



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

**Processamento e análise mecânica de
compósitos laminados metal-fibra submetidos a
diferentes tratamentos superficiais das camadas
metálicas**

Autor: Fabrício de Almeida Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Brasília, DF
2022



Fabrcio de Almeida Oliveira

Processamento e anlise mecânica de compósitos laminados metal-fibra submetidos a diferentes tratamentos superficiais das camadas metálicas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Brasília, DF

2022

Fabrício de Almeida Oliveira

Processamento e análise mecânica de compósitos laminados metal-fibra submetidos a diferentes tratamentos superficiais das camadas metálicas/ Fabrício de Almeida Oliveira. – Brasília, DF, 2022-

56 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Compósitos Laminados Metal-Fibra. 2. Laminação à vácuo. I. Prof. Dr. Rhander Viana. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Processamento e análise mecânica de compósitos laminados metal-fibra submetidos a diferentes tratamentos superficiais das camadas metálicas

CDU 620.1

Fabrício de Almeida Oliveira

Processamento e análise mecânica de compósitos laminados metal-fibra submetidos a diferentes tratamentos superficiais das camadas metálicas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 28 de setembro de 2022:

Prof. Dr. Rhander Viana
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Bento da Silva
Convidado 1

MSc. Danilo dos Santos Oliveira
Convidado 2

Brasília, DF
2022

*Este trabalho é dedicado a todos que foram obrigados
a abandonar os seus sonhos, mas não deixaram de se dedicar
para realizar os sonhos daqueles que amavam.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à toda minha família, especialmente minha mãe, Andrélia, minhas madrinhas, Patrícia e Silvânia e meus avós, Francinete e Donato, por todo apoio, dedicação e por sempre valorizarem o poder transformador da educação. Agradeço minha namorada por seu suporte, auxílio e compreensão nessa jornada. Agradeço a todos os professores ao longo da minha vida que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e como cidadão. Faço um agradecimento especial aos professores Ronni Amorim, Fábio Lisboa e Rhander Viana, meu orientador, que tiveram papel fundamental em minha caminhada ao longo deste curso. Agradeço também a todo corpo técnico e servidores da Universidade de Brasília. Agradeço aos amigos e colegas que fiz no projeto de Fórmula SAE Elétrico - FGR: Gustavo Gusmão, Lucas Avelar, Rafael Tenório, Matheus Valdes, Rafael Ribeiro, Euclides, Maria Clara, Marcos Paulo, Igor, Takehana, Hillary, Vitória e tantos outros, que me ajudaram e me deram suporte por várias vezes quando muito precisei. Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas de outros cursos que me acompanharam nessa caminhada: Aline, Sara, Rebeka, Gabriel Genari, Lucas Marques, Maiara, a vocês, meu muito obrigado. Desculpo-me com aqueles que não citei nominalmente, mas tenho plena certeza que, sabendo de sua importância e do meu carinho, serão capazes de me perdoar. Por fim, agradeço por minha própria resiliência e pelas capacidades que me foram dadas.

*“Os que se encantam com a prática sem a ciência
são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola,
nunca tendo certeza do seu destino.”*

- Leonardo da Vinci

Resumo

Laminados metal-fibra (LMF) são materiais estruturais resultantes da combinação entre chapas metálicas finas e compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras, produzidos em um processo de laminação, e resultando em um produto combinando as características de ambos materiais. Industrialmente, os LMF utilizam tecidos pré-impregnados de resina e as chapas metálicas têm suas superfícies tratadas por meio de anodização para aumentar sua rugosidade e promover a adesão entre as camadas. O objetivo deste trabalho é realizar o processamento de um LMF laminado à vácuo, sem uso de pré-impregnados, composto por alumínio Al 1100 H14 e um compósito de fibra de vidro com matriz em epóxi, comparando as propriedades entre o laminado com camadas metálicas sem tratamento e com camadas submetidas à lixamento manual. Essa análise será realizada medindo a rugosidade das superfícies, resistência à tração, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento interlaminar do LMF e investigando a interface entre as camadas de metal e compósito. A rugosidade das chapas metálicas submetidas ao lixamento mostrou-se comparável àquela obtida em outros trabalhos por meio de anodização, o que indica, em primeiro momento, a viabilidade desse processo para a produção de laminados metal-fibra.

Palavras-chaves: laminados metal-fibra. laminação à vácuo. materiais compósitos.

Abstract

Fiber Metal Laminates (FML) are structural materials following the combination of thin metal sheets and fiber-reinforced polymer composites made through a lamination process and resulting in a product with characteristics of both materials. In industry, the FMLs are produced using fiber sheets pre-impregnated with resin (prepregs) and the metal layers are surface treated through anodization to increase their roughness and promote adhesion between layers. The main goal of this paper is to execute the processing of a FML laminated under vacuum, without using prepregs, composed of aluminum Al 1100 H14 and glass-reinforced epoxy matrix composite, comparing the properties between the laminate with no treatment to its metal sheets surfaces and the one submitted to manual sanding. This analysis will be conducted by measuring the surface roughness, tensile strength, flexural stiffness, interlaminar shear strength and by investigating the interface between metallic and composite layers. The sanded metal sheets had roughness results comparable to those obtained in other works through anodization, what indicates, at first, the viability of this process to produce fiber metal laminates.

Key-words: fiber metal laminates. vacuum bag lamination. composite materials.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Curva tensão-deformação típica de um material compósito de matriz polimérica reforçado por fibras (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).	20
Figura 2 – Representação esquemática da estrutura de um poliéster insaturado (NETO; PARDINI, 2016).	21
Figura 3 – Fórmula química do TBPB (MALLICK, 2007).	21
Figura 4 – Estrutura química do Estireno (MALLICK, 2007).	22
Figura 5 – Representação esquemática do processo de cura de uma resina poliéster. Adaptado de: (MALLICK, 2007, p. 96).	22
Figura 6 – Estrutura química de um grupo Epóxi (MALLICK, 2007).	23
Figura 7 – Estrutura química de uma molécula de DGBEA. (MALLICK, 2007)	24
Figura 8 – Representação esquemática do processo de cura de uma resina epóxi. (a) Reação do DETA com os grupos epóxi e (b) formação das ligações cruzadas entre as cadeias. Adaptado de: (MALLICK, 2007, p. 90)	24
Figura 9 – Equacionamento químico da reação de anodização do alumínio. Adaptado de: (SILVA, 2006), p. 25.	31
Figura 10 – Ilustração do processo de anodização do alumínio (SILVA, 2006).	31
Figura 11 – Diagrama das tensões envolvidas nas energias superficiais do ângulo de contato. Adaptado de (SILVA, 2006, p. 38).	33
Figura 12 – Esquema de operação de um aparelho de Microscopia de Força Atômica. Adaptado de (SOUZA, 2011 apud BELLIS, 2017, p. 28).	35
Figura 13 – Exemplo de corpo de prova com formato de “osso de cachorro” com dimensões em milímetros (ZHAO <i>et al.</i> , 2019).	37
Figura 14 – Diagrama de ensaio de cisalhamento interlaminar (ASTM, 2007).	38
Figura 15 – Dimensão dos apoios e da ferramenta para aplicação de carga em um ensaio de cisalhamento interlaminar. (ASTM, 2007).	39
Figura 16 – Dimensões padronizadas do corpo de prova para ensaio de flexão conforme a norma ASTM D7264 (autoria própria).	39
Figura 17 – Diagrama de ensaio de cisalhamento interlaminar (autoria própria).	40
Figura 18 – Modos de falha possíveis e aceitáveis para um ensaio de cisalhamento interlaminar. Adaptado de (SILVA, 2006, p. 57).	40
Figura 19 – Fluxograma dos procedimentos experimentais (autoria própria).	43
Figura 20 – Processo de decapagem química (autoria própria).	44
Figura 21 – Rugosímetro Portátil Mitutoyo SJ-210 (MITUTOYO, s.d.).	45
Figura 22 – Pontos de medição da rugosidade (autoria própria).	45
Figura 23 – Laminado metal-fibra passando pela aplicação de vácuo (autoria própria).	46
Figura 24 – Bomba de vácuo Surya 7CFM (autoria própria).	47

Figura 25 – Processo de lixamento manual (autoria própria).	49
Figura 26 – Laminado metal-fibra sem tratamento das camadas metálicas, vista lateral à esquerda (autoria própria).	49
Figura 27 – Laminado metal-fibra com camadas metálicas lixadas manualmente, vista lateral à esquerda (autoria própria).	50
Figura 28 – Rugosidade medida no sentido paralelo à laminação da chapa de alumínio (autoria própria).	50
Figura 29 – Rugosidade medida no sentido perpendicular à laminação da chapa de alumínio (autoria própria).	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades típicas de resinas poliéster insaturadas (a 23°C) (MALLICK, 2007)	23
Tabela 2 – Propriedades típicas de resinas epóxi (a 23°C) (MALLICK, 2007)	25
Tabela 3 – Tipos de GLARE [®] padronizados (VLOT; GUNNICK, 2001)	28
Tabela 4 – Parâmetros de anodização de alumínio para diferentes eletrólitos (GENTIL, 2011)	32
Tabela 5 – Dimensões recomendadas para corpos de prova de tração de acordo com a norma D3039 (ASTM, 2000b)	37
Tabela 6 – Propriedades do alumínio 1100 H14 (ALCOA, 2009)	42
Tabela 7 – Propriedades da resina epóxi HEX 135 a 25°C (E-COMPOSITES, 2021a)	42
Tabela 8 – Propriedades do tecido de fibra de vidro tipo R VRW700 (E-COMPOSITES, 2021b)	42

Lista de abreviaturas e siglas

FML	<i>Fiber-Metal Laminates</i>
LMF	Laminados metal-fibra
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
TBPB	Terc-butil-perbenzoato
DGEBA	Diglicidil-éter de bisfenol-A
DETA	Dietileno triamina
REPN	Glicidil-éter novolaca
HDT	Temperatura de Deflexão Térmica (<i>Heat Deflection Temperature</i>)
TGMDA	Tetraglicidil metileno dianilina
DUT	<i>Delft University of Technology</i>
NASA	<i>North America Space Agency</i>
ARALL	<i>Aramid Fiber Reinforced Aluminium Laminate</i>
GLARE [®]	<i>Glass-Reinforced Fibre Metal Laminate</i>
AFM	Microscopia de Força Atômica (<i>Atomic Force Microscopy</i>)
Ra	Rugosidade média
Rq	Rugosidade média quadrática
e ⁻	Elétron
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio, alumina
Cr ⁺³	Crômio (III)
Cr ⁺⁶	Crômio (VI)
H ₂	Gás hidrogênio
HNO ₃	Ácido nítrico

$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	Ácido oxálico
H_2CrO_4	Ácido crômico
H_2O	Água
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
H_3O^+	Hidrônio
H_3PO_4	Ácido fosfórico
NaOH	Hidróxido de sódio
NH_2	Amina
SiO_2	Dióxido de silício, sílica
SiO_4	Silicato

Lista de símbolos

μm	Micrômetro
mm	Milímetro
s	Segundo(s)
min	Minuto(s)
dm^2	Decímetro quadrado
cm^3	Centímetro cúbico
L	Litro
g	Gramma
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
V	Volt
A	Ampere
$^{\circ}C$	Grau Celsius
σ	Tensão
τ	Tensão de cisalhamento
ϵ	Deformação
θ	Ângulo theta
γ	Energia superficial

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Materiais compósitos	19
2.1.1	Matriz	19
2.1.2	Matriz Polimérica Termorrígida ou Termofixa	20
2.1.2.1	Matriz Poliéster	21
2.1.2.2	Matriz Epóxi	23
2.1.3	Reforço	25
2.1.3.1	Fibra de vidro	26
2.2	Laminados Metal-Fibra	26
2.2.1	GLARE®	27
2.3	Adesão e Interface	29
2.4	Anodização	31
2.5	Ângulo de contato	33
2.6	Rugosidade	34
2.6.1	Microscopia de Força Atômica	35
2.7	Laminação a vácuo	36
2.8	Ensaio mecânicos em compósitos laminados	36
2.8.1	Ensaio de tração	36
2.8.2	Ensaio de flexão	38
2.8.3	Ensaio de cisalhamento interlaminar	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Materiais	42
3.2	Plano Experimental	43
3.3	Decapagem e limpeza	44
3.4	Lixamento	44
3.5	Ensaio de rugosidade	44
3.6	Laminação	46
3.7	Usinagem dos corpos de prova	47
3.8	Ensaio de tração	47
3.9	Ensaio de flexão	48

3.10	Ensaio de cisalhamento interlaminar	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Lixamento	49
4.2	Laminados metal-fibra após processamento	49
4.3	Rugosidade	50
5	CONCLUSÕES	52
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 Introdução

Compósitos são materiais com fases distintas, separadas por uma interface e cujas propriedades são resultado da combinação dos materiais que compõem cada uma de suas fases e a interação entre eles. Esses materiais são selecionados de acordo com a aplicação e propriedades desejadas pelos projetistas, como resistência à tração, resistência à fadiga, resistência ao impacto, condutividade e isolamento térmico, por exemplo. Os materiais compósitos apresentam uma ou mais fases dispersas, englobadas por uma fase contínua, denominada matriz, que pode ser metálica, cerâmica, ou, geralmente, polimérica (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

Laminados metal-fibra (LMF, do inglês *Fibre metal laminates – FML*) são compósitos resultantes da combinação, por meio de um processo de laminação entre chapas metálicas finas, primariamente alumínio, com compósitos de polímeros reforçados por fibras. Esses materiais unem características dos metais como ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto, com propriedades de compósitos como resistência à corrosão, rigidez e resistência à fadiga (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011).

Ao mesmo tempo que apresentam tantas qualidades, os compósitos híbridos apresentam algumas desvantagens, como o tempo de processamento necessário, que resulta em baixa produtividade em larga escala. No caso de compósitos laminados, soma-se a tendência à falha por delaminação em razão de problemas como vazios, trincas e falta de adesão na interface entre as camadas (MALLICK, 2007).

A melhora da interface entre as camadas de metal e de compósito de um LMF pode ser obtida por tratamentos das superfícies metálicas. Estes tratamentos podem ser realizados de forma mecânica, química, eletroquímica, pela utilização de agentes de adesão (como silanos) ou tratamentos a seco (como texturização a laser e cobertura por *spray* de plasma). Entre os processos eletroquímicos, encontra-se a anodização, largamente utilizada nas camadas metálicas de LMF para a indústria aeroespacial e militar (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011).

A anodização é um processo eletroquímico, realizado com mais frequência em peças de alumínio, onde o metal assume a posição de anodo em uma cuba eletrolítica e sofre uma oxidação parcial. Essa camada de oxidação na sua superfície apresenta uma boa adesão, protegendo o alumínio e aumentando sua dureza superficial (WELLER *et al.*, 2017). Sua utilização para preparação de chapas metálicas em compósitos laminados metal-fibra é interessante em razão do aumento da porosidade do metal, que favorece a aderência entre as camadas. Todavia, seu custo e as dificuldades impostas pelo tratamento eletroquímico podem tornar-se impeditivos. Nesse sentido, este trabalho buscará

apresentar uma alternativa à anodização enquanto tratamento superficial, analisando o lixamento manual e sua viabilidade por intermédio de amostras em pequena escala.

Aqui será abordado o tratamento mecânico das superfícies metálicas por lixamento, o processamento de compósitos híbridos metal-fibra utilizando chapas de alumínio sem tratamento e lixadas, com a fase de compósito constituída de resina epóxi e fibra de vidro. Assim como será abordada a determinação das propriedades mecânicas resultantes do laminados e análise das interfaces.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Processar e comparar propriedades mecânicas de compósitos laminados metal-fibra com as camadas metálicas tratadas superficialmente por lixamento manual e sem tratamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Realizar uma revisão bibliográfica do processamento de compósitos laminados metal-fibra por laminação à vácuo, analisar as superfícies lixadas e sem tratamento e caracterizar os compósitos metal-fibra obtidos por meio de ensaios mecânicos de tração, flexão, cisalhamento interlaminar e micrografia das interfaces.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais compósitos

Compósitos são materiais multifásicos constituídos por duas ou mais fases quimicamente distintas e separadas por uma interface facilmente diferenciável. É possível identificar alguns materiais de origem natural que atendem a essa definição, como a madeira, que apresenta fibras de celulose envoltas em lignina, que as mantém unidas. A própria humanidade também criou compósitos rudimentares a partir de elementos disponíveis naturalmente, como tijolos de barro reforçados por palha, conhecidos como adobe (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

Historicamente, porém, tratamos os compósitos como objeto de estudo da ciência dos materiais e da engenharia a partir do século XX, quando começa a produção de compósitos feitos artificialmente. Sua pesquisa e desenvolvimento é resultado de uma necessidade por novos materiais com propriedades físicas, mecânicas, químicas e/ou elétricas específicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

Compósitos geralmente possuem duas fases, que recebem nomes próprios: fase matriz e fase dispersa, ou reforço, na ligação entre as fases está a região chamada de interface. A matriz é contínua e envolve o reforço e as propriedades mecânicas resultantes do compósito são uma combinação das propriedades dos materiais que compõem suas fases (CALLISTER; RETHWISCH, 2010). Na Fig. 1 está um exemplo de gráfico tensão-deformação de um ensaio de tração com os materiais de cada uma das fases de um compósito e o material resultante. No estágio I fica clara a influência da fibra no módulo de elasticidade, enquanto no estágio II é possível notar a influência da matriz na tensão máxima e na deformação do compósito.

2.1.1 Matriz

A matriz pode ser metálica, cerâmica, ou mais comumente, polimérica. Os papéis da matriz em um material compósito podem ser resumidos em manter os reforços no lugar, distribuir as cargas recebidas pelo compósitos entre os reforços e proteger os reforços de condições ambientais adversas, degradação química ou desgaste por ação mecânica. Apesar de ter um papel fundamental na distribuição dos esforços, as matrizes têm pouca influência na resistência mecânica do compósito resultante (MALLICK, 2007).

O desempenho geral do compósito, porém, depende de uma escolha acertada da sua matriz. A matriz deve apresentar uma compatibilidade química com o reforço que será utilizado, para que não degrade o material, assim como uma boa capacidade de adesão,

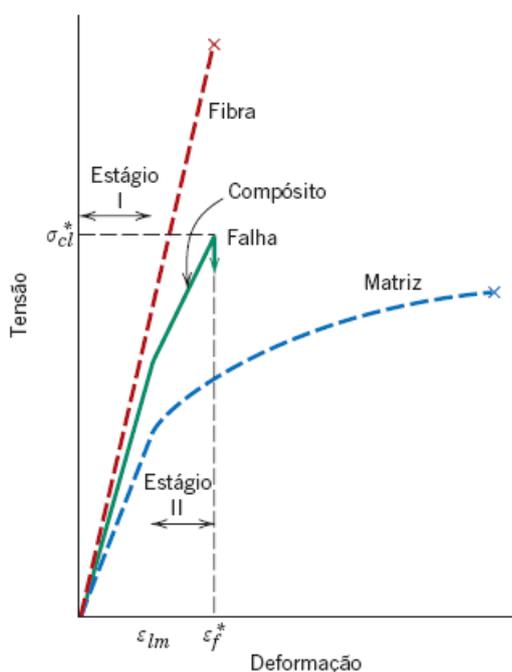


Figura 1 – Curva tensão-deformação típica de um material compósito de matriz polimérica reforçado por fibras (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

diminuindo a tendência a propagação de trincas, separação entre as camadas do compósito e outras formas de falha prematura.

A escolha da matriz também é um fator determinante para o processamento do compósito, especialmente quando pensamos em larga escala e os custos envolvidos. Ela é responsável por definir condições como o material dos moldes, os aceleradores e endurecedores necessários ao processo de cura, a necessidade de aplicação ou infusão à vácuo e a temperatura de cura.

2.1.2 Matriz Polimérica Termorrígida ou Termofixa

Comercialmente, é o tipo de matriz mais utilizado, em especial as resinas à base de poliéster e epóxi, que apresentam características satisfatórias para suas aplicações e uma boa relação custo-benefício. Apesar disso, há uma tendência que o uso de matrizes poliméricas termoplásticas aumente consideravelmente, uma vez que as matrizes termorrígidas têm uma produção mais poluente e não podem ser recicladas como as matrizes termoplásticas (NETO; PARDINI, 2016) (BELLIS, 2017).

São matrizes compostas por resinas poliméricas líquidas que sofrem endurecimento e se tornam sólidos rígidos a partir da formação de ligações químicas cruzadas entre as cadeias poliméricas. Esse processo de endurecimento é conhecido como cura e costuma necessitar da adição de um segundo componente à resina (o endurecedor) para iniciá-lo. O processo de cura pode ocorrer em temperatura ambiente, mas é comum o uso de

catalisadores ou aumento de temperatura para acelerá-lo (CLYNE; HULL, 2019).

O tamanho das cadeias poliméricas e a quantidade de ligações cruzadas determinam as propriedades mecânicas do polímero e, conseqüentemente, do compósito. O tamanho das cadeias é uma propriedade intrínseca dos compostos químicos envolvidos na reação, enquanto sua quantidade é influenciada pelas condições de cura, particularmente tempo e temperatura. Para que as propriedades mecânicas sejam maximizadas, há um tempo e temperatura (ou ciclos de tempo e temperatura) de cura ideais para cada resina. Ao final do processo de cura, pode haver uma retração no volume do compósito e, como resultado, a concentração de tensões residuais no sólido (CLYNE; HULL, 2019).

2.1.2.1 Matriz Poliéster

O poliéster é um polímero formado a partir de uma reação de condensação por etapas entre um ácido dicarboxílico e um álcool (glicol), cujos produtos são éster e água. Se um ou ambos os reagentes apresenta uma ligação dupla reativa entre carbonos, o resultado é uma resina insaturada. A reação química, e conseqüente formação de cadeias poliméricas, continua ocorrendo enquanto houver reagentes, resultando na estrutura química apresentada na Fig. 2 com “n” repetições unidas entre si pelos grupos “éster” (NETO; PARDINI, 2016).

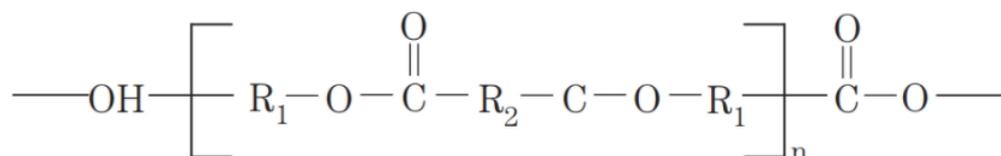


Figura 2 – Representação esquemática da estrutura de um poliéster insaturado (NETO; PARDINI, 2016).

O processo de cura de uma resina poliéster insaturada demoraria a ocorrer de forma natural porque suas moléculas têm pouca mobilidade (NETO; PARDINI, 2016). Para acelerar essa reação, é adicionada uma pequena quantidade de um iniciador ou catalisador, como o terc-butil-perbenzoato (TBPB), mostrado na Fig. 3 e unidades monoméricas insaturadas, como estireno (Fig. 4).

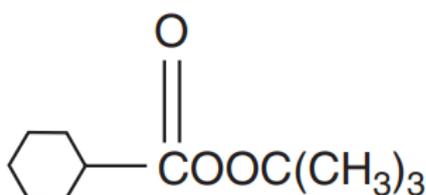


Figura 3 – Fórmula química do TBPB (MALLICK, 2007).

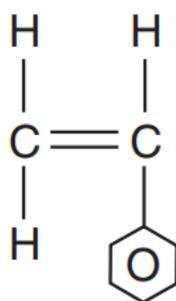


Figura 4 – Estrutura química do Estireno (MALLICK, 2007).

Com a adição de calor, o catalisador se decompõe em radicais livres que reagem com as ligações duplas carbono-carbono do estireno. Os radicais estireno, então, se ligam às cadeias de poliéster nos pontos de insaturação e formam ligações cruzadas entre elas, como simplificado na Fig. 5. (MALLICK, 2007)

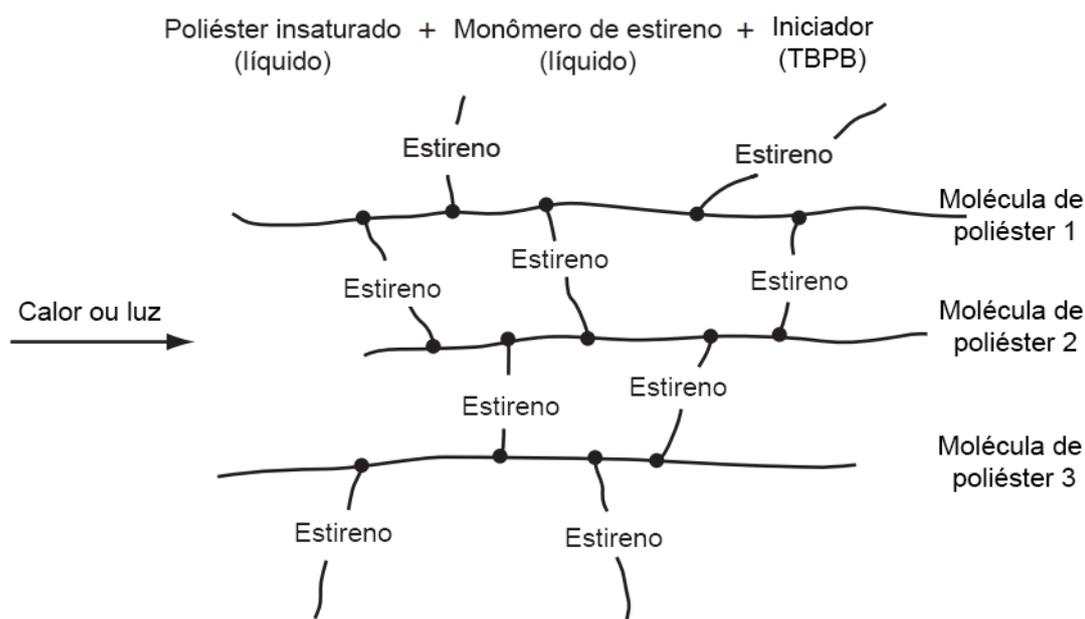


Figura 5 – Representação esquemática do processo de cura de uma resina poliéster. Adaptado de: (MALLICK, 2007, p. 96).

A disponibilidade de ácidos e glicóis torna as combinações possíveis para obtenção de resinas poliéster muito grandes, porém, apenas algumas poucas são utilizadas em razão da sua facilidade de obtenção em larga escala e, sobretudo, custo. A utilização apenas de ácidos dicarboxílicos insaturados provocaria espaçamentos pequenos entre as ligações duplas nas cadeias poliméricas, que levaria a um material frágil e quebradiço. Assim, na formulação da resina poliéster, é necessário o uso também de ácidos saturados que atuam como extensores da cadeia. Maiores proporções de ácidos saturados, como o ácido ortoftálico e ácido isoftálico, resultam em resinas mais tenazes e com menor retração volumétrica após a cura (NETO; PARDINI, 2016).

Podem ser encontradas resinas poliéster com diversos comportamentos após a cura, desde sólidos duros e frágeis, a sólidos extremamente macios e flexíveis. Além da sua versatilidade de aplicações, resinas poliéster apresentam baixa viscosidade, baixo tempo de cura e baixo custo. Sua principal desvantagem é a alta tendência à contração, ou “encolhimento”, após a cura (MALLICK, 2007). Na Tab. 1 estão apresentadas algumas propriedades mecânicas típicas de resinas poliéster e sua grande variação.

Tabela 1 – Propriedades típicas de resinas poliéster insaturadas (a 23°C) (MALLICK, 2007)

Propriedade	Valor
Massa específica [g/cm ³]	1,1-1,43
Tensão de Escoamento [MPa]	34,5-103,5
Módulo de Elasticidade [GPa]	3,1-3,45
Elongação [%]	1-5
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) [°C]	60-205
Encolhimento após cura [%]	5-12

2.1.2.2 Matriz Epóxi

Resinas epóxi são formadas por polímeros com pelo menos dois grupos epóxi nas extremidades das suas moléculas, esses grupos também recebem o nome de oxiranos ou etoxilinas e têm sua estrutura representada na Fig. 6 (NETO; PARDINI, 2016).

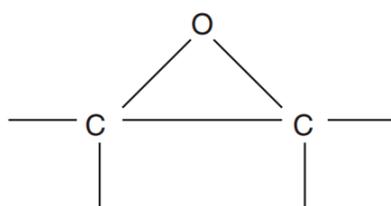


Figura 6 – Estrutura química de um grupo Epóxi (MALLICK, 2007).

A maior parcela das resinas epóxi largamente disponíveis comercialmente têm como material base diglicidil-éter de bisfenol-A (DGEBA), representado na Fig. 7. Que apresenta dois grupos epóxi nas suas extremidades e uma unidade de repetição central com um tamanho “n” que pode variar de 0 a 25. As resinas comercializadas são uma mistura de oligômeros com diferentes valores de “n”. Quando o valor médio de “n” está entre 0 e 1, a resina apresenta baixa viscosidade, enquanto resinas com valor médio de $n > 1$ podem ser encontradas no estado sólido (NETO; PARDINI, 2016).

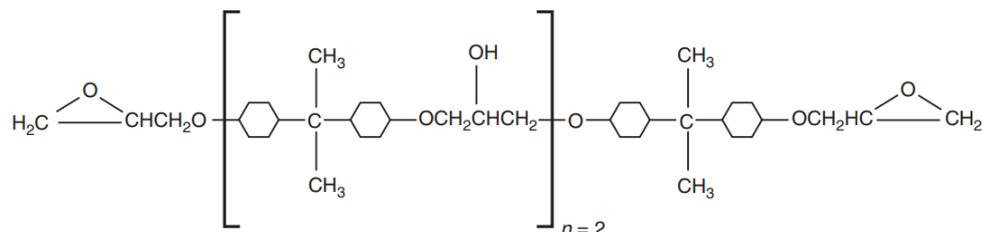


Figura 7 – Estrutura química de uma molécula de DGEBA. (MALLICK, 2007)

Um agente de cura comum para resinas epóxi é o dietileno triamina (DETA). Os átomos de hidrogênio de um dos grupos amina (NH_2) do DETA reagem com os grupos epóxi das cadeias do DGEBA, enquanto outro grupo amina reage com outro grupo epóxi de uma segunda cadeia, formando ligações cruzadas entre elas. Uma simplificação desse processo de cura é apresentada na Fig. 8 (MALLICK, 2007).

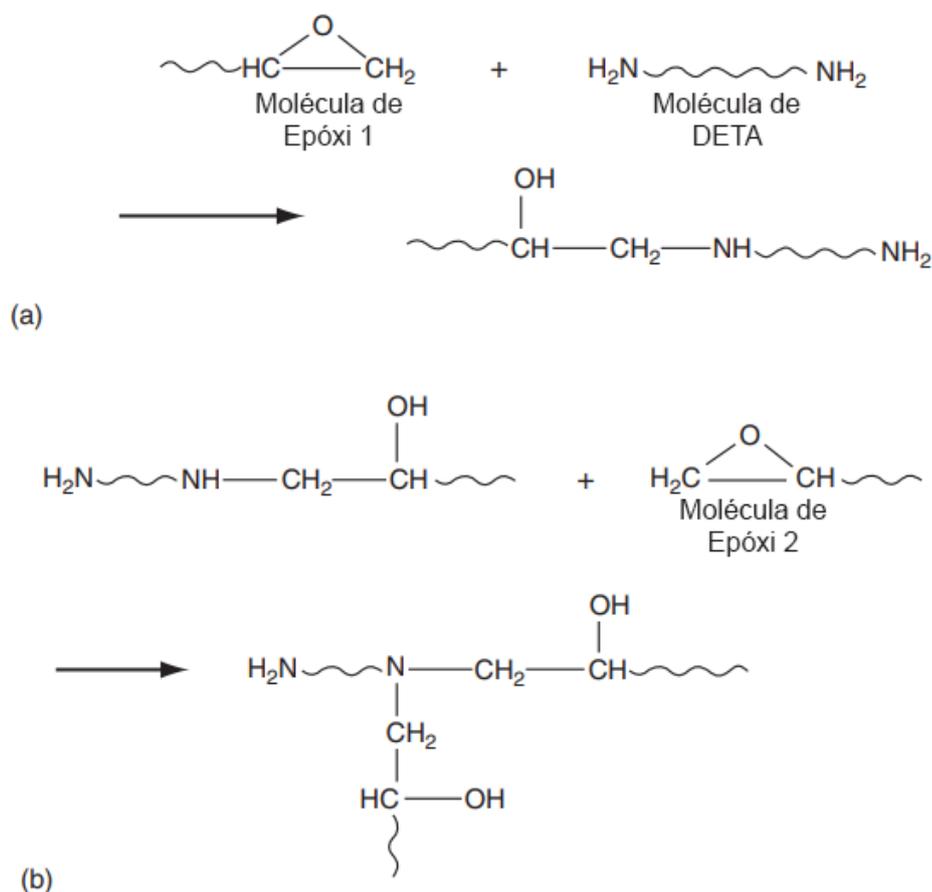


Figura 8 – Representação esquemática do processo de cura de uma resina epóxi. (a) Reação do DETA com os grupos epóxi e (b) formação das ligações cruzadas entre as cadeias. Adaptado de: (MALLICK, 2007, p. 90)

Há também resinas epóxi multifuncionais obtidas a partir de compostos como glicidil-éter novolaca (REPN) ou tetraglicidil metileno dianilina (TGMDA), que apresentam altas viscosidades à temperatura ambiente e são muito utilizadas para a produção de pré-impregnados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. Além disso, outros agentes

de cura, como aminas alifáticas ou aromáticas, modificam as condições necessárias para a cura da resina. Aminas alifáticas, por exemplo, têm tempos de cura curtos e funcionam à temperatura ambiente, enquanto aminas aromáticas necessitam de altas temperaturas (150°C-180°C) para funcionar, além de serem capazes de formar estados de cura parcial (estágio-B) para aplicação em pré-impregnados (NETO; PARDINI, 2016).

Assim como as resinas poliéster, resinas epóxi também apresentam uma grande variedade de aplicações em função dos compostos que podem ser utilizados como base. Suas principais vantagens em relação a outras matrizes termofixas são a excelente resistência à degradação química e solventes, grande compatibilidade e adesão a fibras e outros substratos e baixa contração volumétrica após a cura. A Tab. 2 apresenta os intervalos de valores para algumas propriedades mecânicas de resinas epóxi. Sua aplicação pode ser limitada em razão do custo, longo tempo de cura e, por vezes, da necessidade de altas temperaturas, já que a cura em autoclave é particularmente dispendiosa para peças de grandes dimensões (MALLICK, 2007).

Tabela 2 – Propriedades típicas de resinas epóxi (a 23°C) (MALLICK, 2007)

Propriedade	Valor
Massa específica [g/cm ³]	1,2-1,3
Tensão de Escoamento [MPa]	55-130
Módulo de Elasticidade [GPa]	2,7-4,10
Módulo de Poisson	0,2-0,33
Encolhimento após cura [%]	1-5

2.1.3 Reforço

Reforços para compósitos apresentam-se de três formas principais: fibras contínuas, fibras curtas e particulados. Enquanto reforços particulados são geralmente utilizados para melhorar ou alterar propriedades das matrizes onde são inseridos, as fibras são as responsáveis por, de fato, suportar os carregamentos mecânicos aos quais o compósito é submetido (NETO; PARDINI, 2016).

O uso de fibras para lidar com a aplicação de cargas é uma escolha baseada na baixa ocorrência de defeitos em seus filamentos. Elas apresentam poucas descontinuidades, baixa massa específica e alta resistência mecânica, resultado de fortes ligações na sua estrutura química. Todavia, seu uso em componentes estruturais só é possível com a utilização de uma matriz, que distribui as cargas ao longo de sua extensão, sem ela, as fibras suportariam apenas cargas de tração e falhariam quando submetidas a baixas cargas transversais (NETO; PARDINI, 2016).

2.1.3.1 Fibra de vidro

A maioria das fibras de vidro é derivada de sílica (SiO_2) com a adição de óxidos de elementos como cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. Sua estrutura atômica é amorfa e seu principal bloco de construção é o tetraedro de SiO_4 que, em estado puro forma uma estrutura altamente cristalina na forma de quartzo. A estrutura e propriedades mecânicas da fibra de vidro são isotrópicas. A adição desses óxidos diminui sua temperatura de transição vítrea e permite a conformação mecânica na forma de fibra (CLYNE; HULL, 2019).

Sua utilização na fabricação de compósitos é motivada pelo seu baixo custo, alta resistência à tração e inércia química. Sua baixa elasticidade, autoabrasividade e baixa vida em fadiga são desvantagens que podem ser apresentadas contra sua utilização (NETO; PARDINI, 2016).

A produção de fibra de vidro é feita à partir da fusão da suas matérias-primas em um reservatório. O material fundido é então forçado contra uma placa com diversos furos de diâmetros normalmente entre $8 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$, fluindo com a gravidade. Os filamentos resultantes são então puxados e recobertos com materiais de acordo com sua aplicação (como por exemplo lubrificantes ou agentes de adesão), para depois serem enrolados em bobinas (CLYNE; HULL, 2019)(NETO; PARDINI, 2016).

2.2 Laminados Metal-Fibra

A origem dos LMF pode ser remontada ao ano de 1945, na fábrica devastada pelo pós-guerra da holandesa Fokker, onde a necessidade da sua reconstrução abriu um terreno fértil para o desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse contexto, Rob Schliekelmann, que tivera contato com a união de chapas metálicas por adesivos estruturais ao realizar um treinamento na De Havilland, trouxe a ideia para a Fokker. Então, foram testados os primeiros painéis compostos por camadas de alumínio unidas por um adesivo estrutural para aplicação aeroespacial (VERMEEREN, 2003).

Notou-se que a utilização desse adesivo entre as camadas era capaz de aumentar a vida em fadiga do alumínio, quando comparado a chapas espessas e contínuas. Jaap Schijve percebeu que isso ocorria porque a disposição em camadas era capaz de frear a propagação de trincas ao longo do material, quando uma trinca iniciada em uma chapa encontrava a interface do material adesivo, ela não se propagava para a chapa seguinte. Em 1973, Schijve viria a se tornar professor na Delft University of Technology (DUT), onde encontraria Boud Vogelesang, que na época já trabalhava com adesivos estruturais para chapas metálicas, mas ainda sem a utilização de fibras (VERMEEREN, 2003).

Ao voltar de uma visita aos Estados Unidos, o grupo de trabalho de Schliekelmann

na Fokker percebeu que as pesquisas realizadas pelos norte-americanos eram muito semelhantes ao seu próprio trabalho na união de chapas metálicas, bastando a adição de fibras aos adesivos estruturais. Foram realizados testes com essa combinação que se mostraram promissores, mas apresentavam dificuldades que poderiam levar a um alto custo para serem solucionadas, inviabilizando o novo material economicamente. Desde o princípio, a DUT esteve envolvida com a Fokker nos testes e posterior desenvolvimento do material. Em 1978, Schijve e Vogelesang realizaram testes animadores utilizando fibras de aramida e carbono (VERMEEREN, 2003).

Os estudos continuaram e o entendimento dos mecanismos de propagação de trincas e delaminação entre as camadas foi sendo melhor compreendido, ao passo que a otimização entre o balanço da tendência a cada um deles foi sendo alcançado para tornar os materiais viáveis. Um dos estudantes da Delft, Marissen, desenvolveu um modelo analítico para predição de propagação de trincas em LMF a partir de conceitos da mecânica da fratura em laminados com fibras de aramida, batizados de ARALL (*Aramid Fiber Reinforced Aluminium Laminates*) (VLOT; GUNNICK, 2001).

Durante os anos 1980, a DUT teve a parceria de diversas empresas que forneceram o material necessário ao desenvolvimento dos LMF e acabaram por registrar algumas patentes ao longo dos anos. A AKZO (hoje chamada Akzo Nobel) era responsável por prover as fibras de aramida, a ALCOA (hoje, Arconic) fornecia as chapas finas de alumínio, enquanto os adesivos estruturais, ou resinas, eram fornecidos pela 3M, que também era capaz de fabricar os pré-impregnados utilizados. Em 1981 foi registrada a patente do ARALL, que foi depois testado e homologado para utilização em painéis das asas do avião Fokker F-27, embora as primeiras partes feitas de ARALL utilizadas em voo tenham sido painéis de acesso nas asas do Fokker 50. Nesse momento, havia dois tipos de ARALL, o ARALL 1 com camadas de alumínio 7075 e o ARALL 2 com camadas de alumínio 2024, essa gama de materiais depois viria a ser expandida (VERMEEREN, 2003).

Logo após veio o desenvolvimento de LMF com fibras de carbono, batizados de CARALL (*Carbon Reinforced Aluminium Laminates*). A partir dos anos 1990 foi desenvolvida e comercializada uma evolução do ARALL com fibras de vidro de alta resistência, denominada GLARE[®] (*Glass-Reinforced Fibre Metal Laminate*) e que foi posteriormente utilizada no Airbus A380 como um dos principais materiais estruturais. As chapas metálicas unidas por um adesivo estrutural eram classificadas como uma estrutura, enquanto os laminados metal-fibra que avançaram a partir delas tornaram-se uma nova categoria de materiais estruturais (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011).

2.2.1 GLARE[®]

Enquanto os painéis produzidos com ARALL apresentavam um desempenho ruim quando submetidos a impactos, o mesmo não pode se dizer dos painéis de GLARE. Pes-

quisas demonstraram que impactos a baixa velocidades em painéis de GLARE com fibras bidirecionais apresentavam resultados superiores não apenas a painéis de ARALL e CARALL, mas também em relação a painéis de alumínio, no caso de impactos de alta velocidade. Além disso, seu comportamento após o impacto também é de grande interesse, uma vez que esse laminado sofre deformações plásticas (ao contrário de materiais compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras), que torna a identificação de danos e substituição de painéis muito mais fácil, assim como evita a falha posterior do material em razão de um dano oculto provocado pelo impacto (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011).

O GLARE está disponível comercialmente em 6 graduações, conforme a Tab. 3. Onde a orientação a 0° corresponde ao sentido paralelo ao sentido de laminação da chapa de alumínio (VLOT; GUNNICK, 2001).

Tabela 3 – Tipos de GLARE[®] padronizados (VLOT; GUNNICK, 2001)

Tipo de GLARE	Subtipo	Espessura do alumínio [mm] e liga	Orientação das fibras em cada camada	Principais qualidades favorecidas
GLARE 1	-	0,3-0,4 7475-T761	$0^\circ/0^\circ$	Fadiga, resistência, tensão de escoamento
GLARE 2	GLARE 2A	0,2-0,5 2024-T3	$0^\circ/0^\circ$	Fadiga, resistência
	GLARE 2B	0,2-0,5 2024-T3	$90^\circ/90^\circ$	Fadiga, resistência
GLARE 3	-	0,2-0,5 2024-T3	$0^\circ/90^\circ$	Fadiga, impacto
GLARE 4	GLARE 4A	0,2-0,5 2024-T3	$0^\circ/90^\circ/0^\circ$	Fadiga, resistência na direção de 0°
	GLARE 4B	0,2-0,5 2024-T3	$90^\circ/0^\circ/90^\circ$	Fadiga, resistência na direção de 90°
GLARE 5	-	0,2-0,5 2024-T3	$0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$	Impacto
GLARE 6	GLARE 6A	0,2-0,5 2024-T3	$+45^\circ/-45^\circ$	Cisalhamento, propriedades fora dos eixos principais
	GLARE 6B	0,2-0,5 2024-T3	$-45^\circ/+45^\circ$	Cisalhamento, propriedades fora dos eixos principais

Uma forma compreensível que é utilizada para denominar laminados de GLARE é, por exemplo: Glare 4B-4/3-0.4. Que indica um laminado de Glare 4B, com 4 camadas de alumínio, 3 camadas de fibra de vidro e uma espessura da chapa de alumínio de 0,4 mm. Caso as camadas de alumínio tenham espessuras distintas, elas são apresentadas individualmente na ordem de laminação, como por exemplo “Glare 4B-4/3-0.4/0.3/0.3/0.4”, onde as camadas mais externas têm 0,4 mm de espessura, enquanto as camadas centrais

têm 0,3 mm (VLOT; GUNNICK, 2001).

As fibras de vidro utilizadas no GLARE são do tipo S (*S-glass*), com aproximadamente 10 μm de espessura, 4000 MPa de resistência à tração, módulo de elasticidade de 88 GPa e alongamento máximo de 4,45%. A resina utilizada é um adesivo estrutural com limite de resistência à tração de aproximadamente 50 MPa, módulo de elasticidade de 1,7 GPa e alongamento máximo variando entre 5% e 10%. Além de tratamentos superficiais de anodização no alumínio conduzidos com ácido crômico ou fosfórico, com a possibilidade de uso de uma base de pintura (*primer*) para evitar corrosão e melhorar a ancoragem do compósito (VLOT; GUNNICK, 2001).

Como já apresentado, embora a resina não contribua significativamente para as propriedades mecânicas do laminado final, ela é de suma importância para garantir seu desempenho e integridade. Na produção do GLARE é utilizado o adesivo estrutural FM[®] 94, à base de epóxi, que garante uma aderência extremamente alta entre as superfícies metálicas tratadas e as fibras de vidro (VLOT; GUNNICK, 2001).

Embora a liga de alumínio mais utilizada comercialmente no GLARE seja a 2024-T3, para fins experimentais cujo objetivo não seja testar as propriedades mecânicas absolutas do GLARE, mas realizar uma comparação entre processos envolvidos ou outras alternativas, é viável a utilização de ligas distintas. Zhu (2021) e Bellini (2019), por exemplo, valeram-se das ligas AA6061 e Al 1100, respectivamente, em seus trabalhos.

2.3 Adesão e Interface

Interface é a região de interação entre as fases de um compósito. Essa interação é regida pelas forças atrativas entre as superfícies por meio da adesão (MALLICK, 2007). Em um LMF, há duas interfaces a serem analisadas, a interface entre a matriz e o reforço do compósito e a interface entre o compósito e as camadas metálicas. Apenas a segunda é de interesse do escopo do presente trabalho.

A natureza da adesão é dependente de características das superfícies envolvidas, como a composição química, arranjo atômico e energia interfacial, uma forma de quantificar as forças intermoleculares. Além da energia interfacial, que é a energia superficial presente na região de interação, parâmetros como ângulo de contato e quantidade de vazios também podem ser utilizados como estimadores da adesão no material (BELLIS, 2017)(CLYNE; HULL, 2019).

Entre os processos de promoção da adesão pode-se destacar (CLYNE; HULL, 2019):

- **Interdifusão e ligações químicas:** vários processos de difusão são passíveis de ocorrer na região da interface. Em uma matriz polimérica, extremidades livres dos

polímeros podem se difundir pelas fibras e se entrelaçar, aumentando a resistência da matriz. Esse efeito pode ser estimulado com a adição de agentes de adesão ou solventes ao reforço.

Outros agentes podem promover reações químicas para melhorar a adesão, além de reações que ocorrem naturalmente ou de forma localizada em razão de condições ambientais. Um fator comum e que provoca reações químicas na interface de forma indesejada é a presença de umidade, que pode degradar adesivos estruturais e resinas utilizados com frequência como matrizes em LMF (VLOT; GUNNICK, 2001).

- **Adesão mecânica:** espera-se que superfícies mais ásperas ou rugosas, tanto nas fibras quanto em outros materiais, promovam um melhor contato interfacial em razão do aumento na área da superfície. Os efeitos da melhora da adesão por esse processo tendem a ser mais significativos sob cisalhamento.
- **Atração eletrostática:** se as superfícies estão eletricamente carregadas com cargas de sentidos opostos, isso pode resultar em uma força adesiva. Alguns tratamentos de fibras valem-se disso para garantir deposição de aditivos (como agentes de adesão) em toda sua superfície. Em um compósito pronto, a atração eletrostática tem um papel muito pequeno na adesão e nas propriedades mecânicas finais, uma vez que pode ser facilmente reduzida ao ser descarregada por um solvente polar, por exemplo.

Na fabricação de um LMF, é dada uma atenção especial a adesão entre o compósito, por meio da matriz, e a fase metálica. Além da compatibilidade química entre o adesivo estrutural e a menor absorção de umidade, a adesão é favorecida pelo tratamento superficial dos metais. Estes tratamentos podem ser mecânicos, como jateamento e texturização a *laser*, químico com o uso de agentes de adesão (por exemplo, silanos), por ataque com ácido ou base, eletroquímico por meio de anodização ou tratamentos a seco (como texturização a *laser* e cobertura por *spray* de plasma) (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011). Em LMF destinados a fins militares, por exemplo, é imperativo que o alumínio utilizado seja anodizado (OSTAPIUK *et al.*, 2014)

A ausência de tratamento nas camadas metálicas de um LMF pode resultar em falhas prematuras do material, especialmente quando submetidos a ensaios de flexão e cisalhamento. Isso é claro ao observar os resultados dos ensaios de Vasudevan (2020), em que houve uma delaminação acentuada, com separação quase completa, na região da interface entre alumínio e compósito.

A análise da interface pode ser realizada após a manufatura dos laminados ou mesmo após testes mecânicos de forma a evidenciar falhas e discontinuidades. Métodos para essa análise incluem a observação visual, uso de câmeras digitais, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011)(OSTAPIUK *et al.*, 2014).

2.4 Anodização

A alumina (Al_2O_3) é um óxido formado naturalmente sobre a superfície do alumínio quando este se encontra em contato com o ar atmosférico. Essa camada de óxido é porosa e apresenta características interessantes para a engenharia, uma vez que possui excelente adesão ao metal, alta resistência elétrica e dureza superficial, sendo capaz de proteger o alumínio de processos como corrosão e desgaste (GENTIL, 2011).

Todavia, a espessura da camada de Al_2O_3 formada naturalmente é pequena e depende do tempo de exposição do alumínio ao ar, chegando a algo em torno de $0,03 \mu\text{m}$ por ano. Para aumentar essa espessura rapidamente a fim de obter uma proteção mais duradoura, o alumínio é submetido a processos químicos ou eletrolíticos, como a anodização (GENTIL, 2011).

A anodização é um processo eletroquímico onde o metal de interesse assume a posição de anodo em uma cuba eletrolítica e a oxidação parcial forma um filme passivador na sua superfície. Além do alumínio, a anodização pode ser aplicada a peças de magnésio, titânio, vanádio, zircônio e tântalo (WELLER *et al.*, 2017)(GENTIL, 2011). A equação química do processo de anodização está apresentada na Fig. 9 e sua ilustração na Fig. 10.

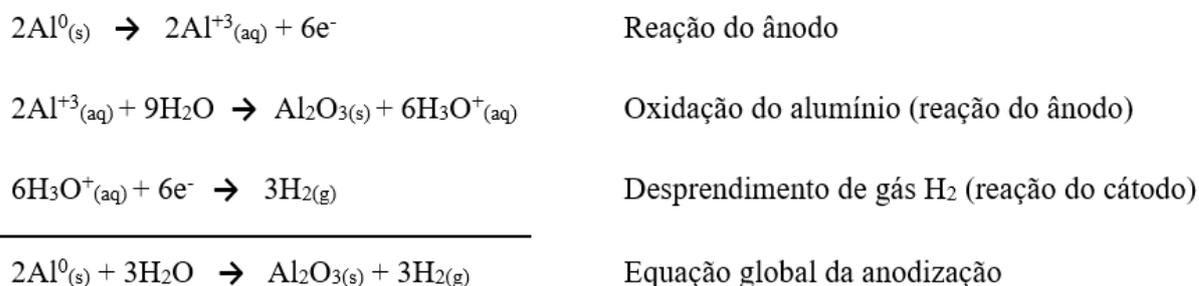


Figura 9 – Equacionamento químico da reação de anodização do alumínio. Adaptado de: (SILVA, 2006), p. 25.

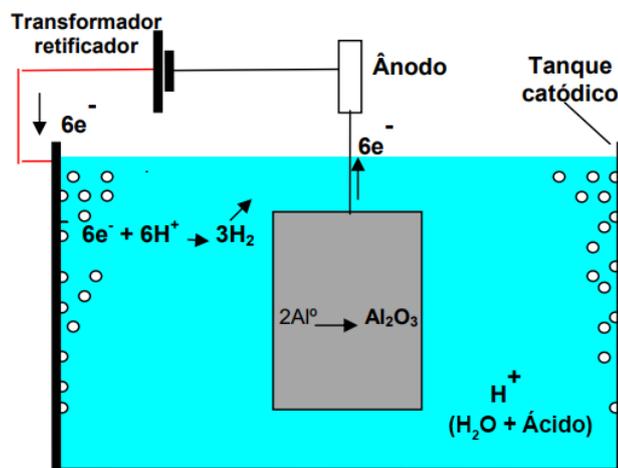


Figura 10 – Ilustração do processo de anodização do alumínio (SILVA, 2006).

A solução eletrolítica utilizada no processo de anodização do alumínio é ácida e pode utilizar diversos ácidos como o ácido sulfúrico, crômico, oxálico, fosfórico, bórico ou sulfâmico em concentração, temperatura, parâmetros de tensão e tempo adequados para cada um. Na Tab. 4 há alguns parâmetros de anodização para diferentes soluções (GENTIL, 2011).

Tabela 4 – Parâmetros de anodização de alumínio para diferentes eletrólitos (GENTIL, 2011)

Eletrólito	Tensão [V]	Densidade de corrente [A/dm ²]	Temperatura [°C]	Tempo [minutos]	Espessura da camada formada [μ m]	Cor
H ₂ SO ₄ (15-25%)	6-24	1,3-1,5	20-30	30-60	20-30	Cinza-claro
H ₂ CrO ₄ (3-10%)	40-50	0,3-0,5	40	40-50	7-10	Cinza-escuro
H ₂ C ₂ O ₄ (1-5%)	65	1,3-1,5	25-35	30-40	20-30	Amarelada

Para a produção de laminados metal-fibra, no entanto, não é recomendada a utilização de ácido sulfúrico (H₂SO₄) no processo de anodização do alumínio. Isso ocorre porque a camada de óxido formada em meio sulfúrico é dura e quebradiça, favorecendo a nucleação de trincas e comprometendo a vida em fadiga das peças (SILVA, 2006).

Industrialmente, é comum realizar a anodização do alumínio para laminados metal-fibra em uma solução de ácido crômico (H₂CrO₄). Apesar de bastante eficaz, essa solução necessita de atenção quanto às condições do ambiente durante o manuseio e o uso de equipamentos de proteção eficazes, em razão da alta toxicidade dos resíduos de cromo. Além dos requisitos de tratamento para o seu descarte adequado, como a redução do Cr⁺⁶ para Cr⁺³ em meio ácido, sua neutralização e posterior filtragem em filtro prensa (SILVA, 2006).

Foram obtidos resultados satisfatórios para a anodização do alumínio para uso em laminados por Zhu (2021) e Bellis (2017) em solução de ácido fosfórico (H₃PO₄). Zhu (2021) realizou a anodização em uma solução de H₃PO₄ de concentração 100 g/L, a uma temperatura de 25 °C com os eletrodos submetidos a uma diferença de potencial de 25V por 20 minutos. Bellis (2017) utilizou uma solução de H₃PO₄ com concentração de 10% em volume, a uma temperatura de 25°C, submetida à uma tensão de 10V e utilizando contra eletrodos de cobre, sua conclusão foi que o tempo ideal de anodização do alumínio nessas circunstâncias é de 10 minutos. Ambos realizaram decapagem química em solução de NaOH a 10% em massa, seguida de neutralização em solução de HNO₃ a 65% em massa. Após a neutralização foi utilizada limpeza com água corrente, seguida de água deionizada e acetona ou apenas água deionizada.

2.5 Ângulo de contato

O ângulo de contato entre a superfície de um sólido e a gota de um líquido expressa a molhabilidade desse sólido e é um importante parâmetro para a avaliação da adesão em compósitos. Esse ângulo depende da relação entre as forças adesivas, que fazem a gota se espalhar sobre a superfície, e as forças coesivas do líquido, que fazem a gota se contrair na tentativa de formar uma esfera de superfície mínima (SILVA, 2006)(COUTINHO, 2007).

O ensaio para determinação do ângulo de contato (θ) é realizado ao pingar uma gota d'água ou de algum solvente orgânico sobre uma superfície nivelada do sólido de interesse, conforme mostrado na Fig. 11. Onde γ representa as energias superficiais dos contatos sólido-líquido (SL), líquido-ar (LA) e sólido-ar (SA) (COUTINHO, 2007).

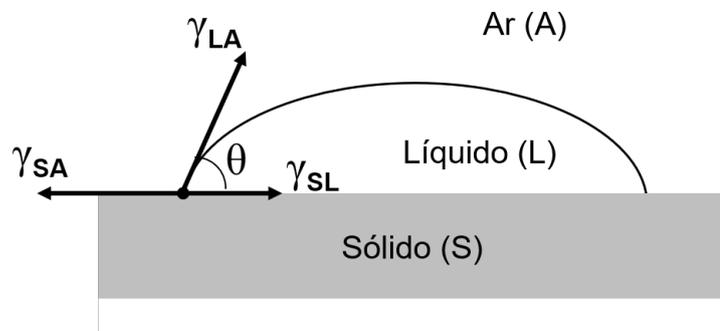


Figura 11 – Diagrama das tensões envolvidas nas energias superficiais do ângulo de contato. Adaptado de (SILVA, 2006, p. 38).

A condição termodinâmica do contato, também chamada de equação de Dupré, em termos das energias superficiais é dada pela Eq. 1. Onde W_a é o trabalho de adesão líquido-sólido.

$$W_a = \gamma_{LA} + \gamma_{SA} - \gamma_{SL} \quad (1)$$

A molhabilidade seria favorecida se as energias superficiais do sólido e do líquido fossem altas e a energia superficial da interface, baixa. Todavia, no mundo real, altos valores para a energia superficial do líquido (γ_{LA}) inibem o espalhamento da gota (CLYNE; HULL, 2019). O ângulo de contato é expresso pela Equação de Young (Eq. 2).

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos \theta \quad (2)$$

A molhabilidade completa de uma superfície ($\theta = 0^\circ$) ocorre se e a energia superficial do sólido é igual ou maior que a soma da energia do líquido e da interface. Nesse caso, substituindo a Eq. 2 na Eq. 1, temos a Eq. 3 que expressa o máximo trabalho de adesão (W_a).

$$W_a = \gamma_{LA} + \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos \theta - \gamma_{SL}$$

$$W_a = 2\gamma_{LA} \quad (3)$$

Por outro lado, quando não há molhabilidade alguma e o líquido forma uma esfera sobre a superfície, $\theta = 180^\circ$ e $W_a = 0$. A energia da superfície da interface é difícil de se obter diretamente, porém, a energia superficial dos sólidos e líquidos constituintes do sistema costuma ser conhecida e, quando a energia superficial do sólido (γ_{SA}) excede muito a energia superficial do líquido (γ_{LA}), a molhabilidade se estabelece facilmente (CLYNE; HULL, 2019).

2.6 Rugosidade

A rugosidade superficial é composta por irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes dos processos de fabricação e usinagem, dependendo de vários parâmetros envolvidos nesses processos e apresentados na forma de um perfil com picos e vales (MACHADO *et al.*, 2015).

É observado que o aumento da rugosidade de uma superfície aumenta sua área superficial, diminui o ângulo de contato da superfície e favorece a retenção mecânica de materiais estranhos. Desta maneira, o aumento da rugosidade está relacionado com o aumento da molhabilidade dos sólidos (COUTINHO, 2007).

A quantificação da rugosidade superficial pode ser expressa de diversas formas, sendo a mais utilizada para controle de qualidade de processos a Rugosidade Média (Ra). A Rugosidade Média é a média aritmética dos valores absolutos da rugosidade ao longo do comprimento de amostragem. Apesar da sua facilidade de obtenção e usabilidade, esse valor falha em caracterizar o perfil de rugosidade, uma vez que perfis com grandes diferenças de amplitude entre os picos de rugosidade podem apresentar a mesma média que uma superfície mais uniforme (MACHADO *et al.*, 2015).

Destarte, costuma-se utilizar também como parâmetro para avaliar a rugosidade a Rugosidade Média Quadrática (Rq), que apresenta a raiz quadrada da média dos valores absolutos de rugosidade ao longo do comprimento de amostragem. Com isso, as distorções causadas por perfis com valores de amplitudes com grandes variações são levadas em consideração, uma vez que essa medida representa também o desvio-padrão da distribuição de alturas (MACHADO *et al.*, 2015).

Há ainda outras medidas de rugosidade mais relevantes para obtenção dos valores exatos de amplitude dos picos, seu espaçamento ou outros parâmetros para avaliação estatística (MACHADO *et al.*, 2015). Contudo, não são de interesse para o presente trabalho. A rugosidade pode ser determinada com o uso de um rugosímetro ou por meio de

Microscopia de Força Atômica, que também permite determinar a topografia da superfície (ALVES *et al.*, 2013).

2.6.1 Microscopia de Força Atômica

A microscopia de força atômica, ou AFM (do inglês *Atomic Force Microscopy*) é um tipo de microscopia de varredura por sonda baseado no princípio da interação entre os átomos que compõem a ponta de prova e os átomos da superfície da amostra. A AFM pode ser utilizada para determinar a rugosidade de superfícies, apresentando-se como uma opção popular pela sua capacidade de produzir imagens com ótima resolução, facilidade de preparar amostras, alta disponibilidade de equipamentos e baixo custo quando comparada a opções semelhantes (PINTO *et al.*, 2013)(BELLIS, 2017).

No momento da varredura, a interação entre os átomos pode ser atrativa ou repulsiva, em consequência da distância dos átomos e a interação de suas nuvens eletrônicas, cuja intensidade é a soma de forças como a força eletrostática, forças de Van der Waals, químicas e capilar. As forças eletrostáticas podem ser evitadas pela seleção adequada dos materiais da ponta e das amostras de forma a evitar o acúmulo de cargas (PINTO *et al.*, 2013).

Os componentes da AFM são: a sonda, seu suporte, chamado de *cantilever* ou haste, cerâmicas piezoelétricas para posicionamento da amostra, além de um *laser*, conjunto de espelhos, fotodetector (fotodiodo) e o *software* para interpretação dos dados e digitalização da superfície. Durante a varredura, o *cantilever* sofre deflexões quando a sonda se aproxima da superfície da amostra. Essa deflexão desvia a trajetória do *laser* que incide sobre a sonda e é detectada pelo fotodiodo, esse desvio é registrado e o sistema de controle ajusta a posição da amostra ou da ponta para evitar danos e erros de medição (PINTO *et al.*, 2013). Esse processo está representado na Fig. 12 e os dados registrados são utilizados para determinar rugosidade e topologia da superfície, por exemplo.

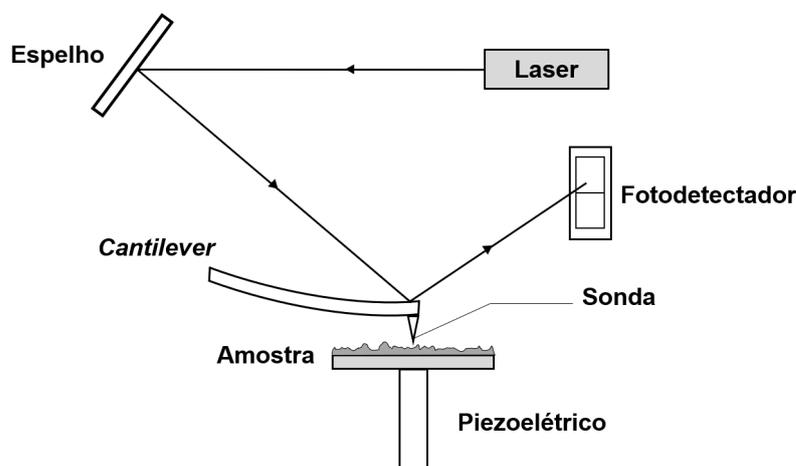


Figura 12 – Esquema de operação de um aparelho de Microscopia de Força Atômica. Adaptado de (SOUZA, 2011 apud BELLIS, 2017, p. 28).

2.7 Laminação a vácuo

Quando nos referimos a processos de manufatura de compósitos laminados com uso de bolsa de vácuo, destacam-se dois métodos: a laminação manual e a infusão à vácuo. Há ainda outros métodos utilizados em circunstâncias que dependem das matrizes, tipo de reforço, complexidade das peças, custo e volume de produção. Entre eles podemos citar a moldagem por compressão, pultrusão, enrolamento filamentar etc. (MALLICK, 2007).

A laminação manual é o método mais simples e mais antigo de produção de compósitos, sendo utilizado até hoje e apresentando resultados seguros e satisfatórios. Na laminação manual, as camadas de fibras são posicionadas e impregnadas manualmente com resina e o auxílio de escovas e rolos, para posterior aplicação de vácuo e remoção do excesso de resina. Esse mesmo processo pode ser realizado com tecidos pré-impregnados, obviamente sem impregnação manual de mais resina, seguido de cura em autoclave após aplicação do vácuo. Sua principal desvantagem é o tempo de processamento e trabalho manual envolvido (MALLICK, 2007)(GAMA, 2017).

Na infusão à vácuo, as fibras são posicionadas sobre o molde e dentro da bolsa de vácuo sem a adição de resina. Esta é infundida por meio da bomba de vácuo que “suga” a resina de um reservatório externo e a distribui pelo laminado com o auxílio de canais posicionados estrategicamente. O excesso de resina é conduzido para um reservatório intermediário entre o molde e a bomba. Esse método é muitas vezes preferido porque apresenta um tempo de processamento menor e evita o uso excessivo de resina, resultando em laminados mais leves e com a mesma resistência mecânica pretendida (GAMA, 2017).

Após a aplicação de vácuo para retirada do ar e excesso de resina, o conjunto pode ser levado a um autoclave para cura da resina a alta temperatura ou realização de ciclos de cura. No caso do uso de *prepregs*, é mandatório que seja realizada cura em autoclave, já que em temperatura ambiente ela poderia levar semanas ou sequer se consolidar. Para laminados metal-fibra, a aplicação de pressão também é extremamente recomendável a fim de diminuir ao máximo a quantidade de vazios e possíveis propagadores de trincas na região da interface metal-compósito (MALLICK, 2007)(OSTAPIUK *et al.*, 2014).

2.8 Ensaios mecânicos em compósitos laminados

2.8.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração tem por finalidade obter a resistência à tração do corpo de prova e determinar diversas propriedades mecânicas do material como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura, dentre outras (GAMA, 2017).

A principal norma para ensaio de tração de LMF é a ASTM D3039, que estabelece

os parâmetros adequados para a condução do ensaio. Todavia, há uma liberdade para o formato dos corpos de prova, contanto que sua seção transversal seja retangular e as relações dimensionais expressas na norma sejam obedecidas (ASTM, 2000b). Dessa forma, encontra-se na literatura corpos de prova inteiramente retangulares, com ou sem abas, ou no formato de “osso de cachorro”, apresentado a Fig 13.

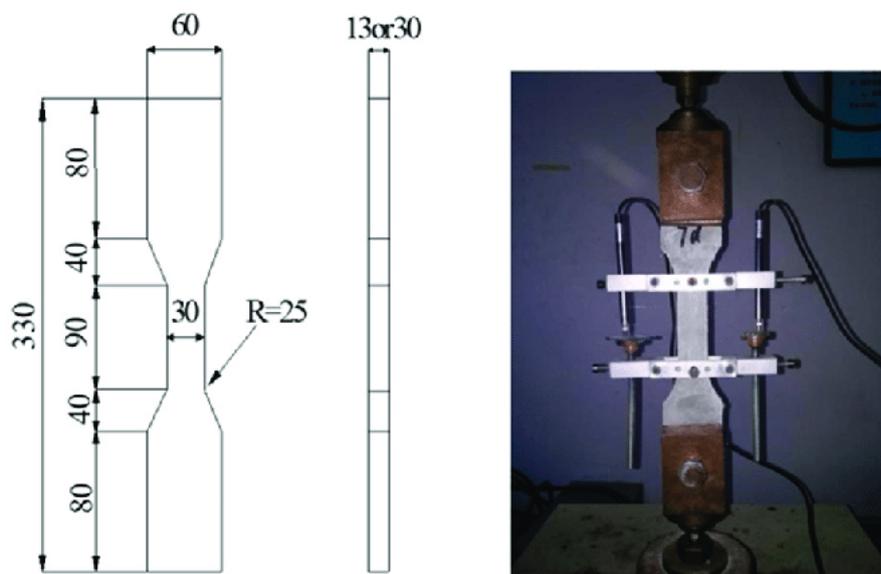


Figura 13 – Exemplo de corpo de prova com formato de “osso de cachorro” com dimensões em milímetros (ZHAO *et al.*, 2019).

Apesar da ausência de padronização das dimensões dos corpos de prova, há uma recomendação de acordo com a orientação das fibras dentro do compósito, expressa na Tab 5. Essas medidas não são absolutas, porém, bastando que sejam seguidas as orientações expressas na norma.

Tabela 5 – Dimensões recomendadas para corpos de prova de tração de acordo com a norma D3039 (ASTM, 2000b)

Orientação das fibras	Largura [mm]	Comprimento médio [mm]	Espessura [mm]	Comprimento das abas [mm]	Espessura das abas [mm]	Ângulo de chanfro das abas
Unidirecional a 0°	15	250	1,0	56	1,5	7° ou 90°
Unidirecional a 90°	25	175	2,0	25	1,5	90°
Balancedo e simétrico	25	250	2,5	Usar tecido abrasivo	-	-
Aleatório-descontínuo	25	250	2,5	Usar tecido abrasivo	-	-

O cálculo das tensões em cada ponto (σ_i) em um ensaio de tração é realizado a partir da Eq. 4. Onde P_i é a carga aplicada ao corpo de prova e A é a área média da seção transversal. Utilizando o P_i máximo registrado, obtém-se o limite de resistência à tração.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (4)$$

A determinação do módulo de elasticidade (E) do LMF é dada pela inclinação da curva tensão-deformação resultante do ensaio dentro do regime elástico, na relação apresentada na Eq. 5. Onde $\Delta\epsilon$ é o intervalo da deformação absoluta e $\Delta\sigma$ é o intervalo das tensões correspondentes. Os limites recomendados pela ASTM D3039 (2000b) para este cálculo estão entre 0,001 e 0,003 da deformação absoluta (ϵ), caso o regime elástico se apresente fora desses limites, pode-se alterá-los da maneira mais adequada, tendo-se o cuidado de informar o intervalo utilizado.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5)$$

Durante os ensaios de tração, a velocidade de avanço utilizada para materiais LMF varia largamente, com velocidades indo de 0,1 mm/min a 5 mm/min, com a maioria dos ensaios sendo conduzidos a 1,0 mm/min, 1,3 mm/min ou 2,0 mm/min (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011).

2.8.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão submete o corpo de prova em condição biapoiada ou engastada a uma carga crescente e pontual enquanto é medida sua deflexão, de modo a gerar um gráfico carga-deflexão. As principais propriedades mecânicas que podem ser extraídas desse ensaio são a tensão de ruptura em flexão (σ_f) e o módulo de elasticidade em flexão (E_f) (GAMA, 2017).

A norma para a realização desse ensaio em um laminado metal-fibra é a ASTM D7264 (2007), que estabelece a utilização de corpos de prova retangulares com seção transversal também retangular. O ensaio de flexão em três pontos (dois apoios e uma carga) é apresentado na Fig. 14. Na Fig. 15 é apresentado o formato dos apoios e do instrumento de aplicação da carga, assim como sua dimensão padrão de 3 mm de raio.

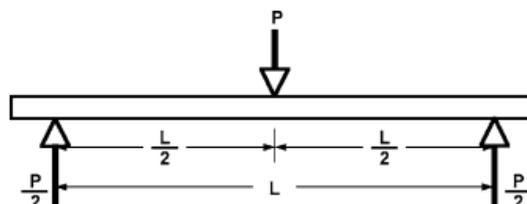


Figura 14 – Diagrama de ensaio de cisalhamento interlaminar (ASTM, 2007).

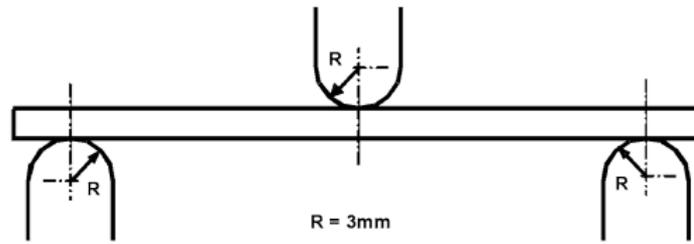


Figura 15 – Dimensão dos apoios e da ferramenta para aplicação de carga em um ensaio de cisalhamento interlaminar. (ASTM, 2007).

As dimensões padrão do corpo de prova utilizado neste ensaio envolvem uma razão de 32:1 entre a distância entre os pontos de apoio (L) e a sua espessura (h), um comprimento livre em cada extremidade equivalente a 20% da distância entre os apoios e uma largura de 13 mm, de acordo com a Fig. 16. A velocidade de avanço da máquina responsável pelo teste deve ser de 1,0 mm/min (ASTM, 2007).

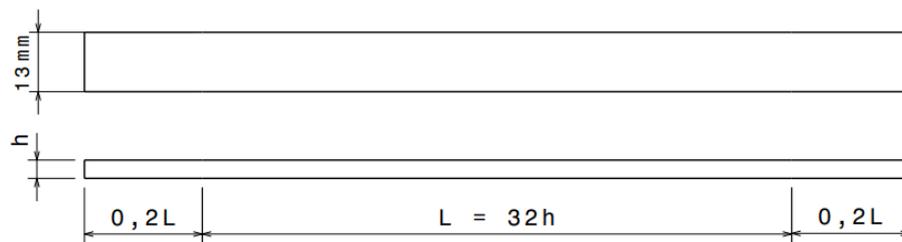


Figura 16 – Dimensões padronizadas do corpo de prova para ensaio de flexão conforme a norma ASTM D7264 (autoria própria).

A tensão de cisalhamento máxima em qualquer ponto da curva tensão-deflexão é dada pela Eq. 6. Onde P é a carga aplicada, L é a distância entre os pontos de apoio, b é a largura do corpo de prova e h é a espessura do corpo de prova.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (6)$$

O módulo de elasticidade em flexão (E_f) pode ser determinado pela Eq. 7. Onde L , b e h são as mesmas grandezas da Eq. 6 e m representa a inclinação da região linear da curva carga-deflexão.

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (7)$$

2.8.3 Ensaio de cisalhamento interlaminar

Uma dos principais modos de falha de materiais compósitos utilizados na aviação, por exemplo, é a delaminação. O ensaio de cisalhamento interlaminar tem por objetivo

determinar a resistência do material a esse modo de falha, sendo também uma forma de mensurar a adesão entre fibra e matriz (BELLIS, 2017).

Esse ensaio é um ensaio de flexão em três pontos, sendo, porém, regido pela norma ASTM D2344 (2000a). A principal diferença física entre os dois ensaios está nas dimensões dos corpos de prova e dos apoios, como mostrado na Fig. 17.

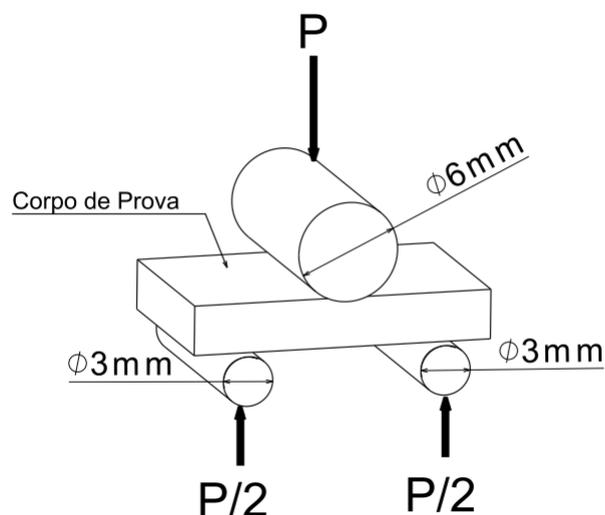


Figura 17 – Diagrama de ensaio de cisalhamento interlaminar (autoria própria).

Os corpos de prova devem ter uma espessura mínima de 2,0 mm e máxima de 6,0 mm, a distância entre os pontos de apoio deve ser de 4 vezes a espessura da amostra e a largura deve ser duas vezes a medida da espessura, respeitadas as tolerâncias da norma. O tamanho total recomendado para o corpo de prova é de 6 vezes a sua espessura. A velocidade de avanço da máquina de ensaio deve ser de 1,0 mm/min.

Outro ponto importante é que, para que o ensaio seja válido, o corpo de prova deve falhar por cisalhamento interlaminar, a Fig. 18 demonstra os modos de falha aceitáveis para este teste.

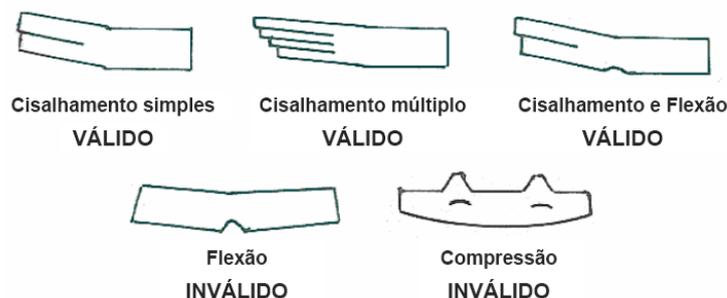


Figura 18 – Modos de falha possíveis e aceitáveis para um ensaio de cisalhamento interlaminar. Adaptado de (SILVA, 2006, p. 57).

A tensão máxima de cisalhamento interlaminar (τ_{max}), também chamada de ILSS

(*Interlaminar Shear Strength*) é calculada pela Eq. 8. Onde P_{max} é a carga no momento da falha, b é a largura do corpo de prova e h é sua espessura.

$$ILSS = \tau_{max} = \frac{3P_{max}}{4bh} \quad (8)$$

3 Materiais e métodos

3.1 Materiais

- Chapas de alumínio Alcoa Al 1100 H14 com 0,5 mm de espessura
- Fibra de vidro tipo R na forma de tecido unidirecional VRW700
- Resina epóxi HEX 135
- Material desmoldante

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na composição do laminado metal-fibra estão descritas nas Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Propriedades do alumínio 1100 H14 (ALCOA, 2009)

Propriedade	Valor
Massa específica [g/cm ³]	2,71
Módulo de Elasticidade [GPa]	68,9
Tensão de Escoamento Mínima [MPa]	95
Limite de Resistência à Tração [MPa]	110-145
Alongamento Mínimo na Ruptura [%]	2,0

Tabela 7 – Propriedades da resina epóxi HEX 135 a 25°C (E-COMPOSITES, 2021a)

Propriedade	Valor
Massa específica [g/cm ³]	1,10-1,20
Módulo de Elasticidade [GPa]	2,8-3,2
Limite de Resistência à Tração [MPa]	65-75
Limite de Resistência à Compressão [MPa]	80-100
Limite de Resistência à Flexão [MPa]	100-120
Alongamento na ruptura [%]	7,0-10,0
Absorção de água após 7 dias [%]	0,20-0,80

Tabela 8 – Propriedades do tecido de fibra de vidro tipo R VRW700 (E-COMPOSITES, 2021b)

Propriedade	Valor
Peso nominal [g/m ²]	900
Espessura [mm]	0,42
Orientação das fibras	0°

3.2 Plano Experimental

O plano experimental deste trabalho está apresentado na Fig. 19. Com destaque para a preparação das chapas de alumínio e a representação dos testes e ensaios a serem executados

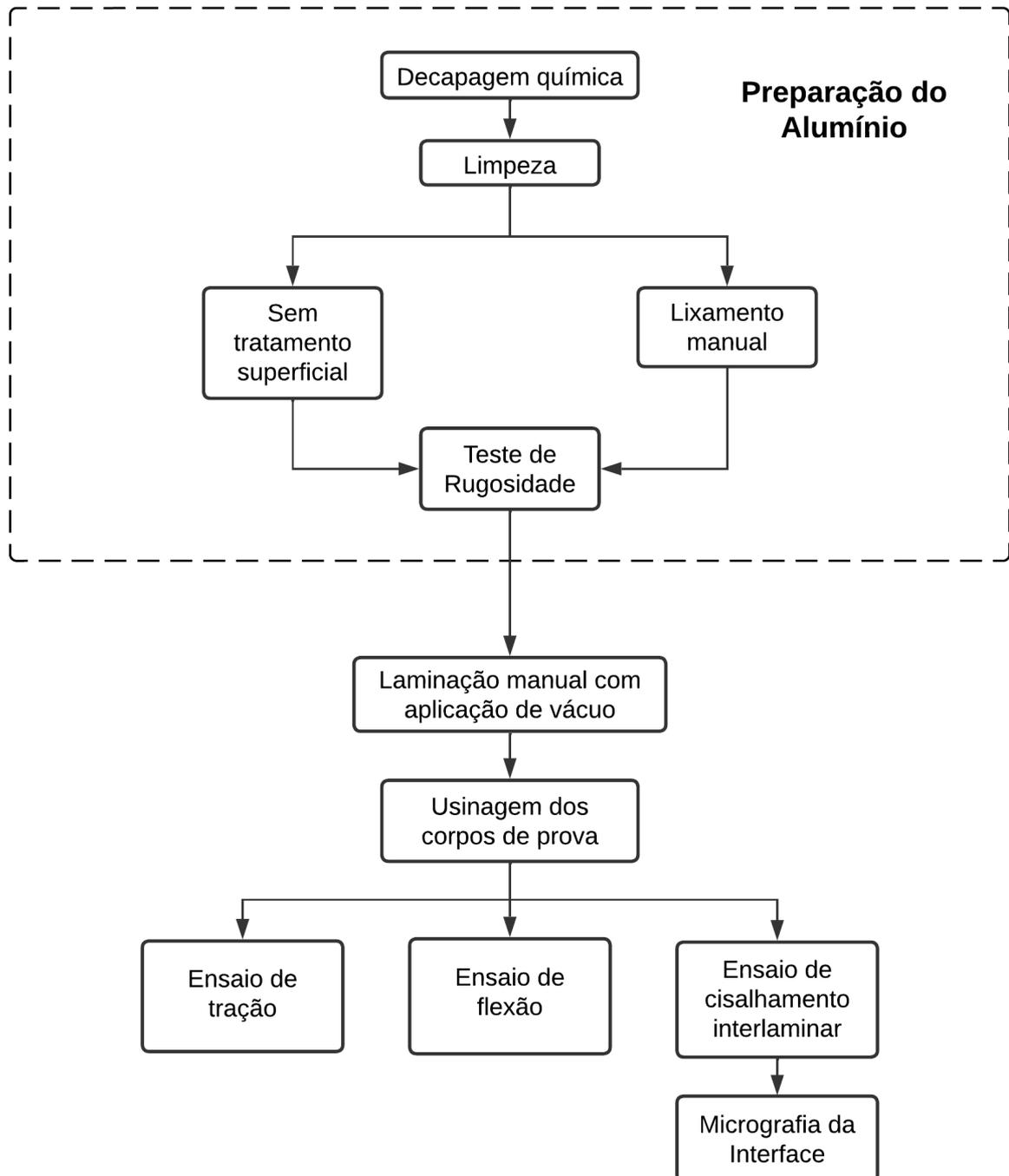


Figura 19 – Fluxograma dos procedimentos experimentais (autoria própria).

3.3 Decapagem e limpeza

O processo de decapagem química visa remover a camada de óxido superficial do alumínio para que todas as chapas apresentem as mesmas condições antes de receberem qualquer outro tratamento superficial.

Ele foi executado submergindo o alumínio em uma solução de NaOH com concentração 100 g/L a 60°C por 90 segundos em capela química (Fig. 20a), seguido de uma neutralização em uma solução de HNO₃ com concentração 53% em massa por 60 segundos à temperatura ambiente de 25°C (Fig. 20b).



(a) Banho em solução de NaOH

(b) Neutralização em HNO₃

Figura 20 – Processo de decapagem química (autoria própria).

Após a neutralização, as chapas metálicas foram lavadas com água corrente, água deionizada e limpas com álcool isopropílico de pureza 99,5%, passando por último por processo de secagem ao ar.

3.4 Lixamento

O lixamento foi realizado manualmente e a seco com uma lixa de gramatura P220 em duas direções perpendiculares entre si, com uma delas paralela ao sentido de conformação da chapa de alumínio, em ambas as faces das chapas. O lixamento ocorreu até que as ranhuras superficiais estivessem visualmente uniformes.

3.5 Ensaio de rugosidade

A medição da rugosidade das superfícies foi realizado com um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo *Surftest* SJ-210 (Fig. 21). O modo de operação utilizado foi o padrão, de acordo com a norma ISO-1997, a uma velocidade de 0,5 mm/s e comprimento de amostragem (λ_{off}) de 0,8 mm.



Figura 21 – Rugosímetro Portátil Mitutoyo SJ-210 (MITUTOYO, s.d.).

Realizou-se três medições de valores de Ra e Rq em 9 pontos distintos de cada placa laminada, conforme apresentado na Fig. 22, nos sentidos de 0° (paralela ao sentido de laminação das chapas de alumínio) e 90° , totalizando 27 medições em cada sentido.



Figura 22 – Pontos de medição da rugosidade (autoria própria).

3.6 Laminação

Um plástico para aplicação em bolsas de vácuo foi colocado sobre uma placa de vidro temperado sobre uma mesa plana, depois aplicado um agente desmoldante e, sobre ele, colocada a primeira chapa de alumínio. A resina foi misturada com seu endurecedor em uma proporção 100:33 em massa. Uma camada leve de resina é aplicada sobre o alumínio, seguida da primeira camada de tecido de fibra de vidro, orientada paralelamente ao sentido de conformação da chapa (0°), mais resina é aplicada e espalhada com o auxílio de um rolo para laminação. O processo é repetido para outra camada de fibra no mesmo sentido.

Depois, é posicionada uma nova camada de alumínio e o processo é realizado para camadas de tecido orientadas agora a 90° . A laminação é finalizada com o posicionamento da terceira e última camada de alumínio e aplicação de material desmoldante sobre ela. São então colocados sobre a placa de vidro bocais para a retirada do ar e aplicação de vácuo, uma fita dupla-face “*tacky-tape*” para aplicação em bolsas de vácuo é colada ao redor de toda a extremidade do laminado e uma camada de plástico é colocada sobre a fita, sendo pressionada e completando a selagem da bolsa. O arranjo final é apresentado na Fig. 23.

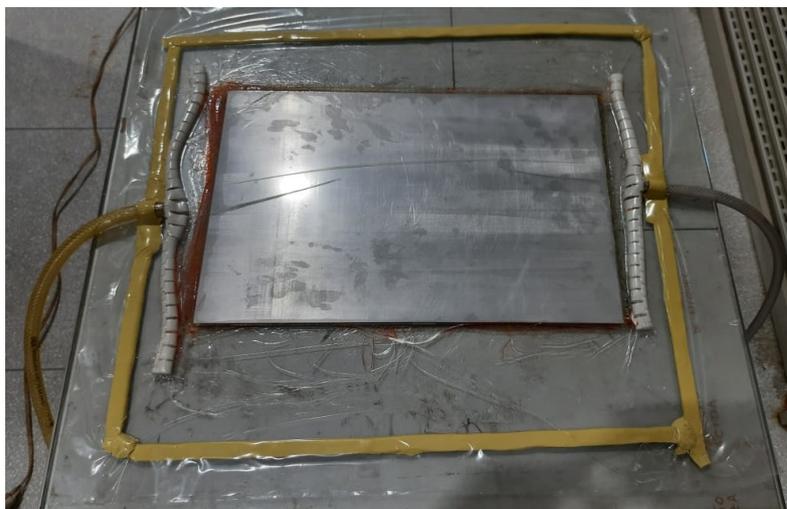


Figura 23 – Laminado metal-fibra passando pela aplicação de vácuo (autoria própria).

A quantidade de resina foi determinada de maneira que o volume total de resina fosse equivalente ao volume de fibra, resultando em camadas de compósito com concentração de fibra de 50% em volume.

Em seguida, conecta-se a mangueira do reservatório para receber o excesso da resina à bolsa de vácuo e a mangueira da bomba de vácuo ao reservatório. Foi utilizada uma bomba de vácuo Suryha 7CFM (Fig. 24) para remover o excesso de ar, aplicando uma pressão negativa da ordem de 0,8 bar para remover bolhas e excesso de resina.



Figura 24 – Bomba de vácuo Suryha 7CFM (autoria própria).

Após 4 horas, a bomba é desligada e a bolsa de vácuo com o laminado deixada em repouso até completar o processo de cura em temperatura ambiente após 12 horas totais, de acordo com o tempo estipulado pelo fabricante, para posterior desmoldagem e preparação dos corpos de prova.

3.7 Usinagem dos corpos de prova

Foi decidido pela usinagem do laminado para produção dos corpos de prova para ensaios de tração, flexão e cisalhamento interlaminar. O processo de usinagem escolhido foi o corte por jato d'água.

O processo de corte por jato d'água resulta em bordas com acabamento grosseiro, que afetam o desempenho do laminado em testes de fadiga (VLOT; GUNNICK, 2001). Como não é o caso, as bordas não passarão por processos de acabamento após o corte. As amostras serão secas em estufa a 60°C por 30 minutos a fim de evitar ou minimizar a absorção de umidade pelos corpos de prova.

3.8 Ensaio de tração

O ensaio de tração será realizado em 8 amostras de cada tratamento, totalizando 24 corpos de prova. Os corpos de prova serão retangulares e produzidos de acordo com a norma ASTM D3039. Uma máquina universal de ensaios Instron 8801 com célula de carga de 100 kN e velocidade de avanço de 1,0 mm/min será utilizada para realização dos ensaios. Ela está localizada no Laboratório de Materiais da Faculdade do Gama da Universidade de Brasília.

3.9 Ensaio de flexão

Assim como no ensaio de tração, serão testadas 8 amostras de cada tratamento. O ensaio será conduzido de acordo com a norma ASTM D7264, seguindo as orientações dispostas, com atenção especial quanto às dimensões da amostra, geometria dos apoios e da ferramenta de aplicação de carga. A máquina que será utilizada é uma máquina universal para ensaios mecânicos Shimadzu, com célula de carga de 5 kN, configurada para uma velocidade de avanço de 1,0 mm/min.

3.10 Ensaio de cisalhamento interlaminar

Para o caso do cisalhamento, serão confeccionadas 15 amostras com cada tratamento superficial, totalizando 45 corpos de prova. Porém, os ensaios para cada tratamento serão encerrados após 8 amostras falharem de maneira válida para o caso interlaminar. Caso menos de 8 corpos de prova de determinado tratamento tenham modos de falha válidos após os 15 ensaios, os resultados ainda serão apresentados caso 5 ou mais amostras tenham apresentado resultados adequados. Entretanto, caso menos de 5 amostras atendam ao critério, novos corpos de prova serão manufaturados em condições análogas para uma nova rodada de ensaios.

Tanto os corpos de prova quanto as condições de ensaios, atenderão às orientações da norma ASTM D2344. A máquina utilizada será a mesma do do ensaio de flexão, com a mesma célula de carga e velocidade de avanço, a distinção ficará a cargo do apoios e aplicador de carga, condizentes com os padrões do ensaio de cisalhamento interlaminar.

4 Resultados e discussão

A seguir estão apresentados os resultados dos testes, experimentos e atividades conduzidos durante a realização deste trabalho.

4.1 Lixamento

As etapas do lixamento realizado manualmente com lixa de gramatura P220 estão apresentadas na Fig. 25.



(a) Chapa sem lixamento (b) Chapa após lixamento na direção de 0° (c) Chapa após lixamento na direção de 90°

Figura 25 – Processo de lixamento manual (autoria própria).

4.2 Laminados metal-fibra após processamento

As Fig. 26 e 27 apresentam, respectivamente, os laminados metal-fibra sem tratamento das camadas metálicas e lixado manualmente, após a laminação, cura, desmolde e retirada do excesso de resina e fibra nas extremidades, logo antes de sua usinagem para confecção dos corpos de prova.



Figura 26 – Laminado metal-fibra sem tratamento das camadas metálicas, vista lateral à esquerda (autoria própria).



Figura 27 – Laminado metal-fibra com camadas metálicas lixadas manualmente, vista lateral à esquerda (autoria própria).

A coloração vermelha nos pontos externos da matriz deve-se à utilização de um marcador durante o corte do tecido de fibra de vidro, a tinta foi dissolvida pela resina e fluiu após a aplicação do vácuo, sem maiores prejuízos para os resultados.

4.3 Rugosidade

Os resultados de rugosidade para as superfícies metálicas dos laminados estão dispostos nas Fig. 28 e 29.

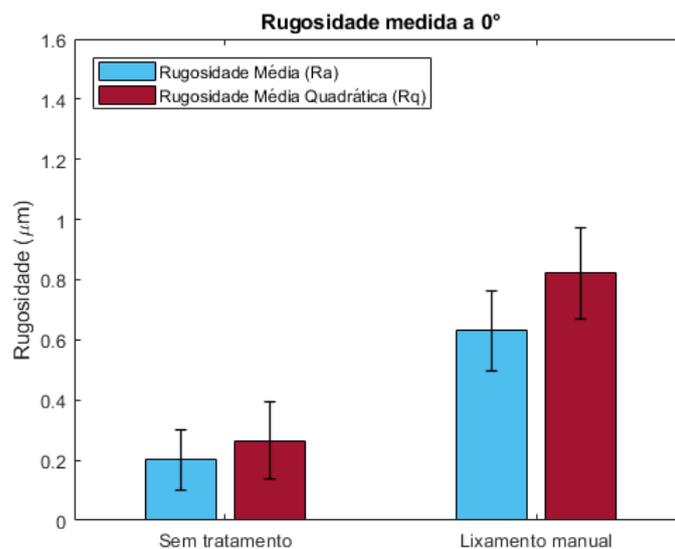


Figura 28 – Rugosidade medida no sentido paralelo à laminação da chapa de alumínio (autoria própria).

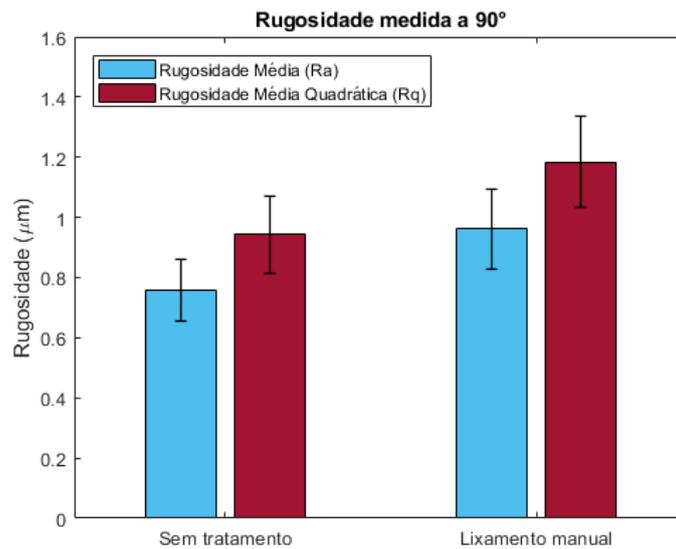


Figura 29 – Rugosidade medida no sentido perpendicular à laminação da chapa de alumínio (autoria própria).

Nota-se que, no caso do laminado sem tratamento superficial, a rugosidade paralela ao sentido de laminação da chapa (0°) é muito mais baixa quando comparada à rugosidade do sentido perpendicular (90°), em consequência das marcas deixadas pelo processo de conformação mecânica.

Ao realizar o lixamento, houve um aumento em todas as rugosidades, sendo este especialmente substancial no sentido de 0° , que tende a favorecer a adesão e, por consequência, a resistência do laminado quando submetido a cargas paralelas a esse sentido.

Ao contrário do que poderia se imaginar, considerando a baixa repetibilidade associada a um processo realizado manualmente, as incertezas das medições da superfície lixada não foram muito maiores que no caso da superfície não-tratada.

5 Conclusões

Foi possível realizar a confecção de laminados metal-fibra sem a utilização de tecidos pré-impregnados, a partir de laminação manual seguida de aplicação de vácuo e cura a temperatura ambiente.

Os menores valores de rugosidade obtidos a partir do tratamento superficial com lixamento manual com uma lixa de gramatura P220, quando comparados aos valores de R_a obtidos por (SILVA, 2006) em processos de anodização ($0,47 \pm 0,04 \mu m$ para anodização em ácido crômico e $0,38 \pm 0,03 \mu m$ para ácido sulfuro-boro-oxálico), são bons indicativos da viabilidade mecânica dos LMF com camadas metálicas lixadas.

Isso significaria um menor custo para produção em baixa escala e volume, eliminando a necessidade de anodização para projetos de pequeno porte, quando comparado aos enormes painéis de GLARE[®] utilizados na indústria aeronáutica, por exemplo.

Todavia, uma conclusão definitiva ainda depende de maiores análises das características superficiais, como ângulo de contato, e dos ensaios mecânicos de tração, flexão e cisalhamento interlaminar.

6 Sugestões para trabalhos futuros

Em trabalhos posteriores, pode-se abordar o desempenho dos laminados metal-fibra com diferentes tratamentos das camadas metálicas quando submetidos a ensaios de vida em fadiga. Assim como a utilização de outros reforços nos compósitos, como fibras de aramida, carbono ou fibras naturais, além da utilização de chapas de titânio ao invés de alumínio e matrizes de polímeros termoplásticos.

Também é possível abordar os efeitos de outras variáveis na produção de um LMF, como o uso de soluções ácidas alternativas na anodização, outros tratamentos mecânicos para aumento de rugosidade, automação do processo de lixamento e testes com diferentes gramaturas de material abrasivo.

Referências

- ALCOA. *Boletim Técnico: Chapas*. Brasil, 2009. 8 p. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 42.
- ALVES, L. M. *et al.* Rugosidade e Microscopia de Força Atômica de Resinas Compostas Submetidas a Diferentes Métodos de Polimento. *Polimeros*, v. 23, n. 5, p. 661–666, 2013. ISSN 01041428. Citado na página 35.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D2344 / D2344M - 00*: Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. West Conshohocken, PA, 2000. 8 p. Citado na página 40.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D3039 / D3039M - 00*: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, 2000. 12 p. Citado 3 vezes nas páginas 11, 37 e 38.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D7264 / D7264M - 07*: Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, 2007. 11 p. Citado 3 vezes nas páginas 9, 38 e 39.
- BARRACUDA ADVANCED COMPOSITES. *Datasheet: Resina HEX 135*. Rio de Janeiro, 2021. 3 p. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 42.
- BARRACUDA ADVANCED COMPOSITES. *Datasheet: VRW700*. Rio de Janeiro, 2021. 1 p. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 42.
- BELLINI, C. *et al.* Experimental analysis of aluminium/carbon epoxy hybrid laminates under flexural load. *Frattura ed Integrità Strutturale*, v. 13, n. 49, p. 739–747, 2019. ISSN 19718993. Citado na página 29.
- BELLIS, B. V. *Estudo Comparativo do Processamento de Compósitos Híbridos Metal Fibra com Matrizes Termoplásticas*. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 9, 20, 29, 32, 35 e 40.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 9, 17, 19 e 20.
- CLYNE, T. W.; HULL, D. *An Introduction to Composite Materials*. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 21, 26, 29, 33 e 34.
- COUTINHO, M. P. *Influência da morfologia da superfície na molhabilidade do titânio comercialmente puro*. 84 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia – IME, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- GAMA, D. P. N. *Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche*. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

GENTIL, V. *Corrosão*. 6. ed. Grupo GEN, 2011. ISBN 978-85-216-1944-4. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1944-4/>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 31 e 32.

MACHADO, Á. *et al. Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440/>>. Citado na página 34.

MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*. 3. ed. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2007. Citado 11 vezes nas páginas 9, 11, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 29 e 36.

MITUTOYO SUL AMERICANA. *Rugosímetro Portátil SurfTest SJ-210 – 178-561-12A*. s.d. Disponível em: <<https://www.mitutoyo.com.br/sj-210.html>>. Acesso em: 26 set. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 45.

NETO, L. F.; PARDINI, L. C. *Compósitos Estruturais*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. Citado 7 vezes nas páginas 9, 20, 21, 22, 23, 25 e 26.

OSTAPIUK, M. *et al.* Interface analysis of fiber metal laminates. *Composite Interfaces*, v. 21, n. 4, p. 309–318, 2014. ISSN 09276440. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.

PINTO, E. P. *et al.* O Microscópio de Força Atômica (AFM): importante ferramenta no estudo da morfologia de superfícies na escala nanométrica. *Estação Científica (UNIFAP)*, v. 3, p. 41–50, 2013. Citado na página 35.

SILVA, R. A. *Processamento e caracterização de compósitos híbridos fibra/metal*. 269 p. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006. Disponível em: <http://www.bdlita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000542951>. Citado 6 vezes nas páginas 9, 31, 32, 33, 40 e 52.

SINMAZÇELIK, T. *et al.* A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials and Design*, v. 32, n. 7, p. 3671–3685, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 17, 27, 28, 30 e 38.

SOUZA, M. *Estudo da forma e da rugosidade em próteses ortopédicas de quadril*. 147 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 35.

VASUDEVAN, A. *et al.* Tensile and flexural behaviour of glass fibre reinforced plastic - Aluminium hybrid laminate manufactured by vacuum resin transfer moulding technique (VARTM). *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, v. 37, n. Part 2, p. 2132–2140, 2020. ISSN 22147853. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.573>>. Citado na página 30.

VERMEEREN, C. A. J. R. An Historic Overview of the Development of Fibre Metal Laminates. *Applied Composite Materials*, v. 10, n. 4-5, p. 189–205, 2003. ISSN 0929189X. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

VLOT, A.; GUNNICK, J. W. *Fibre Metal Laminates: An Introduction*. 1. ed. New York: Springer-Science & Business Media Dordrecht, 2001. Citado 6 vezes nas páginas 11, 27, 28, 29, 30 e 47.

WELLER, M. *et al.* *Química Inorgânica*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 31.

ZHAO, K. *et al.* Application of natural plant fibers in cement-based composites and the influence on mechanical properties and mass transport. *Materials*, v. 12, n. 21, 2019. ISSN 19961944. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 37.

ZHU, W. *et al.* Effect of different coupling agents on interfacial properties of fibre-reinforced aluminum laminates. *Materials*, v. 14, n. 4, p. 1–18, 2021. ISSN 19961944. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.