UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Avaliação Térmica do Desempenho de Defletores de Calor Automotivos

Autor: Eric Scherer da Silveira

Orientador: Profª.Drª. Lígia Damasceno Ferreira Marczak

Coorientador: Me. Eng.Marcos Martau Poziomyck

Porto Alegre, dezembro de 2011

Sumário

Sumário ii
Agradecimentos iii
Resumo iv
Lista de Figuras v
Lista de Tabelas vi
Lista de Símbolos vii
1 Introdução 1
2 Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica 2
2.1 Condução 2
2.1.1 Condutividade Térmica 2
2.1.2 Perfil de Temperaturas na difusão do Calor 3
2.2 Convecção 4
2.2.1 Fluxo de Calor por Convecção 4
2.2.2 Números Adimensionais 4
2.2.3 Convecção Natural 5
2.3 Radiação 7
2.3.1 Poder Emissivo 7
2.3.2 Corpo Negro e Emissividade 8
2.3.3 Propriedades da Radiação 8
2.3.4 Taxa Líquida de Transferência de Calor por Radiação 9
2.3.5 Fator de Forma 9
2.4 Resistência Térmica 10
2.4.1 Resistências em Série e em Paralelo 10
3 Materiais e Métodos 12
3.1 Amostras 12
3.1.1 Materiais 13
3.1.2 Confecção das Amostras do Tipo Três Camadas 13
3.1.3 Confecção das Amostras do Tipo Uma Camada 16
3.1.4 Confecção das amostras com superfície negra 16
3.2 Equipamento 16
3.3 Ensaio de Resistência Térmica 17
4 Resultados e Discussões 19
4.1 Avaliação das Amostras com Superfície Isenta de Pintura 19
4.2 Avaliação das Amostras com Superfície Negra 22
4.2.1 Avaliação das Amostras Negras em Relação às Amostras Isentas de Pintura 24
5 Estimativa da taxa de transferência de calor 26
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros 30
7 Referências 31

Agradecimentos

Agradeço

Sobretudo, a meus pais, Mirian e Cesar, e a meu irmão, Rafael, pelo grande apoio e incentivo recebidos desde sempre.

À minha namorada, Juliana, pela paciência e companheirismo.

Aos meus avós, por sempre me incentivarem nos estudos.

À Profª. Drª. Lígia, por todas as orientações recebidas durante a realização deste trabalho, e por desempenhar tão bem seu papel como professora.

Ao meu coordenador de estágio, Me. Eng. Marcos, pelo apoio e orientações no desenvolvimento deste trabalho, e pelos constantes ensinamentos.

Aos colegas de faculdade, pelo companheirismo.

Aos colegas da Dana Indústrias LTDA , pelos ensinamentos e espírito de equipe.

Aos professores da UFRGS, pela excelência no ensino.

Resumo

O defletor de calor é um dos componentes do sistema de exaustão de veículos, cuja principal função é diminuir o fluxo de calor entre regiões do motor que atingem elevadas temperaturas e componentes com sensibilidade ao calor.

No presente trabalho foram avaliados dois tipos de amostras com materiais aplicados em defletores de calor. Para tanto foi realizado o ensaio de resistência térmica baseado nas normas FIAT 9.55670 e 50570, que consiste em aplicar as amostras sobre uma região em cujas vizinhanças há uma fonte quente à 600 °C, durante 25 minutos. Para atender ao requisito de temperatura, a região oposta à fonte quente, distante 30mm da amostra, deve permanecer numa temperatura inferior a 85 °C.

O primeiro tipo de amostra avaliada era composto por duas camadas externas de aço aluminizado com espessura de 0,3 mm, e uma camada interna de isolante térmico Protec® com espessura de 0,8 mm. O outro tipo de amostra era composto por uma camada única de aço aluminizado, com espessura de 0,3 mm.

Além disso, o ensaio também foi realizado para os dois tipos de amostras com as superfícies cobertas por tinta preta, com a finalidade de avaliá-las quando há perda da refletibilidade.

Nos quatro casos avaliados, as amostras atenderam ao requisito de temperatura, sendo que a amostra com três camadas permitiu maior redução do fluxo de calor.

A amostra do tipo uma camada em cuja superfície aplicou-se tinta, atingiu em média 60,9 °C nas vizinhanças opostas à fonte quente durante a fase estacionária. Nos outros três casos, foram atingidas temperaturas de aproximadamente 50 °C. Dessa forma, constatou-se que, para superfícies com perda de refletibilidade, as amostras de três camadas possuem melhor eficiência.

Lista de Figuras

Figura 1: Escoamento movido pelo empuxo em placas horizontais: (a) superfície superior de placa fria, (b) superfície inferior de placa fria, (c) superfície superior de placa quente, e (d) superfície inferior de placa quente. Extraída de Incropera (2008) [1]. 6

Figura 2: Fatores de forma para discos paralelos coaxiais. Extraída de Incropera (2008) [1]. 10

Figura 3: Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série. Extraída de Incropera (2008) [1]. 11

Figura 4: Configuração do defletor de calor, mostrando camada superior (A), camada interna (B) e camada inferior (C). 12

Figura 5: Ferramentas de corte da camada inferior (esquerda) e superior (direita). 14

Figura 6: Ferramenta para formação da aba lateral. 14

Figura 7: Camada superior, camada de isolante sobre a camada superior e conjunto pré-fechado. 14

Figura 8: Fechamento das amostras. 15

Figura 9: Fluxograma do processo de confecção das amostras. 15

Figura 10: Equipamento utilizado no ensaio de resistência térmica. 17

Figura 11: Fotografia do equipamento durante a realização do ensaio. 18

Figura 12: Disposição dos termopares no equipamento. 19

Figura 13: Médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo três camadas com superfície isenta de pintura. 20

Figura 14: Médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma camada com superfície isenta de pintura. 21

Figura 15: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma e três camadas com superfície isenta de pintura. 22

Figura 16: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma e três camadas com superfície onde foi aplicada pintura preta. 23

Figura 17: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo três camadas com superfície isenta de pintura e com superfície negra. 24

Figura 18: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma camada com superfície isenta de pintura e com superfície negra. 25

Figura 19: Temperaturas utilizadas nos cálculos. 26

Lista de Tabelas

Tabela 1: Correlações para convecção natural em escoamentos externos e placa horizontal. 7

Tabela 2: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 3 camadas. 20

Tabela 3: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 1 camada. 21

Tabela 4: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 3 camadas com pintura preta. 22

Tabela 5: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 1 camada com pintura preta. 23

Tabela 6: Valores utilizados para o cálculo das resistências condutivas. 27

Tabela 7: Valores pertencentes ao cálculo do coeficiente convectivo na região oposta à fonte quente. 27

Tabela 8: Valores pertencentes ao cálculo do coeficiente convectivo na região próxima à fonte quente. 28

Tabela 9: Valores pertencentes ao cálculo da transferência de calor que considerou a radiação. 29

Lista de Símbolos

q_x	Taxa de transferência de calor [W];
q"	Fluxo de calor [W/m²];
k	Coeficiente de condutividade térmica [W/(m*K)];
A	Área [m²];
T	Temperatura [K];
x	Posição [m];
k_e	Parcela de condutividade devida à translação dos elétrons livres [W/(m*K)];
k_f	Parcela de condutividade devida ao transporte dos fônons [W/(m*K)];
C_p	Calor específico [J/(Kg*K)];
ρ	Densidade [kg/m³];
$\dot{S}$	Taxa volumétrica de geração de calor [W/m³];
t	Tempo [s];
h	Coeficiente de calor por convecção [W/(m²*K)];
Re_x	Número adimensional de Reynolds;
ν	Difusividade de quantidade de movimento [m²/s];
μ	Viscosidade [Pa*s];
u_∞	Velocidade do fluido [m/s];
Pr	Número adimensional de Prandtl;
α	Difusividade térmica [m²/s];
Nu	Número adimensional de Nusselt;
L_c	Comprimento característico [m];
Gr	Número adimensional de Grashof;
β	Coeficiente de expanção térmica [1/K];
g	Aceleração da gravidade [m/s²];
Ra	Número adimensional de Rayleigh;
P	Perímetro [m];
λ	Comprimento de onda [m];
f	Freqüência de propagação da radiação [1/s];
E_n	Poder Emissivo de um Corpo Negro [W/m²];
σ	Constante de Stefan-Boltzman [$\frac{W}{m^2K^4}$];
ε	Emissividade;
α	Absortividade total;
ρ_r	Refletibilidade total;
τ	Transmissividade total;
h_r	Coeficiente de calor por radiação [W/(m²*K)];
F_{ij}	Fração de energia que deixa uma superfície i e atinge a superfície j;
R_{total}	Resistência térmica total [K/W];
$R_{contato}$	Resistência térmica de contato [K/W];
U	Coeficiente global de transferência de calor [W/(m²*K)].

1 Introdução

Com o desenvolvimento dos veículos automotivos, houve a necessidade de compactação dos motores, visando à otimização dos espaços e à redução de peso. A compactação resultou em uma aproximação entre regiões que atingem elevadas temperaturas e componentes poliméricos ou eletrônicos, que se danificam quando expostos ao calor.

O defletor de calor, ou termo-acústico, é um dos componentes do sistema de exaustão de veículos automotores, e sua atuação diminui as trocas térmicas entre o sistema de exaustão, que atinge altas temperaturas (em torno de 600 °C), e componentes sensíveis ao calor nas suas adjacências, como cabos, tubulações, entre outros. Além disso, os defletores também atuam na diminuição dos níveis de ruído nas regiões do motor.

O desenvolvimento deste trabalho surgiu da necessidade de conhecer a capacidade de minimização das trocas térmicas que certas configurações de defletores de calor possuem. Resultados de ensaios de resistência térmica como estes que foram realizados no presente estudo são freqüentemente questionados pelas montadoras nas fases preliminares do projeto de defletores. Algumas empresas exigem este tipo de informação experimental no momento em que escolhem a configuração de material que será utilizada no defletor.

Este trabalho tem por finalidade analisar o desempenho de defletores de calor do tipo três camadas e do tipo uma camada. A configuração do tipo três camadas avaliada é composta por duas camadas externas de aço aluminizado, com espessura de 0,3 mm, e uma camada interna de isolante térmico Protec®. A outra configuração é composta por apenas uma camada de aço aluminizado, na espessura de 0,3 mm.

Além disso, ambas configurações também foram avaliadas quando cobertas por pintura preta, a fim de analisar o desempenho destas com perda na reflexão da radiação térmica incidente. Este tipo de análise é comum quando se pensa no desempenho de defletores de calor após longo tempo de utilização. Neste caso, a superfície fica coberta por impurezas, com perda de refletibilidade.

2 Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica

A lei básica da transferência de calor estabelece que toda vez em que houver diferença de temperatura entre dois pontos, haverá transferência de calor do ponto de maior temperatura ao ponto de menor temperatura. Conforme apresentado por INCROPERA (2008) [1], *"transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço"*.

A finalidade do estudo da transferência de calor está em encontrar os fluxos de calor e as temperaturas envolvidas nos processos. Esse estudo torna-se importante quando se pretende minimizar ou aumentar processos de troca térmica ou controlar temperaturas.

Os mecanismos básicos da transferência de calor são a condução, a convecção e a radiação. Estes três mecanismos serão apresentados sucintamente a seguir.

2.1 Condução

O processo de transferência de calor por condução está ligado às atividades atômicas ou moleculares em um meio. A interação entre as partículas permite que ocorra transferência de calor das partículas mais energéticas para as menos energéticas.

Para quantificar a troca de calor por condução é utilizada a Lei de Fourier. Esta é uma lei fenomenológica e estabelece que a taxa de transferência de calor, expressa em [W], é:

$$q_x = kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde (k) é a condutividade térmica [W/(m*K)], *A* é a área expressa em [m²], *T* é a temperatura em [K] , *x* a posição em [m].

2.1.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade térmica que mede a capacidade de um material de conduzir calor. Em geral, a condutividade térmica dos sólidos é maior que a dos líquidos, que é maior que a dos gases. Os maiores espaços intermoleculares atuam de modo a diminuir a condutividade térmica.

Na maioria dos casos, a taxa de transferência de calor por condução em fluidos é pouco significativa quando comparada com a taxa de calor trocado por convecção. Por isto, neste estudo, apenas a condutividade dos sólidos será abordada.

Condutividade em Sólidos

Nós sólidos, os átomos podem ser ligados em um arranjo periódico chamado de *lattice*, podendo ou não haver a existência de elétrons livres percorrendo o material. Há também aqueles materiais sólidos cuja estrutura é amorfa. Para todos estes, a temperatura influencia o valor da condutividade.

A transferência térmica pode ocorrer através de ondas vibracionais no *lattice* ou migração de elétrons livres. No primeiro caso, as porções de energia transportadas são chamadas de *fônons*.

Em um sólido não condutor elétrico, a transferência de energia térmica ocorre predominantemente através das ondas vibracionais. Nos materiais semi-condutores e condutores, por sua vez, ela também ocorre em função do movimento de translação dos elétrons livres, sendo esta a contribuição predominante. Neste caso, a condutividade térmica é dada por:

$$k = k_e + k_f \qquad \text{Equação 2}$$

Onde k_e é parcela de condutividade devida à translação dos elétrons livres e k_fé a parcela devida ao transporte dos fônons.

Nos metais, k_e>>k_f; porém em ligas o valor de k_f tem valor considerável. Em geral, o calor transportado pelos elétrons é muito maior do que o carregado pelos fônons, justificando o fato de metais puros serem ótimos condutores, enquanto materiais não metálicos e cerâmicos - que não possuem elétrons livres - serem maus condutores.

2.1.2 Perfil de Temperaturas na difusão do Calor

A equação do balanço global de energia num volume de controle diferencial cartesiano $dxdydz$ resulta na seguinte expressão:

$$\frac{\partial}{\partial x}k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}k\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}k\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{S}=\rho C_p\frac{dT}{dt}$$

Equação 3

onde C_p representa o calor específico (em [J/(Kg*K)]) , ρ é a massa específica (em [kg/m³]), $\dot{S}$ é a taxa volumétrica de geração interna de calor (em [W/m³]), t é o tempo (em [s]) e *x*, *y* e *z* são as variáveis espaciais.

No caso de transferência de calor unidimensional na direção *x*, sem geração de energia, em estado estacionário, a equação anterior reduz-se a:

$$\frac{\partial}{\partial x}k\left(\frac{dT}{dx}\right)=0 \qquad \text{Equação 4}$$

2.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre em fluidos que escoam em contato com uma superfície sólida que têm temperaturas diferentes. Este processo é decorrente de dois fenômenos físicos: o movimento molecular aleatório (difusão) e o movimento macroscópico (advecção), onde a energia é carregada devido ao movimento global do fluido.

A convecção pode ser de dois tipos:

- forçada: quando o fluido é forçado a escoar devido a um agente externo, como bombas ou ventiladores;
- natural: quando o fluido escoa em decorrência da variação de sua massa específica, que ocorre pela variação de temperatura.

2.2.1 Fluxo de Calor por Convecção

O fluxo de calor convectivo (q'') é expresso pela Lei de Resfriamento de Newton que estabelece:

$$q'' = h\,(T_s - T_\infty) \qquad \text{Equação 5}$$

onde *h* é o coeficiente de calor por convecção, expresso em [W/(m²*K)]. Este coeficiente depende da velocidade do fluído, do tipo de fluido, do tipo de escoamento e da geometria da superfície em contato com o fluido. Para a convecção natural *h* também depende das temperaturas envolvidas.

2.2.2 Números Adimensionais

O estudo da convecção envolve a utilização de vários números adimensionais, que serão apresentados a seguir.

<u>Número de Reynolds</u>

Representa a razão entre as forças de inércia e as viscosas; para forças viscosas muito maiores que as forças de inércia, tem-se um número de Reynolds pequeno e escoamento laminar. No caso de um número de Reynolds grande, as forças de inércia são suficientes para promover um escoamento turbulento.

Em escoamento sobre placa plana, Reynolds é expresso por:

$$Re_x = \frac{u_\infty \mathrm{x}}{\nu} \qquad \text{Equação 6}$$

sendo ν a difusividade de quantidade de movimento (em [m²/s]) que é a razão entre a viscosidade dinâmica μ (em [Pa.s]) e a massa específica ρ. A velocidade do escoamento livre u_∞é expressa em [m/s] e o comprimento característico é a distância *x* medida a partir da borda de ataque da placa.

Número de Prandtl

O número de Prandtl é a razão entre a difusividade de quantidade de movimento ν e a difusividade térmica α, conforme a equação:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \qquad \text{Equação 7}$$

Número de Nusselt

O número de Nusselt representa a razão entre a contribuição da transferência de calor por convecção e a condução para uma camada de fluido, sendo definido como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \qquad \text{Equação 8}$$

onde L_c é o comprimento característico e *k* é a condutividade térmica do fluido. Na convecção forçada, o número de Nusselt possui dependência funcional com os números de Reynolds e de Prandtl.

2.2.3 Convecção Natural

Na convecção natural, a diferença de temperaturas no fluido ocasiona um gradiente de massa específica, cujo efeito líquido que é a força de empuxo; esta força induz as correntes de convecção natural. No cálculo da convecção natural, o número de Grashof desempenha um papel semelhante ao número de Reynolds para a convecção forçada e representa a razão entre as forças de empuxo e as forças viscosas, sendo expresso por:

$$Gr = \frac{g\beta(T-T_\infty)L^3}{\nu^2} \qquad \text{Equação 9}$$

Onde L é o comprimento característico, expresso em [m], β é o coeficiente de expanção térmica, expresso em [1/K], e g é a aceleração da gravidade, expressa em [m/s²]. As correlações da convecção natural são usualmente expressas em termos do número de Rayleigh definido por:

$$Ra = Gr \times \mathrm{Pr} \qquad \text{Equação 10}$$

As taxas de calor envolvidas na convecção natural são fortemente influenciadas pela geometria e orientação da superfície sólida em relação ao fluido. No presente trabalho, a convecção natural irá ocorrer em placas horizontais, cuja análise será detalhada a seguir.

Para placas horizontais, o padrão de escoamento e o número de Nusselt, dependerão do tipo de situação envolvida, conforme Figura 1.

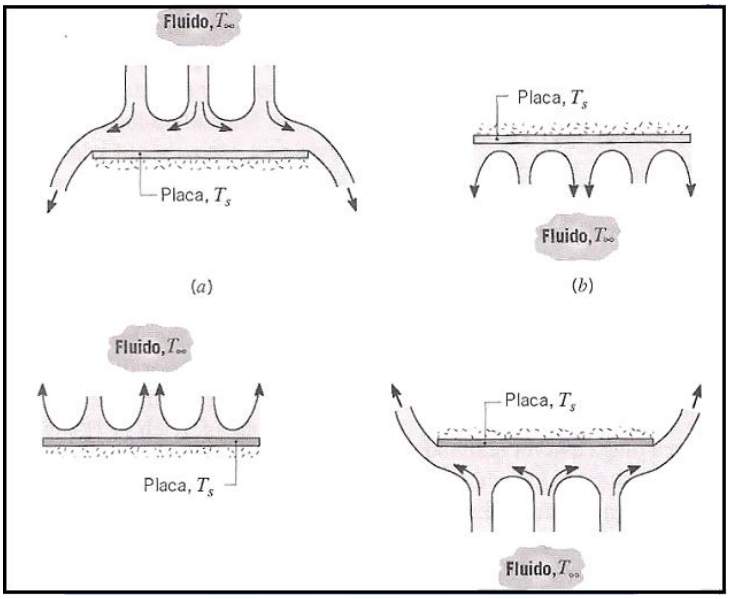

Figura 1: Escoamento movido pelo empuxo em placas horizontais: (a) superfície superior de placa fria, (b) superfície inferior de placa fria, (c) superfície superior de placa quente, e (d) superfície inferior de placa quente. Extraída de Incropera (2008) [1].

As correlações para este tipo de transferência estão mostradas na Tabela 1, e o comprimento característico e dado por:

$$L_C = \frac{A_S}{P} \qquad \text{Equação 11}$$

Sendo A_s a área superficial da placa plana e P o perímetro da placa.

Tabela 1: Correlações para convecção natural em escoamentos externos e placa horizontal.

$\overline{\boldsymbol{Nu_L}} = \mathbf{0,54}\ \boldsymbol{Ra_L}^{\mathbf{1/4}}$	Superfície superior de placa aquecida ou superfície inferior de placa resfriada com: $\mathbf{10^4} \leq \boldsymbol{Ra_L} \leq \mathbf{10^7}$
$\overline{\boldsymbol{Nu_L}} = \mathbf{0,15}\ \boldsymbol{Ra_L}^{\mathbf{1/3}}$	Superfície superior de placa aquecida ou superfície inferior de placa resfriada com: $\mathbf{10^7} \leq \boldsymbol{Ra_L} \leq \mathbf{10^{11}}$
$\overline{\boldsymbol{Nu_L}} = \mathbf{0,27}\ \boldsymbol{Ra_L}^{\mathbf{1/4}}$	Superfície inferior de placa aquecida ou superfície superior de placa resfriada com: $\mathbf{10^5} \leq \boldsymbol{Ra_L} \leq \mathbf{10^{10}}$

2.3 Radiação

Radiação térmica é a energia na forma de ondas eletromagnéticas emitida por um corpo em função de sua temperatura absoluta. A radiação pode ser emitida por sólidos, líquidos ou gases, e não precisa de um meio físico para ocorrer (inclusive ela ocorre mais eficientemente no vácuo).

Considerando-se o espectro eletromagnético, a faixa de comprimento de onda da radiação térmica está compreendida entre 0,1 e 100 µm, englobando, assim, integralmente as faixas infravermelha, visível e uma parte da ultravioleta.

A magnitude e a distribuição no espectro da radiação emitida variam com a temperatura e a natureza da superfície emissora.

2.3.1 Poder Emissivo

A taxa com a qual uma superfície emite a energia térmica da matéria é chamada de Poder Emissivo de um Corpo Negro (E_n), expressa em [W/m²]. Segundo a lei de Stefan-Boltzman, a energia máxima emitida por um corpo é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta:

$$E_n = \sigma {T_s}^4 \qquad \text{Equação 12}$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzman $\left(5{,}67 \times 10^{-8}\ [\frac{W}{m^2K^4}]\right)$ e T_s é a temperatura absoluta, em [K], da superfície. A energia máxima emitida está associada a uma superfície radiante ideal, chamada de corpo negro.

2.3.2 Corpo Negro e Emissividade

Denomina-se corpo negro aquele corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele. Nenhum corpo é capaz de emitir mais energia do que o corpo negro para dada temperatura e comprimento de onda. Além disso, é um emissor difuso, sendo que a radiação emitida por ele independe da direção.

O corpo negro é, na realidade, um absorvedor e emissor ideal. Superfícies reais emitem menos radiação do que ele na mesma temperatura. Para estas, o fluxo térmico é dado por:

$$E = \varepsilon\sigma {T_s}^4 \qquad \text{Equação 13}$$

onde ε é uma propriedade denominada emissividade e fornece a eficiência da emissão em relação ao corpo negro. Seu valor é adimensional, e varia numa faixa de 0 a 1. Esta propriedade tem dependência em relação à natureza do material e às condições de sua superfície, entre elas, a temperatura.

2.3.3 Propriedades da Radiação

Quando a energia radiante atinge uma superfície, parte da radiação é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida. A proporção de energia de cada uma dessas parcelas depende da natureza do material, das condições em que ele se encontra e do comprimento de onda da radiação incidente.

A absortividade total do material α é definida como a fração da radiação incidente que é absorvida por um corpo. Da mesma forma, a refletibilidade total ρ_r é a fração refletida e a transmissividade total τ, a fração da radiação incidente que é transmitida pelo corpo. Logo, tem-se que:

$$\alpha + \rho_r + \tau = 1 \qquad \text{Equação 14}$$

Usualmente considera-se o meio opaco, assumindo a transmissividade igual a zero.

Há dois tipos de reflexão: a especular e a difusa; ocorre radiação especular quando o ângulo da radiação refletida depende do ângulo da radiação incidente. A reflexão difusa ocorre quando a radiação é refletida em várias direções, não dependendo do ângulo em que a radiação incide sobre o corpo.

2.3.4 Taxa Líquida de Transferência de Calor por Radiação

Superfície cinza é a denominação dada àquela onde a absortividade e a emissividade são independentes do comprimento de onda incidente. Para essas superfícies, o fluxo líquido de transferência de calor por radiação entre dois corpos, em [W], é dado por:

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma({T_s}^4 - {T_{viz}}^4) \qquad \text{Equação 15}$$

sendo T_{viz} a temperatura das vizinhanças em relação à superfície envolvida.

Nas situações que envolvem a troca de calor por radiação paralelamente à troca de calor por convecção, é conveniente expressar a taxa líquida de transferência de calor por radiação através da equação:

$$q_{rad} = h_r A(T_s - T_{viz}) \qquad \text{Equação 16}$$

Onde h_r é o coeficiente de calor por radiação, expresso por:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{viz})({T_s}^2 + {T_{viz}}^2) \qquad \text{Equação 17}$$

2.3.5 Fator de Forma

Além da temperatura e das propriedades da radiação, a taxa de energia radiante também depende da forma e da orientação das superfícies envolvidas, definindo-se uma variável chamada de fator de forma.

Considerando duas superfícies A_i e A_j, e assumindo que o meio entre elas é não participante sob o ponto de vista da troca de calor por radiação, tem-se que o fator de forma F_{ij} é a fração de energia que deixa a superfície i e atinge a superfície j. Do mesmo modo, o fator de forma F_{ji} é a fração de energia que deixa a superfície j e atinge a superfície i.

Assim, a taxa de energia que deixa a superfície A_i e atinge a A_j, e a taxa que deixa a superfície A_j e atinge a superfície A_i são expressas, respectivamente, por:

$$q_i = F_{ij} A_i E_{ni} \qquad \text{Equação 18}$$

$$q_j = F_{ji} A_j E_{nj} \qquad \text{Equação 19}$$

Considerado ambas superfícies negras, tem-se que a taxa líquida de energia que deixa a superfície A_i e é absorvida pela superfície A_j é:

$$q_{ij} = F_{ij} A_i E_{ni} - F_{ji} A_j E_{nj} \qquad \text{Equação 20}$$

Existe na literatura uma grande variedade de fatores de forma da radiação para diferentes geometrias. No presente estudo, o fator de forma de interesse será o de dois discos paralelos coaxiais. A Figura 2 mostra os fatores de forma F_{ij} para esta geometria onde L é a distância entre eles, e os raios de cada um são r_i e r_j.

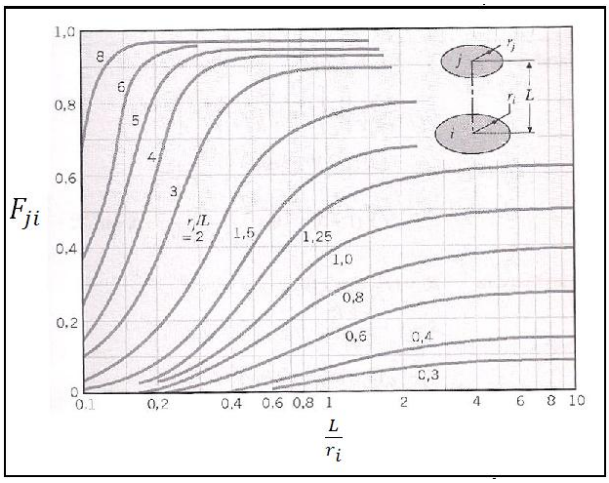

Figura 2: Fatores de forma para discos paralelos coaxiais. Extraída de Incropera (2008) [1].

2.4 Resistência Térmica

A resistência térmica é a razão entre a força motriz – diferença de temperatura - e a correspondente taxa de transferência de calor. Para os diferentes mecanismos de transferência de calor, as resistências térmicas são expressas por:

- condução:

$$R_{t,condução} = \frac{(T_{S1} - T_{S2})}{q_x} = \frac{L}{kA} \qquad \text{Equação 21}$$

- convecção:

$$R_{t,convecção} = \frac{(T_S - T_\infty)}{q} = \frac{1}{hA} \qquad \text{Equação 22}$$

- radiação:

$$R_{t,radiação} = \frac{(T_S - T_{viz})}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \qquad \text{Equação 23}$$

As resistências térmicas são expressas em [K/W].

2.4.1 Resistências em Série e em Paralelo

Em problemas envolvendo a transferência de calor em estado estacionário e sem geração interna de calor, em uma parede composta por diferentes camadas, a taxa de transferência de calor q_x é constante, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3.

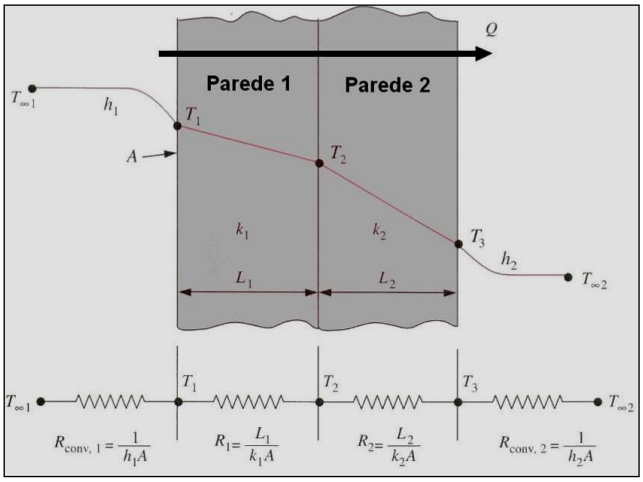

Figura 3: Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série. Extraída de Incropera (2008) [1].

Neste caso, considerando o gradiente global de temperaturas, a taxa de transferência de calor é expressa por:

$$q_x = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{total}} \qquad \text{Equação 24}$$

Sendo a resistência térmica total do sistema. Esta resistência térmica total é a soma das resistências individuais de cada camada para o caso de resistências em série.

Para o caso de se considerar também a troca de calor por radiação, esta resistência estará em paralelo com a resistência térmica à convecção.

3 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram conduzidos ensaios de resistência térmica e realizados cálculos com base nos fundamentos teóricos da condução, convecção e radiação.

3.1 Amostras

As amostras avaliadas possuíam geometria plana e formato circular, de diâmetro igual a 150 mm. Os ensaios de resistência térmica foram conduzidos para amostras nas seguintes configurações:

- Três Camadas;
- Uma Camada;
- Três Camadas com Pintura Preta;
- Uma camada com Pintura preta.

A espessura da amostra do tipo três camadas, de acordo com a Figura 4, foi composta por:

A. camada superior: aço aluminizado DX 53D + AS 120, com espessura de 0,3 mm;

B. camada interna: isolante térmico Protec®, com espessura de 0,8 +/- 0,2mm;

C. camada inferior: aço aluminizado DX 53D + AS 120, com espessura de 0,3 mm;

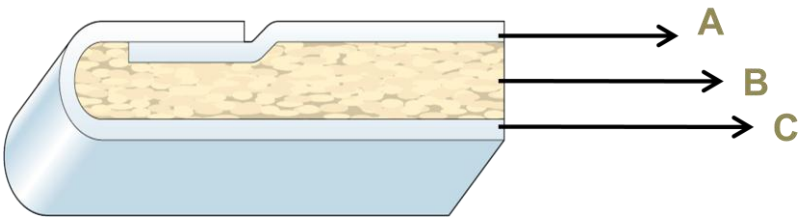

Figura 4: Configuração do defletor de calor, mostrando camada superior (A), camada interna (B) e camada inferior (C).

Por outro lado, a amostra do tipo uma camada foi composta por aço aluminizado DX 53D + AS 120 com espessura de 0,3 mm.

3.1.1 Materiais

Para a configuração avaliada, o material das camadas superior e inferior é um Aço-Carbono de baixa liga cuja superfície é revestida por uma fina camada de Alumínio-Silício (Al-Si). A aplicação desse revestimento é realizada por imersão à quente, processo em que o aço passa por um banho da liga Al-Si fundida. Além da proteção contra oxidação, esse revestimento confere à camada um alto índice de refletibilidade térmica.

A especificação do aço aluminizado é DX 53 D + AS 120, de acordo com a norma DIN EN 10346 [5]. Este material possui 120g/m² da liga de Alumínio-Silício em sua superfície, resultando numa espessura de revestimento de aproximadamente 20 µm. O fornecedor deste aço foi a empresa Arcelor Mittal.

O material da camada interna, segundo POZIOMYCK [2], *é formado por uma fibra mineral denominada Vermiculita, que constitui-se de um Silicato Hidratado de Magnésio Alumínio, Cálcio e Ferro, de estrutura cristalina e lamelar, sem a presença de asbestos.*

Este material é um isolante térmico, com condutividade térmica igual a 0,07 W/mK, conforme INCROPERA (2008) [1]. O fornecedor da fibra mineral utilizada foi a empresa Terramatter.

3.1.2 Confecção das Amostras do Tipo Três Camadas

<u>Corte das Camadas</u>

A primeira etapa da confecção das amostras foi o corte da camada inferior, em formato circular com diâmetro de 150 mm. Para este corte utilizou-se uma prensa hidráulica, além de uma ferramenta composta por um corpo de madeira e uma “faca” de aço, conforme mostrado na Figura 5.

A confecção da camada superior também ocorreu através de prensagem, com uma ferramenta semelhante, porém com diâmetro da “faca” de 160 mm. Esta camada possui maior área, pois sobre ela precisa ser formada uma aba lateral.

A conformação da aba também ocorreu por prensagem, com uso de uma ferramenta de madeira em cuja base havia uma abertura circular com diâmetro de 150 mm (Figura 6). Por fim, o corte da camada de isolante térmico deu-se manualmente.

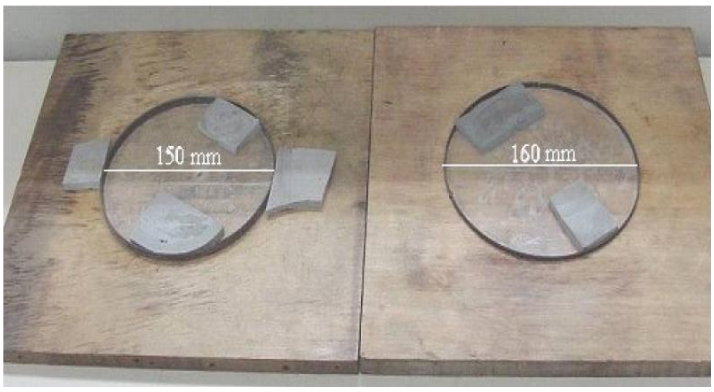

Figura 5: Ferramentas de corte da camada inferior (esquerda) e superior (direita).

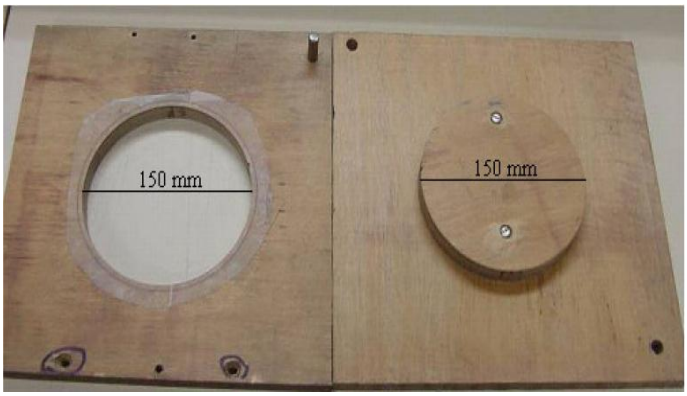

Figura 6: Ferramenta para formação da aba lateral.

Montagem da amostras

Na montagem do conjunto, primeiramente colocou-se a camada de isolante sobre a camada superior de aço. Neste caso, diz-se camada superior, pois esta é posicionada com sua face externa voltada para cima durante o experimento, porém, na montagem, ela permanece como base.

Após isso, colocou-se a outra camada de aço sobre as demais. O pré-fechamento da amostra ocorreu manualmente, martelando-se a aba de modo a fechar o conjunto. A Figura 7 ilustra o conjunto montado até esta etapa. O fechamento deu-se por prensagem, na prensa hidráulica Luxor, código MQ-129, mostrada na Figura 8.

Figura 7: Camada superior, camada de isolante sobre a camada superior e conjunto pré-fechado.

Figura 8: Fechamento das amostras.

A Figura 9 mostra um fluxograma geral do processo de preparação das amostras.

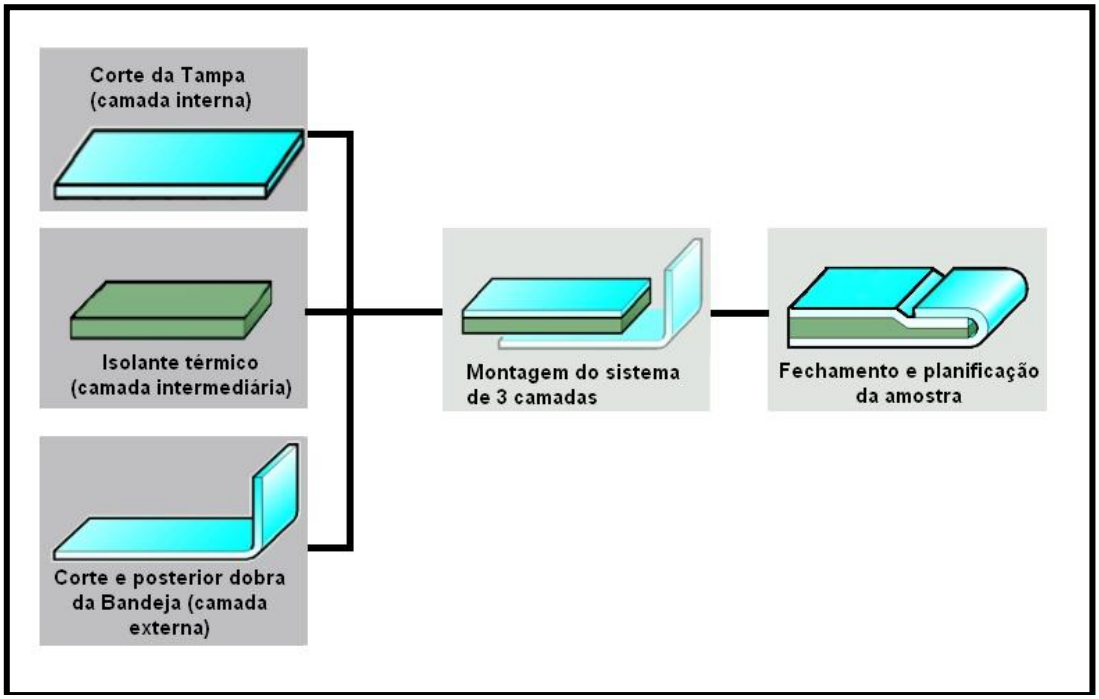

Figura 9: Fluxograma do processo de confecção das amostras.

3.1.3 Confecção das Amostras do Tipo Uma Camada

As amostras do tipo uma camada foram confeccionadas de modo semelhante à camada inferior da configuração com 3 camadas, ou seja, em formato circular com diâmetro de 150 mm. O corte das amostras sobre a lâmina de aço foi realizado sob prensagem com a mesma ferramenta que o caso anterior, conforme Figura 5.

3.1.4 Confecção das amostras com superfície negra

Foram confeccionadas também, tanto para a configuração com três camadas, quanto para a configuração com uma camada, amostras com superfícies pretas. Para tanto, aplicou-se sobre elas, a tinta *Color Jet para altas temperaturas*, de cor preta e marca *Renner*.

Conforme orientado pelo fabricante, a tinta spray foi aplicada à distância de 20 cm da amostra, em demãos finas e cruzadas, com movimentos uniformes. O intervalo entre demãos foi de 10 minutos. A secagem para cada superfície ocorreu durante 24 horas sob ar ambiente.

Foram aplicadas duas demãos tanto na superfície superior quanto na inferior de cada amostra.

3.2 Equipamento

O conjunto de equipamentos utilizados no ensaio de resistência de calor tem a função de manter uma fonte quente a 600 °C e medir as temperaturas em três pontos do sistema. Esse conjunto, mostrado na Figura 10, é formado pelas seguintes peças:

- uma chapa aquecedora (fabricante Irmãos Sanchis);
- três termopares tipo K (fabricante Ecil);
- um cilíndro metálico em aço carbono 1020 (com altura de 150 mm, espessura de 17,6mm e diâmetro interno de 99 mm);
- módulo de aquisição e registro do tipo FieldLogger I/O (fabricante Novus).

Além desses equipamentos, também foi utilizado um computador onde foi rodado o software FiedLogger Novus, cuja função foi registrar as temperaturas medidas.

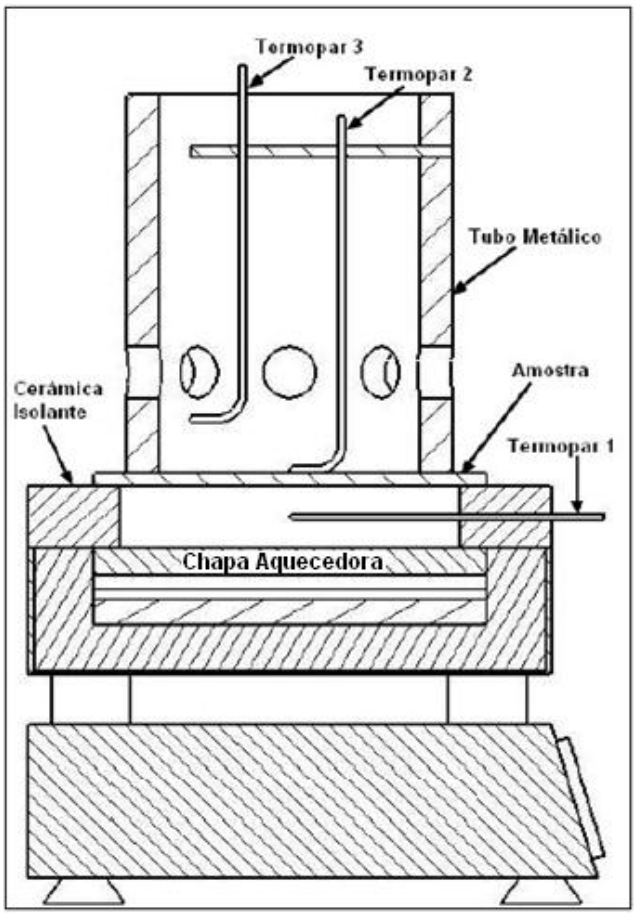

Figura 10: Equipamento utilizado no ensaio de resistência térmica.

É importante observar o posicionamento dos termopares na Figura 10; pode-se observar que o termopar 1 localiza-se entre a fonte quente e a amostra; O termopar 2 fica sobre a camada da amostra oposta à fonte quente, chamada de camada superior e o termopar 3 encontra-se a uma distância de 30 mm dessa camada.

A cavidade cilíndrica, onde se encontra o termopar 1, é delimitada pela chapa aquecedora (base inferior), pelas paredes do equipamento (lateral), e pela amostra (base superior). Essa cavidade tem 100 mm de diâmetro e 25,8 mm de altura. As paredes do equipamento, nessa região, são feitas de material refratário.

3.3 Ensaio de Resistência Térmica

O ensaio de resistência térmica foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o LACER, e no Departamento de Engenharia Química da UFRGS.

A escolha dos locais ocorreu pelo fato de que estes possuem módulos de aquisição e registro de temperaturas FieldLogger I/O, onde foi possível conectar os termopares do tipo K.

O ensaio foi baseado nas normas FIAT 50570 [3] e 9.55670 [4]. Esta última tem como requisito a temperatura máxima de 85 °C na região oposta à fonte quente.

Foram feitas, porém, algumas mudanças de procedimento em relação a estas normas.

O procedimento iniciou quando, após a montagem do conjunto, ajustou-se a temperatura de $600\ °C$ para a chapa aquecedora. Durante esta fase inicial de aquecimento do experimento, as temperaturas já estavam sendo monitoradas pelos termopares e visualizadas no computador. O registro dessas, entretanto, só iniciava no momento em que a temperatura nas vizinhanças da fonte quente atingia o valor de $200\ °C$. Iniciado o registro, prosseguia-se o experimento por vinte e cinco minutos.

Foram realizados quatro ensaios para cada configuração de amostra avaliada. Em cada caso, foram avaliadas duas amostras e para cada uma delas o ensaio foi realizado duas vezes. Ao longo dos ensaios, o programa foi ajustado para registrar as temperaturas a cada 5 segundos. A Figura 11 mostra uma fotografia do equipamento no momento da realização de um ensaio.

Figura 11: Fotografia do equipamento durante a realização do ensaio.

4 Resultados e Discussões

A partir dos ensaios de resistência térmica foram obtidos valores de temperatura em três pontos do sistema ao longo de vinte e cinco minutos. Conforme descrito no Capítulo 3, havia três termopares cujas posições estão mostradas na Figura 13. Neste estudo, as discussões dos resultados terão foco na fase estacionária da transferência de calor.

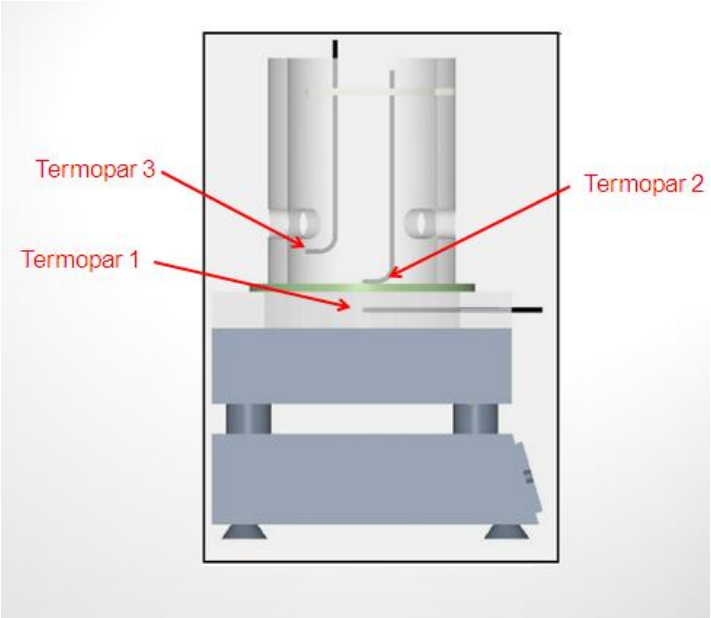

Figura 12: Disposição dos termopares no equipamento.

4.1 Avaliação das Amostras com Superfície Isenta de Pintura

A partir dos ensaios de resistência térmica realizados para amostras do tipo três camadas, fazendo a média das temperaturas obtidas para cada amostra, foram geradas as curvas de temperatura apresentadas na Figura 13. A análise desta figura mostra que após cerca de 500 segundos o estado estacionário é atingido. As temperaturas no estado estacionário estão apresentadas na Tabela 2.

Com base no resultado obtido, observa-se que este tipo de amostra atende ao requisito funcional descrito na Norma *FIAT 9.55670 [4]* que, como mencionado anteriormente, permite uma temperatura máxima de 85°C na região do termopar 3.

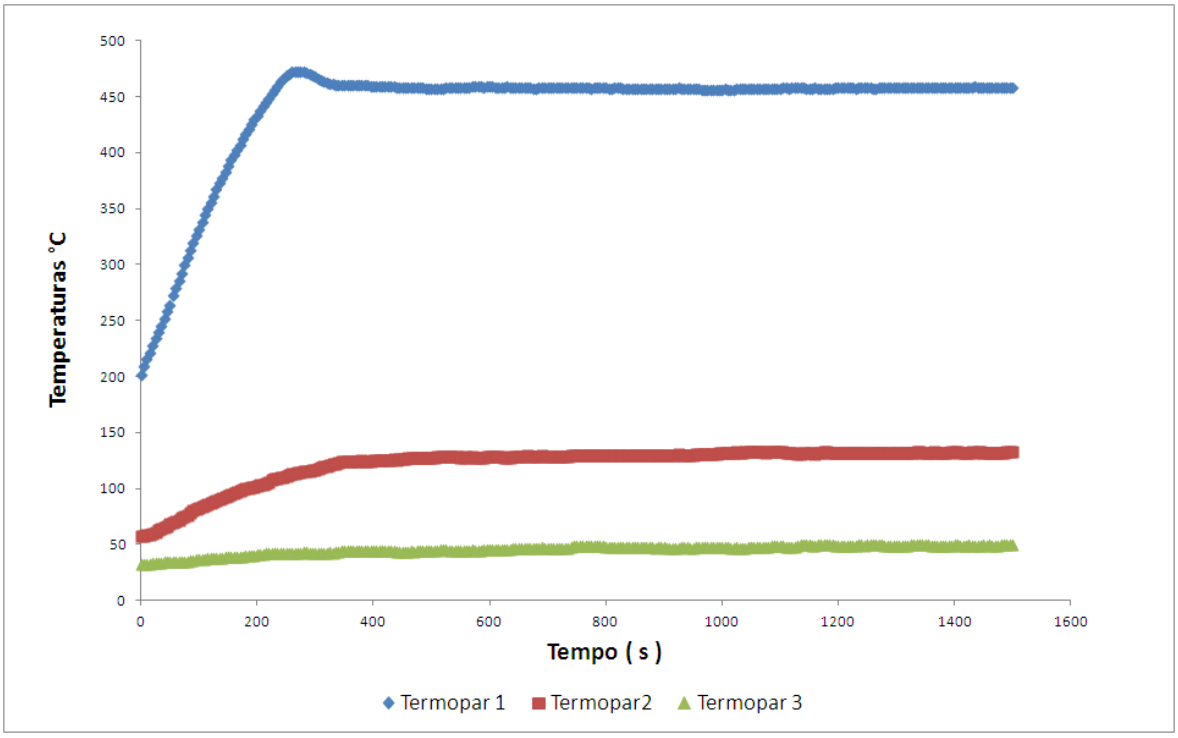

Figura 13: Médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo três camadas com superfície isenta de pintura.

Tabela 2: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 3 camadas.

Termopar	Amostra A				Amostra B				Média Geral	Desvio
	Medida 1 (°C)	Medida 2 (°C)	Média	Desvio Padrão	Medida 1 (°C)	Medida 2 (°C)	Média	Desvio Padrão		
Termopar 1	457,1	453,8	455,5	1,7	462,0	457,4	459,7	2,3	457,6	2,9
Termopar 2	131,3	132,7	132,0	0,7	130,2	132,8	131,5	1,3	131,8	1,1
Termopar 3	47,2	48,0	47,6	0,4	47,9	51,3	49,6	1,7	48,6	1,6

A Figura 14 mostra a evolução das temperaturas para as amostras do tipo uma camada onde se observa que a fase estacionária inicia em cerca de 600 segundos após o início do experimento.

A Tabela 3 apresenta as temperaturas registradas nos termopares para esta amostra; observa-se que este tipo de amostra também se mostrou eficiente na minimização das trocas térmicas, e as temperaturas no termopar 3 ficaram abaixo de 85 °C.

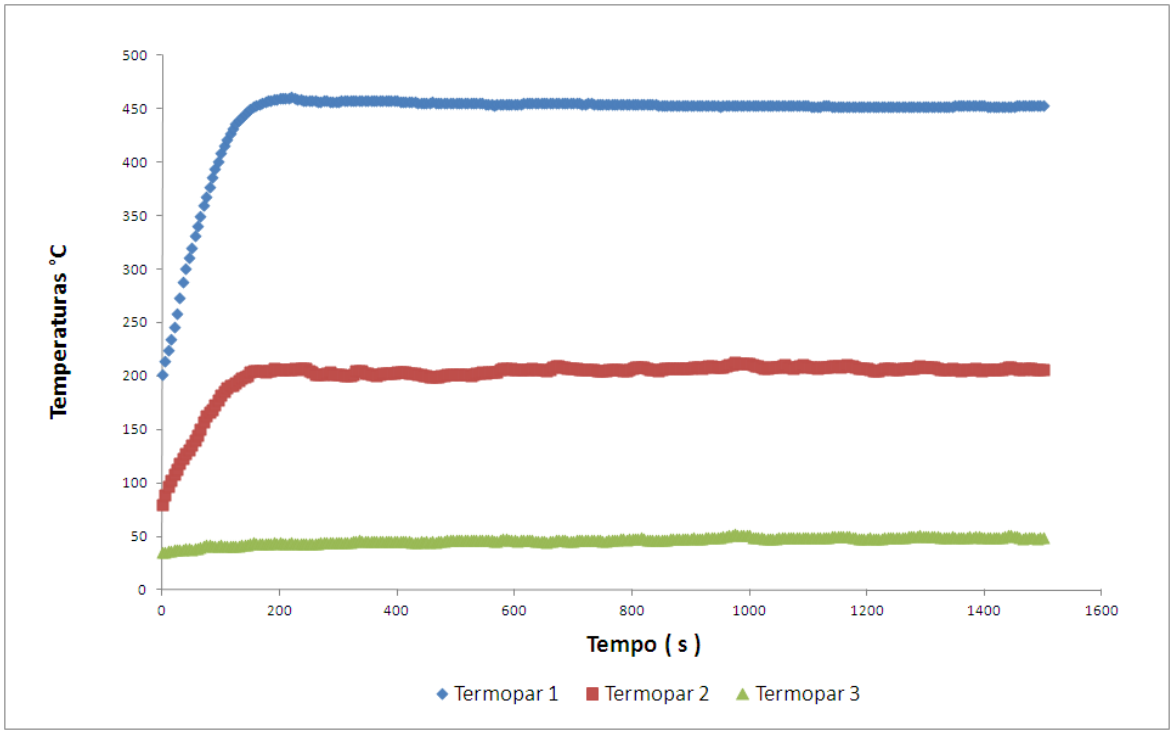

Figura 14: Médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma camada com superfície isenta de pintura.

Tabela 3: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 1 camada.

Termopar	Amostra A				Amostra B				Média Geral	Desvio
	Medida 1 (°C)	Medida 2 (°C)	Média	Desvio Padrão	Medida 1 (°C)	Medida 2 (°C)	Média	Desvio Padrão		
Termopar 1	443,2	452,6	447,9	4,7	461,6	452,3	457,0	4,6	452,4	6,5
Termopar 2	215,8	209,9	212,8	3,0	203,2	202,4	202,8	0,4	207,8	5,5
Termopar 3	48,6	49,3	48,9	0,4	47,9	51,0	49,4	1,5	49,2	1,1

A fim de ilustrar a comparação entre as temperaturas registradas pelos três termopares para os dois tipos de amostras, montou-se o gráfico apresentado na Figura 15. A comparação entre os valores de temperatura registrados pelo Termopar 2 para as duas amostras demonstra que houve um aumento na temperatura para a configuração com uma camada quando comparada à configuração de três camadas; a temperatura no primeiro caso foi próxima a 210 °C e da segunda amostra próxima a 130 °C. Esta diferença de 80 °C decorre da presença da camada de isolante térmico Protec® (Vermiculita), presente nas amostras com três camadas, cuja condutividade térmica é muito baixa (0,07 W/(m*K)).

As temperaturas medidas na região oposta à fonte quente (Termopar 3), assim como na região do Termopar 1, apresentaram pouca diferença entre os dois casos.

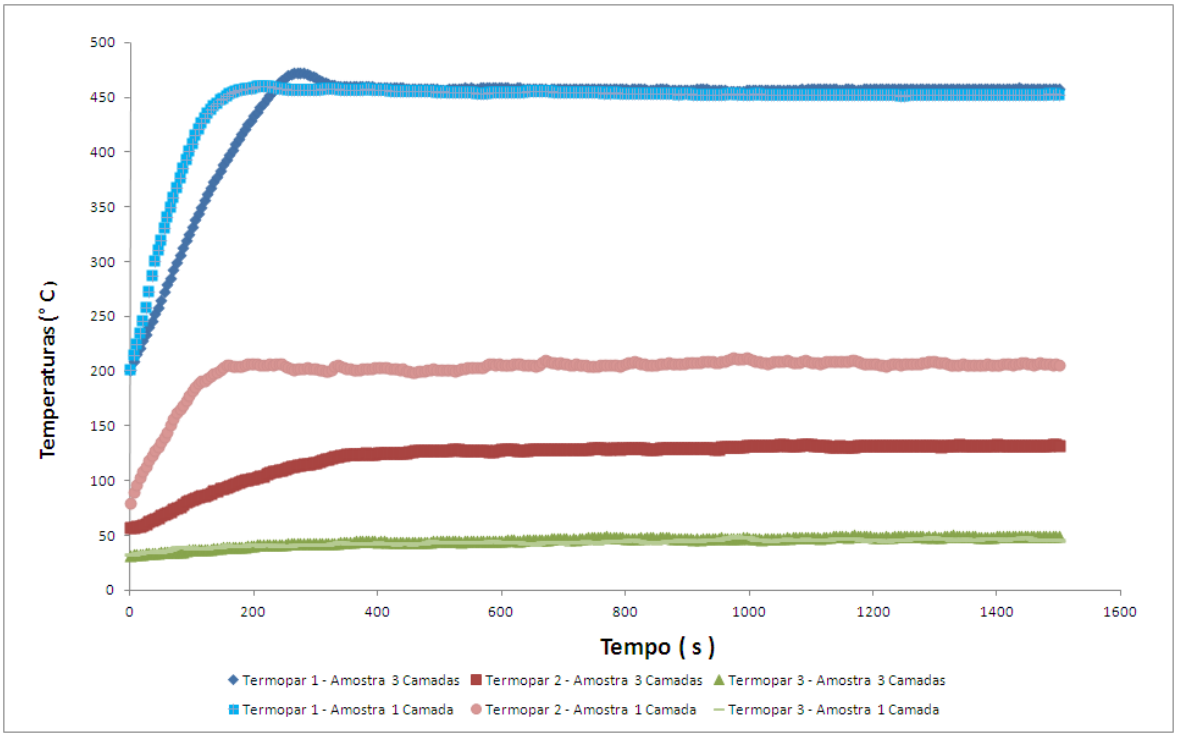

Figura 15: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma e três camadas com superfície isenta de pintura.

4.2 Avaliação das Amostras com Superfície Negra

As temperaturas no estado estacionário obtidas para as amostras dos dois tipos, uma camada e três camadas, com superfície negra são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 4 e 5. As médias gerais das temperaturas para os dois tipos de amostras com pintura preta estão apresentadas na Figura 16.

Tabela 4: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 3 camadas com pintura preta.

Termopar	Amostra A				Amostra B				Média Geral	Desvio
	Medida 1	Medida 2	Média	Desvio Padrão	Medida 1	Medida 2	Média	Desvio Padrão		
Termopar 1	384,5	394,7	389,6	5,1	393,5	400,9	397,2	3,7	393,4	5,9
Termopar 2	149,0	150,8	149,9	0,9	148,2	156,6	152,4	4,2	151,2	3,3
Termopar 3	50,7	52,2	51,4	0,8	51,3	50,2	50,8	0,5	51,1	0,7

Tabela 5: Temperaturas medidas pelos Termopares 1,2 e 3 durante a fase estacionária do ensaio de resistência térmica com amostras do tipo 1 camada com pintura preta.

Termopar	Amostra A				Amostra B				Média Geral	Desvio
	Medida 1	Medida 2	Média	Desvio Padrão	Medida 1	Medida 2	Média	Desvio Padrão		
Termopar 1	389,0	380,3	384,7	4,4	373,7	370,7	372,2	1,5	378,4	7,1
Termopar 2	237,5	238,6	238,1	0,6	236,0	236,0	236,0	0,0	237,0	1,1
Termopar 3	60,4	62,8	61,6	1,2	59,4	60,8	60,1	0,7	60,9	1,3

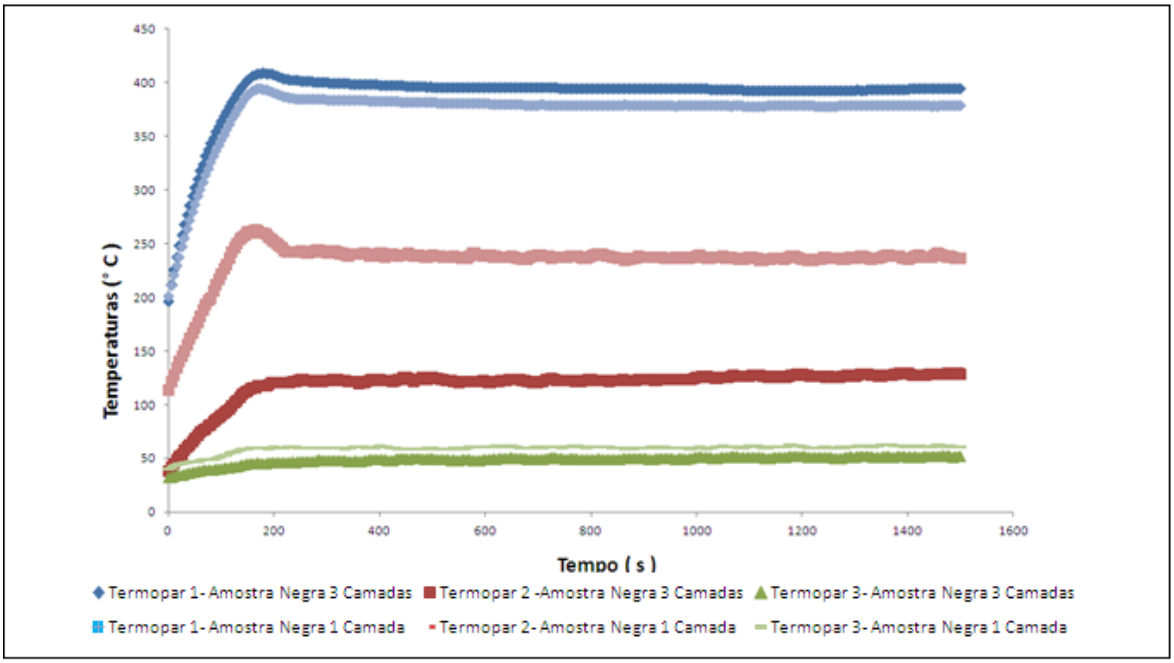

Figura 16: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma e três camadas com superfície onde foi aplicada pintura preta.

A finalidade de testar este tipo de amostra está relacionada à avaliação do desempenho de cada configuração com a perda quase total da refletibilidade térmica. Neste caso, para as duas configurações, a temperatura na região oposta à fonte quente (medida no Termopar 3) ficou abaixo dos 85 °C, ou seja, abaixo do limite especificado pela norma.

A análise desta figura mostra que, de forma semelhante ao que ocorreu para as amostras sem pintura, a maior diferença entre as duas amostras está na temperatura da superfície superior, lida pelo Termopar 2. Para esta temperatura, a configuração com uma única camada apresentou um aumento próximo a 85 °C em relação à amostra com três camadas. As demais temperaturas, termopares 1 e 3, ficaram próximas, com diferenças de aproximadamente 15 e 19 °C, respectivamente.

4.2.1 Avaliação das Amostras Negras em Relação às Amostras Isentas de Pintura

As Figuras 17 e 18 apresentam as temperaturas para as amostras de três e uma camadas, respectivamente, com e sem pintura preta. A perda da refletibilidade ocasionada pela pintura resultou em uma diminuição da temperatura medida pelo Termopar 1, e diferenças menores para os outros dois termopares. A diferença entre as temperaturas lidas no Termopar 2 foi um pouco mais acentuada para a amostra com 1 camada, conforme mostra a Figura 18.

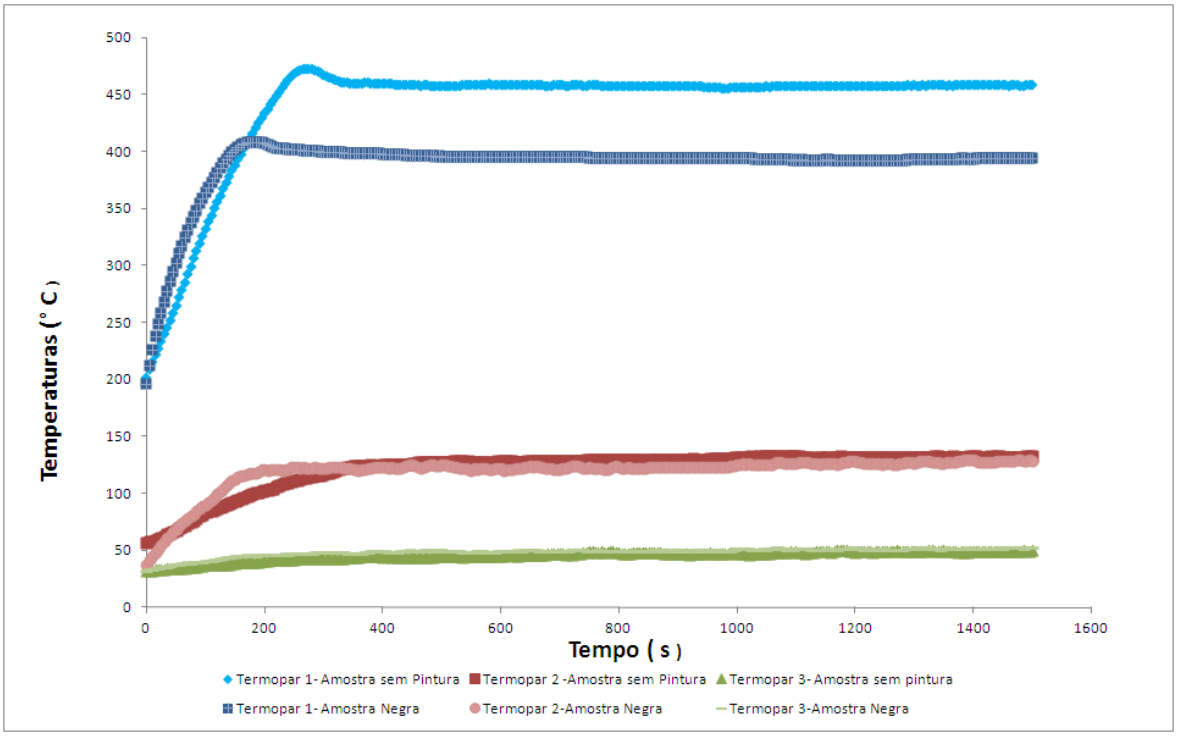

Figura 17: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo três camadas com superfície isenta de pintura e com superfície negra.

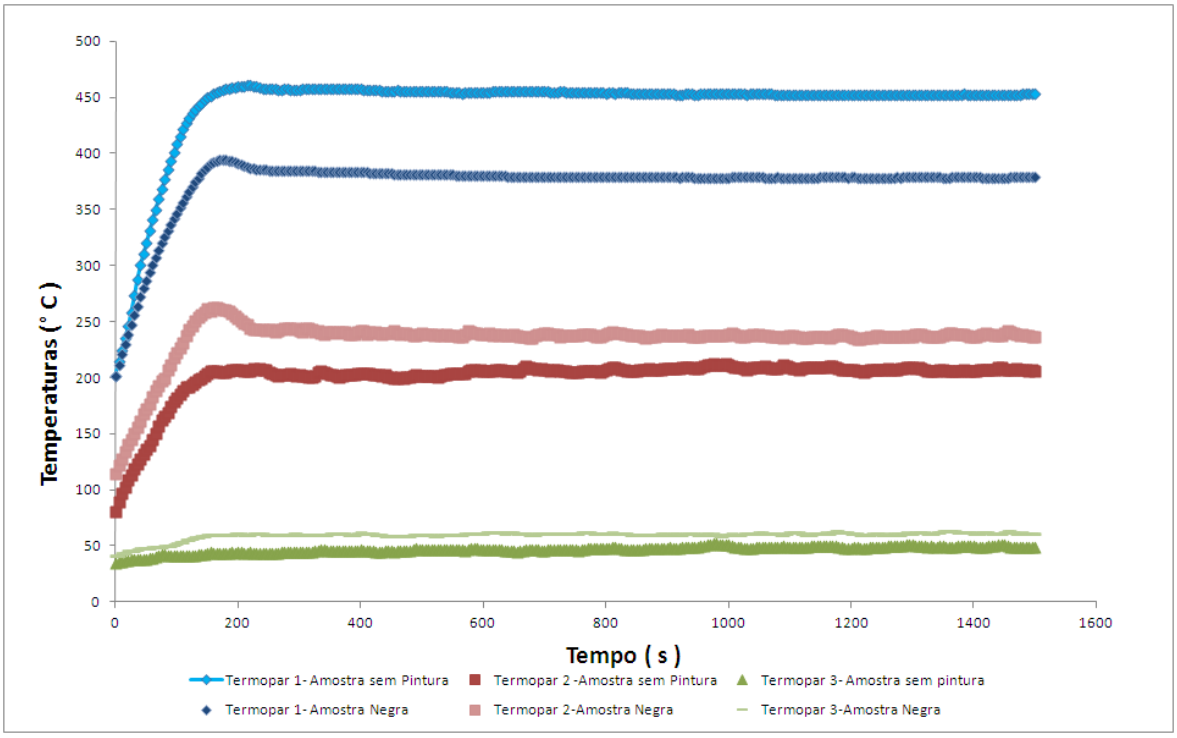

Figura 18: Comparação das médias das temperaturas obtidas ao longo do ensaio de resistência térmica para amostras do tipo uma camada com superfície isenta de pintura e com superfície negra.

Analisando os quatro casos investigados, observa-se que a temperatura no Termopar 3 é próxima a 50 °C para todas as amostras, exceto para a amostra do tipo uma camada com superfície negra. Neste caso, esta temperatura lida é aproximadamente igual a 60 °C, indicando que, para superfícies com perda de refletibilidade, as amostras de três camadas apresentaram melhor eficiência térmica.

5 Estimativa da taxa de transferência de calor

Como um exemplo dos cálculos que podem realizados para se estimar a taxa de transferência de calor, foi considerado o caso da amostra de 3 camadas sem a pintura preta. Os termopares 1, 2 e 3 serão aqui designados, respectivamente, conforme temperaturas $T_{\infty 1}$, T_{s2} e $T_{\infty 2}$, mostradas na Figura 19.

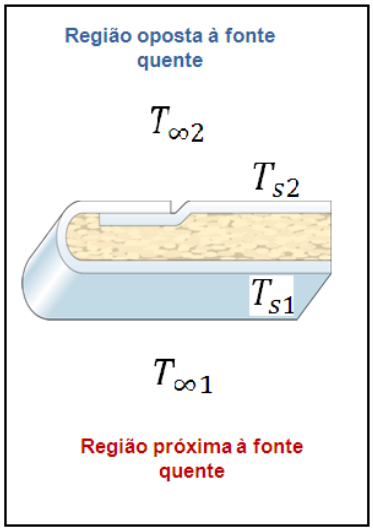

Figura 19: Temperaturas utilizadas nos cálculos.

Primeiramente, a troca de calor foi calculada considerando apenas os mecanismos de convecção e de condução. A equação utilizada para o cálculo da taxa de calor foi:

$$q_x = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{total}} \qquad \text{Equação 25}$$

A expressão da resistência total utilizada foi:

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + 2\frac{L_1}{k_{aço} A} + \frac{L_2}{k_{isol} A} + \frac{1}{h_2 A} \qquad \text{Equação 26}$$

Na Equação 26, a primeira e a última parcelas referem-se, respectivamente, às resistências convectivas na região próxima à fonte quente e na região oposta à esta; a segunda parcela refere-se à resistência à condução nas duas camadas de aço, e a terceira à resistência condutiva na camada de isolante térmico.

Os valores utilizados no cálculo das resistências condutivas estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores utilizados para o cálculo das resistências condutivas.

Parâmetros e Variáveis	Símbolo	Valor
Área da placa (m²)	A	0,00769
Espessura de aço (m)	L_1	0,0003
Espessura de isolante (m)	L_2	0,0008
Condutividade térmica para aço Carbono-Silício (W/(m.K))	$k_{aço}$	49,8
Condutividade térmica para Vermiculita (W/(m.K))	k_{isol}	0,07
Resistência térmica de total de condução (K/W)	R_{tcond}	1,4861

Para o cálculo da resistência convectiva na região oposta à fonte quente, foi necessário estimar o coeficiente convectivo. Uma vez que esta troca é por convecção natural, inicialmente calculou-se o número de Rayleigh (Equação 10), e, a seguir, o número de Nusselt através da correlação apropriada para o caso de superfície superior de placa horizontal aquecida (Tabela 1):

$$\mathrm{Nu} = \frac{hL_c}{K} = 0{,}54\, {Ra_L}^{1/4} \qquad \text{Equação 27}$$

Utilizando uma temperatura média do filme T_f como sendo a média aritmética entre a temperatura do fluido e da superfície, foi possível obter os valores apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Valores pertencentes ao cálculo do coeficiente convectivo na região oposta à fonte quente.

Parâmetros e Variáveis	Símbolo	Valor
Temperatura do filme (K)	T_f	350
Coeficiente de expansão térmica (1/K)	β	0,0029
Aceleração da gravidade (m/s²)	g	9,8
Comprimento Característico (m)	L_c	0,025
Difusividade de quantidade de movimento (m/s^2)	ν	20,92x10^{-6}
Difusividade térmica (m/s^2)	α	29,9x10^{-6}
Condutividade térmica do ar (W/(m.K))	K_f	30x10^{-3}
Número de Rayleigh	Ra	5,63x10^4
Coeficiente Convectivo (W/(m^2.K))	h	10

No cálculo da resistência convectiva na região próxima à fonte quente, também se calculou o coeficiente convectivo através da Equação 27. Foi realizada uma aproximação considerando o caso de superfície inferior de placa horizontal resfriada para escoamentos externos. Os valores utilizados neste cálculo, bem como os valores obtidos estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Valores pertencentes ao cálculo do coeficiente convectivo na região próxima à fonte quente.

Parâmetros e Variáveis	Símbolo	Valor
Temperatura do filme (K)	T_f	550
Coeficiente de expansão térmica (1/K)	β	0,001818
Aceleração da gravidade (m/s²)	g	9,8
Comprimento Característico (m)	L_c	0,025
Difusividade de quantidade de movimento (m/s^2)	ν	45,6x10^{-6}
Difusividade térmica (m/s^2)	α	66,7x10^{-6}
Condutividade térmica do ar (W/(m.K))	K_f	0,0439
Número de Rayleigh	Ra	2,98x10^4
Coeficiente Convectivo (W/(m^2.K))	h	12

Por fim, através da Equação 25, considerando a temperatura $T_{\infty 1}$ igual a 458 °C e a temperatura $T_{\infty 2}$ igual a 49 °C, foi obtido um fluxo de calor de 16,3 W.

Um análise posterior foi feita considerando também a troca de calor pelo mecanismo da radiação. Para tanto, foram calculados os coeficientes de calor por radiação na região próxima à fonte quente e na região oposta, respectivamente por:

$$h_{r1} = \varepsilon\sigma(T_{s1} + T_{\infty 1})({T_{s1}}^2 + {T_{\infty 1}}^2) \qquad \text{Equação 28}$$

$$h_{r2} = \varepsilon\sigma(T_{s2} + T_{\infty 2})({T_{s2}}^2 + {T_{\infty 2}}^2) \qquad \text{Equação 29}$$

A partir disso, foi utilizada a seguinte expressão que leva em conta as resistências convectiva e radiativa em paralelo:

$$q_x = \frac{(T_{\infty 1} - T_{S1})}{\left(\left(\frac{1}{h_1 A}\right) + \left(\frac{1}{h_{r1} A}\right)\right)^{-1}} = \frac{(T_{S1} - T_{S2})}{R_{tcond}} = \frac{(T_{S2} - T_{\infty 2})}{\left(\left(\frac{1}{h_2 A}\right) + \left(\frac{1}{h_{r2} A}\right)\right)^{-1}} \qquad \text{Equação 30}$$

Neste cálculo, foram utilizados os valores dos coeficientes convectivos h_1e h_2, além da resistência térmica à condução na placa R_{tcond} calculados anteriormente. Os demais valores estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Valores pertencentes ao cálculo da transferência de calor que considerou a radiação.

Parâmetros e Variáveis	Símbolo	Valor
Área da placa (m²)	A	0,00769
Emissividade do Alumínio	ε	0,2
Fator de forma para discos coaxiais	F_{ij}	0,09
Constante de Boltzman (W/m^2K^4)	σ	$5{,}67 \times 10^8$

Com base nos últimos cálculos, foi obtido um fluxo de calor de 16,8 W. Os valores próximos para os casos que não considera a radiação e o que considera a radiação se justificam pelo baixo valor de emissividade utilizado para o alumínio (0,2).

Este procedimento de cálculo pode ser feito para todos os demais casos investigados, ou seja, uma única camada (neste caso a resistência térmica à condução teria um outro valor) e para o caso da amostras com pintura negra que modificaria o coeficiente de transferência de calor por radiação.

Como o presente trabalho tem foco experimental, a estimativa da transferência de calor através de cálculos foi realizada apenas com intuito de se trabalhar com os conceitos e equações dos mecanismos de transferência térmica envolvidos no estudo.

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O ensaio de resistência térmica é um instrumento de análise comumente utilizado para avaliação em configurações de defletores termo-acústicos automotivos. O procedimento e o equipamento utilizados neste trabalho basearam-se, respectivamente, nas normas FIAT 9.55670 [4] e 50570 [3].

Através da avaliação das amostras dos tipos três camadas e uma camada, ficou claro que ambas atendem ao requisito de temperatura máxima de 85 °C na região oposta à fonte de calor. Estas configurações apresentaram temperatura de aproximadamente 50 °C para a região.

A configuração de amostra do tipo três camadas apresentou maior eficiência térmica, permitindo a passagem de um fluxo de calor menor. Este fato pôde ser melhor observado comparando-se as temperaturas medidas na superfície das amostras oposta à fonte de calor. As amostras com três camadas apresentaram menor valor de temperatura para este ponto.

A aplicação de tinta preta sobre as amostras teve como finalidade estudar o desempenho destas quando há perda de refletibilidade. Este é um caso extremo, que não ocorre em defletores de calor na prática. Porém, é muito utilizado para avaliar a perda de resistência térmica quando se estuda defletores impregnados por sujidade após longo período de utilização.

As amostras com tinta sobre a superfície também atenderam aos requisitos de temperatura na região externa. Porém, enquanto a temperatura na configuração de três camadas ficou muito próxima à obtida com as amostras sem pintura (~50°C), a amostra com uma camada apresentou temperatura em torno de 10 °C superior. Este fato evidencia um desempenho ainda melhor da configuração com três camadas para casos em que a reflexão de calor na superfície é comprometida.

Embora as amostras com três camadas tenham mostrado eficiência um pouco melhor, como as temperaturas lidas no termopar 2 ficaram próximas para os casos avaliados, pode-se indicar a utilização da configuração com uma camada. Neste caso, utiliza-se menor quantidade de matéria-prima para produção do defletor.

Entretanto, se os componentes sensíveis ao calor estiverem em contato com o defletor, ou se houver comportamento vibracional indesejado na utilização do defletor com uma camada, a configuração com três camadas deve ser indicada.

Para casos onde os componentes termicamente sensíveis estiverem à distâncias menores do que 3 cm do defletor, deve-se realizar o ensaio de resistência térmica com o termopar 2 colocado na distância em que se quer avaliar.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar a avaliação de amostras feitas de Alumínio com acabamento gofrado (superfície com protuberâncias) muito utilizado em defletores de calor do escapamento automotivo (*underbody shields*).

7 Referências

[1] INCROPERA, DeWitt, Bergnan, Lavine; *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 6ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

[2] POZIOMYCK, Marcos Martau; *Análise Comparativa entre Diferentes Formas Construtivas e Materiais Utilizados em Defletores de Calor Empregados em Veículos Automotivos.* Porto Alegre: UFRGS, 2009.

[3] FIAT Auto Normazione. *Material Standard 50570: Heat Resistance and Thermal Insulation Properties of Heat Shields Materials***.** January, 1993.

[4] FIAT Auto Normazione. *Specification 9.55670: Heat Shields for Underbody and Engine Compartment Applications.* Fabruary, 1993.

[5] Norma DIN EN 10327: Continuously hot-dip coated strip and sheet of low carbon steels for cold forming : Technical delivery conditions. German Institute for Standardization, Setembro de 2004.