

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais

PPGEM

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES FORMAS
CONSTRUTIVAS E MATERIAIS UTILIZADOS EM DEFLETORES DE
CALOR EMPREGADOS EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS**

Marcos Martau Poziomyck

Dissertação para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Porto Alegre – RS

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais

PPGEM

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES FORMAS
CONSTRUTIVAS E MATERIAIS UTILIZADOS EM DEFLETORES DE
CALOR EMPREGADOS EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS**

Marcos Martau Poziomyck

Engenheiro de Materiais

Trabalho desenvolvido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Porto Alegre – RS

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Ciência e Tecnologia de Materiais e aprovada em sua forma final, pelos orientadores e pela banca examinadora do curso de pós-graduação.

Orientador: Prof. Dr. -Ing Carlos Pérez Bergmann

Co-Orientadora: Prof^a Dr^a Célia de Fraga Malfatti

Banca Examinadora:

Prof^a Dr^a. Vânia Caldas de Souza

Prof^o Dr. Hugo Marcelo Veit

Prof^a Dr^a. Ester Schmidt Rieder

Prof. Dr.-Ing. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Dedico essa dissertação a minha esposa...

...Aline...

...aos meus pais...

...Mary Helena e Albert...

...e ao meu irmão...

Arthur.

AGRADECIMENTOS

Nesta longa jornada de estudos, muitas pessoas fizeram parte deste projeto. Sem a colaboração delas, o desenvolvimento deste trabalho não seria possível. Desta forma, gostaria de agradecer aqueles que fizeram parte desta caminhada.

Começo agradecendo a minha esposa Aline, que muito contribuiu com amor, carinho, afeto e companheirismo. Obrigada por estar ao meu lado durante esta longa jornada.

Aos meus pais, Mary e Albert, responsáveis pela minha criação, educação e cultura, indispensáveis para que este objetivo fosse alcançado.

Ao meu irmão Arthur que sempre esteve torcendo por mim.

A minha Avó Ida, um exemplo de vida e superação.

Aos meus sogros Lucia e Moacyr Kirjner, pelo carinho, afeto e “torcida”.

Aos meus familiares, em especial a Luiz Guilherme Poziomczyk (“Tio Lú”) – *in memorian*, que em vida sempre foi um exemplo de alegria, bom humor e perseverança.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann pela atenção, incentivo e dedicação. Obrigado por acreditar neste trabalho.

À minha Co-Orientadora Prof. Dr^a. Célia de Fraga Malfatti, pela amizade e orientação durante toda minha vida acadêmica. Agradeço por ter despertado, ainda na iniciação científica, meus interesses pelo mestrado.

Ao colega e amigo Alexandros Evangelu Aravanis (“Grego”) pelo constante incentivo durante toda a realização deste trabalho.

Ao colega e amigo Tiago Veiga Borges (“TVB”) pelo companheirismo e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao colega e amigo Dimitrius Caloghero Pereira (“Dimi”) pelas inúmeras discussões sobre os Materiais e o Calor.

À Gerente da Engenharia de Produto Roseane Campos, que incentivou e tornou este estudo viável.

Aos colegas da Dana Indústrias LTDA, em especial aos colegas da Engenharia de Produto, pelo apoio, colaboração e amizade demonstradas.

À Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e aos engenheiros Everton Pequeno e Nicodemos Coni, que contribuíram ativamente na realização deste estudo e desta dissertação.

À Novelis e à Engenheira Barbara Nivoloni, que contribuíram ativamente na realização deste trabalho.

Aos colegas do LACER-UFRGS, especialmente ao amigo Antônio Takimi, pela intensa colaboração e ajuda na realização deste estudo.

Aos colegas e professores do PPGEM e da Engenharia de Materiais, pelo apoio, colaboração e amizade demonstrados.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela possibilidade de pesquisa e desenvolvimento.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração e realização deste trabalho, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO DE PESQUISA.....	4
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1	DEFLETORES DE CALOR.....	5
4.2	AÇOS REVESTIDOS POR IMERSÃO CONTÍNUA A QUENTE	7
4.2.1	<i>Aço revestido com alumínio - silício (Al-Si).....</i>	<i>8</i>
4.2.2	<i>Aço revestido com alumínio - zinco (Zn-55Al).....</i>	<i>12</i>
4.3	ALUMÍNIO.....	15
4.4	TRANSMISSÃO DE CALOR	17
4.4.1	<i>Condução.....</i>	<i>18</i>
4.4.1.1	Conductividade Térmica	19
4.4.1.2	Mecanismos de Condução do Calor	20
4.4.1.3	Isolantes Térmicos.....	21
4.4.2	<i>Condução unidimensional em regime estacionário</i>	<i>22</i>
4.4.2.1	Parede Plana	22
4.4.2.2	Resistência Térmica.....	23
4.4.2.3	Paredes Planas Compostas.....	24
4.4.3	<i>Radiação.....</i>	<i>25</i>
4.4.3.1	Corpo Negro (Blackbody)	26
4.4.3.2	Emissividade.....	27
4.4.3.3	Irradiação	28
4.4.3.4	Refletividade.....	28
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	30

5.1	MATERIAIS	30
5.1.1	<i>Aço revestido com Al-Si</i>	30
5.1.2	<i>Aço revestido com Zn-55Al</i>	31
5.1.3	<i>Alumínio</i>	32
5.1.4	<i>Isolante térmico Protec[®]</i>	32
5.1.5	<i>Isolante térmico Fiberfrax[®] 970</i>	33
5.2	PREPARAÇÃO E MONTAGEM DOS SISTEMAS	35
5.2.1	<i>Preparação e confecção das amostras – Ensaio de resistência ao calor</i> ..	35
5.2.2	<i>Preparação e confecção das amostras simulando corpos negros</i>	37
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS ESTUDADOS	38
5.3.1	<i>Ensaio de resistência ao calor</i>	38
5.3.2	<i>Análise da secção transversal e determinação da espessura dos revestimentos de Al-Si e Zn-55Al</i>	40
5.3.3	<i>Morfologia superficial dos materiais</i>	40
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL E ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS.....	42
6.1.1	<i>Revestimento Al-Si</i>	42
6.1.2	<i>Revestimento Zn-55Al</i>	43
6.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CALOR	44
6.2.1	<i>Configuração de 1 camada</i>	44
6.2.2	<i>Configuração de 3 camadas</i>	45
6.2.3	<i>Avaliação dos corpos negros</i>	47
6.2.3.1	<i>Configuração de 1 camada</i>	47
6.2.3.2	<i>Configuração de 3 camadas</i>	49
6.3	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DOS MATERIAIS ANTES E APÓS O ENSAIO DE	

RESISTÊNCIA AO CALOR.....	51
6.3.1 <i>Análise do revestimento de Al-Si</i>	51
6.3.1.1 Análise morfológica por microscopia óptica.....	51
6.3.1.2 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura.....	53
6.3.2 <i>Análise do revestimento de Zn-55Al</i>	56
6.3.2.1 Análise por microscopia óptica	56
6.3.2.2 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura.....	57
6.3.3 <i>Análise do alumínio</i>	62
6.3.3.1 Análise por microscopia óptica	62
6.3.3.2 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura.....	63
6.3.4 <i>Análise do isolante térmico Protec[®]</i>	64
6.3.5 <i>Análise do isolante térmico Fiberfrax[®]</i>	65
7 CONCLUSÕES.....	69
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Motor completo, com defletor de calor projetado para o lado externo do veículo [1, 2]	5
Figura 4.2: a) Sistema de exaustão projetado para o lado externo do veículo e b) Sistema de exaustão projetado para o lado interno do veículo [2].	6
Figura 4.3: Representação esquemática da região do banho em um típico processo de revestimento por imersão contínua a quente [14].	8
Figura 4.4: Representação tridimensional do processo de imersão contínua a quente: tira de aço (1), rolo submerso (2), rolo corretor (3) e rolo estabilizador (4) [15].	8
Figura 4.5: Diagrama de fase da liga Al-Si [17]	9
Figura 4.6: Secção transversal do revestimento de alumínio Tipo 1 [13].	11
Figura 4.7: Secção transversal do revestimento de alumínio-silício, mostrando a região composta pela liga de Al-Si (1), a camada intermetálica de ferro-alumínio-silício (2) e substrato de aço (3) [16].	11
Figura 4.8: Morfologia superficial do revestimento de Al-Si (90% alumínio e 10% silício), com a formação de partículas de silício eutético na superfície do revestimento [23].	11
Figura 4.9: Aplicações de aços aluminizados como: (a) defletor de calor do motor e (b) conversor catalítico de calor, componente do sistema de exaustão do veículo [25].	12
Figura 4.10: Diagrama de fase da liga Al – Zn [17].	12
Figura 4.11: Representação esquemática da secção transversal do revestimento Zn-55Al, mostrando sua morfologia e constituição [27, 30].	13
Figura 4.12: Secção transversal do revestimento Zn-55Al, mostrando as regiões interdendríticas de Zn com eventuais partículas de Si dispersas (1), as regiões dendríticas de alumínio (2) e a camada intermetálica de zinco-ferro-alumínio-silício (3) e substrato de aço (4) [18].	13

Figura 4.13: Aspecto de mosaico brilhante observado na morfologia superficial do revestimento Zn-55Al [27, 30].	14
Figura 4.14: Micrografia superficial do revestimento hipereutetóide de alumínio-zinco (Zn-25Al) [31].	14
Figura 4.15: Aplicações de aço revestido com Zn-55Al: a) defletores de calor do escapamento (underbody shields) e b) surdina do escapamento, componente do sistema de exaustão do veículo, e tampa protetora de freio [34].	15
Figura 4.16: Aplicações do alumínio: a) defletor de calor do sistema de exaustão e b) defletor de calor do motor FIAT [37].	17
Figura 4.17: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação [10].	18
Figura 4.18: Variação da condutividade térmica de diversos materiais na temperatura ambiente [38].	19
Figura 4.19: Balanço de energia através de parede plana [38].	23
Figura 4.20: Balanço de energia através da parede plana. Analogia com o sistema de resistências em série [38].	24
Figura 4.21: Balanço de energia através da parede composta. Analogia com o sistema de resistências em série [38].	25
Figura 4.22: Transferência por radiação: a) em superfície e b) entre uma superfície e uma grande vizinhança [10].	26
Figura 4.23: Balanço da irradiação sobre uma superfície: absorção, reflexão e transmissão [42].	28
Figura 5.1: Fiberfrax [®] 970 A fornecido em rolos [52].	34
Figura 5.2: Gráfico de condutividade térmica em função da temperatura média conforme norma ASTM-C-177, para o isolante térmico Fiberfrax [®] 970 A [51].	35
Figura 5.3: Ferramental de corte das camadas interna (tampa) e externa (bandeja).	36
Figura 5.4: Ferramental de conformação – aba lateral da camada externa (bandeja).	36

Figura 5.5: Fluxograma do processo de preparação e montagem do sistema construtivo de 3 camadas	37
Figura 5.6: Figura esquemática do ensaio de resistência ao calor.....	39
Figura 5.7: Modelo em três dimensões do ensaio de resistência ao calor: a) vista isométrica e b) vista lateral	39
Figura 6.1: Secção transversal do revestimento de Al-Si, observada em microscópio óptico.	42
Figura 6.2: Secção transversal do revestimento de Al-Si, observada no MEV.....	43
Figura 6.3: Secção transversal do revestimento de Zn-55Al observada no microscópio óptico.	44
Figura 6.4: Secção transversal do revestimento de Zn-55Al, observada no MEV.....	44
Figura 6.5: Médias de temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3, para os materiais testados na configuração de 1 camada.....	45
Figura 6.6: Médias das temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3 , para os materiais testados na configuração de 3 camadas.	47
Figura 6.7: Temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3 , para os corpos negros testados na configuração de 1 camada.....	48
Figura 6.8: Temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3 , para os corpos negros testados na configuração de 3 camadas.	50
Figura 6.9: Análise do revestimento de Al-Si no microscópio óptico: A) revestimento antes do ensaio de resistência ao calor e B) revestimento após o ensaio de resistência ao calor.	52
Figura 6.10: Revestimento de Al-Si antes do ensaio de resistência ao calor. Descrição da morfologia superficial conforme literatura [23].	53
Figura 6.11: Micrografia superficial do revestimento de Al-Si antes do ensaio de resistência ao calor, observada no MEV. Detalhe dos orifícios dispersos no revestimento.	54
Figura 6.12: Micrografia superficial do revestimento de Al-Si após o ensaio de resistência ao calor, observada no MEV.	55

Figura 6.13: Micrografia superficial do revestimento de Al-Si após o ensaio de resistência ao calor, observada no MEV. Detalhe de um orifício disperso no revestimento.	55
Figura 6.14: Análise do revestimento de Zn-55Al no microscópio óptico: A) revestimento antes do ensaio de resistência ao calor e B) revestimento após o ensaio de resistência ao calor..	57
Figura 6.15: Revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor	57
Figura 6.16: Regiões 1 e 2 do revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor.	58
Figura 6.17: Região 2 do revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor. ..	58
Figura 6.18: Revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.	59
Figura 6.19: Região 1 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor	60
Figura 6.20: Região 2 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.	60
Figura 6.21: Região 2 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.	61
Figura 6.22: Região 3 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.	61
Figura 6.23: Análise do alumínio no microscópio óptico: A) material antes do ensaio de resistência ao calor e B) material após o ensaio de resistência ao calor.....	63
Figura 6.24: Alumínio antes do ensaio de resistência ao calor.	64
Figura 6.25: Alumínio após o ensaio de resistência ao calor.	64
Figura 6.26: Isolante Protec [®] antes do ensaio de resistência ao calor.....	65
Figura 6.27: Isolante Protec [®] após o ensaio de resistência ao calor.....	65
Figura 6.28: Fiberfrax [®] antes do ensaio de resistência ao calor.....	66
Figura 6.29: Fiberfrax [®] antes do ensaio de resistência ao calor (detalhe da Figura 6.28).	66
Figura 6.30: Fiberfrax [®] após o ensaio de resistência ao calor.....	67
Figura 6.31: Fiberfrax [®] após o ensaio de resistência ao calor.....	68
Figura 6.32 - Fiberfrax [®] (utilizado na camada intermediária da forma construtiva de 3 camadas) após o ensaio de resistência ao calor.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Forma construtiva, materiais e configuração dos protetores de calor [12].....	6
Tabela 4.2: Subclassificação do revestimento de alumínio – silício quanto ao peso e à espessura, conforme norma DIN EN 10327 [20].	10
Tabela 4.3 – Classificação do revestimento de Zn-55Al quanto ao peso e à espessura, conforme as Normas DIN EN 10327, NBR 15578 e ASTM A 792 [20, 33, 34].	15
Tabela 4.4 – Classificação do alumínio conforme a associação dos produtores norte-americanos (The Aluminum Association Inc.) [35, 36].	16
Tabela 5.1: Composição química e as propriedades mecânicas do substrato de aço, conforme a norma DIN EN 10327 [20] e relatório de inspeção [43]	30
Tabela 5.2: Composição química e as propriedades mecânicas do aço Galvalume®, conforme a norma ASTM A 792 [33] e análise química do metal base [44].	31
Tabela 5.3: Composição química e as propriedades mecânicas do alumínio, conforme liga 1050 O [45] e certificado de análise de material [46].	32
Tabela 5.4: Composição química e propriedades físicas do isolante térmico Prote [50].	33
Tabela 5.5: Composição química do isolante térmico Fiberfrax® 970 A [51, 52].	34
Tabela 6.1: Médias das temperaturas medidas nos termopares 1 e 2 e dos fatores de eficiência, obtidos para a configuração de 1 camada.	45
Tabela 6.2: Médias das temperaturas medidas no termopar 3 para a configuração de 1 camada.	45
Tabela 6.3: Médias das temperaturas medidas nos termopares 1 e 2 e dos fatores de eficiência, obtidos para a configuração de 3 camadas	46
Tabela 6.4: Médias das temperaturas medidas no termopar 3 para a configuração de 3 camadas.	46

Tabela 6.5: Temperaturas monitoradas a partir dos termopares 1, 2 e 3 e os fatores de eficiência obtidos para os corpos negros na configuração de 1 camada.	47
Tabela 6. 6: Comparativo entre os fatores de eficiência dos corpos negros e dos materiais com uma condição superficial normal, para a configuração de 1 camada.	49
Tabela 6.7: Médias das medições de temperatura dos termopares 1, 2 e 3 dos fatores de eficiência, obtidos para os corpos negros na configuração de 3 camadas.	49
Tabela 6.8: Comparativo percentual entre fatores de eficiência dos corpos negros com os de materiais com uma condição superficial normal para a configuração de 3 camadas.	51

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Al-Si – liga alumínio - silício

Zn-55Al – liga constituída por 55% alumínio e 45% zinco

Zn-25Al – liga constituída por 25% alumínio e 75% zinco

Zn-5Al – liga constituída por 5% alumínio e 95% zinco

AS - Classificação do revestimento Al-Si conforme Norma DIN EN 10327

AZ - Classificação do revestimento Zn-55Al conforme Norma ASTM A 972

Fe-Al-Si - Intermetálico de ferro-alumínio-silício

Zn-Al-Si-Fe - Intermetálico quaternário de zinco-alumínio-silício-ferro

q - Fluxo de calor

k – Condutividade térmica

dT/dx - Gradiente de temperatura através do meio de condução

k_r - Condutividade térmica devida à vibração do retículo

k_e - Condutividade térmica devida aos elétrons

A – Área

L - Espessura

Q – Taxa de transferência de calor

ΔT – Variação de temperatura

R – Resistência

E – Poder emissivo

σ - Constante de Stefan-Boltzmann

ε – Emissividade

ρ - Refletividade

F – Fator de eficiência

G_{total} - Energia total radiante

$G_{reflexão}$ – Energia radiante refletida

$G_{absorção}$ – Energia radiante absorvida

$G_{transmissão}$ - Energia radiante transmitida

MQ – Máquina

IVRM-LT – Instrução Victor Reinz Mercosur – Laboratório de Teste

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar e analisar comparativamente, a partir do ensaio de resistência ao calor, a *performance* das formas construtivas de 1 camada e 3 camadas dos defletores de calor, bem como o desempenho dos diferentes materiais utilizados em sua produção.

Neste estudo foram utilizados três diferentes materiais metálicos e dois distintos isolantes térmicos. Os materiais metálicos avaliados nas camadas externas dos sistemas ensaiados foram: i) aço revestido com Al-Si, comercialmente chamado de aço aluminizado; ii) aço revestido com Zn-55Al, comercialmente chamado de Galvalume[®]; e iii) alumínio liso, chamado comercialmente de alumínio puro. Os isolantes térmicos cerâmicos avaliados na camada intermediária da configuração de 3 camadas foram: o isolante térmico Protec[®] e o papel Fiberfrax[®] 970A.

Com o ensaio de resistência ao calor avaliou-se a condutividade térmica das diferentes formas construtivas de defletores de calor, considerando-se o modo de condução, o qual é o principal modo de transmissão de calor atuante nos defletores. O fenômeno de convecção não foi considerado.

Foi proposto um fator de eficiência que se mostrou um parâmetro eficaz de correlação entre as temperaturas interna e externa desenvolvidas no ensaio de resistência ao calor, permitindo a análise comparativa entre as formas construtivas e os materiais testados.

Os resultados obtidos mostraram um desempenho superior da forma construtiva de 3 camadas quando comparada com a forma construtiva de 1 camada, para todos os materiais testados.

O revestimento de Al-Si e o a superfície do alumínio não apresentaram alterações morfológicas superficiais após o ensaio de resistência ao calor, não ocorrendo um comprometimento das suas propriedades nas temperaturas estudadas. O revestimento de Zn-55Al apresentou alteração morfológica superficial após o ensaio de resistência ao calor, indicando um comprometimento das suas propriedades nas temperaturas estudadas.

Ambos os isolantes térmicos estudados, Protec[®] e Fiberfrax[®], apresentaram um desempenho térmico similar, sem diferenças significativas em suas *performances*.

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze and evaluate comparatively, with the heat resistance test, the performance of 1 layer and 3 layers of constructive systems of thermal acoustic protective shields, as well as the performance of different materials applied in their production.

In this study both three different metallic materials and two different insulators were used. The metallic materials evaluated in the outer layers of the tested systems were the following: i) steel coated with Al-Si, commercially called aluminized steel ii) steel coated with Zn-55Al, commercially known as Galvalume[®], and iii) smooth aluminum, commercially called pure aluminum. The ceramic insulators evaluated in the intermediate layer of 3 layer constructive system were the insulator Protec[®] and paper insulator Fiberfrax[®] 970 A.

The thermal conductivity of different constructive systems of heat shields was evaluated with the heat resistance test, considering the conduction mode, which is the main mode of heat transfer active in the shields. The phenomenon of convection was not considered in this study.

In this work it was proposed an efficiency factor that proved to be an effective correlation parameter between the internal and external temperatures developed in the heat resistance test, allowing a comparative analysis among constructive systems and the tested materials.

The results showed a superior performance of the 3 layer constructive system for all tested materials when compared with the 1 layer constructive system.

The coating of Al-Si and the aluminum surface didn't show superficial morphological changes after the heat resistance test, without damaging at evaluated temperatures. The coating of Zn-55Al showed superficial morphological changes after the heat resistance test, showing a modification in their properties at evaluated temperatures.

Both insulators studied, Protec[®] and Fiberfrax[®], showed a similar thermal results, without significant differences in their performances.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico da indústria automotiva, novos desafios e necessidades surgiram como a de redução do peso dos veículos e a busca por materiais recicláveis, gerando a compactação dos espaços disponíveis no compartimento do motor [1, 2, 3, 4]. Para atender essas diretrizes, foram desenvolvidos componentes em materiais termoplásticos, juntamente com o aumento do uso de materiais eletrônicos [5].

No entanto, devido ao fato de que esses materiais apresentam o comprometimento das propriedades mecânicas quando expostos a elevadas temperaturas e ao excesso de calor, foi necessária a criação de defletores de calor em determinadas áreas dos veículos, principalmente naquelas onde uma elevada temperatura de trabalho é requerida.

Defletores de calor, também chamados de protetores de calor, são componentes automotivos desenvolvidos para evitar a propagação do calor produzido pelo sistema de exaustão do veículo. Sua utilização permite minimizar a transmissão de calor, possibilitando que os componentes sensíveis adjacentes à exaustão, como peças plásticas e material eletrônico, não sofram dano ou avaria, devido às altas temperaturas geradas durante o processo de combustão. Como segunda característica funcional, os defletores de calor apresentam uma propriedade acústica, evitando a propagação dos ruídos para as demais partes do motor [6, 7, 8, 9].

O uso dos defletores de calor nos veículos cresceu rapidamente com as crescentes exigências relacionadas ao controle de emissões e a necessidade de compactação dos motores, tornando-se um componente obrigatório nos motores [4]. Produzidos a partir de chapas metálicas, os protetores de calor são comumente confeccionados em aço de baixo carbono revestido por imersão contínua a quente, em banhos em fusão de ligas de alumínio – silício (Al-Si) e alumínio – zinco (Zn-Al), e em alumínio liso ou gofrado. Como formas construtivas, os defletores podem ser projetados em uma, duas ou três camadas, conforme a temperatura específica de trabalho de cada motor.

A questão da transferência de calor é evidentemente fundamental no entendimento do funcionamento dos defletores de calor para a proteção dos componentes de veículos automotivos. A transferência de calor pode ser definida como a energia transferida entre um sistema e seu ambiente, devido uma diferença de temperatura entre eles. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, haverá necessariamente a transferência de calor, no sentido da diminuição da temperatura mais elevada [10].

Em materiais sólidos, o calor é transportado tanto através das ondas de vibração do retículo, os fônons (k_f), como através dos elétrons livres (k_e). A condutividade térmica está associada com cada um desses mecanismos, e a condutividade total é a soma dessas duas contribuições. A energia associada aos fônons é transportada na direção do seu movimento. Sua contribuição resulta de um movimento líquido ou global dos fônons, desde as regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura de um corpo, através das quais existe um gradiente de temperatura [10, 11].

Os elétrons livres ou condutores participam na condução térmica eletrônica. Aos elétrons livres em uma região quente da amostra é concedido um ganho em energia cinética, fazendo com que migrem para as áreas mais frias, onde uma parte dessa energia cinética é transferida para os próprios átomos (na forma de energia vibracional), como consequência de colisões com os fônons ou outras imperfeições no cristal. Sua contribuição relativa para a condutividade térmica total eleva com o aumento das concentrações de elétrons livres, uma vez que mais elétrons estão disponíveis para participar nesse processo de transferência de calor [11].

O mecanismo eletrônico de transporte de calor é muito mais eficiente do que a contribuição dos fônons em metais de alta pureza, pois os elétrons não são tão facilmente dispersos como são os fônons, além de possuírem maiores velocidades. Além do mais, os metais são condutores de calor extremamente bons, pois existem números relativamente grandes de elétrons livres que participam na condução térmica [11].

Os materiais não-metálicos e os materiais cerâmicos são isolantes térmicos, uma vez que carecem de grandes números de elétrons livres. Dessa forma, os fônons são os principais responsáveis pela condutividade térmica: o valor de k_e é muito menor do que o valor de k_r . No entanto, os fônons não são tão efetivos como os elétrons livres no transporte de calor, como consequência do espalhamento dos fônons pelas imperfeições do retículo [11].

A partir de considerações baseadas na fenomenologia da transferência de calor, a definição do projeto de defletores de calor para veículos automotivos passa pela definição de qual forma construtiva, e com que materiais, pode-se obter uma maior eficiência na função de barreira térmica. Nesse contexto, este trabalho procura contribuir com uma metodologia investigativa que permita a obtenção de resultados práticos na avaliação de diferentes possibilidades no sentido do aumento de sua eficiência em serviço.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi avaliar comparativamente, a partir do ensaio de resistência ao calor, o desempenho de diferentes formas construtivas de defletores de calor, estudando os materiais atualmente empregados na indústria automotiva para esta aplicação.

Para atingir o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos foram indicados:

- i) Avaliar as chapas metálicas do ponto de vista morfológico antes e depois do ensaio de resistência ao calor;
- ii) Avaliar os isolantes térmicos do ponto de vista morfológico antes e depois do ensaio de resistência ao calor;
- iii) Criar uma equação de eficiência térmica para avaliar as temperaturas interna e externa do ensaio de resistência ao calor;
- iv) Avaliar o desempenho dos isolantes térmicos Protec[®] e Fiberfrax[®] 970 A empregados na camada intermediária da configuração de 3 camadas dos defletores de calor;
- v) Avaliar o desempenho dos 3 materiais metálicos ensaiados: aço revestido com Al-Si, aço revestido com Zn-55Al e alumínio.

3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO DE PESQUISA

Esse trabalho teve algumas limitações durante o período de pesquisa:

i) No ensaio de resistência ao calor, foi desconsiderada a convecção entre a amostra e a fonte de calor. O estado estacionário de condução de calor foi admitido durante a realização dos ensaios.

ii) Não foram consideradas variações de temperatura ambiente durante a realização dos ensaios de resistência ao calor.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Defletores de Calor

O defletor de calor, também chamado de protetor de calor ou defletor termoacústico, é um dos componentes do sistema de exaustão do veículo, utilizado basicamente para evitar a propagação do calor para as demais partes do motor (Figura 4.1) [4, 6, 7].

Agregado a esta função principal, os defletores de calor também permitem a compactação do espaço interno dos motores, restringindo as emissões de gases e controlando os níveis de ruído e aspereza no veículo [4, 6].

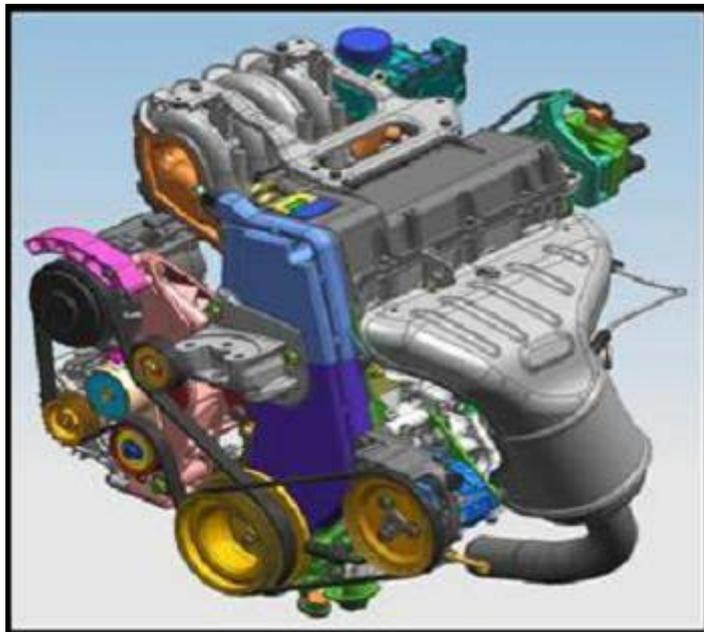


Figura 4.1: Motor completo, com defletor de calor projetado para o lado externo do veículo [1, 2]

Acoplado e fixado ao coletor de exaustão, sua posição é determinada pelo projeto do sistema de exaustão, podendo estar fixado na parte externa do motor, na frente do veículo, bem como na parte interna, voltado para o assento do passageiro (Figura 4.2) [2, 3].

Como formas construtivas do produto existem defletores de calor produzidos em uma, duas ou três camadas (Tabela 4.1).

O defletor de uma camada, chamado de chapa única, é fabricado com chapas metálicas com espessuras variadas.

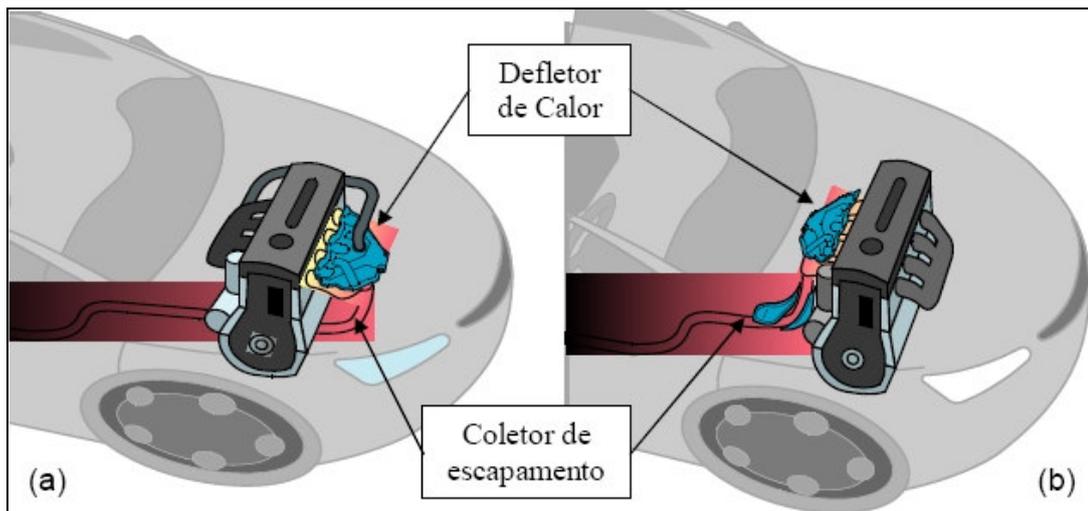


Figura 4.2: a) Sistema de exaustão projetado para o lado externo do veículo e b) Sistema de exaustão projetado para o lado interno do veículo [2].

Tabela 4.1: Forma construtiva, materiais e configuração dos protetores de calor [12].

Forma Construtiva	Material	Configuração
1 camada (chapa única)	Chapa metálica	
2 camadas	Chapa metálica + Chapa metálica (sem isolante térmico)	
3 camadas (sanduíche)	Chapa metálica + Isolante térmico (Protec®)	
3 camadas (sanduíche)	Chapa metálica + Isolante térmico (Fiberfrax® 970 A)	

O defletor de duas camadas é normalmente fabricado a partir de duas chapas metálicas planas de iguais espessuras. Porém, diferentes combinações de espessuras e materiais podem ser utilizadas na indústria automotiva. Como exemplo, tem-se a produção de um defletor com uma camada de aço e outra de alumínio.

O defletor de três camadas tem sua forma construtiva denominada “sanduíche”. As camadas externas, chamadas de tampa e bandeja, são produzidas em chapas metálicas, enquanto a camada interna é confeccionada com materiais isolantes térmicos [1, 2, 3]

Para a produção dos defletores de calor, normalmente são utilizados três materiais: aço de baixo carbono revestido com alumínio-silício (Al-Si), aço de baixo carbono revestido com alumínio-zinco (Zn-55Al) e alumínio.

4.2 Aços revestidos por imersão contínua a quente

O aço, que é basicamente de uma liga ferro – carbono com diferentes teores de carbono e adição ou não de outros elementos de liga, é utilizado em diversas aplicações de engenharia como um material metálico estrutural devido a suas características [11, 13].

Com excelentes propriedades mecânicas, como tenacidade e ductibilidade, este material oferece uma boa manufaturabilidade, formabilidade e soldabilidade. Contudo, devido a sua susceptibilidade à corrosão em ambientes úmidos e a sua oxidação em temperaturas elevadas, para o seu adequado uso em campo, geralmente alguma forma de proteção superficial é requerida [13].

Para tanto, diferentes métodos de proteção contra a corrosão e oxidação são empregados para proteger o aço, tais como: modificação da composição da liga, mudança do ambiente com a utilização de inibidores, controle do potencial eletroquímico com a aplicação de correntes catódicas e anódicas, e a aplicação de revestimentos orgânicos ou metálicos [13].

Uma das formas mais comuns empregadas para a proteção do aço é a aplicação de revestimentos metálicos por imersão contínua a quente. Neste processo, os substratos a serem revestidos passam continuamente através de um banho do revestimento metálico fundido (Figura 4.3 e Figura 4.4) [14, 15]. A partir do processo por imersão contínua a quente, são obtidos revestimentos de metais e ligas metálicas com baixos pontos de fusão, como por exemplo: zinco; zinco-ferro; alumínio; alumínio-silício (Al-Si); alumínio-zinco (Zn-5Al e Zn-55Al) e chumbo-estanho [13].

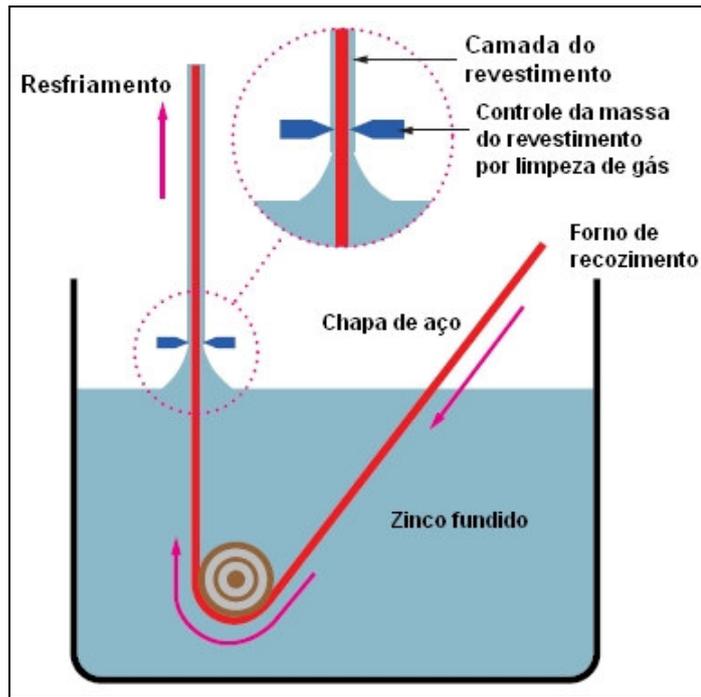


Figura 4.3: Representação esquemática da região do banho em um típico processo de revestimento por imersão contínua a quente [14].

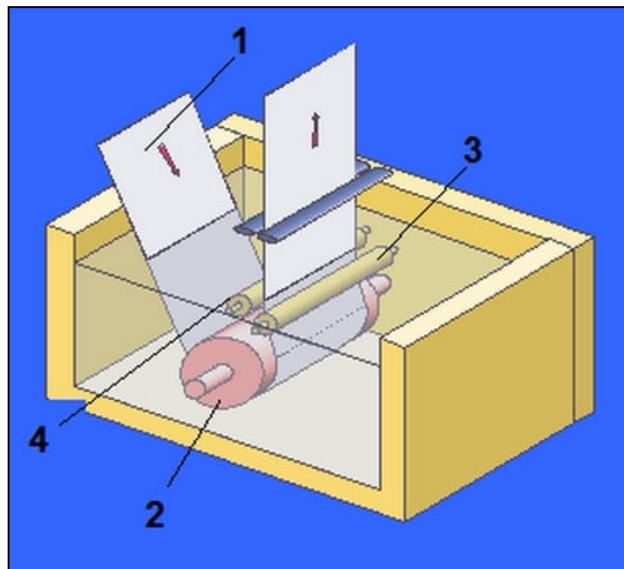


Figura 4.4: Representação tridimensional do processo de imersão contínua a quente: tira de aço (1), rolo submerso (2), rolo corretor (3) e rolo estabilizador (4)[15].

4.2.1 Aço revestido com alumínio - silício (Al-Si)

O revestimento de alumínio aplicado ao aço por imersão contínua a quente, comercialmente chamado de aço aluminizado, é um revestimento resistente ao calor, à oxidação em altas temperaturas e à corrosão, que possui altos níveis de refletividade [16].

Tecnicamente classificado como revestimento de alumínio tipo 1, na prática é um revestimento de baixa espessura da liga Al-Si (Figura 4.5), aplicado ao aço quando são requeridas propriedades de conformabilidade e resistência à temperatura. [13, 16]

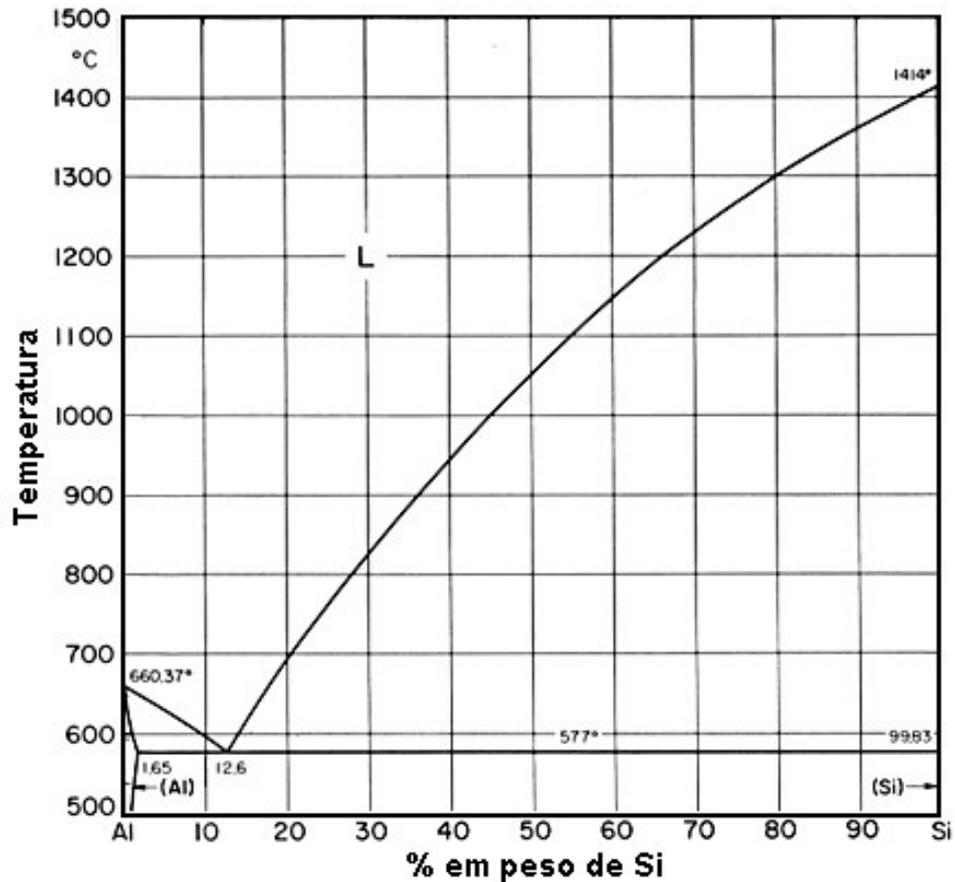


Figura 4.5: Diagrama de fase da liga Al-Si. [17]

Com alta resistência térmica, o aço aluminizado pode ser submetido a temperaturas variando de 650°C até 800°C, sem apresentar nenhuma alteração na camada. Nesta condição, é adicionada uma quantidade de titânio a liga do metal base. Em geral, quando altas temperaturas de trabalho são requeridas, o revestimento de Al-Si deve ser o escolhido, pois pode permanecer continuamente a temperatura de 400°C sem apresentar nenhuma mudança na camada ou perda de sua refletividade (nível de 80% até a temperatura de 600°C) [16, 18, 19].

A subclassificação do revestimento está associada a sua espessura e peso, como se pode observar na Tabela 4.2. Para a maioria das aplicações, a espessura usual do revestimento é de 20 a 25 μm , o equivalente a variação de 120 a 150 g.m^{-2} . Em uma aplicação especial, onde a conformabilidade é uma característica crítica, um revestimento de baixa espessura (10 μm , ou 60 g.m^{-2}) pode ser requerido.

Tabela 4.2: Subclassificação do revestimento de alumínio – silício quanto ao peso e à espessura, conforme norma DIN EN 10327 [20].

Classificação conforme Norma DIN EN 10327	Peso mínimo do revestimento em g/m² (ambos os lados)	Espessura típica por lado (μm)	Variação de espessura (μm)
AS 60	60	8	6 a 13
AS 80	80	14	10 a 20
AS 100	100	17	12 a 23
AS 120	120	20	15 a 27
AS 150	150	25	19 a 33

Como característica importante desse revestimento, tem-se o percentual de silício existente na liga. Variando entre 5 e 11% em peso, sua função é prevenir a formação de uma camada intermetálica de ferro – alumínio de elevada espessura, a qual prejudicaria a aderência e a conformabilidade do revestimento [16, 19].

Quanto à morfologia, o revestimento é constituído por duas regiões distintas. A primeira região é composta por uma camada intermetálica de Fe-Al-Si. Nesta região, com o aumento percentual de silício no banho em fusão de alumínio, menos rugosa e irregular é a interface entre o substrato de aço e o revestimento, e menor é a espessura da camada intermetálica [21, 22, 23]. A segunda região, com maior espessura, é constituída pela camada da liga Al-Si, com o silício disperso em uma matriz de alumínio [23].

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram estas regiões. A Figura 4.8 mostra a morfologia superficial do revestimento de alumínio contendo 10% de silício.

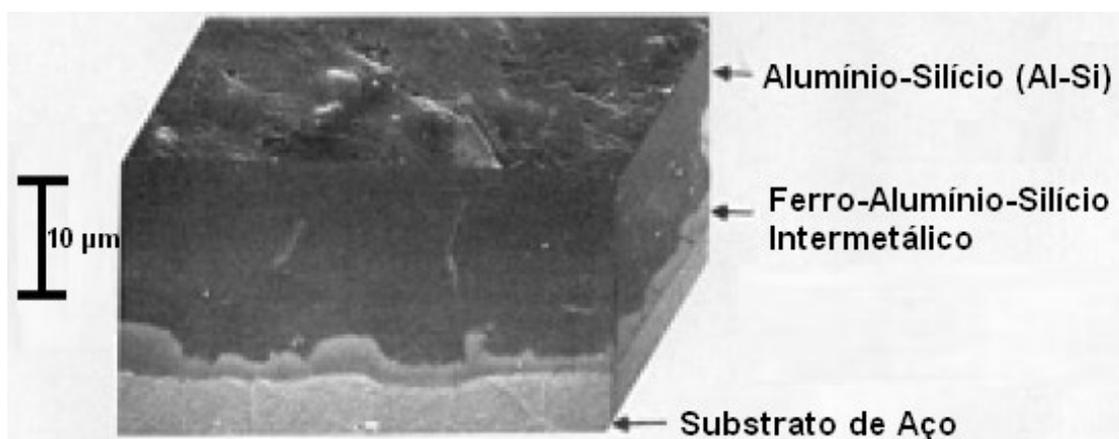


Figura 4.6: Secção transversal do revestimento de alumínio Tipo 1 [13].

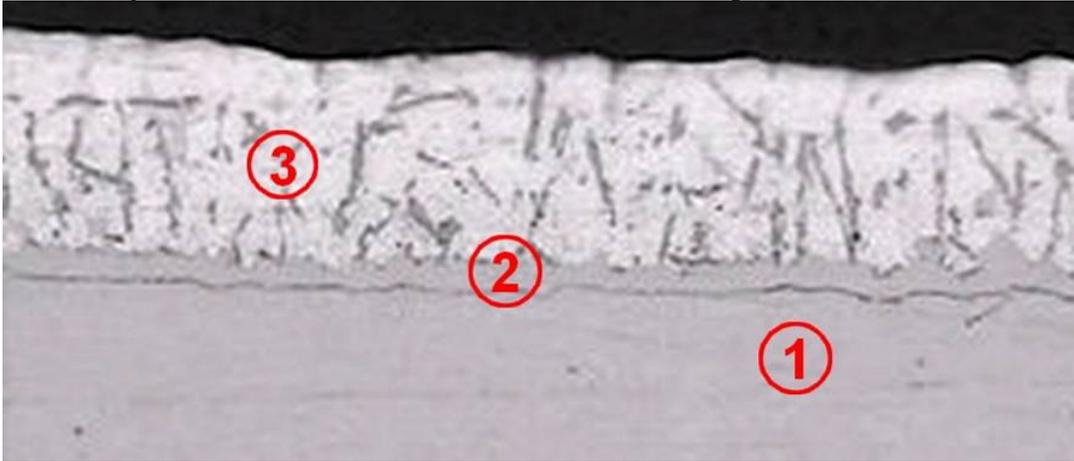


Figura 4.7: Secção transversal do revestimento de alumínio-silício, mostrando a região composta pela liga de Al-Si (1), a camada intermetálica de ferro-alumínio-silício (2) e substrato de aço (3) [16].



Figura 4.8: Morfologia superficial do revestimento de Al-Si (90% alumínio e 10% silício), com a formação de partículas de silício eutético na superfície do revestimento [23].

Exemplos de aplicações automotivas típicas desse tipo de revestimento são [13, 16, 24]:

- defletores de calor de motores (Figura 4.9a);
- defletores de calor do escapamento (*underbody shields*);
- componentes do sistema de exaustão do veículo (Figura 4.9b);
- tanques de combustíveis;
- filtros de biodiesel.



Figura 4.9: Aplicações de aços aluminizados como: (a) defletor de calor do motor e (b) conversor catalítico de calor, componente do sistema de exaustão do veículo [25].

4.2.2 Aço revestido com alumínio - zinco (Zn-55Al)

O revestimento de alumínio - zinco – Zn-55Al (ver diagrama Al-Zn da Figura 4.10) aplicado ao aço por imersão contínua a quente, foi comercialmente produzido pela primeira vez em 1972, nos Estados Unidos, sob a marca registrada Galvalume® [13, 26].

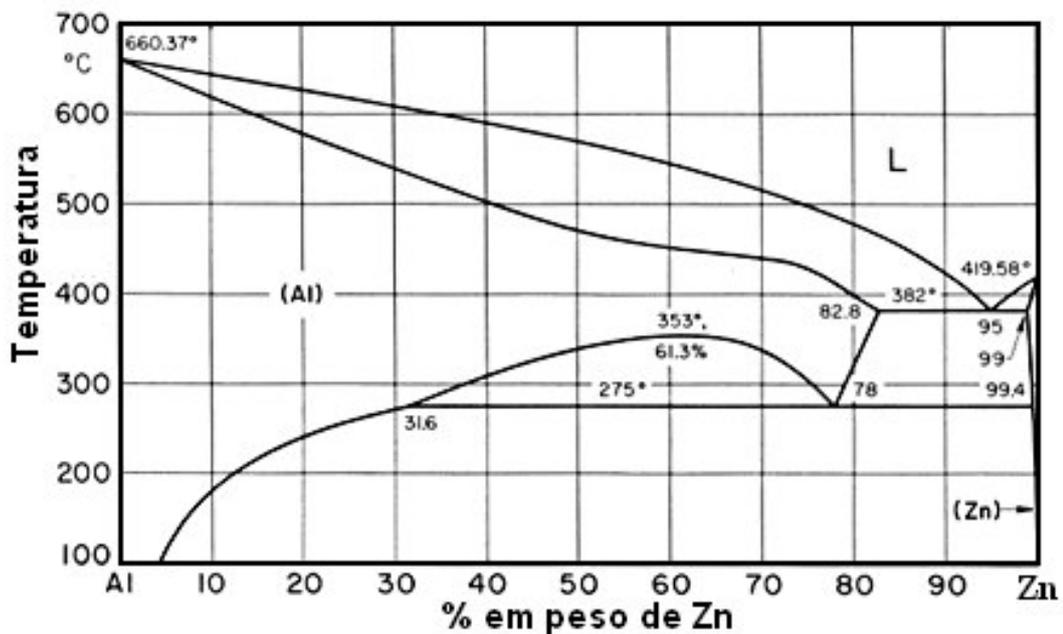


Figura 4.10: Diagrama de fase da liga Al – Zn [17].

Constituído em peso por 55% Al, 43,5% Zn e 1,5% Si, o revestimento foi elaborado com o objetivo de otimizar as propriedades do revestimento de zinco, combinando a formação da camada passivante do alumínio (resistência à corrosão por barreira) com a proteção por sacrifício do zinco [26, 27].

O revestimento de alumínio - zinco (Zn-55Al) (Figura 4.11 e Figura 4.12) é composto por regiões dendríticas ricas em alumínio, regiões interdendríticas ricas em zinco e uma fina camada intermetálica [28, 29]. A região dendrítica rica em alumínio é composta de 64,5% Al, 35,3% Zn e 0,2% Si. As áreas interdendríticas ricas em zinco são compostas de 20,4% Al, 78,9% Zn e 0,7% Si, com partículas ocasionais de silício dispersas [29]. E a camada intermetálica é composta de alumínio (48%) - ferro (24%) - zinco (14%) – silício (11%) [28].

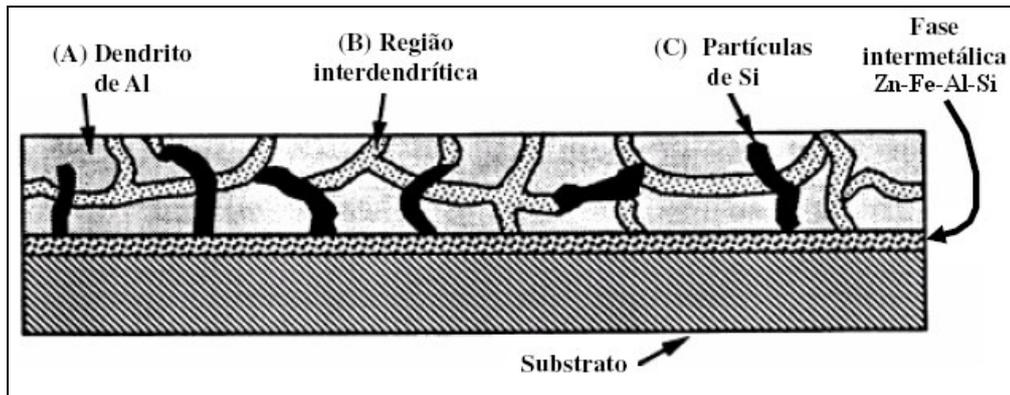


Figura 4.11: Representação esquemática da seção transversal do revestimento Zn-55Al, mostrando sua morfologia e constituição [27, 30].

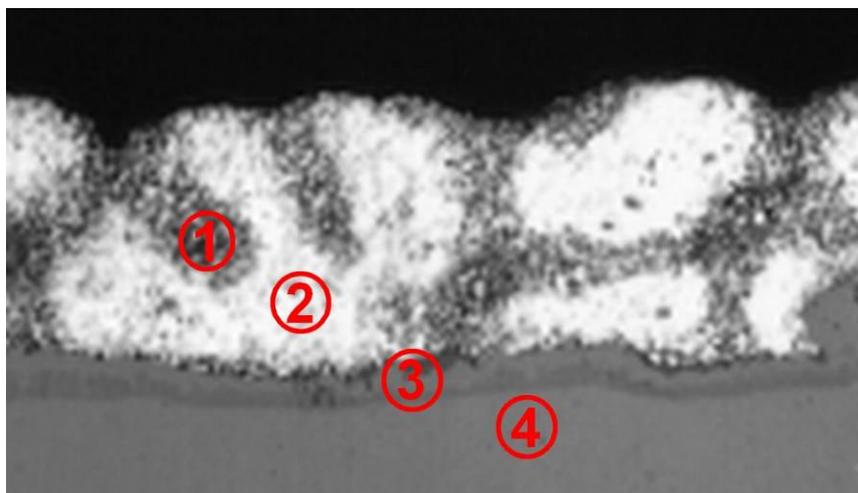


Figura 4.12: Seção transversal do revestimento Zn-55Al, mostrando as regiões interdendríticas de Zn com eventuais partículas de Si dispersas (1), as regiões dendríticas de alumínio (2) e a camada intermetálica de zinco-ferro-alumínio-silício (3) e substrato de aço (4) [18].

Como morfologia superficial, o revestimento apresenta uma superfície com aspecto de mosaico brilhante, constituída por grãos de alumínio (Figura 4.13) [27, 30]

Quando observada mais detalhadamente no microscópio eletrônico de varredura, esta superfície apresenta uma estrutura típica dos revestimentos hipereutetoides de Zn-Al, constituída por regiões escuras interdendríticas ricas em zinco e regiões dendríticas claras

ricas em alumínio (Figura 4.14). Com o aumento do percentual de alumínio na composição da liga, decresce a região interdendrítica com composição eutética [31].

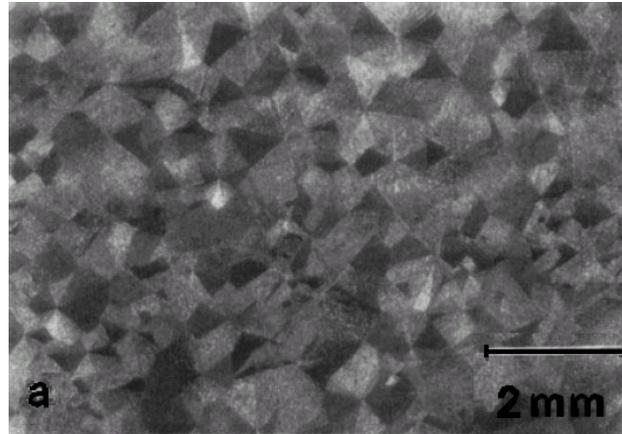


Figura 4.13: Aspecto de mosaico brilhante observado na morfologia superficial do revestimento Zn-55Al [27, 30].

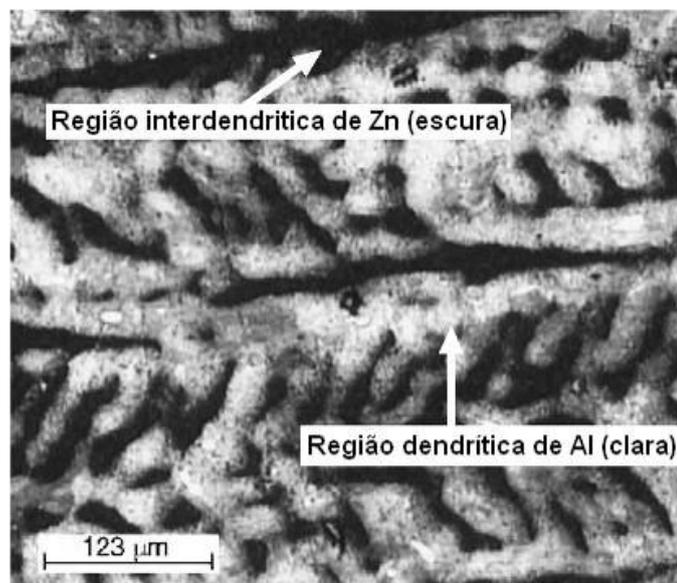


Figura 4.14: Micrografia superficial do revestimento hipereutetóide de alumínio-zinco (Zn-25Al) [31].

Devido a sua condutividade térmica moderada, o aço revestido com Zn-55Al pode ser empregado a temperaturas contínuas de trabalho de até 315°C sem apresentar danos e descoloração da camada. Em aplicações e usos onde o aspecto visual não tenha elevada importância, o revestimento pode ser submetido a picos de temperatura de até 480°C durante curtos períodos [18, 26]. A Tabela 4.3 apresenta a classificação do Galvalume[®] quanto à espessura e peso.

Tabela 4.3 – Classificação do revestimento de Zn-55Al quanto ao peso e à espessura, conforme as Normas DIN EM 10327, NBR 15578 e ASTM A 792 [20, 32, 33].

Classificação conforme Norma ASTM A 972	Peso do revestimento em g.m^{-2} [ambos os lados]	Espessura do revestimento (μm)	Faixa de espessura (μm)
AZ 100	100	13	9 a 19
AZ 150	150	20	15 a 27
AZ 165	165	22	---
AZ 185	185	25	19 a 33
AZ 200	200	---	---

Exemplos de aplicações deste tipo de revestimento são [26, 34]:

- defletores de calor do escapamento (*underbody shields*) (Figura 4.15 a);
- componentes do sistema de exaustão do veículo (surdinas) (Figura 4.15 b);
- *box* para componentes elétricos;
- dutos de ar industriais
- telhas.

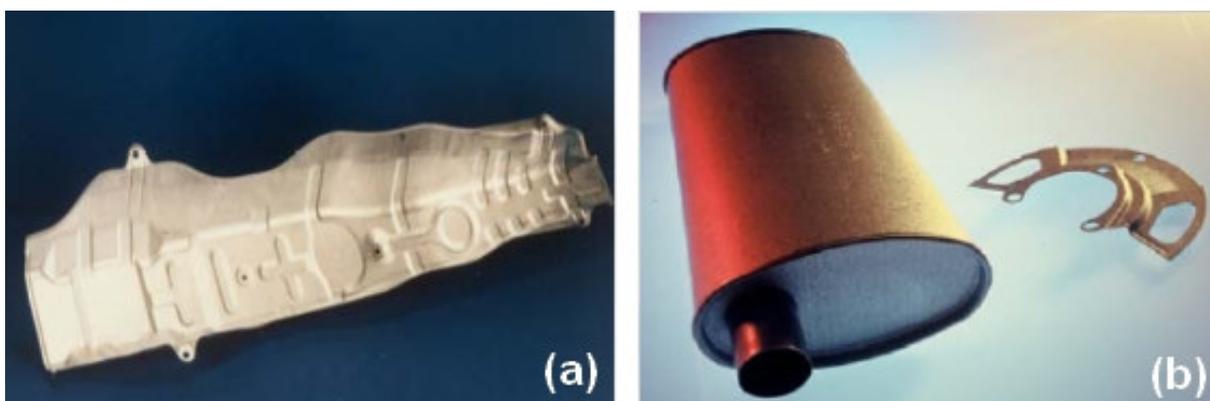


Figura 4.15: Aplicações de aço revestido com Zn-55Al: a) defletores de calor do escapamento (*underbody shields*) e b) surdina do escapamento, componente do sistema de exaustão do veículo, e tampa protetora de freio [34].

4.3 Alumínio

Caracterizado por sua versatilidade, o alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais atrativos, mecanicamente e economicamente, para uma série de

aplicações. Como metal estrutural, sua aplicação só é menor comparada com a dos aços [35, 36].

Com densidade de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ e propriedades físicas e mecânicas variadas devido à versatilidade, geralmente o alumínio apresenta elevadas condutividades térmica e elétrica, boa conformabilidade e elevada resistência à corrosão, devido à rápida formação de uma camada de óxido protetor que impede a progressão da deterioração do material [35, 36].

A superfície do alumínio apresenta uma alta refletividade, o que permite a sua utilização em defletores de calor e em aplicações decorativas. Quando anodizado, sua superfície pode ser refletiva ou absorvente, conforme o acabamento final. Sua classificação, conforme a associação dos produtores norte-americanos (*The Aluminum Association Inc.*), é descrita na Tabela 4.4 [35, 36].

Tabela 4.4 – Classificação do alumínio conforme a associação dos produtores norte-americanos (*The Aluminum Association Inc.*) [35, 36].

Série	Elementos de liga principais	Outros elementos de liga
1xxx	Alumínio comercialmente puro	-
2xxx	Cu	Mg , Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg , Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8xxx	Sn, Li, Fe, Cu, Mg	-
9xxx	Reservado para uso futuro	-

Exemplos de aplicações de alumínio e suas ligas são [35, 36]:

- Liga 1xxx: Indústrias química, elétrica e automotiva;
- Liga 2xxx: Aeronaves (graças a sua elevada resistência mecânica);
- Liga 3xxx: Aplicações arquitetônicas e produtos de uso geral;
- Liga 4xxx: Varetas ou eletrodos de solda e chapas para brasagem;
- Liga 5xxx: Produtos expostos à atmosfera marinha como cascos de barcos;

- Liga 6xxx: Produtos extrudados de uso arquitetônico e
- Liga 7xxx: Componentes estruturais de aeronaves e outras aplicações que necessitam de elevados requisitos de resistência. Esta liga é a que possui a maior resistência mecânica entre as ligas de alumínio.

Alguns exemplos de aplicação do alumínio no setor automotivo estão mostrados na Figura 4.16

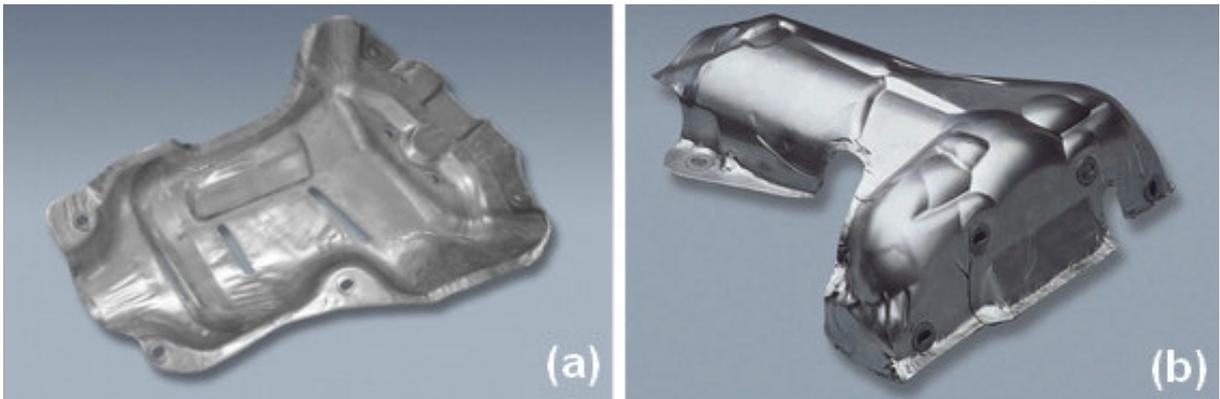


Figura 4.16: Aplicações do alumínio: a) defletor de calor do sistema de exaustão e b) defletor de calor do motor FIAT [37].

4.4 Transmissão de Calor

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorre, necessariamente, transferência de calor [10, 38].

A taxa de transferência de calor em uma determinada direção depende da diferença de temperatura (magnitude) naquela direção. Quanto maior a diferença de temperatura, maior é a taxa de transferência de calor [38].

Como modos de transferência de calor têm-se: condução, convecção e radiação (Figura 4.17).

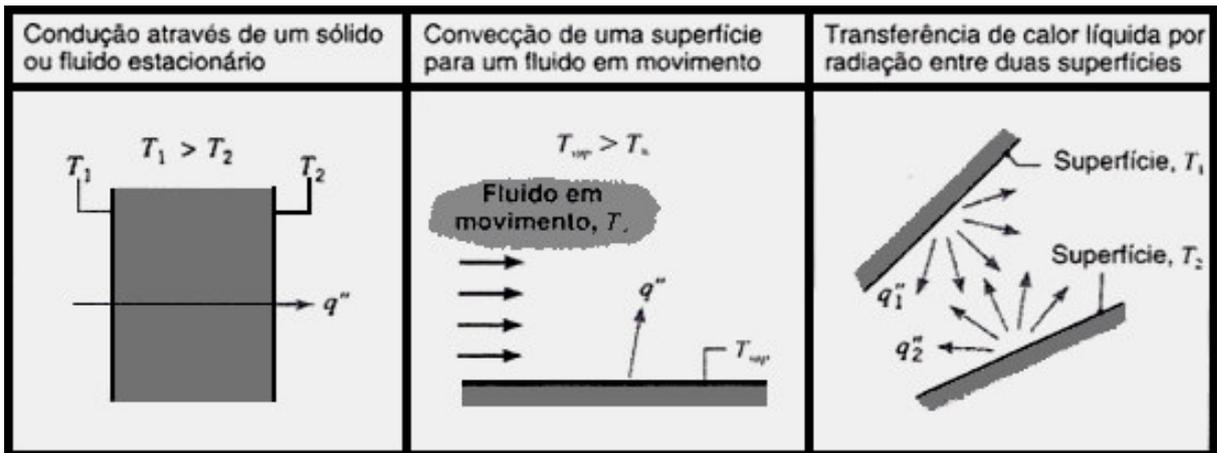


Figura 4.17: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação [10].

4.4.1 Condução

A condução pode ser vista como a transferência de calor, em um meio, de partículas mais energéticas para partículas de menor energia devido às interações que existem entre elas. Assim, na presença de um gradiente de temperatura, a transferência de energia por condução ocorre, portanto, no sentido da diminuição de temperatura [10, 38].

A condução ocorre em sólidos, líquidos e gases. Nos gases e líquidos, a condução é resultado das colisões e da difusão das moléculas durante seu movimento aleatório. Nos sólidos, a condução é resultado da combinação das vibrações moleculares na rede cristalina e a energia transportada pelos elétrons livres [38].

A taxa de condução através de um meio depende da geometria, da espessura, do material e da diferença de temperatura entre os dois lados do meio. Materiais isolantes diminuem a taxa de perda de calor. Quanto maior a espessura do isolante, menor é a perda de calor [38].

Considerando-se a condução de calor através de uma grande parede em um regime estacionário (situação em que o fluxo de calor não se altera ao longo do tempo), conclui-se que a taxa de condução por uma camada é proporcional à diferença de temperatura entre os dois lados da camada e a área de transferência de calor, mas inversamente proporcional à espessura da camada. A Equação 4.1 mostra esta relação [38].

$$\text{Taxa de Condução de Calor} \sim \frac{(\text{área da superfície}) \times (\text{diferença de temperatura})}{\text{Espessura}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

4.4.1.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é a propriedade que indica a habilidade de um material transferir calor. Fisicamente, representa o fenômeno da condução térmica, onde o calor é transportado, em uma substância, das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura [11, 39, 40].

Nos materiais, a condutividade térmica varia com a temperatura, causando uma complexidade na análise da condução. Conseqüentemente, é comum avaliar a condutividade térmica na faixa de temperatura de trabalho do material e considerar seu valor constante.

A Figura 4.18 mostra a variação da condutividade térmica de diversos materiais na temperatura ambiente.

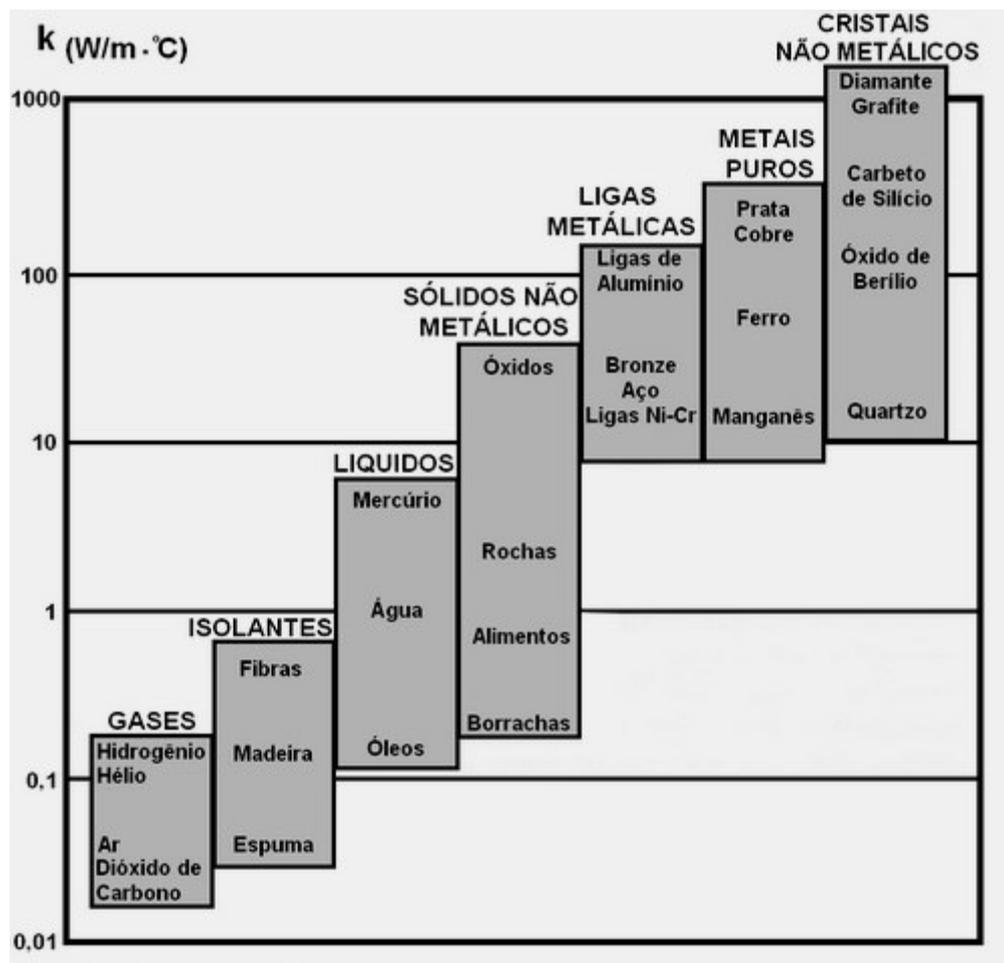


Figura 4.18: Variação da condutividade térmica de diversos materiais na temperatura ambiente [38].

Baixos valores de condutividade térmica são exigidos quando o objetivo é minimizar as perdas de calor. De modo inverso, quando se pretende maximizar a transferência de calor, materiais com alta condutividade térmica (k) são requeridos [38, 39].

A condutividade térmica pode ser mais bem definida em termos da Lei de Fourier para a condução de calor, conforme a Equação 4.2.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Equação 4.2})$$

onde q representa o fluxo de calor, ou escoamento de calor, por unidade de tempo por unidade de área (a área sendo tomada como aquela perpendicular à direção do escoamento), k é a condutividade térmica, e dT/dx é o gradiente de temperatura através do meio de condução [11].

As unidades para q e k são $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($\text{Btu}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot\text{h}$) e $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ($\text{Btu}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F}$), respectivamente.

A Equação 4.2 é válida somente para o escoamento de calor em condições de regime estacionário, isto é, para as situações em que o fluxo de calor não se altera ao longo do tempo. O sinal negativo na expressão indica que a direção do escoamento de calor ocorre da região mais quente para a região mais fria, decrescendo ao longo do gradiente de temperatura [11].

4.4.1.2 Mecanismos de Condução do Calor

Em materiais sólidos, o calor é transportado tanto através das ondas de vibração do retículo (fônons), como através dos elétrons livres. Uma condutividade térmica está associada com cada um desses mecanismos, e a condutividade total é a soma dessas duas contribuições [10, 11, 38].

$$k = k_r + k_e \quad (\text{Equação 4.3})$$

onde k_r e k_e representam as condutividades térmicas devidas à vibração do retículo e aos elétrons, respectivamente; em geral, uma forma ou a outra é predominante.

A energia que está associada aos fônons ou às ondas reticulares é transportada na direção do seu movimento. A contribuição de k_r resulta de um movimento líquido ou global dos fônons desde as regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura de um corpo [11].

Um efeito importante sobre k_r é a regularidade da rede cristalina. Materiais cristalinos, bem ordenados, possuem uma condutividade térmica maior que materiais amorfos. Este efeito

é comprovado em sólidos cristalinos não metálicos, tais como o diamante, onde k_r pode ser bastante elevado, excedendo valores de k associados a materiais considerados bons condutores, tal como alumínio [10].

Os elétrons livres ou condutores participam na condução térmica eletrônica. Aos elétrons livres em uma região quente da amostra é concedido um ganho em energia cinética. Eles então migram para as áreas mais frias, onde uma parte dessa energia cinética é transferida para os próprios átomos (na forma de energia vibracional), como consequência de colisões com os fônons ou outras imperfeições no cristal. A contribuição relativa de k_e para a condutividade térmica total eleva com o aumento das concentrações de elétrons livres, uma vez que mais elétrons estão disponíveis para participar nesse processo de transferência de calor [11].

O mecanismo eletrônico de transporte de calor é muito mais eficiente do que a contribuição dos fônons em metais de alta pureza, pois os elétrons não são tão facilmente dispersos como são os fônons, além de possuírem maiores velocidades. Além disso, os metais são condutores de calor extremamente bons, pois existem números relativamente grandes de elétrons livres que participam na condução térmica [11].

Os materiais não-metálicos e os materiais cerâmicos são geralmente isolantes térmicos, uma vez que eles não dispõem de elétrons livres. Dessa forma, os fônons são os principais responsáveis pela condutividade térmica, não sendo tão efetivos como os elétrons livres no transporte da energia calorífica, o que é um resultado do espalhamento muito eficiente dos fônons pelas imperfeições do retículo [11].

4.4.1.3 *Isolantes Térmicos*

Isolantes térmicos são materiais que retardam o fluxo de calor. Com baixa condutividade térmica, são usados como barreira entre dois corpos com temperaturas diferentes, tanto para reduzir a perda de calor proveniente do corpo mais quente, como para reduzir a entrada de calor no corpo mais frio [10, 38, 41].

Em sistemas de isolamento térmico, compostos de materiais de baixa condutividade térmica são combinados para se atingir níveis ainda menores de condutividade térmica.

Nos isolamentos com fibras, com pó ou com flocos, o material sólido encontra-se finamente disperso em um espaço contendo ar. Tais sistemas caracterizam-se por uma condutividade térmica efetiva que depende da condutividade térmica das propriedades

radiantes da superfície do material sólido, bem como da natureza e da fração volumétrica de ar ou de espaço entre as partículas [10, 38].

Se espaços pequenos ou poros são formados pela ligação ou fundição do material sólido, uma matriz rígida é criada. Quando não houver ligação nesses espaços, o sistema é conhecido como isolamento celular. Isolamentos refletivos são compostos de chapas finas ou folhas, dispostas em múltiplas camadas paralelas de alta refletividade, que são espaçadas entre si de modo a refletir a energia radiante de volta a sua fonte. O espaço entre as folhas é projetado de modo a restringir o movimento do ar e, em isolamento de alto desempenho, é feito vácuo neste espaço [10].

A transferência de calor através de qualquer sistema de isolamento pode incluir diversas formas: condução através de um material sólido; condução ou convecção através do ar nos espaços vazios; e, se a temperatura for suficientemente elevada, troca de calor por radiação entre as superfícies da matriz sólida. A condutividade efetiva leva em conta todos estes processos [10, 38].

4.4.2 Condução unidimensional em regime estacionário

A condução unidimensional em regime estacionário trata das situações para as quais o calor é transferido em uma única direção, em que o fluxo de calor não se altera ao longo do tempo.

Mais especificamente, unidimensional refere-se ao fato de apenas uma coordenada ser necessária para descrever a variação espacial das variáveis dependentes. Assim sendo, os gradientes de temperatura existem ao longo de apenas uma direção, e a transferência de calor ocorre exclusivamente nessa direção [10].

O regime estacionário por sua vez refere-se à condição em que a temperatura de cada ponto do sistema é independente do tempo.

4.4.2.1 Parede Plana

Para a condução unidimensional de uma parede plana, a temperatura é função apenas da coordenada x e o calor é transferido exclusivamente nesta direção. Com isso, a temperatura pode ser expressa como $T(x)$.

Considerando-se que a única interação de energia envolvida é a transferência de calor e que não há geração de calor, o balanço de energia para a parede é mostrado na Figura 4.19.

$$\left(\begin{array}{l} \text{Taxa de transferência} \\ \text{de calor em direção a} \\ \text{parede} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Taxa de transferência} \\ \text{de calor fora da parede} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Taxa de mudança de} \\ \text{energia do material} \\ \text{da parede} \end{array} \right)$$

Figura 4.19: Balanço de energia através de parede plana [38].

Este balanço é representado pela Equação 4.4.

$$Q_{\text{direção}} - Q_{\text{fora}} = dE_{\text{parede}} / dt \quad (\text{Equação 4.4})$$

Integrando a Equação 4.4, considerando algumas condições de contorno [29], chega-se a Equação 4.5.

$$Q_{\text{condução, parede}} = kA * [T_1 - T_2 / L] \quad (\text{Equação 4.5})$$

A Equação 4.5 é igual à Equação 4.2, representando a Lei de Fourier para condução de calor. Descrita desta forma, a Equação 4.5 mostra que a taxa de condução de calor através da parede plana é proporcional ao valor da condutividade térmica (k), à área da parede (A) e à diferença de temperatura ($T_1 - T_2$), mas inversamente proporcional à espessura (L) da parede.

4.4.2.2 Resistência Térmica

Resistência térmica é a propriedade que mensura a dificuldade de passagem de calor (energia) através de um material [41].

Conceitualmente, esta propriedade faz analogia entre a difusão de calor e carga elétrica. Assim, como a resistência elétrica é associada à condução elétrica, a resistência térmica pode ser associada à condução de calor [10, 38].

A Figura 4.20 mostra o balanço de energia através da parede plana relacionada com o sistema de resistências em série.

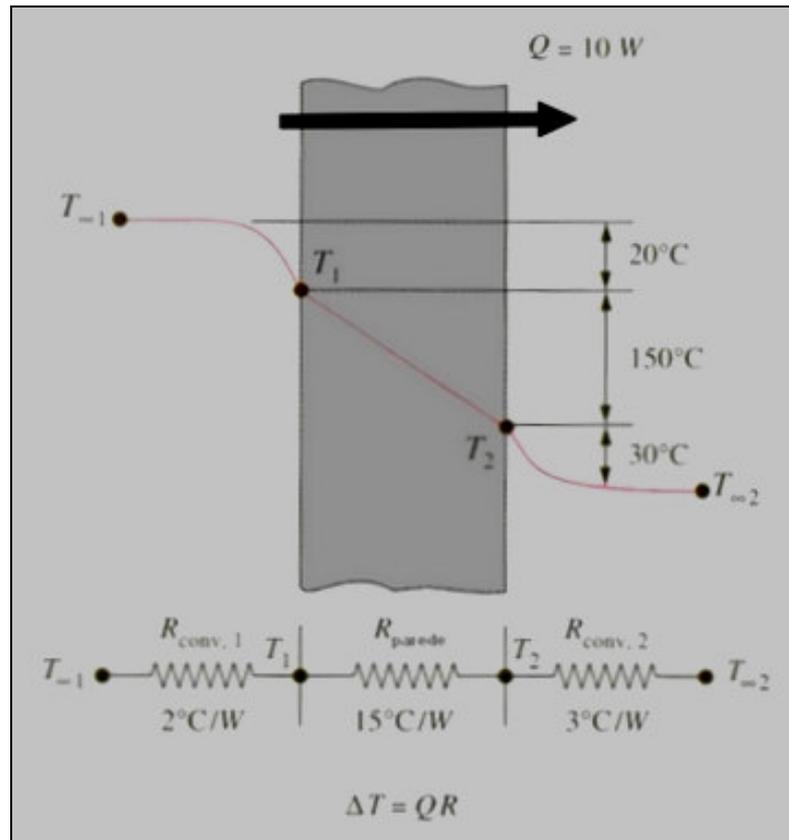


Figura 4.20: Balanço de energia através da parede plana. Analogia com o sistema de resistências em série [38].

Rearranjando a Equação 4.5, tem-se a Equação 4.6 e Equação 4.7, que mostram a resistência térmica para a condução em uma parede plana [10].

$$Q_{\text{condução,parede}} = T_1 - T_2 / R_{\text{condução,parede}} \quad (\text{Equação 4.6})$$

$$R_{\text{condução,parede}} = L / kA \quad (\text{Equação 4.7})$$

4.4.2.3 Paredes Planas Compostas

Paredes planas compostas consistem em paredes constituídas por diversas camadas de paredes de diferentes materiais. O mesmo conceito de resistência térmica pode ser utilizado para se determinar a taxa de transferência de calor através da parede composta [38].

A resistência térmica é calculada da mesma forma da parede plana simples, utilizando-se um circuito elétrico como analogia (Figura 4.21).

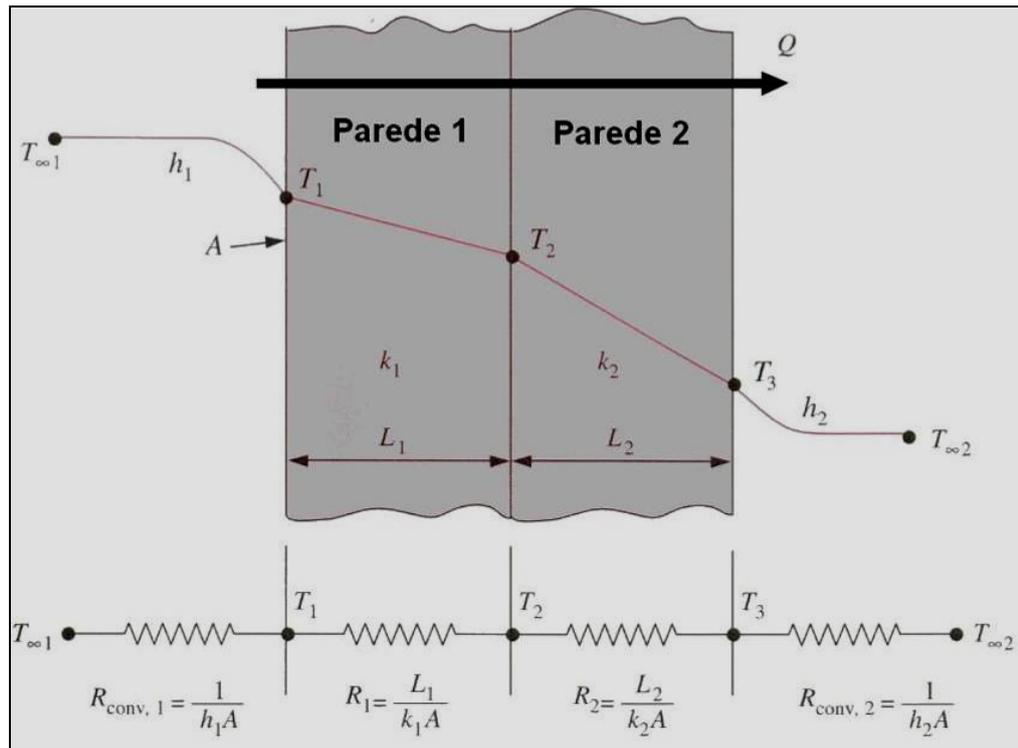


Figura 4.21: Balanço de energia através da parede composta. Analogia com o sistema de resistências em série [38].

4.4.3 Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente fótons), como resultado das modificações na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas. Diferente da transferência de energia por condução ou convecção que requer a presença de um meio material, a radiação não necessita dele. De fato, a transferência por radiação ocorre mais eficientemente e sem atenuação no vácuo [10, 38].

No estudo da transferência de calor o interesse é na radiação térmica, definida como a radiação emitida por um corpo devido a sua temperatura (Figura 4.22). Desta forma, toda matéria que se encontra a uma temperatura não-nula (acima do zero absoluto) emite radiação térmica. E a taxa de emissão desta radiação aumenta com o aumento da temperatura [10, 38].

A taxa máxima de radiação que pode ser emitida por uma superfície, conhecida como poder emissivo E da superfície, é previsto pela lei de Stefan-Boltzmann (Equação 4.8):

$$E = \sigma T_{sup}^4 \quad (\text{Equação 4.8})$$

onde T_{sup} é a temperatura absoluta (K) da superfície, e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^4$).

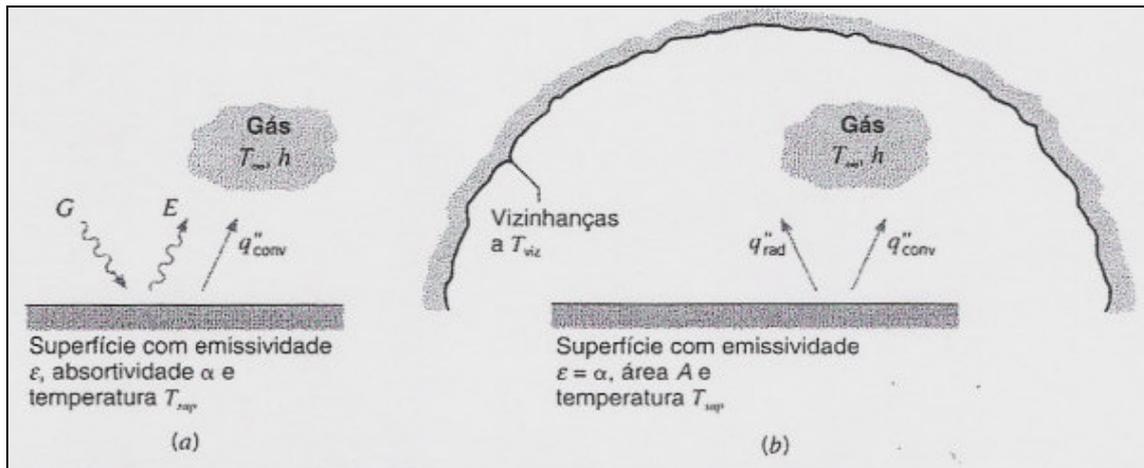


Figura 4.22: Transferência por radiação: a) em superfície e b) entre uma superfície e uma grande vizinhança [10].

4.4.3.1 Corpo Negro (Blackbody)

Em 1860, Kirchhoff definiu o corpo negro como uma superfície que nem reflete nem transmite, mas absorve toda a radiação incidente, independente de sua direção e comprimento de onda [42]. Assim, o corpo negro é um perfeito emissor e absorvedor de radiação, considerado uma superfície ideal [10, 38]. Além disso:

- i) Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independente do comprimento de onda e da direção;
- ii) Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro;
- iii) Embora a radiação emitida por um corpo negro seja função do comprimento de onda e temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso.

Como um absorvedor e emissor perfeito, o corpo negro serve como um padrão com o qual as propriedades radioativas de superfícies reais podem ser comparadas. Matematicamente, uma superfície é chamada de corpo negro quando emite o máximo poder emissivo E (Equação 4.8) [10, 42].

4.4.3.2 Emissividade

Em uma superfície real, o fluxo de calor emitido é menor do que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura. Desta forma, o poder emissivo de uma superfície real é previsto pela Equação 4.9:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4 \quad (\text{Equação 4.9})$$

onde ε é uma propriedade radiante da superfície conhecida por emissividade [10, 38].

A emissividade mede a capacidade de emissão de energia da superfície em relação a um corpo negro, mensurando o quanto uma superfície está próxima deste. Com valores na faixa de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, a emissividade é fortemente depende do material da superfície e de seu acabamento [10, 38, 42].

Materiais com elevada emissividade, próximas de $\varepsilon = 1$, absorvem o calor que é irradiado sobre sua superfície. Materiais com baixa emissividade, próximas de $\varepsilon = 0$, refletem o calor irradiado.

Algumas generalizações quanto à emissividade dos materiais podem ser feitas [10]:

- i) A emissividade de superfícies metálicas é geralmente pequena, alcançando valores de 0,002 para ouro e prata polidos;
- ii) A presença de camadas de óxido pode aumentar significativamente a emissividade de superfícies metálicas;
- iii) A emissividade de não condutores é comparativamente alta, excedendo geralmente 0,6;
- iv) A emissividade de condutores cresce com o aumento da temperatura; entretanto, dependendo do material específico, a emissividade de não condutores pode ou crescer ou decrescer com o aumento da temperatura.

Como a emissividade depende fortemente da natureza da superfície, esta propriedade pode ser influenciada pelo método de fabricação do material, ciclo térmico, reações químicas com o ambiente, entre outros fatores. Em um projeto em que esta propriedade é importante, estas questões devem ser consideradas para a adequada escolha do material.

4.4.3.3 Irradiação

Como toda substância a uma temperatura não nula emite radiação térmica, todas as substâncias e corpos são constantemente bombardeados por radiação vinda de todas as direções e comprimentos de onda. A intensidade desta radiação incidente chama-se irradiação.

Quando uma radiação incide sobre um meio sólido (ou líquido), tem-se 3 processos resultantes desta interceptação: reflexão, absorção ou transmissão (Figura 4.23) [10]. Matematicamente, a irradiação G_{total} é representada pela Equação 4.10.

$$G_{total} = G_{reflexão} + G_{absorção} + G_{transmissão} \quad (\text{Equação 4.10})$$

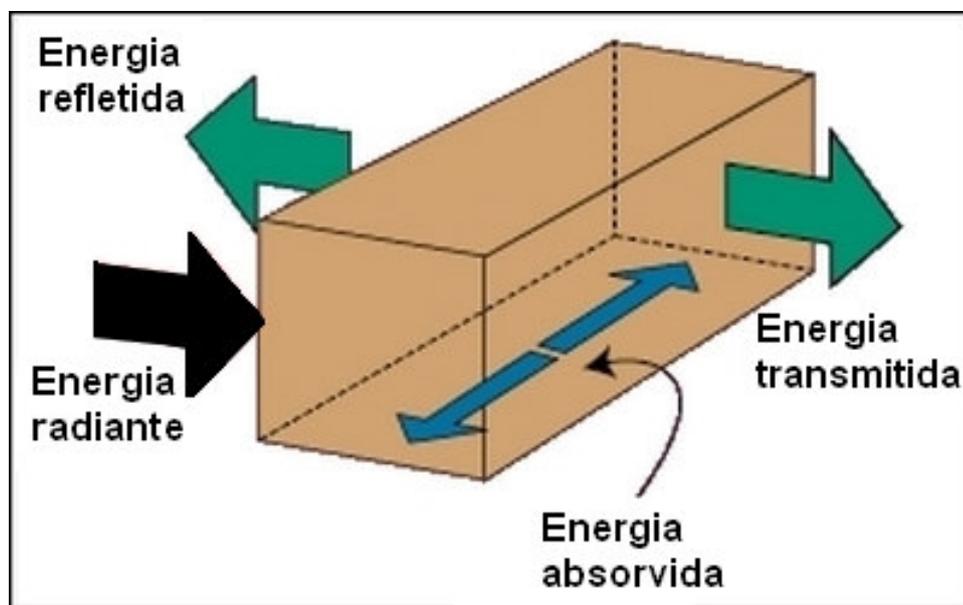


Figura 4.23: Balanço da irradiação sobre uma superfície: absorção, reflexão e transmissão [42].

4.4.3.4 Refletividade

A refletividade ou refletância é a propriedade que determina a fração da radiação incidente refletida por uma superfície. Matematicamente, a refletividade é definida pela Equação 4.11.

$$\rho = \text{radiação refletida} / \text{radiação incidente} \quad (\text{Equação 4.11})$$

Os valores de ρ variam entre $0 \leq \rho \leq 1$.

Na prática, as superfícies são consideradas processos de reflexão perfeitamente especular ou difuso. Na reflexão especular, como um espelho, o ângulo de reflexão é igual ao

ângulo de incidência da radiação. Na reflexão difusa, a radiação é refletida igualmente em todas as direções [10].

A reflexão de superfícies lisas e polidas se aproxima da reflexão especular, enquanto a reflexão de superfícies rugosas e irregulares se aproxima da reflexão difusa [10].

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Materiais

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais: i) aço revestido com Al-Si; ii) aço revestido com Zn-55Al; iii) alumínio; iv) isolante térmico Protec[®] e v) isolante térmico Fiberfrax[®] 970A. Para estes materiais foram considerados os valores de composição química, bem como os valores das propriedades físicas e químicas, informados nos descritivos técnicos de cada material. Apenas características específicas de cada material foram analisadas novamente, conforme sua relevância para o estudo. A escolha da espessura de cada material estudado está relacionada aos parâmetros usuais de fabricação e produção dos defletores de calor.

5.1.1 Aço revestido com Al-Si

Empregou-se uma chapa de aço de baixo carbono, plana, laminada a frio e recristalizada em um forno contínuo, revestida com uma liga de alumínio e de silício [18]. Chamado usualmente de aço aluminizado, é fornecido em bobinas e fabricado em diversas espessuras, variando desde a espessura de 0,25 mm até a espessura de 2 mm. Seu revestimento é aplicado por imersão contínua a quente, em um banho em fusão contendo 90% de alumínio e 10% de silício.

O aço revestido com Al-Si utilizado neste trabalho é classificado como do Tipo 1. A composição química e as propriedades mecânicas deste material seguem a norma DIN EN 10327 (especificação DX53D, Tabela 5.1) [18, 19].

Tabela 5.1: Composição química e as propriedades mecânicas do substrato de aço, conforme a norma DIN EN 10327 [20] e relatório de inspeção [43].

Ensaio	Norma DIN EN 10327	Relatório de inspeção
Composição química do metal base	C - 0,08 %	C - 0,004 %
	Mn - 0,50 %	Mn - 0,15 %
	P - 0,030 %	P - 0,013 %
	S - 0,030 %	S - 0,007 %
Composição química do revestimento	AS 120 A	AS 120 A
Resistência à tração	270 – 380 MPa	330 MPa

Limite de escoamento	140 – 260 MPa	175 MPa
Alongamento	26 % min. em 50 mm	38,3 % em 50 mm

O revestimento utilizado é classificado como AS 120 [18], com camada dupla face de 120 g.m⁻² e espessura de 20 µm [19]. Sua composição química é controlada através do banho em fusão pelo qual passa o substrato de aço durante o processo de imersão contínua a quente e certificada pelo fornecedor [43]. Neste trabalho, foi avaliado um aço revestido com Al-Si com espessura de e 0,4 +/- 0,06 mm.

5.1.2 Aço revestido com Zn-55Al

Empregou-se uma chapa de aço plana, revestida com uma liga de alumínio e de zinco (Zn-55Al), chamada comercialmente de Galvalume[®]. Esse material é fornecido em bobinas e fabricado em diversas espessuras, variando desde 0,43 mm até 2 mm. Seu revestimento é aplicado por imersão contínua a quente, em um banho em fusão contendo 55% de alumínio, 43% de zinco e um pequeno percentual de silício .

Quanto à composição química e as propriedades mecânicas, o aço segue a norma ASTM A 972 grau CS-A (estampado comum, Tabela 5.2), enquanto o revestimento atende os requerimentos da norma DIN EN 10327 [20], com massa mínima em ambas as faces de 150g.m⁻² (espessura mínima de 20 µm) [26]. Neste trabalho, foi avaliado um aço revestido com Zn-55Al de espessura de 0,43 +/- 0,07 mm.

Tabela 5.2: Composição química e as propriedades mecânicas do aço Galvalume[®], conforme a norma ASTM A 792 [33] e análise química do metal base [44].

Ensaio	Norma ASTM A 972	Análise química
Composição química do metal base	C - 0,10 %	C - 0,06 %
	Mn - 0,60%	Mn - 0,33 %
	P- 0,03%	P- 0,013 %
	S - 0,035%	S - 0,008 %
Resistência à tração	–	–
Limite de escoamento	205 – 410 MPa	–
Alongamento	20 % min em 50mm	–

5.1.3 Alumínio

Classificado como uma liga de alumínio 1050 O (Tabela 5.3), este material é composto de uma chapa metálica plana, fornecida em forma de *blanks* (chapa plana), sem nenhum revestimento superficial [45]. É basicamente o alumínio comercialmente puro, muito dúctil no estado recozido. Neste trabalho foi avaliado um alumínio com espessura de 0,4 +/- 0,025 mm.

Tabela 5.3: Composição química e as propriedades mecânicas do alumínio, conforme liga 1050 O [45] e certificado de análise de material [46].

Ensaio	Liga 1050 O	Certificado de análise
Composição química	Al – 99,5 % (min)	Al – 99,6 %
	Si - 0,25% (max)	Si - 0,05%
	Fe – 0,40% (max)	Fe– 0,29%
	Mn - 0,05% (max)	Mn – 0 %
	Zn– 0,05% (max)	Zn– 0 %
	Cu – 0,05% (max)	Cu– 0,01%
	Mg - 0,05% (max)	Mg – 0 %
Resistência à tração	65 – 95 MPa	73 MPa
Limite de escoamento	20 MPa (min)	42 MPa
Alongamento	-	20 % em 50 mm

5.1.4 Isolante térmico Protec[®]

O isolante térmico e acústico Protec[®] é um mineral da família das argilas micáceas, descrito como um silicato hidratado de magnésio, alumínio, cálcio e ferro (Tabela 5.4). Apresenta estrutura cristalina e lamelar, livre de asbestos [47, 48]. Utilizado na camada interna dos defletores de calor, possui baixa condutividade térmica e alta temperatura de amolecimento (ensaio com cone pirométrico, conforme norma NBR 9573).

Com alta estabilidade térmica, quando utilizado na camada intermediária dos defletores de calor, não apresenta emissão de gases ou fumaça, podendo ser aplicado em temperaturas de até 1000 °C [49]. Neste trabalho, foi estudado o isolante térmico Protec[®] com espessura variando de 0,8 mm a 1,2 mm.

Tabela 5.4: Composição química e propriedades físicas do isolante térmico Protec® [50].

Classificação	argila micácea
Composição química	SiO ₂ – 40 A 45 %
	MgO – 20 A 25 %
	Al ₂ O ₃ – 8 A 10 %
	Fe ₂ O ₃ – 8 A 12 %
	CaO ~ 2%
	TiO ₂ ~ 1 %
	MnO ~ 01, %
	Outros ~ 0,5%.
Condutividade térmica média - norma ASTM E 1225: 0,242 W/m.K	
Temperatura de amolecimento - norma NBR 9573: 1315 – 1326°C	
Perda ao fogo: 7,72 %	

5.1.5 Isolante térmico Fiberfrax® 970

O isolante térmico Fiberfrax® 970 é um material composto por fibras cerâmicas de sílica e alumina, lavadas e processadas ainda úmidas em uma máquina Fourdrinier (máquina de tela plana e folha contínua para produção de papel) [51].

Usualmente chamado de papel isolante, devido ao resultado do seu processo produtivo que gera uma folha flexível e de pouco peso, possui baixa condutividade térmica e boa resistência ao manuseio [51, 52]. É fornecido em rolos e fabricado em diversas espessuras, variando desde 0,5 mm até 3 mm (Figura 5.1).

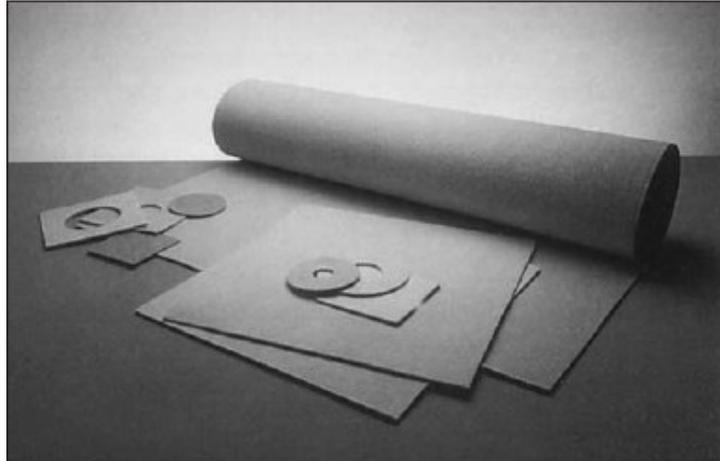


Figura 5.1: Fiberfrax[®] 970 A fornecido em rolos [52].

Este isolante, utilizado como isolante térmico na camada interna dos defletores de calor de 3 camadas, tem composição química típica descrita na Tabela 5.5. A condutividade térmica do Fiberfrax[®] 970 é apresentada na Figura 5.2. Neste trabalho foi estudado o isolante térmico Fiberfrax[®] 970 A, com espessura de 0,8 mm.

Tabela 5.5: Composição química do isolante térmico Fiberfrax[®] 970A [51, 52].

Classificação	Fibras de sílica e alumina
Composição química	SiO ₂ – 47 a 52 %
	Al ₂ O ₃ – 47 a 52 %
	Na ₂ O – < 0,5 %
	Fe ₂ O ₃ – < 0,05 %

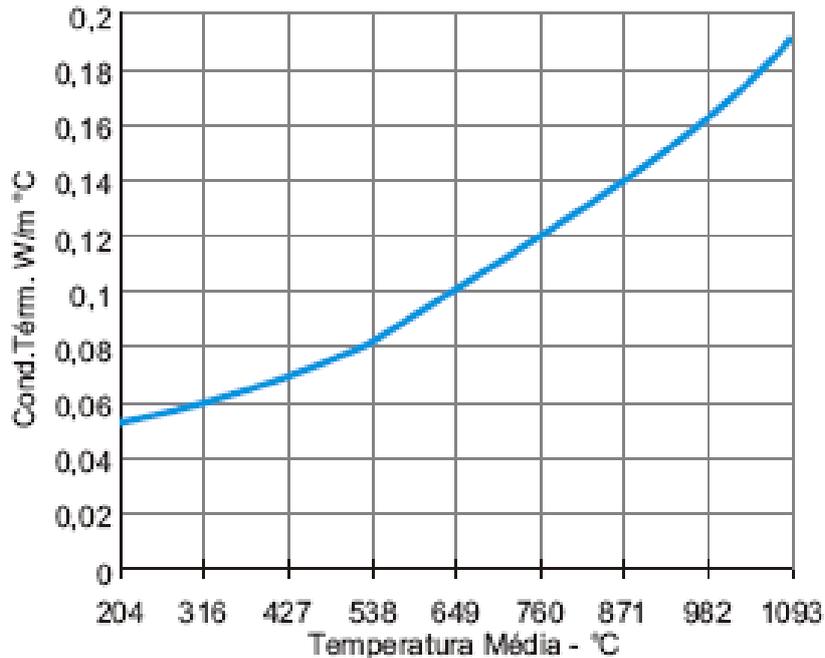


Figura 5.2: Gráfico de condutividade térmica em função da temperatura média conforme norma ASTM-C-177, para o isolante térmico Fiberfrax[®] 970 A [51].

5.2 Preparação e montagem dos sistemas

5.2.1 Preparação e confecção das amostras – Ensaio de resistência ao calor

Para a confecção das amostras do sistema construtivo de 3 camadas, para o ensaio de resistência ao calor, inicialmente foram obtidas por corte as camadas interna (tampa) e externa (bandeja) deste sistema, empregando-se para isso ferramentais de corte com lâmina de aço (Figura 5.3). Ambas as camadas foram confeccionadas na forma circular, com diâmetros de 150 mm para a camada interna e 160 mm para a camada externa (a fim de possibilitar o futuro fechamento do conjunto).

Após o corte das camadas, foi realizada a formação da aba lateral da camada externa (bandeja) empregando-se um ferramental de madeira (Figura 5.4). Para o corte das camadas e formação da aba lateral foi utilizada a Prensa Luxor (código MQ-0129).

Em uma terceira etapa, os isolantes Protec[®] e Fiberfrax[®] 970A foram recortados na forma circular (diâmetro de 150 mm) e posicionados no interior da camada externa formada na etapa anterior (Figura 5.5).

Por fim, as amostras do sistema construtivo de 3 camadas foram montadas e fechadas manualmente, com posterior planificação. A espessura destas amostras testadas foi de 1,6 +/- 0,2 mm.

Como amostras do sistema construtivo de 1 camada, para o ensaio de resistência ao calor, foram utilizadas amostras da camada interna do sistema construtivo de 3 camadas, com obtenção e dimensão descritas anteriormente.



Figura 5.3: Ferramental de corte das camadas interna (tampa) e externa (bandeja).

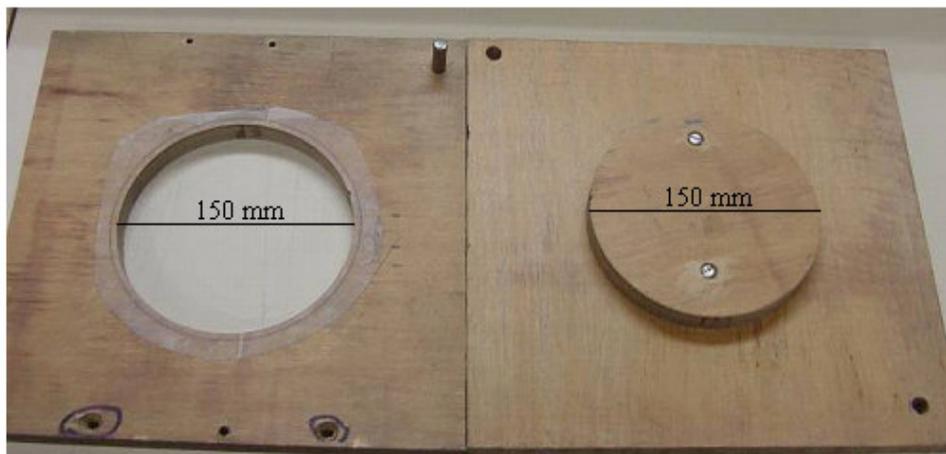


Figura 5.4: Ferramental de conformação – aba lateral da camada externa (bandeja).

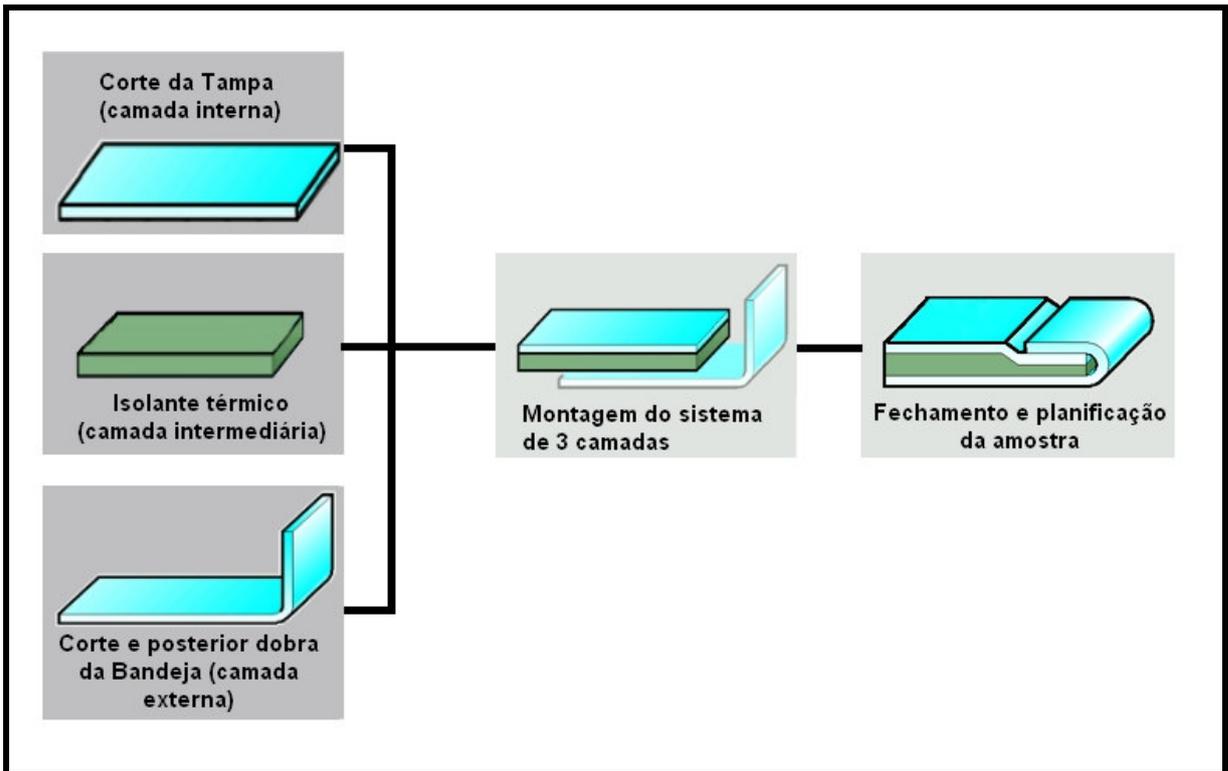


Figura 5.5: Fluxograma do processo de preparação e montagem do sistema construtivo de 3 camadas

5.2.2 Preparação e confecção das amostras simulando corpos negros

As amostras para simular os corpos negros (para o ensaio de resistência ao calor) foram confeccionadas da mesma forma que as demais amostras, mas com posterior aplicação de tinta preta especial para superfícies metálicas.

Para a pintura da superfície das amostras, foi utilizada a tinta Color Jet Alta Temperatura, do fabricante Tintas Renner. É uma pintura *spray* indicada para superfícies metálicas expostas a temperaturas de até 600°C, tanto em interiores como para exteriores. É recomendada especialmente para escapamentos de automóveis, motocicletas e lareiras [53].

O modo de aplicação seguiu a indicação do fabricante. Sobre a superfície metálica foram aplicadas duas camadas cruzadas de tinta (de baixa espessura), a uma distância de 250 mm da amostra para evitar escorrimento. Após a aplicação, a secagem física da tinta ocorreu por 30 minutos, à temperatura ambiente. Por fim, as amostras pintadas foram submetidas à secagem na estufa por 1h à temperatura de 250°C, para garantir a cura total da tinta e sua máxima resistência química e térmica (resistência à temperatura de até 600°C) [53].

5.3 Caracterização dos sistemas estudados

5.3.1 Ensaio de resistência ao calor

O ensaio de resistência ao calor consistiu na avaliação dos defletores de calor, submetidos à exposição em temperaturas elevadas. Como pode ser observado na Figura 5.6 e na Figura 5.6, a fonte de transmissão constante de calor ficou posicionada a 25 milímetros do defletor, que permaneceu apoiado em um anel circular de material cerâmico refratário. Externamente, pressionando o defletor ao anel cerâmico, tem-se um tubo cilíndrico de aço.

Esta configuração de ensaio está baseada nas normas FIAT 50570 [54] e 995670 [55], sendo adaptada e modificada para atender os requisitos específicos deste trabalho, conforme IVRM-LT-007 [56].

Para análise das temperaturas, três termopares foram utilizados no ensaio. O primeiro termopar (Termopar 1) foi fixado entre a chapa aquecedora e a amostra, na cavidade interna do equipamento. O segundo termopar (Termopar 2), fixado no tubo metálico, é posicionado na face externa do amostra, encostando na mesma. O terceiro e último termopar (Termopar 3) também está fixado ao tubo metálico, posicionado a trinta milímetros da amostra.

A partir do monitoramento da temperatura nos termopares 1 e 2, pode-se determinar um fator de eficiência (F), estabelecido de acordo com a Equação 5.1.

$$F_e = \frac{\text{Temperatura Termopar 1 (interno)}}{\text{Temperatura Termopar 2 (externo)}} \quad (\text{Equação 5.1})$$

A determinação desse fator teve como objetivo demonstrar a partir do ensaio de resistência ao calor, a forma construtiva mais eficiente para minimizar transferência do calor. Dessa forma, o menor fator de eficiência é 1, e representa a passagem e transmissão total do calor, com temperatura externa muito próxima ou igual à temperatura interna, e o maior fator de eficiência é 20, representando a menor passagem e transmissão do calor possível, com a temperatura externa medida próxima a temperatura ambiente (25°C).

O monitoramento da temperatura no termopar 3 permitiu observar e determinar o comportamento da temperatura externa ao ensaio de resistência ao calor, com o termopar posicionado trinta milímetros distante da amostra.

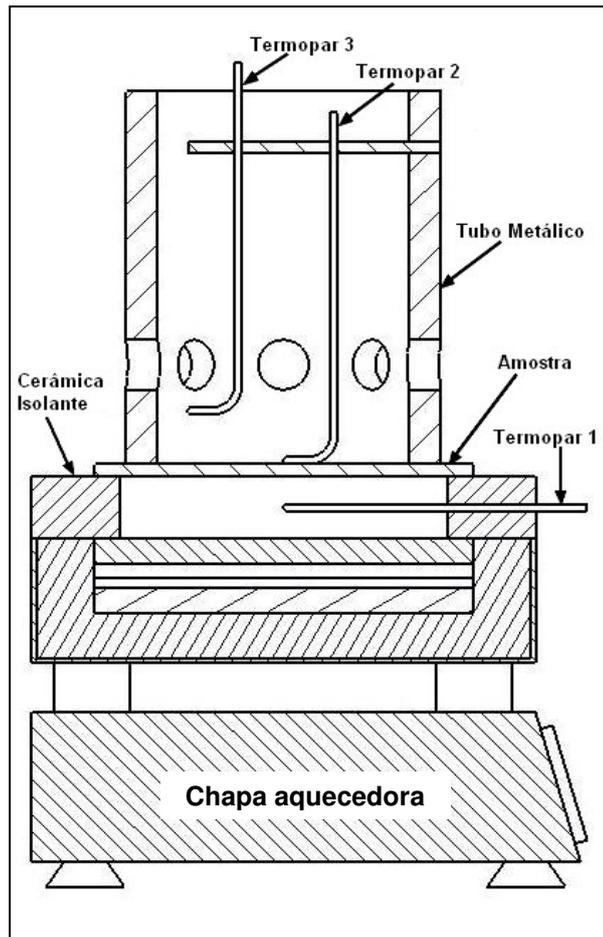


Figura 5.6: Figura esquemática do ensaio de resistência ao calor.

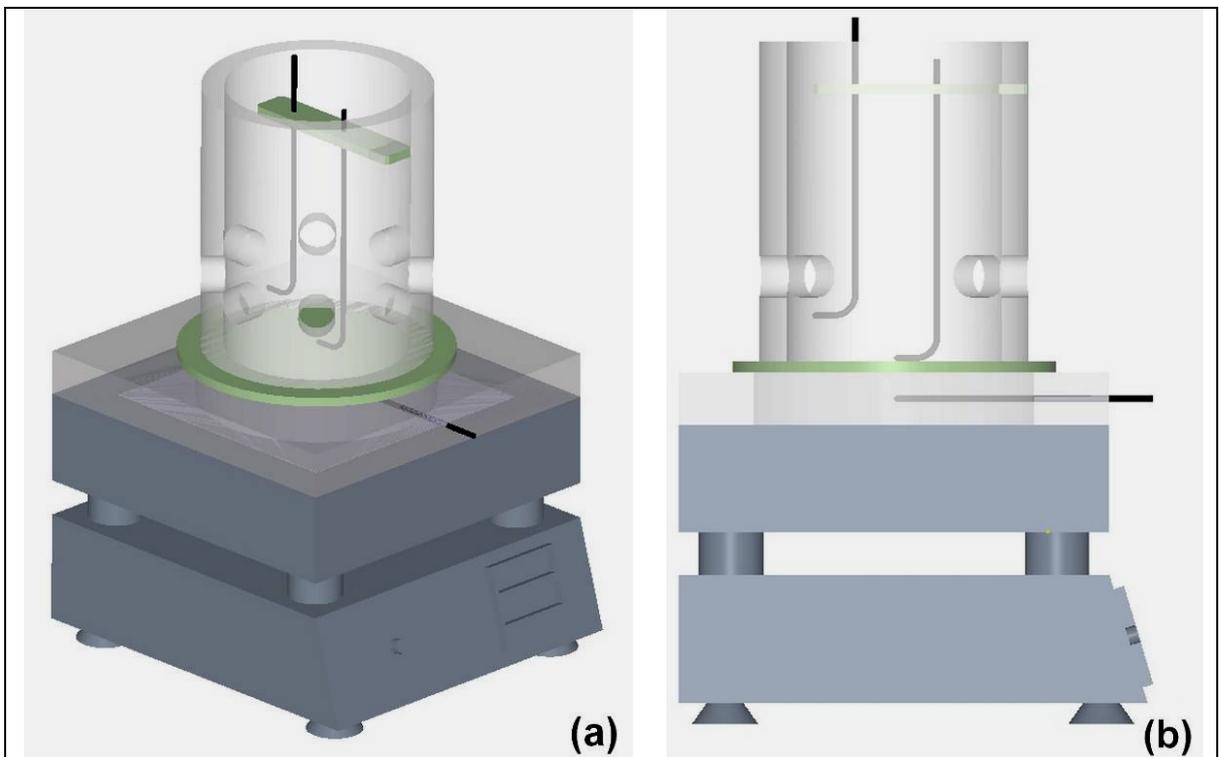


Figura 5.7: Modelo em três dimensões do ensaio de resistência ao calor: a) vista isométrica e b) vista lateral

Quanto aos parâmetros de teste, todos os ensaios começaram em uma temperatura da chapa aquecedora de 600°C, com temperatura constante, até o final do ensaio em 60 minutos. A temperatura ambiente não foi controlada, visando simular o ambiente de aplicação dos defletores no veículo.

O dispositivo utilizado neste ensaio era constituído de uma chapa aquecedora fabricada pela Irmãos Sanchis; com termopares tipo K, fabricados pela Ecil; um cilindro metálico em aço carbono 1020, e um controlador microprocessador NE-2000, fabricado pela Novus. Foram testadas 3 amostras de cada material, confeccionadas com as formas construtivas de 1 camada e 3 camadas.

Visando simular um corpo negro e realizar uma análise comparativa de seu desempenho com o desempenho do mesmo material com superfície normal de trabalho, apenas uma amostra de cada forma construtiva e material foi pintada com tinta preta e ensaiada, de acordo com os mesmos parâmetros das demais amostras testadas. Essa análise possibilitou avaliar a influência específica da refletividade de cada material e sistema ensaiado.

5.3.2 Análise da secção transversal e determinação da espessura dos revestimentos de Al-Si e Zn-55Al

Para análise da secção transversal e da espessura de camada dos revestimentos (antes do ensaio de resistência ao calor), uma amostra de cada material foi embutida em resina, lixada e polida, para posterior análise em um microscópio óptico e em um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL-JSM 5800 (locado no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS).

5.3.3 Morfologia superficial dos materiais

Para a análise e caracterização da morfologia superficial dos materiais metálicos, uma amostra de cada material com a forma construtiva de 1 camada foi observada antes e depois do ensaio de resistência ao calor nos microscópios óptico e eletrônico de varredura (MEV).

Para a análise e caracterização da morfologia superficial dos isolantes térmicos, uma amostra de cada material foi observada antes e depois do ensaio de resistência ao calor no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para possibilitar a análise e caracterização dos isolantes após o ensaio de resistência ao calor, uma amostra testada de cada uma das

configurações de 3 camadas foi aberta e de seu interior foi retirada a camada intermediária (isolante).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização da secção transversal e espessura dos revestimentos

6.1.1 Revestimento Al-Si

A Figura 6.1 e a Figura 6.2 apresentam as micrografias da secção transversal do aço revestido com Al-Si, observadas no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura, respectivamente. Os revestimentos apresentaram espessura média de $22,39 \pm 0,51 \mu\text{m}$.

Baseado na literatura tem-se, a partir dessas imagens (Figura 6.1 e Figura 6.2), a estrutura do revestimento composta pela camada intermetálica rugosa de Fe-Al-Si e a camada de Al-Si, com partículas escuras de Si dispersas na matriz base de Al [16, 18].

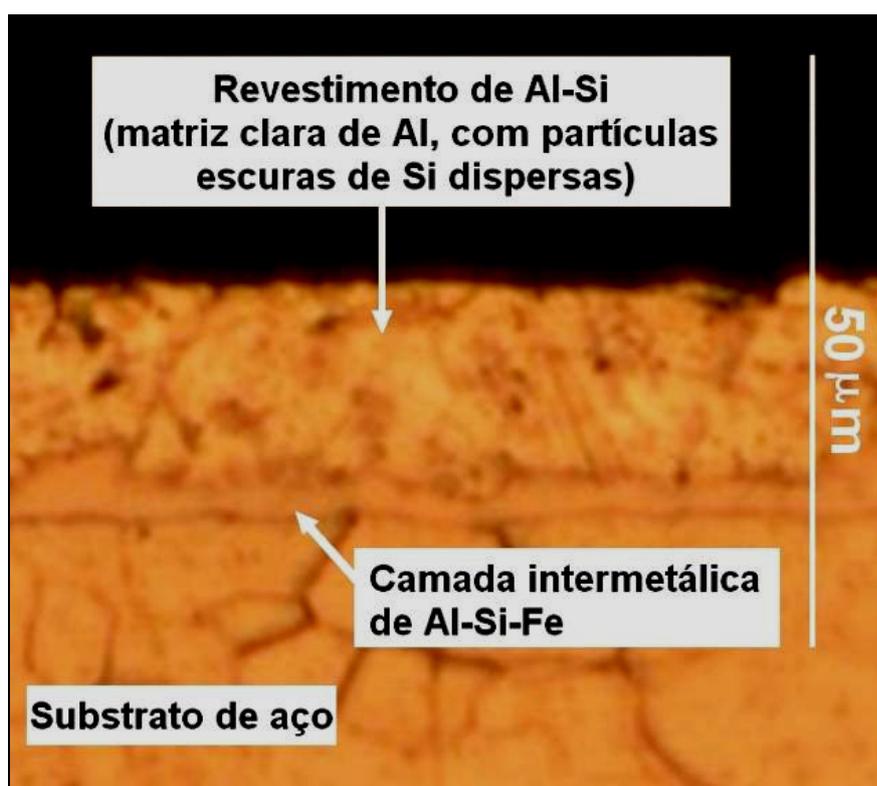


Figura 6.1: Secção transversal do revestimento de Al-Si, observada em microscópio óptico.

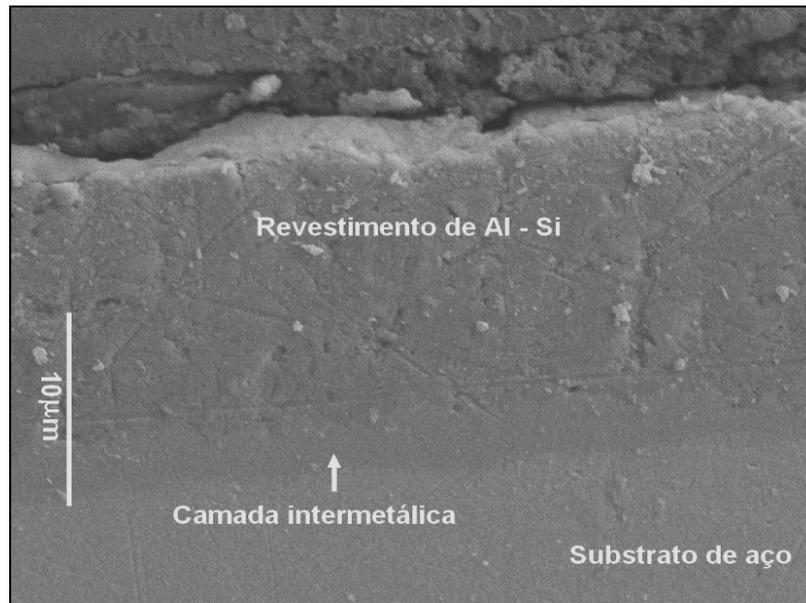


Figura 6.2: Secção transversal do revestimento de Al-Si, observada no MEV.

6.1.2 Revestimento Zn-55Al

A Figura 6.3 e a Figura 6.4 apresentam as micrografias da secção transversal do aço revestido com Zn-55Al, observados no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura, respectivamente. Os revestimentos apresentaram espessura média de $28,99 \pm 1,01 \mu\text{m}$. As imagens mostram a estrutura do revestimento (conforme descrito na literatura), constituída pela camada intermetálica rugosa de Fe-Zn-Al-Si e a camada de Zn-Al, composta por 2 diferentes regiões: uma região clara das dendritas de Al e uma região escura interdendrítica de Zn [18].

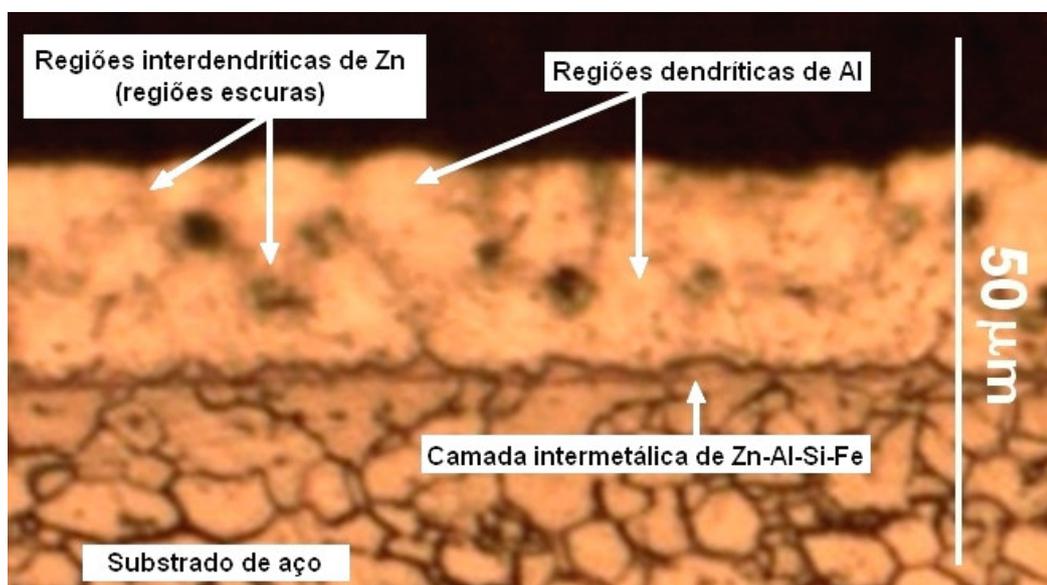


Figura 6.3: Secção transversal do revestimento de Zn-55Al observada no microscópio ótico.

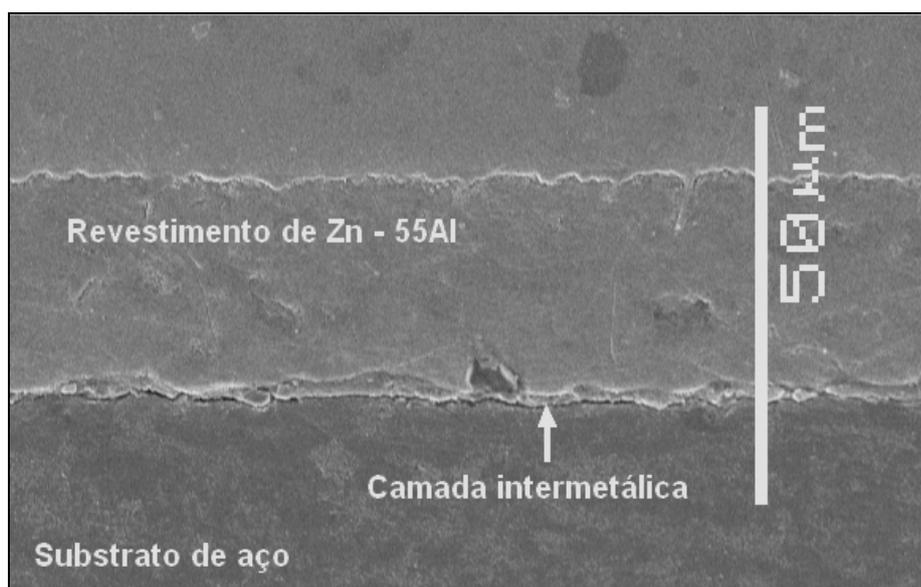


Figura 6.4: Secção transversal do revestimento de Zn-55Al, observada no MEV

6.2 Ensaio de Resistência ao Calor

6.2.1 Configuração de 1 camada

A partir da Tabela 6.1, é possível observar as médias das temperaturas medidas nos termopares 1 e 2 e os fatores de eficiência de cada material, testados no ensaio de resistência ao calor com a configuração de 1 camada.

As médias das temperaturas medidas no termopar 3, com os desvios padrões são apresentadas na

Tabela 6.2. A variação das medias das medições de temperatura dos termopares 1, 2 e 3 é apresentada graficamente na Figura 6.5.

Nesta configuração, o material alumínio apresentou o maior valor para o fator de eficiência, indicando que nas condições estudadas, esse material é o mais eficiente para a configuração de 1 camada. Este resultado está conforme o esperado, devido à maior refletividade (menor emissividade) do alumínio, quando comparado com os demais materiais ensaiados.

Os resultados obtidos no termopar 3 indicaram que a temperatura externa a 30 milímetros da amostra é relativamente baixa, independente do material ensaiado para a configuração de 1 camada.

Tabela 6.1: Médias das temperaturas medidas nos termopares 1 e 2 e dos fatores de eficiência, obtidos para a configuração de 1 camada.

Configuração	Termopar 1 / Desvio Padrão (°C)	Termopar 2 / Desvio Padrão (°C)	Fator de Eficiência/ Desvio Padrão
Aço revestido com Al-Si	446,33 +/- 5,81	173,47 +/- 1,36	2,57 +/- 0,053
Aço revestido com Zn-55Al	446,00 +/- 4,64	184,37 +/- 4,02	2,42 +/- 0,07
Alumínio	421,43 +/- 4,27	127,10 +/- 2,26	3,31 +/- 0,05

Tabela 6.2: Médias das temperaturas medidas no termopar 3 para a configuração de 1 camada.

Configuração	Termopar 3 / Desvio Padrão (°C)
Aço revestido com Al-Si	56,03 +/- 3,15
Aço revestido com Zn-55Al	61,60 +/- 2,09
Alumínio	59,03 +/- 6,53

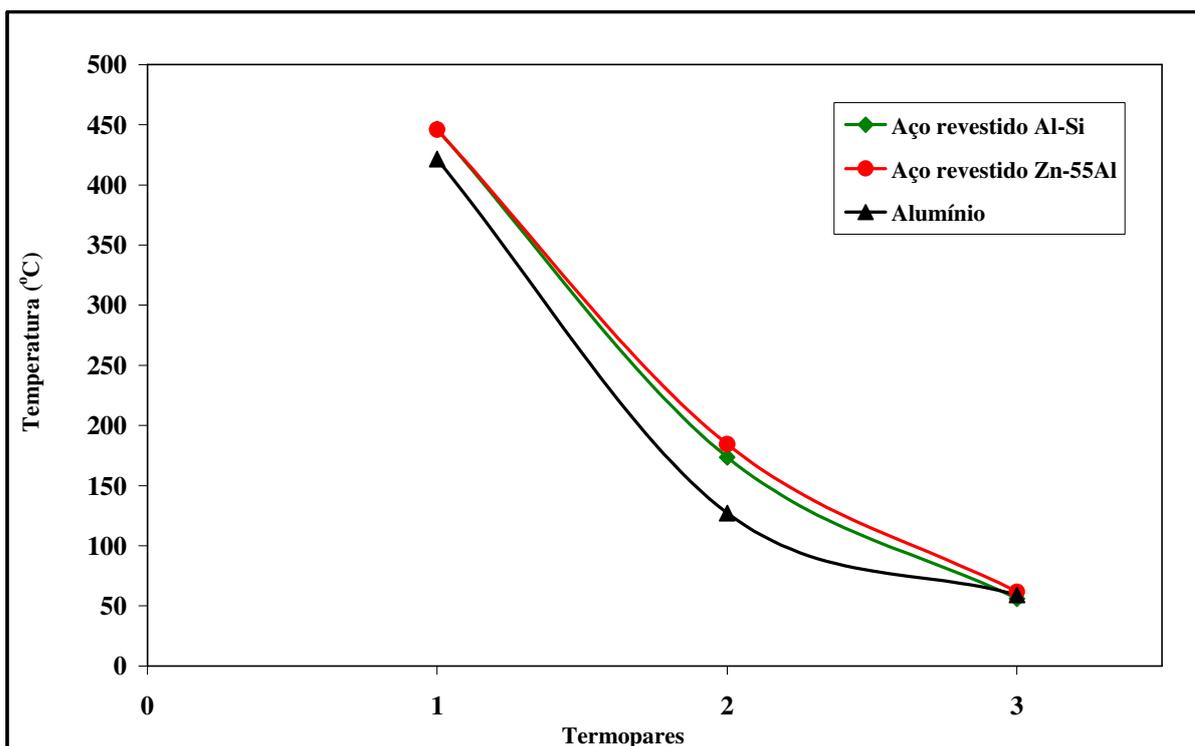


Figura 6.5: Médias de temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3, para os materiais testados na configuração de 1 camada.

6.2.2 Configuração de 3 camadas

A Tabela 6.3 apresenta as médias das temperaturas medidas nos termopares 1 e 2 e os fatores de eficiência de cada material, testados no ensaio de resistência ao calor com a configuração de 3 camadas.

A Tabela 6.4 descreve as médias das temperaturas monitoradas a partir do termopar 3, com os respectivos desvios padrões. A Figura 6.6 apresenta graficamente a variação das médias das temperaturas monitoradas a partir dos termopares 1, 2 e 3. Nesta configuração, o material alumínio com o isolante térmico Fiberfrax[®] apresentou o maior valor para o fator de eficiência, indicando que essa combinação de materiais é a mais eficiente para a configuração de 3 camadas, nas condições investigadas. Este resultado é decorrente da união de duas propriedades: a maior refletividade (menor emissividade) do alumínio e a menor condutividade térmica do isolante Fiberfrax[®].

Os resultados obtidos no termopar 3 indicaram que a temperatura externa a 30 milímetros da amostra é relativamente baixa independente do material ensaiado para a configuração de 3 camadas.

Tabela 6.3: Médias das temperaturas medidas nos termopares 1 e 2 e dos fatores de eficiência, obtidos para a configuração de 3 camadas .

Material	Termopar 1 / Desvio Padrão (°C)	Termopar 2 / Desvio Padrão (°C)	Fator de Eficiência/ Desvio Padrão
Aço revestido com Al-Si + Protec [®]	468,73 +/- 9,06	144,07 +/- 6,07	3,25 +/- 0,083
Aço revestido com Al-Si + Fiberfrax [®]	473,63 +/- 10,34	129,27 +/- 5,60	3,66 +/- 0,085
Aço revestido com Zn-55Al + Protec [®]	455,07 +/- 6,63	129,80 +/- 6,46	3,51 +/- 0,12
Aço revestido com Zn-55Al + Fiberfrax [®]	481,63 +/- 5,85	157,67 +/- 3,18	3,05 +/- 0,08
Alumínio + Protec [®]	414,20 +/- 4,22	115,80 +/- 2,52	3,57 +/- 0,08
Alumínio + Fiberfrax [®]	424,13 +/- 3,58	106,13 +/- 2,83	3,99 +/- 0,10

Tabela 6.4: Médias das temperaturas medidas no termopar 3 para a configuração de 3 camadas.

Configuração	Termopar 3 / Desvio Padrão (°C)
Aço revestido com Al-Si + Protec [®]	53,43 +/- 5,33
Aço revestido com Al-Si + Fiberfrax [®]	55,03 +/- 1,76
Aço revestido com Zn-55Al + Protec [®]	57,97 +/- 2,30
Aço revestido com Zn-55Al + Fiberfrax [®]	62,67 +/- 4,95
Alumínio + Protec [®]	60,53 +/- 1,90
Alumínio + Fiberfrax [®]	57,63 +/- 3,42

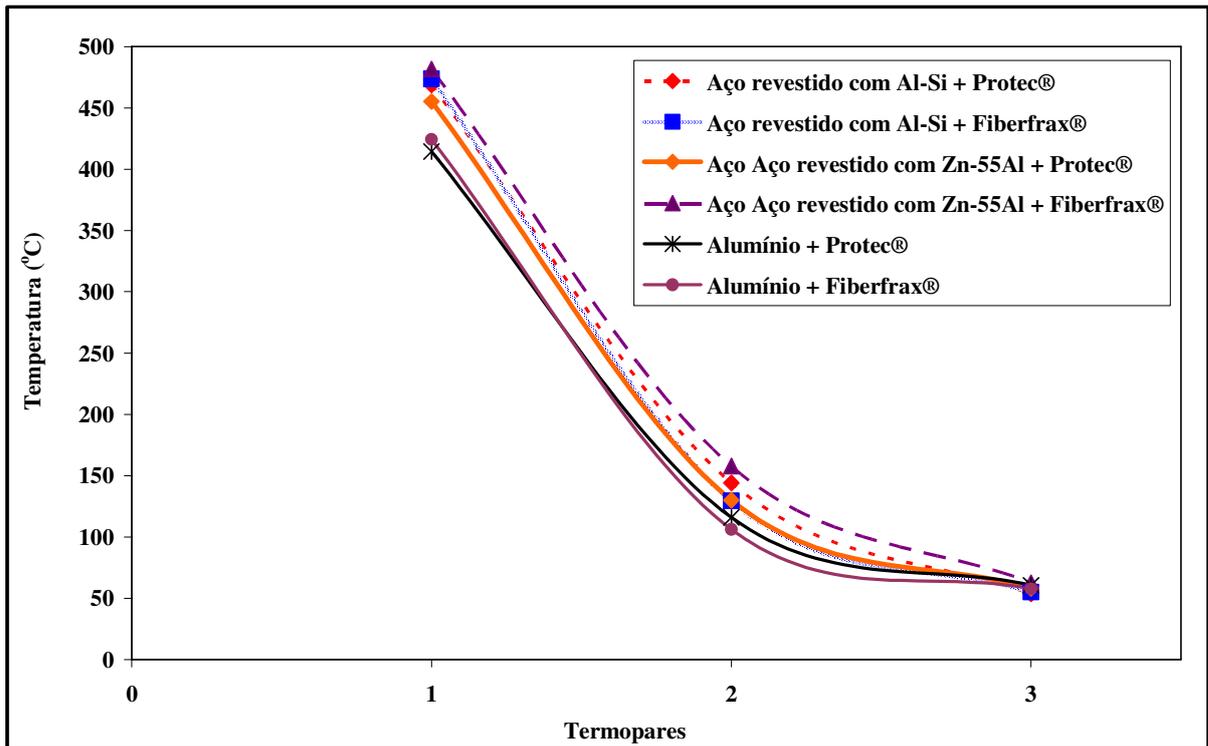


Figura 6.6: Médias das temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3 , para os materiais testados na configuração de 3 camadas.

6.2.3 Avaliação dos corpos negros

6.2.3.1 Configuração de 1 camada

A Tabela 6.5 apresenta as temperaturas e os fatores de eficiência nos ensaios dos materiais como corpos negros na configuração de 1 camada. A Figura 6.7 apresenta graficamente a variação das temperaturas medidas a partir dos termopares 1, 2 e 3.

Comparando-se o desempenho dos materiais testados como corpos negros na configuração de 1 camada com o desempenho destes mesmos materiais ensaiados com uma condição superficial normal de trabalho, observa-se um significativo decréscimo do fator de eficiência para todos os materiais ensaiados, simulando o comportamento de um corpo negro (Tabela 6.6).

Tabela 6.5: Temperaturas monitoradas a partir dos termopares 1, 2 e 3 e os fatores de eficiência obtidos para os corpos negros na configuração de 1 camada.

Material	Termopares			Fator de Eficiência
	1	2	3	
Aço revestido com Al-Si	379,5	261,9	65,7	1,45
Aço revestido com Zn-55Al	387,4	277,5	73,3	1,40
Alumínio	352,1	206	62,61	1,71

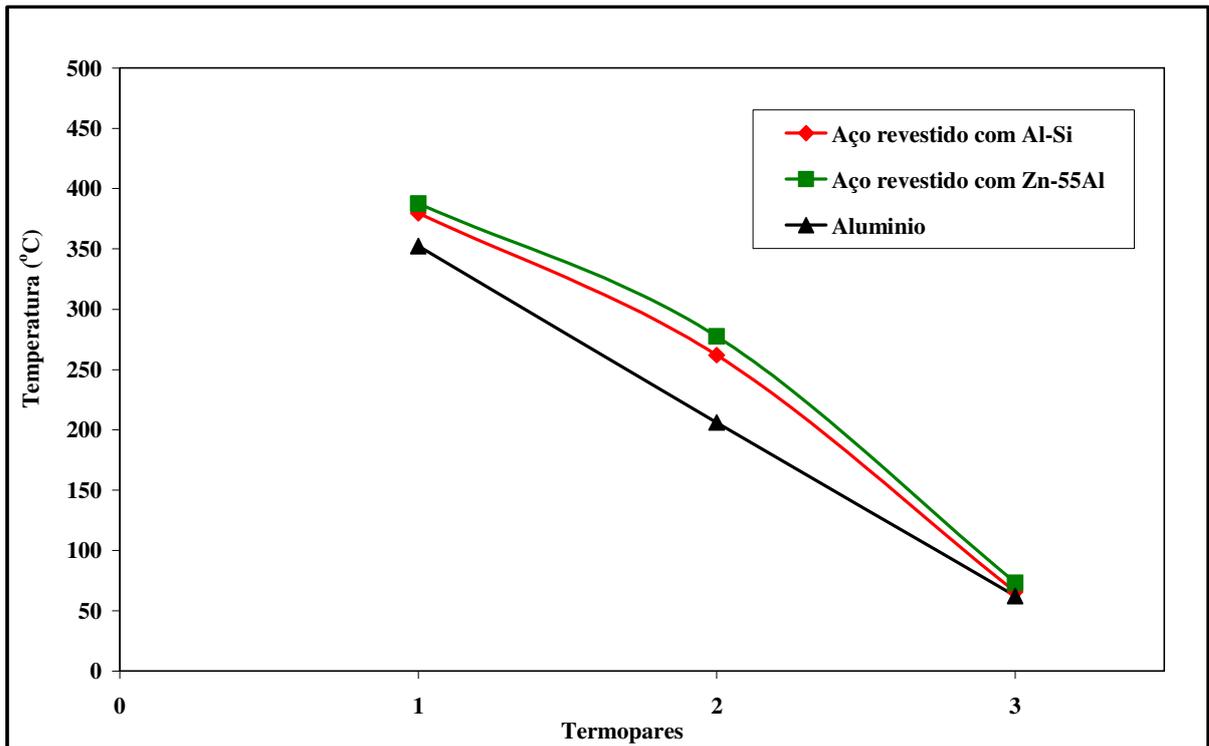


Figura 6.7: Temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3 , para os corpos negros testados na configuração de 1 camada.

O percentual de perda apresentado na Tabela 6.6 representa a diferença percentual entre os fatores de eficiência obtidos com a condição superficial normal dos materiais e a simulação dos corpos negros.

Quando a refletividade (uma propriedade característica da superfície dos materiais) foi desconsiderada do ensaio de resistência ao calor com a aplicação da tinta preta sobre a superfície das amostras, os materiais apresentaram um decréscimo da refletividade e por consequência um aumento da emissividade.

Estes resultados evidenciaram a importância da refletividade do material na configuração de 1 camada. Esta propriedade deve ser corretamente avaliada e considerada na utilização de defletores de calor com esta configuração, pois durante a vida útil do produto, sua superfície apresentará sujidades, o que pode comprometer significativamente seu desempenho. Contudo, não é possível afirmar em função da metodologia empregada (ensaio realizado com apenas uma amostra simulando o corpo negro), que houve uma diferença importante do percentual da perda de calor em função do material empregado.

Tabela 6. 6: Comparativo entre os fatores de eficiência dos corpos negros e dos materiais com uma condição superficial normal, para a configuração de 1 camada.

Material	Fator de Eficiência – Condição normal	Fator de Eficiência – Corpo Negro	Percentual de perda (%)
Aço revestido com Al-Si	2,57	1,45	44
Aço revestido com Zn-55Al	2,42	1,4	42
Alumínio	3,32	1,71	48

6.2.3.2 Configuração de 3 camadas

A Tabela 6.7 mostra o comportamento dos materiais ensaiados como corpos negros na configuração de 3 camadas. A Figura 6.9 apresenta graficamente a variação da temperatura nos termopares 1, 2 e 3.

Tabela 6.7: Médias das medições de temperatura dos termopares 1, 2 e 3 dos fatores de eficiência, obtidos para os corpos negros na configuração de 3 camadas.

Material	Termopares			Fator de Eficiência
	1	2	3	
Aço revestido com Al-Si + Protec®	383,9	180,8	60,5	2,12
Aço revestido com Al-Si + Fiberfrax®	396	148,5	57,3	2,67
Aço revestido com Zn-55Al + Protec®	389	171,7	61,1	2,27
Aço revestido com Zn-55Al + Fiberfrax®	398,1	163	58,8	2,44
Alumínio + Protec®	350	137,3	57,4	2,55
Alumínio + Fiberfrax®	353	138,2	55,6	2,55

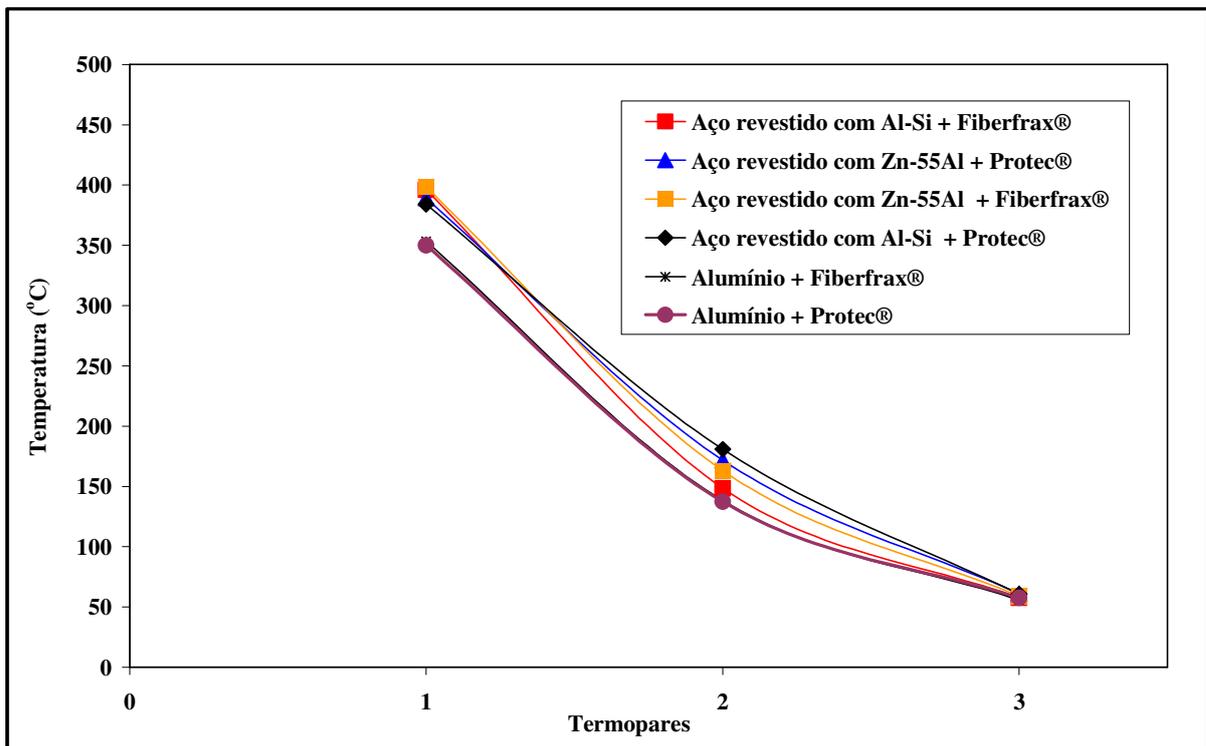


Figura 6.8: Temperaturas desenvolvidas nos termopares 1, 2 e 3 , para os corpos negros testados na configuração de 3 camadas.

Comparando-se o desempenho dos materiais testados como corpos negros na configuração de 3 camadas com o desempenho destes mesmos materiais ensaiados com uma condição superficial normal, observa-se um decréscimo do fator de eficiência (Tabela 6.10), para todos os materiais ensaiados.

O percentual de perda apresentado na Tabela 6.8 representa a diferença percentual entre os fatores de eficiência obtidos com a condição superficial normal dos materiais e a simulação dos corpos negros.

Quando a refletividade (uma propriedade característica da superfície dos materiais) foi desconsiderada do ensaio de resistência ao calor com a aplicação da tinta preta sobre a superfície das amostras, apesar do decréscimo da refletividade dos materiais, a existência do isolante térmico na camada intermediária aumentou a eficiência térmica deste sistema quando comparado com o sistema de 1 camada.

Estes resultados evidenciaram a importância da camada intermediária para a proteção do calor. Defletores de calor com esta configuração, mesmo com a existência das sujidades superficiais durante a vida útil do produto, apresentarão uma maior eficiência térmica que

defletores com a configuração de 1 camada. Da mesma forma que no caso anterior, não é possível afirmar, em função da metodologia empregada, que houve uma diferença importante do percentual da perda de calor em função do material empregado.

Tabela 6.8: Comparativo percentual entre fatores de eficiência dos corpos negros com os de materiais com uma condição superficial normal para a configuração de 3 camadas.

Material	Fator de Eficiência – Condição normal	Fator de Eficiência – Corpo Negro	Percentual de perda (%)
Aço revestido com Al-Si + Protec®	3,26	2,12	35
Aço revestido com Al-Si + Fiberfrax®	3,67	2,67	27
Aço revestido com Zn-55Al + Protec®	3,51	2,27	35
Aço revestido com Zn-55Al + Fiberfrax®	3,06	2,44	20
Alumínio + Protec®	3,58	2,55	29
Alumínio + Fiberfrax®	4,00	2,55	36

6.3 Análise da superfície dos materiais antes e após o ensaio de resistência ao calor

6.3.1 Análise do revestimento de Al-Si

6.3.1.1 Análise morfológica por microscopia óptica

A Figura 6.9 apresenta a morfologia superficial do revestimento de Al-Si, antes e depois do ensaio de resistência ao calor.

A partir das análises por microscopia óptica, não foi possível observar alterações superficiais no revestimento após o ensaio de resistência ao calor.

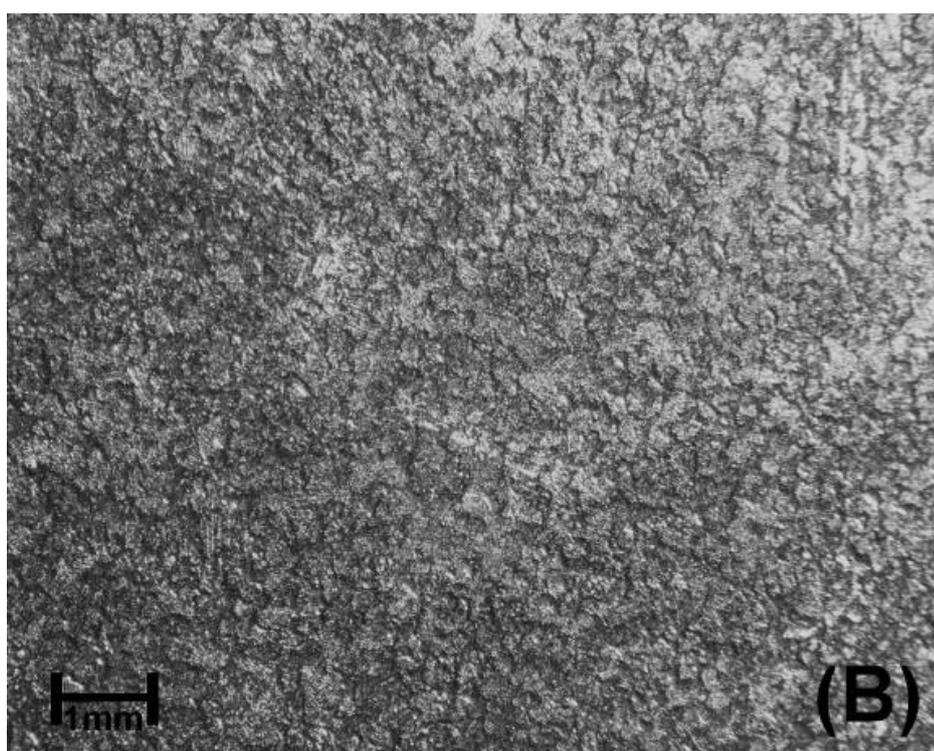
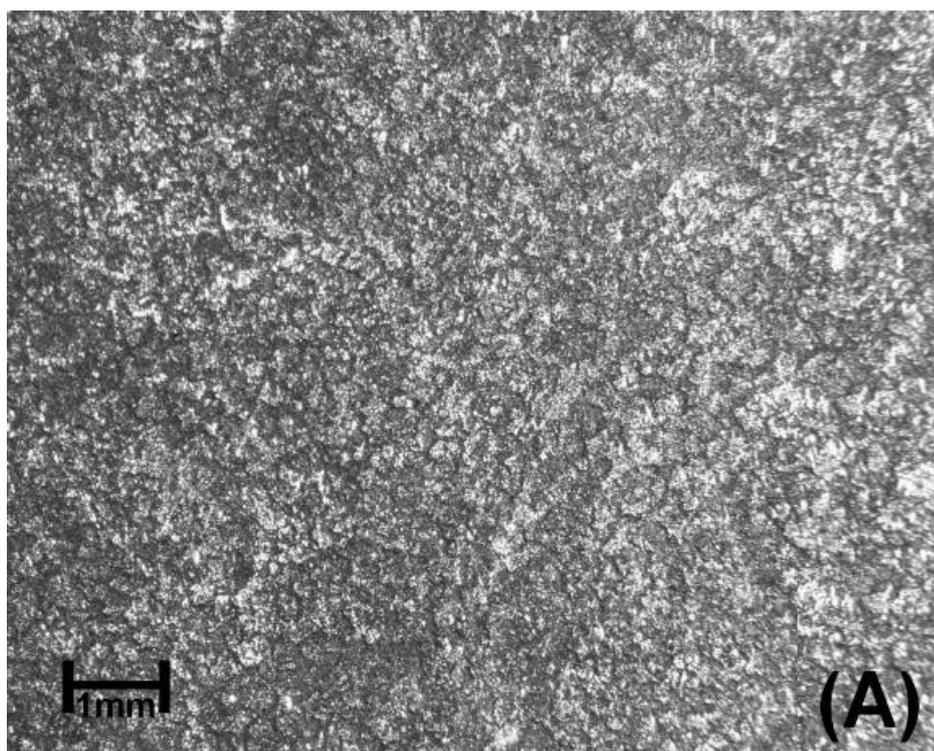


Figura 6.9: Análise do revestimento de Al-Si no microscópio óptico: A) revestimento antes do ensaio de resistência ao calor e B) revestimento após o ensaio de resistência ao calor.

6.3.1.2 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura

A partir da Figura 6.10 é possível observar a morfologia superficial do revestimento de Al-Si antes do ensaio de resistência ao calor. A superfície do revestimento apresenta partículas dispersas de silício formadas sobre a matriz de alumínio [23], conforme a Figura 4.8. As regiões assinaladas evidenciam a existência de pequenos orifícios dispersos no revestimento, os quais são mostrados em detalhe na Figura 6.11.

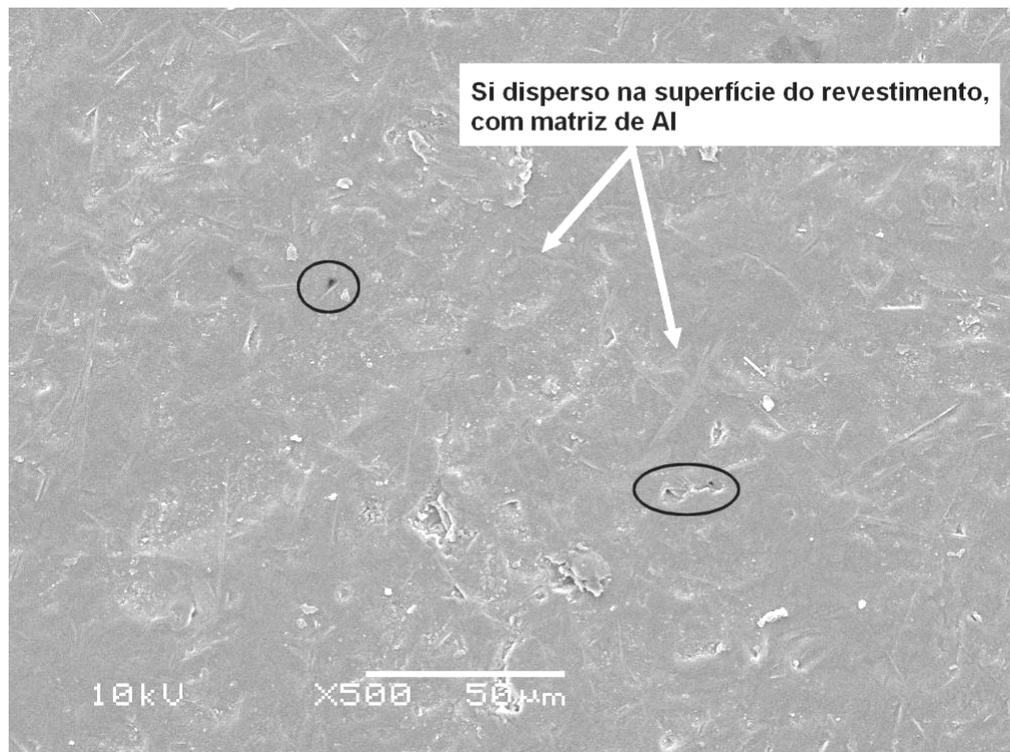


Figura 6.10: Revestimento de Al-Si antes do ensaio de resistência ao calor. Descrição da morfologia superficial conforme literatura [23].

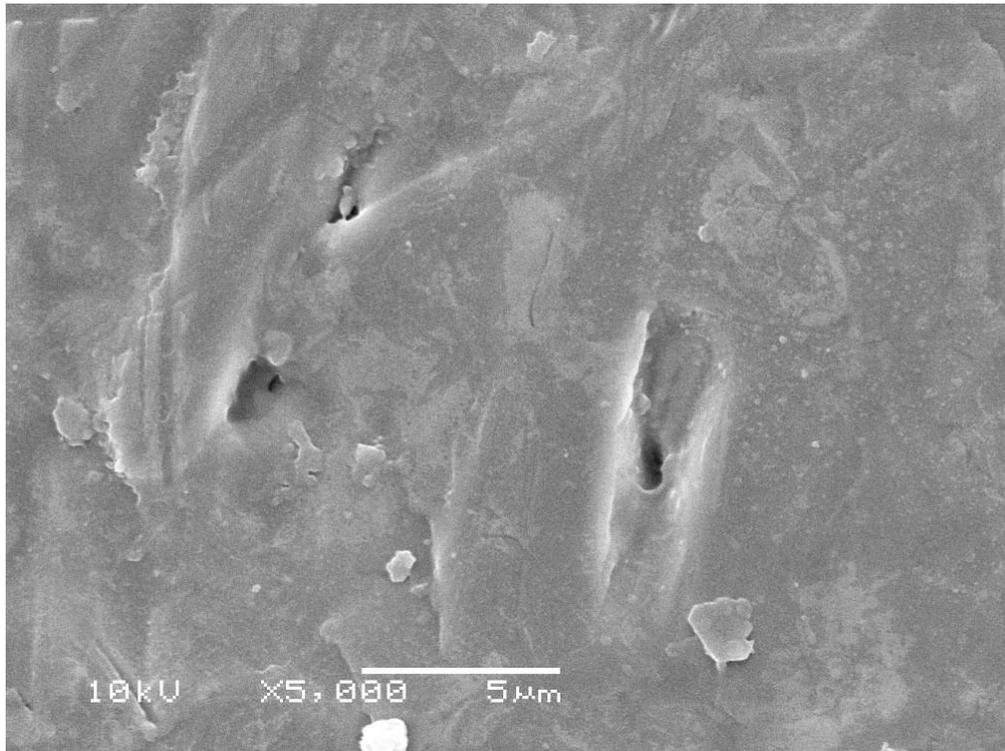


Figura 6.11: Micrografia superficial do revestimento de Al-Si antes do ensaio de resistência ao calor, observada no MEV. Detalhe dos orifícios dispersos no revestimento.

A partir da Figura 6.12 é possível observar a morfologia superficial do revestimento de Al-Si após o ensaio de resistência ao calor. As regiões assinaladas evidenciam a existência de pequenos orifícios dispersos no revestimento os quais são mostrados em detalhe na Figura 6.13. A superfície do revestimento não apresentou alterações morfológicas significativas após o ensaio de resistência ao calor.

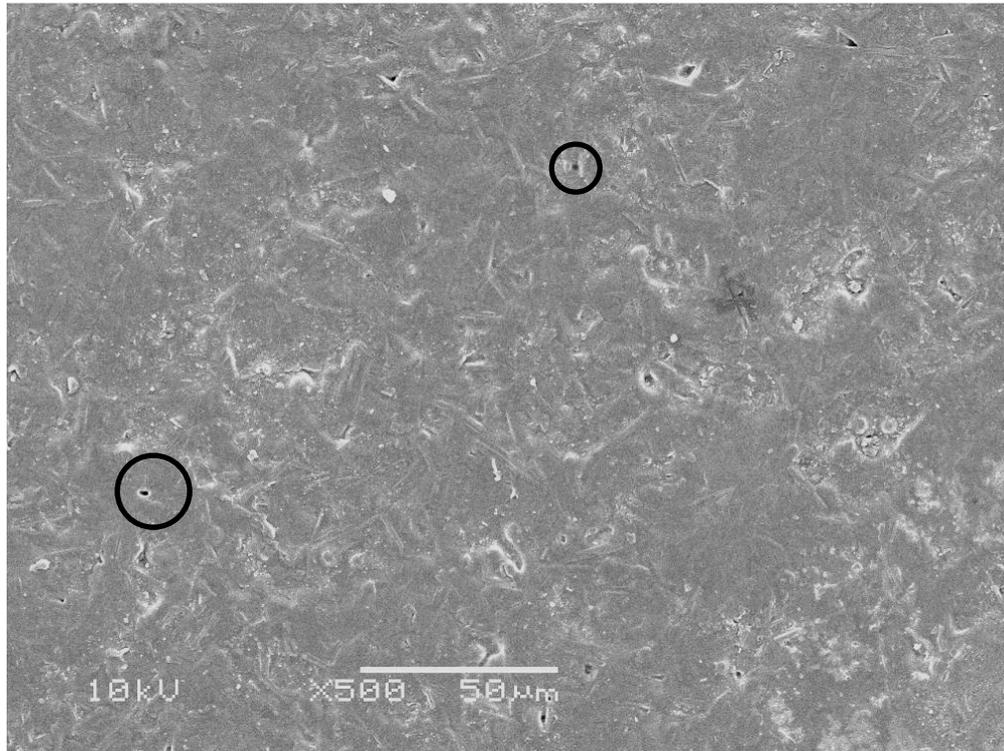


Figura 6.12: Micrografia superficial do revestimento de Al-Si após o ensaio de resistência ao calor, observada no MEV.

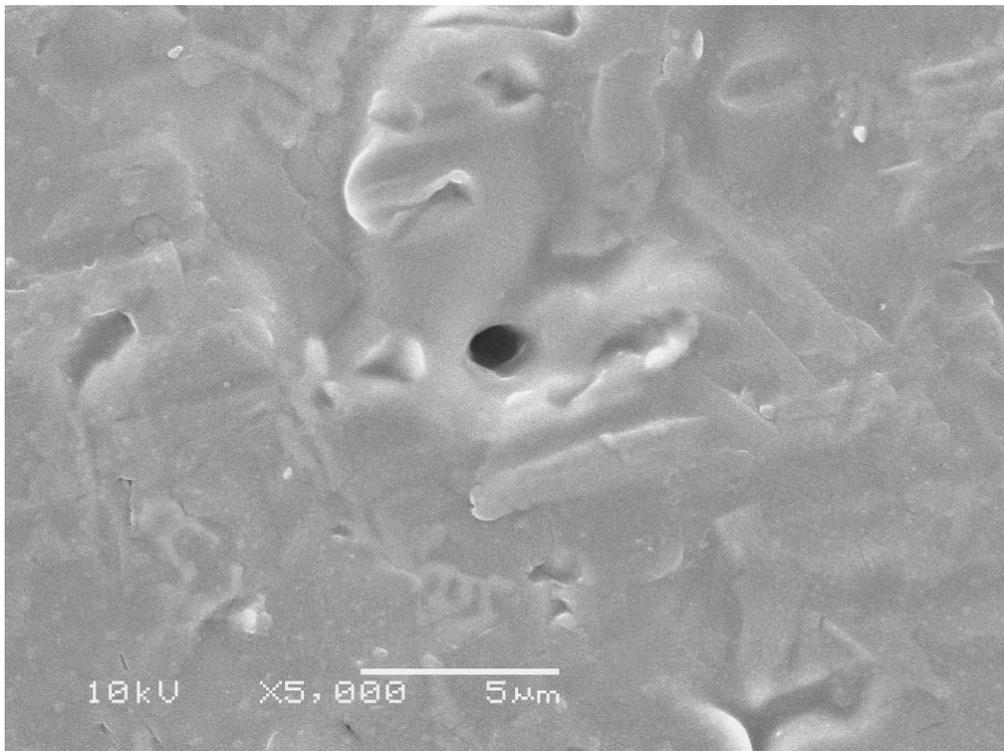


Figura 6.13: Micrografia superficial do revestimento de Al-Si após o ensaio de resistência ao calor, observada no MEV. Detalhe de um orifício disperso no revestimento.

6.3.2 *Análise do revestimento de Zn-55Al*

6.3.2.1 *Análise por microscopia óptica*

A Figura 6.14 apresenta a morfologia superficial do revestimento de Zn-55Al, antes e depois do ensaio de resistência ao calor. Não foi possível observar alterações superficiais no revestimento após o ensaio de resistência ao calor a partir da análise em microscopia óptica.

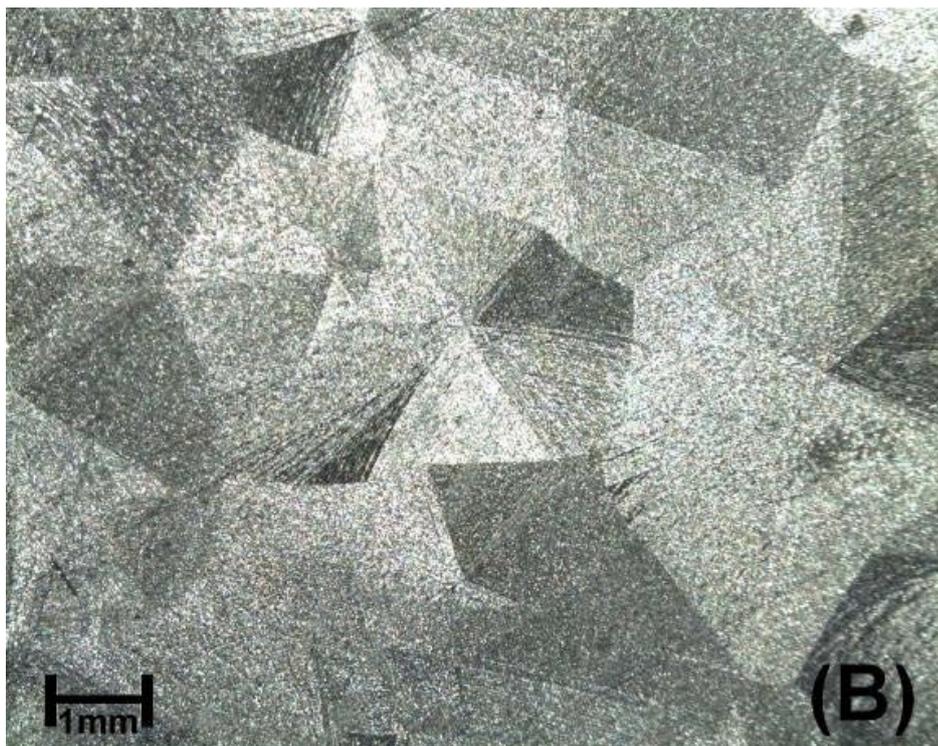
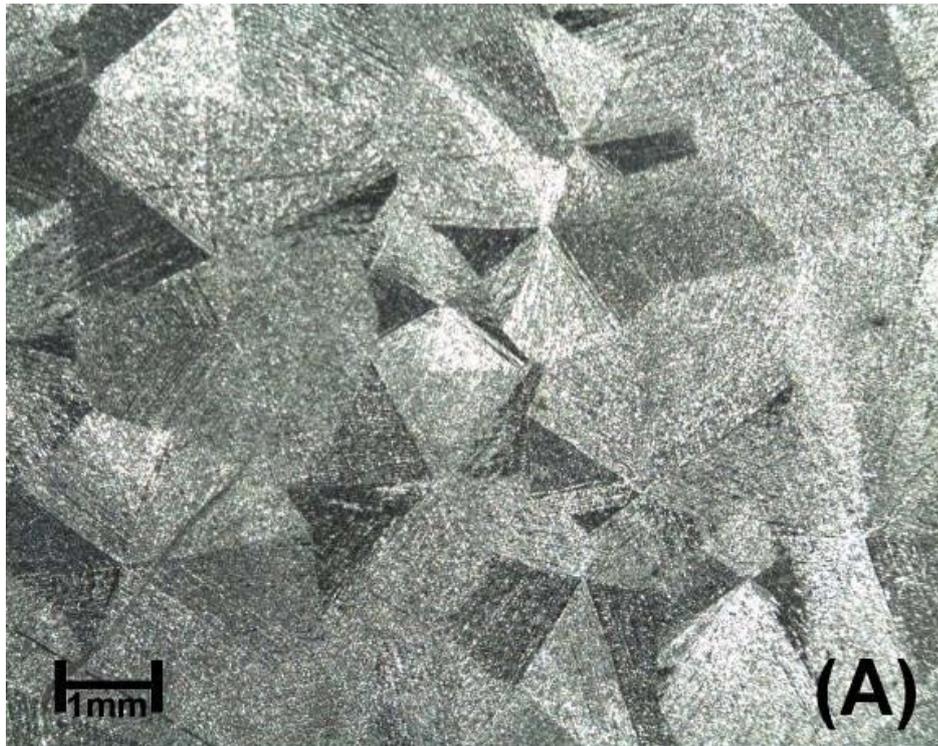


Figura 6.14: Análise do revestimento de Zn-55Al no microscópio óptico: A) revestimento antes do ensaio de resistência ao calor e B) revestimento após o ensaio de resistência ao calor.

6.3.2.2 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura

A Figura 6.15, a Figura 6.16 e a Figura 6.17 mostram a morfologia superficial do revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor.

A Figura 6.15 apresenta a superfície do revestimento, formada por uma matriz dendrítica de alumínio (região clara), envolvida por uma mistura interdendrítica rica em zinco (região escura) [31]. A Figura 6.16 apresenta as duas regiões distintas do revestimento: região escura formada pela região interdendrítica rica em zinco (1) e região clara formada pelas dendritas de alumínio (2).

A Figura 6.17 apresenta um detalhamento da região formada pelas dendritas de alumínio, constituída por regiões escuras de Zn e regiões claras de Al [31].

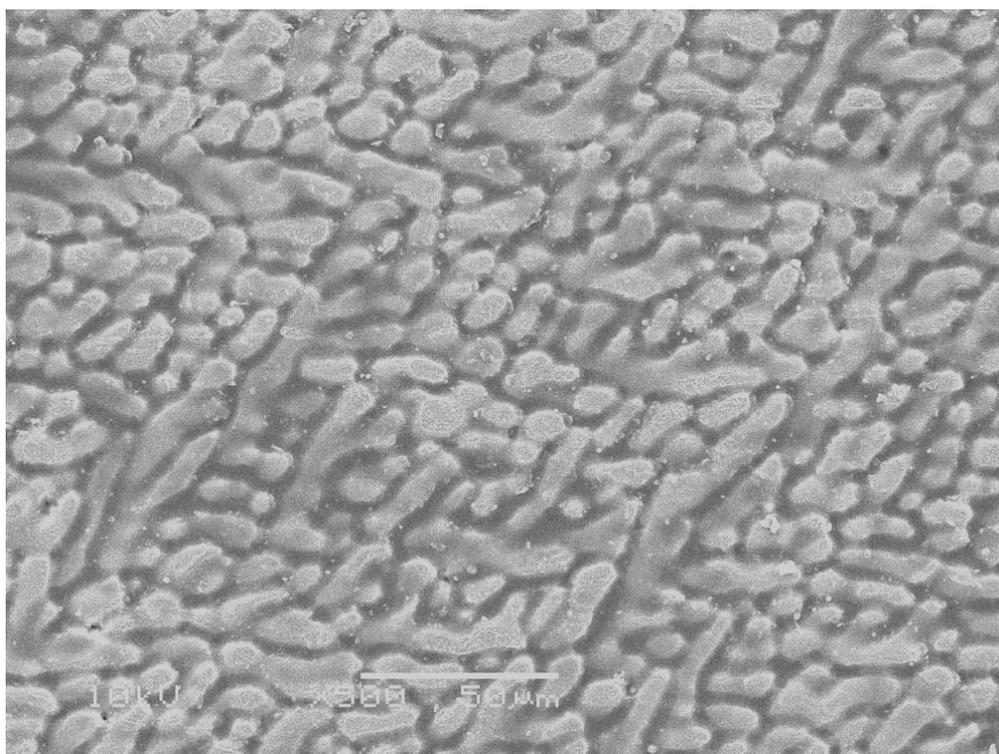


Figura 6.15: Revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor

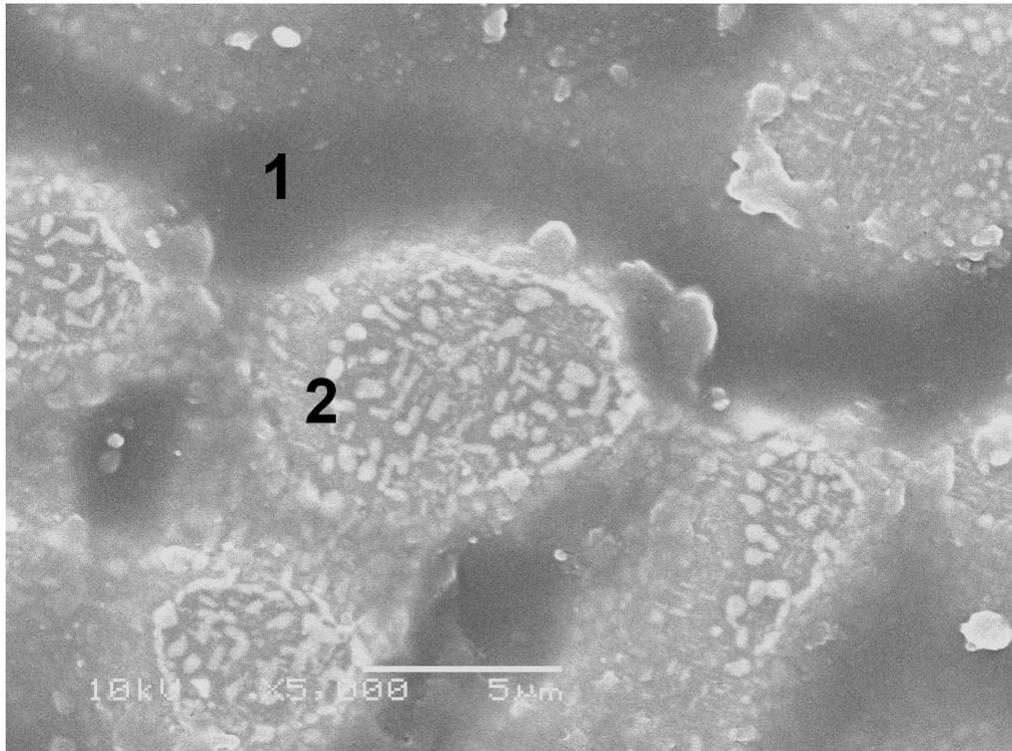


Figura 6.16: Regiões 1 e 2 do revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor.

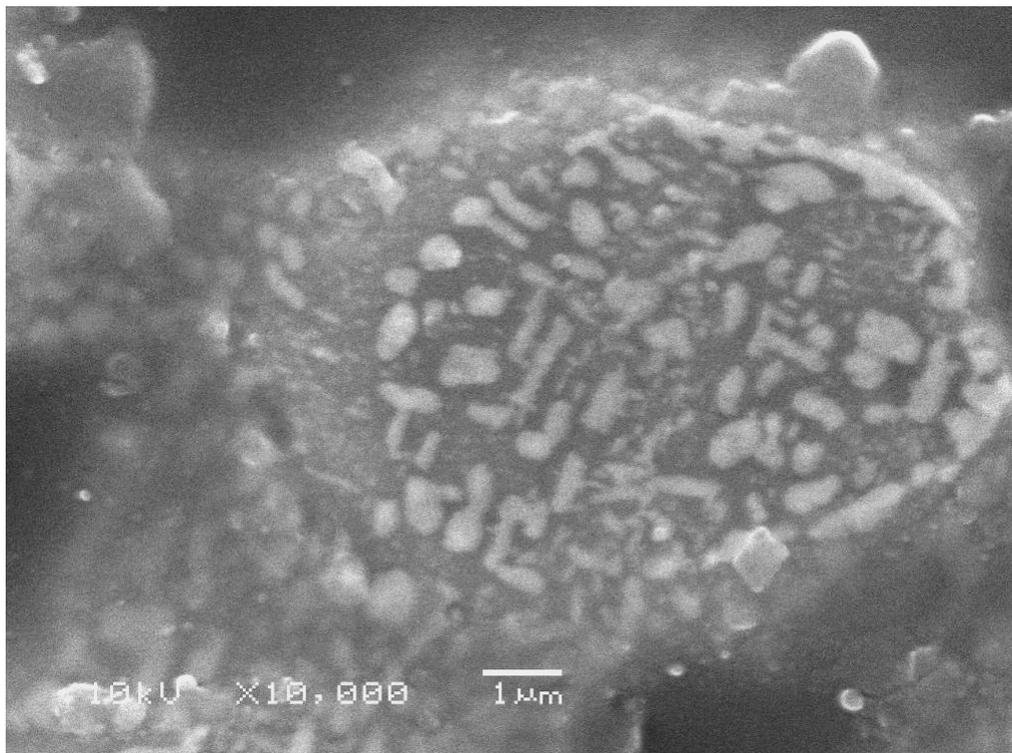


Figura 6.17: Região 2 do revestimento de Zn-55Al antes do ensaio de resistência ao calor.

A morfologia superficial do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor é apresentada na Figura 6.18.

A Figura 6.18 indica que o revestimento apresenta 3 regiões distintas: região escura interdendrítica de zinco (1), região clara com as dendritas de alumínio (2) e uma região mais clara mostrando um aglomerado de dendritas de alumínio (3) [31].

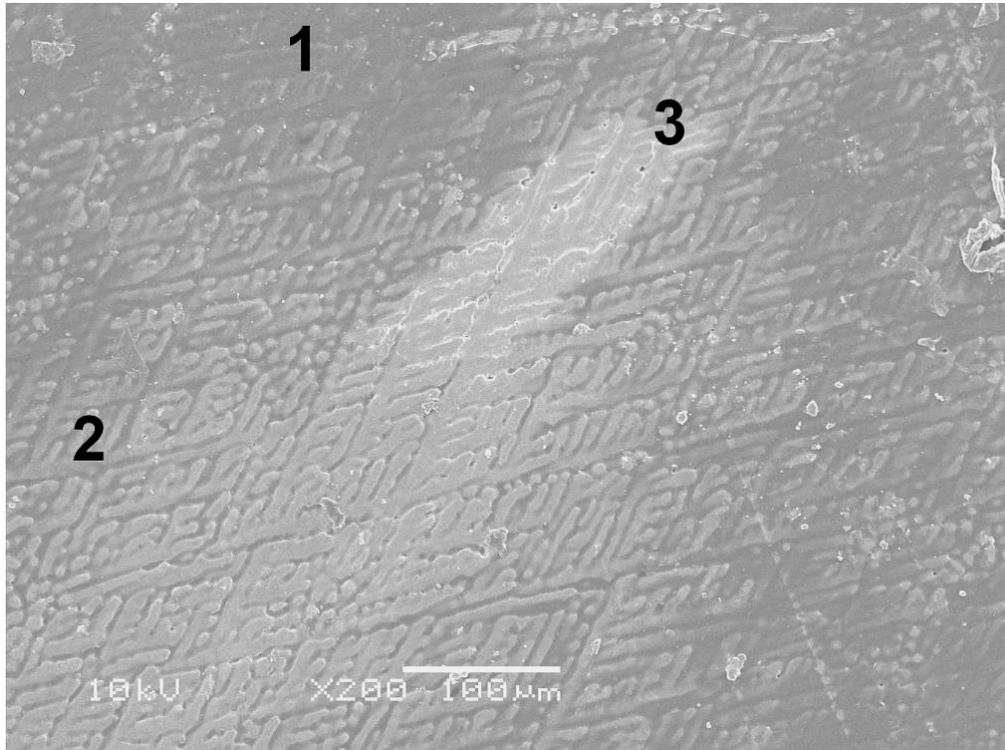


Figura 6.18: Revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.

A Figura 6.19 apresenta em detalhe a região 1, mostrando uma fraca segregação entre as dendritas de Al e a região escura interdendrítica de Zn.

A Figura 6.20 apresenta a região 2, formada pelas dendritas de Al, com regiões escuras interdendríticas de Zn. A mesma região é apresentada em detalhe pela Figura 6.21. Quando comparada com sua situação antes do ensaio de resistência ao calor (Figura 6.16), é possível observar na região 2 uma menor área escura.

A Figura 6.22 apresenta em maior aumento a região 3, sugerindo significativa presença de dendritas de alumínio, co-existindo com uma região minoritária formada por interdendríticas de zinco.

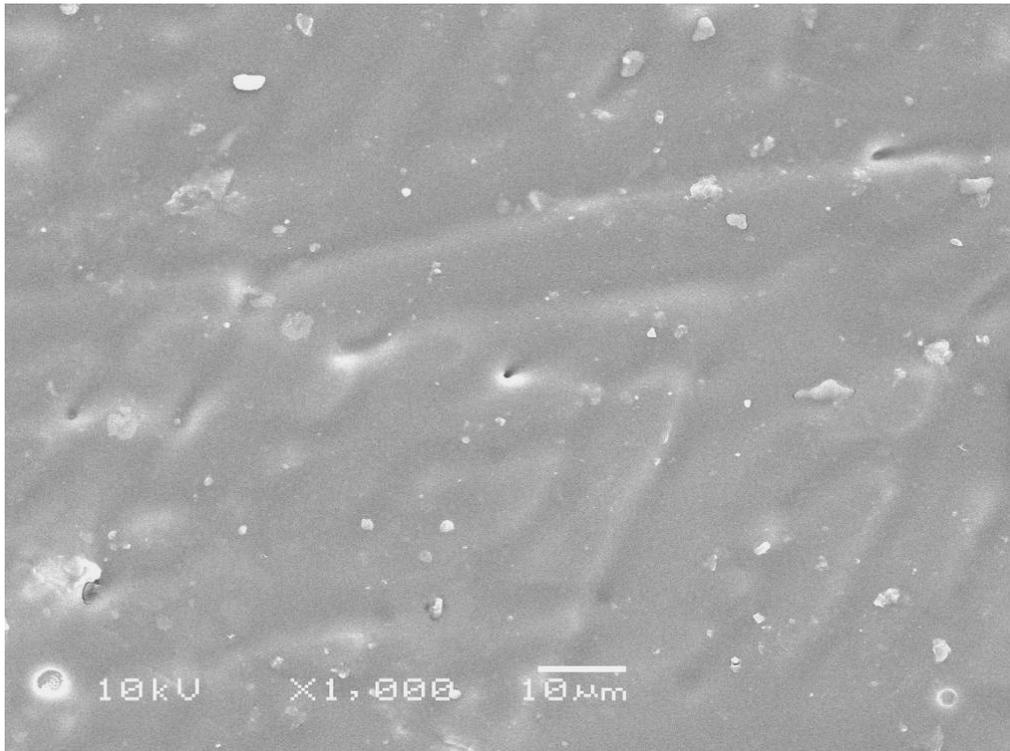


Figura 6.19: Região 1 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor

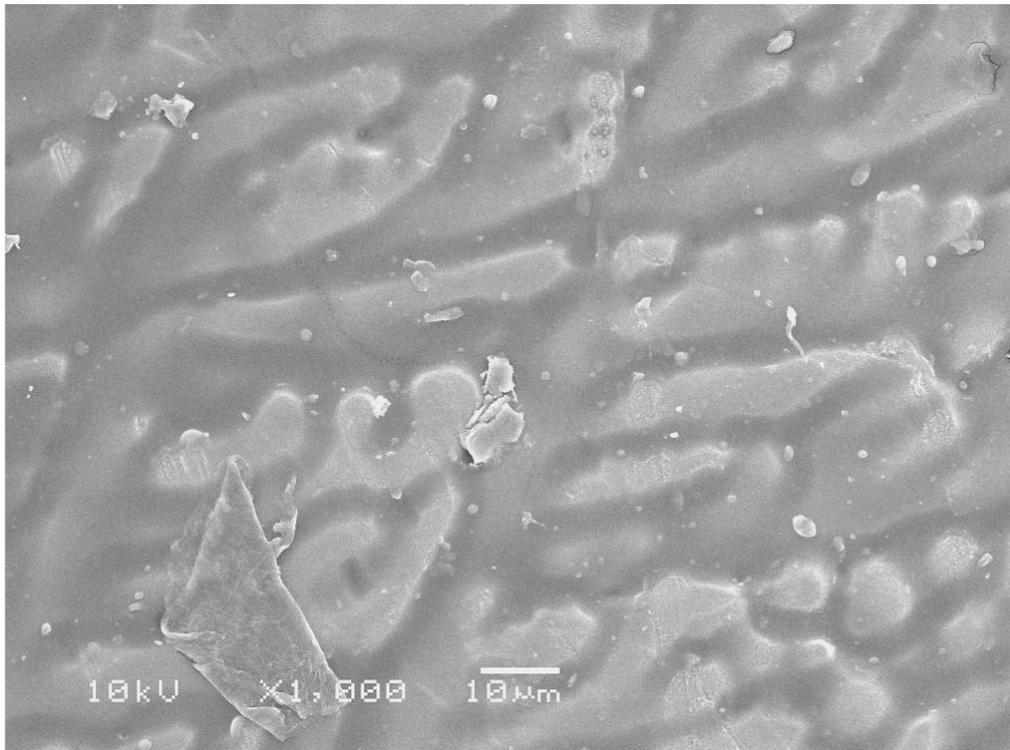


Figura 6.20: Região 2 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.

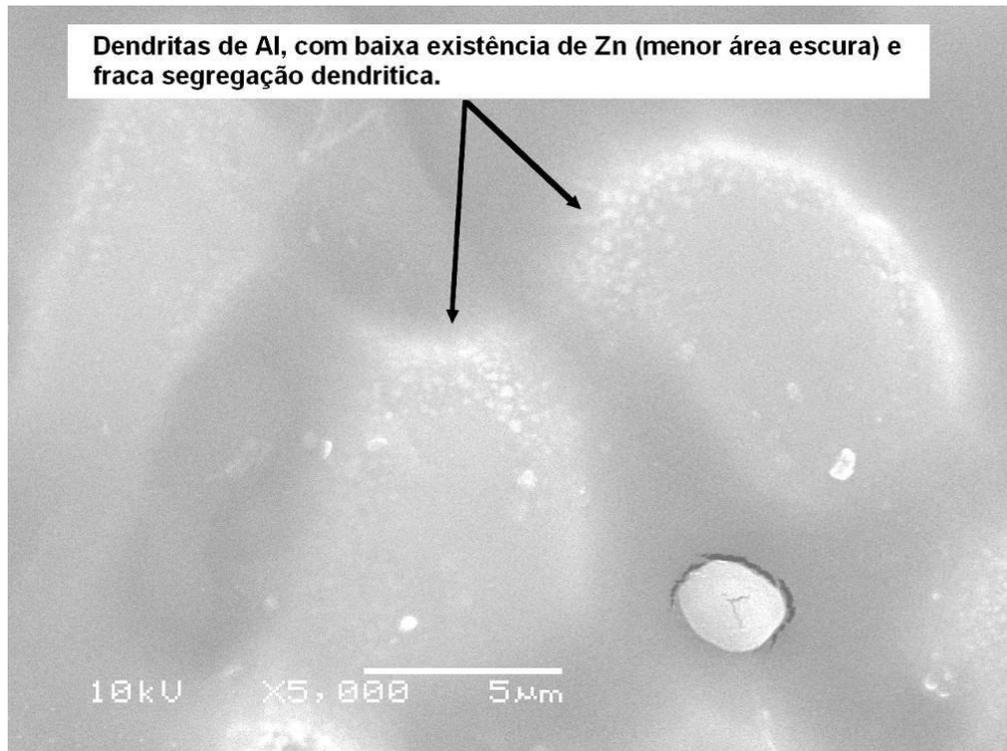


Figura 6.21: Região 2 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.

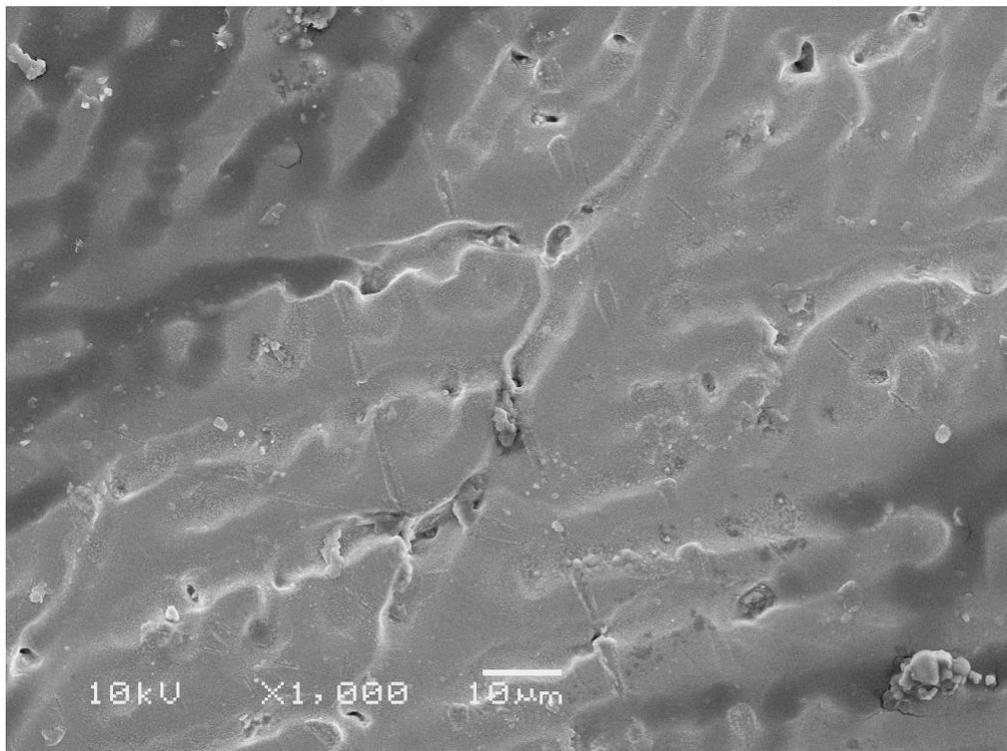


Figura 6.22: Região 3 do revestimento de Zn-55Al após o ensaio de resistência ao calor.

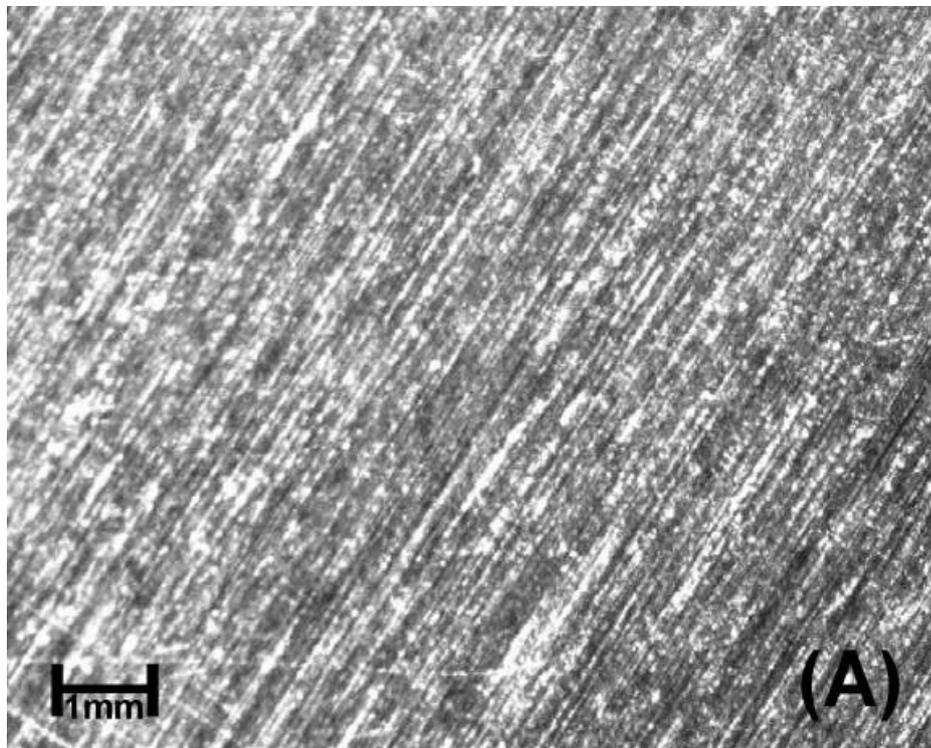
Os resultados obtidos quanto à análise morfológica permitiram verificar que a superfície do revestimento apresentou alterações após o ensaio de resistência ao calor.

Quando submetido a temperaturas na faixa dos 450°C, o revestimento de Zn-55Al ultrapassou a sua temperatura de equilíbrio eutético, atingindo temperaturas próximas a ocorrência da intensa segregação dendrítica, conforme descrito por Moreira et al [29].

6.3.3 *Análise do alumínio*

6.3.3.1 *Análise por microscopia óptica*

A Figura 6.23 apresenta a morfologia superficial do alumínio, antes e depois do ensaio de resistência ao calor. A partir da análise em microscopia óptica, não foi possível observar alterações superficiais no alumínio após o ensaio de resistência ao calor.



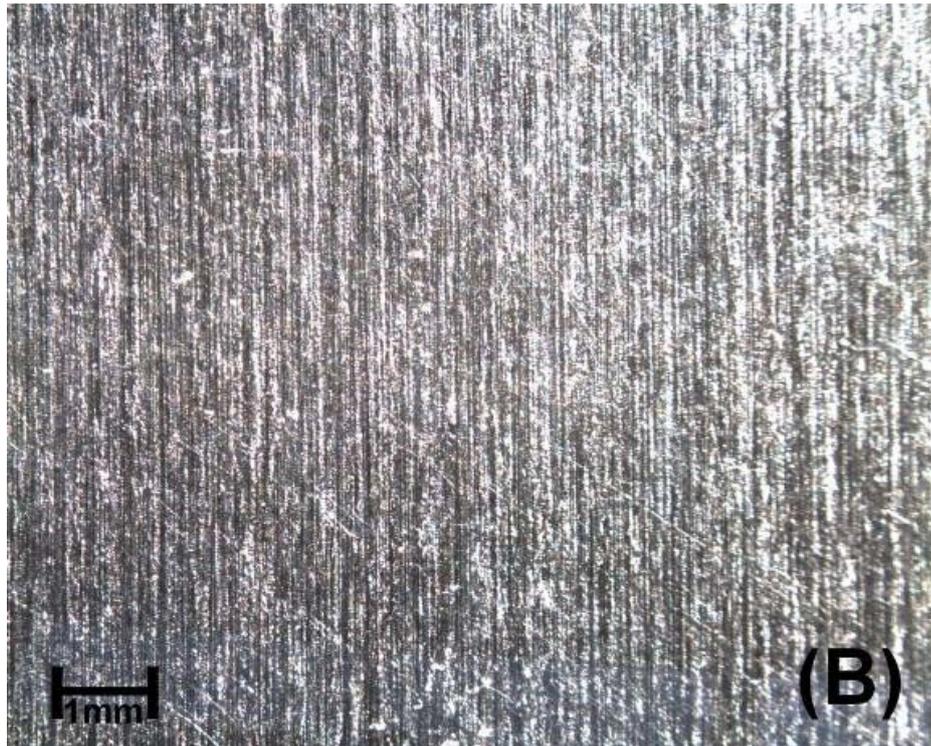


Figura 6.23: Análise do alumínio no microscópio óptico: A) material antes do ensaio de resistência ao calor e B) material após o ensaio de resistência ao calor.

6.3.3.2 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura

A morfologia superficial do alumínio antes do ensaio de resistência ao calor é apresentada na Figura 6.24. A superfície do alumínio apresenta baixa rugosidade e algumas marcas paralelas resultantes do processo de laminação do material [57].

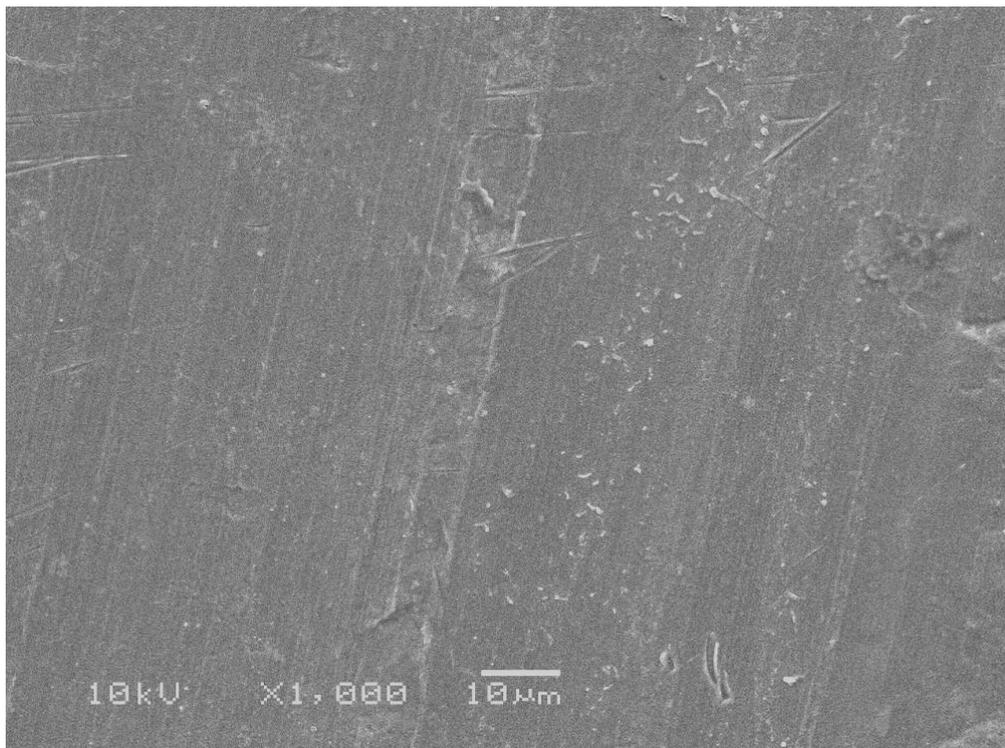


Figura 6.24: Alumínio antes do ensaio de resistência ao calor.

A Figura 6.25 mostra a morfologia superficial do alumínio após o ensaio de resistência ao calor. A superfície do material não apresentou importantes alterações morfológicas após exposição a temperaturas na faixa dos 450°C.

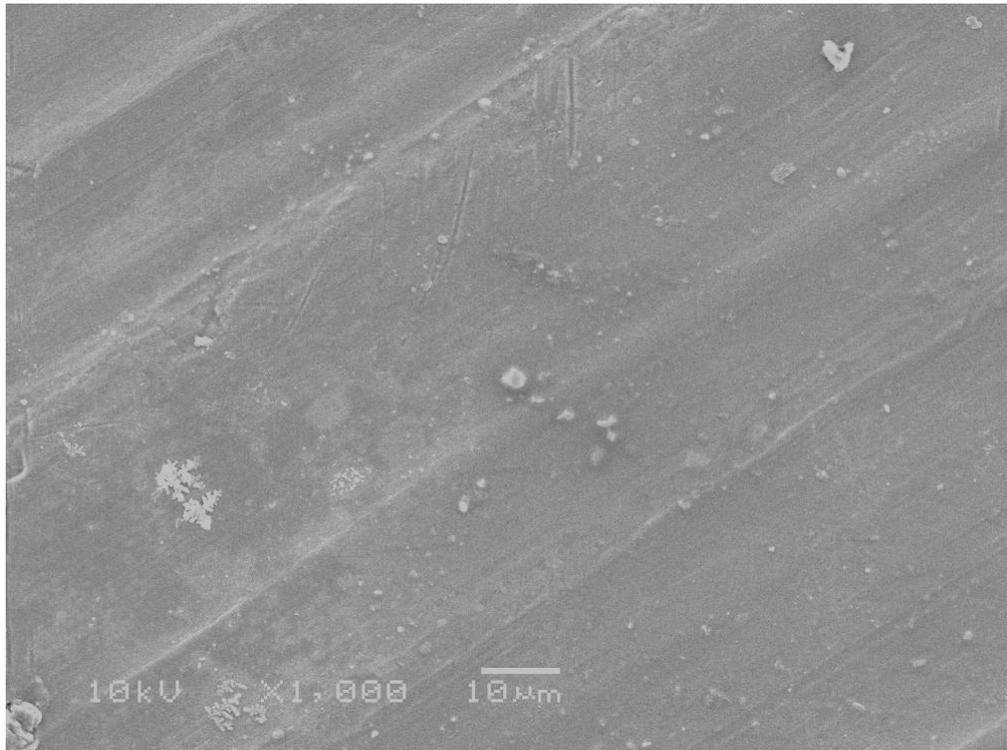


Figura 6.25: Alumínio após o ensaio de resistência ao calor.

6.3.4 Análise do isolante térmico Protec[®]

A Figura 6.26 mostra a morfologia do isolante térmico Protec[®] antes do ensaio de resistência ao calor. A superfície do material apresenta-se rugosa, devido ao processo de compactação por prensagem do particulado para obtenção do isolante térmico Protec[®]. O isolante térmico Protec[®] não apresentou alterações morfológicas importantes após o ensaio de resistência ao calor, como indica a Figura 6.27.

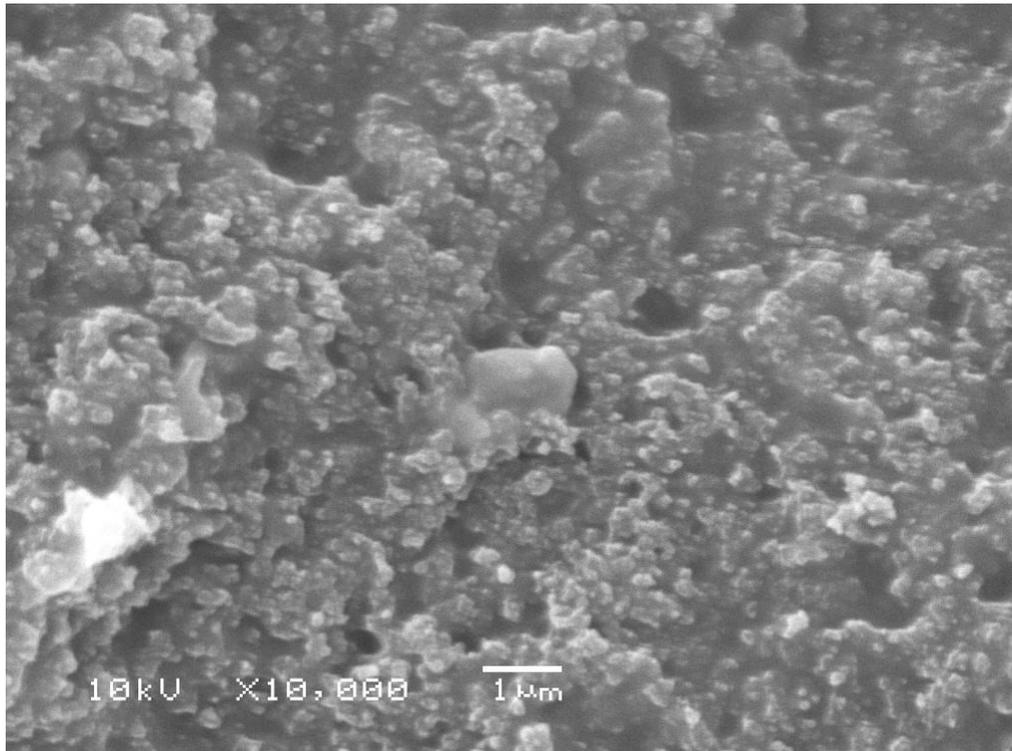


Figura 6.26: Isolante Protec® antes do ensaio de resistência ao calor.

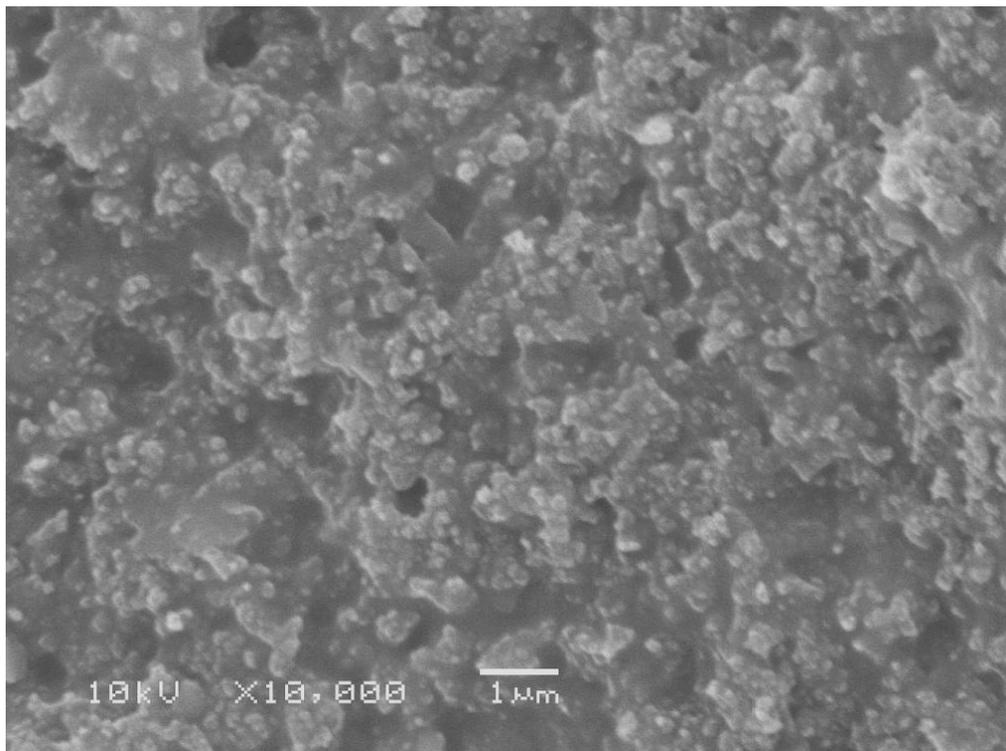


Figura 6.27: Isolante Protec® após o ensaio de resistência ao calor.

6.3.5 Análise do isolante térmico Fiberfrax®

A Figura 6.28 e a Figura 6.29 mostram a morfologia do isolante térmico Fiberfrax® antes do ensaio de resistência ao calor. A Figura 6.28 mostra o emaranhado de fibras aciculares lisas, distribuídas aleatoriamente, que constituem o isolante térmico Fiberfrax®. Estas fibras são aglomeradas pela adição de um ligante orgânico, que permite a sua

compactação e união. Na Figura 6.28, estão indicadas algumas regiões chamadas de *shot*, que são esferas geradas no processo de fabricação da fibra.

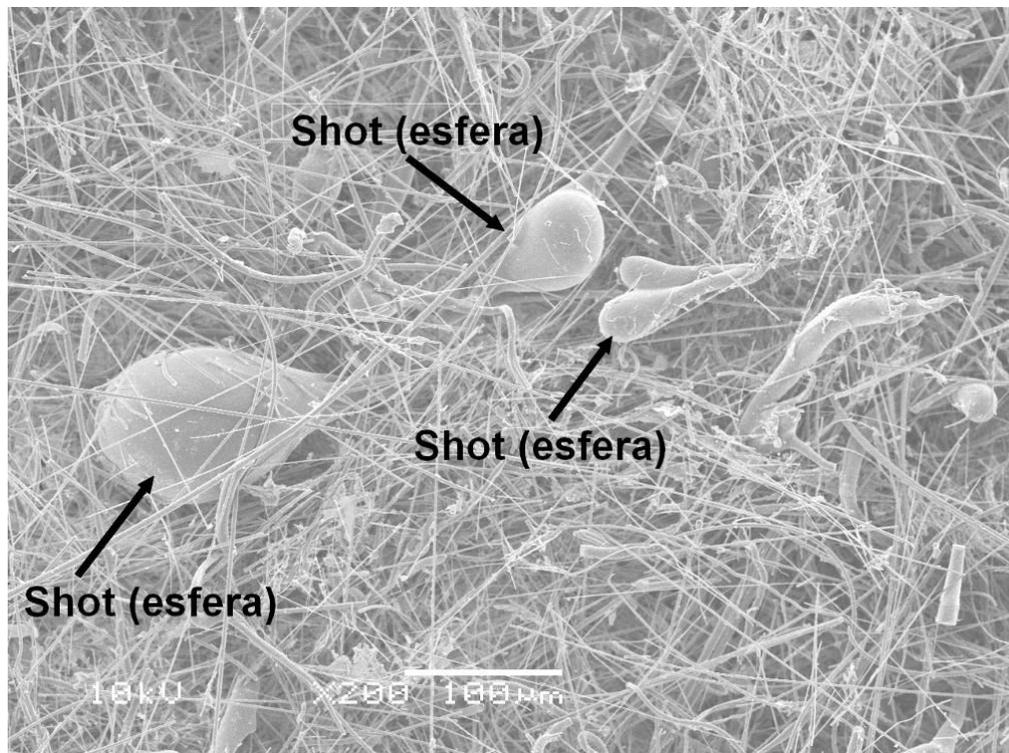


Figura 6.28: Fiberfrax[®] antes do ensaio de resistência ao calor.

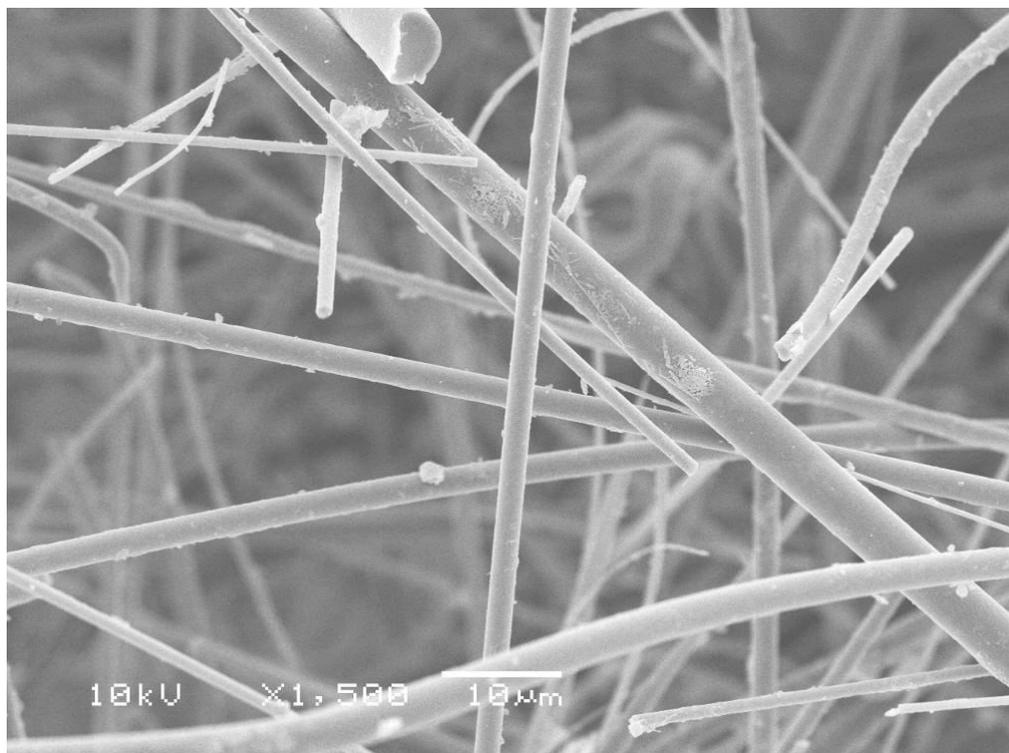


Figura 6.29: Fiberfrax[®] antes do ensaio de resistência ao calor (detalhe da Figura 6.28).

A morfologia do isolante térmico Fiberfrax[®], após o ensaio de resistência ao calor, é mostrada na Figura 6.30 e na Figura 6.31. Como se pode observar, o isolante térmico Fiberfrax[®] não apresentou significativas alterações morfológicas após o ensaio de resistência ao calor. No entanto, verificou-se a presença de um “amarelamento” na região central da superfície exposta ao fluxo de calor, após o ensaio de resistência ao calor (Figura 6.32). Este “amarelamento” é possivelmente decorrente da queima do ligante orgânico em temperaturas próximas a 150°C. Esta queima não prejudica a propriedade de condutividade térmica, porém fragiliza o material, tornando o isolante Fiberfrax[®] quebradiço.

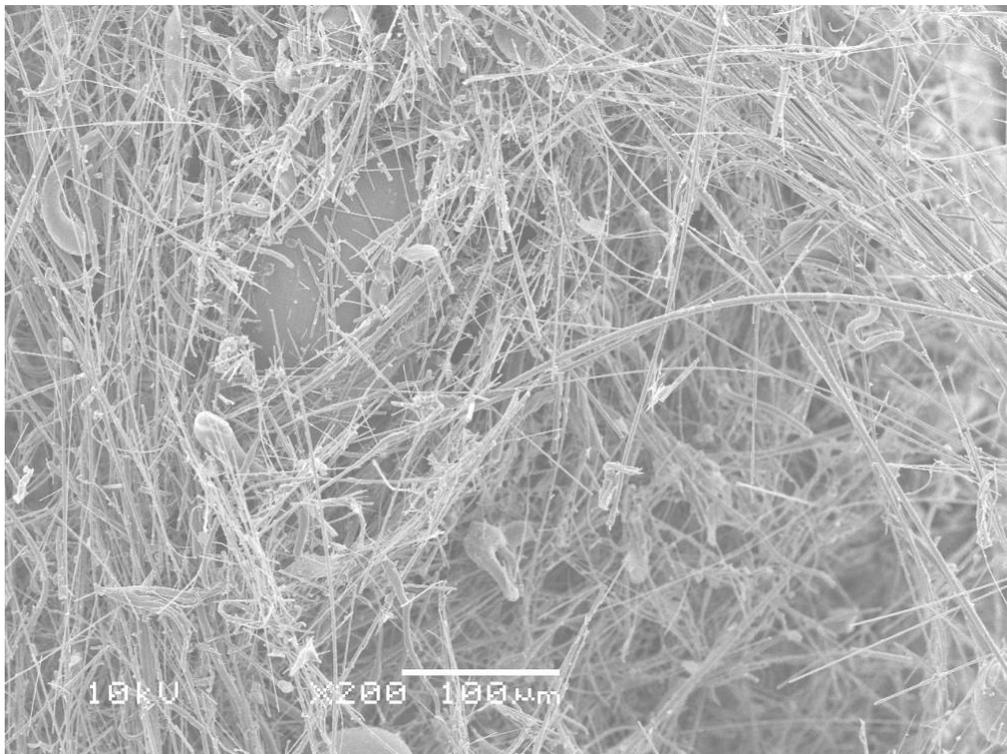


Figura 6.30: Fiberfrax[®] após o ensaio de resistência ao calor.

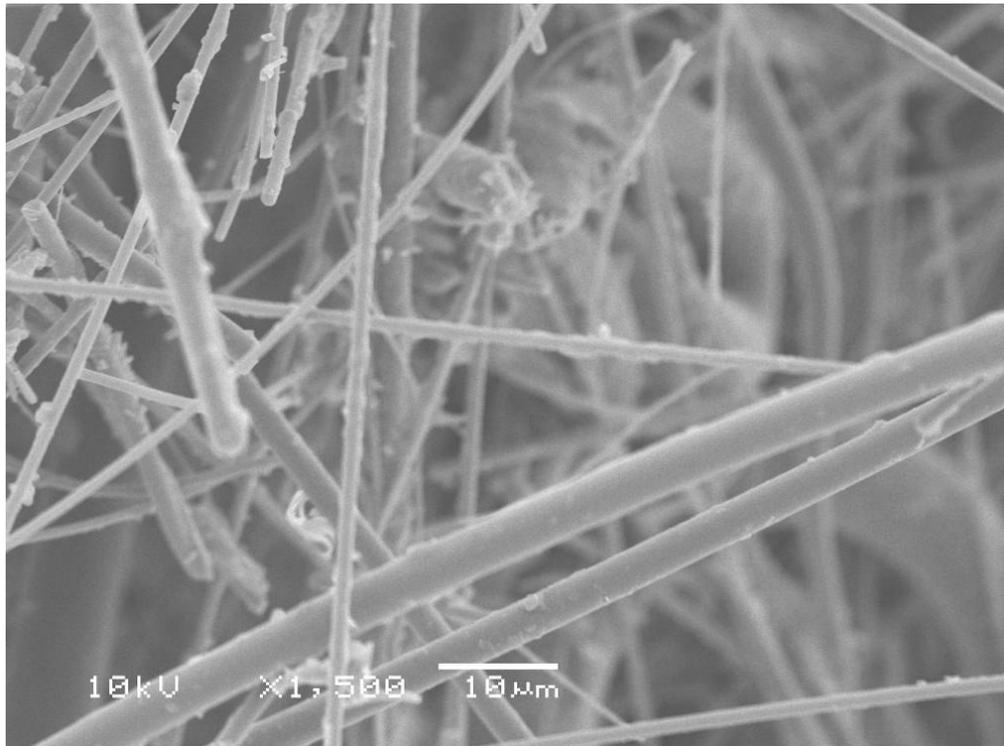


Figura 6.31: Fiberfrax® após o ensaio de resistência ao calor.



Figura 6.32 - Fiberfrax® (utilizado na camada intermediária da forma construtiva de 3 camadas) após o ensaio de resistência ao calor.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nas condições empregadas no presente trabalho pode-se concluir que:

- A equação do Fator de Eficiência proposta neste estudo, mostrou-se um parâmetro eficiente de correlação entre as temperaturas interna e externa desenvolvidas no ensaio de resistência ao calor, permitindo a análise comparativa entre as formas construtivas e os materiais testados;

- Comparando-se os fatores de eficiência das formas construtivas de 1 camada e 3 camadas, para todos os materiais analisados, a forma construtiva de 3 camadas apresentou maior eficiência térmica que a configuração de 1 camada;

- Para a forma construtiva de chapa única, o material alumínio apresentou maior eficiência térmica, desenvolvendo menores temperaturas externas no ensaio de resistência ao calor;

- Para a forma construtiva de 3 camadas, o material alumínio combinado com o isolante térmico Fiberfrax[®] apresentou maior eficiência térmica, desenvolvendo menores temperaturas externas no ensaio de resistência ao calor;

- O revestimento de Zn-55Al apresentou alteração morfológica superficial após o ensaio de resistência ao calor, indicando um comprometimento das suas propriedades nas temperaturas estudadas.

- O revestimento de Al-Si e a superfície do alumínio não apresentaram alterações morfológicas superficiais após o ensaio de resistência ao calor, não ocorrendo um comprometimento das suas propriedades nas temperaturas estudadas.

- A temperatura externa a 30 mm do defletor de calor é muito similar para todas as configurações testadas, desenvolvendo temperaturas próximas a 60°C, o que indica que independentemente da forma construtiva empregada e material, a temperatura a 30 mm do defletor de calor seria relativamente baixa;

- Ambos os isolantes térmicos estudados, Protec[®] e Fiberfrax[®], apresentaram um desempenho térmico similar, sem diferenças significativas em suas *performances*.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização desse trabalho, pode-se sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Estudar a perda de calor por convecção no ensaio de resistência ao calor;
- Avaliar o desempenho térmico de outros materiais isolantes;
- Analisar comparativamente os resultados obtidos no ensaio de resistência ao calor com os resultados obtidos em ensaios computacionais (simulação numérica);
- Mapear as temperaturas externas ao ensaio de resistência ao calor;
- Avaliar o desempenho térmico da forma construtiva de 2 camadas, utilizando-se os materiais atualmente aplicados aos defletores de calor;
- Avaliar o desempenho térmico da forma construtiva de 3 camadas, com diferentes combinações de materiais metálicos nas camadas 1 e 3;
- Avaliar o desempenho térmico de outros materiais metálicos aplicados aos defletores de calor, como aço inoxidável e alumínio com acabamento gofrado;
- Estudar a relação entre refletividade e sujidade superficial dos materiais metálicos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Poziomyck MM, Wunsche M, Pereira DC, Borges TV, Campos RS, Malfatti CF, Bergmann CP. Comparative Study Between Different Constructive Forms of Thermal Acoustic Protective Shield (Paper 2008-36-0230). Congresso SAE Brasil 2008; Outubro de 2008; São Paulo.
- [2] Wunsche M. Estudo Comparativo de Revestimentos para Aplicação em Defletores de Calor [trabalho de conclusão de curso]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, 2008.
- [3] Poziomyck, MM, Wunsche M, Malfatti CF, Bergmann CP, Rieder ES. Estudo Comparativo entre as Formas Construtivas de 1 e 3 camadas de Defletores de Calor. 18º CBECIMAT; Novembro de 2008; Recife.
- [4] Popielas F, Minkav M, Moffatt R, Chen C, Matias CH, Boogemans M. CAE Approach for Thermal Acoustical Protective Shields (Paper 2001-01-0684). SAE 2001 World Congress; March 2001; Detroit (USA).
- [5] Elring Klinger [*homepage* na internet]. Elrotherm® Shielding Systems - Brochura Técnica [acessado em 16 de abril de 2009]. Disponível em www.elringklienger.de.
- [6] Popielas F, Ramkumar R, Digregorio A, Chen C, Rebien H, Boogemans M. CAE Approach for Thermal Acoustical Protective Shields - Part 2 (Paper 2004-01-2970). October 2004; SAE Special Publication (SP) 1901.
- [7] Popielas F, Bastias P, Schneider J, Rebien H, Matias C, Chen C, Boogemans M. Forming Analysis of Thermal-Acoustical Protective Shields (Paper 2004-01-2969). October 2004; SAE Special Publication (SP) 1901.
- [8] Popielas F, Lu C, Krishna M, Chen C, Oxenknecht E. NVH and modal Analysis of Thermal-Acoustical Protective Shields (Paper 2004-01-2971) October 2004; SAE Special Publication (SP) 1901.
- [9] Pereira DC, Borges TV, Ribeiro F, Campos RS. The development of a Thermal-Acoustic Protective Shields (TAPS) using Finite Element Analysis (Paper 2005-01-4111). Congresso SAE Brasil 2005; Outubro de 2005; São Paulo.
- [10] Incropera FP, De Witt DP. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC; 2008.
- [11] Callister Jr WD. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [12] SEVEX Group [*homepage* na internet]. Types of Heatshields [acessado em 16 de abril de 2009]. Disponível em <http://www.sevex.ch/Hitzeschilde/Varianten/tabid/83/Default.aspx>.
- [13] ASM International. ASM Handbook Volume 5 – Surface Engineering. ASM International, 1994. p. 1058 – 1081

-
- [14] Nippon Steel [*homepage* na internet]. Nippon Steel News N° 307 [acessado em 06 de Fevereiro de 2009]. Disponível em www.nsc.co.jp.
- [15] Coni NHS. Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à Quente e Galvalume® produzidos na CSN-PR [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, 2004.
- [16] Arcelor Mittal. Steels coated with Alusi®, an aluminum-silicon alloy: general points [acessado em 6 de fevereiro de 2009]. Disponível em www.arcelormittal.com/automotive,
- [17] ASM International. ASM Handbook, Volume 3 – Alloy Phase Diagram, ASM International, 1991.
- [18] ThyssenKrupp Steel [*homepage* na internet]. Hot dip coated sheet - Brochura técnica [acessado em 6 de fevereiro de 2009]. Disponível em www.thyssenkrupp-steel.com.
- [19] Arcelor Auto (Arcelor Group). Catálogo automóvel 2003, p. 107 – 114.
- [20] German Institute for Standardization. Norma DIN EN 10327: Continuously hot-dip coated strip and sheet of low carbon steels for cold forming - Technical delivery conditions. Setembro de 2004.
- [21] Awan, GH, Hasan FU. The morphology of coating/substrate interface in hot-dip-aluminized steels. *Materials Science and Engineering*. 2008; A 472:157–165.
- [22] Awan GH, Ahmed F, Ali L, Shuja M.S, Hasan F. Effect of coating-thickness on formability of hot dip aluminized steel. *Engineering and Application Science*. 2008 January; Vol. 2.
- [23] Wang CJ, Chen SM. The high-temperature oxidation behavior of hot dipping al-Si coating on low carbon steel, *Surface & Coating Technology*. 2006; 200: 6601-5.
- [24] ThyssenKrupp Steel [*homepage* na internet]. Hot dip aluminized steel Fal- AS - Brochura técnica [acessado em 6 de Fevereiro de 2009]. Disponível em www.thyssenkrupp-steel.com.
- [25] Arcelor Mittal [*homepage* na internet]. Steels coated with Alusi® aluminum-silicon alloy: specific applications [acessado em 6 de fevereiro de 2009]. Disponível em www.arcelormittal.com/automotive.
- [26] Companhia Siderúrgica Nacional. Prospecto Galvalume. Brasil, 2008.
- [27] Silva PSG. Ligas de Zinco de interesse tecnológico: estudo do revestimento anticorrosivo ZnAl e da eletrodeposição do semicondutor ZnTe [Tese]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Pós-graduação em Química Inorgânica, Grupo de Eletroquímica, 2006.
- [28] Companhia Siderúrgica Nacional [*homepage* na internet]. Catálogo Galvalume [acessado em 24 de abril de 2009]. Disponível em www.csn.com.br.
- [29] Moreira AR, Panossian Z, Camargo PL, Moreira MF, da Silva IC, Carvalho JER. Zn/55Al coating microstructure and corrosion mechanism, *Corrosion Science*. 2006; 48: 564–576.

-
- [30] Marder AR. The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science.2000; 45: 191 – 271.
- [31] Osóri WR, Freire CM, Garcis A. The effect of the dendritic microstructure on the corrosion resistance of Zn-Al Alloys. Journal of Alloys and Compounds. 2005; 397: 179 – 191.
- [32] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 15578: Bobinas e chapas de aço revestidas com liga 55% alumínio – zinco pelo processo contínuo de imersão a quente. 14 de Maio de 2008.
- [33] American Society for Testing and Materials . Norma ASTM A 972: Standard Specification for Steel Sheet, 55 % Aluminum-Zinc Alloy-Coated by the Hot-Dip Process. 2008.
- [34] BIEC International, Inc. [*homepage* na internet]. Product Applications [acessado em 21 de fevereiro de 2009]. Disponível em www.galvalume.com.
- [35] ASM International. ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. 4a ed. ASM International, 1995. p.17 – 39,
- [36] Infomet [*homepage* na internet]. Handbook/Metais&Ligas [acessado em 21 de março de 2009]. Disponível em www.infomet.com.br.
- [37] The PRO-CARS Company [*homepage* na internet]. [acessado em 3 de março de 2009] Disponível em www.procars.com.pl.
- [38] Çengel YA. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. Nova York: McGraw-Hill; 1997.
- [39] Dos Santos WN. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. Revista Cerâmica. 2008; 48.
- [40] Dos Santos WN. Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: II - o método do fio quente. Revista Cerâmica. 2005, 51.
- [41] Malloy JF. Thermal Insulation. van Nostrand Reinhold; 1969.
- [42] Omega Engineering Inc. [*homepage* na internet]. Transactions in measurements and control, Vol. 1, 2ª. Ed. [acessado em 13 de março de 2009]. Disponível em www.omega.com.
- [43] ThyssenKrupp Stahl-Service-Center. Inspection Document (Coil no R305178332). 24 de setembro de 2008.
- [44] LAMEF-UFRGS. Relatório de análise química do aço Galvalume®. Brasil; 8 de julho de 2009.
- [45] Novelis. Chapas de Alumínio - Brochura técnica. Brasil; 2009.
- [46] Novelis. Certificado de Análise de Material. Brasil; 30 de junho de 2009.
- [47] Terramater Indústria e Comércio LTDA. Prospecto de material Isomater.

[48] Instituto de Pesquisas Técnicas. Relatório Técnico No 89304-205. São Paulo: Universidade de São Paulo; agosto de 2006.

[49] Dana Corporation. VICTOR REINZ: Technical Specifications of Protec[®] (brochura técnica). Brasil, 2009.

[50] Laboratório de Cerâmicos. Relatório de Ensaio de Material. Porto Alegre: Universidade federal do Rio Grande do Sul; 16 de julho de 2007.

[51] Unifrax . Papel Fiberfrax 970 - Especificação do Produto. Brasil; fevereiro de 2001.

[52] Unifrax Corporation. Fiberfrax[®] Ceramic Fiber Paper - Product Information Sheet. USA; agosto de 2002.

[53] Tintas Renner [*homepage* na internet]. Boletim Técnico Tinta Renner Color Jet Alta Temperatura [acessado em 24 de abril de 2009]. Disponível em www.tintasrenner.com.

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

[55] FIAT Auto Normazione. Procurement Specification 9.55670:Heat Shiels for Underbody and/or Engine Compartment Applications. February, 1993

[56] Dana Industrias LTDA. Instrução de Teste IVRM-LT-007: Ensaio de Resistência ao Calor. Revisão C; junho de 2008.

[57] Novelis. Relatório FR-079/2009 - Caracterização da Chapa liga 1050. Brasil; 19 de junho de 2009.