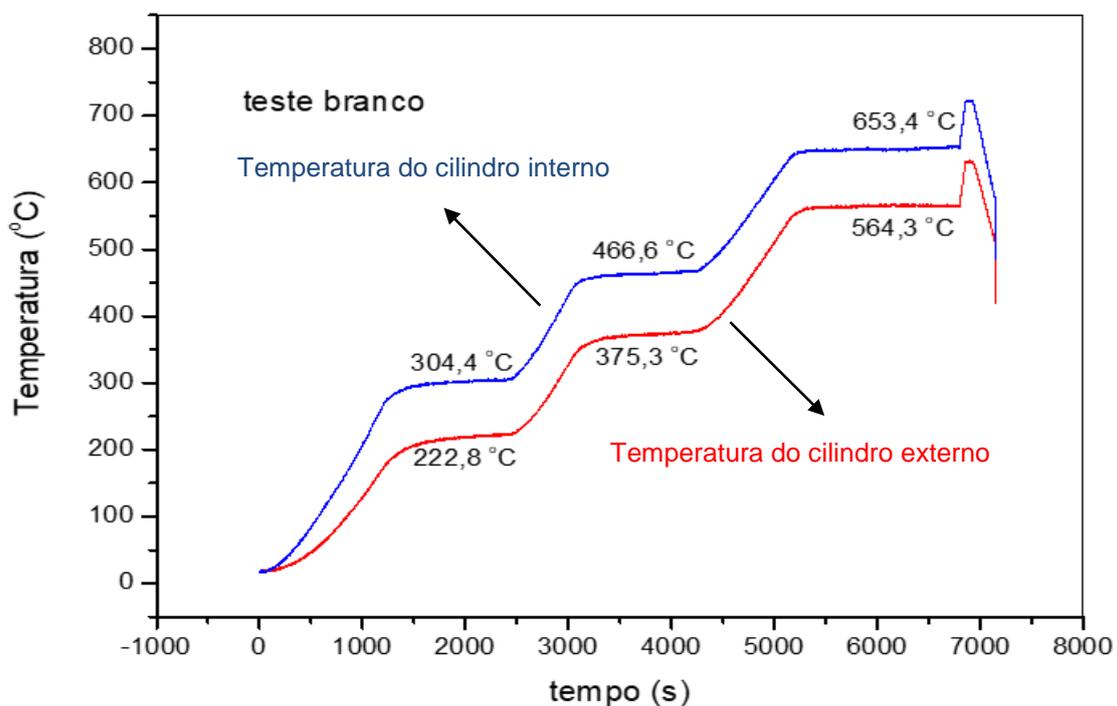
A função desse software Origin é uma interface dos dados de uma planilha em excell , o software fará um tratamento de dados e linearidade, filtros e técnicas de interpolação, com isso permite a possibilidade de formatar gráficos em função do tempo, possibilitando a análise da difusividade e condutividade térmica do material ensaiado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Transferência de calor por condução e radiação

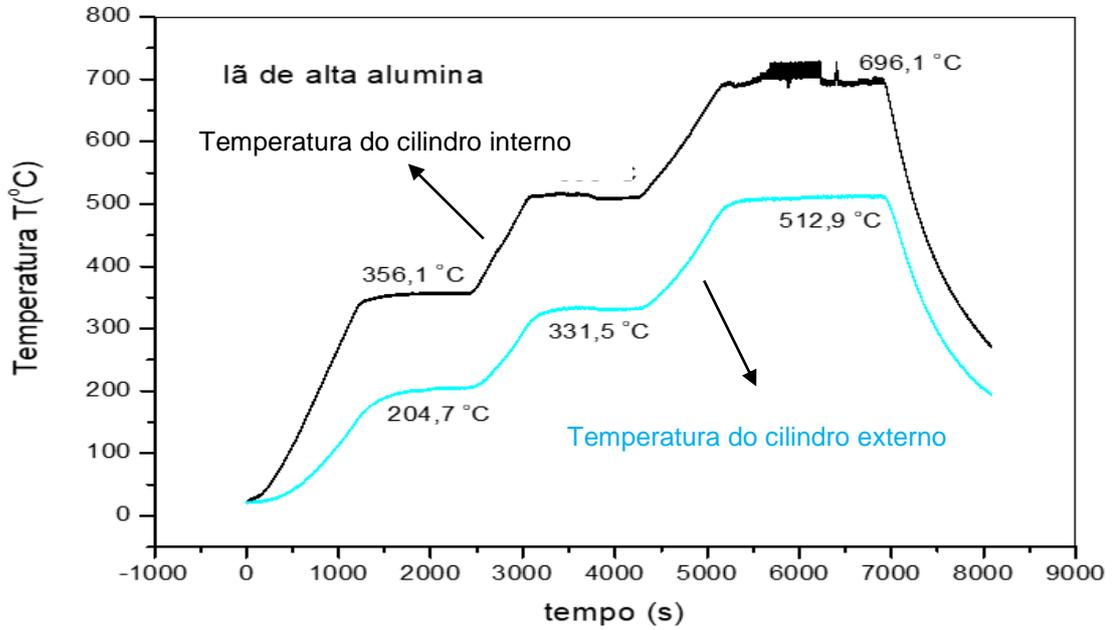
As figuras 28,29 e 30, mostram a sequência das amostras que foram realizados os ensaios, sendo cada qual, composto de 2 curvas de temperatura: a curva de maior temperatura corresponde às medições dos termopares junto ao tubo interno de inox (contato com a resistência fonte de calor) enquanto que a curva com temperaturas menores indica as medições no cilindro externo de aço carbono. A interpretação dos resultados mostram a oposição da condução e Radiação de calor, ou seja quanto maior a temperatura na fonte, mais isolou termicamente. Nas figuras 28, 29 e 30 mostram os resultados que foram submetidos as amostras respectivamente, sem material de blindagem térmica usando apenas o ar como isolante entre as duas camisas (Teste em Branco), o ensaio com uma isolante térmico comercial, e por último com hiper-cermet YTZ -20% Vol. Ni

Figura 28 - Gráfico da temperatura do primeiro experimento sem blindagem ou usando o ar como isolante °C x Seg.



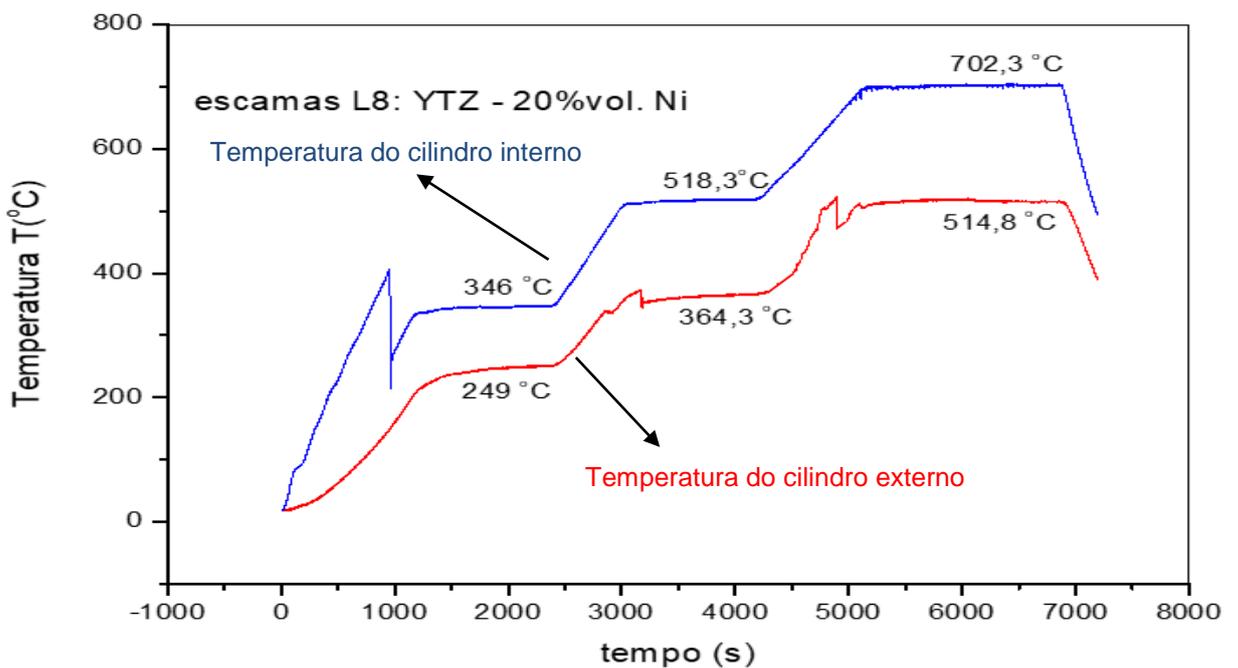
Fonte: Elaboração própria

Figura 29 - Gráfico da temperatura com isolante comercial (manta de lã e alta alumina) °C x Seg.



Fonte: Elaboração própria

Figura 30 - Gráfico da temperatura com blindagem Cermet L8 YTZ- 20%Ni . °C x Seg.



Fonte: Elaboração própria

A tabela1 detalha as temperaturas (T_i) (cilindro aço inox) e externo (T_e) (cilindro aço carbono), e a diferença entre elas, para os três patamares, coletado da figura 24,25,26 acima, com o mesmo critério das escolhas das temperaturas, foram aplicados aos três gráficos, e foram executados várias testes com as amostras de Cermets, sendo que a escolha do YZT escamas L8 foi o escolhido para as análises comparativas e cujo resultado foi o mais isolante.

Tabela 1 - Temperaturas dos cilindros Internos e externos nos 3 testes

	intervalo do processo [S]	Teste em Branco (vazio)			Manta term. Alumina			Cermet YZT20%Ni		
		T_i [°C]	T_e [°C]	$T_i - T_e$ [°C]	T_i [°C]	T_e [°C]	$T_i - T_e$ [°C]	T_i [°C]	T_e [°C]	$T_i - T_e$ [°C]
1º	1000 a 2500	304,40	222,80	81,60	356,10	204,70	151,40	346,00	249,00	97,00
2º	3000 a 4500	466,60	375,30	91,30	508,00	331,50	176,50	518,30	364,30	154,00
3º	5200 a 7000	653,40	564,30	89,10	653,40	512,90	140,50	702,30	514,80	187,50

Fonte: Elaboração própria

Observando o resultado das três amostras e analisando os três intervalos, no ensaio “Teste em branco “ e na manta térmica a temperatura interna atinge no máximo 653,40°C, mas as diferenças de temperaturas nas três amostras no 3º patamar são bastantes consideráveis. No hiper-Cermet a temperatura interna atingiu 702,30 °C confirmando a blindagem térmica, ou seja, o fluxo térmico é refletido de volta para a fonte de calor interna, elevando sua temperatura, enquanto que a diferença de temperatura é aumentada, vale observar que este efeito é mais pronunciado em temperaturas elevadas, onde a transferência de calor por radiação é maior devido a sua dependência com a quarta potência da temperatura (equação 21)

Sendo K a constante de condutibilidade térmica para o aço inox 316 L.

Sabemos que $Q \dot{=} \frac{(T_i - T_e)}{Rt}$, sendo Rt a resistência térmica do sistema.

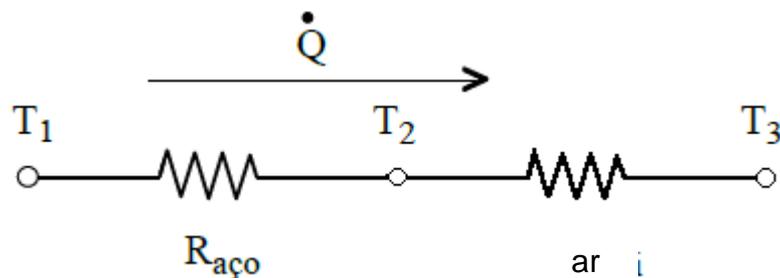
$$Q \dot{=} \frac{(T_i - T_e)}{Raço\ inox + Rar}$$

Para o teste em branco, calcula-se a transferência de calor :

$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{aço}} \cdot L}$$

$$, \quad k_{Ar} = 0,026 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Calculando a resistência térmica do Inox e do Ar temos:



$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi kL}$$

$$r_1 = 13,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_2 = 28,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L_1 = 0,210 \text{ m}$$

$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{28,87}{13,25}\right)}{6,28 \cdot 13,4 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{17,67} = 0,044$$

$$K_{\text{AISI 316}} = 13,4 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

$$R_{\text{ar}} = \frac{\ln\left(\frac{28,87}{13,25}\right)}{6,28 \cdot 0,026 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{0,03428} = 22,71$$

$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{22,75}$$

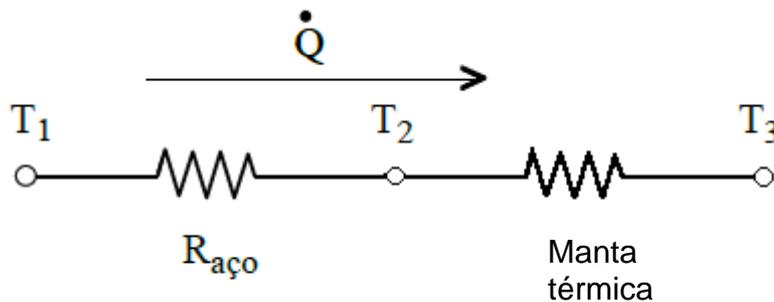
No teste em branco temos as seguintes trocas de calor por condução nas três etapas do processo conforme a Tabela 2, no anexo A comprovamos os cálculos.

Tabela 2 - Cálculo da transferência de calor para o ensaio em branco por transferência de condução.

	intervalo do processo [S]	Teste em Branco (vazio)		
		T _i [°K]	T _e [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	577,40	495,80	3,59
2º	3000 a 4500	739,60	648,30	4,01
3º	5200 a 7000	926,40	837,30	3,92

Fonte: Elaboração própria

Calculo da transferência de calor considerando o ensaio para manta térmica de Alumina:



$$K \text{ manta} = 0,038 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad R \text{ manta} = \frac{\ln \left(\frac{28,87}{13,25} \right)}{6,28 \cdot 0,038 \cdot 0,100} = \frac{0,7787}{0,23864} =$$

3,26

$$R \text{ aço inox} = \frac{\ln \left(\frac{28,87}{13,25} \right)}{6,28 \cdot 13,4 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{17,67} = 0,044$$

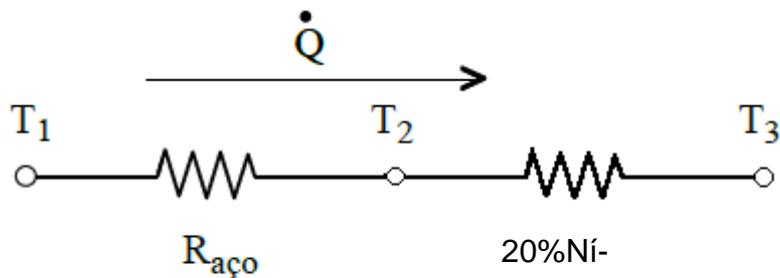
$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{3,304}$$

Tabela 3 - Cálculo da transferência de calor para as três etapas do processo, o ensaio em com a manta isolante de Alta alumina.

	intervalo do processo [S]	Manta term. Alumina		
		Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	629,10	477,70	45,82
2º	3000 a 4500	781,00	604,50	53,42
3º	5200 a 7000	926,40	785,90	42,52

Fonte: Elaboração própria

Calculo utilizando o hiper-Cermet 20%Ní-YTZ



$$K_{20\%Ní-YTZ} = 0,120 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

$$R_{20\%Ní-YTZ} = \frac{\ln\left(\frac{28,87}{13,25}\right)}{6,28 \cdot 0,120 \cdot 0,100} = \frac{0,7787}{0,07536} = 10,33$$

$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{28,87}{13,25}\right)}{6,28 \cdot 13,4 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{17,67} = 0,044$$

$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{10,3744}$$

Tabela 4 - Cálculo da transferência de calor para o ensaio da amostra hiper-cermet YZT20% Ni

	intervalo do processo [S]	Cermet YZT20%Ni		
		T _i [°K]	T _e [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	619,00	522,00	9,35
2º	3000 a 4500	791,30	637,30	14,84
3º	5200 a 7000	975,30	787,80	18,07

Fonte: Elaboração do próprio Autor (2019)

Na tabela 5 mostra o comparativo dos 3 ensaios com suas devidas trocas de calor por condução apenas temos:

Tabela 5 mostra o comparativo dos 3 ensaios

	intervalo do processo [S]	Teste em Branco (vazio)			Manta term. Alumina			Cermet YZT20%Ni		
		T _i [°K]	T _e [°K]	Q [W]	T _i [°K]	T _e [°K]	Q [W]	T _i [°K]	T _e [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	577,40	495,80	3,59	629,10	477,70	45,82	619,00	522,00	9,35
2º	3000 a 4500	739,60	648,30	4,01	781,00	604,50	53,42	791,30	637,30	14,84
3º	5200 a 7000	926,40	837,30	3,92	926,40	785,90	42,52	975,30	787,80	18,07

Fonte: Elaboração própria

Na tabela 6 foi feita a análise da troca de calor por radiação dos mesmo experimentos, sendo convertido as temperaturas em Kelvin, teremos como resultado a tabela:

Tabela 6 Transferência de calor por radiação nas 3 amostras

	intervalo do processo [S]	Teste em Branco (vazio)			Manta term. Alumina			Cermet YZT20%Ni		
		Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]	Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]	Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	577,40	495,80	18,64	629,10	477,70	26,35	619,00	522,00	21,77
2º	3000 a 4500	739,60	648,30	28,93	781,00	604,50	45,54	791,30	637,30	43,90
3º	5200 a 7000	926,40	837,30	46,47	926,40	785,90	62,23	975,30	787,80	85,79

Fonte: Elaboração própria

Para o cálculo, do fluxo de calor por radiação teórico utilizaremos as temperaturas coletadas no dispositivo conforme a tabela 6 temos :

Emissividade do aço inox (tubo cilindrico interno) $\epsilon_1 = 0,24$

Emissividade do aço carbono (tubo cil.externo) $\epsilon_2 = 0,066$

Constante de Boltzman $\sigma = 5,669.10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T_1^4 temperatura no cilindro interno $T_1 (\text{°K}) = T_1 \text{°C} + 273$

T_2^4 temperatura no cilindro externo $T_2 (\text{°K}) = T_2 \text{°C} + 273$

Area externa $A_1 = \Pi.D.L_1 = 3,1415 * 33,5.10^{-3} * 0,10 = 0,010524\text{m}^2$

Area interna $A_2 = \Pi.D.L_2 = 3,1415 * 41,67.10^{-3} * 0,10 = 0,0130906\text{m}^2$

$$Q_{\text{rad}} = \frac{5,669.10^{-8} * 0,010524 * (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{0,24} + \frac{0,010524}{0,0130906} * \left(\frac{1}{0,066} - 1\right)} = 3,8382. 10^{-11} * (T_1^4 - T_2^4)$$

No Anexo A comprovamos os cálculos das tabelas.

5.2 Ensaios de Difusividade e Condutividade Térmica

O pó do compósito cerâmica-metal (Hiper-cermet) foi encaminhado para teste de condutividade térmica no aparato “difusímetro flash” com impulsão de 5000 J de luz xenônio, em porta-amostra especial para pós e líquidos, onde foram medidas as difusividades térmicas e calculadas as condutividades térmicas aparentes do material, a tabela 7 e 8 mostra as condutividades térmicas obtidas.

Tabela 7 condutividade térmica aparente

Temperatura (°C)	Condutividade térmica aparente (W/mK)
25	0.164
300	0.231
500	0.248
700	0.243
800	0.236

Fonte: Elaboração própria

A densidade resultante do material FLAKE com 15 % em massa de Ni é de 1811,5 kg/m³.

As medidas no mesmo material processado na forma de discos sobre placa perfurada resultaram em condutividades térmicas de discos empilhados:

Tabela 8 Condutividade térmica 15%Ni

Temperatura (°C)	Condutividade térmica aparente (W/mK)
25	0,132
300	0,251
500	0,276
700	0,247
800	0,232

Fonte: Elaboração própria

A densidade aparente do empilhamento de discos é de 1039,4 kg/m³.

Uma amostra cujo o teor nominal de Ni em YTZ a 20 % na forma de escamas (FLAKE) empregada no dispositivo cilíndrico foi ensaiada com resultados listados na Tabela 9. As condutividades térmicas medidas são:

Tabela 9 Condutividade térmica 20%Ni

Temperatura (°C)	Condutividade térmica aparente(W/mK)
20	0,186
100	0,179
300	0,266
500	0,189

Fonte: Elaboração própria

Neste caso, a densidade aparente resultante do material FLAKE com 20 % em massa de Ni é 2487,6 kg/m³.

A tabela10 a seguir mostra uma compilação dos principais isolantes térmicos em comparação com os presentes hiper-cermets.

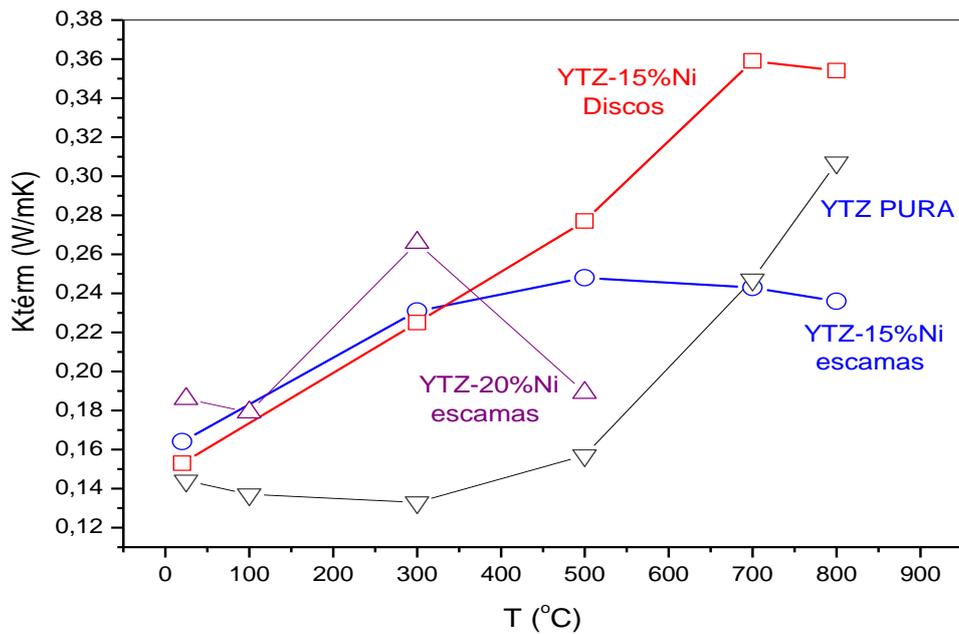
Tabela 10 Principais isolantes Térmicos

Material Isolante	Densidade (Kg/m ³)	K therm (W/m K)	Pontos de Temperat. (°C)
Manta Silico -Aluminosa	128	0,041	25
Hiper-Cermet -Flake 15% Ni *	pó solto	0,0507	25
Hiper-Cermet -Flake 15% Ni **	1611	0,16 - 0,25 - 0,24	25 - 500 - 800
Hiper-Cermet -Flake 20% Ni **	2488	0,19 - 0,27 - 0,19	25 - 300 - 500
Hiper-Cermet -Discos 15% Ni*	empilhado	0,0697	25
Hiper-Cermet -Discos 15% Ni	1040	0,13 - 0,28 - 0,23	25 - 500 - 800
YTZ pura **	1672	0,320 - 0,327	25 - 100
*Cti Condutivimetro ASTM D7984 ; ** difusimetro Flash ASTM E1461			

Fonte: Elaboração própria

Observamos que os hiper-cermets competem com os materiais comerciais, como a lâ de alumina, em altas temperaturas, mesmo com valores de densidade muito superiores. A figura 31, é um gráfico, que mostra os valores obtidos para a condutividade térmica em função da temperatura pelo método flash. Verifica-se uma inversão na tendência de aumento da condutividade em altas temperaturas para os hiper-cermets, indicando que a reflexão de radiação térmica atua na redução do fluxo de calor aparente do material. O hiper-cermet na forma de escamas parece ser mais eficaz na blindagem de radiação térmica.

Figura 31 - comparativo do hiper-cermets com materiais comerciais.



Fonte: Elaboração própria

Os materiais compostos cerâmica-metal contendo cerne denso e envoltório poroso apresentam configuração e funcionalidades inéditas e vantajosas em relação aos materiais e processos de produção dos mesmos encontrados no mercado para a mesma aplicação. Dentre essas vantagens, podem-se citar: o fato de ser um processo simples de custo reduzido, realizado em equipamento e ferramental convencional, sem necessitar de

máquinas industriais complexas e fornos sofisticados; o fato de resultar em um material de fácil obtenção, de alta eficiência térmica, oferecendo maior isolamento térmica de componentes aquecidos, mantendo o calor em seu interior através de múltiplas reflexões de micro-placas metálicas blindantes, enquanto mantém baixa a condutividade térmica através do material; e o fato de resultar em um material protegido da oxidação devido a sua configuração lamelar inédita e especialmente projetada, sem similar no estado da técnica.

O processo de fabricação do Hiper-cermet, tem um custo muito considerável em comparação a outros materiais encontrado comercialmente, e agrega menos energia na sua fabricação, não sobra resíduos que oferece impactos ambientais. A blindagem da radiação térmica associada à condução térmica comprova a mitigação com a alta refletância do metal encapsulado e a baixa condutividade térmica conduzida pela estrutura dos poros, em altas temperaturas.

Com isso o hiper-cermet é um material candidato para atuação em novos produtos de blindagem termica, devido a sua construção e com resultados muito interessante na atenuação dos efeitos da condução e radiação térmica.

6 CONCLUSÃO

Foram feitos vários ensaios com o material hiper-cermet e sempre referenciando o teste em branco utilizando o ar como isolante térmico e um isolante comercial no caso a manta térmica para alta temperatura.

Para altas temperaturas no terceiro ciclo, os ensaios onde foram utilizado o hiper-cermet YZT20%Ni, ficou evidenciado uma blindagem mais eficiente a fonte interna atingiu 975,30°K , contra os 926,40°K, comparando no teste em Branco e da manta térmica, porém num intervalo de tempo inferior.

A dissipação de calor no ambiente, durante o ensaios com os cermets foi bem menor, comprovando a blindagem térmica, gastando menos energia atingindo seu set-point.

Nas outras etapas as temperaturas mais elevadas no cilindro interno, também apresentaram valores superiores com a blindagem Cermet, o Cermet como blindagem obteve 37% mais eficiência que à blindagem da manta térmica de alta alumina que é um isolante de uso comercial e 84,46% em comparação com a blindagem do ar.

O hipercermet obteve essa eficiência, pois blindou o fluxo de calor por condução associado com a blindagem da radiação térmica, atingindo o objetivo proposto.

O hipercermet é um excelente isolante térmico, combinando com outros materiais pode ser muito explorado numa ampla variedade de aplicações.

REFERÊNCIAS

BERGMAN,T.L.;LAVINE,A.S. **Incropera Fundamentos de Transferencia de calor e de massa** Editora LTC 2019 ISBN 8521636598

GUISARD-RESTIVO, T.A.; **Desenvolvimento de instrumento para a medida de difusividade térmica de materiais pelo método flash.** Proceedings of the 47th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society, 15-18/junho/2003 – João Pessoa, Brazil, http://www.protolab.com.br/Medir_difusividade.pdf, (accessed 10 november 2018)

KANG,S. J.L. **Densification, Grain Growth, and microstructure** 2005 ISBN 0750663855

HAUSNER, H.H.: **Sintering New Development**, M.M. Ristic (ed.), Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., p. 3, 1979.

KUCZYNSKI, G.C. **Sintering New Development.** M.M. Ristic (ed.), Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., p. 245, 1979.

LEE, J.; HWANG, J.H.; MASHEK, J.J.; MASON, T.O., MILLER, A.E.; SIEGEL, R.W. *J. Mater. Res.*, 10(9):2295– 2300, 1995.

LONG C.;SAYAMA, N. Ventus Publishing **Heat Transfer : Exercise** ISBN 978-87-7681-433-5

MING Q.; HEALEY, T.; ALLEN, L.; IRVING, P. **Steam reforming of hydrocarbon fuels.** *Catalysis Today* 77 (2002) 51–64.

MIYAKE **International journal of hydrogen energy** :vol:41 fasc:31 pág:13625 - 13631 2016

POIRIER,D.R.;GEIGER,G.H. **Transport Phenomena in Materials Processing.** TMS, warrendale,Pennsylvania, USA, 1994

PRAKASH, L. **Fundamentals and General Applications of Hardmetals.** Comprehensive Hard (2014) vol.1 p.29-90.

Restivo,T.A.G; Becari,R. F.; Padilha,W,R; Durazzo,M; Telles,V.B.; Coleti G.; Yamagata,C.; Silva ,A.C.; Suzuki E.F.Y.; Tenorio,J.A.S.; Castanho,S. R. H.M.;**Micrograded ceramic-metal composite** disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.0187>. Materials, Vol.1, 29–90.

RESTIVO T.A.G.; DURAZZO,M.; MELLO-CASTANHO,S.R.H., MOREIRA, A.C.; GRACIANO S., TELLES V.B.; TENORIO,J.A.S. **Low-temperature densification of ceramics and cermets by the intermediary stage activated sintering method**, J. Therm. Anal. and Calorim., 131 (2018), p.249–258.

ROSOLOWSKI, J.H.; BURKE, J.E. **In Encyclopedia of Chemical Processing and Design**, John J. McKetta (ed.), Chapter of Sintering, New York: Marcel Dekker, Inc., pp. 301–329, 1995.

SIEGEL, R.W.; RAMASAMY, S.; HAHN, H.; ZONGQUAN, L.; TING,L.; GRONSKI, R. J. Mater. Res., 3:1367, 1988.

SIEGEL, R.W.: Mater. Sci. Eng., A 168:189, 1993.

STUJTS, A.L. **Sintering and related phenomena.** Proc. of 3rd Int. Conference, G.C. Kuczynski (ed.), New York: Plenum Press, pp. 331–337, 1973.

SHAIKH S.P.S.;MUCHTAR, A; SOMALU, M.R. **A review on the selection of anode materials for solid-oxide fuel cells.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 51 (2015) 1-8.

UPADHYAYA, G.S. **Science of Sintering**, 27(2):49–70, 1995.

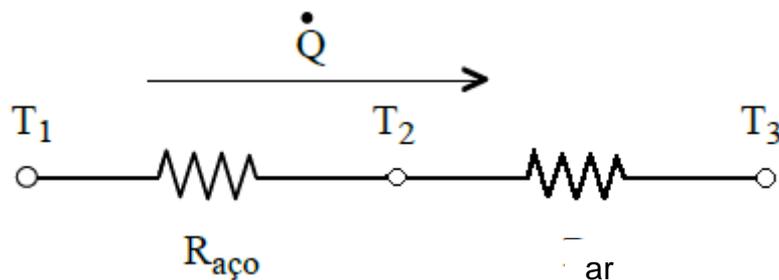
YUKSEL, N. Submitted: September 28th 2015Reviewed: May 9th 2016Published: August 31st 2016 DOI: 10.5772/64157

ANEXO A

Justificando os cálculos do teste em branco, calcula-se a transferência de calor :

$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K_{\text{aço}} \cdot L} \quad , \quad k_{\text{Ar}} = 0,026 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Calculando a resistência térmica do Inox e do Ar temos:



$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi kL}$$

$$r_1 = 13,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_2 = 28,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 0,210 \text{ m}$$

$$R_{\text{aço inox}} = \frac{\ln\left(\frac{28,87}{13,25}\right)}{6,28 \cdot 13,4 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{17,67} = 0,044$$

$$K_{\text{AISI 316}} = 13,4 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

$$R_{\text{ar}} = \frac{\ln\left(\frac{28,87}{13,25}\right)}{6,28 \cdot 0,026 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{0,03428} = 22,71$$

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e)}{22,75} = \frac{(577,4 - 495,8)}{22,75} = 3,59 \quad ,$$

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e)}{22,75} = \frac{(739,6 - 648,3)}{22,75} = 4,01$$

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e)}{22,75} = \frac{(926,4 - 837,30)}{22,75} = 3,92$$

* justificativa dos cálculos da tabela 1

No teste em branco temos as seguintes trocas de calor por condução nas três etapas do processo conforme a tabela 1.

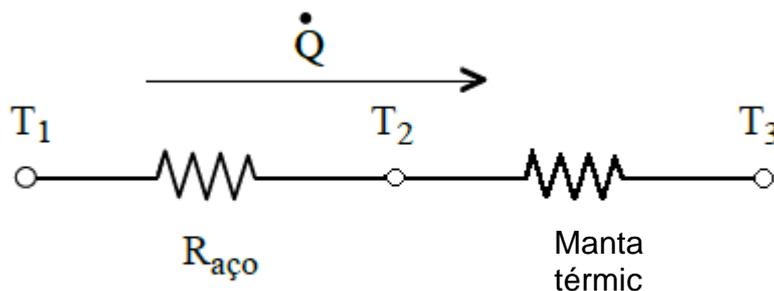
Tabela 1 - Cálculo da transferência de calor para o ensaio em branco por condução.

	intervalo do processo [S]	Teste em Branco (vazio)		
		Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	577,40	495,80	3,59
2º	3000 a 4500	739,60	648,30	4,01
3º	5200 a 7000	926,40	837,30	3,92

Fonte :Elaboração própria

Justificando os cálculos do segundo ensaio utilizando a manta térmica de Alumina, será calculado a transferência de calor Q.

Calculo da transferência de calor considerando o ensaio para manta térmica de Alumina:



$$K \text{ manta} = 0,038 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad R \text{ manta} = \frac{\ln \left(\frac{28,87}{13,25} \right)}{6,28 \cdot 0,038 \cdot 0,100} = \frac{0,7787}{0,23864} = 3,26$$

$$R \text{ aço inox} = \frac{\ln \left(\frac{28,87}{13,25} \right)}{6,28 \cdot 13,4 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{17,67} = 0,044$$

$$R \text{ total} = R \text{ manta} + R \text{ aço inox} = 3,26 + 0,044 = 3,304$$

$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{3,304} = \frac{(629,10 - 477,70)}{3,304} = 45,82$$

$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{3,304} = \frac{(781,00 - 604,50)}{3,304} = 53,42$$

$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{3,304} = \frac{(926,40 - 785,90)}{3,304} = 42,52$$

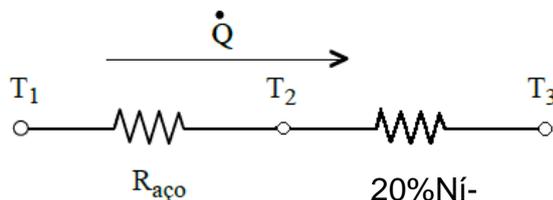
***Justificativa dos resultados da Tabela 2**

tabela 2 - Cálculo da transferência de calor para as três etapas do processo, o ensaio em com a manta isolante de Alta alumina.

	intervalo do processo [S]	Manta term. Alumina		
		Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	629,10	477,70	45,82
2º	3000 a 4500	781,00	604,50	53,42
3º	5200 a 7000	926,40	785,90	42,52

Fonte : Elaboração própria

Justificando os cálculos de Q, utilizando o hiper-Cermet 20%Ni-YTZ como isolante térmico:



$$K \text{ 20\%Ni-YTZ} = 0,120 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad R \text{ 20\%Ni-YTZ} = \frac{\ln \left(\frac{28,87}{13,25} \right)}{6,28 \cdot 0,120 \cdot 0,100} = \frac{0,7787}{0,07536} = 10,33$$

$$R \text{ aço inox} = \frac{\ln \left(\frac{28,87}{13,25} \right)}{6,28 \cdot 13,4 \cdot 0,21} = \frac{0,7787}{17,67} = 0,044$$

$$Q1' = \frac{(T_i - T_e)}{10,3744} = \frac{(619,00 - 522,0)}{10,3744} = 9,35W$$

$$Q2' = \frac{(T_i - T_e)}{10,3744} = \frac{(791,30 - 637,30)}{10,3744} = 14,84W$$

$$Q' = \frac{(975,30 - 787,80)}{10,3744} = 18,07 W$$

*Justificativa dos resultados da tabela 3

Justificando os Cálculo da Transferência de calor por radiação do experimento com a amostra hiper-cermet YZT20% Ni .

Tabela 3 - Cálculo da transferência de calor para o ensaio da amostra hiper-cermet YZT20% Ni .

	intervalo do processo [S]	Cermet YZT20%Ni		
		Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	619,00	522,00	9,35
2º	3000 a 4500	791,30	637,30	14,84
3º	5200 a 7000	975,30	787,80	18,07

Fonte : Elaboração própria

A tabela 4 mostra o comparativo dos 3 ensaios com suas devidas troca de calor por condução temos:

	intervalo do processo [S]	Teste em Branco (vazio)			Manta term. Alumina			Cermet YZT20%Ni		
		Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]	Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]	Ti [°K]	Te [°K]	Q [W]
1º	1000 a 2500	577,40	495,80	3,59	629,10	477,70	45,82	619,00	522,00	9,35
2º	3000 a 4500	739,60	648,30	4,01	781,00	604,50	53,42	791,30	637,30	14,84
3º	5200 a 7000	926,40	837,30	3,92	926,40	785,90	42,52	975,30	787,80	18,07

Fonte: Elaboração própria