

BEATRIZ VAZ DE BELLIS

**Estudo Comparativo do Processamento de Compósitos Híbridos Metal Fibra com
Matrizes Termoplásticas**

Guaratinguetá - SP
2017

Beatriz Vaz De Bellis

Estudo Comparativo do Processamento de Compósitos Híbridos Metal Fibra com Matrizes Termoplásticas

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: Dr. Alberto Lima Santos

Co-orientador: Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá - SP
2017

Bellis, Beatriz Vaz De
B444e Estudo comparativo do processamento de compósitos híbridos metal
 fibra com matrizes termoplásticas/ Beatriz Vaz De Bellis – Guaratinguetá,
 2017
 69 f. : il
 Bibliografia: f. 63-69

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Alberto Lima Santos
Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

1. Materiais compostos. 2. Alumínio. 3. Titânio. I. Título

CDU 620.1

BEATRIZ VAZ DE BELLIS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**BEATRIZ VAZ DE BELLIS EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**”

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


Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Alberto Lima Santos
Orientador/UNESP-FEG



Msc. Jonas Frank Reis
UNESP-FEG



Prof. Dr. Roberto Zenhei Nakazato
UNESP-FEG

Novembro 2017

Dedico este trabalho à minha família que sempre me incentivou e me deu força nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois sem Ele nada seria possível. Agradeço aos meus familiares que sempre me deram apoio e acreditaram em mim.

Aos meus amigos de infância e aos meus amigos feitos na faculdade que me ajudaram a concluir mais uma etapa da minha vida.

Ao meu orientador, *Dr. Alberto Lima Santos* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

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

“Tu te tornas eternamente responsável
por aquilo que cativas”

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

Este trabalho refere-se ao processamento e caracterização de dois compósitos híbridos metal fibra: alumínio/poli-sulfeto de fenileno/fibra de carbono e titânio/poli-éter-éter-cetona/fibra de carbono. Para uma boa adesão na interface do compósito que possui como componente o alumínio, foi necessária a realização de um tratamento eletroquímico, o qual foi avaliado por meio de microscopia de força atômica (AFM), de medidas de ângulo de contato e microscopia óptica. Os dois compósitos foram produzidos por meio de moldagem por compressão a quente e depois caracterizados utilizando os seguintes ensaios mecânicos: cisalhamento interlaminar (ILSS), cisalhamento por compressão (CST), Iosipescu e vibração. Para uma caracterização da interface, realizou-se a microscopia óptica antes e após os ensaios. Com os resultados obtidos, foi possível avaliar que o tratamento da superfície do alumínio melhorou consideravelmente sua adesão, além de mostrar que as propriedades avaliadas apresentaram ótimos valores para os compósitos em questão, se comparados com os valores encontrados na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos híbridos metal fibra.. Baixa massa específica. Adesão. Alumínio. Titânio. Interface.

ABSTRACT

This work deals with the processing and characterization of two hybrid metal composites: aluminum / PPS / carbon fiber and titanium/PEEK/carbon fiber. For a good adhesion at the composite interface that has aluminum as component, it was necessary to perform an electrochemical treatment. The treatment was evaluated by means of atomic force microscopy (AFM), contact angle measurements and optical microscopy. The two composites were produced by hot compression molding and then characterized using the following mechanical tests: interlaminar shear test (ILSS), compression shear test (CST), Iosipescu and vibration. For an interface characterization, the optical microscopy was performed before and after the tests. With the results obtained, it was possible to evaluate that the aluminum treatment considerably improved its adhesion. Lastly, the results showed that the composites properties evaluated presented excellent values if compared with literature.

KEYWORDS: Hybrid metal fiber composites.. Low specific mass. Adhesion. Aluminum. Titanium. Interface.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Detalhe do compósito híbrido metal/fibra.....	13
Figura 2 - Aeronave Airbus A380.....	17
Figura 3 - Propriedades dos principais termoplásticos.....	18
Figura 4 - Fórmula estrutural do PPS.....	19
Figura 5 - Propriedades do termoplástico PPS.....	20
Figura 6 - Estrutura do PEEK.....	21
Figura 7 - Propriedades do PEEK.....	21
Figura 8 - Esquema das medidas de ângulo de contato.....	26
Figura 9 - Esquema de um Microscópio de Força Atômica.....	28
Figura 10 - Ciclo de processamento da moldagem por compressão a quente.....	29
Figura 11 - Desenho representativo do ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar em 3 pontos.....	30
Figura 12 - Possíveis modos de falhas que podem ocorrer no ensaio em questão.....	31
Figura 13 - Esquema do dispositivo do ensaio de cisalhamento por Iosipescu.....	32
Figura 14 - Esquema de aplicação de cargas na amostra no ensaio de cisalhamento por Iosipescu.....	32
Figura 15 - Equipamento para o ensaio de CST.....	33
Figura 16 - Fluxograma do trabalho.....	36
Figura 17 - Esquema célula eletrolítica.....	37
Figura 18 – Goniômetro.....	37
Figura 19 - Microscópio Nanoscope V Multimode.....	38
Figura – Preparação do compósito FC/PEEK/titânio não tratado.....	39
Figura 21 - Dispositivo para ensaio de cisalhamento por Iosipescu.....	41
Figura 22 – Dispositivo para ensaio de CST.....	42
Figura 23 - Dispositivo para o ensaio de ILSS.....	42
Figura 24 – Dispositivo para ensaio de vibração.....	43
Figura 25 – Microscópio Zeiss Axio Imager Z2m.....	44
Figura 26 – Valores dos ângulos de contato.....	45
Figura 27 – Valores dos ângulos de contato	46
Figura 28 – Imagem referente à amostra (a) não tratada (b) decapada e anodizadas por (c) 10 min (d) 15 min e (e) 20 min.....	46

Figura 29 – Imagens obtidas por AFM das amostras (a) não tratada, (b) decapada e tratadas eletroquimicamente nos diferentes tempos: (c) 10min (d) 15 min.....	47
Figura 30 - Rugosidade das amostras de alumínio tratadas e não tratada.....	48
Figura 31– Imagens obtidas por meio da microscopia óptica do alumínio (a) não tratado (b) decapado e anodizados por (c) 10 min (d) 15 min e (e) 20 min, ampliação de 200x.....	49
Figura 32 – Seção transversal do compósito processado com alumínio tratado.....	50
Figura 33 - Compósito de FC/PEEK/titânio não tratado.....	50
Figura 34 – Seção transversal de uma amostra de ILSS do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio, ampliação de 50x.....	52
Figura 35 – Seção transversal de uma amostra de ILSS do compósito Ti não tratado/PEEK/FC após ensaio, ampliação de 50x.....	53
Figura 36 – Seção transversal de uma amostra após o ensaio de Iosipescu do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio, ampliação de 10x.....	55
Figura 37 – Seção transversal de uma amostra de Iosipescu do compósito Ti não tratado/PEEK/FC após ensaio, ampliação de 10x.....	56
Figura 38 – Seção transversal de uma amostra de CST do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio, ampliação de 50x.....	58
Figura 39 – Seção transversal de uma amostra de CST do compósito Ti não tratado/PEEK/FC após ensaio, ampliação de 50x.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no processamento do compósito Al/FC/PPS.....	39
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processamento do compósito Ti/FC/PEEK.....	40
Tabela 3 – Valores de tensão máxima para cada amostra de ILSS (Al/PPS/FC).....	51
Tabela 4 – Valores de tensão máxima para cada amostra de ILSS (Ti/PEEK/FC).....	53
Tabela 6 – Valores de tensão máxima para cada amostra de Iosipescu (Ti/PEEK/FC)....	56
Tabela 7 – Valores de tensão máxima para cada amostra de CST (Al/PPS/FC).....	57
Tabela 8 – Valores de tensão máxima para cada amostra de CST (Ti/PEEK/FC).....	58
Tabela 9 – Valores de módulo de elasticidade para cada amostra (Al/PPS/FC).....	60
Tabela 10 – Valores de módulo de elasticidade para cada amostra (Ti/PEEK/FC).....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	COMPÓSITOS	15
2.2	COMPÓSITOS LAMINADOS METAL FIBRA	16
2.3	MATRIZ TERMOPLÁSTICA	17
2.4	POLI-SULFETO DE FENILENO (PPS)	19
2.5	POLI – ETER – ETER – CETONA (PEEK)	20
2.6	REFORÇOS	22
2.7	TITÂNIO E ALUMÍNIO	23
2.8	ADESÃO E INTERFACE	24
2.9	ANODIZAÇÃO	25
2.10	ÂNGULO DE CONTATO	26
2.11	RUGOSIDADE	27
2.11.1	Microscopia de Força Atômica	27
2.12	MOLDAGEM POR COMPRESSÃO A QUENTE	28
2.13	ENSAIO DE CISALHAMENTO INTERLAMINAR	30
2.14	CISALHAMENTO IOSIPESCU	31
2.15	CISALHAMENTO POR COMPRESSÃO (CST)	33
2.16	VIBRAÇÃO	34
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1	MATERIAIS	35
3.2	PLANO EXPERIMENTAL	35
3.3	TRATAMENTO ELETROQUÍMICO	36
3.4	ÂNGULO DE CONTATO	37
3.5	MICROSCOPIA DE FORÇA ATÔMICA (AFM)	38
3.6	PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS	38
3.6.1	Al/FC/PPS	39
3.6.2	Ti/FC/PEEK	39
3.7	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	40
3.7.1	Iosipescu	40
3.7.2	Cisalhamento por compressão (CST)	41
3.7.3	Cisalhamento interlaminar (ILSS)	42

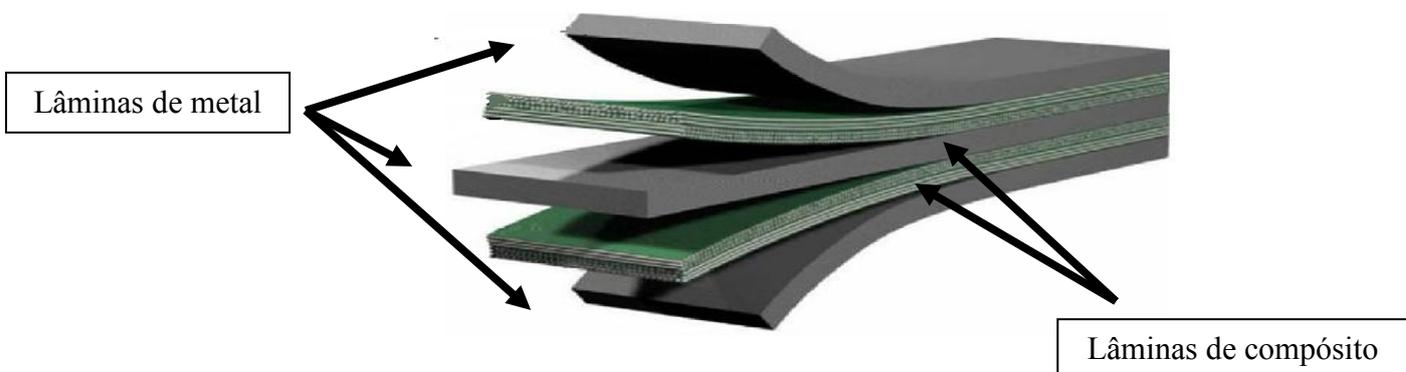
3.7.4	Vibração	43
3.8	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRATAMENTO ELETROQUÍMICO DO ALUMÍNIO.....	45
4.1.1	Ângulo de contato	45
4.1.2	Microscopia de força atômica	47
4.1.3	Microscopia Óptica	48
4.2	ANÁLISE VISUAL DOS COMPÓSITOS HÍBRIDOS.....	49
4.2.1	Al/FC/PPS	49
4.2.2	Ti/FC/PEEK	50
4.3	CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	51
4.3.1	Ensaio de Cisalhamento Interlaminar	51
4.3.1.1	Al/FC/PPS.....	51
4.3.1.2	Ti/FC/PEEK.....	52
4.3.2	Ensaio de Iosipescu	54
4.3.2.1	Al/FC/PPS.....	54
4.3.2.2	Ti/FC/PEEK.....	55
4.3.3	Ensaio de cisalhamento por compressão (CST)	57
4.3.3.1	Al/FC/PPS.....	57
4.3.3.2	Ti/FC/PEEK.....	58
4.3.4	Vibração	59
4.3.4.1	Al/FC/PPS.....	59
4.3.4.2	Ti/FC/PEEK.....	60
5	CONCLUSÕES	61
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	62

1 INTRODUÇÃO

Compósitos são materiais compostos por fases quimicamente distintas que são separados por uma interface. Esta classe de material pode possuir uma ou mais fases descontínuas que são incorporadas por uma fase contínua que é denominada de matriz e pode ser polimérica, cerâmica ou metálica (SINKE, 2009).

Diversas inovações nesta área ocorreram nestes últimos anos, principalmente com o intuito de reduzir o peso para as aplicações estruturais. Levando em consideração a necessidade da diminuição da massa específica aliada com elevadas propriedades mecânicas, foi desenvolvido o compósito híbrido metal-fibra. Esse laminado é constituído por um metal intercalado por um compósito polimérico, conforme ilustrado na Figura 1. Esse material apresenta certas vantagens quando comparados com as ligas metálicas tradicionais, das quais podem ser citadas: excelentes propriedades à fadiga, elevada resistência ao fogo e boa resistência à corrosão (SATHISHKUMAR et al, 2014).

Figura 1 - Detalhe do compósito híbrido metal/fibra



Fonte: (EMBERY et al, 2007)

A indústria aeronáutica demanda cada vez mais esses compósitos híbridos caracterizados pela estrutura “sanduíche”. Podendo ser citados o ARALL (fibra de aramida/epóxi/alumínio), o CARALL (fibra de carbono/epóxi/alumínio) e o GLARE (fibra de vidro/epóxi/alumínio) como principais exemplos (NETO e PARDINI, 2006).

Uma vez que a utilização do compósito híbrido metal-fibra faz com que haja uma redução de peso, em torno de 20% este se mostra mais vantajoso quando comparado a ligas metálicas para a utilização em aplicações aeroespaciais. O campo dos compósitos híbridos é talvez o

mais amplo dentre as classe de materiais, abrangendo desde madeira compensada a concreto para estruturas tipo colméia (COOK, 1993).

Para que um laminado apresente boas propriedades mecânicas, as camadas do compósito devem apresentar boa adesão entre si. A adesão entre duas superfícies surge de forças atrativas de curto alcance entre átomos em cada superfície. Em se tratando de um laminado metal-fibra, essa força de adesão depende de como o polímero “molha” o metal (DOU et al, 2015).

Atualmente, novas gerações de laminados metal-fibra estão sendo desenvolvidas com o uso de matrizes poliméricas termoplásticas. Esses polímeros termoplásticos apresentam melhores desempenhos mecânicos (resistência ao impacto, resistência à fadiga, etc.) em relação aos termorrígidos, e são recicláveis. Dentre as diversas matrizes termoplásticas com potencial para serem utilizadas na obtenção de laminados metal-fibra, o PEEK se destaca uma vez que este polímero suporta elevadas temperaturas de trabalho, e apresenta elevadas resistências à fadiga, à compressão e à tensão (DOU et al, 2015).

Sendo assim, este trabalho envolve o processamento de compósitos híbridos metal-fibra formados por duas matrizes termoplásticas (PPS ou PEEK), fibras de carbono como reforço e ligas de titânio ou alumínio intercaladas formando uma estrutura do tipo laminada. Tais compósitos foram obtidos por meio do processo de moldagem por compressão a quente. Antes da realização do processamento, visando uma melhoria da interface, foi realizado tratamento eletroquímico no alumínio. Os resultados foram analisados posteriormente por medidas de ângulo de contato, microscopia de força atômica (AFM) e microscopia óptica (MO). Após o processamento por moldagem por compressão a quente, os compósitos foram caracterizados por ensaios de cisalhamento interlaminar (ILSS), cisalhamento por compressão (CST), cisalhamento Iosipescu, vibração e microscopia óptica.

1.1 OBJETIVO

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo principal a obtenção e caracterização de dois compósitos metal fibra sendo estes: Ti/CF/PEEK e Al/FC/PPS. Como objetivos secundários têm-se:

- 1 – Avaliação do tratamento superficial para viabilizar a adesão entre o PPS e o alumínio.
- 2 – Desenvolvimento de um novo processo para a fabricação de laminados metal fibra envolvendo a utilização de moldagem por compressão a quente;
- 3 – Avaliação mecânica de laminados metal fibra envolvendo matrizes poliméricas a partir de ensaios mecânicos e microscopia óptica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS

Pode-se classificar um material como compósito ao apresentar os componentes em proporções maiores que 5% e fases com diferentes propriedades, as quais se diferenciam das propriedades do compósito como um todo. Dessa forma, compósitos são desenvolvidos a fim de aperfeiçoar o desempenho de uma fase sozinha (DANIEL E ISHAI, 2006).

A matriz, menos rígida e frágil, é uma fase. Esta é responsável pelo formato da estrutura e por colaborar com a ligação do material. A segunda fase é o reforço, a qual centraliza as propriedades mecânicas e estruturais do material. Por último, a terceira fase chamada de interface é considerada a área de contato entre as fases, tornando-se responsável por transferir esforços (DANIEL e ISHAI, 2006).

Os polímeros são usados como matriz na maioria dos compósitos. Com o objetivo de alcançar certas características no produto final, são escolhidos componentes com uma relação de propriedades específicas. (DANIEL e ISHAI, 2006).

O reforço, em sua maioria, se apresenta na forma de fibras, pois apresentam uma alta relação área/volume. Assim, compósitos com reforço de fibras de elevados valores de resistência e módulo específicos são usualmente combinados com materiais de baixa massa específica (matrizes poliméricas) (ROSÁRIO, 2005).

Aas propriedades mecânicas podem ser modificadas por esses fatores: processo de fabricação, o percentual de fibras, o tipo de polímero, a presença de vazios, a qualidade de interface. (TAVARES, 1999; AQUINO, 1999; MARGARIA, 1997).

A obtenção de propriedades que não aparecem isoladamente em um material tornou-se de fundamental importância. Dentre essas propriedades, pode-se citar: elevada resistência mecânica, elevada rigidez, boa resistência à corrosão em e alta tenacidade à fratura (DANIEL e ISHAI, 2006).

Com a evolução dos processos de fabricação e novas descobertas na área de reforços e estruturas laminares, o compósito vem sendo cada vez mais usados em aplicações estruturais (TORRES, 2013).

Na indústria aeronáutica, o peso da estrutura tem grande influência no desempenho de voo, na capacidade de transportar pessoas e cargas, além de permitir consumo de combustível. Quanto menor o peso da aeronave, menor é a razão entre quantidade máxima transportada

pelo peso máximo de decolagem, assim, mais eficiente a aeronave é considerada. (ASUNDI e CHOI, 1997).

Para alcançar essa baixa massa específica, começou-se a realizar projetos envolvendo os esforços e a utilizar materiais com alta resistência. Nunca se esquecendo da segurança, confiabilidade e custos associados (ASUNDI e CHOI, 1997).

2.2 COMPÓSITOS LAMINADOS METAL FIBRA

Os compósitos laminados metal-fibra são compósitos poliméricos combinados com um metal, resultando em materiais com baixa massa específica, elevada resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas (FARIAS, 2006). Chamam-se de compósitos laminados aqueles que possuem fibras sobrepostas unidirecional ou multidirecionalmente (CALLISTER, 2002).

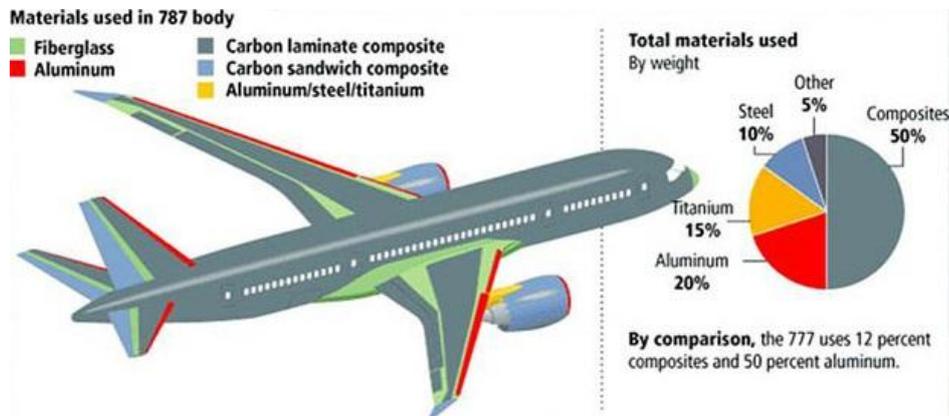
Esses compósitos em formato de “sanduíche” têm sido muito utilizados como material alternativo com o mesmo desempenho estrutural de um metal, mas com menor massa específica. O peso menor torna-se uma característica fundamental para economia de combustível nas aplicações aeronáuticas e marinhas, além de aumentar o tempo de vida da peça em questão. Esse tipo de material é normalmente empregado na fuselagem e na parte inferior da asa de aviões (HAZIZAN e TAN, 2011).

O processamento de um laminado pode ser realizado de diversas formas que influenciam nas propriedades finais do material. Assim, excelentes propriedades são obtidas se houver uma combinação entre as fases que garantam uma melhor interação e transferência de esforços (VLOT e VOGELANG, 2000).

Em 1982, o primeiro laminado de aramida reforçado com alumínio foi lançado pela empresa Alcoa®. O ARALL 1 (alumínio 7075) e o ARALL 2 (alumínio 2024) foram produzidos sendo diferenciados pelo alumínio. Em seguida, a Universidade Técnica de Delft, localizada na Holanda, desenvolveu o Laminado Fibra/Metal (LFM) de aramida utilizando um alumínio 7475-T761 e resina epóxi obtendo melhores resultados. A patente sobre o GLARE, laminas de alumínio com fibras de vidro foi arquivado pela empresa Akzo® no ano de 1987. Após uma parceria entre Alcoa e Akzo® iniciou-se a produção e comercialização do GLARE, sendo este atualmente comercializado em diferentes combinações (CATRODEZA, 2002; BOTELHO, et al., 2006).

O GLARE é o laminado metal fibra mais utilizado na indústria aeronáutica, pois apresenta alta resistência à propagação de trincas de fadiga e uma baixa densidade (BEUMLER et al, 2007). A Figura 2 apresenta a utilização do GLARE na aeronave Airbus A380.

Figura 2 - Aeronave Airbus A380



Fonte: (BEUMLER et al, 2007).

A indústria automobilística também é uma área que utiliza compósitos híbridos metal fibra na carenagem de automóveis, pois necessitam de uma redução de peso e de um bom desempenho sob o impacto. Para essa aplicação, os polímeros termoplásticos são preferíveis, uma vez que requer uma alta produtividade e também por empregarem múltiplas operações de conformação mecânica (MOSSE, 2005).

Laminados metal fibra com matriz termorrígida apresenta um longo período de ciclo de cura, diminuindo, assim, a produtividade, aumentando o custo da mão de obra e o custo do produto final. Além disso, pode-se citar mais uma desvantagem: a baixa tenacidade à fratura interlaminar apresentada, (CORTES, CANTWELL, 2006; SINMAZÇELIK, et al., 2011).

O grupo de pesquisa liderado por W. Cantwell estuda o processamento de uma nova geração de laminados metal-fibra, com base em compósitos termoplásticos, com o objetivo de diminuir os custos de produção, aumentar a reciclabilidade e, principalmente, melhorar o desempenho para absorção de cargas de impacto do material. Essa boa absorção de cargas de impacto é proveniente do comportamento viscoelástico do termoplástico (SANTIAGO, 2014).

2.3 MATRIZ TERMOPLÁSTICA

A matriz atua como meio, distribuindo as tensões aplicadas ao reforço. O material utilizado para matriz apresenta um módulo de elasticidade menor do que o material utilizado como reforço. Além disso, ela evita que o reforço sofra danos provenientes da abrasão mecânica (CALLISTER, 2002).

Dentre os diferentes tipos de matrizes que geralmente são utilizadas na fabricação de materiais compósitos, se destacam as poliméricas. Não é necessário alcançar elevadas temperaturas e elevadas pressões para se obter um compósito de matriz polimérica, se comparados a matrizes metálicas. Além disso, nesses processamentos há uma menor degradação do reforço, sem contar com a facilidade da utilização dos equipamentos usados para obter compósitos de matriz termoplástica, fazendo com que o desenvolvimento desse tipo de material seja rápido e com grande aceitação para aplicações estruturais (FONTES, 2013).

Compósitos poliméricos podem ser processados por moldagem por compressão a quente, bobinagem, moldagem por transferência de resina e pultrusão. (REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011).

Os polímeros termoplásticos são conhecidos por apresentar uma massa molar elevada, formados por cadeias lineares ou ramificadas. Essas cadeias resultam em um material íntegro, mas que podem se deformar plasticamente quando são aplicadas elevadas tensões (MALLICK, 2008).

As propriedades de alguns termoplásticos estão apresentadas na Figura 3. Fazendo uma comparação com as resinas epóxi, elas apresentam resistência à tração de 30-100 MPa, módulos de elasticidade de 2,8-3,4 GPa, ductilidades de 0-4% e uma massa específica de 1,25 g/cm³ (ASKELAND, 1989). Assim, de modo geral, pode-se afirmar que as resinas epóxi são mais frágeis que os termoplásticos.

Figura 3 – Propriedades dos principais termoplásticos

	PES	PEEK	PEI	PPS	PI
T _g (°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	3,0	3,3	3,4
Ductilidade (alongação %)	30-80	50-150	50-65	2	5
Impacto Izod (J/m)	85,44	85,44	53,4	< 26,70	80,10
Massa Específica (g/cm ³)	1,37	1,31	1,27	1,30	1,37

Fonte: (ASKELAND, 1989; WHANG, et al. 1990; SHERMAN, et al. 1988)

A adição de fibras aumenta a temperatura de amolecimento de um termoplástico, além de aumentar a resistência à deformação e aumentar a estabilidade dimensional em relação à temperatura (ALGER, DYSON, 1990).

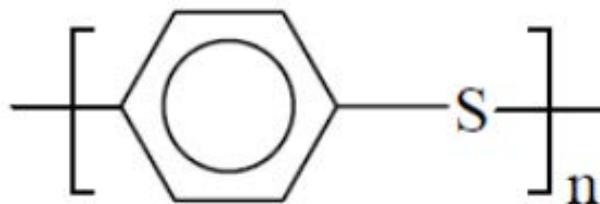
Os compósitos com matriz termoplástica estão, aos poucos, substituindo os que apresentam matriz termorrígida, pois apresentam melhores propriedades, podem ser reaproveitados e são fáceis de serem fabricados. (MALLICK, 2008).

O setor aeroespacial é um mercado promissor a esses compósitos termoplásticos reforçados com fibras, pois estes apresentam maior resistência ao impacto, menor absorção de água, maior tenacidade à fratura, maior tolerância a danos, menor tempo de processamento e não-inflamabilidade (MALLICK, 2008).

2.4 POLI-SULFETO DE FENILENO (PPS)

O PPS, cuja fórmula estrutural está presente na Figura 4, é um polímero de cadeia linear formado por anéis aromáticos ligados por grupos sulfetos. A cadeia macromolecular é rígida e apresenta um comportamento mecânico de um material frágil com baixa resistência ao impacto, portanto, suas aplicações são limitadas devido ao comportamento inerente quebradiço. Trata-se de uma matriz semicristalina (MALLICK, 2008).

Figura 4 - Fórmula estrutural do PPS



Fonte: (MALLICK, 2008)

O PPS possui uma combinação de boas propriedades mecânicas combinadas com elevada resistência química, elevada estabilidade dimensional, facilidade de processamento, propriedade adesiva, elevada dureza, baixa absorção de umidade e boa resistência ao desgaste à temperatura ambiente (LUO et al, 2009). Essas propriedades são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Propriedades do termoplástico PPS

Propriedades Físicas e Térmicas.	PPS
	PURO
Densidade (g/cm ³)	1,35
Calor específico de fusão (J/g°C)	1,83
Temperatura de transição vítrea (°C)	85
Temperatura de Fusão (°C)	285
Temperatura de Cristalização (°C)	125
Temperatura de cristalização fundida (°C)	160 – 250
Absorção de água (%)	0,03
Propriedades Mecânicas	PPS
	PURO
Resistência a tração (MPa)	70
Alongamento (%)	4,1
Resistência a flexão (MPa)	150
Modulo de flexão (MPa)	5100
Impacto Izod com entalhe (kJ/m ²)	0,31
Coef. Expansão linear (m/m/°C)	0,000024

Fonte: (LUO et al, 2009)

2.5 POLI – ETER – ETER – CETONA (PEEK)

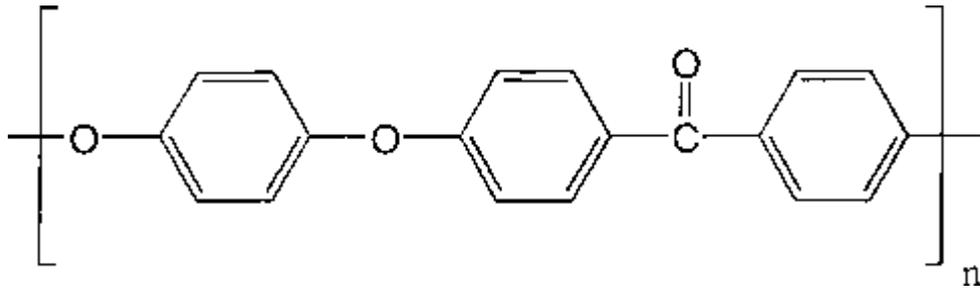
A fibra de carbono reforçado com poli (éter-éter-cetona) (PEEK) possui altos valores de resistência e rigidez ao longo do comprimento em relação ao aço, ligas de Al ou Ti. Desta forma, o compósito fibra de Carbono/PEEK está sendo considerado como um dos candidatos para substituir os compósitos convencionais baseados em resina epóxi para aplicações aeroespaciais (KUO et al, 2003).

Além da aplicação aeroespacial, o PEEK pode ser usado em aplicações biomédicas como enchimentos biocompatíveis, na indústria como em revestimento de fios, conexões elétricas e ventiladores (CRAWFORD, 1998).

Este é um polímero semicristalino e é conhecido como o termoplástico de mais alto desempenho em temperaturas elevadas, graças aos anéis aromáticos. Apresenta resistência à fadiga dinâmica obtida por meio da cristalinidade do polímero em questão. Os anéis

aromáticos também são responsáveis pela alta rigidez, resultando em um alto valor de temperatura de transição vítrea (ALBUQUERQUE, 2000). A estrutura desse termoplástico é mostrada na Figura 6

Figura 6 - Estrutura do PEEK.



Fonte: (ALBUQUERQUE, 2000)

À temperatura ambiente, é um termoplástico rígido, apresenta resistência à fadiga mecânica, à abrasão e a reagentes aquosos, além de possuir uma baixa absorção de umidade. (LIMA, 2012). As principais propriedades do PEEK são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Propriedades do PEEK

Poliéter-éter-cetona			
Propriedades	Unidades	Condições	Valor
Temperatura de Fusão	K	DSC	608-616
		Equilíbrio	657-668
Resistência a Tração	MPa	À 23°C	92
		À 100°C	50
		À 200°C	12
		À 300°C	10
Condutividade Térmica	$W m^{-1} K^{-1}$	C177	0,25
Coeficiente de Expansão Térmica	K^{-1}	30°C < T < 150°C à P=0	$1,610 \times 10^{-4}$
		Fundido	$6,690 \times 10^{-4}$
Tensão de Escoamento	MPa	D638	91

Fonte: (MARK, 1999)

O PEEK possui um alto custo e, por apresentar alta temperatura de processamento (382 - 399°C) e uma elevada viscosidade quando fundido (10^3 Pa.s), o processamento de peças com propriedades bem definidas torna-se difícil. (LEE, 1989; HSIAO, CHANG, SAUER, 1991).

Os parâmetros de processamento, como temperatura de transição vítrea, de fusão e de degradação, são de fundamental conhecimento para o processamento de compósitos contendo o PEEK através da moldagem por compressão a quente, já que podem alterar a morfologia do material e alterar as propriedades finais deste (SALEK, 2005).

2.6 REFORÇOS

Os principais reforços utilizados em compósitos se encontram na forma de fibras contínuas, picadas ou partículas e estes são os responsáveis por suportarem o carregamento mecânico aplicado ao compósito. As fibras contínuas podem ser produzidas por três tipos fundamentais de processos, sendo estes: fiação por fusão, fiação a úmido e fiação a seco. As propriedades finais da fibra dependem das matérias primas utilizadas em sua fabricação, do processo de produção empregado e das condições de sua aplicação final (NETO e PARDINI, 2006).

Essas fibras só adquirem função estrutural quando acopladas a uma matriz. A interface entre a fibra e a matriz que pode ocorrer a transferência de esforços geralmente é elevada, uma vez que a relação área superficial/volume é alta já que as fibras possuem pequeno diâmetro e grande comprimento (NETO e PARDINI, 2006).

As propriedades dos compósitos que possuem como componente as fibras sofrem uma influência significativa de três fatores principais sendo estes (BUSCH, 2016):

- A orientação das fibras;
- A concentração das fibras;
- A distribuição das fibras.

Para compósitos avançados, as fibras tendem a ser contínua para que haja a total transferência dos esforços da fibra para o compósito. As fibras de carbono, de vidro e de aramida são os principais reforços contínuos utilizados em compósitos estruturais. (LIMA, 2012).

Comparando com as outras fibras de reforço, as de carbono são as que apresentam os valores mais altos de módulo específico, além de uma maior resistência específica. Estas conseguem manter, sob altas temperaturas, elevados módulos de tração e resistências, além de possuírem a propriedade de serem pouco afetadas, na temperatura ambiente, pela umidade e por diversos solventes. (BUSCH, 2016).

As fibras de carbono são geralmente produzidas por meio da pirólise de compostos orgânicos, os quais mais comuns são: poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose, piches de

petróleo e alcatrão de hulha. Pode-se classificar as fibras de carbono quanto ao módulo de elasticidade, ao tipo de composto usado na pirólise, à resistência e à temperatura de tratamento térmico final (NETO e PARDINI, 2006).

A pirólise consiste no tratamento térmico do precursor que remove oxigênio, nitrogênio e hidrogênio. A fibra produzida terá uma resistência maior dependendo do grau de cristalinidade, de orientação e da redução de defeitos (NETO e PARDINI, 2006).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras podem ser utilizados em diversos setores, sendo que as principais áreas são: aeronáutica; aeroespacial; automotivo; artigos esportivos; marinha e de infraestrutura. Esses materiais também são usados em menor escala em eletrônicos, construção civil, móveis, indústria de petróleo e medicina (BUSCH, 2016).

2.7 TITÂNIO E ALUMÍNIO

O titânio e suas ligas apresentam elevadas propriedades mecânicas em relação ao alumínio. Além disso, o titânio possui resistência a altas temperaturas, à corrosão, boa relação resistência/peso e biocompatibilidade (BOYER, 1996). O fato de não ocasionar corrosão galvânica ao ser intercalados com outros componentes é de extrema importância para sua aplicação em laminados metal fibra (STARIKOV & SCHÖN, 2001).

O LMF com titânio foi projetado com o intuito de utilizá-lo em aplicações críticas de fadiga (BURIANEK, et al., 2001). Além disso, esse material possui uma melhor adesão na interface graças ao uso do titânio (CAMANHO, et al., 2009, FINK, et al., 2009). Como componente do compósito híbrido são utilizados o titânio puro ou suas ligas, como o Ti-6Al-4V (LONGDON, et al., 1998; LE BOURLEGAT, 2009).

Holanda, U.S.A., Japão, Alemanha, Portugal, Inglaterra e Brasil são alguns países onde os estudos dos compósitos híbridos metal fibra contendo titânio foram intensificados. Nestes estudos, avaliam-se diferentes tratamentos térmicos no titânio e diferentes matrizes termoplásticas, visando aperfeiçoar estes laminados. De maneira geral, são estudadas as delaminações, as tolerâncias ao dano e como o ambiente pode influenciar nas propriedades mecânicas do material (SILVA, 2011).

O alumínio é o metal mais abundante no planeta e, assim, várias ligas foram desenvolvidas, possibilitando que elevadas propriedades mecânicas fossem obtidas. Essas propriedades mecânicas em conjunto com a baixa massa específica fizeram com que essas ligas se tornassem um dos principais materiais usados na aeronáutica (SANTANA, 2014).

As ligas de alumínio que passam por tratamento térmico são as mais utilizadas, pois elas combinam massa específica baixa e elevada resistência mecânica. A grande variedade dessas ligas comerciais e dos tipos de tratamento térmico fez com que fosse possível a união de certas propriedades: resistência mecânica, à corrosão e à fadiga, tenacidade à fratura e conformabilidade (BEST, 1986).

Vários tratamentos superficiais podem ser realizados a fim de que a integridade do material seja mantida, maximizando a vida do componente ao evitar que o alumínio sofra degradação por corrosão ou desgaste (THOMPOSON, 1999).

2.8 ADESÃO E INTERFACE

Os constituintes de um compósito apresentam interações físicas entre seus componentes que estão dispostos sinergicamente. Portanto, para que ocorra essa interação existem forças atrativas entre as superfícies, a qual se chama adesão. Alguns fatores são de grande importância na natureza dessa adesão, como: orientação e arranjo atômico, presença de grupos funcionais superficiais, cristalinidade e propriedades químicas. (NETO e PARDINI, 2006).

A energia adicional contida na superfície ou na interface entre componentes é conhecida como energia interfacial que é a manifestação direta de forças intermoleculares. A estimativa dessa energia, o ângulo de contato e a força de adesão são parâmetros relevantes para caracterizar a adesão. Essa interação possui uma relação direta com o comportamento mecânico do compósito, uma vez que quanto mais aderidos os componentes estão, menor é a chance de ocorrer algum colapso no material (NETO e PARDINI, 2006).

O grau de contato entre as superfícies e as forças coesivas nesta região caracterizam a interação dos componentes. Por conta de o material apresentar diferentes naturezas de ligações químicas e diferentes coeficientes de expansão térmica, essa interação torna-se difícil (SHACKELFORD, 1996; FU et al., 2008; RATNA, 2009).

A durabilidade de um compósito pode ser comprometida por tensões cíclicas combinadas com umidade e temperatura. Assim, o período de vida útil do material é determinado pelas propriedades deste, as quais possuem uma grande relação com as propriedades da interface. (REZENDE, et al., 2011).

Essa adesão pode ser resultado de vários processos que dependem da microestrutura do material, as quais são muito influenciadas pela energia superficial. Esses processos são (NETO e PARDINI, 2006):

- **Interdifusão** de átomos ou moléculas na interface. No caso de compósitos, depende do entrelaçamento molecular, do número de moléculas envolvidas e da resistência da ligação molecular. Esse processo pode ser promovido pela presença de solventes e a quantidade de difusão dependerá da conformação molecular. A região da interface resultante possui uma espessura substancial e apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas diferentes das características da matriz e do reforço.
- **Atração eletrostática** devido à diferença de cargas eletrostáticas entre os constituintes na interface, fazendo com que haja a adesão. Essa atração não contribui muito à resistência da interface de compósitos poliméricos.
- **Ligação química** ocorre em compósitos de matriz polimérica, nos quais uma ligação é formada entre grupamentos químicos presentes na superfície metálica e na matriz. Dependendo do tipo e número de ligações químicas formadas, a interface terá uma determinada resistência.
- **Adesão mecânica** envolve ancoramento mecânico na interface. Esse processo não costuma resultar em alta resistência da interface quando o material é submetido a tensões transversais, a menos que haja um valor significativo de reentrâncias. Além da ligação mecânica, ocorrem tensões internas ou residuais.

A adesão envolve interações de curta distância de elétrons em escala atômica e a molhabilidade. Essa molhabilidade é representada pelo ângulo de contato que forma entre um sólido e um líquido, indicando o grau de interação deles. Esse ângulo precisa ser menor que 90° para atender os critérios da molhabilidade. Quando esses dois entram em contato, o líquido pode se espalhar, aumentando a área superficial, ou pode ser formada uma gota, diminuindo a área superficial (NETO e PARDINI, 2006).

2.9 ANODIZAÇÃO

A anodização é um tipo de tratamento eletroquímico que envolve um processo de oxidação, aplicado ao alumínio e suas ligas, impedindo a ação de agentes oxidantes externos e gerando uma superfície de alta resistência à abrasão, corrosão e intempéries (PERNICK, 1987; SILVA, 1981).

O alumínio é um material muito reativo, assim, quando exposto à atmosfera, forma-se rapidamente uma película passiva composta de óxido de alumínio, a qual evita a sua deterioração. (GOMES, 2005).

A anodização oferece aumento da adesão de pintura, graças à superfície quimicamente ativa da camada anódica, além de melhorar a adesão e intensificar a durabilidade. (BRACE e SHEASBY, 1979).

O baixo custo, a qualidade do revestimento e a simplicidade são características que explicam o grande uso do tratamento da superfície por anodização. A anodização faz com que as superfícies revestidas apresentem proteção contra corrosão e ao desgaste, além de garantir que as camadas apresentem compostos porosos, melhorando, assim, a colagem e a pintura. (THOMPSONSON, 1999).

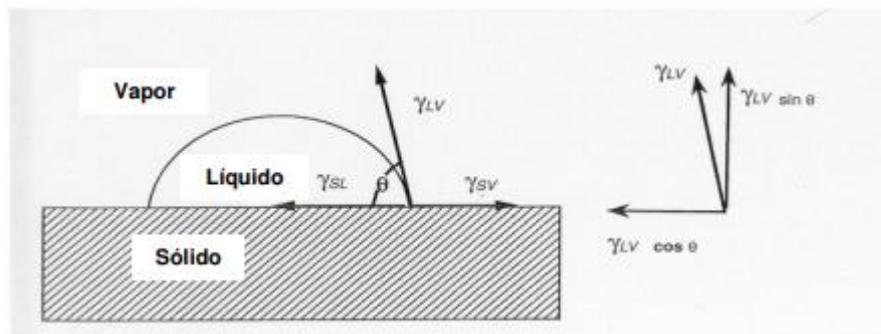
Os eletrólitos mais utilizados para o processo de anodização são soluções aquosas de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido crômico (PARKHUTIK, 1990).

2.10 ÂNGULO DE CONTATO

O ângulo de contato entre o líquido e a superfície do material em questão traduz a molhabilidade da superfície. É de extrema importância estudar esse parâmetro, uma vez que interfere na adesão (SILVA, 2006).

O ângulo entre as superfícies do líquido e do sólido é o chamado ângulo de contato, ao analisar geometricamente como pode-se verificar na Figura 8 (MYERS, 1990).

Figura 8 - Esquema das medidas de ângulo de contato



Fonte: (MYERS, 1990)

O ensaio para determinar o ângulo de contato é realizado ao pingar uma gota de um líquido, água ou solventes orgânicos, na superfície do material. Através da análise de como a gota comporta-se, espalhando inteiramente ou permanecendo na forma de gota, pode-se estudar a interação entre as duas superfícies (SANTANA, 2014).

Se o líquido se espalhar totalmente, o ângulo de contato será zero e há uma maior área superficial, indicando que a superfície possui propriedades hidrofílicas. Já, se o líquido assume uma forma quase totalmente esférica, tem-se uma menor área superficial e as propriedades apresentadas são hidrofóbicas, ou seja, a superfície dificilmente é molhada por um líquido (MYERS, 1990).

O ângulo de contato fornece uma visão termodinâmica sobre a natureza química da superfície, como o trabalho de adesão (BRISOLARI, 2008).

2.11 RUGOSIDADE

Irregularidades são comuns em superfícies e são compostas por rugosidade, ondulação e forma. A repetição dessas irregularidades em ondas de comprimento semelhantes a sua espessura é caracterizado como rugosidade superficial (SOUZA, 2011).

A rugosidade superficial aparece devido ao processo de fabricação ou ao tipo de processamento. Essa rugosidade é considerada um erro microgeométrico, já que medido a partir de instrumentos especiais, como o rugosímetro que deixa passar sinais de alta frequência que correspondem à rugosidade e não deixa passar os sinais de baixa frequência que correspondem à ondulação (SOUZA, 2011).

Para avaliar a rugosidade, podem ser utilizados vários parâmetros, porém os mais utilizados são: rugosidade média (R_a) que é a média aritmética dos valores referentes aos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média e o desvio médio quadrático (R_q) que é similar ao R_a (SOUZA, 2011).

Um importante ponto a ser considerado é o fato de que a rugosidade se encontra diretamente associada ao comportamento mecânico do material. Quanto maior a rugosidade, geralmente melhor será a aderência entre os componentes e, portanto, muitas vezes melhor será o desempenho mecânico do compósito (SOUZA, 2011).

2.11.1 Microscopia de Força Atômica

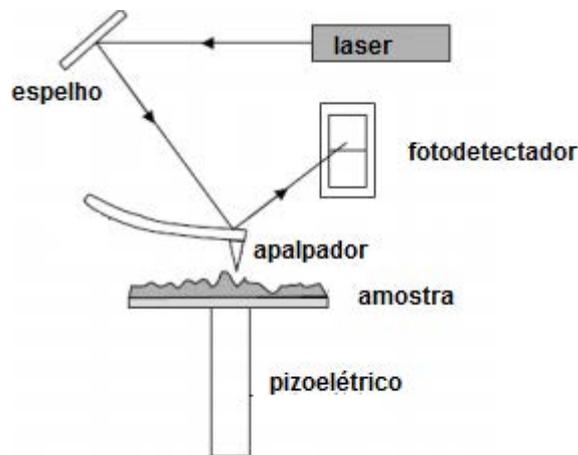
A microscopia de força atômica é responsável por avaliar a rugosidade da superfície. Ela é bastante utilizada, por conta da ótima resolução das imagens obtidas, facilidade da preparação de amostras e disponibilidade de instrumentos comerciais de alta qualidade, além de ter um menor custo em comparação a outras técnicas semelhantes (HERRMANN et al, 1997).

Como vantagens, pode-se citar o aumento em diversas vezes que a imagem pode ser vista, imagem em 3 dimensões e a possibilidade de medir a rugosidade do material em estudo (HERRMANN et al, 1997).

Esta técnica possui uma ponta de apalpação da superfície de medição, a qual se encontra em uma haste que gira livremente com o intuito de avaliar a rugosidade. Nessa haste, há um espelho que reflete a luz de um feixe de laser. A luz é refletida, passa por uma lente e incide sobre um fotodetector gerando uma diferença de potencial que depende da área iluminada pelo laser (SOUZA, 2011).

Conforme a ponta aproxima-se da amostra, uma força de interação aparece entre elas. A posição desta ponta depende do relevo da superfície e da natureza da amostra, da geometria da ponta, da distância entre a ponta e a amostra e de qualquer contaminação que houver na superfície da amostra (SOUZA, 2011). A Figura 9 abaixo mostra um esquema do funcionamento desse tipo de microscopia.

Figura 9 - Esquema de um Microscópio de Força Atômica



Fonte: (SOUZA, 2011)

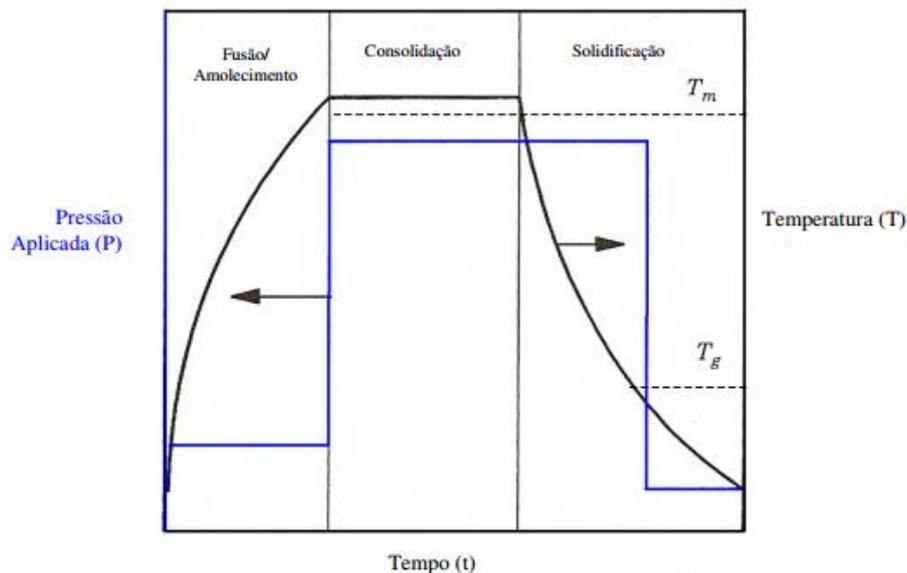
2.12 MOLDAGEM POR COMPRESSÃO A QUENTE

Compósitos metal fibra fabricados por meio da moldagem por compressão a quente são obtidos por meio da laminação manual a partir do empilhamento intercalado de camadas de polímero, fibra e de metal. Esse material é colocado na prensa, onde há aplicação de

temperatura e pressão. O número de camadas empilhadas depende da espessura desejada do compósito (NOGUEIRA, 2004).

O ciclo mostrado na Figura 10 mostra as três etapas desse processamento que são: aquecimento, consolidação e resfriamento. Assim, primeiramente, há um aquecimento até um ponto acima da temperatura de fusão do polímero. Após, durante a consolidação, a temperatura torna-se constante por um período ao mesmo tempo em que se aplica uma pressão, a qual depende da matéria prima utilizada, assim como o valor da temperatura. Na última etapa, o sistema é resfriado até a temperatura ambiente. Após esse período, o molde é aberto e o compósito removido (MUZZY, COLTON, 1997; BOURBAN et al., 2001).

Figura 10 - Ciclo de processamento da moldagem por compressão a quente



Fonte: (MUZZY, COLTON, 1997; BOURBAN et al., 2001)

O processo de moldagem por compressão a quente de compósitos termoplásticos apresenta quatro principais mecanismos:

- (a) percolação ou escoamento do polímero fundido através das camadas de fibras;
- (b) fluxo transversal ou em direção às fibras ou a camada de fibras;
- (c) cisalhamento interlaminar, que permite que as fibras em cada camada se movam umas em relação às outras no sentido do eixo e na direção transversal;
- (d) escorregamento interlaminar, permitindo o deslizamento das camadas durante a conformação.

Os dois primeiros mecanismos (a) e (b) são essenciais para uma boa consolidação do compósito, desde que esses ajudem a reduzir os espaços e os vazios existentes entre as

camadas e a criar uma boa adesão interlaminar. Os outros dois mecanismos ajudam nas formas do contorno das fibras sem franzir, rachar ou afinar no local (MALLICK, 2008).

2.13 ENSAIO DE CISALHAMENTO INTERLAMINAR

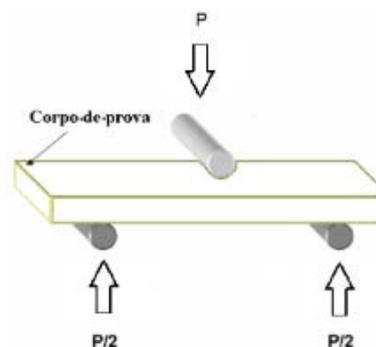
Com a utilização de materiais compósitos em aeronaves, foi possível verificar que um dos principais modos de falha seria a fratura interlaminar. Assim, a análise da resistência ao cisalhamento interlaminar nestes materiais é essencial e deve ser considerada nos projetos de estruturas (SILVA, 2006).

É um dos ensaios mais utilizados para caracterizar compósitos, devido à rapidez, à necessidade de pouca matéria prima e ao formato simples dos corpos de prova. Através dele, pode-se avaliar a adesão da fibra com a matriz (COSTA, 2006).

Mas há certa dificuldade de se determinar essa propriedade, pois esses compósitos podem ser caracterizados como anisotrópicos, além de gerarem uma resposta não linear quando são submetidos a esforços. O ensaio de cisalhamento interlaminar, descrito neste estudo, segue os requisitos da norma ASTM D 2344/D2344M – 00, conhecido como ensaio de cisalhamento em três pontos (SILVA, 2006 e LE BOURLEGAT, 2009).

O ensaio é realizado apoiando a amostra sobre dois roletes de 3 mm de diâmetro cada separados por uma distância específica para depois aplicar uma carga, no cilindro superior de 6 mm de diâmetro, conforme é observado na Figura 11 (ASTM D 2344/D2344M – 00, 2000).

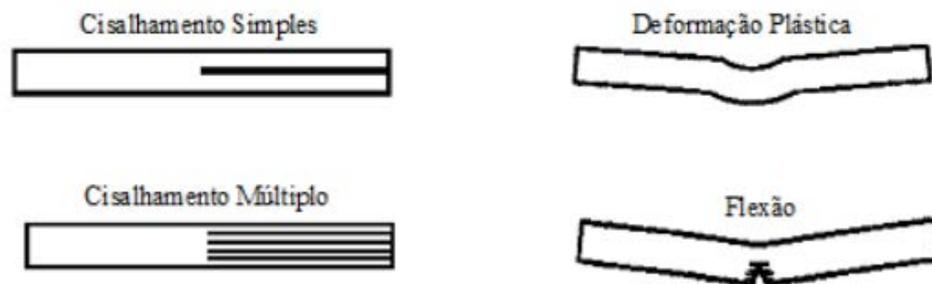
Figura 11 - Desenho representativo do ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar em 3 pontos



Fonte: (SILVA, 2006 e LE BOURLEGAT, 2009)

De acordo com a norma citada acima, a Figura 12 apresenta os modos de falhas que podem ocorrer durante o ensaio. Levando em consideração de que se a amostra falhar por deformação plástica ou flexão, o corpo de prova deve ser desconsiderado.

Figura 12 - Possíveis modos de falhas que podem ocorrer no ensaio em questão



Fonte: (SILVA, 2006 e LE BOURLEGAT, 2009)

2.14 CISALHAMENTO IOSIPESCU

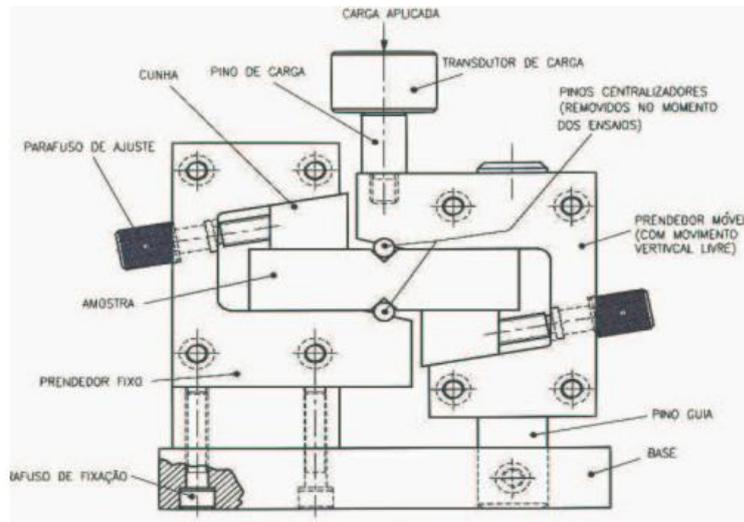
O ensaio de cisalhamento por Iosipescu tem como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento no plano e módulo de cisalhamento do laminado metal fibra. O ensaio é realizado segundo a norma ASTM D5379M-93.

Esse ensaio é bastante utilizado em compósitos, pois possibilita que seja medido, simultaneamente, a resistência ao cisalhamento e o módulo de cisalhamento, além da simplicidade da geometria das amostras e a possibilidade de avaliar quantitativamente as diferenças entre os materiais (NOHARA, 1998).

Quando criado, o método de Iosipescu era usado para avaliar a resistência ao cisalhamento de metais e foi só expandido para os compósitos na década de 70 (ADAMS, 1994).

O desenho esquemático do dispositivo está apresentado na Figura 13. A amostra tem a forma de uma viga retangular de aproximadamente 70 mm x 20 mm x 3 mm, com dois entalhes em V opostos um ao outro. A metade da amostra encontra-se em uma parte fixa e a outra metade em uma parte móvel. Os parafusos são os responsáveis por fixar a amostra para que uma carga externa seja aplicada (SOUZA, 2006).

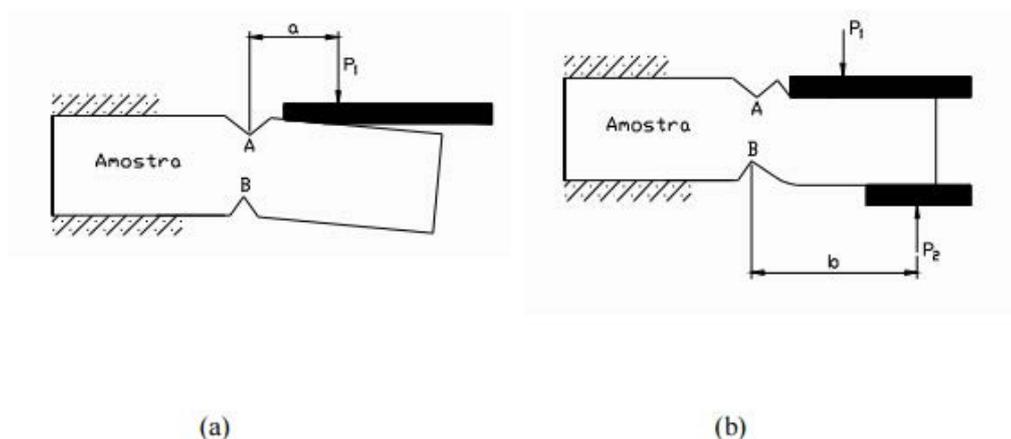
Figura 13 - Esquema do dispositivo do ensaio de cisalhamento por Iosipescu



Fonte: (SOUZA, 2006)

O funcionamento da parte móvel está apresentado na Figura 14. Quando a carga P_1 é aplicada, a amostra tende a rotacionar (Figura 11a), mas, por conta do formato do dispositivo, ocorre uma reação P_2 (Figura 11b) evitando essa rotação e gerando um movimento de translação da região da amostra (SOUZA, 2006).

Figura 14 - Esquema de aplicação de cargas na amostra no ensaio de cisalhamento por Iosipescu



Fonte: (SOUZA, 2006)

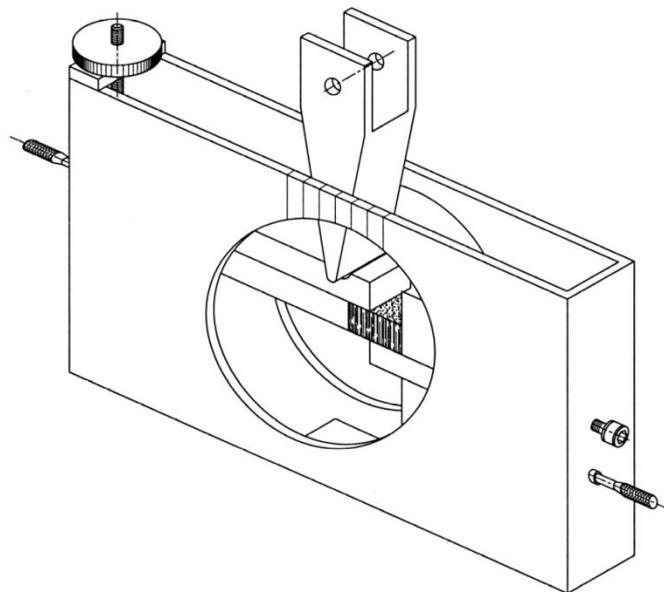
2.15 CISALHAMENTO POR COMPRESSÃO (CST)

Em compósitos termoplástico, observou-se o ensaio realizado por cisalhamento em 3 pontos não é o ideal para caracterizar o cisalhamento interlaminar, uma vez que esses tendem a falhar por flexão. Assim, um dispositivo de cisalhamento interlaminar por compressão foi desenvolvido na Alemanha (BOTELHO, 2001).

O CST é mais um ensaio que consegue avaliar o desempenho deste em uma aplicação estrutural. Os danos podem ocorrer por delaminação, rompimento do reforço, fratura, falha na interface fibra/matriz. (DAVIES et al, 1996).

A amostra é colocada entre os braços imóvel e móvel. O parafuso que encontra-se ao lado direito do dispositivo é o responsável por garantir que a pressão aplicada seja perpendicular ao plano de cisalhamento. Pode-se realizar um ajuste fino do posicionamento dos braços para ajustar a área do corpo de prova, como é mostrado na Figura 15 (SCHNEIDER et al, 2001).

Figura 15 - Equipamento para o ensaio de CST



Fonte: (SCHNEIDER et al, 2001)

2.16 VIBRAÇÃO

O ensaio de vibração estuda os movimentos oscilatórios de corpos e às forças associadas. Todos os corpos que apresentam massa e elasticidade são capazes de vibrar. Há dois tipos de vibração: a livre, a qual há ausência de qualquer ação de força externa, ou seja, a vibração ocorre por frequências naturais e a forçada, a qual ocorre com a excitação de forças externas (THOMSON, 1973).

Esse ensaio pode ser utilizado para encontrar defeitos em peças de materiais compósitos por fornecer parâmetros de forma, frequência de ressonância e amortecimento que caracterizam o estado de um componente. Esses parâmetros quando danos ocorrem no material, mas, através dessa técnica, não é possível identificar o dano e nem o localizar (EBERLE & HAENSEL, 1998).

A presença de delaminações muda a resistência assim como a resposta quando o material é solicitado por vibrações (ZOU et al, 2000).

O procedimento em si ocorre quando a amostra é excitada por uma força controlada (senoidal ou pulsada) para medir as vibrações resultantes em função do tempo (EBERLE, 1990). Um transdutor que monitora a resposta estrutural à força de excitação artificialmente induzida fornece os parâmetros relacionados (SALAWU, 1997). A frequência e o amortecimento são os parâmetros mais sensíveis (EBERLE & HAENSEL, 1998).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

- Placas de alumínio 2024 – T3 de 100 mm x 70 mm;
- Placas de titânio de 100 mm x 70 mm;
- Fibra de carbono na forma de tecido plain weave com massa específica igual a 1,77 g/cm³;
- PPS na forma de filme com 0,12 mm de espessura, com massa específica igual a 1,35 g/cm³;
- PEEK na forma de pó, com massa específica igual a 1,32 g/cm³;
- Desmoldante Upilex[®] (poliimida).

3.2 PLANO EXPERIMENTAL

O tratamento eletroquímico foi realizado na liga de alumínio 2024-T3. Num primeiro momento, variou-se o tempo de tratamento (utilizou-se 10, 15 e 20 minutos) e por meio da análise dos resultados de ângulo de contato e de rugosidade, determinou-se o tempo ótimo de tratamento (menor ângulo de contato e maior rugosidade). Após a determinação do melhor tempo de tratamento, o passo seguinte foi processar os compósitos contendo o alumínio tratado e também o compósito contendo titânio, o qual não sofreu tratamento. Cada compósito foi constituído de 3 placas metálicas intercaladas com duas lâminas dos compósitos termoplásticos (PPS ou PEEK) reforçados com fibra de carbono (tecido *plain weave*). O fluxograma do trabalho está apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma do trabalho



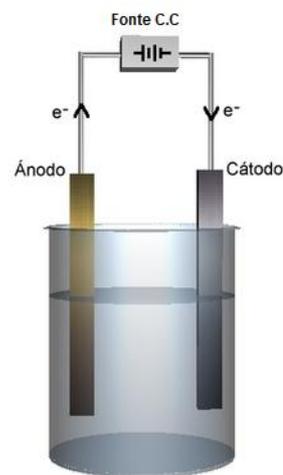
Fonte: Próprio autor

3.3 TRATAMENTO ELETROQUÍMICO

As placas de alumínio 2024-T3 foram, primeiramente, lavadas em água corrente e detergente e depois com acetona. Antes da anodização, uma limpeza química a quente (60°C) envolvendo NaOH 10% em massa durante 60 segundos foi realizada. Para neutralizar a base, as placas foram imersas em HNO₃ de 65% em massa durante 90 segundos. A anodização, de corrente contínua, ocorreu em solução de H₃PO₄ (com concentração de 10% em volume) a 10 V a uma temperatura de 25°C, usando contra eletrodos de cobre. Essa anodização foi realizada em uma fonte de alimentação de corrente contínua 0-25V,7A/0-50V, 4A, modelo Agilent E3634. O esquema de como funciona uma célula eletrolítica está apresentado na Figura 17.

Por fim, as amostras foram lavadas em água corrente, água destilada, limpas por álcool para depois serem secas em estufa a 60°C durante 30 minutos (WINGFIELD, 1993).

Figura 17 - Esquema célula eletrolítica



Fonte: Wikipedia

3.4 ÂNGULO DE CONTATO

Após tratamento eletroquímico do alumínio, foi utilizado o goniômetro para obter medidas de ângulo de contato das 5 amostras (não tratada, decapada, anodizada por 10 minutos, anodizada por 15 minutos e anodizada por 20 minutos). Utilizou-se água para realizar essas medidas, o volume da gota foi estipulado em 2,5 μL .

Um goniômetro, semelhante ao mostrado na Figura 18, encontra-se no Departamento de Física e Química da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

Figura 18 - Goniômetro



Fonte: Wikipedia

3.5 MICROSCOPIA DE FORÇA ATÔMICA (AFM)

A rugosidade dessas 5 amostras de alumínio foi avaliada por meio do método de microscopia de força atômica utilizando o microscópio Nanoscope V Multimode, disponível no Laboratório de Sensores e Materiais – LAS, INPE, de São José dos Campos, semelhante ao mostrado na Figura 19.

A área analisada foi de $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ com o microscópio operando no modo de contato intermitente, com a ponta de silício de 50N/m vibrando na frequência de $0,501 \text{ Hz}$. A topografia foi caracterizada através da rugosidade média quadrática (R_q), calculada por um software.

Figura 19 - Microscópio Nanoscope V Multimode



Fonte: (BRUKER, 2017)

3.6 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos foram produzidos com o alumínio tratado e o não tratado, e com o titânio não tratado, utilizando uma proporção nominal em volume de aproximadamente 60/40 de fibra e matriz.

3.6.1 Al/FC/PPS

As fibras juntamente com os filmes de PPS foram intercaladas com as placas de alumínio e depois colocados na prensa CMG100H-15-X da Caver entre dois filmes do desmoldante Upilex[®]. Aqueceu-se até 340° C e depois foi aplicado uma pressão de 1,4 MPa. Foi realizado um patamar de 5 minutos, para garantir a percolação da matriz nas fibras e a consolidação da espessura final do compósito. A pressão foi mantida até o material ser resfriado até a temperatura ambiente. Os parâmetros utilizados no processamento encontram-se na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no processamento do compósito Al/FC/PPS

Parâmetros utilizados	
Temperatura	340°C
Pressão	1,4 MPa
Tempo de processamento	5 min

Fonte: Próprio Autor

3.6.2 Ti/FC/PEEK

O compósito formado pelas fibras e pelo pó de PEEK foi intercalado com o titânio e em seguida levado à prensa CMG100H-15-X da Caver, entre duas folhas de desmoldante Upilex[®]. Primeiramente, foi realizado o aquecimento até 350°C para depois ser aplicada a pressão de 1,4 MPa durante 5 minutos. Por fim, foi realizado o resfriamento até temperatura ambiente, mantando-se a pressão. A preparação do laminado pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Preparação do compósito FC/PEEK/titânio não tratado



Fonte: Próprio autor

Os parâmetros utilizados no processamento encontram-se na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processamento do compósito Ti/FC/PEEK

Parâmetros utilizados	
Temperatura	350°C
Pressão	1,4 Mpa
Tempo de processamento	5 min

Fonte: Próprio autor

3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

A última etapa do trabalho foi a realização dos ensaios mecânicos e a análise por microscopia. Foram realizados os ensaios por ILSS, CST, vibração, cisalhamento por Iosipescu e a microscopia óptica das amostras.

Todos os ensaios foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

3.7.1 Iosipescu

O ensaio de cisalhamento por Iosipescu foi realizado em 5 amostras do compósito Ti/PEEK/FC e em 5 do compósito e Al/PPS/FC. O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios Shimadzu. A velocidade usada foi de 0.5 mm/min e a célula de carga empregada foi de 5 kN, seguindo a norma ASTM 5379M/05. O dispositivo usado está representado na Figura 21.

Figura 21 - Dispositivo para ensaio de cisalhamento por Iosipescu

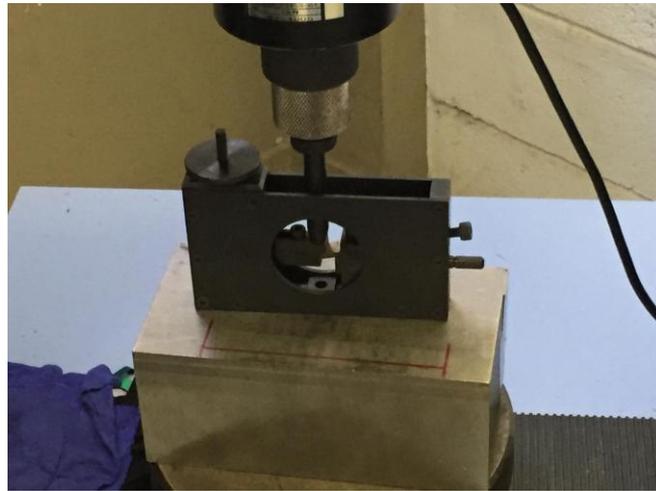


Fonte: Próprio autor

3.7.2 Cisalhamento por compressão (CST)

O ensaio de CST foi realizado em 8 amostras do compósito de Ti/PEEK/FC e em 8 do compósito de Al/PPS/FC. O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios Shimadzu. A velocidade usada foi de 0.25 mm/min e a célula de carga empregada foi de 5 kN, segundo a norma ASTM-G36. O dispositivo usado está representado na Figura 22.

Figura 22 – Dispositivo para ensaio de CST

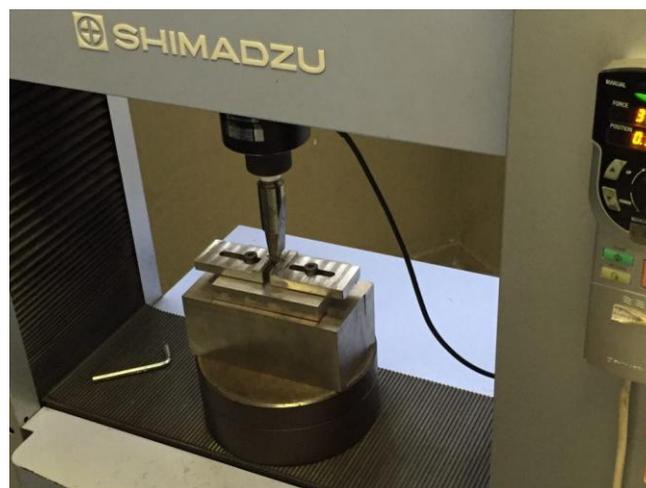


Fonte: Próprio autor

3.7.3 Cisalhamento interlaminar (ILSS)

O ensaio de ILSS foi realizado em 12 amostras do compósito de Ti/PEEK/FC e em 12 do compósito de Al/PPS/FC. O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios Shimadzu. A velocidade utilizada foi de 0,5 mm/min e a célula de carga empregada foi de 5 kN, seguindo a norma ASTM D2344. O dispositivo usado está representado na Figura 23.

Figura 23 - Dispositivo para o ensaio de ILSS



Fonte: Próprio autor

3.7.4 Vibração

O ensaio de vibração foi realizado em 4 amostras do compósito composto de Al/PPS/FC e em 2 do compósito composto de Ti/PEEK/FC. As normas utilizadas no Sonelastic são ASTM E1876, C1259, C215. Esse dispositivo está representado na Figura 24.

Figura 24 – Dispositivo para ensaio de vibração



Fonte: Próprio autor

3.8 MICROSCOPIA ÓPTICA

Realizou-se a análise por microscopia óptica após o tratamento eletroquímico nas amostras de alumínio para uma melhor observação da rugosidade e também após a realização dos ensaios mecânicos nos dois tipos de compósitos, Al/FC/PSS e Ti/FC/PEEK, para uma análise da adesão entre os componentes e a qualidade do laminado.

O microscópio utilizado foi o Zeiss Axio Imager Z2m e encontra-se no Departamento de Materiais e Tecnologia, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP. Um semelhante a este pode ser mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Microscópio Zeiss Axio Imager Z2m



Fonte: Wikipedia

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o tratamento superficial eletroquímico do alumínio, as amostras foram caracterizadas pelo ângulo de contato e pela rugosidade, medida por meio da Microscopia de Força Atômica

4.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRATAMENTO ELETROQUÍMICO DO ALUMÍNIO.

4.1.1 Ângulo de Contato

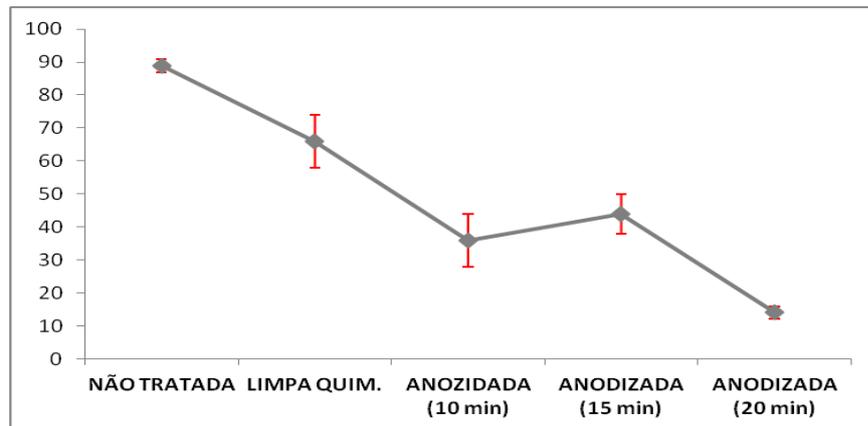
Com cinco amostras de alumínio, realizou-se o tratamento eletroquímico e foram medidos os ângulos de contato. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 26 e esquematizados no gráfico presente na Figura 27.

Figura 26 – Valores dos ângulos de contato

AMOSTRAS	MÉDIA
NÃO TRATADA	$89^\circ \pm 2^\circ$
LIMPA QUIM.	$66^\circ \pm 8^\circ$
ANODIZADA (10 min)	$36^\circ \pm 8^\circ$
ANODIZADA (15 min)	$44 \pm 6^\circ$
ANODIZADA (20 min)	$14^\circ \pm 2^\circ$

Fonte: Próprio autor

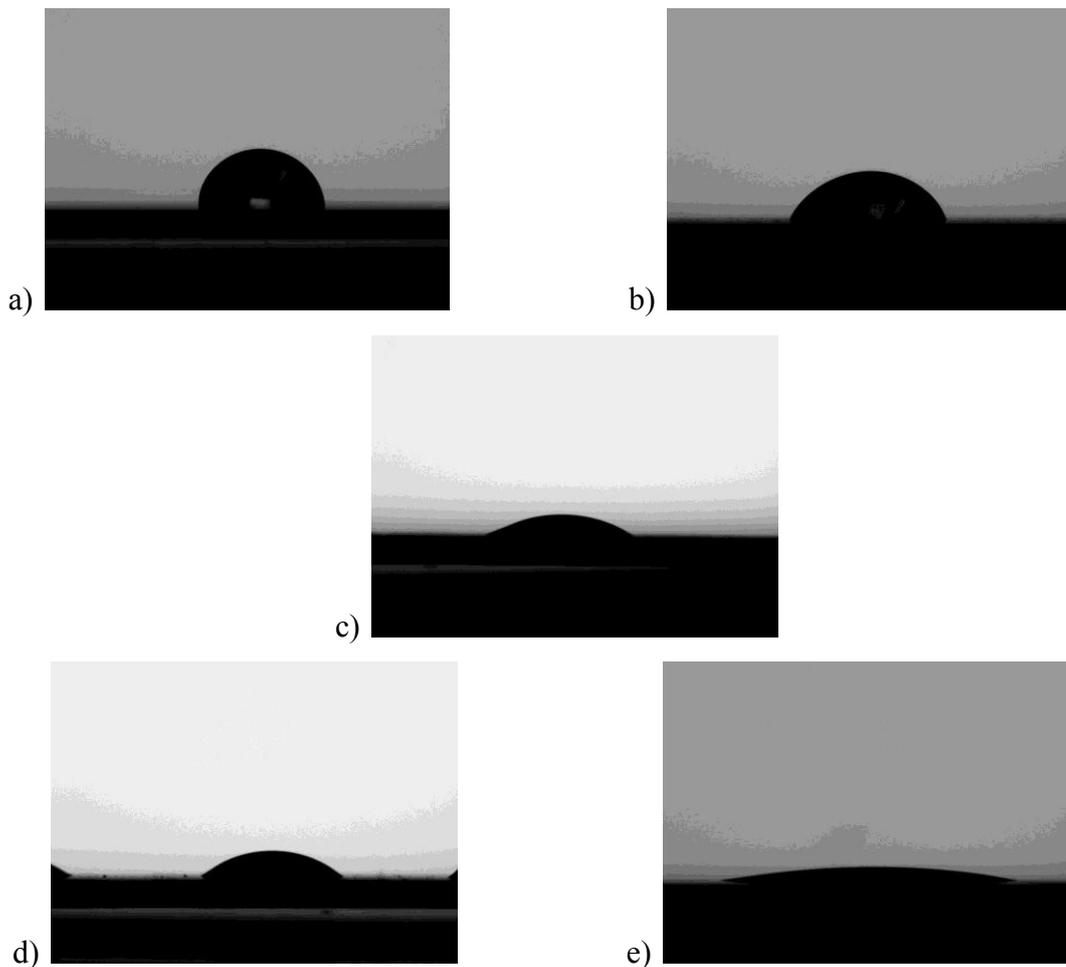
Figura 27 – Valores dos ângulos de contato



Fonte: Próprio autor

As fotos tiradas do ensaio de ângulo de contato estão na Figura 28.

Figura 28 – Imagem referente à amostra (a) não tratada (b) decapada e anodizadas por (c) 10 min (d) 15 min e (e) 20 min



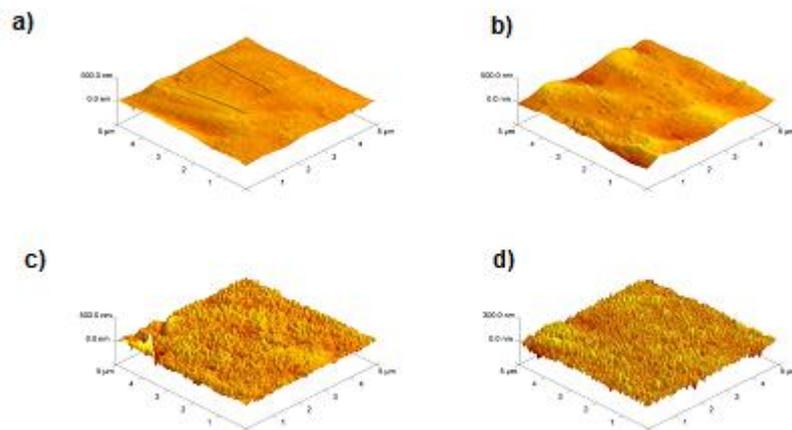
Fonte: Próprio autor

Pelos valores dos ângulos de contato e pelas imagens apresentadas na Figura 28, observa-se que o valor do ângulo de contato diminui com o passar do tempo de anodização.

4.1.2 Microscopia de Força Atômica

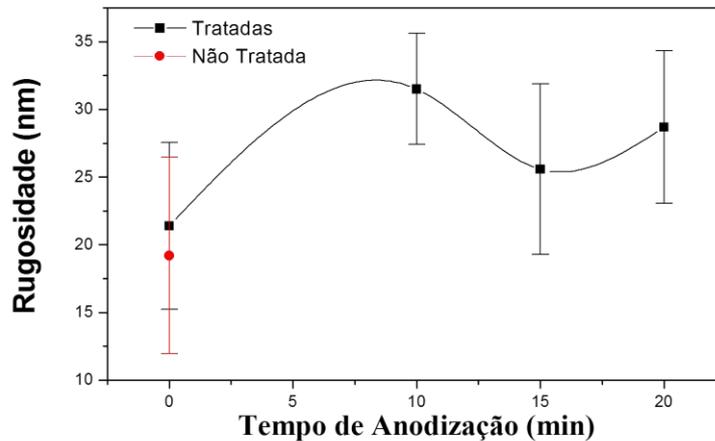
Para avaliar a influência do tratamento eletroquímico na rugosidade a microscopia de força atômica foi realizada. A Figura 29 apresenta imagens das superfícies do alumínio (a) não tratado, (b) decapado e (c e d) tratado eletroquimicamente nos diferentes tempos de tratamento. A Figura 30 apresenta o valor da rugosidade das amostras de titânio em função do tempo de anodização.

Figura 29 – Imagens obtidas por AFM das amostras (a) não tratada, (b) decapada e tratadas eletroquimicamente nos diferentes tempos: (c) 10min (d) 15 min



Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Rugosidade das amostras de alumínio tratadas e não tratada



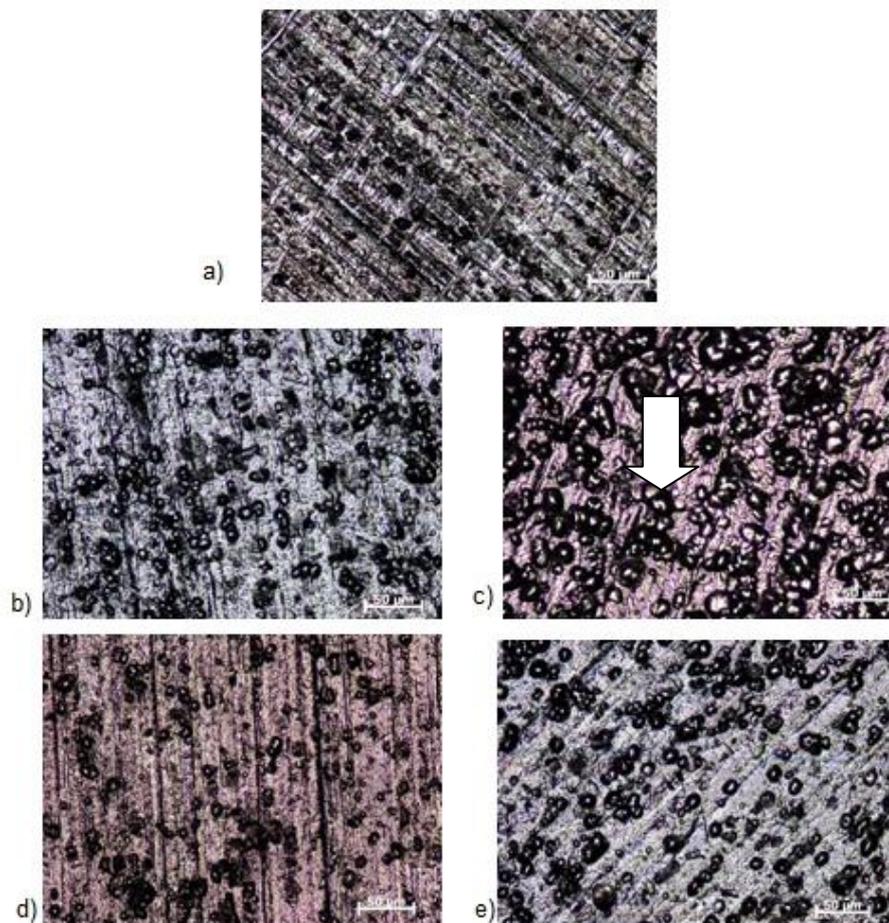
Fonte: Próprio autor

Por meio da análise do gráfico e das imagens obtidas, observa-se uma variação da rugosidade com a anodização. Levando em conta que todas as amostras tratadas apresentaram rugosidade semelhante, conclui-se que o tempo ideal para anodização do alumínio é de 10 minutos, uma vez que com apenas 10 minutos já é possível atingir a mesma rugosidade das outras amostras tratadas. Esse tempo ideal é comprovado por meio do Teste de Hipóteses. Esse aumento de rugosidade leva a um aumento de área superficial, por isso há uma melhora na adesão.

4.1.3 Microscopia Óptica

A Figura 31 apresenta imagens provenientes da microscopia óptica realizada nas amostras de alumínio, incluindo a não tratada, decapada, anodizada por 10 minutos, por 15 minutos e por 20 minutos.

Figura 31– Imagens obtidas por meio da microscopia óptica do alumínio (a) não tratado (b) decapado e anodizados por (c) 10 min (d) 15 min e (e) 20 min, ampliação de 200x



Fonte: Próprio autor

Após análise da Figura 31 nota-se que a amostra decapada (b) e as amostras anodizadas (c, d e e) são muito semelhantes entre si. Ou seja, o processo de anodização não alterou significativamente a superfície na escala micrométrica. Outro fato que se observa após análise da Figura 31 são as estruturas formadas no processo de decapagem, pequenos pits (pontos escuros que estão indicados pela seta). Tais estruturas, provavelmente, favorecerão o aumento da adesão na interface Al/Compósito.

4.2 ANÁLISE VISUAL DOS COMPÓSITOS HÍBRIDOS

4.2.1 Al/FC/PPS

Os compósitos com alumínio não tratado delaminaram logo após a retirada do compósito da prensa. Enquanto que, os compósitos processados com o alumínio tratado não delaminaram,

mostrando que o tratamento eletroquímico utilizado para tratar a superfície metálica é fundamental na obtenção desses compósitos híbridos. A Figura 32 apresenta uma imagem da seção transversal do compósito processado com o alumínio tratado.

Figura 32 – Seção transversal do compósito processado com alumínio tratado



Fonte: Próprio autor

4.2.2 Ti/FC/PEEK

Por meio do procedimento experimental descrito nesse relatório, foram processados compósitos com fibra de carbono/PEEK/titânio não tratado. No final do processo, o compósito com o titânio não tratado não delaminou, como apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Compósito de FC/PEEK/titânio não tratado



Fonte: Próprio autor

4.3 CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS PRODUZIDOS

4.3.1 Ensaio de Cisalhamento Interlaminar

4.3.1.1 Al/FC/PPS

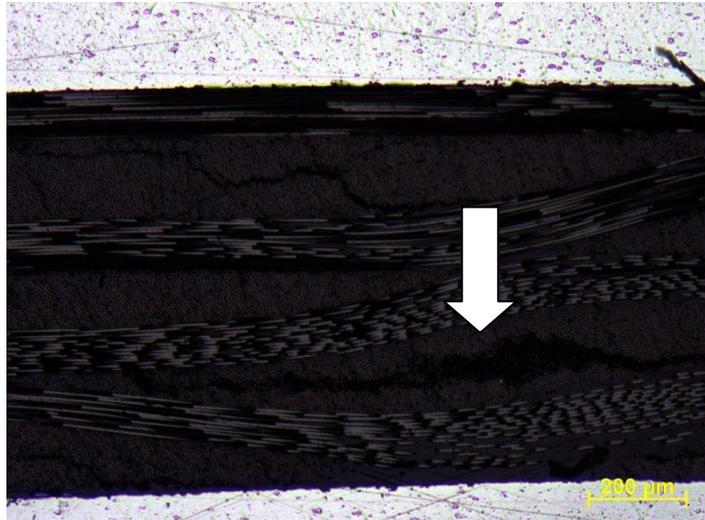
O primeiro ensaio realizado foi o de cisalhamento interlaminar (ILSS), realizado com o intuito de avaliar a resistência ao cisalhamento interlaminar, e desta forma caracterizar a interface dos compósitos produzidos. As amostras do compósito formado por Al tratado/PPS/FC apresentaram uma tensão máxima média de 79 ± 4 MPa. A Tabela 3 apresenta os valores de tensão para cada amostra ensaiada. E uma imagem da seção transversal do compósito ensaiado é apresentado na Figura 34.

Tabela 3 – Valores de tensão máxima para cada amostra de ILSS (Al/PPS/FC)

Resultados em MPa	
Amostra 1	82
Amostra 2	76
Amostra 3	79
Amostra 4	80
Amostra 5	79
Amostra 6	75
Amostra 7	83
Amostra 8	79
Amostra 9	72
Amostra 10	81
Amostra 11	84
Amostra 12	75

Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Seção transversal de uma amostra de ILSS do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio, ampliação de 50x



Fonte: Próprio autor

Observa-se a partir da Figura 34 trincas no compósito, evidenciando a falha por cisalhamento interlaminar do compósito. É importante ressaltar o fato de que apesar da falha do compósito, a interface Alumínio/FC+PPS permaneceu íntegra, não apresentando sinais de delaminação. Este fato demonstra que o tratamento eletroquímico empregado foi apropriado para aumentar a adesão desta interface.

4.3.1.2 Ti/FC/PEEK

As amostras do compósito Ti não tratado/PEEK/FC apresentaram uma tensão máxima de 73 ± 4 MPa. Os valores de tensão máxima dos compósitos com alumínio e titânio apresentaram valores próximos. A Tabela 4 apresenta os valores de tensão para cada amostra ensaiada.

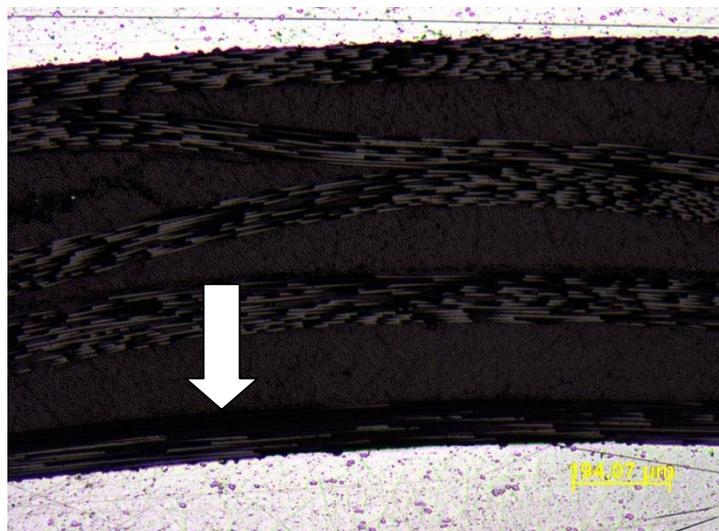
Tabela 4 – Valores de tensão máxima para cada amostra de ILSS (Ti/PEEK/FC)

Resultados em MPa	
Amostra 1	69
Amostra 2	71
Amostra 3	68
Amostra 4	77
Amostra 5	80
Amostra 6	79
Amostra 7	70
Amostra 8	73
Amostra 9	72
Amostra 10	74
Amostra 11	71
Amostra 12	75

Fonte: Próprio autor

Comparando tais valores com o da resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito FC/PPS, 58,4 MPa, observa-se que ambos compósito, Al/FC/PPS e Ti/FC/PEEK apresentaram resistências maiores (REZENDE et al, 2011). Desta forma, evidenciando a qualidade do compósito produzido e, principalmente, corroborando a eficiência do tratamento eletroquímico do alumínio. Uma imagem da seção transversal do compósito ensaiado Ti não tratado/PEEK/FC é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Seção transversal de uma amostra de ILSS do compósito Ti não tratado/PEEK/FC após ensaio, ampliação de 50x



Fonte: Próprio autor

Observa-se na Figura 35 a seção transversal de uma amostra do compósito de titânio após ensaio por ILSS. Nota-se que não ocorreu delaminação na interface Ti/FC+PEEK. Assim como evidenciado para o compósito Al tratado/PPS/FC, a falha por cisalhamento ocorreu no compósito FC/matriz, e não na interface metal/FC+matriz. Tal fato demonstra a qualidade dos compósitos obtidos.

4.3.2 Ensaio de Iosipescu

4.3.2.1 Al/FC/PPS

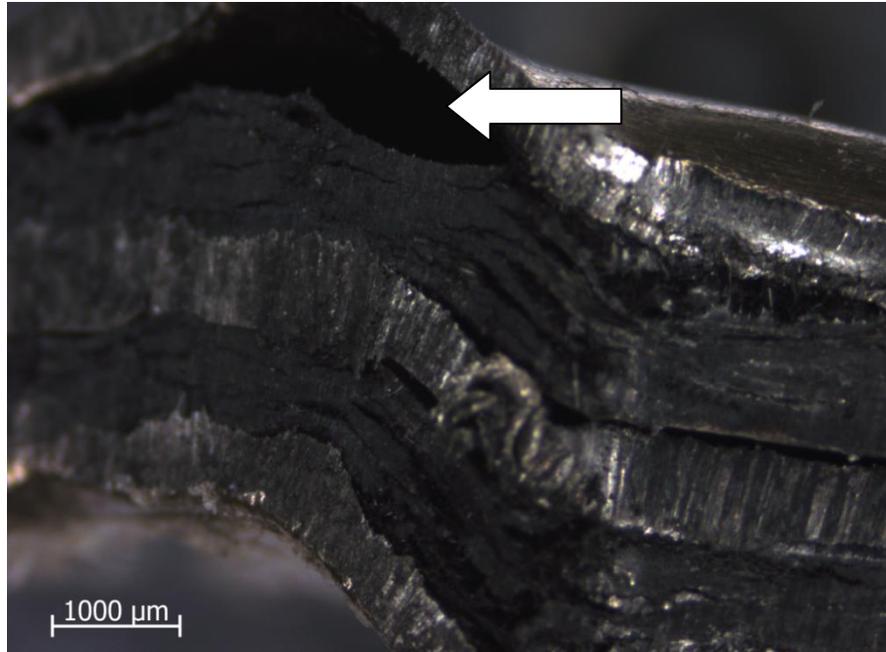
As amostras do compósito formados por Al tratado/PPS/FC apresentaram uma tensão máxima média de 143 ± 5 MPa. A Tabela 5 apresenta os valores de tensão para cada amostra ensaiada. E a Figura 36 mostra uma amostra do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio.

Tabela 5 – Valores de tensão máxima para cada amostra de Iosipescu (Al/PPS/FC)

Resultados em MPa	
Amostra 1	150
Amostra 2	139
Amostra 3	140
Amostra 4	147
Amostra 5	141

Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Seção transversal de uma amostra após o ensaio de Iosipescu do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio, ampliação de 10x



Fonte: Próprio autor

Após análise da Figura 36, nota-se uma grande delaminação do alumínio após o ensaio Iosipescu, nota-se também trincas no compósito FC/PPS.

4.3.2.2 Ti/FC/PEEK

As amostras dos compósitos formados por Ti não tratado/PEEK/FC apresentaram uma tensão máxima de 132 ± 6 MPa, quando avaliadas por cisalhamento Iosipescu. A Tabela 6 apresenta os valores de tensão para cada amostra ensaiada. E a Figura 37 apresenta uma imagem de microscopia óptica de uma amostra de Ti/PEEK/FC após a realização deste ensaio mecânico.

Tabela 6 – Valores de tensão máxima para cada amostra de Iosipescu (Ti/PEEK/FC)

Resultados em MPa	
Amostra 1	142
Amostra 2	130
Amostra 3	134
Amostra 4	127
Amostra 5	128

Fonte: Próprio autor

Figura 37 – Seção transversal de uma amostra de Iosipescu do compósito Ti não tratado/PEEK/FC após ensaio, ampliação de 10x



Fonte: Próprio autor

Na Figura 37, também observa-se a delaminação na interface metal/compósito e defeitos no compósito FC/PEEK (trincas interlaminares e rompimento de fibras). Comparando os resultados de ambos os compósitos, mais uma vez, o compósito Al tratado/PPS/FC apresentou propriedades superiores ao compósito Ti não tratado/PEEK/FC.

Segundo a literatura (SINKE, 2009) os valores para compósitos de fibra de carbono/epóxi e compósitos de fibra de vidro/epóxi são de 69 e 85 MPa, respectivamente. É importante

ressaltar que o ensaio não foi realizado até o rompimento completo do corpo de prova, como realizado por SINKE (2009), uma vez que o valor obtido teria a influência dos metais e o objetivo desse ensaio era avaliar a interface metal/compósito.

4.3.3 Ensaio de cisalhamento por compressão (CST)

4.3.3.1 Al/FC/PPS

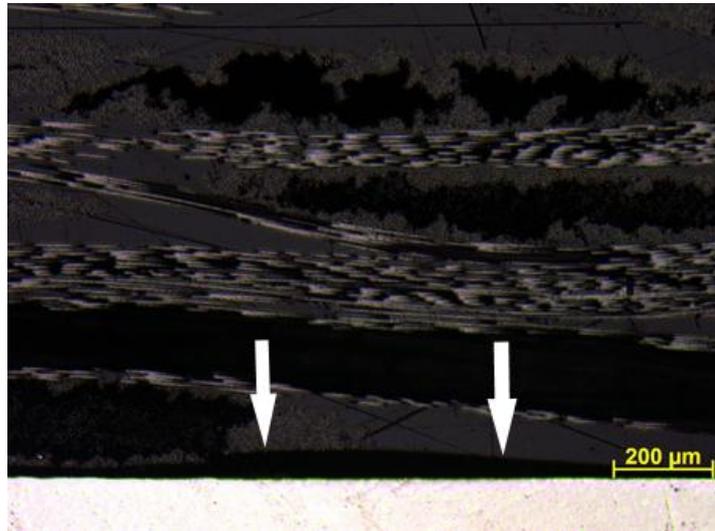
As amostras do compósito formados por Al tratado/PPS/FC apresentaram uma tensão máxima de 17 ± 3 MPa. A Tabela 7 apresenta os valores de tensão para cada amostra ensaiada. E a Figura 38 mostra uma amostra do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio.

Tabela 7 – Valores de tensão máxima para cada amostra de CST (Al/PPS/FC)

Resultados em MPa	
Amostra 1	13
Amostra 2	22
Amostra 3	15
Amostra 4	17
Amostra 5	18
Amostra 6	15
Amostra 7	13
Amostra 8	21

Fonte: Próprio autor

Figura 38 – Seção transversal de uma amostra de CST do compósito Al tratado/PPS/FC após ensaio, ampliação de 50x



Fonte: Próprio autor

Observa-se na Figura 38 que ocorreu delaminação na interface alumínio/FC+PPS, evidenciado pelas setas. Apesar do ensaio de ILSS e do ensaio de CST caracterizarem a interface, o segundo apresenta uma sollicitação puramente de cisalhamento e desta forma, causou a delaminação na interface do alumínio tratado.

4.3.3.2 Ti/FC/PEEK

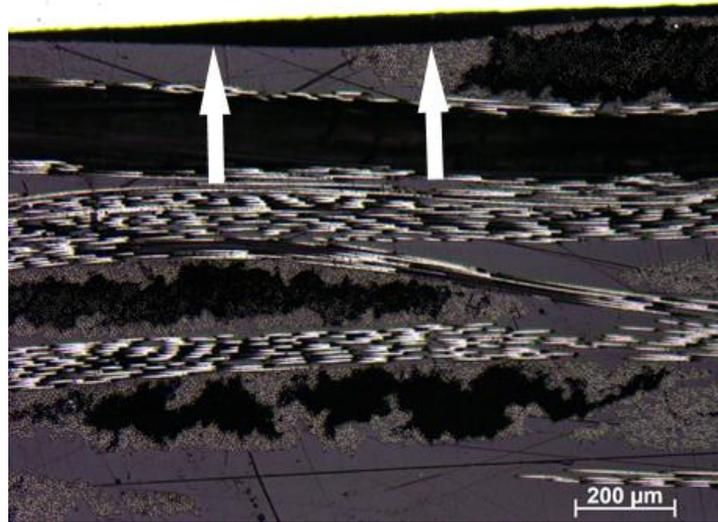
As amostras do compósito formados por Ti/PEEK/FC apresentaram uma tensão máxima de $7,0 \pm 0,8$ MPa. A Tabela 8 apresenta os valores de tensão para cada amostra ensaiada. A Figura 39 mostra uma amostra do compósito Ti/PEEK/FC após ensaio.

Tabela 8 – Valores de tensão máxima para cada amostra de CST (Ti/PEEK/FC)

Resultados em MPa	
Amostra 1	7
Amostra 2	7
Amostra 3	6
Amostra 4	6
Amostra 5	8
Amostra 6	8
Amostra 7	7
Amostra 8	6

Fonte: Próprio autor

Figura 39 – Seção transversal de uma amostra de CST do compósito Ti não tratado/PEEK/FC após ensaio, ampliação de 50x



Fonte: Próprio autor

Observa-se na Figura 39 delaminação na interface titânio/FC+PEEK, destacado pelas setas. Por meio da comparação dos resultados de ambos os compósitos, conclui-se que o compósito com o titânio apresenta valores de tensão máxima ao cisalhamento por compressão bem menores do que o compósito com alumínio, fato que pode ser explicado, provavelmente, pela realização do tratamento eletroquímico no alumínio e não no titânio.

Devido o ensaio de CST ser inovador, a caracterização de LMF por meio deste ensaio não existe na literatura. Comparando tais valores com o de um compósito de poliamida/FC, 23,9 MPa (BOTELHO, 2002) nota-se que estes valores são inferiores. Porém, é importante ressaltar que a comparação direta de tais valores não deve ser realizada, uma vez que os compósitos de poliamida/FC não possuem a interface metal/compósito.

4.3.4 Vibração

4.3.4.1 Al/FC/PPS

O módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de vibração realizado no compósito Al/PPS/FC foi de 56 ± 3 GPa. A Tabela 9 apresenta os valores do módulo de elasticidade para cada amostra ensaiada.

Tabela 9 – Valores de módulo de elasticidade para cada amostra (Al/PPS/FC)

Resultados em GPa	
Amostra 1	59
Amostra 2	57
Amostra 3	57
Amostra 4	51

Fonte: Próprio autor

Comparando tal valor com um compósito de fibra de vidro e epóxi, que apresenta um módulo de elasticidade de 20 GPa (CASTRO, 2000), pode-se concluir que o compósito Al/PPS/FC apresenta um valor bem mais alto de módulo de elasticidade. Isto ocorre devido ao fato do emprego do alumínio que possui módulo de, aproximadamente, 70 GPa (FARIAS, 2015). Ou seja, o módulo encontrado para o compósito Al/PPS/FC se encontra entre o módulo metálico e o módulo de um compósito convencional.

4.3.4.2 Ti/FC/PEEK

O módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de vibração realizado no compósito Ti/PEEK/FC foi de 40 ± 5 GPa. A Tabela 10 apresenta os valores de módulo de elasticidade para cada amostra ensaiada.

Tabela 10 – Valores de módulo de elasticidade para cada amostra (Ti/PEEK/FC)

Resultados em GPa	
Amostra 1	37
Amostra 2	43

Fonte: Próprio autor

Comparando este ao mesmo compósito de fibra de vidro e epóxi citado acima, nota-se que o compósito Ti/PEEK/FC apresenta como valor do módulo de elasticidade o dobro do correspondente ao compósito de fibra de vidro e epóxi graças a presença do titânio que puro possui módulo de elasticidade de aproximadamente 132 GPa (SOUZA, 2001).

Mas, ao comparar com o resultado referente ao compósito de Al/PPS/FC, este compósito envolvendo o titânio e o PEEK apresentou propriedades inferiores. Muito provavelmente, devido a falta de adesão na interface (presença de vazios) metal/compósito.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo foi alcançado após obtermos os compósitos e conseguirmos caracterizá-los.

Sobre a avaliação do tratamento eletroquímico na superfície do alumínio, pode-se afirmar que gerou resultados satisfatórios. As técnicas de caracterização utilizadas mostraram que o tratamento da superfície do alumínio melhorou consideravelmente a adesão do mesmo ao PPS, permitindo a obtenção de um compósito metal-fibra com qualidade. Já a utilização da matriz PEEK com titânio se mostrou adequada para a obtenção do laminado metal-fibra, principalmente sem nenhum tratamento prévio na superfície do titânio.

Para o processamento, utilizou-se a técnica de moldagem por compressão à quente, mas sem a utilização de um molde, como é comum. Esse novo processo foi efetivo para a fabricação de laminados metal fibra.

A partir dos ensaios mecânicos e da microscopia óptica, foi possível avaliar mecanicamente os compósitos. Essa avaliação mostrou a necessidade de novos estudos visando melhorar a interface entre os constituintes do compósito híbrido Ti/PEEK/FC.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Tratar a superfície do titânio (anodização ou plasma);
- Trocar o PEEK por outra matriz termoplástica e avaliar a modificação.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, D. F.; LEWIS, E.Q. Current status of composite material shear test methods, **Sampe Journal**, California, v. 31, n.6, p. 1-32 , 1994.
- ALBUQUERQUE, J.A.C. **Planeta plástico**: tudo que você precisa saber sobre plásticos. Porto Alegre: Editora Sagra Luzzatto, 2000.
- ALGER, M. S. M.; DYSON, R. W. **Engineering polymers**. Glasgow: editado por R.W. Dyson, Blackie, Glasgow, 1990.
- AQUINO, E. M. F. **Identificação do modo de fratura de compósitos poliésteres – Vidro-E**. In 13 CBECIMAT, 1992, Paraná. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais. Paraná, 1992.
- ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. New York: Editora Springer, p. 538-539, 1989.
- ASTM D 2344/D 2344M – 00. **Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates**, 2000.
- ASUNDI, A.; CHOI, Y.N. Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. **Journal of Materials Processing Technology**, Hong Kong, v.63, p.84-94, 1997.
- BEST, K.F. High strength materials for aircraft landing gear. **Aircraft engineering and aerospace technology**, New York, p.14-24, 1986.
- BEUMLER, T. et al. **Controlling the damage with fiber metal laminate structures**. In: 1st International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures, The Netherlands, 2007. Anais da 1st Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. The Netherlands, 2007.
- BOTELHO, E. C. et al. **Mechanical behavior of polyamide/carbon fiber composites manufactured by compression molding**. In: 1^o International Conference on Science and Technology of Composite Materials, Argentina, 2001. Anais do 1^o International Conference on Science and Technology of Composite Materials. Argentina, 2001.
- BOTELHO, E.C ; REZENDE, M. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, vol. 12, n. 3, p. 153-163, 2002.
- BOTELHO, E. C. et al. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. **Materials Research**, Cambridge, 2006.
- BOURBAN, P. E. et. al. Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Cambridge, v. 32, n.8, p.1045-1057, 2001.

BOYER, R.R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. **Materials Science & Engineering A**, Cambridge, vol.213, p.103-114, 1996.

BRACE, A; SHEASBY, P. The technology of anodizing aluminum. **Technicopy Limited**, England, 1979.

BRISOLARI, A. **Estudo da molhabilidade em madeiras tropicais ou de reflorestamento por medidas de ângulo de contato e de permeabilidade**. 99f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-17062009-145256/en.php>>. Acesso em: 15 de Setembro de 2017.

BURIANEK, D. A. et al. **Durability of hybrid fiber metal composite laminates**. In: Fourth International Conference on Durability Analysis of Composite Systems, Rotterdam, 2000. Anais do Fourth International Conference on Durability Analysis of Composite Systems. Rotterdam, 2000.

BUSCH, M. Análise experimental do comportamento mecânico de juntas híbridas metal-compósito. 98 f. Tese (Bacharel em Engenharia Mecânica) - CEFET, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/83759> Acesso em: 18 de Setembro de 2017.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. São Paulo: Editora Grupo Gen-LTC, 2002.

CAMANHO, P. P et al. Hybrid titanium-CFRP laminates for high-performance bolted joints. **Composites: Part A**, Cambridge, p. 1826-1837, 2009.

CASTRO, J. et al. **Estudo de propriedades mecânicas de compósitos epóxi/fibra de vidro para aplicação em temperaturas criogênicas**. In: 14º Congresso Brasileiro de Engenharia dos Materiais, Lorena, 2000. Anais do 14º Congresso Brasileiro de Engenharia dos Materiais. Lorena, 2000.

CATRODEZA, E. M. **Desenvolvimento e avaliação de técnicas experimentais para o estudo da mecânica da fratura de laminados fibra metal**. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/834515> Acesso em: 19 de Setembro de 2017.

COLPO, F.C. **Residual stress characterization in a single fibre composite specimen by using FBG sensor and the OLCR technique**. 89 f. Tese (Doutorado em Física) - EPFL École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2006. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/83851> Acesso em: 10 de Outubro de 2017.

COOK, Jeffrey. **Processing and properties of high temperature metal/ fiber-reinforced-thermoplastic laminates**. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Lehigh University, Bethlehem, 1993. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/83726> Acesso em: 12 de Outubro de 2017.

CORTÉS, P., CANTWELL, W. J. The fracture properties of a fibre-metal laminate based on magnesium alloy. **Composites: Part B**, Cambridge, p. 163-170, 2006.

COSTA, G. G. **Avaliação da influência dos ciclos térmicos nas propriedades dos compósitos termoplásticos de PPS e PEI com fibras de carbono e vidro conformados por prensagem quente**. 156 f. Tese (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006. Disponível em: http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000541132. Acesso em: 25 de Outubro de 2017.

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

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

Davies, P. et al. **Development of a standard mode II shear fracture test procedure**. In: Seventh European Conference on Composite Materials, London, 1996. Anais da Seventh European Conference on Composite Materials. London, 1996.

DOU, X. et al. Finite element modeling of stamp forming process on fiber metal laminates. **World Journal of Engineering and Technology**, New York, 2015.

EBERLE, K.; HAENSEL, C. **Characterization of damages in composites with vibration test methods**. Londres: Edita oECCM, 1998.

EMBEREY, C.L et al. **Application of knowledge engineering methodologies to support engineering design application development in aerospace**. In: Integration and Operations Conference (ATIO), Wichita, 2007. Anais de Integration and Operations Conference (ATIO). Wichita, 2007.

FARIAS, A. et al. **Avanços na usinagem de ligas de titânio**. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, 2015. Anais do 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Caxias do Sul, 2015.

FARIAS, C.T.T. **Utilização das ondas ultra-sônicas de lamb na inspeção de materiais C compósitos laminados fibra-metal**. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.metalmat.ufrj.br/wp-content/uploads/2017/05/2006-DSc-PEMMCI%C3%A1udia-Teresa-Teles-Farias.pdf>. Acesso em: 25 de Outubro de 2017.

FINK, A. et al. **Hybrid CFRP /titanium bolted joints: performance assessment and application to a payload adaptor**. **Composite and Science and Technology**, Londres, p. 305-317, 2010.

FONTES, R. **Compósito polimérico híbrido: comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual**. 81 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/15693>. Acesso em: 26 de Outubro de 2017.

FU, S.-Y. et al. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, Cambridge, v. 39, p. 933-961, 2008.

GOMES, V. **Desenvolvimento e caracterização de pigmentos cerâmicos baseados em alumina e mulita obtidos a partir de lama de anodização de alumínio**. 116 f. Tese (Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101998> Acesso em: 26 de Outubro de 2017.

HAZIZAN, M. D. ; TAN, C. Comparative study of fiber metal laminates (FMLs) and aluminum skins for polypropylene (PP) honeycomb core sandwich structure under low velocity impact loads. **Key Engineering Materials**, Suíça, 2011.

HERRMAN, P et al. Microscopia de varredura por força: uma ferramenta poderosa no estudo de polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, 1997.

HSIAO, B. et al. Isothermal crystallization kinetics of poly (ether ketone ketone) and its carbon-fibre-reinforced composites. **Polymer Paper**, New York, v.32, p.2799- 2805, 1991.

KUO, M, et al. Fabrication of high performance magnesium/carbon-fiber/PEEK laminated composites. **Materials Transactions**, Hong Kong, v. 44. 2003.

LE BOURLEGAT, LOÏC RENÉ. **Processamento e caracterização do compósito híbrido titânio/fibra de carbono/epóxi**. 115f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011. Disponível em:http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000554916 Acesso em: 10 de Outubro de 2017.

LEE, S. M.. **Encyclopedia of Composites**. New York, Editora: VCH, 1989.

LIMA, M. **Resposta térmica de um compósito PEEK+PTFE+Fibra de Carbono+Grafite**. 137 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/958851> Acesso em: 17 de Setembro de 2017.

LONGDON, G. S. et al. Failure characterization of blast-loaded fibre–metal laminate panels. **Composites Science and Technology**, Cambridge, v. 17, 1320 p. , 1998.

LUO, Z et al. Effect of polytetrafluoroethylene gradient –distribution on the hydrofobic and tribological properties of polyphenylene sulfide composite coating. **Surface & Coatings Technology**, New York, v. 203, p 1516 – 1522, 2009.

MALLICK, P. K. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. New York, Editora: CRC Press, 2008.

MARGARIA, G. ; AQUINO, E. M. F. **Influence of moisture on the mechanical properties of polyester/fibre glass-E composite**. In: Second International Congress on Metallurgy and materials, São Paulo, 1997. Anais do Second International Congress on Metallurgy and materials. São Paulo, 1997.

MARK, J.E. **Polymer data Handbook**. Oxford, Oxford University Press, p. 1012, 1999.

MOSSE, L. et al. The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre-metal laminates. **Composites: Part A**, Cambridge, v.36, p.1158-1166, 2005.

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

MYERS, D. **Surface, interfaces and colloids**. New York: VCH, 1990.

NETO, F. L.; PARDINI; L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

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: 15 de Outubro de 2017.

NOHARA, E. L. **Estabelecimento de parâmetros de processamento de compósitos CRFC aplicados na área de elementos de fricção**. 158 f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica-DCTA/ITA, São José dos Campos, 1998. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/7895221> Acesso em: 08 de Setembro de 2017.

PARKHUTIK, V.P. et al. Study of aluminium anodization in sulphuric and chromic acid solutions. I – Kinetics of growth and composition of oxides. **Electrochimica Acta**, New York, v. 35, p. 955-960, 1990.

PERNICK, J. Aluminum Anodizing. Corrosion. **Metals Handbook**. Londres:ASM Internacional, v. 13, 1987.

RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins**. Shawbury: ISmithers, 2009.

REZENDE, M. C. et al. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

ROSÁRIO, F. **Estudo das modificações do PHB com PCL, com farinha de madeira e com plastificantes**. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/887554> Acesso em: 21 de Outubro de 2017.

SALAWU, O. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. **Engineering structures**, New York, v. 19, p. 718-723, 1997.

SALEK, M. H. **Effects of processing parameters on the mechanical properties of carbon/PEKK thermoplastic composite materials**. 112 f. Tese (Mestrado em Ciência Aplicada) - Concordia University Montreal, Quebec, 2005. Disponível em: <https://spectrum.library.concordia.ca/8442/>. Acesso em: 18 de Setembro de 2017.

SANTIAGO, R. **Desempenho ao impacto de laminados fibra metal utilizando reforços termoplásticos**. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-29122014-120343/en.php>. Acesso em: 17 de Setembro de 2017.

SATHISHKUMAR, T. P et al. Hybrid fiber reinforced polymer composites – a review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, London, 2014.

SCHNEIDER, K. et al. Compression shear test (CST)–a convenient apparatus for the estimation of apparent shear strength of composite materials. **Applied Composite Materials**, New York, v. 8, p. 43-62, 2001.

SHACKELFORD, J.F. **Introduction to materials science for engineers**. New Jersey : Prentice Hall, 1996.

SINKE, J. **Manufacturing principles for fiber metal laminates**. In: International Conference on Composite Materials, Delft, 2009. Anais do International Conference on Composite Materials. Delft, 2009.

SILVA, D. **Avaliação do efeito ambiental nas propriedades mecânicas e viscoelásticas de compósitos híbridos de titânio/fibra de carbono/resina epóxi**. 108 f. Tese (Trabalho de Graduação de Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/121185> Acesso em: 18 de Setembro de 2017.

SILVA, P. F. **Introdução à corrosão e proteção das superfícies metálicas**, Belo Horizonte: Imprensa Universitária UFMG, 1981.

SILVA, R.D.A. **Processamento e caracterização de compósitos híbridos fibra/metal**. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006. Disponível em: http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000542951 Acesso em: 20 de Outubro de 2017.

SINMAZÇELIK, T. et al. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. **Material and Design**, New York, p. 3671-3685, 2011.

SOUZA, E. **Resistência ao cisalhamento iosipescu do compósito laminado reforçado com tecido de fibras de vidro/epóxi**. 91f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Itajubá, Itajubá, 2006.

SOUZA, G. **Estudo de propriedades mecânicas e tribológicas de titânio nitretado por plasma**. 128 f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2001. Disponível em: <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/026.pdf> Acesso em 01 de Outubro de 2017.

SOUZA, M. **Estudo da forma e da rugosidade em próteses ortopédicas de quadril**. 147 f. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/478531> Acesso em: 19 de Outubro de 2017

STARIKOV, R. SCHÖN, J. Quasi-static behaviour of composite joist with countersunk composite and metal fasteners. **Composites: Part B**, Cambridge, v.32, p.401-411, 2001.

TAVARES, R. N.; AQUINO, E. M.. F. Controle da moldagem a vácuo melhora a qualidade das peças de plásticos reforçado. **Plástico Industrial**, São Paulo, v. 04, 1999.

THOMPOSON, G.E. et al. Anodizing of aluminium alloys. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, New York, v.71, p.228-238, 1999.

THOMSON, W. T. **Teoria da vibração com aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência. 1973.

TORRES, R. **Desenvolvimento de compósito híbrido de fibra de vidro e micropartículas de sílica e cimento para uso em caneleiras**. 70 f. Tese (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Estadual de São João Del Rei., São João Del Rei, 2013. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/582421>. Acesso em: 21 de Outubro de 2017.

VOGELESAND, L. B.; VLOT A. Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. **Journal of Materials Processing Technology**, Delft, v.103, p. 1- 5, 2000.

WINGFIELD, J. Treatment of composite surfaces for adhesive bonding. **Internacional Journal of Adhesion and Adhesives**, Londres, 1993.

YOSOMIYA, R. et al. **Adhesion and bonding in composites**. New York: Dekker, 1990.

ZOU, Y. et al. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures—a review. **Journal of Sound and vibration**, New York, v. 230, p. 357-378, 2000.