

ANA CAROLINA DOS SANTOS

**Desenvolvimento e produção de um laminado metal-fibra Alumínio 2024-T3 / PEEK /
Fibra de vidro por moldagem por compressão a quente**

Guaratinguetá - SP

2021

ANA CAROLINA DOS SANTOS

**Desenvolvimento e produção de um laminado metal-fibra Alumínio 2024-T3 / PEEK /
Fibra de vidro por moldagem por compressão a quente**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Me. Eduardo Pires Bonhin
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri
Botelho

Guaratinguetá - SP

2021

Santos, Ana Carolina dos
S237d Desenvolvimento e produção de um laminado metal fibra Alumínio
2024-T3 / Fibra de vidro / PEEK por moldagem por compressão à quente /
Ana Carolina dos Santos – Guaratinguetá, 2021.
65 f. : il.
Bibliografia : f. 60-64

Trabalho de graduação em Engenharia de Materiais – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.
Orientador: Me. Eduardo Pires Bonhin
Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

1. Materiais compostos. 2. Compósitos poliméricos.
3. Termoplásticos. 4. Materiais laminados. I. Título.

CDU 620.1

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

ANA CAROLINA DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO(A) EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Me. EDUARDO PIRES BONHIN
Orientador(a)/UNESP-FEG



Prof. Dr. ROBERTO ZENHEI NAKAZATO
UNESP-FEG



Me. SARAH DAVID MÜZEL
UNESP-FEG

Janeiro de 2021

DADOS CURRICULARES

ANA CAROLINA DOS SANTOS

NASCIMENTO 09.10.1997 – Capivari/SP

FILIAÇÃO André Henrique dos Santos
Jocelaine da Conceição Santos

2016/2021 Graduação em Engenharia de Materiais – Bacharelado
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Dedico este trabalho à minha família que esteve sempre me apoiando durante esta jornada, à minha república que esteve sempre do meu lado e aos meus professores que me guiaram durante estes anos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois dele vem toda a força. Agradeço imensamente à minha família, pelo apoio, incentivo e suporte durante estes cinco anos.

Agradeço também meu orientador, Eduardo Pires Bonhin, por sempre ter me incentivado e me guiado por todos os 3 anos de construção deste trabalho e ao meu co-orientador Edson Cocchieri Botelho por ter me inserido em seu grupo de pesquisa e por toda orientação oferecida.

Aos meus amigos e amigas que muito torceram por mim e especialmente às minhas companheiras de república que se tornaram uma família em Guaratinguetá.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e prestação de serviços e disposição no atendimento.

À FAPESP pelo auxílio financeiro e por todo suporte para que esse projeto fosse realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Programa de Bolsas para Iniciação Científica (PIBIC) - número do processo 149271/2018-2.

RESUMO

Um compósito laminado metal-fibra é um material constituído de lâminas metálicas intercaladas a compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas. Este tipo de material apresenta diversas vantagens quando comparado a materiais compósitos tradicionais ou materiais metálicos, como redução de massa específica, menor absorção de água e melhores propriedades mecânicas, como resistência mecânica, resistência ao impacto e a chama. Devido a isto, este material tem ganhado cada vez mais visibilidade e vem sendo aplicado, principalmente, para composições estruturais na indústria aeronáutica. Este trabalho teve por objetivo o processamento do laminado metal-fibra de alumínio/PEEK/fibra de vidro, além de analisar a influência, a partir do ensaio de ângulo de contato, de 3 tipos de tratamentos superficiais no alumínio, a abrasão mecânica, a decapagem química e a anodização fosfórica, em suas propriedades finais a partir de ensaios mecânicos de cisalhamento, CST, ILSS e Iosipescu, e mecânica da fratura, ENF. A análise dos resultados torna possível entender que a utilização do PEEK em pó foi um ponto de interferência nos resultados, assim como o tratamento superficial do alumínio. A partir dos resultados pode-se observar uma grande redução do ângulo de contato com o tratamento de anodização, único que permitiu a realização de ensaios mecânicos. Os valores obtidos para resistência ao cisalhamento interlaminar e à tenacidade à fratura são inferiores aos encontrados para materiais similares com matrizes termorrígidas, mostrando que novos estudos ainda são necessários para viabilizar a utilização deste laminado metal-fibra.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos híbridos metal-fibra. Alumínio. Tratamento de Superfície. Termoplástico. Interface.

ABSTRACT

A laminated metal fiber composite is a material made up of metal laminates interspersed with polymeric fiber-reinforced composites, this type of material has several advantages when compared to traditional composite materials or metallic materials, such as reduced specific mass, less water absorption and better mechanical properties such as mechanical strength, impact and flame resistance. Because of this fact, this material has gained more and more visibility and has been applied mainly to structural composition in the aeronautical industry. This work aimed to process the laminated metal aluminum fiber / PEEK / glass fiber, in addition to analyzing the influence, from the contact angle test, of 3 types of surface treatments on aluminum, mechanical abrasion, chemical pickling and phosphoric anodization, in their final properties from mechanical shear tests, CST, ILSS and Iosipescu, and fracture mechanics, ENF. The results analysis makes it possible to understand that the use of PEEK powder was a point of interference in the results, as well as the surface treatment of aluminum, from the results it is possible to observe a great reduction in the contact angle with the anodizing treatment. The performance of mechanical tests was possible only with the material made up with phosphoric anodized aluminum. The values obtained for shear strength and fracture toughness are lower than similar materials with thermoset matrices, which made the substitution of the matrix by PEEK not advantageous in this work.

KEYWORDS: Hybrid metal fiber composites. Aluminum. Surface treatment. Thermoplastic. Interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um compósito polimérico.....	16
Figura 2 – Esquemática de um laminado metal-fibra, onde setas vermelhas indicam o compósito e setas azuis as lâminas metálicas.....	17
Figura 3 – Disposição das diversas camadas metálicas e de lâminas de fibra de vidro/epóxi individuais do laminado GLARE® 5.	18
Figura 4 – Esquema da organização molecular de um polímero termorrígido.	19
Figura 5 – Esquema da organização molecular de um polímero termoplástico.....	19
Figura 6 – Estrutura do PEEK.....	21
Figura 7 – Esquemática do processo de anodização.....	25
Figura 8 – Medidas a serem consideradas pelo goniômetro.....	26
Figura 9 – Esquema de realização de parte prática.	27
Figura 10 – Guilhotina utilizada para corte das placas de alumínio.....	28
Figura 11 – Aparelhagem utilizada para anodização.....	29
Figura 12 – Equipamento utilizado para o ensaio de ângulo de contato.....	31
Figura 13 – Prensa utilizada para o processamento por compressão a quente.....	32
Figura 14 – Esquemática do empilhamento de camadas de material para processamento.....	33
Figura 15 – Curva de processamento do laminado.....	34
Figura 16 – Máquina utilizada para a realização dos ensaios mecânicos.....	35
Figura 17 – Esquemática do ensaio de ILSS.....	35
Figura 18 – realização do ensaio de ILSS, onde a seta vermelha indica o corpo de prova posicionado.....	36
Figura 19 – Esquemática do ensaio de CST.....	37
Figura 20 – Corpos de prova para o ensaio de CST.....	38
Figura 21 – Dispositivo e corpo de prova posicionados para a realização do ensaio de CST, onde seta vermelha indica o corpo de prova.....	38
Figura 22 – Esquemática do ensaio de Iosipescu.....	39
Figura 23 – Corpos de prova para o ensaio Iosipescu.....	40
Figura 24 – Dispositivo e corpo de prova posicionados para a realização do ensaio Iosipescu, onde seta vermelha indica o corpo de prova.....	41
Figura 25 – Exemplificação dos modos de falha.....	42
Figura 26 – Esquemática do ensaio ENF.....	42

Figura 27 – Corpo de prova para ensaio de ENF, onde a seta vermelha indica a pré trica, e ensaio ENF sendo realizado.	43
Figura 28 – Resultado das tentativas de solubilização do PEEK.	44
Figura 29 – Placa sem tratamento superficial logo após ser tirada da prensa, onde a seta vermelha indica a delaminação.....	44
Figura 30 – placa com abrasão com Scott-Brite logo após ser retirada da prensa.	45
Figura 31 – Laminados com delaminação após algumas horas de repouso.	45
Figura 32 – Corpos de prova a partir de lâmina decapada que apresentaram abertura entre as camadas após o corte.	46
Figura 33 – Compósito processado com placas de alumínio anodizadas.....	46
Figura 34 – Imagem obtida no ensaio de ângulo de contato com a liga Al2024-T3. A:Sem tratamento; B: abrasão mecânica; C: decapagem química.	47
Figura 35 – Imagem obtida no ensaio de ângulo de contato com a liga Al2024-T3 anodizada. A: cátodo de cobre; B: cátodo de dióxido de chumbo.....	48
Figura 36 – Gráfico do comportamento das amostras durante o ensaio CST.	49
Figura 37 – Corpo de prova após ensaio de CST, onde seta vermelha indica a falha no compósito.	50
Figura 38 – Gráfico do comportamento das amostras durante o ensaio ILSS.	51
Figura 39 – Corpos de prova após o ensaio de ILSS em microscópio com ampliação de 0,8x, onde as setas vermelhas indicam as falhas no compósito e a seta verde o local de aplicação da carga durante o ensaio.	52
Figura 40 – Corpos de prova após o ensaio de Iosipescu em microscópio com ampliação de 0,8x, onde as setas vermelhas indicam as falhas no compósito e as setas azuis indicam o dobramento das lâminas de alumínio.	53
Figura 41 – Gráfico Força x Deslocamento das amostras durante o ensaio Iosipescu.....	53
Figura 42 – Corpo de prova depois do ensaio de ENF que não apresentou delaminação.	54
Figura 43 – Corpo de prova aberto depois do ensaio de ENF onde as fibras foram totalmente separadas da matriz.....	55
Figura 44 – Gráfico de G_{II} médio relacionado ao tamanho da trinca	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais propriedades de alguns polímeros termoplásticos.....	20
Tabela 2 – Principais propriedades do PEEK.....	21
Tabela 3 – Comparativo entre propriedades mecânicas do tipo E e do tipo S.....	22
Tabela 4 – Resultados do ensaio de ângulo de contato para cada tipo de tratamento superficial	47
Tabela 5 – GII médio para cada tamanho de trinca.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

CST	Cisalhamento Interlaminar por Compressão
DMSO	Dimetilsulfóxido
DPS	Difenil Sulfona
DQE	Laboratório de Eletroquímica e Corrosão
ENF	End Notched Flexure
FML	Laminado Metal-Fibra
GLARE®	GLAss-REinforced
ILSS	Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar
P.A.	Propanona
PEEK	Poli (Éter-Éter-Cetona)
PEI	Polyetherimide
PEK	Polietercetona
PES	Polietersulfona
PI	Poliimida
PPS	Sulfeto de polifenileno
Tg	Temperatura de Transição Vítrea

LISTA DE SIMBOLOS

a	Tamanho da trinca dos corpos de prova
A	Área
b	Largura do corpo de prova
cc	Corrente contínua
F	Força
h	Espessura do material
HNO_3	Ácido Nítrico
HPO_4	Ácido Fosfórico
l	Comprimento do corpo de prova
NaOH	Hidróxido de sódio
P	Carga máxima obtida
σ	Tensão Final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	COMPÓSITOS	16
2.2	COMPÓSITOS LAMINADOS METAL-FIBRA	17
2.3	MATRIZES POLIMÉRICAS	18
2.3.1	Peek	20
2.4	FIBRA DE VIDRO	21
2.5	INTERFACE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	22
2.5.1	Abrasão mecânica	23
2.5.2	Decapagem química	23
2.5.3	Anodização	24
2.6	ÂNGULO DE CONTATO	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	SOLUBILIZAÇÃO DO PEEK	27
3.2	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DO ALUMÍNIO	28
3.3	ÂNGULO DE CONTATO	30
3.4	PROCESSAMENTO POR COMPRESSÃO A QUENTE	31
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS	34
3.5.1	ILSS	35
3.5.2	CST	37
3.5.3	Iosipescu	39
3.7	ENSAIO DE MECÂNICA DA FRATURA – ENF	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	SOLUBILIZAÇÃO DO PEEK	43
4.2	INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	44
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS	48
4.3.1	Ensaio de cisalhamento	48
4.3.2	ENF	53
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

A utilização de laminados metal-fibra vem sendo cada vez mais considerada desde seu desenvolvimento na Universidade de Delft em 1978, com vasta aplicação nas indústrias aeronáutica e militar, que se beneficiam, principalmente, de suas boas propriedades mecânicas aliadas à sua baixa massa específica, o que o torna um material atraente para ser empregado em componentes importantes de aeronaves, por exemplo (SANTANA, 2014).

A importância da melhora das propriedades mecânicas dos materiais estruturais em aeronaves se estende desde um maior tempo de serviço da aeronave, até uma maior segurança de operação, evitando falhas estruturais catastróficas. E, quando aliada à redução do peso da aeronave devido à baixa massa específica dos laminados metal-fibra (a qual é muito menor do que a de materiais metálicos monolíticos, por exemplo) faz com que haja uma economia de combustível consumido, além de ser possível aumentar a quantidade de carga e/ou passageiros transportados (BEUMLER, 2004). Dito isso, o estudo destes materiais é de extrema importância para o ramo, a fim de se aumentar o desempenho e diminuir o risco de falhas.

Uma das maiores preocupações ao se produzir um laminado metal-fibra (FML), é a interface compósito/metal. Isso ocorre, pois, as falhas mais recorrentes neste tipo de material são as falhas que se dão por cisalhamento e delaminação entre essas camadas. Essas falhas são causadas por má aderência entre os materiais, defeitos na interface, bem como pela diferença entre os coeficientes de dilatação térmica dos materiais, o que causa tensões internas quando o material é submetido a variações de temperatura. Dessa forma, as principais dificuldades para se produzir um FML são a escolha dos materiais, os quais precisam ter coeficientes de expansão térmica compatíveis, bem como o método a ser empregado para se melhorar a interface do material, já que a adesão entre a matriz polimérica e o metal influencia diretamente no desempenho mecânico do referido (BEUMLER, 2004).

As matrizes poliméricas dos compósitos podem ser classificadas em matrizes termorrígidas e termoplásticas. A matriz termorrígida é a mais comum para essa utilização, devido a apresentar maiores valores de resistência mecânica quando comparados a maioria das matrizes termoplásticas, porém, estas apresentam o processo de formação de ligações cruzadas (cura) tornando necessário um maior tempo de processamento, o que torna o processo de fabricação mais caro em relação as matrizes termoplásticas. As matrizes termoplásticas apresentam uma grande vantagem em relação as matrizes termorrígidas, a possibilidade de reciclagem após sua utilização (CAMPBELL, 2004).

O desenvolvimento de um FML composto por uma matriz termoplástica se mostra vantajoso, devido à suas vantagens em relação à matrizes termorrígidas, e, a associação do Poli(éter-éter-cetona) (PEEK), polímero termoplástico considerado de alto desempenho, com a liga de alumínio 2024-T3, muito utilizada na indústria aeronáutica para componentes estruturais, faz com que este material tenha uma composição interessante para a aplicação, como substituto de FML compostos por matrizes termorrígidas, já vastamente estudados e aplicados industrialmente (VILAS BOAS, 2014).

1.2 OBJETIVOS

Comparar e avaliar a viabilidade da substituição de uma matriz termorrígida de epóxi por uma matriz termoplástica de PEEK (Poli(éter-éter-cetona)) na obtenção de laminados metal-fibra.

1.2.1 Objetivos específicos

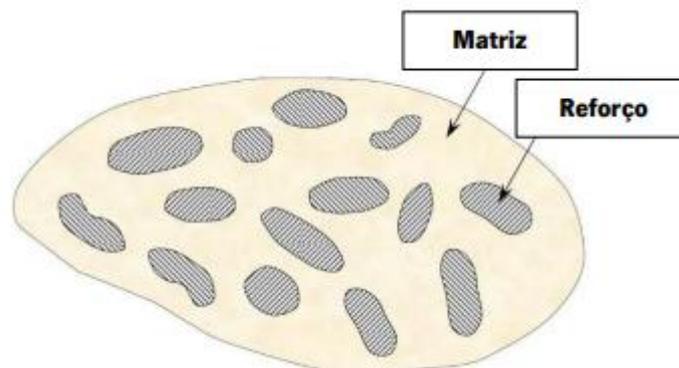
- Analisar a influência de três tratamentos superficiais no alumínio na interface final do compósito.
- Analisar as propriedades mecânicas do laminado metal-fibra produzido.
- Produzir e caracterizar o laminado metal-fibra com Alumínio 2024-T3/ PEEK / Fibra de Vidro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS

Materiais compósitos são aqueles constituídos por materiais de natureza diferente, normalmente, sendo uma ou mais fases descontínuas distribuídas em uma fase contínua, no qual a fase contínua é denominada matriz e as fases descontínuas reforço (Figura 1) (COELHO, 2020). Uma característica desta classe de material é a sua anisotropia, ou seja, as propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas se alteram em função do ponto do material e da direção (SILVA, 2014). Um tipo de material compósito muito estudado é o compósito de matriz polimérica reforçado com fibras, que pode ser reforçado com fibras contínuas (longas) ou fibras descontínuas (curtas) e matrizes termorrígidas ou termoplásticas (MILANESE, 2008).

Figura 1 - Ilustração de um compósito polimérico.



Fonte: Coelho (2020).

Os fatores que influenciam as propriedades finais destes materiais compósitos podem ser descritos por: propriedades da fibra e da matriz, fração volumétrica de fibras e a geometria e orientação das fibras na construção do compósito (GURIT, 2019).

Devido à sua composição heterogênea e a mistura de materiais com propriedades diferentes, os materiais compósitos apresentam uma combinação das propriedades de seus componentes, que acaba por apresentar diversas vantagens quando comparado às propriedades singulares de cada material separadamente, como a combinação de baixa massa específica com alta resistência mecânica (SILVA, 2014).

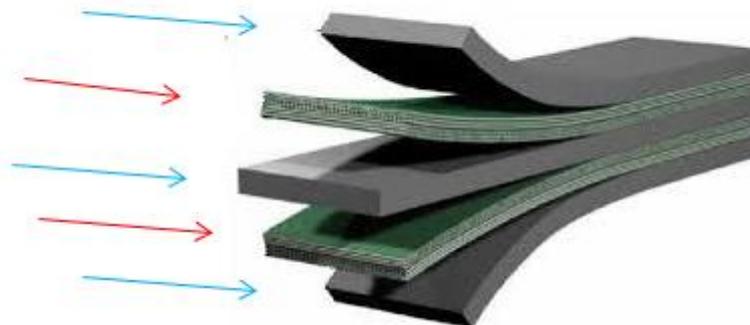
Quando um compósito é constituído de mais de um tipo de reforço com naturezas distintas, este é classificado como compósito híbrido, sendo comum compósitos com uma

matriz e dois tipos de fibras diferentes, e compósitos híbridos laminado metal-fibra por exemplo (COELHO, 2020).

2.2 COMPÓSITOS LAMINADOS METAL-FIBRA

Os laminados metal-fibra foram desenvolvidos na Universidade de Delft em parceria com a empresa aeronáutica holandesa Fokker, em 1978, como uma alternativa para a indústria aeroespacial, que buscava uma redução de peso em suas aeronaves. Sua configuração (Figura 2) consiste em ligas metálicas, como alumínio, titânio e aço, fibras cerâmicas, como fibras de vidro, de carbono e de aramida e resinas termoplásticas ou termorrígidas (GUALBERTO, 2008).

Figura 2 - Esquemática de um laminado metal-fibra, onde setas vermelhas indicam o compósito e setas azuis as lâminas metálicas.

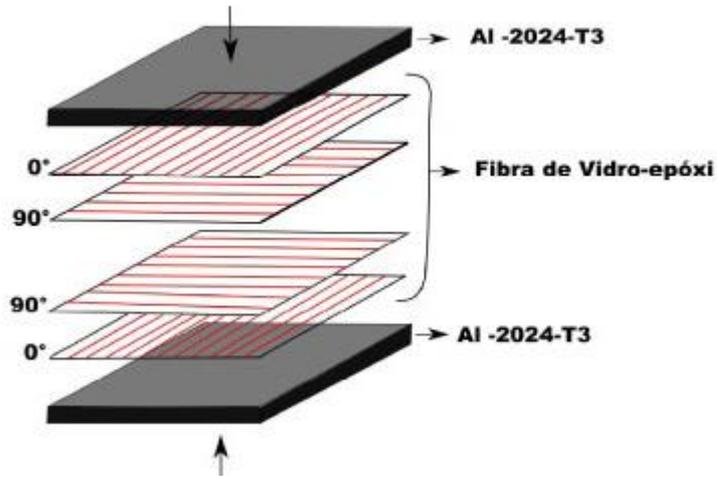


Fonte: Gualberto (2018).

Essa composição permite que estes materiais apresentem uma massa específica reduzida, aproximadamente 25% abaixo da massa específica do alumínio, e uma baixa absorção de umidade, menor do que 0,5%. Ao mesmo tempo apresenta uma melhora em suas propriedades mecânicas, como resistência mecânica, aproximadamente 60% maior quando comparado ao alumínio, uma maior resistência ao impacto (que supera outros compósitos e o alumínio utilizados separadamente), à tração e a chama, quando comparada aos materiais isoladamente (GUALBERTO, 2008; BEUMLER, 2004).

Atualmente, o laminado metal-fibra mais conhecido e comercializado para aplicações estruturais é o GLARE[®], exemplificado na Figura 3, sendo este material composto por lâminas de alumínio com compósito epóxi/fibra de vidro (SANTIAGO, 2014).

Figura 3 - Disposição das diversas camadas metálicas e de lâminas de fibra de vidro/epóxi individuais do laminado GLARE® 5.



Fonte: Santiago (2014).

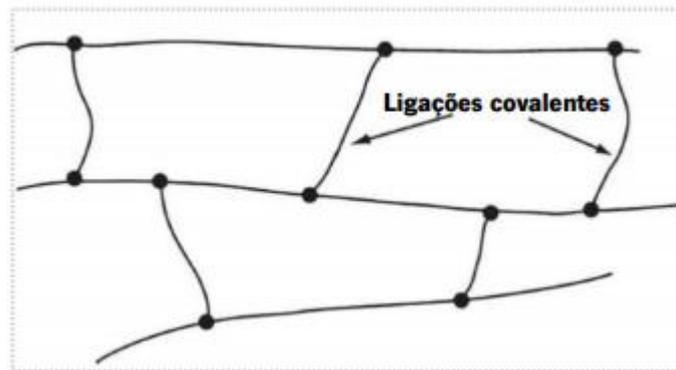
2.3 MATRIZES POLIMÉRICAS

É considerado matriz de um material compósito a fase menos rígida e responsável pelo formato e coesão do material (DANIEL, 2006; ISHAI, 2006). Atualmente, as matrizes mais utilizadas em compósitos são as matrizes poliméricas, por poderem ser processadas a temperaturas e pressões relativamente baixas, além de gerar uma redução do peso específico do material final, quando comparados à materiais metálicos, por exemplo (GURIT, 2019).

Os polímeros podem ser classificados em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros, porém para materiais compósitos as duas mais utilizadas são: as termoplásticas e termorrígidas (MATTHEWS, 1994; COELHO, 2020).

Polímeros termorrígidos são constituídos por rede molecular tridimensional, como apresentado na Figura 4, o que confere elevada rigidez. Devido a presença de reticulação estes materiais não fundem quando submetidos a altas temperaturas, demonstrando uma boa resistência térmica (PAIVA, 2014).

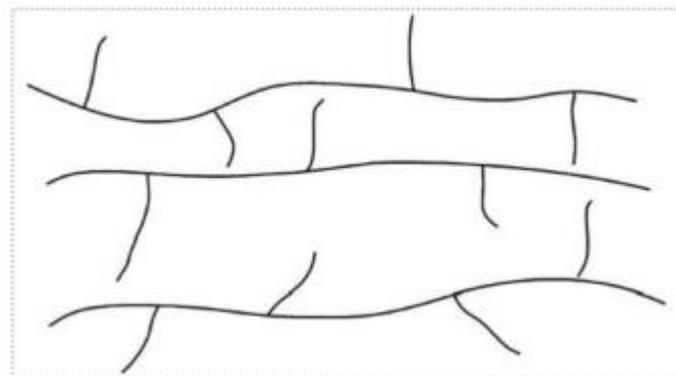
Figura 4 - Esquema da organização molecular de um polímero termorrígido.



Fonte: Mallik (2017).

Polímeros termoplásticos são compostos por macromoléculas organizadas em cadeias simples ou ramificadas, exemplificado na Figura 5. Este comportamento faz com que seja possível fundi-los a certas temperaturas e com que se deformem plasticamente.

Figura 5 - Esquema da organização molecular de um polímero termoplástico.



Fonte: Mallik (2017).

Matrizes termoplásticas são impregnadas ao reforço com o uso de pressão e calor, já que se encontram sólidas em temperatura ambiente. Sua viscosidade mais elevada, quando comparada às matrizes termorrígidas, fazem com que uma impregnação de qualidade seja mais difícil de se conquistar (STRONG, 2008). Porém, ainda assim a procura por este tipo de matriz vem demonstrando um crescimento na área de compósitos estruturais (RAMOS, 2006; JOHNSON, 2019).

A substituição de matrizes termorrígidas por termoplásticas traz vantagens como um menor tempo de processamento, já que matrizes termoplásticas não necessitam do tempo para a realização da cura, o que diminui os custos de processamento e o tempo investido, além de

apresentarem menor nível de toxicidade e uma maior resistência ao impacto e a facilidade de reciclagem (MAGALHÃES, 2011). As matrizes termoplásticas consideradas de alto desempenho são as poliétercetonas (PEEK, PEK (Poliétercetona), a poliamida e o policarbonato, por exemplo). Algumas de suas propriedades são exemplificadas na Tabela 1 (CANEVAROLO, 2002; PAIVA, 2014).

Tabela 1 - Principais propriedades de alguns polímeros termoplásticos.

	PES	PEEK	PEI	PPS	PI
Tg°C	230	170	225	86	256
Temperatura de Degradação (°C)	550	590	555	527	550
Temperatura de Processamento (°C)	350	380	350	316	304
Resistência à Tração (MPa)	84	70	105	66	138
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,4	3,8	3	3,3	3,4
Ductilidade (elongação %)	30-80	50-150	50-65	2	5
Impacto Izod (J/m)	85,44	85,44	53,4	<26,70	80,1
Massa Espacífica (g/cm ³)	1,37	1,31	1,27	1,3	1,37

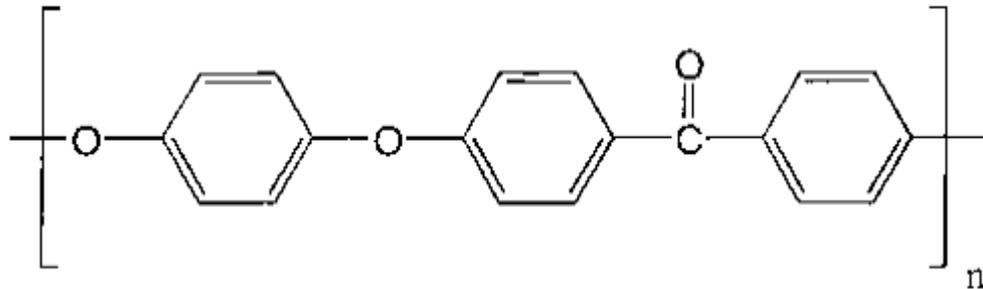
Fonte: Askeland (1989).

2.3.1 PEEK

O PEEK (Póli(éter-éter-cetona)), é um polímero termoplástico semicristalino de alta performance, suas aplicações vão desde a indústria aeronáutica até o uso em componentes da biomedicina e industriais, como revestimento de fios e conexões elétricas e em ventiladores (CRAWFORD, 1998; CANEVAROLO JT, 2002).

Seus anéis aromáticos, como apresentado na Figura 6, são responsáveis pelo seu alto desempenho quando exposto à elevadas temperaturas. Além disso sua elevada rigidez e resistência à fadiga dinâmica decorrem de sua parte cristalina. Suas principais propriedades são apresentadas na Tabela 2 (ALBUQUERQUE, 2000).

Figura 6 - Estrutura do PEEK.



Fonte: Albuquerque (2000).

Tabela 2 - Principais propriedades do PEEK.

Propriedades	Unidades	Condições	Valor
Temperatura de fusão	K	DSC	608-616
		Equilíbrio	657-668
Resistência à Tração	MPa	À 23°	92
		À 100°	50
		À 200°	12
		À 300°	10
Condutividade Térmica	$Wm^{-1}K^{-1}$	C177	0,25
Coeficiente de Expansão Térmica	K^{-1}	30°C<T<150°C à P=0	$1,610 \times 10^{-4}$
		Fundido	$9,690 \times 10^{-4}$
Tensão de Escoamento	MPa	D638	91

Fonte: Mark (1999).

2.4 FIBRA DE VIDRO

Ao se tratar de reforços a partir de fibras, a fibra de vidro é a mais utilizada, isso ocorre devido a suas propriedades mecânicas, como as resistências a tração e ao impacto, e seu bom comportamento quando exposta a agentes químicos, tudo isso aliado ao custo de aplicação baixo faz com que sua aplicação seja extremamente vantajosa (RAWLINGS, 1994).

As fibras de vidro comerciais podem ser classificadas em 3 categorias: as fibras E, as fibras C e as fibras S (GURIT, 2019). As fibras E, denominadas 'electrical glass' são as mais utilizadas em materiais compósitos, já que apresentam a melhor relação custo/benefício entre valor e propriedades mecânicas (STRONG, 2008). Esta classe de fibras apresenta boa resistência à umidade, excelentes propriedades de isolamento térmico e mecânicas (MAGALHÃES, 2011).

Quando se considera as fibras do tipo C espera-se melhores resultados em termos de resistência à corrosão, enquanto as fibras do tipo S são aquelas que demonstram maior

resistência à tração e módulo de elasticidade quando comparadas às fibras do tipo E, porém também são as fibras de vidro de maior custo do mercado, o que faz com que sua utilização seja reduzida (SILVA, 2014; GURIT, 2019). A comparação entre as principais propriedades das fibras de vidro tipo E e do tipo S é apresentada na Tabela 3:

Tabela 3 - Comparativo entre propriedades mecânicas do tipo E e do tipo S.

Propriedades	Fibras de vidro do tipo E	Fibras de vidro do tipo S
Massa volumétrica [kg/m ³]	2540	2490
Módulo de Elasticidade [GPa]	72,4	86,9
Resistência à Tração [Mpa]	3450	4300
Deformação à rotura [%]	4,8	5

Fonte: Mallick (2017).

A adesão entre a matriz polimérica e a fibra utilizada como reforço é o que define a qualidade da interface no material compósito, dessa forma, é necessário entender como essa adesão ocorre e como se pode maximizar a qualidade da interface gerada (PARK, 2010).

2.5 INTERFACE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

As forças responsáveis pela coesão do material compósito são as interações físicas e químicas entre seus componentes, logo, para se obter um material coeso é necessário garantir uma boa adesão na interface entre os dois materiais que constituem o compósito. Esta adesão pode ser explicada pelas forças atrativas entre os materiais constituintes do compósito (NETO, 2016; PARDINI, 2016).

A interface é considerada como o maior concentrador de tensões nos compósitos laminados metal-fibra (ANGELOPOULOS, 2017). Isso ocorre devido às diferenças entre coeficientes de dilatação térmica e composição química entre as camadas metálicas e poliméricas (RATNA, 2009).

A adesão na interface do material pode ocorrer de acordo com 4 mecanismos principais: adesão mecânica, interação eletrostática, forças de ligação química e interdifusão.

A adesão mecânica se resume ao ancoramento mecânico entre cavidades na superfície de cada material e de tensões internas e residuais. A interação eletrostática ocorre devido a diferença entre cargas eletrostáticas superficiais dos constituintes. Já a interação química é a resultante das forças de ligação química, que só ocorrem em compósitos de matriz polimérica e é formada devido à agrupamentos químicos na superfície. Por fim, na interação causada pela

interdifusão se observa um entrelaçamento molecular, normalmente, possibilitado pela utilização de solventes e que depende diretamente da conformação molecular do material (NETO, 2016; PARDINI, 2016).

Uma forma de se aumentar a adesão, independentemente do tipo, entre os componentes do material compósito, melhorando a interface do material final, é através de tratamentos de superfície, que são processos pelos quais os materiais são submetidos a fim de se modificar a sua superfície, adaptando-o para uma determinada aplicação ou melhorando seu desempenho. Os tratamentos superficiais mais comuns são aqueles que modificam o ângulo de contato das superfícies e sua rugosidade, o que facilita sua ancoragem química e mecânica de adesivos e outros materiais (VILAS BOAS, 2014).

Para laminados híbridos metal-fibra, estes tratamentos representam grande auxílio na melhora da interface entre o metal e o compósito, já que esta é a grande dificuldade apresentada quando se discute a aplicação do laminado. Dentro deste contexto, os tratamentos mais comumente utilizados são os mecânicos (abrasão), decapagem química e anodização (VILAS BOAS, 2014).

2.5.1 Abrasão mecânica

Um dos mais simples processos que pode ser considerado como um tratamento superficial é a abrasão mecânica da superfície, a qual cria ranhuras que aumentam a ancoragem mecânica do polímero com o metal. Esse pode se dar por meio do uso de lixas, atrito com materiais e maior dureza, por sedimentos que passam pela superfície, por jatos de líquido ou gás, entre outras formas (GIUSEPPE, 2002).

2.5.2 Decapagem química

A decapagem química é um processo utilizado para preparar superfícies que irão receber algum tipo de revestimento, para isso é necessário retirar qualquer resíduo da superfície, assim como oxidação, crostas de laminação e excesso de solda, sendo este o objetivo deste processo (GONZÁLEZ, 2004).

Conhecido por limpeza química, este processo se dá a partir da aplicação de diversas soluções químicas, básicas e ácidas, que visam inibir o ataque excessivo de substâncias ácidas à superfície, tais soluções são absorvidas pela superfície impedindo a difusão de hidrogênio, inativando a superfície do material (GONZÁLEZ, 2004).

Quando se trata de ligas de alumínio, a decapagem se dá através da utilização de soluções de hidróxido de sódio e de ácido nítrico ou fluorídrico diluídos, para que seja possível retirar a fina camada de óxido formada na superfície dessas ligas, sendo que este processo é altamente exotérmico e as soluções ácidas têm como função retirar resíduos deixados pela reação entre os óxidos e a solução básica (PEREIRA, 2000).

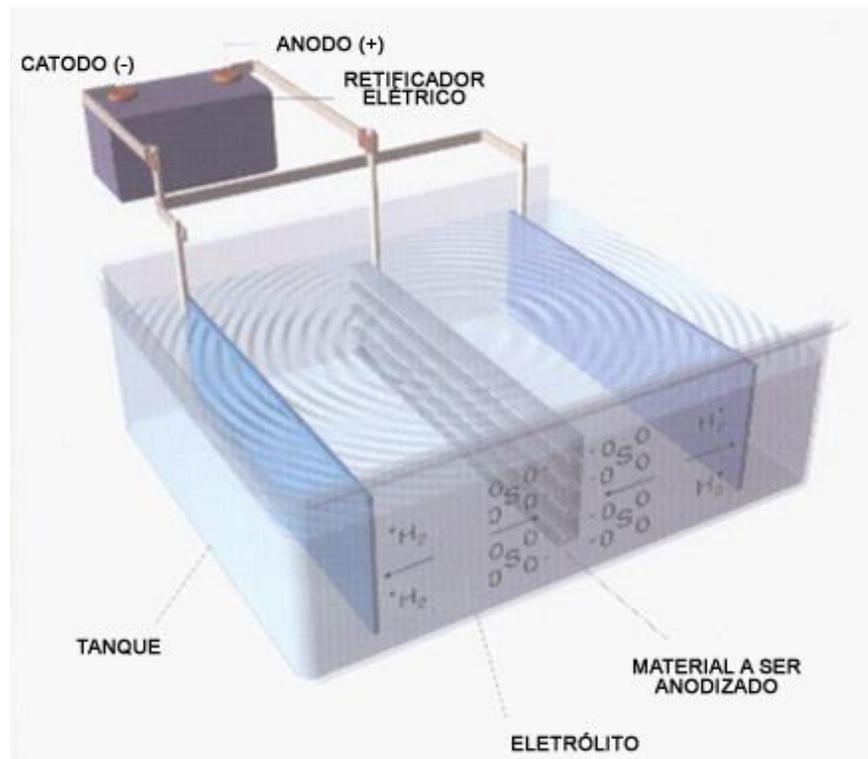
2.5.3 Anodização

A anodização é um processo eletroquímico que tem por finalidade criar e depositar uma camada de óxido sobre a superfície do material, tornando-o resistente à corrosão, aumentando sua dureza e auxiliando na ancoragem mecânica deste, já que a camada depositada é, na maioria das vezes, porosa (GONZÁLEZ, 2004).

O processo leva este nome, pois, o material sobre o qual se deseja criar a camada é mergulhado em uma solução eletrolítica e atua como ânodo, como exemplificado na Figura 7. Durante este processo qualquer metal condutor que não seja reativo com a solução escolhida como meio pode servir como cátodo.

A produção desta camada de óxido se dá pela passagem de corrente elétrica no sistema, a qual ao passar pela solução eletrolítica, que é ácida, promove a formação de hidrogênio do cátodo, enquanto no ânodo são formados óxidos do metal na superfície (GONZÁLEZ, 2004).

Figura 7 - Esquemática do processo de anodização.



Fonte: González (2004).

A anodização apresenta diversas vantagens em relação a outros processos de tratamento superficiais já citados, entre elas podem ser citadas a espessura da camada superficial criada no material, que é mais fina do que a resultante de outros processos, a durabilidade da camada, a qual não é retirada facilmente quando o material se encontra em serviço, a resistência à abrasão da camada, seu custo relativamente baixo e a preservação da possibilidade de reciclagem do material, caso essa já exista inicialmente (GONZÁLEZ, 2004).

Ao se tratar do alumínio, a anodização traz como principal característica a criação da camada porosa de óxido em sua superfície, principal responsável pelo aumento considerável da rugosidade superficial do material. O principal meio utilizado para esse processo é o ácido sulfúrico, podendo também ser utilizados os ácidos fosfóricos e crômico. Além disso, este processo apresenta baixo custo entre os processos de crescimento de óxidos atualmente aplicados, como crescimento de óxido por plasma, por exemplo (DOMINGUES, 2003).

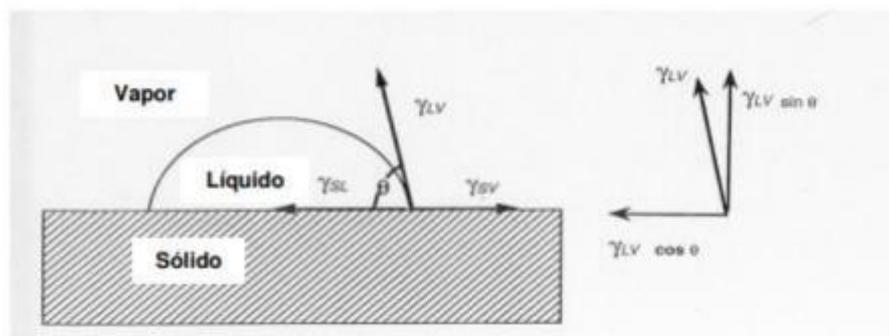
2.6 ÂNGULO DE CONTATO

O ângulo de contato é uma análise utilizada para identificar a interação de uma superfície com uma substância líquida. Essa análise normalmente ajuda a identificar previamente como

será a interação na interface entre a camada polimérica e a metálica no laminado metal-fibra. Essa interação é medida a partir do ângulo formado entre uma gota de líquido e a superfície do material, por esta razão é muitas vezes tratado como molhabilidade da superfície do material (ANDRADE, 2013).

A análise do ângulo de contato é feita com a utilização de um goniômetro e os cálculos são baseados na geometria de espalhamento da gota, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Medidas a serem consideradas pelo goniômetro.



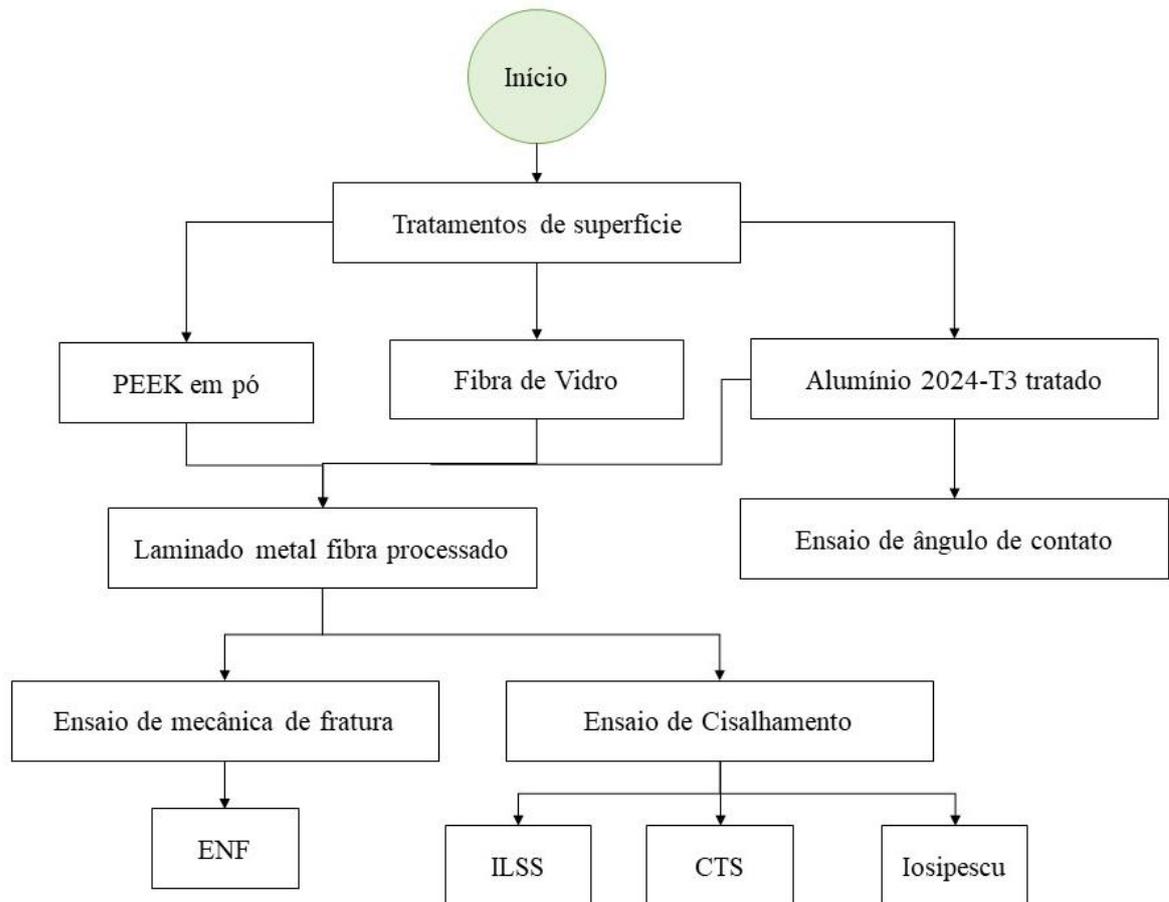
Fonte: Myers (1990).

O ensaio utilizado para a medição do ângulo de contato tem como premissa depositar uma única gota de líquido na superfície do material e analisar o espalhamento da mesma (SANTANA, 2014). Caso o líquido utilizado seja água e se espalhe completamente o ângulo de contato resultante será zero e por isso a superfície é considerada hidrofílica. Já caso a gota forme uma gota praticamente esférica, a superfície é considerada hidrofóbica (MYERS, 1990).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da parte experimental e prática deste trabalho (Figura 9) teve início com a realização dos tratamentos de superfície no alumínio 2024-T3 de espessura de 0,4mm. Após esta etapa, foi realizado o ensaio de ângulo de contato nas lâminas de alumínio 2024-T3 e os laminados metal-fibra foram processados. Com o material já processado, foram realizados ensaios mecânicos para se analisar o cisalhamento e a mecânica da fratura do compósito e após isso os resultados foram analisados.

Figura 9 - Esquema de realização de parte prática.



Fonte: Autoria própria.

3.1 SOLUBILIZAÇÃO DO PEEK

Com o objetivo de se produzir um filme de PEEK para a produção dos laminados, foram realizadas tentativas de solubilização do PEEK em pó. Com este objetivo foram utilizados três solventes: o álcool isopropílico; o difenil sulfona (DPS); e o dimetilsulfóxido (DMSO). O PEEK foi misturado a cada um dos solventes na proporção de 25 ml de solvente por grama de PEEK, a mistura foi deixada em agitador magnético por 30 minutos e após isto foi levada para a estufa em 70°C por 24 horas. Essa temperatura foi definida a partir da temperatura de inflamabilidade dos solventes, que se dá a aproximadamente 90°C.

3.2 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DO ALUMÍNIO

Inicialmente as placas de alumínio 2024-T3, com 0,4 mm de espessura, foram cortadas utilizando uma guilhotina (Figura 10), disponível na oficina do Colégio Técnico da Unesp – Campus Guaratinguetá.

Figura 10 - Guilhotina utilizada para corte das placas de alumínio.



Fonte: Autora própria.

Após isso, as placas de alumínio foram submetidas a três diferentes tratamentos superficiais, sendo estes a abrasão mecânica com esponja Scott-Brite, a decapagem química e a anodização fosfórica, realizados no Laboratório de Eletroquímica e Corrosão, DQE, Unesp – Campus Guaratinguetá.

A abrasão com Scott- Brite, foi realizada embaixo da água corrente, para que os resíduos não se prendessem a placa, e tomou-se cuidado de se realizar a abrasão em um único sentido em cada face das placas. Além disso, após este procedimento as placas foram limpas utilizando acetona P.A., como forma de garantir que estas estavam isentas de compostos orgânicos como gordura.

A decapagem química, foi realizada utilizando uma solução diluída de hidróxido de sódio (NaOH) 10% em massa, na qual as placas foram deixadas por sessenta segundos. Após isso, as placas foram mergulhadas em um Becker de 2 litros com água deionizada para a remoção do excesso da base. Em seguida as placas foram deixadas por noventa segundos imersas em uma solução diluída de HNO₃, preparada por diluição de HNO₃ 67% (em massa), na proporção 1:1 com água deionizada, com o objetivo de neutralizar a superfície da placa. Para finalizar o processo, as placas foram lavadas com água deionizada e foi realizada a limpeza com álcool isopropílico. Na sequência as placas foram secas com secador e foram deixadas por 30 minutos na estufa a 60° C para que toda a água fosse retirada da superfície.

No caso do tratamento de anodização das placas foi necessário realizar preliminarmente a decapagem química das placas. A aparelhagem necessária para anodização (Figura 11), foi uma fonte de alimentação (cc) AGILENT, modelo E3634A (25V/7^a) para que se gerasse uma tensão de 10 V, uma cuba de plástico, na qual foi colocada a solução 10% em massa de HPO₄, bem como uma serpentina instalada no interior da cuba, com capacidade de 4L, para que houvesse a homogeneização da temperatura da solução, um termômetro de escala interna para o controle de temperatura e um banho termostatizado ligado à serpentina para manter a temperatura em 24°C ± 1°C. A agitação da solução foi feita por borbulhamento de ar, usando uma bomba de aquário.

Figura 11 - Aparelhagem utilizada para anodização.



Fonte: Autoria própria

Primeiramente, utilizou-se como cátodo placas de cobre, porém devido a formação de óxido durante a secagem a 60° em estufa realizada após a decapagem, a anodização não se

completava. Em uma tentativa de solucionar este problema, os cátodos de cobre foram substituídos por cátodos de dióxido de chumbo, mas a anodização ainda não foi bem-sucedida. Dessa forma, para que a anodização fosse possível, foi necessário realizar uma segunda decapagem nas placas de alumínio e, logo em seguida, realizar a anodização novamente.

Para que se ocorresse a anodização completa, as placas de Al2024 foram anodizadas aplicando-se um potencial de 10 V, durante um intervalo de tempo de 10 minutos. No início da anodização, a corrente atingia o valor limite do equipamento (7,0 A) e, após cerca de 60 segundos, tendia a um valor estacionário de 2,8 A. Com o a área imersa das placas era de cerca de 370 cm²(155 mm x 120 mm de cada lado) a densidade de corrente era de 7,5 mA/cm². Este parâmetro foi utilizado para garantir que as placas fossem anodizadas na mesma condição. Após este processo a fonte foi desligada e as placas foram lavadas com água deionizada, foi feita a limpeza com álcool isopropílico, a secagem com secador e as placas foram mantidas por 30 minutos na estufa a 60°C para a eliminação de toda água.

3.3 ÂNGULO DE CONTATO

Para avaliar a influência dos três tratamentos superficiais aplicados nas chapas de alumínio foram realizadas medidas de ângulo de contato. Para cada condição de tratamento foram realizadas cinco medidas de ângulo de contato em diferentes regiões das chapas. Essas medidas foram realizadas na Unesp - Campus de Guaratinguetá utilizando o instrumento Drop Shape Analyzer DSA100 - KRÜSS GmbH (Figura 12), o qual tem capacidade de medir a tensão superficial de líquidos, molhabilidade e interação entre o líquido e substrato. O equipamento apresenta capacidade de medição de ângulos de contato entre 1° e 180°.

Figura 12 - Equipamento utilizado para o ensaio de ângulo de contato.



Fonte: Autoria própria

3.4 PROCESSAMENTO POR COMPRESSÃO A QUENTE

Ao todo foram processados 7 laminados, sendo 1 de dimensões 70 mm x 70 mm sem nenhum tratamento superficial, 1 com dimensão de 70 mm x 70 mm apenas com abrasão por Scott- Brite, 2 de dimensões 120 mm x 170 mm com o alumínio decapado quimicamente e 3 de dimensões 120 mm x 170 mm com o alumínio que passou pelo processo de anodização. As dimensões de 120 mm por 170 mm foram determinadas com base no tamanho dos corpos de prova necessários para a realização dos ensaios mecânicos e, também, pelo tamanho máximo suportado pela cuba eletrolítica de anodização.

Os laminados foram processados a partir da compressão a quente, utilizando uma prensa da marca Carver, modelo CMV1000H-15-X (Figura 13), disponível na Unesp – Campus de Guaratinguetá.

Figura 13 - Prensa utilizada para o processamento por compressão a quente.

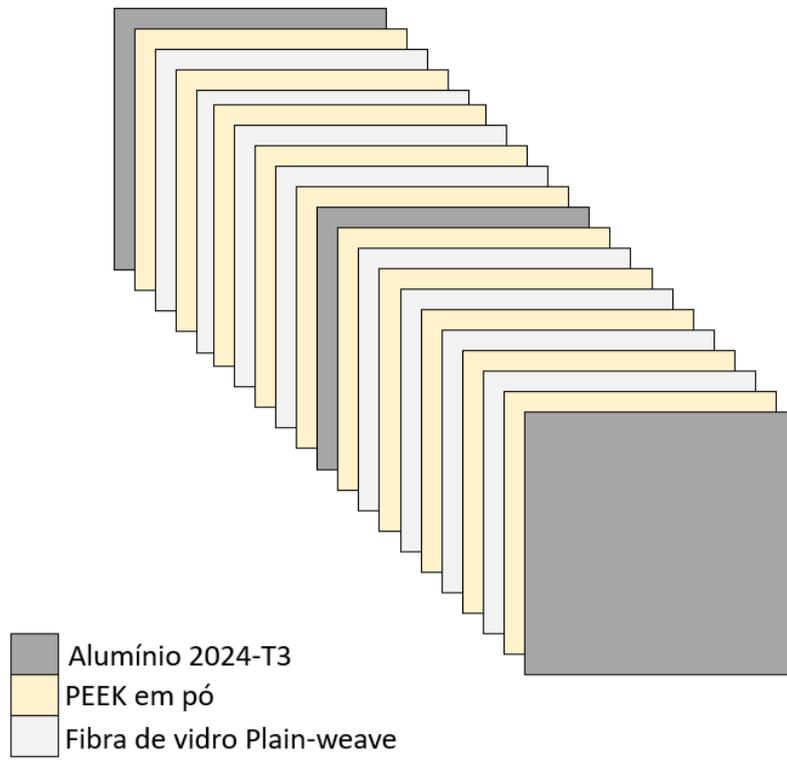


Fonte: Autoria própria.

Primeiramente foi feito o empilhamento manual dos materiais para a produção de cada laminado, sendo a sequência composta por uma lâmina de alumínio, 5 camadas de PEEK em pó intercaladas com 4 de fibra de vidro plain waeve, outra lâmina de alumínio, mais cinco camadas de PEEK intercaladas com 4 de fibra de vidro e a última placa de alumínio (Figura 14). Além disto, para as placas que foram produzidas para o ensaio de ENF, entre a quinta camada de PEEK e o segundo alumínio foram inseridas tiras de papel alumínio de 45 mm de largura, como forma de produzir as pré-trincas.

Figura 14 - Esquemática do empilhamento de camadas de material para processamento.

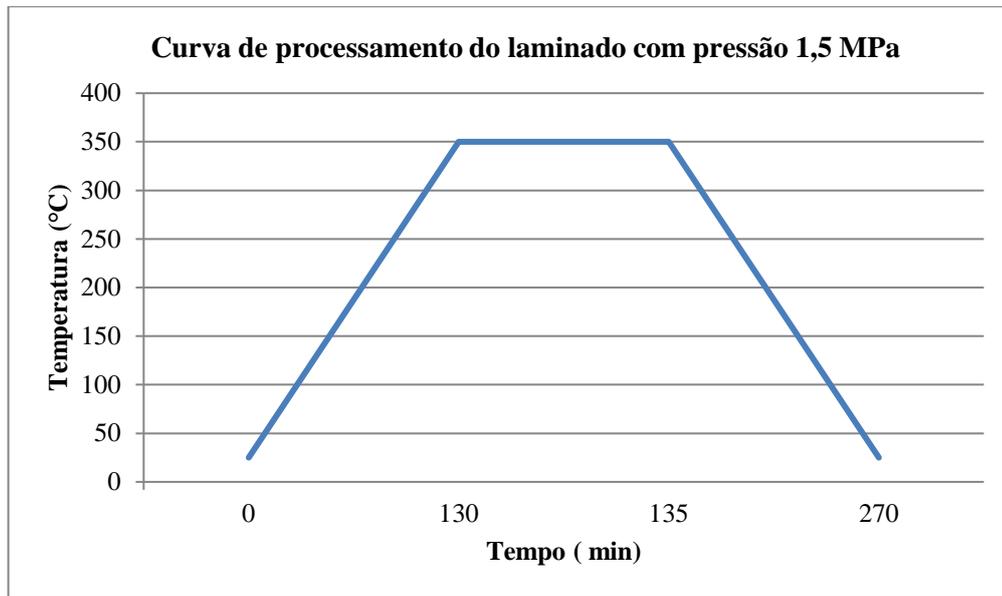
Esquemática de empilhamento de camadas para processamento.



Fonte: Autoria própria.

Após o empilhamento, o laminado foi colocado na prensa e submetido a uma curva de aquecimento (Figura 15), chegando até a temperatura de 350 °C. Após atingir esta temperatura, o material foi submetido a uma pressão de 1,5 MPa, permanecendo nestas condições por aproximadamente cinco minutos e posteriormente sendo resfriado com auxílio de ar e água até a temperatura ambiente.

Figura 15 - Curva de processamento do laminado.



Fonte: Autoria própria.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Conhecer as propriedades mecânicas dos materiais compósitos é essencial quando se considera uma aplicação estrutural. O comportamento mecânico dos materiais, como resistência ao cisalhamento, por exemplo, (definida pelas propriedades individuais dos materiais utilizados, pelo tipo de carregamento e a geometria final do material) é derivada dos materiais que o compõe assim como do método de processamento do compósito e das condições de trabalho do material. A fim de se avaliar a interface em materiais compósitos, os ensaios mais empregados são aqueles que testam resistência ao cisalhamento (DIAS, 2004).

Para se entender as propriedades mecânicas dos materiais, foram realizados os ensaios de cisalhamento ILSS, CST e Iosipescu, e além deles, também foi realizado o ensaio de mecânica da fratura, ENF. Todos foram realizados em uma máquina universal Shimadzu modelo AG-X, (Figura 16) que se encontrava no laboratório de Ensaio Mecânicos da UNESP – campus Guaratinguetá.

Figura 16 - Máquina utilizada para a realização dos ensaios mecânicos.

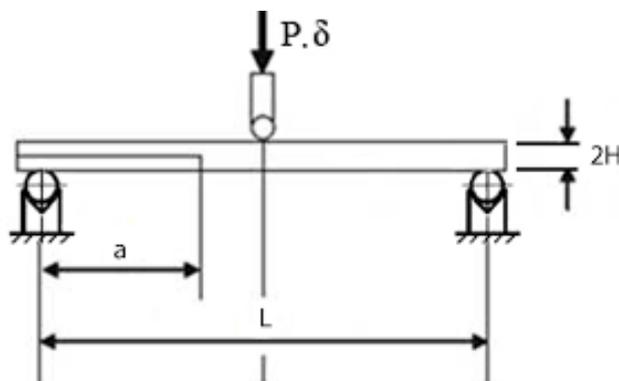


Fonte: Autoria própria.

3.5.1 ILSS

O ensaio ILSS tem como principal objetivo a avaliação do cisalhamento interlaminar de materiais compósitos. Nesse ensaio o corpo de prova de geometria retangular é posicionado em dois apoios nas pontas e a carga é aplicada no centro do corpo de prova, dessa forma a carga resultante promove o cisalhamento interlaminar do material (BONHIN, 2019) como exemplificado na Figura 17.

Figura 17 - Esquemática do ensaio de ILSS.



Fonte: Dias (2004).

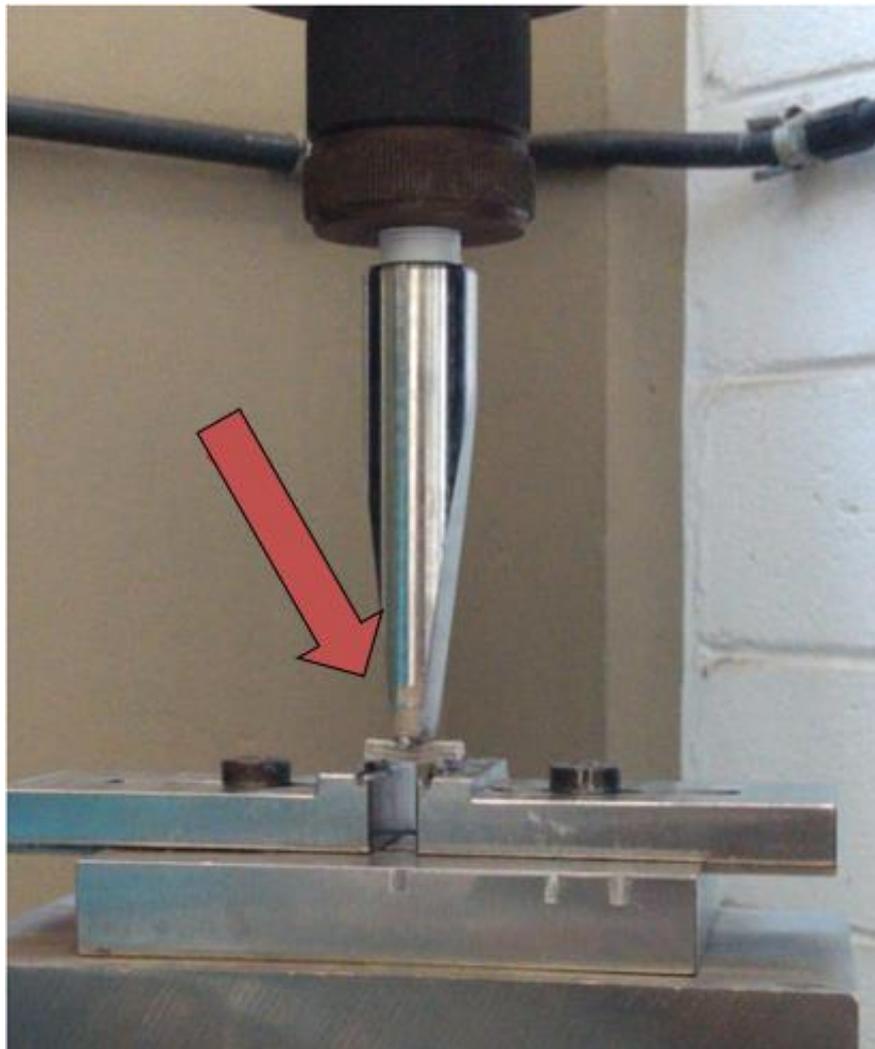
Para a realização do ensaio de ILSS, utilizou-se a norma da ASTM D2344/D2344M. De modo que as dimensões dos corpos de prova foram determinadas de acordo com a equação 1 e 2, onde l é o comprimento do corpo de prova, h é a espessura do material e b é a largura do corpo de prova.

$$l = h * 6,0 \quad (1)$$

$$b = h * 2,0 \quad (2)$$

No total foram ensaiados 9 corpos de prova, a uma velocidade 1,0 mm/min, utilizando a célula de carga de 5kN. Na Figura 18 é apresentada a realização do ensaio de ILSS.

Figura 18 - realização do ensaio de ILSS, onde a seta vermelha indica o corpo de prova posicionado.



Fonte: Autoria própria.

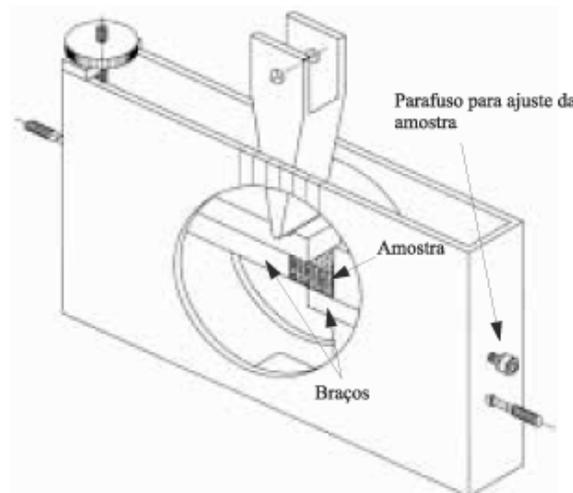
O cálculo da tensão final, se deu a partir da equação 3, na qual F representa a força e A representa a área, também foram calculados a média calculada para as tensões, o desvio padrão dos resultados obtidos e a variância.

$$\sigma = \frac{F}{A} * 0,75 \quad (3)$$

3.5.2 CST

O ensaio de cisalhamento CST, baseia-se na aplicação vertical da carga em apenas algumas das camadas do compósito de um corpo de prova com dimensões de 10x10 mm, causando, assim, o cisalhamento do corpo de prova verticalmente. Este ensaio não é amplamente utilizado para análises de laminados metal-fibra, mesmo que seus resultados tragam uma análise interessante da maneira com que acontece a delaminação caso a carga seja aplicada diretamente em parte da espessura do material (BONHIN, 2019) como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Esquemática do ensaio de CST.



Fonte: Dias (2004).

Para a realização do ensaio de CST não há uma norma definida, contudo ele foi realizado de acordo com a metodologia já utilizada pelo grupo de pesquisa (Núcleo Interdisciplinar de Compósitos Avançados) da FEG. Esta metodologia é a mesma utilizada pelo Leibniz Institute of Polymer Research de Dresden, Alemanha. Para este ensaio foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de aproximadamente 10mm por 10mm (Figura 20).

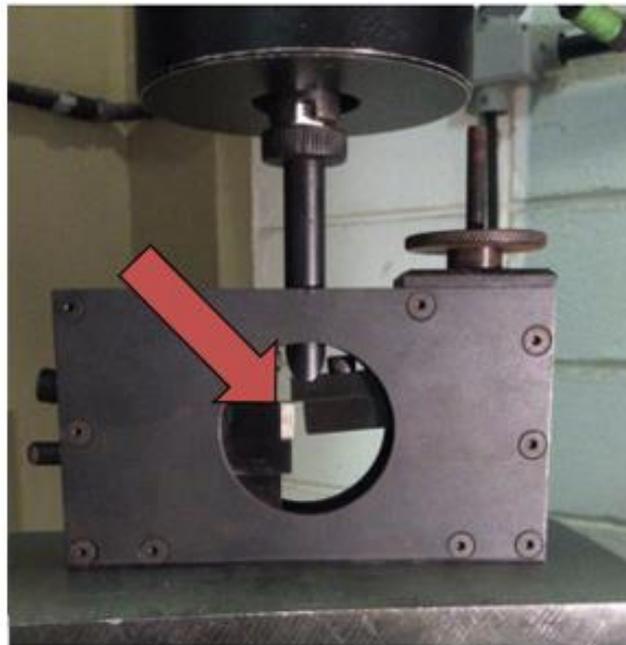
Figura 20 - Corpos de prova para o ensaio de CST.



Fonte: Autoria própria.

De maneira análoga ao ensaio de ILSS (item 3.6.1 deste trabalho), utilizou-se uma célula de carga de 5kN para a realização do ensaio, contudo a velocidade de deslocamento neste caso foi de 0,25 mm/min. A Figura 21 apresenta a realização do ensaio de CST.

Figura 21 - Dispositivo e corpo de prova posicionados para a realização do ensaio de CST, onde seta vermelha indica o corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

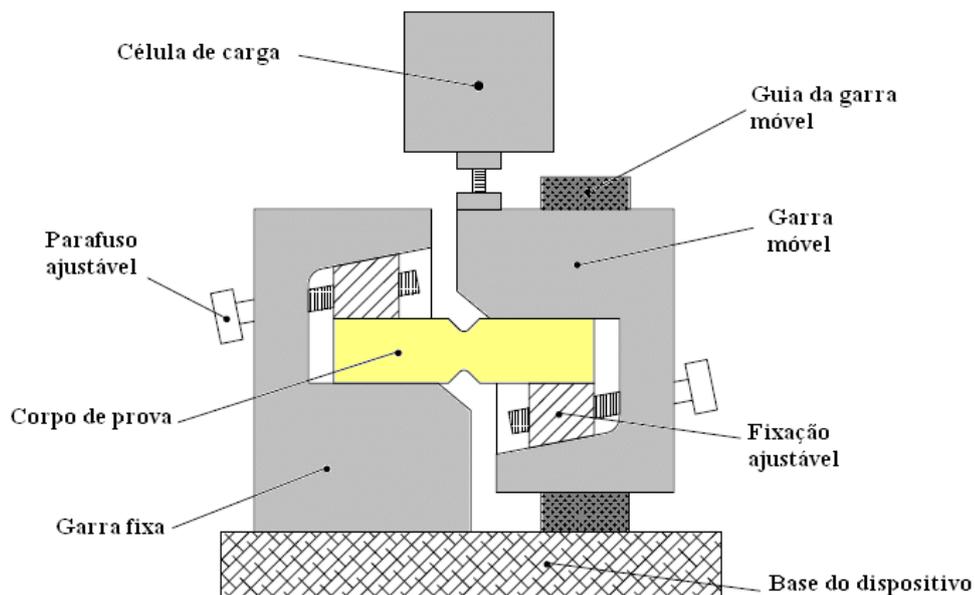
Os cálculos de resultados a partir dos dados obtidos a partir do ensaio seguiram a equação 4.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

3.5.3 Iosipescu

O ensaio mecânico de Iosipescu foi definido para se obter resistência e o módulo de cisalhamento transversal do material. Este consiste na aplicação de carga compressiva em um corpo de prova de geometria retangular de dimensões 77 mm X 20 mm e dois entalhes em “v” que atuam como concentradores de tensão, em ambos os lados, na metade de seu comprimento (BOTELHO, 2008), como apresentado na Figura 22.

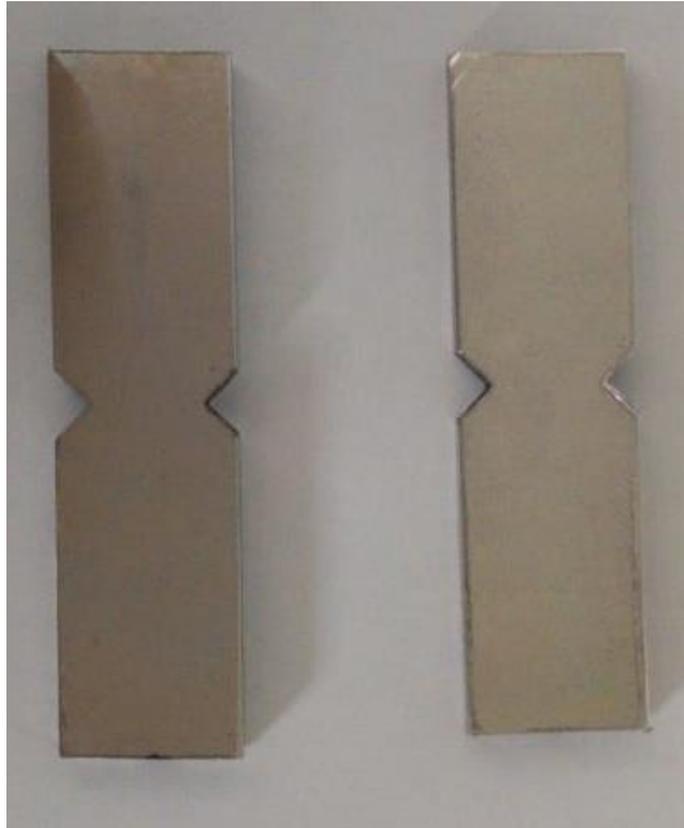
Figura 22 - Esquemática do ensaio de Iosipescu.



Fonte: Dias (2004).

A norma utilizada para a realização do ensaio Iosipescu foi ASTM D5379 / D5379M, de modo que os oito corpos de prova produzidos apresentaram dimensões de 77 mm de comprimento por 20 mm de largura e dois entalhes na parte central com ângulo de 90° e profundidade de 5 mm (Figura 23). Estes corpos de prova foram ensaiados utilizando uma célula de carga de 5 kN e com velocidade de deslocamento de 0,5 mm/min.

Figura 23 - Corpos de prova para o ensaio Iosipescu.

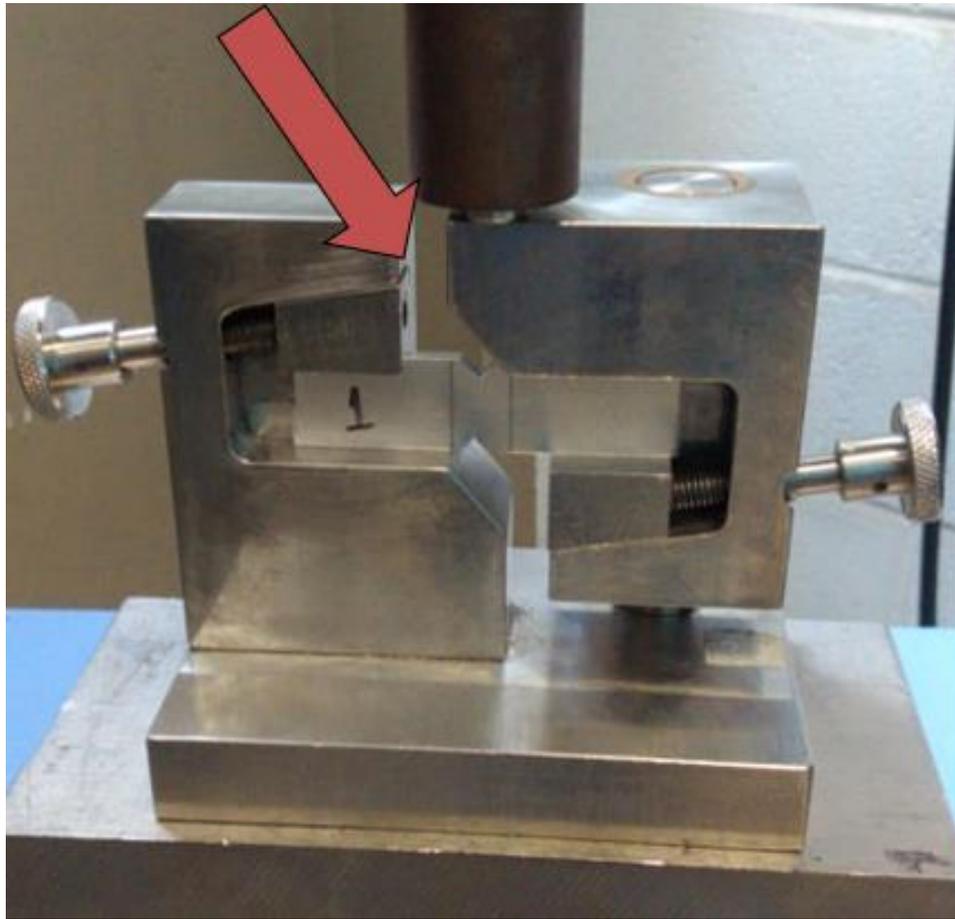


Fonte: Autoria própria.

A realização deste ensaio mecânico também contou com o acoplamento de um dispositivo na máquina Shimadzu, e a Figura 24 demonstra a montagem para a realização do ensaio, o cálculo para a obtenção da tensão foi realizado de acordo com a equação 5.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Figura 24 - Dispositivo e corpo de prova posicionados para a realização do ensaio Iosipescu, onde seta vermelha indica o corpo de prova.



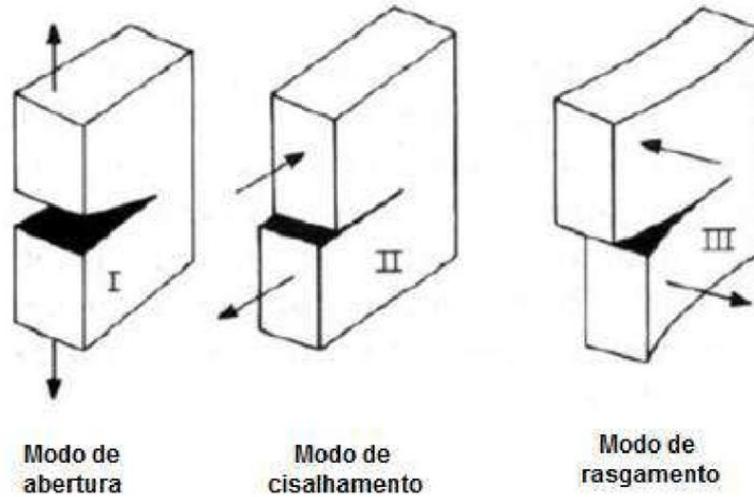
Fonte: Autoria própria.

3.6 ENSAIO DE MECÂNICA DA FRATURA – ENF

A tenacidade à fratura pode ser definida como a capacidade do material de absorver energia, seja esta de compressão, tração ou impacto, antes de apresentar fratura (CÂNDIDO, 2014). Essa propriedade intrínseca do material se mostra altamente importante para componentes de aplicação estrutural como é o caso dos laminados metal-fibra (NIKOLAOS, 2017).

Quando se analisa falha em materiais, considera-se que a falha pode ocorrer de três formas diferentes, apresentadas na Figura 25. Modo I, quando a falha se dá por espaçamento vertical, modo II, quando a falha é causada por deslizamento horizontal e modo III quando a falha ocorre por rotação (BEIN, 2008).

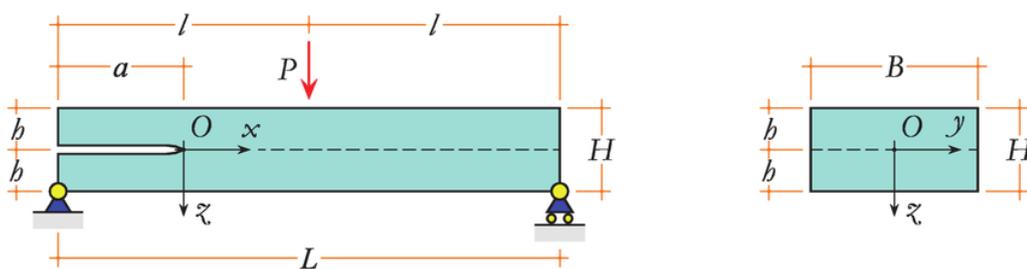
Figura 25 - Exemplificação dos modos de falha.



Fonte: Bein (2008).

Um dos ensaios mais utilizados mundialmente quando se trata de analisar a tenacidade a fratura interlaminar quando há aplicação de carga é o ENF, exemplificado na Figura 26. O ensaio é similar a um ensaio de flexão em três pontos, no qual um corpo de prova retangular, com dimensões de 165 mm x 20 mm contendo uma pré-trinca em uma das extremidades é submetido a esforços de compressão no centro entre dois apoios, de modo a resultar na propagação da trinca partindo da extremidade (SILVA, 2014).

Figura 26 - Esquemática do ensaio ENF.

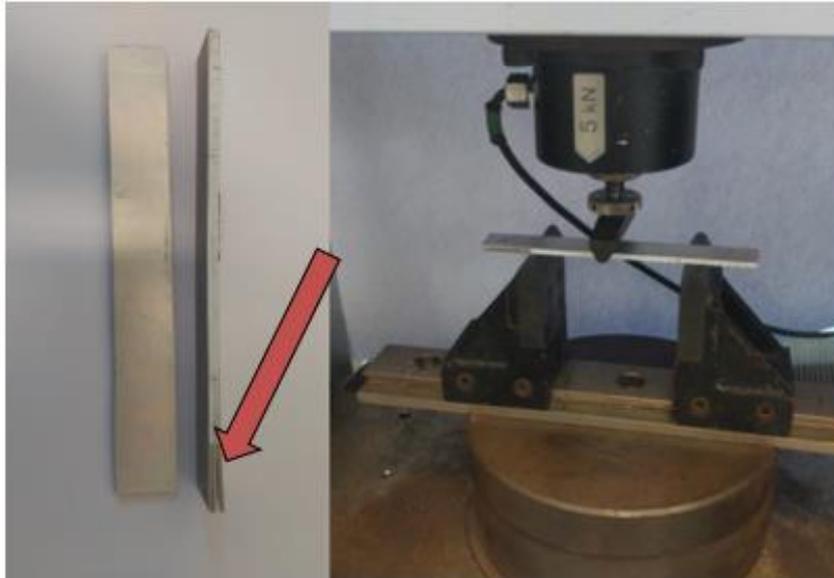


Fonte: Bein (2008).

O ensaio ENF foi realizado de acordo com a norma ASTM D7905/D7905M e foram utilizados 8 corpos de prova, de dimensões de aproximadamente 170 mm de comprimento por 20 mm de largura, possuindo uma pré-trinca, de 45 mm, na extremidade, exemplificado na Figura 27. Para que fosse possível observar o crescimento da trinca, os corpos de prova tiveram as laterais pintadas de branco e foram marcados de 1 em 1 milímetro. O ensaio foi realizado

utilizando uma célula de carga de 5 kN e velocidade de deslocamento de 0,5 mm/min, a Figura 27 representa a realização do ensaio.

Figura 27 - Corpo de prova para ensaio de ENF, onde a seta vermelha indica a pré trica, e ensaio ENF sendo realizado.



Fonte: Autoria própria.

Para os cálculos dos valores obtidos a partir do ensaio de ENF utilizou-se a equação (6), onde P é a carga máxima obtida a partir do ensaio, m é o coeficiente angular da reta, obtido a parte do gráfico entre pontos de carga maiores que 90 N e menores do que 50% de P, a é o tamanho da trinca dos corpos de prova e b é a largura de cada corpo de prova.

$$G_{II} = \frac{2mP^2a^2}{2b} \quad (6)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SOLUBILIZAÇÃO DO PEEK

Apesar das tentativas com os três solventes utilizados, não foi possível a produção do filme de PEEK, visto que ao retirá-lo da estufa, o pó de PEEK não havia formado filme com a evaporação do solvente, isso pode ser explicado pelo fato do PEEK ser um polímero com alta estabilidade térmica, o que faz com que sua estrutura química se mantenha essencialmente inalterada quando exposto a ciclos térmicos, dificultando sua solubilização. O resultado da

tentativa de solubilização e produção do filme é mostrado na Figura 28. Dessa forma usou-se o PEEK em pó para a produção do laminado.

Figura 28 - Resultado das tentativas de solubilização do PEEK.

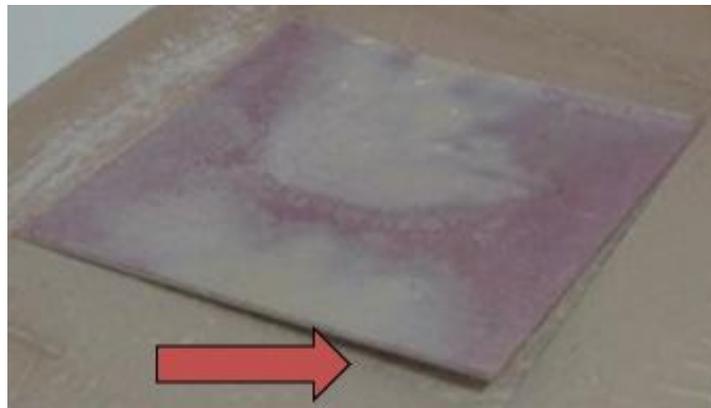


Fonte: Autorial própria.

4.2 INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

A respeito dos efeitos dos tratamentos superficiais nos laminados finais, pode-se observar que para a placa de controle, sem nenhum tratamento superficial no alumínio, logo após retirá-la da prensa a mesma delaminou (Figura 31). Demonstrando que o alumínio necessita passar por algum tratamento para adesão entre o metal e o compósito.

Figura 29 - Placa sem tratamento superficial logo após ser tirada da prensa, onde a seta vermelha indica a delaminação.



Fonte: Autorial própria.

Já para a placa produzida com a abrasão mecânica utilizando Scott-Brite, houve uma aderência entre o metal e o compósito quando esta foi retirada da prensa (Figura 32).

Figura 30 - placa com abrasão com Scott-Brite logo após ser retirada da prensa.



. Fonte: Autoria própria.

Contudo após algumas horas em repouso, ela sofreu delaminação na primeira camada de alumínio, Figura 33. Resultado das tensões residuais geradas pelo processo de consolidação do laminado, visto que o alumínio e o PEEK/fibra de vidro apresentam diferentes coeficientes de expansão térmica. De modo que ao aquecer um sofreu maior dilatação que o outro e ao resfriar tal variação de expansão gerou tensões internas. Além disso, por mais que a abrasão tenha modificado a superfície do metal, esta mudança não foi o suficiente para proporcionar uma interface boa o suficiente entre o compósito e a lâmina metálica para a consolidação do material. Tal fato impossibilitou a realização de ensaios mecânicos com as placas produzidas nesta condição.

Figura 31 - Laminados com delaminação após algumas horas de repouso.



Fonte: Autoria própria.

Quando se passa a analisar as placas que sofreram tratamento químico de decapagem estas não apresentaram delaminação mesmo após sete dias.

Entretanto após o passado período de um dia depois do corte dos corpos de prova provenientes desta placa as camadas se separaram quase completamente, Figura 34, impedindo também a realização de ensaios mecânicos, este fato pode ser explicado pelos resultados obtidos

no ensaio de ângulo de contato, mostrando que a perturbação causada pela serra seria suficiente para abrir as camadas do compósito, já que a superfície do alumínio não era propícia para a aderência mecânica esperada.

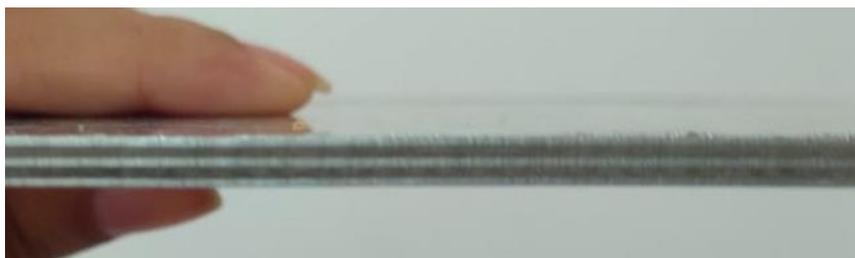
Figura 32 - Corpos de prova a partir de lâmina decapada que apresentaram abertura entre as camadas após o corte.



Fonte: Autoria própria.

Já as placas que passaram pelo processo de anodização fosfórica, não apresentaram delaminação inicial, após a prensagem (Figura 35) e nem após o corte dos corpos de provas.

Figura 33 - Compósito processado com placas de alumínio anodizadas.



Fonte: Autoria própria.

Com estas foi possível a preparação de corpos de prova para a realização de ensaios de cisalhamento e de mecânica da fratura, fato que permite a conclusão de que entre os tratamentos superficiais testados, a anodização fosfórica teve o melhor desempenho e a única que foi viável para produção do FML de alumínio 2024-T3 / PEEK / Fibra de vidro nesse estudo, bem como possibilitou a realização dos ensaios mecânicos.

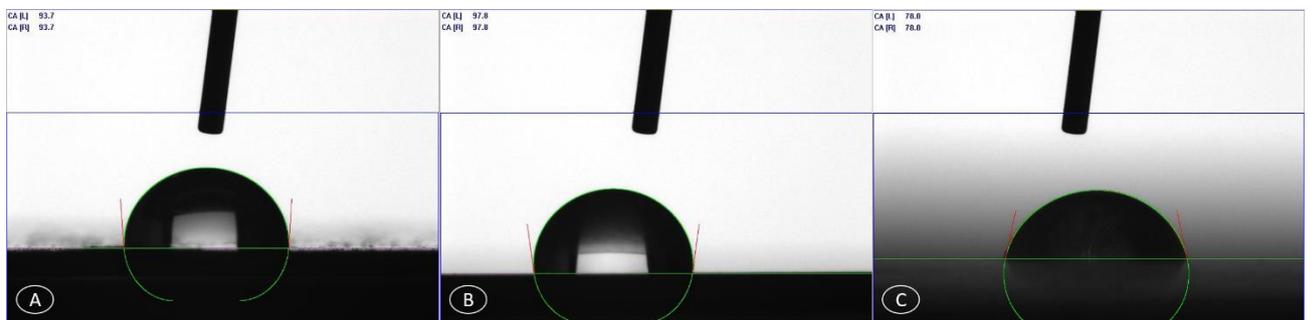
Os resultados obtidos através do ensaio de ângulo de contato para cada tratamento de superfície realizado (Tabela 4) foram utilizados para comprovar e entender o comportamento do material após o processamento e os motivos de haver, ou não, delaminação, sendo que quanto menor o ângulo de contato maior a molhabilidade do material e maior a aderência entre a matriz e o metal.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de ângulo de contato para cada tipo de tratamento superficial.

Tratamento Superficial	Ângulo de Contato Médio
Sem Tratamento	93,8°
Abrasão Mecânica	98,7°
Decapagem	(3) 0° 68° 78°
Anodização (PbO ₂)	22,3
Anodização (Cu)	33,4

Fonte: Autoria própria.

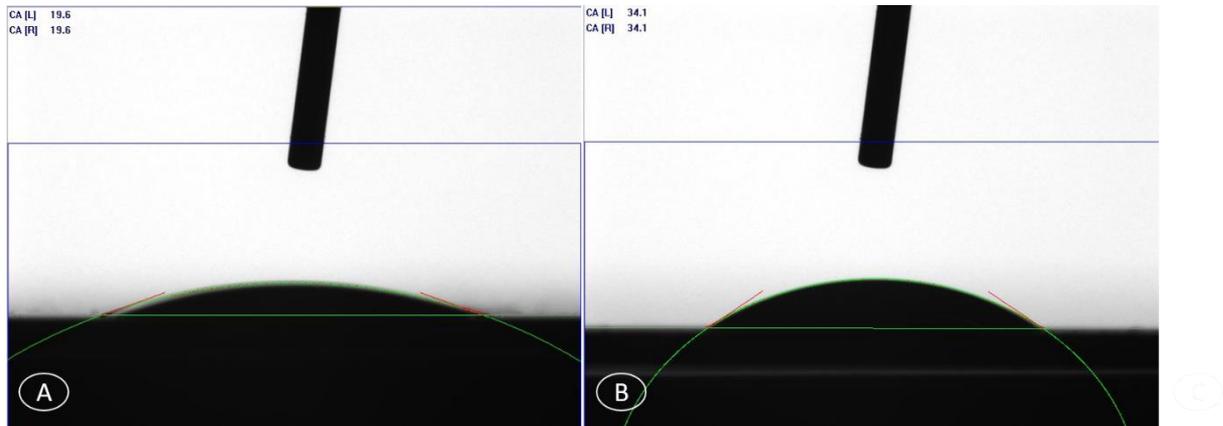
Figura 34 - Imagem obtida no ensaio de ângulo de contato com a liga Al2024-T3. A: Sem tratamento; B: abrasão mecânica; C: decapagem química.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Imagem obtida no ensaio de ângulo de contato com a liga Al2024-T3 anodizada.

A: cátodo de cobre; B: cátodo de dióxido de chumbo.



Fonte: Autoria própria.

Foi possível notar uma redução máxima no ângulo de contato da superfície do alumínio de 73,17%, atingida com a anodização utilizando cátodos de chumbo, também destaca-se que a placa decapada quimicamente apresentou resultados variantes e um ângulo de contato 0° em uma das medidas, isso ocorre por que o tratamento de decapagem resultou em uma superfície livre de óxidos e portanto hidrofílica, de modo que a gota se espalhou completamente e dessa forma o ângulo de contato não pode ser medido (PARK, 2010).

A partir das imagens obtidas e dos resultados apontados pelo ensaio de ângulo de contato, pode-se considerar que o melhor método de tratamento superficial para esta aplicação foi a anodização com cátodos de chumbo, já que este método levou a maior redução de ângulo de contato, mas não resultou em um resultado nulo.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1 Ensaio de cisalhamento

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento realizados trazem informações importantes para a validação da qualidade do laminado metal-fibra produzido.

Com relação ao valor da tensão média suportada pelo material no ensaio CST, este foi de 9,55 MPa com desvio padrão de 0,76 e variância de 1,68, valor que quando comparado à valores da literatura para FML mais usuais como os constituídos por alumínio 2024-T3/epóxi/fibra de vidro, representa um decréscimo de aproximadamente 60% no desempenho (BONHIN, 2019). É possível observar no gráfico, Figura 36, que todos os corpos de prova apresentaram

comportamento semelhante durante o ensaio, com exceção do corpo de prova 1, e isso pode ser explicado por uma falha no posicionamento do corpo de prova, o que fez com que a carga fosse aplicada na camada de metal em vez de aplicar na camada de compósito. Entretanto, uma observação importante que pode ser feita a partir da análise dos corpos de prova após o ensaio (Figura 37), é que a falha, diferentemente do que se esperava, ocorreu no compósito e não na interface entre o alumínio e o PEEK, fato este que pode ser explicado pela falha prematura na matriz antes da interface.

Figura 36 - Gráfico do comportamento das amostras durante o ensaio CST.

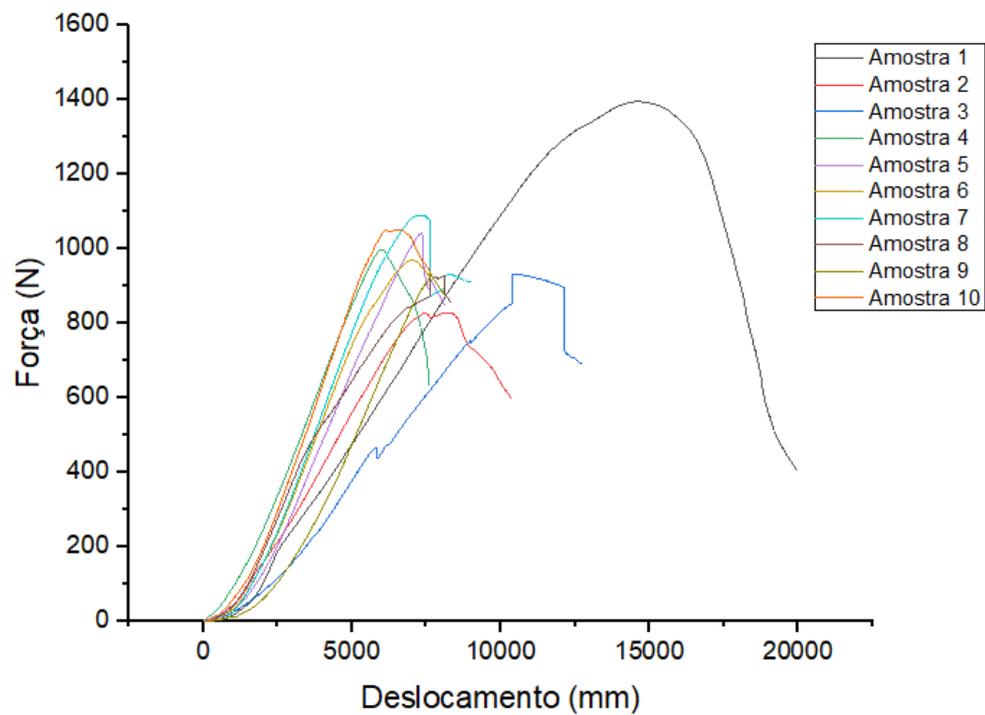
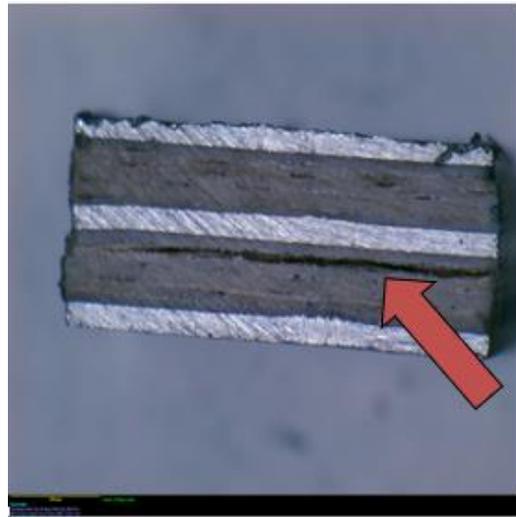


Figura 37 - Corpo de prova após ensaio de CST, onde seta vermelha indica a falha no compósito.

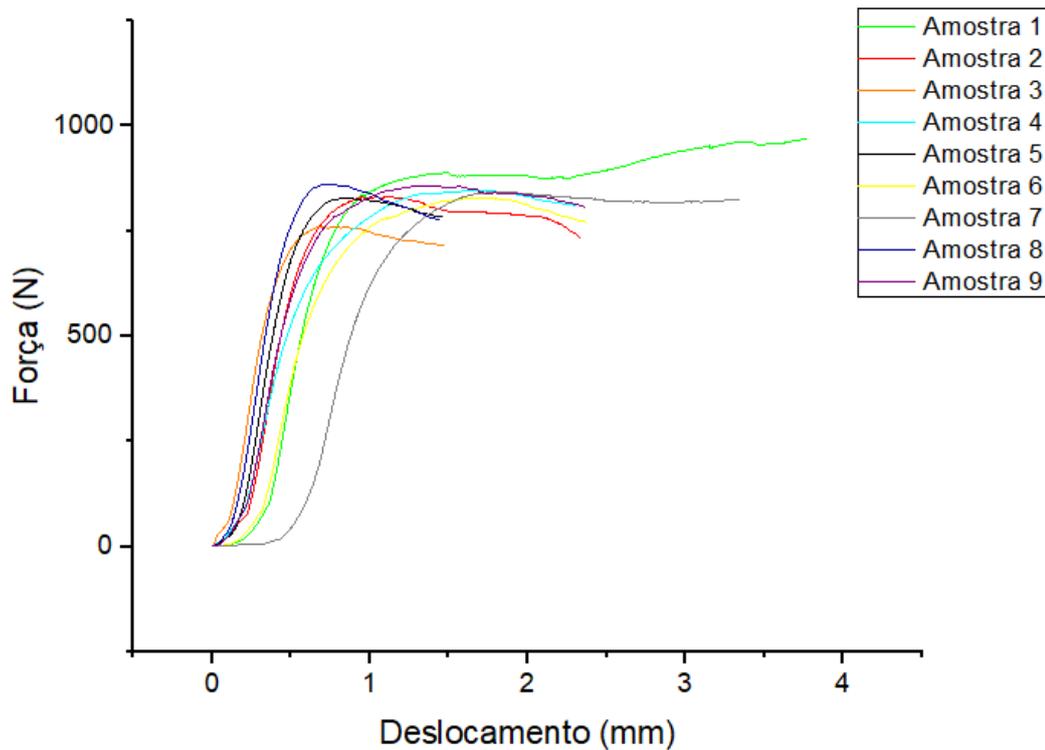


Fonte: Autoria própria.

Tal fato pode ter ocorrido devido a deficiência na consolidação do polímero durante o processamento, visto que este encontrava-se na forma de pó, de modo que possivelmente gerou poros dentro da estrutura, fragilizando a mesma.

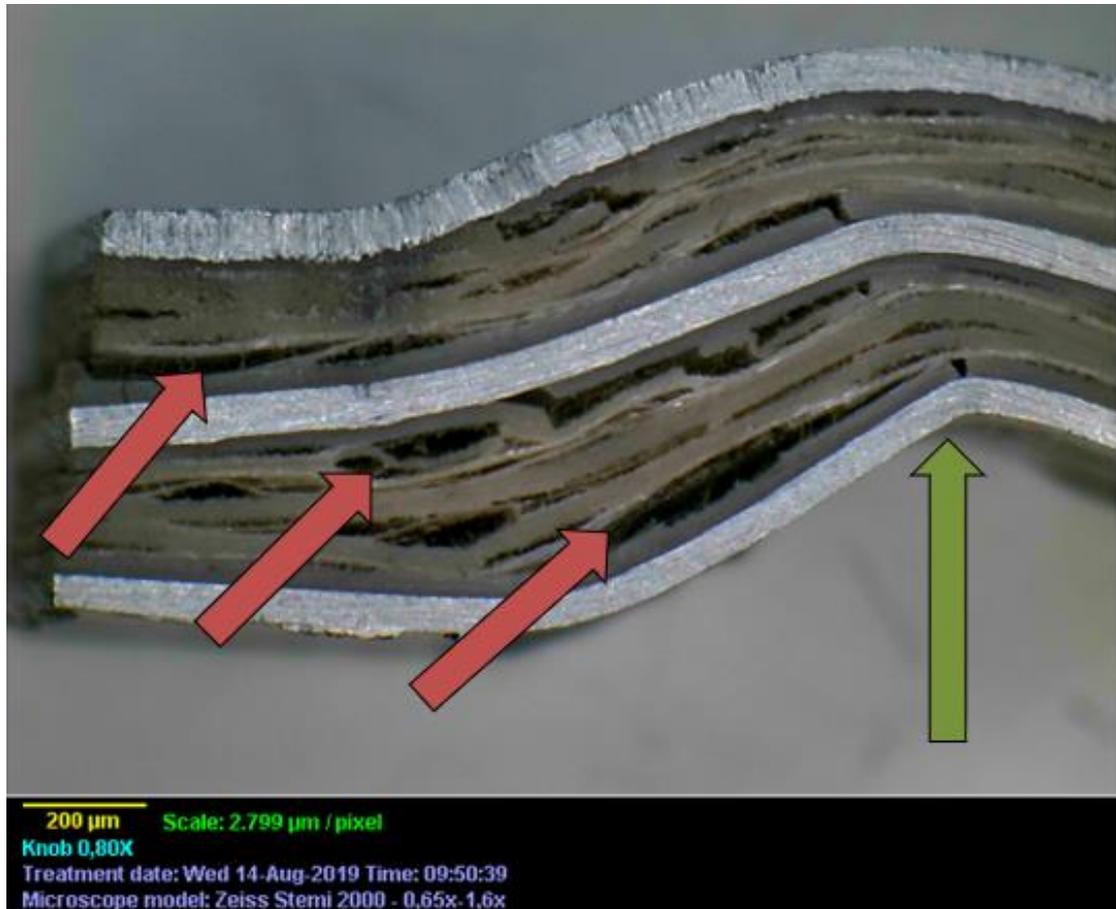
Com relação ao ensaio de ILSS, a resistência interlaminar do material foi de 24,29 Mpa com desvio padrão de 2,12 e variância de 4,49. Este valor é próximo aos valores encontrados em outros trabalhos (BONHIN, 2019). Assim como nas análises nos corpos de prova provenientes do ensaio de CST, neste ensaio também se notou a que a falha se deu na matriz e não na interface (Figura 39) e analisando o gráfico do comportamento dos corpos de prova durante o ensaio, também pode-se observar uma resposta semelhante, sem apresentar grandes variações (Figura38).

Figura 38 - Gráfico do comportamento das amostras durante o ensaio ILSS.



Entretanto, o fato do valor de resistência não ter se diferenciado tanto da literatura pode ser explicado pela direção de atuação da carga, a qual tende a promover o cisalhamento interlaminar no modo II, ou seja, preferencialmente na interface, de modo que se pode afirmar que a mesma apresentou boa adesão entre o alumínio e o PEEK. Contudo, pode-se supor que caso a consolidação da matriz utilizada fosse melhor, o material teria suportado uma maior carga neste ensaio, já que ele iria se estender até a falha ocorrer na interface entre o polímero e o metal.

Figura 39 - Corpos de prova após o ensaio de ILSS em microscópio com ampliação de 0,8x, onde as setas vermelhas indicam as falhas no compósito e a seta verde o local de aplicação da carga durante o ensaio.

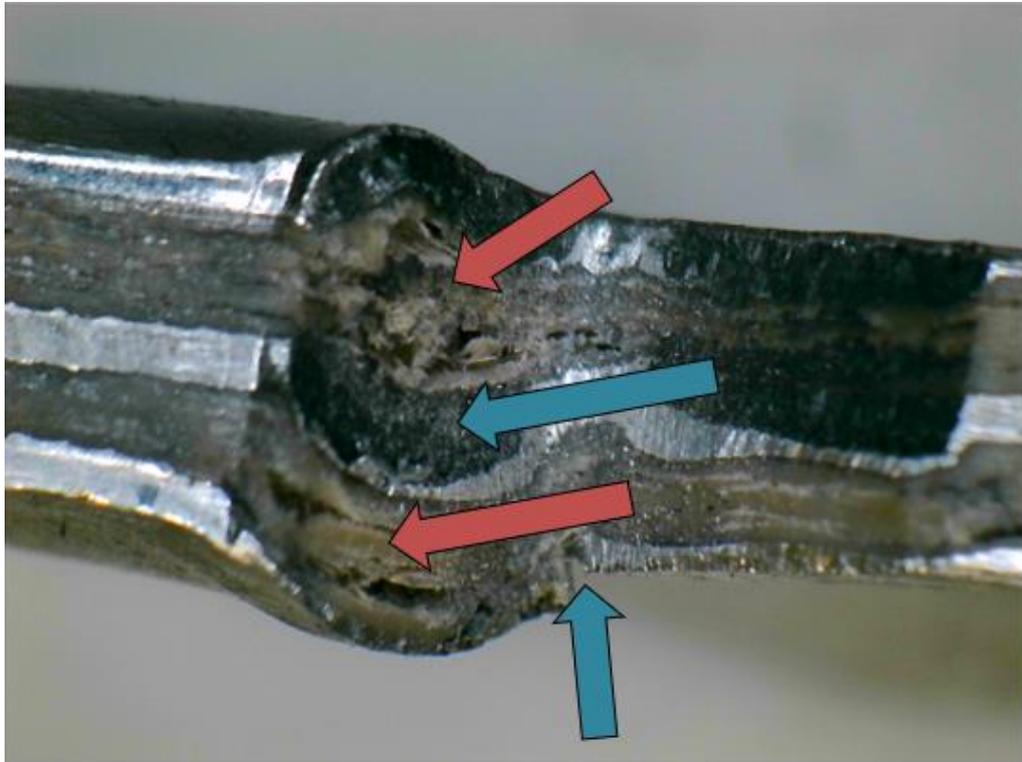


Fonte: Autoria própria.

E por fim, ao analisar os valores obtidos pelo ensaio de Iosipescu, estes foram de 92,98 Mpa com desvio padrão de 7,96, valor este que é menor do que observados em outros estudos (BOTELHO, 2008). Esta variação pode ser justificada pela forma com que a falhas ocorreram nos corpos de prova (Figura 40). Com a análise do gráfico que representa o comportamento das amostras durante o ensaio (Figura 41) pode-se notar que todas as amostras apresentaram um comportamento muito similar, o que corrobora para validade do ensaio.

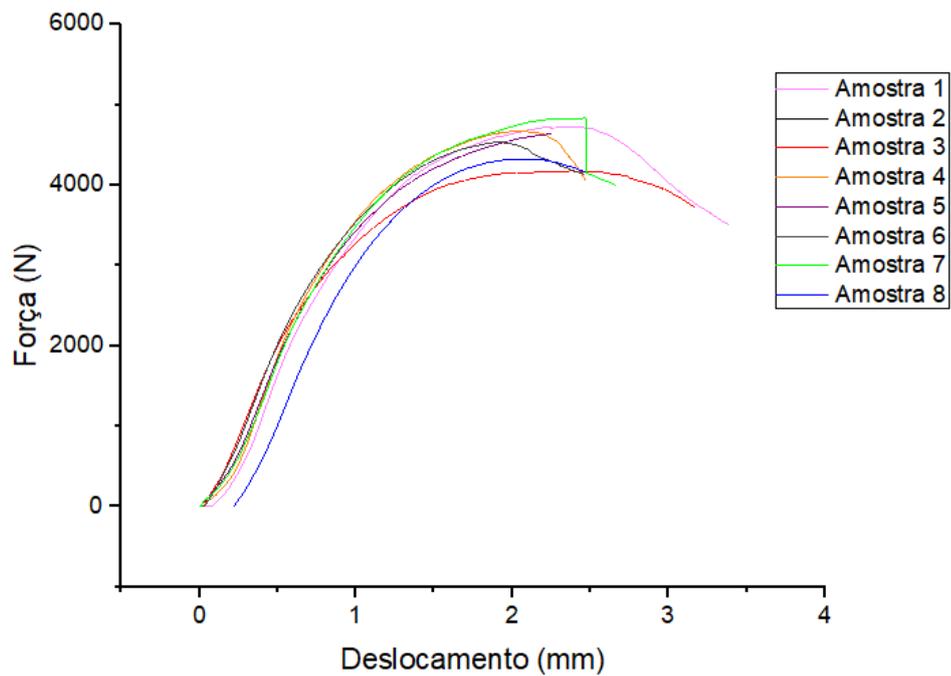
De modo geral as falhas que ocorreram foram o dobramento das lâminas de alumínio e na matriz polimérica. Isso significa que, novamente, o compósito falhou antes e toda a carga foi direcionada ao alumínio, promovendo assim sua falha por dobramento e não a falha de cisalhamento translaminar, a qual deveria ter ocorrido já que a carga é aplicada diretamente sobre um dos lados do corpo de prova.

Figura 40 - Corpos de prova após o ensaio de Iosipescu em microscópio com ampliação de 0,8x, onde as setas vermelhas indicam as falhas no compósito e as setas azuis indicam o dobramento das lâminas de alumínio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 41 - Gráfico Força x Deslocamento das amostras durante o ensaio Iosipescu.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 ENF

Primeiramente, pode-se observar que quatro corpos de prova, dentre os oito que foram preparados para o ensaio de ENF não demonstraram resultados válidos, visto que após aplicação da carga os corpos de prova não apresentaram crescimento de trinca (Figura 42), isso pode ter ocorrido por interferência do alumínio no ensaio, que absorve parte da carga aplicada.

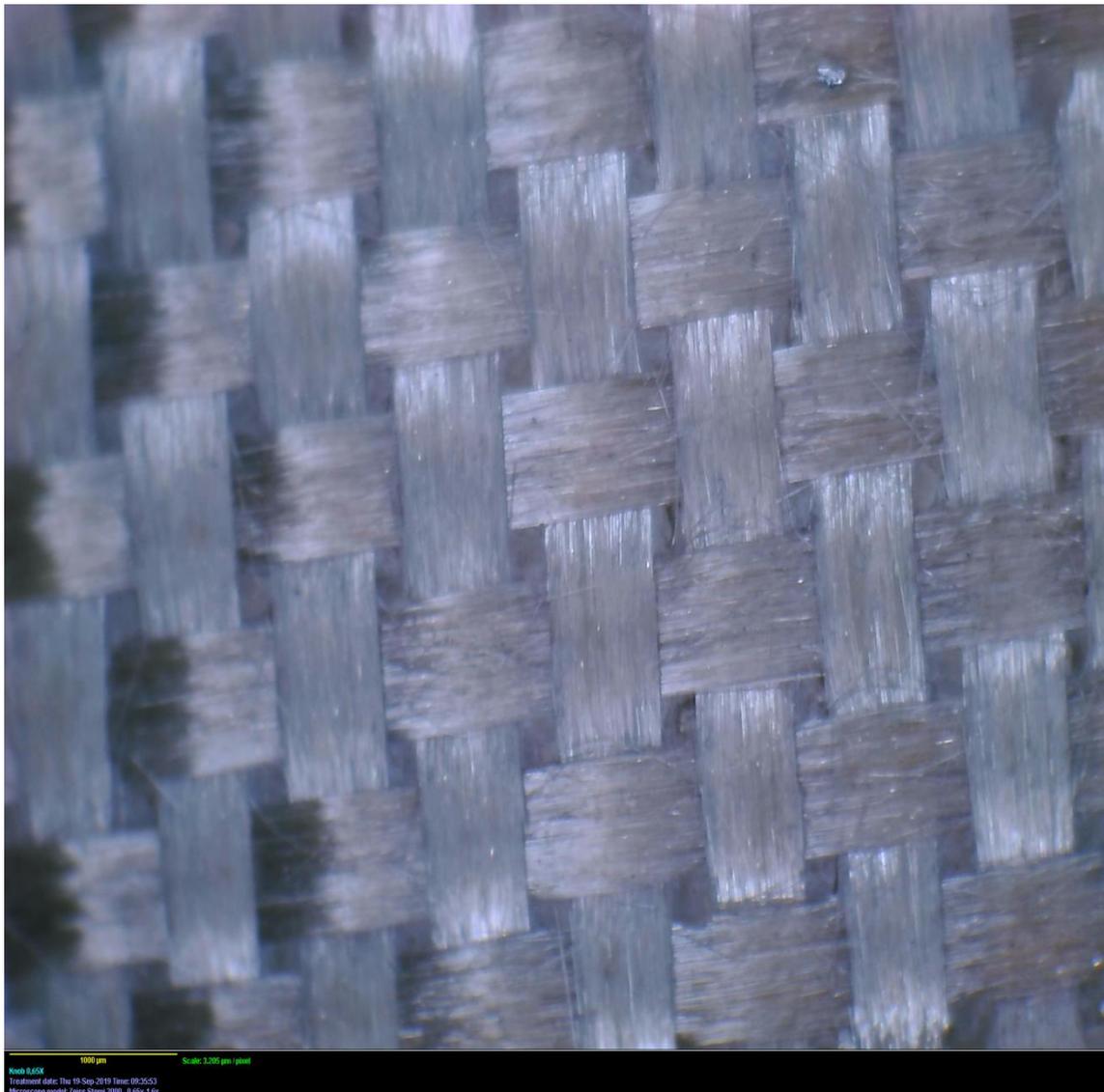
Figura 42 - Corpo de prova depois do ensaio de ENF que não apresentou delaminação.



Fonte: Autoria própria.

Outra constatação que foi feita ao analisarmos a propagação da trinca na interface entre o alumínio e o polímero dos laminados, mais especificamente na superfície da camada de compósito, foi que não houve uma boa impregnação entre a fibra e a matriz polimérica (Figura 43), visto que praticamente não há resíduo de matriz polimérica nas fibras.

Figura 43 - Corpo de prova aberto depois do ensaio de ENF onde as fibras foram totalmente separadas da matriz.



Fonte: Autoria própria.

Apesar dos ensaios que falharam, com os valores obtidos nos demais foram calculadas as tensões de propagação das trincas em função do comprimento utilizando a equação (6) descrita na metodologia.

Os valores obtidos a partir dos cálculos realizados são apresentados na Tabela 5, que traz o valor de G_{II} médio calculado para cada comprimento de trinca, onde é possível observar que

os valores de G_{II} para tamanho e trinca entre 40 e 49 mm são bem próximos, porém quando se aumenta para 52 mm este valor aumenta drasticamente, e quando se considera uma trinca de 61 mm, este valor chega a dobrar, evidenciando a influência do tamanho da trinca no ensaio.

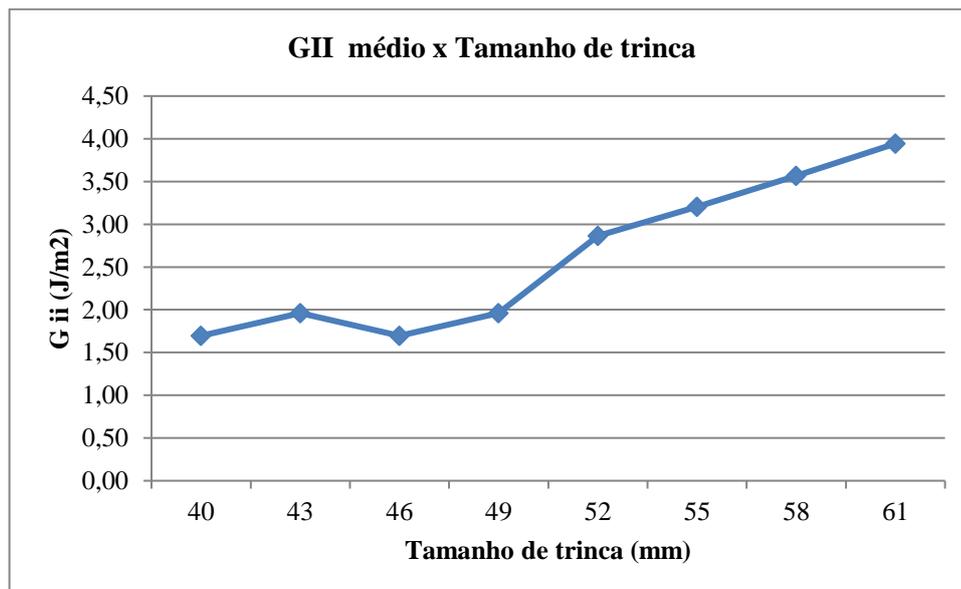
Tabela 5 - G_{II} médio para cada tamanho de trinca.

Tamanho da trinca (mm)	G_{II} (J/m^2)	Desvio Padrão	Variância
40	1,70	0,18	0,30
43	1,96	0,20	0,04
46	1,70	0,18	0,30
49	1,96	0,20	0,04
52	2,87	0,29	0,09
55	3,21	0,33	0,11
58	3,57	0,37	0,14
61	3,94	0,41	0,17

Fonte: Autoria própria.

O gráfico que relaciona o tamanho de trinca com o G_{II} médio calculado foi construído (Figura 44). Quando comparamos estes valores à literatura, é possível notar um desempenho aquém de outros laminados metal-fibra, como por exemplo o laminado de titânio/Fibra de Carbono/Epóxi, que apresenta um G_{II} médio de $22,10 \pm 2,31$ (ROSA, 2017).

Figura 44 - Gráfico de G_{II} médio relacionado ao tamanho da trinca



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

A partir do trabalho desenvolvido, pode-se confirmar a influência do tratamento superficial nas propriedades finais do laminado. Através do ensaio de ângulo de contato pode-se notar uma máxima redução com a anodização fosfórica utilizando cátodos de dióxidos de chumbo e um efeito contrário do que se esperava com a decapagem química. As consequências dessas modificações superficiais puderam ser observadas no processamento do laminado, no qual apenas houve consolidação que permitiu a realização de ensaios mecânicos nos laminados em que se utilizou as placas anodizadas.

Além disto, foi possível observar que a utilização do PEEK em pó foi um fator determinante para a qualidade do material final, já que esta promove uma distribuição irregular de material durante o processamento, o que causa uma menor adesão na interface e consequentemente uma redução de suas propriedades mecânicas.

A respeito dos resultados dos ensaios mecânicos obtidos, pôde-se concluir que os resultados apresentados pelo material foram inferiores aos apresentados por materiais similares, porém com matrizes termorrígidas, o que se pode atribuir, principalmente, à estrutura tridimensional reticulada dessas matrizes, que elevam suas propriedades mecânicas, além disso fatores como a dificuldade do processamento do PEEK em pó e a existência de falhas de consolidação, como formação de poros e pouca molhabilidade da fibra pelo polímero, também justificam este desempenho inferior.

Desta forma, pode-se concluir que a substituição da matriz termorrígida pela termoplástica não apresentou resultados satisfatórios neste trabalho que possam justificar uma troca nos materiais aplicados com fins estruturais na indústria atualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, O. N. G. **Estudo de delaminação em compósitos de matriz polimérica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Materiais e Tecnologias de Fabrico) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013. Disponível em: <http://docplayer.com.br/37651487-Estudo-de-delaminacao-em-compositos-de-matriz-polimerica.html>. Acesso em: 18.ago. 2020.
- ANGELOPOULOS, N. **Damage detection and damage evolution monitoring of composite materials for naval applications using acoustic emission testing**. 2017. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Birmingham, Birmingham, 2017. Disponível em: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7597/>. Acesso em: 02.ago. 2020.
- ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. New York: Editora Springer, Berlim, Alemanha, 1989. p.538-539.
- BEIN, K. F. **Estudo comparativo das tensões cisalhantes na interface entre camadas de um compósito polimérico de fibra de carbono pelos métodos numéricos e experimental**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Kira%20Fukushima%20Beim_M.pdf. Acesso em:04.set. 2020.
- BEUMLER, T. **A contribution to aircraft certification issues on strength properties in non- damaged and fatigue damaged GLARE® structures**. 2004. 488f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2004.
- BONHIN, E. P. **Estudo do processo de furação do laminado metal-fibra alumínio 2024-T3 e epoxy reforçado com fibra de vidro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/181761/bonhim_ep_me_guara_int.pdf?sequence=8. Acesso em:21.jun. 2020.
- BOTELHO, E. C. *et al.* **Hygrothermal effects evaluation using the iosipescu shear test for glare laminates**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 3, p.213-220, 2008.
- BOTELHO, E. C. *et al.* **A review on the development and properties of continuous fiber/epóxi/aluminum hibrid composites for aircraft strutures**. Materials Research, v. 9, n.3, p. 247-256, 2006.
- CAMPBELL, F. C. **Manufacturing processes for advanced composites**. 2nd ed. Oxford: Elsevier, Oxford, 2004.
- CÂNDIDO, G. M. *et al.* **Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido ao ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.24, n.1, p.65-71, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2013.008>. Acesso em:07.out. 2020.

CANEVAROLO JÚNIOR., S. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002. 227p.

CHAWLA, K. K. **Composite materials: science and engineering**. 2.ed. Mumbai: Springer, 1998.

COELHO, B. M. A. **Detecção de defeitos em materiais compósitos usando tecnologia de ultrassons**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Polímeros) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2020. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/65770>. Acesso em: 03.out. 2020.

CRAWFORD, R. J. **Plastics engineering**. Oxford: Editora Elsevier, Oxford, 1998.

DANIEL, I.M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. 2.ed. [S.1]: Oxford University Press, 2006.

HSU, D. K. **Nondestructive inspection of composite structures: methods and practice**. In: WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING, 17., 2008, Shanghai. Article [...]. Shanghai: NDT, 2008. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/612.pdf>. Acesso em: 04.set. 2020.

DIAS, J. C. **Resistência ao cisalhamento do compósito carbono reforçado com fibras de carbono/tecido tipo twill**. Revista Matéria, Itajubá, v.9, n.4, p. 263-270, 2004. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10606/>. Acesso em: 03.out. 2020.

DOMINGUES, L. *et al.* **Anodização não poluente de ligas de alumínio**. Corrosão e Proteção de Materiais, Lisboa, 2003, v. 22, n.3. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/238092764_ANODIZACAO_NAO_POLUENTE_DE_LIGAS_DE_ALUMINIO. Acesso em: 19.out. 2020.

DOU, X. *et al.* **Finite element modeling of stamp forming process on fiber metal laminates**. World Journal of Engineering and Technology, New York, v.3, p. 247-252, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283436252_Finite_Element_Modeling_of_Stamp_Forming_Process_on_Fiber_Metal_Laminates. Acesso em: 24.out. 2020.

DURO, A. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Polímeros) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2013. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/65770>. Acesso em: 08.nov. 2020.

EMBEREY, C.L. *et al.* **Application of knowledge engineering methodologies to support engineering design application development in aerospace**. In: INTEGRATION AND OPERATIONS CONFERENCE, 7., 2007, Belfast. Anais [...]. Belfast: AIAA, 2007.

GIANTS, T. W. **Crystallinity and dielectric properties of PEEK, poly (ether ether ketone)**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 1, n. 6, p. 991-999, 1994.

GIUSEPPE, P. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-07042010-111922/publico/TESE_GIUSEPPE_PINTAUDE.pdf. Acesso em: 11.nov. 2020.

GONZÁLEZ, J. A. *et al.* **Durabilidad del aluminio desnudo y anodizado em atmosferas de muy diferentes corrosividades.** *Aluminio desnudo*, Madrid, v. 40, n. 4, p. 259-269, 2004. Disponível em: <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/273>. Acesso em: 13.nov. 2020.

GUALBERTO, A. R. M. **Metodologia para a determinação das propriedades de impacto de baixa energia de laminados metal-fibra.** 2008. Dissertação (Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-14052010-171330/publico/AlanRodrigoMarinhoGualbertoRevisadaME.pdf>. Acesso em: 30.set. 2020.

HAGENBEEK, M. **Characterisation of fibre metal laminates under thermomechanical loadings.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia aeroespacial) – Universidade de Delft, Delft, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/27347859_Characterisation_of_fibre_metal_laminates_under_thermomechanical_loadings. Acesso em: 06.out. 2020.

MALLICK, P. K. **Processing of polymer matrix composites.** Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group., 2017.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science.** 2st ed. Woodhead Publishing Limited, 1994.

MILANESE, A.C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibra de sisal de vidro.** 2008. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2008. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94401/milanes_ac_me_guara.pdf?sequence=1. Acesso em: 14.out. 2020.

MOURA, M.F. *et al.* **Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico.** 2nd ed. Porto: Publindústria, 2011.

MUZZY, J. D.; COLTON J. S. **The processing science of thermoplastic composites.** Cambridge: Advanced Composites Manufacturing, 1997.

NETO, F. L.; PARDINI; L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2016.

NOGUEIRA, C. L. **Obtenção e caracterização de compósitos termoplásticos avançados à base de matrizes de polipropileno reforçados com fibra de carbono.** 110 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

(ITA), São José dos Campos, 2004. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/855841>. Acesso em: 26 set. 2020.

PAIVA, M. C. J. R. **Introdução aos polímeros**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Polímeros) – Universidade do Minho, Guimarães, 2014.

PARK, S. Y. *et al.* **Effects of surface pre-treatment and void content on GLARE laminate process characteristics**. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v. 210, n. 8, p. 1008-1016, 2010.

PEREIRA, M. C. *et al.* **Efeito do tratamento térmico na corrosão das ligas de alumínio 2024 e 750 em meio salino**. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, v. 20, n.1, p.63-66, 2000.

RAMOS, C.A.X. **Materiais compósitos inteligentes**. 2006. Tese (Doutor em Ciências da Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006. Disponível em: <http://docplayer.com.br/52583980-Materiais-compositos-inteligentes-carlos-augusto-xavier-ramos.html>. Acesso em: 29.jul. 2020.

ROSA, B. M. **Avaliação do condicionamento higrotérmico em compósitos fibra de carbono/epóxi e titânio anodizado**. 2017. Tese (Doutor em Ciências da Engenharia) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/156781/000902208.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12.nov. 2020.

SANTIAGO, R.C. **Desempenho ao impacto de laminados fibra-metal utilizando reforços termoplásticos**. 2014. Tese (Doutorado na área de Projeto e Fabricação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-29122014-120343/publico/Tese_RafaelCeleghiniSantiago.pdf. Acesso em: 20.out. 2020.

SILVA, H.P. **Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxi nano- reforçados**. 2014. Tese (Doutorado em Construção Mecânica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/43579528.pdf>. Acesso em: 13.set. 2020.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5.ed. Porto Alegre, AMGW, 2012.

SOUZA, E. B. **Resistência ao cisalhamento iosipescu do compósito laminado reforçado com tecido de fibra de vidro/ epóxi**. 2006. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. Disponível em: <https://silo.tips/download/resistencia-ao-cisalhamento-iosipescu-do-composito-laminado-reforado-com-tecido>. Acesso em: 22.out. 2020.

STRONG, A. B. **Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and mpplications**. 2nd ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

VILAS BOAS, C. *et al.* **Análise comparativa de propriedades mecânicas em laminados de fibra e metal sob diversas configurações.** *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 21., 2014, Cuiabá. Trabalho Apresentado [...]. Cuiabá: CBECIMAT, 2014.