

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS DE
COMPÓSITOS PEI/FIBRA DE CARBONO
SUBMETIDOS A CONDICIONAMENTOS
AMBIENTAIS**

Arthur Menzet Kon

Isabela Luiza Rodrigues Cintra

Pindamonhangaba - SP

2019

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS DE
COMPÓSITOS PEI/FIBRA DE CARBONO
SUBMETIDOS A CONDICIONAMENTOS
AMBIENTAIS.**

Arthur Menzet Kon

Isabela Luiza Rodrigues Cintra

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de Tecnologia em
Mecânica: Processos de Soldagem.

Área de Concentração: Soldagem

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Ana Beatriz Ramos
Moreira Abrahão.

Pindamonhangaba - SP

2019

K836c Kon, Arthur Menzet.

Caracterização de juntas de compósitos PEI/fibra de carbono submetidos a condicionamentos ambientais / Arthur Menzet Kon; Isabela Luiza Rodrigues Cintra / FATEC Pindamonhangaba, 2019. 67f.; il.

Orientadora: Professora Dr.^a Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2019

1. Compósitos Poliméricos. 2. Planejamento experimental. 3. Oxiacetileno. 4. Condicionamento ambiental. 5. Soldagem. I. Kon, Arthur Menzet. II. Cintra, Isabela Luiza Rodrigues. III. Abrahão, Ana Beatriz Ramos Moreira. IV. Título.

CDD 620

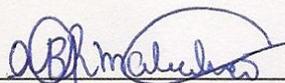
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS DE
COMPÓSITOS PEI/FIBRA DE CARBONO
SUBMETIDOS A CONDICIONAMENTOS
AMBIENTAIS.**

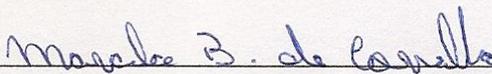
Arthur Menzet Kon

Isabela Luiza Rodrigues Cintra

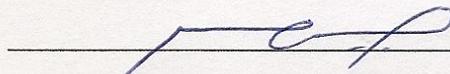
Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de Tecnologia em
Mecânica: Processos de Soldagem.



Prof. Dr. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba



Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba



Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Pindamonhangaba, 17 de junho de 2019.

DEDICATÓRIA

ALUNO 1

Primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida. Ao meu pai Kon Yam Man e a minha mãe Lúcia Mendes Kon, e a meus amigos e colegas que contribuíram para este trabalho.

ALUNO 2

A meu namorado Marcos, por sempre estar ao meu lado, por me entender e apoiar sempre.

AGRADECIMENTO

ALUNO 1

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus.

Agradeço a minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Ana Beatriz R. M. Abrahão por aceitar conduzir o presente trabalho de pesquisa. Adicionalmente a minha parceira deste trabalho Isabela Luiza Rodrigues Cintra por toda dedicação e ajuda para conclusão.

Aos professores do curso de Mecânica: Processos de Soldagem da faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, pela excelência da qualidade técnica de cada um.

Aos meus pais Kon Yam Man e Lúcia Mendes Kon que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

A meu cônjuge Ariele Ferreira Ludgero Kon pela compreensão e paciência demonstrada durante o desenvolvimento do projeto.

ALUNO 2

Primeiramente a Deus por me abençoar e mostrar sempre o melhor caminho.

Aos auxiliares docentes Luiz, Edilon e especialmente ao Flávio Felício pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do grupo de Pesquisa: Luís Felipe e Jonas.

A Prof. Dra. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão por todo incentivo, apoio, auxílio, confiança e direcionamento.

Ao Prof^º Edson Cocchieri Botelho pelo apoio e parceria com a FEG, em fornecer maior parte dos materiais e insumos para realização deste trabalho.

A todos meus amigos que me entenderam e apoiaram em todas as situações.

E a meu cônjuge Marcos Paulo Souza Ribeiro pelo apoio, compreensão e auxílio.

“A grandeza vem não quando as coisas sempre vão bem para você, mas a grandeza vem quando você é realmente testado, quando você sofre alguns golpes, algumas decepções, quando a tristeza chega. Porque apenas se você esteve nos mais profundos vales você poderá um dia saber o quão magnífico é se estar no topo da mais alta montanha”.

Richard Milhous Nixon.

KON, A. M.; CINTRA, I. L. R. **Caracterização de juntas de compósitos PEI/fibra de carbono submetidos a condicionamentos ambientais.** 2019. 65p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2019.

RESUMO

A soldagem em materiais compósitos é recente no meio industrial e vem sendo cada vez mais estudada para obtenção de melhorias no processo. A soldagem por gás oxiacetileno é um dos processos desenvolvidos para a soldagem devido a seu baixo custo e possibilidade de adaptação. Na soldagem de materiais compósitos, a combustão dos gases fornece o calor que, com o auxílio do alumínio para proteção e transferência, provoca o derretimento e a junção da matriz polimérica. Por meio do planejamento experimental neste trabalho determinou-se os melhores parâmetros otimizados para a soldagem de materiais compósitos poliméricos PEI/fibra de carbono por meio da soldagem por oxiacetileno, sendo estes 54 s e distância da chama de 60 mm. Os parâmetros reais que apresentaram maior *Lap Shear* (15,82 MPa) foram conseguidos com um tempo de 50 s e distância de chama de 50 mm. Adicionalmente foi feito um estudo frente a condicionamentos ambientais das juntas obtidas (nas condições em que se obteve maior valor de resistência mecânica): imersão em ácido nítrico, exposição em câmaras higrotérmica e ultravioleta. Foram definidos como parâmetros de avaliação da soldagem das juntas com e sem condicionamento o ensaio mecânico de *Lap Shear* e uma caracterização por microscopia ótica. No caso das juntas submetidas aos condicionamentos, em todos houve uma diminuição significativa no valor de resistência mecânica.

Palavras-chave: compósitos poliméricos. Planejamento experimental. Oxiacetileno. Condicionamento ambiental. Soldagem.

KON, A. M.; CINTRA, I. L. R. **Caracterização de juntas de compósitos PEI/fibra de carbono submetidos a condicionamentos ambientais.** 2019. 65 p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2019.

ABSTRACT

Welding in composite materials is recent in the industrial environment and has been increasingly studied to obtain improvements in the process. Oxyacetylene gas welding is one of the processes developed for welding due to its low cost and the possibility of adaptation. In the welding of composite materials, the combustion of the gases provides the heat that, with the aid of aluminum for protection and transfer, causes the melting and the junction of the polymeric matrix. By means of the experimental design in this work, it was determined the best optimized parameters for the welding of PEI / carbon fiber polymer composites by oxyacetylene welding, these being a distance of 60 mm from the flame. The actual parameters that presented the greatest Lap Shear (15.82 MPa) were achieved with a time of 50 s and a flame distance of 50 mm. In addition, a study was carried out on the environmental conditions of the joints obtained (under the conditions in which the greatest value of mechanical resistance was obtained): immersion in nitric acid, exposure in hygrothermal and ultraviolet. The Lap Shear mechanical test and a characterization by optical microscopy were defined as welding parameters of the joints with and without conditioning. In the case of joints submitted to the conditioning, in all there was a significant decrease in the value of mechanical resistance.

Keywords: Polymer Composites. Experimental Planning. Oxyacetylene. Environmental Conditioning. Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração das camadas do material compósito	
Figura 2- Propriedades das principais fibras utilizadas como reforço em compósitos	
Figura 3- Estrutura da fibra de carbono	
Figura 4- Vantagens e desvantagens da fibra de carbono	
Figura 5- Principais propriedades do poli (éter imida)	
Figura 6- Representação da unidade repetitiva da poli (éter imida).....	
Figura 7- Ilustração das etapas de união por fusão de um compósito termoplástico	
Figura 8- Classificação das tecnologias de soldagem por fusão	
Figura 9- Ilustração das partes e tipos de chama.....	
Figura 10- Gases combustíveis mais utilizados e suas características	
Figura 11- a) Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio Lap Shear b) esquematização do ensaio	
Figura 12- Tipos de fraturas em materiais compósitos.	
Figura 13- Curva do ganho de massa de umidade para sistemas fickianos (linha cheia) e não fickianos (linha pontilhada).....	
Figura 14- Ilustração esquemática da máquina de condicionamento ultravioleta.....	
Figura 15- Dispositivo utilizado na soldagem com dimensões	
Figura 16- Ácido nítrico utilizado no ensaio de imersão	
Figura 17- Equipamento utilizado para ensaio de condicionamento Higrotérmico.	
Figura 18- Máquina utilizada para realização do condicionamento ultravioleta.	
Figura 19- Máquina utilizada para realização do ensaio Lapshear.	
Figura 20- Resina e catalisador utilizados para embutimento a frio.	
Figura 21- Amostras embutidas.	
Figura 22- Microscópios utilizados.....	
Figura 23- Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.	
Figura 24- Curvas de Nível para o Compósito PEI/Fibra de Carbono.....	
Figura 25- Gráfico Superfície de Resposta	
Figura 26- Amostras Soldadas após o ensaio de imersão em ácido nítrico	
Figura 27- Ganho de massa em porcentagem das amostras submetidas ao condicionamento Higrotérmico	
Figura 28- Amostras retiradas após condicionamento Higrotérmico.....	
Figura 29- Perda de massa do material submetido ao condicionamento UV.....	
Figura 30- Microscopia óptica da amostra que apresentou maior valor de resistência obtido com ampliação de 50x.....	
Figura 31- Microscopia da amostra 1 após ensaio de imersão em meio ácido com ampliação de 50x.....	
Figura 32- Microscopia da amostra 3 após LapShear com ampliação de 50x.....	
Figura 33- Microscopia da amostra que apresentou menor valor de resistência com ampliação de 50 X.....	
Figura 34- Microscopia da amostra que apresentou maior valor de resistência com ampliação de 50 X.....	
Figura 35- Microscopia da amostra condicionada por ultravioleta que apresentou menor valor de resistência, com ampliação de 50X.....	
Figura 36- Microscopia da amostra condicionada por ultravioleta que apresentou maior valor de resistência, com ampliação de 50X.....	

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1-** Parâmetros mínimos e máximos utilizados na soldagem do PEI/Fibra de carbono pelo processo oxiacetileno
- Tabela 2-** Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (Lap Shear).
- Tabela 3-** Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem do compósito PEI/fibra de carbono
- Tabela 4-** Valores de resistência mecânica obtidos através do ensaio Lap Shear antes e após a imersão em ácido Nítrico.
- Tabela 5-** Resistência mecânica das amostras submetidas a condicionamento Higrotérmico
- Tabela 6-** Valores de resistência mecânica das amostras com e sem exposição ao condicionamento ambiental.....

LISTA DE EQUAÇÕES

- Equação 1-** Equação utilizada pra regulagem da chama no processo de soldagem.
- Equação 2-** Equação utilizada para determinação da categoria do material
- Equação 3-** Calculo utilizado para determinação da perda de massa das amostras.
- Equação 4-** Cálculo utilizado para determinação do ganho de massa das amostras
- Equação 5-** Equação utilizada para determinação da resistênciamecânica do material após ensaio Lapshear.
- Equação 6-** Equação utilizada para definição dos parâmetros otimizados.....

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Compósitos Poliméricos.....	15
2.1.1	Fibra de Carbono.....	16
2.1.2	Poli (éter imida).....	18
2.2	Soldagem de Materiais Compósitos Poliméricos	20
2.3	Soldagem Oxiacetileno	21
2.4	Ensaio de Caracterização Envolvendo Compósitos.....	23
2.4.1	<i>Lap Shear(LSS)</i>	24
2.5	Degradação de Materiais Compósitos.....	25
2.6	Condições ambientais de serviço	26
2.6.1	Efeitos agressivos para resistência química	27
2.7	Ensaio de condicionamento ambiental	27
2.7.1	Condicionamento Higrotérmico	27
2.7.2	Condicionamento Ultravioleta (UV).....	29
2.8	Planejamento Experimental.....	31
2.8.1	Otimização de Processos	31
2.8.2	Técnica de Superfície de Resposta (MSR).....	32
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	33
3.1	Materiais.....	33
3.1.1	Laminados	33
3.2	Metodologia	33
3.2.1	Planejamento Experimental.....	33
3.2.2	Soldagem Oxiacetileno	34
3.2.3	Ensaio de Condicionamento Ambiental	34
3.2.4	Caracterização Mecânica.....	37
3.2.5	Caracterização Microestrutural	39
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Planejamento Experimental.....	41
4.1.1	Otimização do Processo de Soldagem.....	44
4.2	Caracterização mecânica das juntas com e sem Condicionamentos Ambientais.....	46
4.2.1	Imersão das juntas em meio ácido.....	46
4.2.2	Condicionamento Higrotérmico	48
4.2.3	Condicionamento Ultravioleta (UV).....	50

4.3	Caracterização morfológica das amostras fraturadas	51
4.3.1	Amostras sem condicionamento.....	52
4.3.2	Caracterização da amostra após imersão em ácido	53
4.3.3	Condicionamento Higrotérmico	54
4.3.4	Caracterização da amostra após condicionamento Ultravioleta (UV).....	56
5.	CONCLUSÃO	58
5.1.	Sugestão de trabalhos futuros.....	59
5.2.	Produção acadêmica	59
5.2.1.	Simpósio.....	59
5.2.2.	Congressos	59
5.2.3.	Artigos científicos	60
	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos termoplásticos foram introduzidos na indústria aeronáutica na década de 1960, substituindo componentes metálicos devido a seu melhor desempenho estrutural, propriedades como baixa densidade, elevada resistência mecânica e economia em peso, diminuindo o peso das aeronaves e melhorando assim seu desempenho. Com a evolução tecnológica e de matérias-primas, o custo de utilização e processamento de compósitos poliméricos vem sendo reduzidos, o que começa a chamar a atenção de outros segmentos industriais, como a espacial (estruturas de satélites e de veículos lançadores de satélites), automobilística (protetores de Carter e suportes de assentos), náutica (cascos de embarcações) e biomédica (próteses ortopédicas) (DA COSTA, 2011).

A adaptação de processos de soldagem para a união de compósitos vem crescendo a cada dia, e dentre elas a soldagem por resistência elétrica, indução e ultrassom vem se mostrando mais promissoras. Na Soldagem por oxiacetileno é utilizado a queima de um gás combustível com um gás comburente como meio de calor, ela vem sendo estudada para utilização em compósitos devido a ser um processo versátil e permitir o controle da temperatura durante a solda (BRACARENCE, 2000).

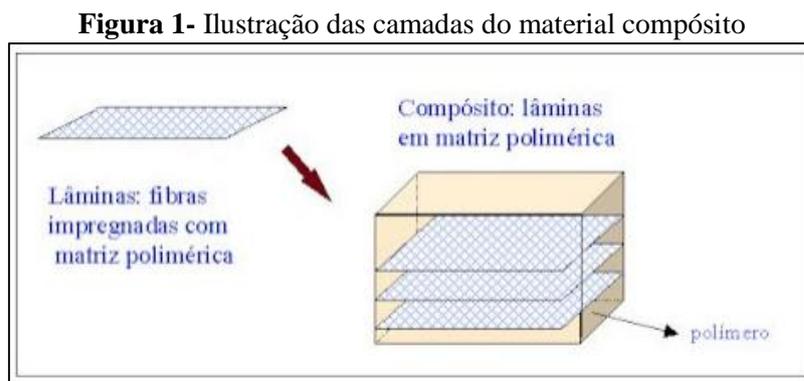
Poucos estudos foram realizados para analisar o surgimento de danos causados por fadiga térmica, principalmente em compósitos submetidos a processos de soldagem. O primeiro dano observado é o aparecimento de micro trincas na matriz polimérica, estas além de serem prejudiciais as propriedades mecânicas e térmicas do material ainda abrem espaço para que agentes corrosivos penetrem no material (DA COSTA, 2011).

Neste sentido a proposta deste estudo é fazer a caracterização de juntas soldadas de compósito PEI/ fibra de carbono pelo processo oxiacetileno, frente aos condicionamentos ambientais em meio ácido, ultravioleta e Higrotérmico. Serão estudadas as amostras soldadas com parâmetros de soldagem já desenvolvidos em trabalhos anteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos Poliméricos

Segundo Leite (2014) os compósitos consistem na união de dois materiais macro constituintes distintos, ilustrado na Figura 1, resultando em um material com propriedades superiores a seus constituintes, porém com uma interface reconhecível para ambos. Eles são constituídos geralmente de fibras como seu material estrutural (vidro, carbono, aramida) e de resina polimérica como a fase matriz (quase sempre um material termoplástico ou termorrígido) (CALLISTER; RETHWISH, 2016). Sendo a fibra responsável pela sua resistência á esforços e a matriz responsável pela transferência das forças de cisalhamento entre as camadas de fibra e por alinhá-las e protegê-las de danos superficiais (CAMPOS, 2018).



Fonte: (MOREIRA, 2009).

Eles podem ser fabricados por diferentes técnicas como moldagem por compressão e bobinagem, e são conhecidos comumente por possuírem elevada resistência mecânica aliada com menores valores de massa específica (900 a 1500 kg.m⁻³ (0,9 a 1,5 g.cm⁻³), o que explica o interesse das indústrias aeronáuticas nessa classe de materiais (DAMATO, 2010).

Os compósitos não sofrem corrosão em determinados meios comparado aos metais, o que se torna uma vantagem na utilização quando comparadas com ligas de alumínio já que estas acabam necessitando de manutenção constante, o que gera um elevado custo. Eles também podem oferecer como vantagem baixa condutividade térmica, isolamento acústica e térmica e facilidade de obtenção de geometrias complexas (LEITE, 2014).

A utilização de resinas termorrígidas como matriz (tais como as resinas epóxi e fenólica) é muito comum devido a estas garantirem uma alta rigidez no produto final, entretanto, vem cada vez mais sendo utilizadas resinas termoplásticas para esta aplicação. Em comparação aos termorrígidos convencionais os termoplásticos avançados apresentam vantagens em sua utilização como elevada temperatura de serviço, alta resistência ao impacto, baixo custo, possibilidade de reparos, soldagem, reaproveitamento, dentre outros. Vários termoplásticos vêm sendo utilizados atualmente na obtenção de compósitos, como PEEK (poli (éter-éter-cetona)), PEI (poli (éter-imida)), PPS (poli (sulfeto de fenileno)), PSU (polissulfona); porem destaca-se dentre elas o polímero PEI (BATISTA; BOTELHO, 2009; MARQUES; NARITA; COSTA; 2010).

A busca por materiais mais leves, duráveis e com alta resistência faz com que os materiais compósitos sejam cada vez mais estudados e utilizados na indústria aeronáutica na fabricação de peças como: flapes, leme, carenagens, empenagens, airelon, tanques de combustível e profundor, substituindo metais como ligas de alumínio, titânio e aços especiais. As vantagens da utilização de materiais compósitos na fabricação de aeronaves são diversas, elas possuem a capacidade de adaptação a diversos layouts sem que haja a perda da resistência, perda de rigidez a fadiga, resistência á corrosão, e também possuem um baixo custo na montagem devido a um número menor de peças e elementos para fixação (LEITE, 2014; VIEIRA; VIEIRA; CARVALHO, 2016).

2.1.1 Fibra de Carbono

Na fabricação de compósitos poliméricos as fibras são comumente usadas como fase de reforço, e quando esta apresenta comprimento igual à maior dimensão da peça ocorre à máxima transferência das propriedades mecânicas para o compósito (MAZUR, 2010).

São muito utilizadas as fibras de vidro, aramida e carbono na fabricação de compósitos, tendo a de carbono se destacado com relação às outras, devido ao seu elevado coeficiente de expansão térmica, estabilidade térmica quando submetida a temperaturas elevadas, e elevada resistência à corrosão e rigidez. Os compósitos com este tipo de reforço vêm se tornando um ótimo substituto para os metais e suas ligas (FARIA 2008; MAZUR, 2010). Na Figura 2 são apresentadas as propriedades mecânicas das fibras utilizadas como reforço em materiais compósitos poliméricos.

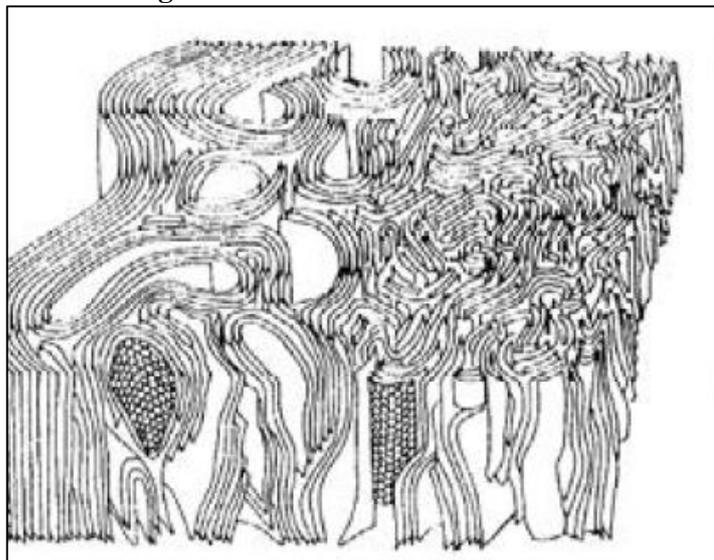
Figura 2- Propriedades das principais fibras utilizadas como reforço em compósitos

Propriedades	Vidro	Aramida	Carbono
Massa específica ρ_f (g/cm ³)	2,45	1,47	1,77
Módulo de elasticidade longitudinal E_1 , (GPa)	71	154	224
Módulo de elasticidade transversal E_2 , (GPa)	71	4,2	14
Coefficiente de Poison ν_{12}	0,22	0,35	0,2
Módulo de cisalhamento (GPa)	30	12	14
Resistência à tração longitudinal (MPa)	3500	2800	2100
Elongação (%)	3,5	2,3	0,6
Coefficiente de expansão térmica α_1 , $10^{-6} K^{-1}$	5	-4	-1

Fonte: (MAZUR, 2010).

A fibra de carbono se trata de um material composto por átomos de carbono contendo partes amorfas e partes cristalinas, juntamente com tecido FC, onde cada fio é constituído de milhares de monofilamentos, conforme ilustrado na Figura 3. Ela possui elevada resistência mecânica e térmica e baixa molhabilidade (SANTOS, 2015).

Figura 3- Estrutura da fibra de carbono



Fonte: (SANTOS, 2015)

A fibra de carbono possui propriedades mecânicas superiores quando comparada as outras utilizadas, porém possui um custo elevado. Ela possui baixa densidade, um baixo coeficiente de expansão térmica, e uma boa condutividade. Estruturalmente possui uma elevada resistência à fadiga e baixa resistência a impacto, sendo também responsável pela

ocorrência de corrosão galvânica quando colocada em contato com o alumínio. Quando comparada a outros materiais utilizados na indústria aeronáutica, a fibra de carbono utilizada como fase de reforço possui elevada resistência mecânica, essa maior do que quando comparada a outras ligas metálicas. Isto resulta em um menor peso das aeronaves, o que permite uma economia de combustível, uma melhora no desempenho e a possibilidade de transporte de cargas maiores (LEITE, 2014).

Segundo Reis (2016) as fibras de carbono são de grande interesse comercial e científico. Sua utilização oferece diversas vantagens como, facilidade de processamento, elevada taxa de resistência/densidade, a possibilidade de reciclagem e a obtenção de peças com formas complexas, sendo então cada vez mais utilizadas como materiais estruturais em diversas aplicações na engenharia. Na Figura 4 são citadas as principais vantagens e desvantagens da utilização da fibra de carbono em materiais compósitos.

Figura 4- Vantagens e desvantagens da fibra de carbono

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência à tração - Elevado módulo de elasticidade longitudinal - Baixa massa específica - Elevada condutibilidade eléctrica - Elevada estabilidade dimensional; - Baixo coeficiente de dilatação térmica - Bom comportamento a elevadas temperaturas de serviço - Inércia química excepto em ambientes fortemente oxidantes - Boas características de amortecimento estrutural 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzida resistência ao impacto - Elevada condutibilidade térmica - Fractura frágil - Baixa deformação antes da fractura - Baixa resistência à compressão - Custo elevado

Fonte: (MOREIRA, 2009).

2.1.2 Poli (éter imida)

Os polímeros da classe poliimidas são os mais antigos e conhecidos plásticos de alto desempenho, devido a seus custo e propriedades, sendo um forte candidato na utilização como fase matriz em compósitos poliméricos (ABRAHAO, 2015).

A PEI é um termoplástico de engenharia que foi desenvolvido pela General Eletrics inc. na década de 70. Trata-se de um polímero amorfo, transparente e de coloração amarelada, que apresenta elevada Temperatura de Transição Vítre (Tg) (entre 170 a 217°C), elevados

valores de resistência e rigidez, e boas propriedades mecânicas como alto módulo elástico e resistência química, além de ser um material isolante que pode apresentar valores de resistividade elétrica da ordem $10^{17} \Omega/\text{cm}$. As principais propriedades do polímero PEI são apresentadas na Figura 5 (REIS, 2016; ALEXANDRINO, 2012).

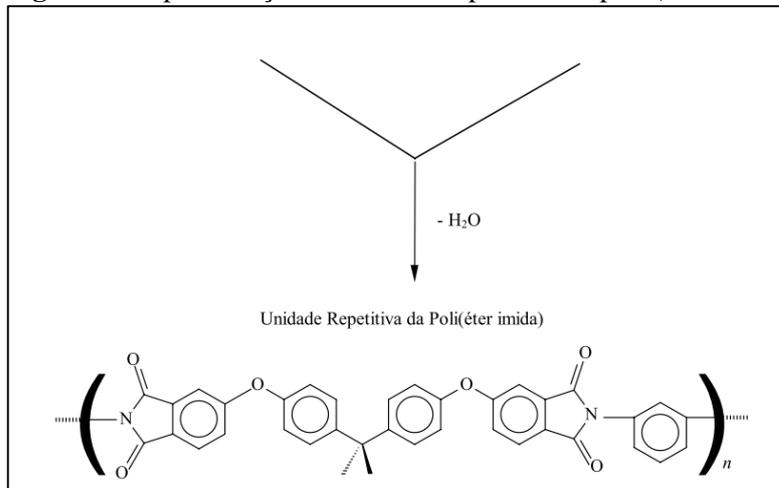
Figura 5- Principais propriedades do poli (éter imida)

<i>Propriedades PEI</i>		
<i>Físicas</i>	<i>Massa específica (g/cm³)</i>	1,35
	<i>Absorção de água (%)</i>	0,24
	<i>Dureza Shore (D)</i>	85,50
<i>Mecânicas</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	100,00
	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	3,60
	<i>Enlongação (%)</i>	44,9
<i>Térmicas</i>	<i>Temperatura de Transição Vítrea (°C)</i>	220,00
	<i>Temperatura Máxima de serviço (°C)</i>	200,00

Fonte: (VICIOSO, 2014).

Segundo Reis (2016) a poli (éter imida) é uma das series de derivados da poliimida que possui ligações flexíveis de carbono e oxigênio em sua estrutura. Esse polímero é formado a partir da reação de policondensação entre um dianidrido contendo ligações éter e uma diamina aromática. A Figura 6 mostra a representação da unidade repetitiva da PEI (BARROS, 2004).

Figura 6- Representação da unidade repetitiva da poli (éter imida)



Fonte: (BARROS, 2004).

Segundo Abrahão (2015) a presença de anéis aromáticos na estrutura química da PEI é uma importante característica deste material, já que estes anéis são ligados por um ou dois átomos sem a presença de resistividade elétrica, o que resulta que a energia de ligação da estrutura seja elevada.

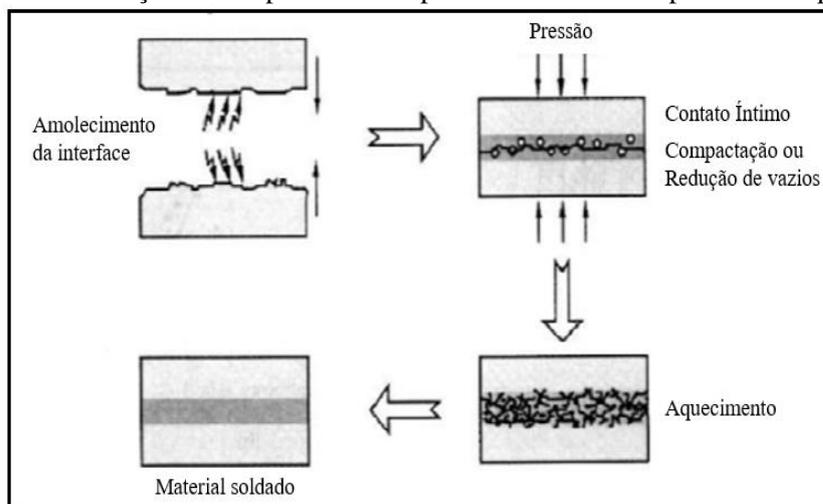
2.2 Soldagem de Materiais Compósitos Poliméricos

Geralmente, o desenvolvimento de uma estrutura deve ser feito de forma que não haja a existência de uniões, pois estas podem causar fragilidade e diminuição do desempenho do material. Entretanto muitas vezes é necessária a utilização de conexões devido a limitações no processo de fabricação, montagem, reparo e inspeção (DA COSTA, 2011).

As técnicas de união de compósitos podem ser classificadas por fixação mecânica, união adesiva e união por fusão (soldagem). No entanto, dentre as técnicas utilizadas, destaca-se os processos de soldagem devido a estes proporcionar uma melhor qualidade nas juntas, sendo necessário um menor tempo de processo e pouca preparação da superfície a ser soldada (SOUZA, 2013).

Os princípios de ligação por soldagem envolvendo componentes termoplásticos consistem na preparação da superfície a ser soldada, aquecimento do polímero na região interfacial para o estado viscoso e do resfriamento (ABRAHÃO, 2015). A Figura 7 mostra as etapas de soldagem de materiais compósitos termoplásticos.

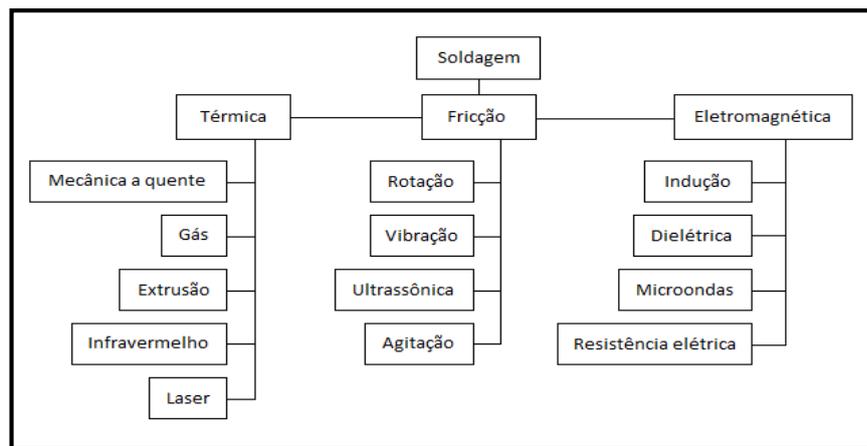
Figura 7- Ilustração das etapas de união por fusão de um compósito termoplástico



Fonte: (AGEORGES; YE; HOU, 2001).

Para obter êxito na união de compósitos termoplásticos é necessário, além da relação de custo/benefício, a adaptação e desenvolvimento de processos adequados. As técnicas utilizadas para união por fusão são geralmente classificadas pela tecnologia usada para gerar o aquecimento. Abaixo, na Figura 8, são apresentados os principais processos de união por soldagem (ABRAHÃO, 2015).

Figura 8- Classificação das tecnologias de soldagem por fusão



Fonte: (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Os processos mais comumente utilizados são soldagem por vibração, ultrassom, ultravioleta, indução e resistência elétrica, pois estes apresentam melhor eficiência da junta, maiores campos de aplicação e eficiência no processo (ABRAHAO, 2015).

Um dos processos mais utilizados para a soldagem de materiais termoplásticos é a soldagem por gás quente (Hot Gas Welding), sendo ela o equivalente da soldagem por oxigás para materiais metálicos. O fluxo de gás quente é direcionado para a junção resultando no amolecimento do polímero e de uma haste de enchimento que é consumida pelo processo (WISE, 1999).

2.3 Soldagem Oxiacetileno

São denominados processos por oxigás (OFW) aqueles que utilizam como meio de calor a combustão de um gás combustível juntamente com o oxigênio. O processo utiliza proporções controladas dos dois gases, a chama produzida por um maçarico, e pode ou não usar material de adição. Podem ser citados como vantagens para a utilização da soldagem oxiacetileno a possibilidade de controle do calor e temperatura sobre o material, e o baixo custo e versatilidade do equipamento para a soldagem (BRACARENSE, 2000).

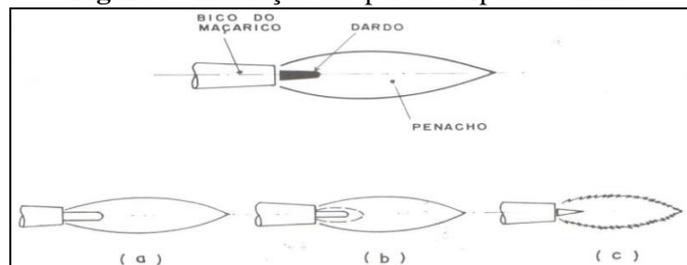
De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992) a combustão do gás acetileno na soldagem ocorre em duas etapas: a primeira, que é onde apenas o oxigênio do cilindro é utilizado; e secundária, onde o ar atmosférico também participa da reação. A característica da chama utilizada depende diretamente da relação entre o gás combustível e comburente, utilizando então para a regulação da chama a razão entre os volumes dos gases na zona de combustão primária, conforme mostrado na Equação 1:

Equação 1- Equação utilizada pra regulação da chama no processo de soldagem.

$$a = \text{regulagem da chama} = \frac{\text{volume do comburente (oxigenio)}}{\text{volume do combustivel (gás)}}$$

A partir disto a chama pode ser definida como neutra, redutora e oxidante. Para a chama neutra são utilizadas as vazões entre 1,0 e 1,1 e esta é caracterizada por um penacho longo, dardo branco e arredondado. A chama redutora utiliza vazões abaixo de 1,0 e possui penacho esverdeado com um dardo circundado por um véu branco. Já a chama oxidante utiliza vazões acima de 1,1 e é caracterizada por possuir penacho azulado ou esverdeado, dardo pequeno e pontiagudo e ruído característico (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). As características e tipos de chama são ilustrados na Figura 9.

Figura 9- Ilustração das partes e tipos de chama



Fonte: (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Sendo:

- Chama (a) = neutra;
- Chama (b) = redutora;
- Chama (c) = oxidante.

Para que um gás possa ser utilizado para a soldagem ele necessita apresentar, quando queimado, baixa reação química entre a chama e materiais utilizados, alta taxa de propagação da chama, elevada temperatura e calor suficiente para a junção, sendo o gás acetileno o que mais se encaixa nestes requisitos. A Figura 11 mostra os principais gases utilizados para a soldagem e suas características (BRACARENSE, 2000).

Figura 10- Gases combustíveis mais utilizados e suas características

Gás	Fórmula	G.E. (Ar=1 à 15.6°C)	V.E. (m ³ /kg)	R. E.	T _{chama} (°C)	Calor de Combustão		
						1 ^o MJ/m ³	2 ^o MJ/m ³	total MJ/m ³
Acetileno	C ₂ H ₂	0.906	0.91	2.5	3087	19	36	55
Propano	C ₂ H ₃	1.52	0.54	5.0	2526	10	94	104
Metil Acetileno Propadieno (MPS)	C ₃ H ₄	1.48	0.55	4.0	2927	21	70	91
Propileno	C ₃ H ₆	1.48	0.55	4.5	2900	16	73	89
Metano	CH ₄	0.62	1.44	2.0	2538	0.4	37	37
Hidrogênio	H ₂	0.07	11.77	0.5	2660	-	-	12

Fonte: (BRACARENSE, 2000).

Sendo:

- G.E = gravidade específica;
- V.E= volume específico;
- R. E= razão estequiométrica.

2.4 Ensaios de Caracterização Envolvendo Compósitos

Os compósitos poliméricos utilizados nas construções na indústria espacial devem atingir os critérios de elevada resistência mecânica e baixa massa específica para serem utilizados em substituição de alumínio, titânio e aços especiais na fabricação de peças. Porém, essas novas peças, antes de serem utilizadas, necessitam serem analisadas por meio de ensaios para verificação de suas propriedades (MAZUR, 2010).

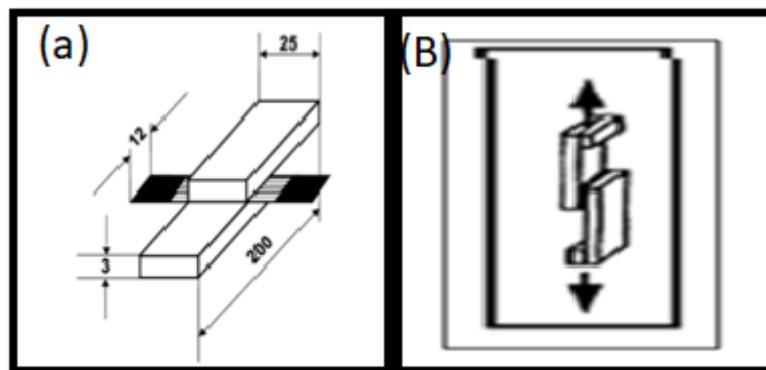
Há várias alternativas e métodos de avaliação envolvendo compósitos, dentre elas dois grupos se distinguem: ensaios mecânicos e técnicas de avaliação por análises térmicas e ensaios morfológicos. Nos ensaios mecânicos, dois métodos de análise são mais amplamente utilizados quando se trata de juntas soldadas de material compósitos, sendo teste de *Lap Shear* teste de resistência ao cisalhamento DCB. Já o segundo grupo é utilizado normalmente para

analisar a qualidade do interior do material tais como: DSC (calorimetria exploratória diferencial); técnicas de microscopia e ultrassom (ABRAHAO, 2015).

2.4.1 *Lap Shear(LSS)*

É o ensaio mais comumente utilizado para testar a resistência de juntas soldadas de materiais compósitos. O teste consiste em submeter o corpo de prova à sollicitação de tração longitudinal até a ruptura. A norma que costuma basear este ensaio é a ASTM D 1002 (ABRAHAO, 2015). Na Figura 11 são apresentadas respectivamente as dimensões do corpo de prova utilizado e a esquematização do ensaio *Lap Shear*.

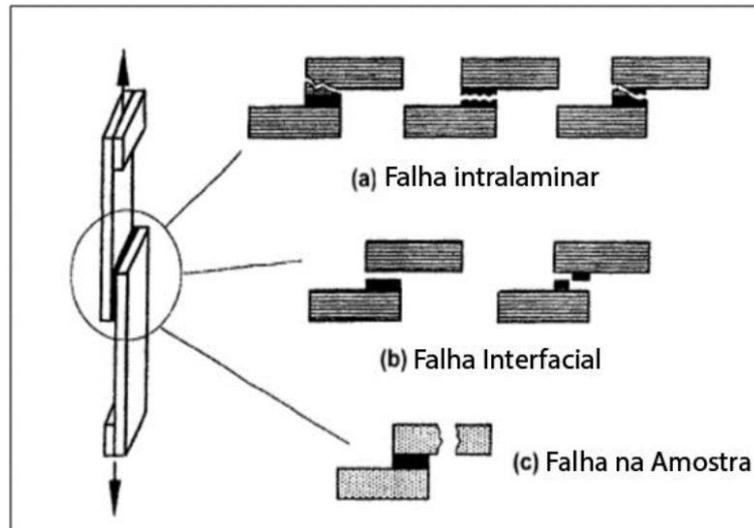
Figura 11- a) Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio *Lap Shear* b) esquematização do ensaio



Fonte: (STAVROV; BERSEEM 2014; AGEORGES; YE, 2001).

As falhas em materiais compósitos podem ser determinadas pelos danos que ocorrem na fratura, que podem ser definidos como quebra das fibras, trinca da matriz ou delaminação interlaminar. Os tipos de danos causados são diretamente ligados à orientação das fibras do compósito e à aplicação da carga do ensaio. As fraturas podem ser definidas em três tipos: a interlaminar, que consiste na interação entre as partes soldadas; a interfacial, que ocorre entre o elemento resistivo e o laminado; e na amostra, que ocorre no material em si fora da área soldada (REZENDE, 2007; SOUZA, 2013). Na Figura 12 são apresentados os tipos de fraturas em juntas soldadas de materiais compósitos.

Figura 12- Tipos de fraturas em materiais compósitos.



Fonte: (QUAN, 2016).

A fratura intralaminar ocorre na estrutura com grandes quantidades de material, sendo geralmente acompanhada de elevados valores de resistência mecânica obtidos no ensaio *Lap shear*. A fratura interfacial ocorre entre as interfaces dos materiais laminados, comumente apresentam baixos valores de resistência, o que evidencia uma deficiência no processo de soldagem (QUAN, 2016).

2.5 Degradação de Materiais Compósitos

O termo corrosão pode ser definido como a deterioração dos materiais através de uma reação química ou eletroquímica, sendo sua ocorrência geralmente em materiais metálicos (GENTIL, 2011).

De acordo com Callister e Rethwish (2016) os materiais plásticos e plásticos reforçados com fibras também apresentam deterioração quando exposto ao ambiente, porém através de processos não corrosivos, e para esta é dado o nome de degradação. A deterioração destes materiais é dada através de um processo físico-químico, sua deterioração ocorre através de processos químicos (oxidação das ligações químicas), degradação térmica e ação de solventes.

Segundo ABMACO (s.d) a resina polimérica quando em um compósito tem por função a transferência de esforços para a fibra e a proteção desta em meios agressivos, retardando a absorção destes. Entretanto, quando em exposição a estes ambientes a interface

fibra-resina pode facilitar a entrada destes agentes resultando na degradação do compósito. Quanto maior for a porcentagem da fibra, maior é o volume da interface, tornando mais acentuada a penetração do ambiente agressivo, sendo este efeito chamado de “Cavalo de Tróia”. Para que seja possível medir a vida útil de um material compósito é necessário que os ambientes a que são expostos sejam classificados não pela agressividade, mas sim pelo poder de penetração no material. Sendo assim, os ambientes podem ser classificados em três categorias:

- Não-penetrantes: são aqueles que atacam apenas a superfície do material e, para que as laminas internas sejam atingidas, é necessário antes destruir as que permanecem mais próximas da superfície; mantendo assim as laminas mais profundas intactas e conservando suas propriedades. Como exemplo destas condições, temos os ambientes abrasivos, fogo e raios UV.
- Semipenetrantes: possuem pouco poder de penetração, atacando as fibras superiores e mantendo as internas intactas. Sendo citado como ambiente semipenetrantes os produtos químicos utilizados nas áreas industriais.
- Penetrantes: atacam todas as fibras do laminado independente de suas respectivas localizações. Os ambientes penetrantes mais conhecidos são os solventes, como a água.

2.6 Condições ambientais de serviço

Por trabalhar em grandes altitudes, as aeronaves acabam sendo expostas as mais variadas condições atmosféricas, o que pode resultar na perda de suas propriedades originais, como incidência de raios UV, baixas temperaturas, variações de umidade e exposição a ambientes ácidos (ROSA, 2017).

Quando expostos a elevadas temperaturas e umidade pode ocorrer a degradação hidrolítica das cadeias poliméricas, a formação de ligações cruzadas e a plasticização da matriz, enquanto que quando expostas a atmosferas salinas pode ocorrer a perda das propriedades mecânicas devido à degradação da interface fibra/matriz polimérica. Estes efeitos podem ser reversíveis, quando expostos a um curto período de tempo, ou irreversíveis, quando expostos a longos ciclos (COSTA; BOTELHO; PARDINI, 2011; ROSA, 2017).

As condições ambientais as quais os materiais compósitos são submetidos durante o uso acabam conseqüentemente dificultando a análise de propriedades mecânicas. Para que os

resultados dos ensaios mecânicos obtidos em laboratório sejam coerentes com os resultados apresentados em serviço, se torna necessário que as amostras sejam submetidas ao condicionamento ambiental, que simula as condições de trabalho durante o voo (ROSA, 2017).

2.6.1 Efeitos agressivos para resistência química

Ainda que exista pouca literatura especificando o efeito de ambientes ácidos na vida útil de materiais compósitos poliméricos, questões como chuva ácida não só como fator ambiental é um fenômeno que causa a degradação de todas as classes de materiais. De acordo com Celi (2019) e Magalhães (s.d) a chuva ácida é considerada um dos principais problemas ambientais em países mais desenvolvidos industrialmente, sendo ela resultado da combinação da queima de combustíveis fósseis e poluentes despejados na atmosfera com a água precipitada das nuvens. A queima de combustíveis fósseis libera óxidos ácidos e a interação destes com a água da chuva geram soluções diluídas em ácido, como o sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3). A chuva ácida provoca diversos problemas para a sociedade em geral, como:

- Contaminação do lençol freático;
- Corrosão na pintura de veículos;
- Extinção de alguns animais e vegetais;
- Degradação de construções e monumentos históricos.

Considerando os materiais compósitos este tipo de ambiente é classificado como semi-penetrante, ou seja, atinge apenas a superfície do material e apenas se a degradação causada for alta chega a atingir também as fibras internas. Exemplos desse ambiente são produtos químicos encontrados na maioria das aplicações industriais e também englobados ambientes de vapores ácidos encontrados na atmosfera (ABMACO, [s.d])

2.7 Ensaios de condicionamento ambiental

2.7.1 Condicionamento Higrotérmico

A ação da umidade do ambiente associado a temperatura é uma das situações mais atuantes em compósitos estruturais, sendo neste caso a matriz polimérica o componente mais afetado, pois esta absorve as moléculas de água em sua estrutura (DAMATO, 2010). Como a água possui afinidade com grupos de natureza polar sua presença pode causar degradação das

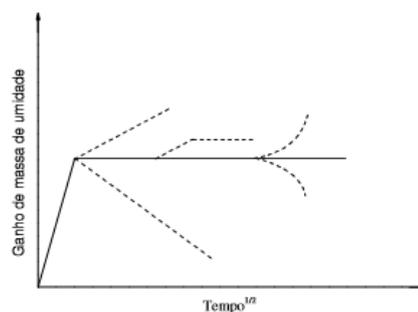
interações físico-química entre a matriz e a fibra, consequentemente causando o descolamento das fibras e alteração nas propriedades mecânicas e físicas do compósito (DA COSTA, 2011).

A absorção de umidade pela matriz polimérica, quando exposta a ambientes quentes e úmidos, pode ocorrer através de alguns mecanismos, que são: absorção por difusão de Fick, difusão acelerada através de vazios ou trincas e difusão acelerada por capilaridades pela interface fibra/resina (DA COSTA, 2011).

Segundo Mazur (2010) o mecanismo de difusão de moléculas de água em matriz polimérica é geralmente representado utilizando a 2ª lei de Fick. Esta teoria é baseada na hipótese de que o fluxo de umidade é proporcional ao gradiente de concentração, e pode ser dividida em três categorias:

- Difusão Fickiana: conforme é ilustrado na figura 13, a taxa de difusão é menor que a mobilidade dos segmentos de cadeia. Neste caso o equilíbrio de sorção rapidamente se estabiliza.
- As taxas de difusão e mobilidade são maiores comparadas aos processos de relaxação das cadeias. O processo de sorção é dependente da cinética de intumescimento da matriz.
- Difusão anômala ou não Fickiana: ocorre quando a mobilidade de permeação da água e relaxação dos segmentos das cadeias são comparáveis. Os polímeros são analisados no estado vítreo ou em temperaturas próximas, onde o segmento tem pouca mobilidade.

Figura 13-Curva do ganho de massa de umidade para sistemas fickianos (linha cheia) e não fickianos (linha pontilhada).



Fonte: (RUFFNER, 2001)

Para que se possa determinar a qual categoria pertence o material é utilizado a Equação 2:

Equação 2- Equação utilizada para determinação da categoria do material

$$\frac{M_T}{M_\infty} = kt^n$$

Considerando:

- M_T = ganho de massa com relação ao tempo,
- M_∞ = ganho de massa no equilíbrio,
- K e n constantes.

Sendo que nesse sistema o valor de $n \sim 1/2$ para sistemas fickianos e valores distantes de $1/2$ para sistemas anômalos.

De acordo com Damato (2010), neste caso a água penetra na matriz polimérica por meio do processo de difusão, sendo a absorção interrompida quando a concentração de equilíbrio entre o material e meio ambiente é atingida. Essa movimentação das moléculas dentro da matriz é fator responsável pela difusão de umidade de uma região de maior concentração para uma de menor concentração. Como consequência da difusão a resistência a tração, cisalhamento e rigidez tem seus valores reduzidos.

2.7.2 Condicionamento Ultravioleta (UV)

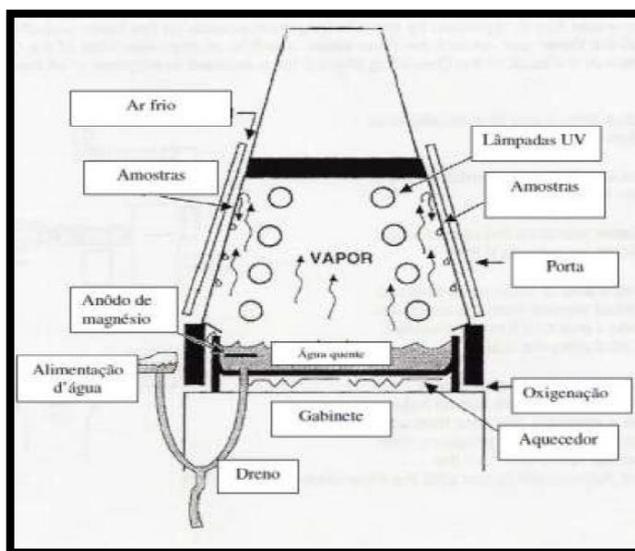
A ação dos raios UV em polímeros podem causar a falhas prematura deste quando em serviço. A radiação solar nos materiais poliméricos tem como consequência a ocorrência de reações oxidativas que resultam na degradação do material, causando alterações em suas características físicas (fragilização mecânica e formação de fissuras) e alterações químicas como a formação de novos grupos químicos e diminuição da massa molar (OLIVEIRA et al, 2012; RABELLO; WHITE, 1997).

A exposição de materiais poliméricos a este meio pode promover a cura durante a manufatura, entretanto quando se trata de materiais compósitos estruturais esta exposição pode resultar na fotodegradação, sendo esta as consequências da absorção dos raios

ultravioletas por materiais poliméricos, causando reações oxidativas, redução de seu peso molecular e alterações em sua estrutura química. A velocidade da fotodegradação nos polímeros depende dos fatores ambientais, estruturas químicas e físicas do material, composição química e transmissão dos raios UV (SILVA, 2011; RABELLO; WHITE, 1997; QUAN 2016).

Os raios ultravioletas com comprimento de onda entre 100 e 400nm são uns dos principais causadores de degradação em materiais poliméricos. Em alguns polímeros a radiação faz com que haja um aumento na excitação eletrônica podendo causar cisão molecular e/ou formação de ligações cruzadas. A cisão se trata do rompimento das ligações entre cadeias moleculares, causando a separação dos segmentos da cadeia polimérica. A radiação UV age na superfície do compósito favorecendo a formação de ligações cruzadas superficiais causando a fragilização do material e aparecimento de microtrincas (MAZUR, 2010; SILVA, 2011). A Figura 14 apresenta esquematicamente o processo do ensaio ultravioleta.

Figura 14- Ilustração esquemática da máquina de condicionamento ultravioleta.



Fonte: (QUAN, 2016)

A radiação ultravioleta associada com a umidade pode aumentar ainda mais a degradação do material polimérico. As microtrincas geradas pela exposição do material facilitam a penetração da umidade para o interior do material. O vapor d'água gerado pode

remover produtos solúveis provenientes das reações foto-oxidativa e expõe novas superfícies a radiação (QUAN, 2016).

O comportamento de materiais compósitos quando expostos a radiação UV é ainda um campo pouco explorado, devido à complexidade das interações entre os componentes e os produtos oriundos da degradação (OLIVEIRA et al, 2012).

2.8 Planejamento Experimental

Há diversos modos de se obter a melhoria de um processo com a utilização da estatística, mais precisamente, pode ser realizado através de um planejamento experimental (ABRAHÃO, 2015).

O planejamento experimental representa um conjunto de ensaios com critérios estatísticos e científicos predeterminados, com o objetivo de indicar a influência de determinadas variáveis nos resultados de um determinado processo (DUARTE, MEOLA; 2007). De acordo com Abrahão (2015) as variáveis podem ser controláveis ou não, ainda que estas possam ser controladas para testes, sendo denominados de ruídos os fatores não controláveis.

Segundo Galdámez (2002), o planejamento experimental tem como objetivo melhorar a qualidade de processos e produtos, reduzir o número de testes necessários e aperfeiçoar a utilização de recursos da empresa; sendo este objetivo ainda dividido em outros objetivos secundários como:

- Identificar parâmetros que mais influenciem nas respostas do processo;
- Determinar valores para as variáveis que atuam no processo, para que variabilidade da resposta seja mínima ou que o resultado seja aproximado do valor nominal;
- Determinar valores as variáveis do processo, de modo que seja reduzido o efeito das variáveis não controláveis.

2.8.1 Otimização de Processos

Utilizando as ferramentas estatísticas de planejamento experimental é possível a criação de um modelo matemático que, quando validado, pode ser utilizado para a determinação da superfície de resposta, podendo assim determinar as condições otimizadas do

processo, conhecendo as significâncias estatísticas das respostas (RODRIGUES e IEMMA, 2005; NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Uma situação que envolva a otimização de processo refere-se quando há o objetivo de resolução através de uma função, que é utilizada para minimizar e maximizar o valor de uma variável que apresente o desempenho do processo. Considerando que a otimização consiste em determinar os melhores valores das variáveis, para a obtenção do melhor valor da variável resposta de interesse. Sendo a técnica considerada mais eficiente para este fim à chamada Metodologia de superfície de resposta ou MSR (ABRAHÃO, 2015).

2.8.2 Técnica de Superfície de Resposta (MSR)

Nos seguimentos industriais é frequente a existência de fatores e variáveis que afetam o resultado do produto final, por este motivo vem sendo estudado, desde 1970, a metodologia de superfície de resposta (DUARTE, MEOLA; 2007). Essa metodologia consiste em um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas na análise de situações em que há a influência de diversas variáveis, buscando a otimização. Basicamente, a técnica consiste em determinar coeficientes de regressão polinomial, gerando assim um modelo empírico, para que seja possível aproximar este a uma relação entre os fatores e respostas do processo (DUARTE, MEOLA; 2007; Comparini, *et. al* [s.d]).

De acordo com Gandámez (2002) A metodologia de superfície de resposta é uma técnica que pode ser utilizada também na modelagem de processos em que há um número variado de características da qualidade, sendo também conhecidas como otimização de multi-respostas. As principais razões para utilizar a MSR são:

- Determinar as condições dos fatores que resultam em uma melhor resposta;
- Necessidade da determinação das características da função resposta, sendo esta que se aproxima das condições de operação do sistema;
- A identificação da relação entre os parâmetros e as respostas do processo.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Materiais

3.1.1 Laminados

Foram utilizados amostras do laminado PEI/Fibras de carbono, nas dimensões 100x25 mm, confeccionados com tecidos na configuração 8 HS com espessuras nominais entre 2mm a 3,5mm, e com configuração (0/90)5s contendo, aproximadamente, 50% em volume de matriz.

3.2 Metodologia

3.2.1 Planejamento Experimental

No desenvolvimento do planejamento experimental foram utilizadas as condições mínimas (40 mm e 40s) e máximas (60 mm e 60s) das variáveis tempo e distância na soldagem do compósito polimérico PEI/Fibra de carbono, sendo definidas por Santos e Carvalho (2018), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros mínimos e máximos utilizados na soldagem do PEI/Fibra de carbono pelo processo oxiacetileno

Tempo mínimo	Tempo máximo	Altura mínima	Altura máxima
40s	60s	40 mm	60 mm

Fonte: (SANTOS, CARVALHO, 2018).

Para a otimização do processo foi utilizado o planejamento experimental *Central Composite Design* (CCD) e o experimento fatorial completo, onde foram analisadas a influência das variáveis de entrada nos resultados obtidos no processo.

Foi utilizado o fatorial completo 2^2 , com dois níveis e duas variáveis (tempo e distância), utilizando um design com determinado número de pontos centrais e axiais (pontos abaixo e acima dos níveis determinados). Neste trabalho foram analisadas 4 replicatas do

ponto central e 8 replicatas dos pontos axiais, sendo que em um CCD os pontos axiais totalizam o dobro do número de fatores envolvidos no experimento, ou seja, $2 \times 2 = 4$.

3.2.2 Soldagem Oxiacetileno

Para a soldagem foi utilizado o conjunto de cilindros Oxiacetileno, utilizando a chama neutra com vazões de $1,0 \text{ kgf/cm}^3$ de acetileno e de $0,5 \text{ kgf/cm}^3$ de oxigênio. Durante o processo de soldagem de materiais compósitos é de grande importância manter o controle da temperatura, sendo utilizado para este fim um pirômetro óptico, da marca INSTRUTHERM. Para a realização da soldagem as amostras foram posicionadas e fixadas em um dispositivo que consiste em dois tijolos refratários, mostrado na Figura 15, possuindo dois orifícios para a passagem da chama.

Figura 15- Dispositivo utilizado na soldagem com dimensões



Fonte:(AUTOR, 2019).

Para que não haja a degradação do material compósito a ser soldado pela chama é utilizada a liga de Alumínio 2024 como protetor e condutor térmico, sendo está inserida entre a amostra e os orifícios circulares do dispositivo.

3.2.3 Ensaio de Condicionamento Ambiental

Para a realização dos ensaios de condicionamento Higrotérmico e ultravioleta as amostras foram submetidas a um processo de secagem em estufa a vácuo da marca Quimis, modelo Q819V2, para que porcentagem de água absorvida durante o condicionamento fosse precisa. Elas foram pesadas e colocadas em estufa á 80°C , durante um período de 12 horas,

até que ocorresse a estabilização da massa e a presença de umidade fosse mínima. A perda calculada através da Equação 3.

Equação 3- Calculo utilizado para determinação da perda de massa das amostras.

$$\% \text{ perda de massa: } \frac{(M_u - M_s)}{M_u}$$

Onde:

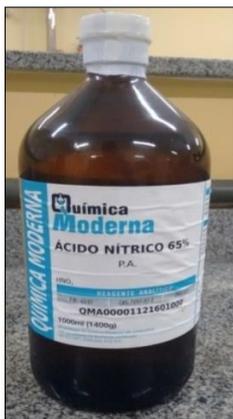
- M_u = massa úmida
- M_s = massa seca

Para ensaio de condicionamento em ácido as amostras, após a soldagem, foram imersas em ácido nítrico com concentração de 65% pelo período de 48 horas.

3.2.3.1 Condicionamento em Meio Ácido

Para condicionamento ambiental foi utilizado á imersão em ácido Nítrico 65% da empresa Química Moderna, apresentado na Figura 16, devido a este causar grande degradação quando em contato com a fibra de carbono. Foram imersas em ácido Nítrico juntas soldadas durante um período de 2 dias (48 horas), para verificação da resistência do polímero e da proteção proporcionada por este a fibra.

Figura 16- Ácido nítrico utilizado no ensaio de imersão



Fonte:(AUTOR, 2019).

3.2.3.2 Condicionamento Higrotérmico

O ensaio de condicionamento ambiental hidrotérmico é um teste gravimétrico, onde é controlado o ganho de umidade na amostra em função do tempo, utilizando a medida de mudança de massa nas amostras de acompanhamento (FARIA, CIOFFI, BOTELHO, 2012).

Após o processo de soldagem, as juntas foram colocadas para condicionamento em uma câmara higrotérmica da marca Marconi modelo MA 835/UR, apresentada na Figura 17, com temperatura de 80 °C e umidade relativa de 90%. Os ensaios foram realizados na UNESP de Guaratinguetá, e baseando-se nas normas ASTM D5229/ D522 m-04.

Figura 17- Equipamento utilizado para ensaio de condicionamento Higrotérmico.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Para acompanhamento do ganho de massa, as amostras de acompanhamento foram pesadas durante todo o período de condicionamento. Sendo pesadas diariamente até o 7 dia, depois a cada 4 dias, e por fim uma vez a cada 7 dias, até que seja notada a estabilização das massas, sendo então retiradas e pesadas todas as amostras. O valor do ganho de massa é obtido através da Equação 4.

Equação 4-Cálculo utilizado para determinação do ganho de massa das amostras

$$\% \text{ Ganho de Massa: } \frac{(M_u - M_s)}{M_s} 100$$

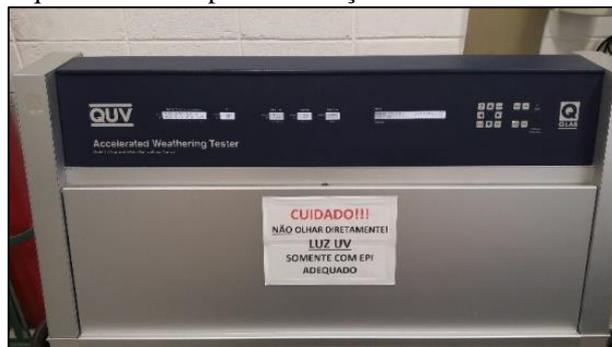
Onde:

- M_u = massa úmida
- M_s = massa seca

3.2.3.3 Condicionamento Ultravioleta (UV)

As amostra permaneceram expostas ao condicionamento ultravioleta no equipamento da marca Q-Lab modelo QUV durante 1.200 horas, com um ciclo de 8 radiações UV e 4 horas de condensação. Os ensaios foram realizados na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, baseando-se na norma ASTM G154. A máquina utilizada para a realização do ensaio é apresentada na Figura 18.

Figura 18- Máquina utilizada para realização do condicionamento ultravioleta.



Fonte: (AUTOR, 2019).

3.2.4 Caracterização Mecânica

3.2.4.1 *Lap Shear (LSS)*

O teste *Lap Shear (LSS)* é considerado como sendo o método mais utilizado para a investigação da resistência de ruptura de juntas soldadas de materiais compósitos. Este método consiste em aplicação de força de tração em corpos de prova soldados até a ruptura. Para a determinação dos valores de resistência é necessária a utilização da Equação 5, utilizando-se dos dados obtidos na máquina durante o ensaio. (STAVROV; BERSEE, 2005).

Equação 5- Equação utilizada para determinação da resistência mecânica do material após ensaio *Lap shear*.

$$T = \frac{F_{m\acute{a}x}}{L.b} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Onde:

- T = Tensão de ruptura (N/mm^2),
- L = comprimento da sobreposição da solda (mm),
- b = largura da sobreposição (mm)
- $F_{m\acute{a}x}$ = força máxima de tração (N).

Este método será utilizado com a finalidade de se determinar a variável resposta do planejamento experimental e para analisar a resistência do material após exposição ao ambiente agressivo. Os ensaios serão realizados na máquina universal de ensaios da SHIMADZU, modelo AG-X, com uma célula de carga de 50 KN, baseando-se nas normas ASTM D1002-10 e ASTM D2344. As amostras serão posicionadas nas garras da máquina de ensaio universal e tracionadas a 1,5 mm / min (0,05 in / min) até a falha ocorrer. O equipamento utilizado para a realização do ensaio *Lap Shear* é apresentado na Figura 19.

Figura 19- Máquina utilizada para realização do ensaio *Lap shear*.



Fonte: (AUTOR, 2019).

3.2.5 Caracterização Microestrutural

Como procedimento para o preparo das amostras para análises microscópicas o material foi primeiramente embutido em resina poliéster da marca AROTEC tipo P1, utilizando um catalisador da marca AROTEC, mostrados na Figura 20. Posteriormente, as amostras embutidas foram lixadas em lixas d'água com granulometria de 300, 600 e 1200, seguido de polimento com pasta de diamante de granulometria de 6 μm . As amostras após o embutimento a frio são apresentadas na Figura 21.

Figura 20- Resina e catalisador utilizados para embutimento a frio.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 21- Amostras embutidas.

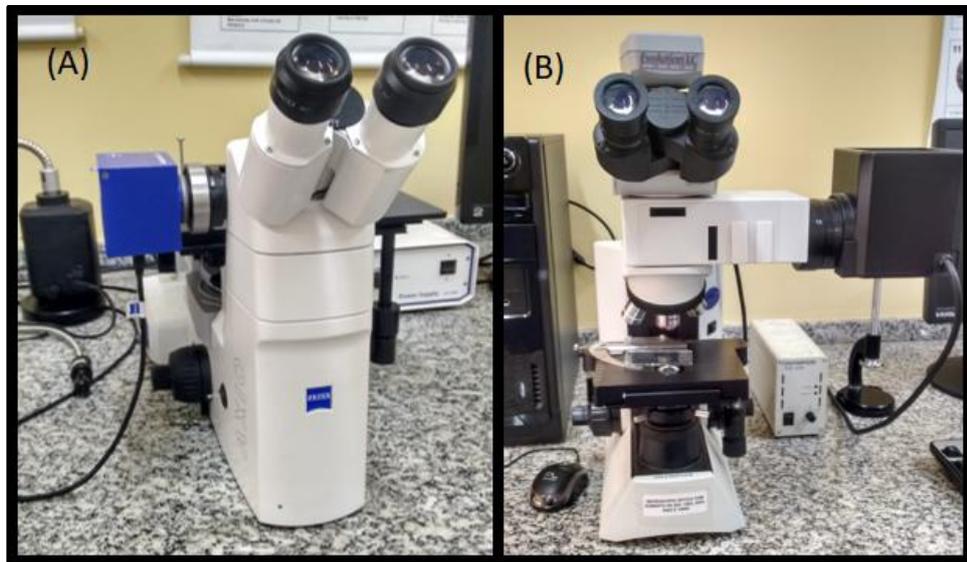


Fonte: (AUTOR, 2019).

3.2.5.1 Microscopia Óptica

Para a caracterização dos laminados e avaliação da eficiência do processo de soldagem por resistência, serão realizadas análises por microscopia óptica utilizando um microscópio óptico da marca ZEISS modelo VERT A1 com aumento de 50x a 1000x, apresentado na Figura 22 (A) e um microscópio da marca Evolution LC color, com aumento de 50x a 1000x, apresentado na Figura 22 (B).

Figura 22- Microscópios utilizados.

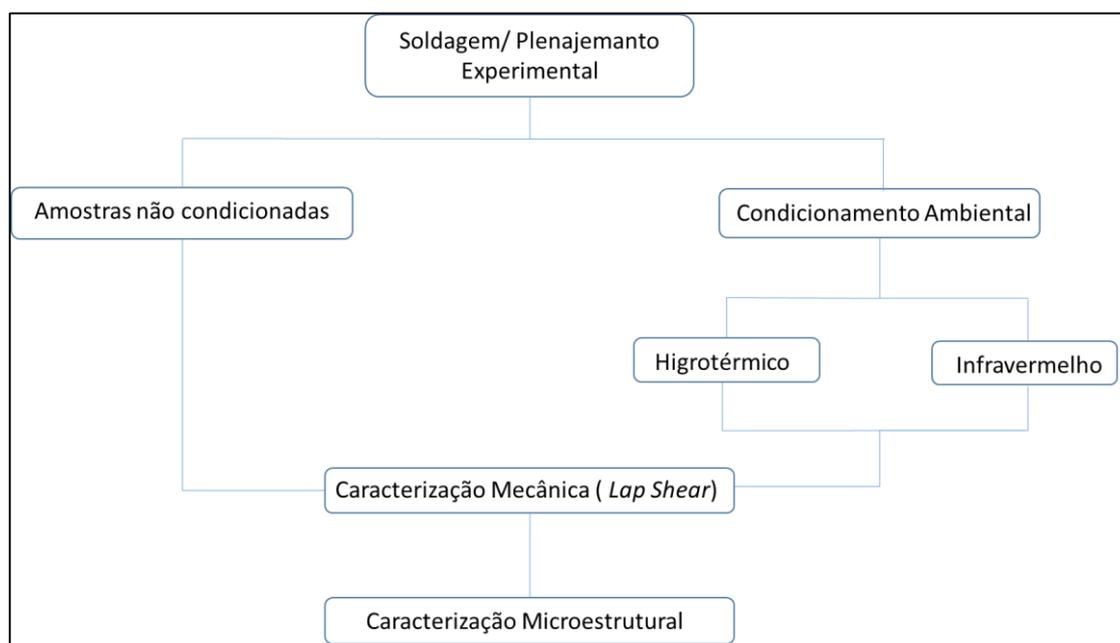


Fonte: (AUTOR, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A parte experimental deste trabalho consistiu primeiramente em realizar um planejamento experimental do tipo fatorial completo 2^2 , onde objetivou determinar as melhores condições de soldagem do compósito para se obter o valor mais elevado de resistência mecânica. Posteriormente as amostras foram submetidas a condicionamentos ambientais para caracterização do material soldado para simular sua aplicação em condições de serviço. A Figura 23 mostra o panorama geral da parte experimental deste trabalho.

Figura 23- Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



Fonte: (AUTOR, 2019).

4.1 Planejamento Experimental

A Tabela 2 apresenta a matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*Lap Shear*) obtidos nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de carbono. Os valores obtidos encontram-se na faixa de 2,17 (apresentado em vermelho) a 15,82 MPa (apresentado em azul).

Tabela 2- Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*Lap Shear*).

Testes	Distancia (mm)	Tempo (s)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	50,00	64,14	2,80
2	50,00	50,00	15,82
3	60,00	40,00	7,00
4	50,00	50,00	15,21
5	40,00	40,00	12,05
6	35,86	50,00	2,17
7	40,00	60,00	7,37
8	60,00	60,00	14,92
9	50,00	35,86	6,71
10	64,14	50,00	7,10
11	50,00	50,00	13,70
12	50,00	50,00	9,87

Fonte: (AUTOR, 2019).

Por se tratar do ponto médio foram realizadas soldas em um maior número de amostras nos parâmetros de 50 milímetros de distância e tempo de 50 segundos, sendo que estas apresentaram maior valor de tensão no ensaio de *Lap Shear*, que mesmo utilizando os mesmos parâmetros na soldagem das amostras pertencentes ao ponto médio (50 mm e 50s), estas não apresentaram resultados de tensão homogêneos devido à imprecisão da chama do maçarico.

A amostra soldada com a menor distância (35.86 mm/ 50 s), e a amostra com maior tempo (50 mm/ 64.14 s), apresentaram os menores resultados de tensão dentre todos os parâmetros ensaiados. Nas soldagens em que foi utilizada a distância de 60 mm, as amostras apresentaram valores de tensão muito divergentes entre si. Enquanto que nas amostras soldadas com 40 mm de distância apresentaram valores de tensão mais homogêneos apesar de menores.

Devido a fatores não controláveis no processo, como exatidão da chama, foi encontrada grande diferença entre os resultados obtidos, se tornando necessário outros testes e a soldagem de mais amostras para a definição do melhor parâmetro.

Com base nos resultados obtidos dos ensaios com a variável resposta (*Lap Shear*), foi possível, utilizando o programa estatístico, analisar as variáveis significativas deste processo. Os resultados obtidos são analisados com o programa *Design-Expert 6.0* (*Stat-Ease Corporation, USA*) e, através da análise de variância (ANOVA), foi possível determinar quais fatores influenciam ou não na resposta do processo, sendo estes dados apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem do compósito PEI/fibra de carbono

Fator	Soma Quadrática	F	"Prob> F"
Modelo	204,10	6,70	0,02
A	4,36	0,72	0,43
B	1,37	0,23	0,65
A ²	7,69	1,26	0,30
B ²	153,12	25,14	0,00
AB	45,16	7,41	0,03
Erro residual	36,54		
Falta de Ajuste	24,78	2,11	
Erro Puro	11,76		
R ²	240,65		

Fonte: (AUTOR, 2019).

Onde:

- A = distância da chama;
- B = tempo de soldagem.

Os valores de "**Prob> F**" que forem inferiores a 0,0500 indicam que os parâmetros influenciam diretamente na variável resposta, e os valores maiores que 0,1000 indicam que os termos do modelo não influenciam.

No estudo deste processo com o material avaliado, os termos de tempo quadrático, tempo e distância da chama e o modelo foram significativos, como apontados acima na Tabela 3. A variação dos valores isoladamente de tempo ou distância da chama não gerará alteração da resistência mecânica da junta.

Adicionalmente pelos resultados da variância (ANOVA) verificou-se que o modelo estatístico proposto é significativo, representando satisfatoriamente o processo para o material em um nível de significância de 95%.

4.1.1 Otimização do Processo de Soldagem

Ainda por meio dos resultados obtidos na análise de variância (ANOVA) foi possível construir um modelo estatístico incluindo os coeficientes dos parâmetros significativos para o processo de soldagem, apresentados na Equação 6.

Equação 6- Equação utilizada para definição dos parâmetros otimizados.

$$Lap\ Shear = +14,84 - 4,89 B^2 + 3,36 A \cdot B$$

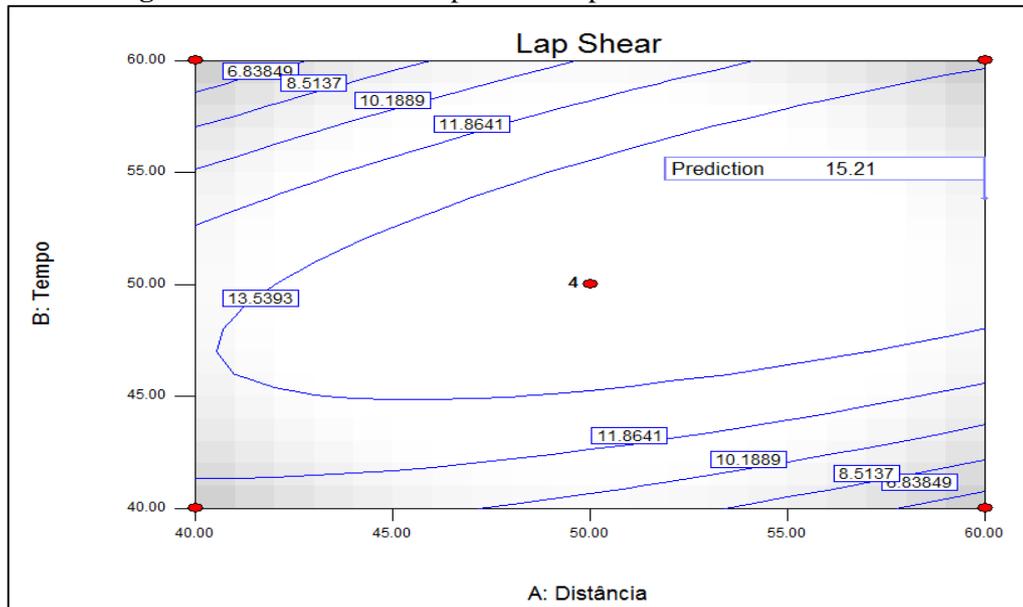
Onde:

- A = Distância da chama;
- B = Tempo de soldagem

Para a estimativa dos coeficientes definidos pela equação, geralmente se utiliza o método dos mínimos quadrados (OLS), que busca definir o melhor ajuste para um conjunto de dados, buscando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. Dessa forma é construída uma função que associa as respostas com as variáveis do processo.

Utilizando o programa Design-Expert, foram obtidos os valores máximos de resistência dentro dos parâmetros estudados, foram construídos gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis buscando-se os maiores valores de *Lap Shear*. As Figuras 24 e 25 mostram as superfícies de resposta com as regiões de otimização.

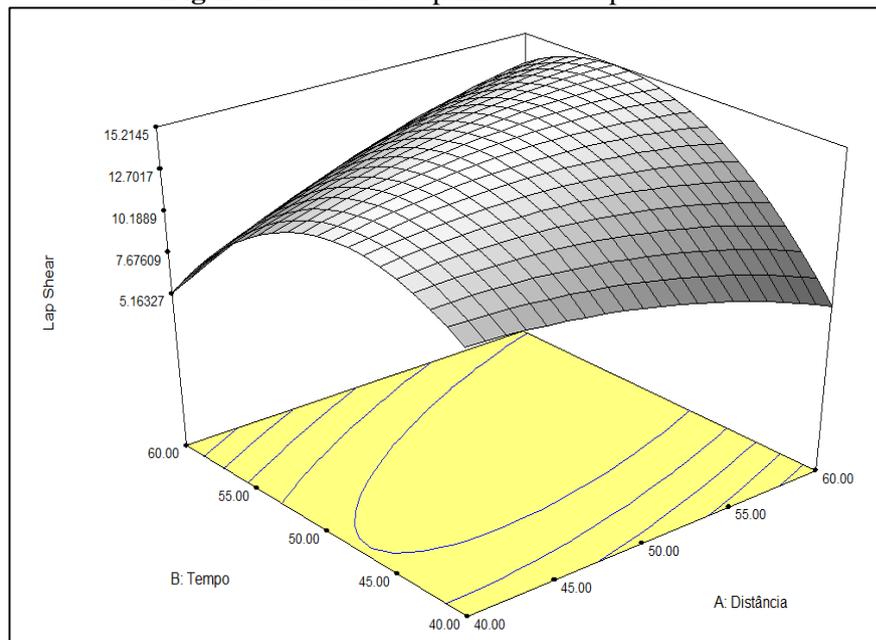
Figura 24- Curvas de Nível para o Compósito PEI/Fibra de Carbono



Fonte: (AUTOR, 2019).

Na Figura 24 é apresentado os parâmetros de tempo e distância utilizados no planejamento experimental e seus respectivos resultados de resistência mecânica obtidos por a partir do ensaio *Lap Shear*. Por meio dele é também possível obter uma previsão de valores de resistência em cada parâmetro dentro da faixa determinada.

Figura 25- Gráfico Superfície de Resposta



Fonte: (AUTOR, 2019).

Na Figura 25 é apresentada a curva de superfície de resposta com os respectivos valores de resistência, onde é indicado o melhor parâmetro determinado pelo programa a partir da elevação do gráfico.

Pela análise das curvas de nível e superfície de resposta pode-se sugerir, dentro dos cálculos estatísticos realizados pelo programa, que para a realização da soldagem pelo processo oxiacetileno os melhores parâmetros a serem utilizados são a distância de 60 mm e o tempo de 64 s, obtendo-se um valor de resistência mecânica de 15,21 MPa.

Para a realização deste trabalho foi utilizado para a soldagem os melhores parâmetros reais definidos, devido e estes resultarem em um maior valor de resistência mecânica obtidos durante o planejamento experimental, sendo eles 50 mm de distância da chama e 50 segundos.

4.2 Caracterização mecânica das juntas com e sem Condicionamentos Ambientais

4.2.1 Imersão das juntas em meio ácido

4.2.1.1 *Lap Shear (LSS)*

Com a obtenção das juntas nas condições de soldagem obtidas por planejamento experimental, foi realizado o ensaio mecânico de LSS afim de verificar a influência da exposição em meio ácido na resistência mecânica. Foram então realizadas as análises das amostras após o período ao qual permaneceram em imersão no período de 2 dias em ácido nítrico. Para o ensaio as amostras foram limpas com água corrente e álcool etílico, para em seguida serem submetidas ao ensaio *Lap Shear*. Os resultados de resistência mecânica obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Valores de resistência mecânica obtidos através do ensaio *Lap Shear* antes e após a imersão em ácido Nítrico.

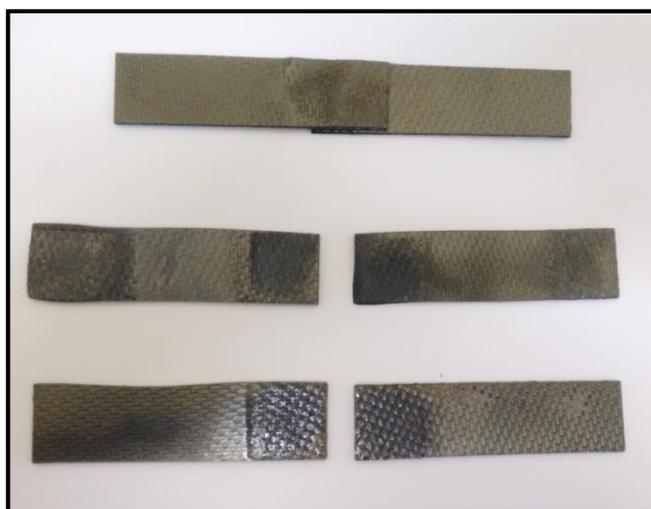
<i>LapShear (MPa)</i>		
Amostra	Material como recebido	Após Imersão Ácida
1	14,22	Rompimento da junta
2	14,12	Rompimento da junta
3	15,82	3,37
Média	14,72	1,12
Desvio padrão	0,67	

Fonte: (AUTOR, 2019).

Através do ensaio *Lap Shear* foi possível observar, na amostra 3 após imersão em ácido, uma grande diminuição da resistência mecânica do material quando comparada a do material como recebido, cerca de 12,25 MPa.

Nas amostras 1 e 2 houve o rompimento total das amostras logo após serem retiradas do ensaio de imersão, devido ao ataque do agente agressivo nas juntas, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26- Amostras Soldadas após o ensaio de imersão em ácido nítrico

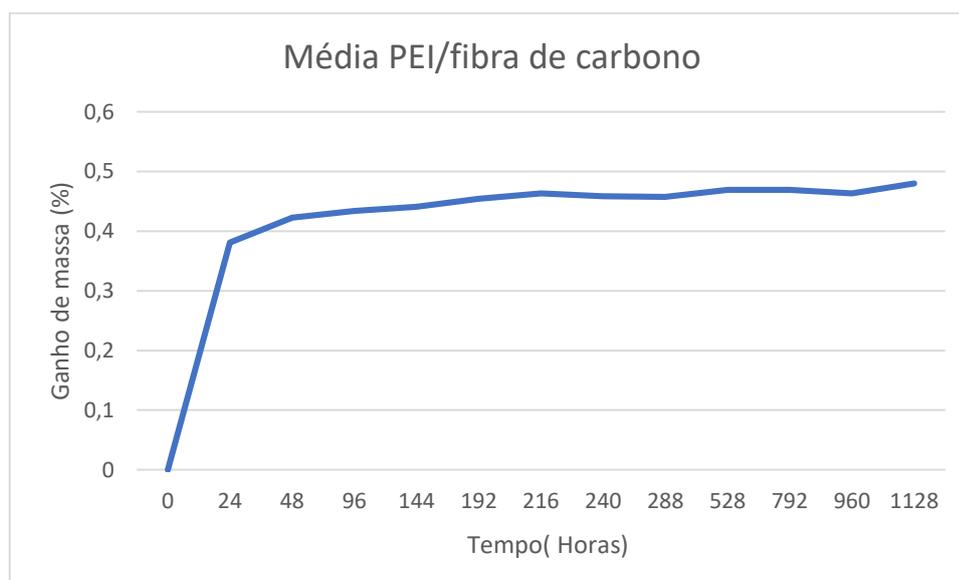


Fonte: (AUTOR, 2019).

4.2.2 Condicionamento Higrotérmico

Os efeitos causados pela ação da umidade em materiais compósitos devem ser levados em consideração na realização de um projeto. Através da difusão a umidade penetra na fase matriz do material até que o equilíbrio seja atingido, sendo esse processo acentuado quando em conjunto com a temperatura. A absorção de umidade pode gerar a expansão da matriz polimérica causando lesões internas, podendo resultar na redução da resistência mecânica e rigidez do material, gerando também mudanças nas características físico-química da matriz (QUAN, 2016). A Figura 27 apresenta o ganho de massa em função do tempo em gramas para amostras do material PEI/ fibra de carbono soldadas pelo processo oxiacetileno, e a Figura 28 apresenta o ganho de massa das amostras em porcentagem.

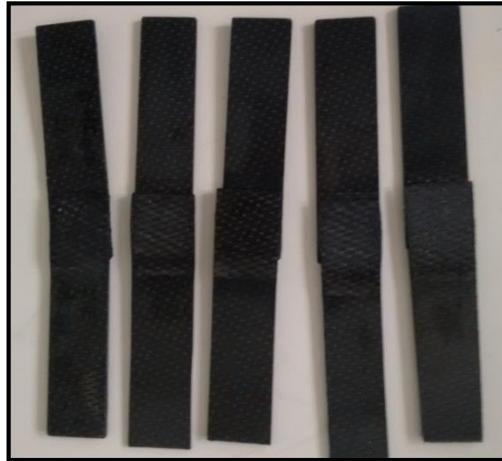
Figura 27-Ganho de massa em porcentagem das amostras submetidas ao condicionamento Higrotérmico



Fonte: (AUTOR, 2019).

Analisando-se as curvas obtidas observa-se que o ganho de umidade pelas amostras cresce com o tempo, sendo este, cerca de 0,48%. Na primeira semana de ensaio as amostras absorveram a água mais rapidamente, até que se atinja um estado chamado de pseudo-equilíbrio. No final do ensaio é notado um ganho de massa das amostras devido a absorção de umidade que e depois de certo tempo tente a penetrar a matriz polimérica através do processo de difusão, tornando a absorção de umidade mais lenta, como visto por Quan (2016) e Reis (2016). Na Figura 29 são apresentadas as amostras após o termino do ensaio Higrotérmico.

Figura 28-Amostras retiradas após condicionamento Higrotérmico.



Fonte: (AUTOR, 2019).

4.2.2.1 Lap Shear (LSS)

Após a estabilização do ganho de massa das amostras submetidas à câmara de climatização higrotermica foi realizado o ensaio mecânico *LapShear* para a verificação da resistência da junta pós-ensaio de condicionamento, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5- Resistência mecânica das amostras submetidas a condicionamento Higrotérmico

<i>LapShear (MPa)</i>		
Amostra	Material como Recebido	Condicionamento Higrotérmico
1	14,22	8,70
2	14,12	11,37
3	15,82	10,30
4	15,55	9,10
5	14,58	6,42
Média	14,85	9,18
Desvio padrão	0,70	1,67

Fonte: (AUTOR, 2019).

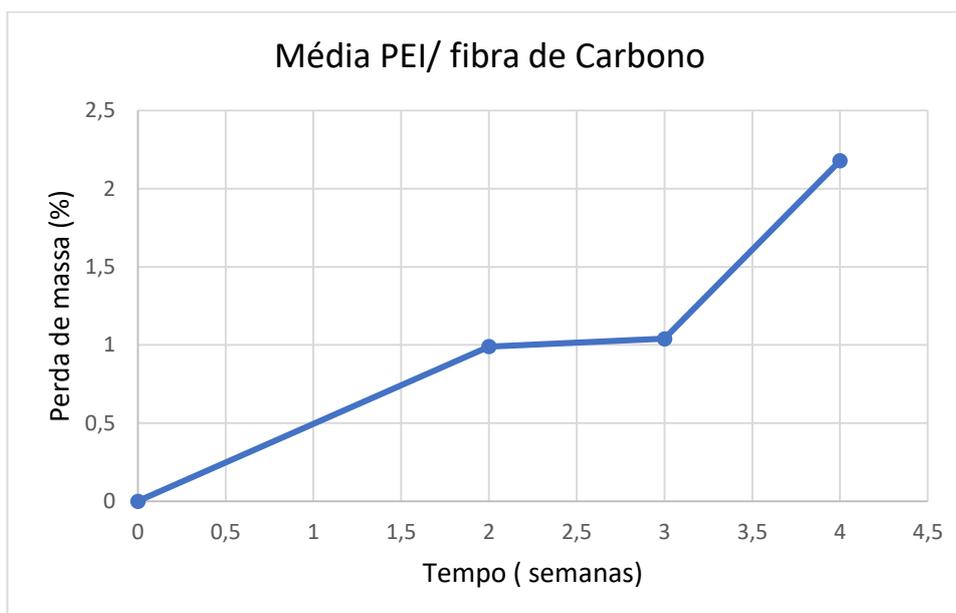
Na Tabela 5 observa-se que os valores de resistência mínimos e máximos obtidos no ensaio *Lap shear* das amostras não condicionadas foram de 14,12 MPa e 15,82 MPa, respectivamente.

Nos compósitos condicionados esses valores foram de 6,42 MPa e 11,37 MPa. Foi observado uma queda de resistência mecânica das amostras condicionadas quando comparadas com as do material como recebido, correspondente em média a 38,18%.

4.2.3 Condicionamento Ultravioleta (UV)

Após o ensaio de ultravioleta, obteve-se uma curva onde foi possível verificar o comportamento do material durante o período de exposição de 5 semanas. Na primeira semana houve um ganho de massa nas amostras, sendo de em torno de 0,33 %. Na Figura 30 é apresentado a curva de perda de massa do material submetido ao condicionamento UV, considerando a partir da segunda semana que houve efetivamente o efeito deste condicionamento na degradação do material.

Figura 29- Perda de massa do material submetido ao condicionamento UV.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Observou-se que na primeira semana houve um ganho de massa na amostra, de 14,28 g para 14,33 g, provavelmente devido á absorção de umidade pelo laminado. Já entre a segunda e terceira semana constatou-se a perda de massa, de 14,33 g para 14,14 g. Entre a terceira e quarta semana a massa permaneceu sem muita variação, enquanto que da quarta para a quinta semana está perdeu cerca de 0,16 g. A partir disto é possível observar a ocorrência de perda de massa de aproximadamente 2,51 %.

Possivelmente a perda de massa do material após condicionamento UV se dá pela liberação de moléculas de água e voláteis, e também pela degradação do material pela foto-oxidação, causada pela radiação (BATISTA; BOTELHO, 2009).

4.2.3.1 *Lap Shear (LSS)*

Para a verificação do efeito do condicionamento UV na resistência das juntas soldadas foi realizado o ensaio *Lap Shear*, sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Valores de resistência mecânica das amostras com e sem exposição ao condicionamento ambiental.

<i>Lap Shear (Mpa)</i>		
Amostra	Material como Recebido	Condicionamento Ultravioleta
1	14,22	5,20
2	14,12	2,40
3	15,82	0,85
4	15,55	14,39
5	14,58	9,47
Média	14,85	6,46
Desvio padrão	0,70	4,93

Fonte: (AUTOR, 2019).

Analisando-se a tabela com os valores de resistência obtidos observa-se uma queda significativa na resistência mecânica do material condicionado quando comparado ao material como recebido, cerca de 56,48 %. As amostras do material como recebido apresentaram valores entre 14,12 MPa e 15,82 MPa, enquanto que as amostras submetidas ao condicionamento UV apresentaram valores entre 0,85 MPa e 14,39 MPa.

4.3 Caracterização morfológica das amostras fraturadas

Para a caracterização e para complementação da análise dos efeitos de condicionamento ambientais nas juntas soldadas, após o rompimento das amostras pelo ensaio mecânico de *Lap Shear* as amostras fraturadas com e sem condicionamento ambiental

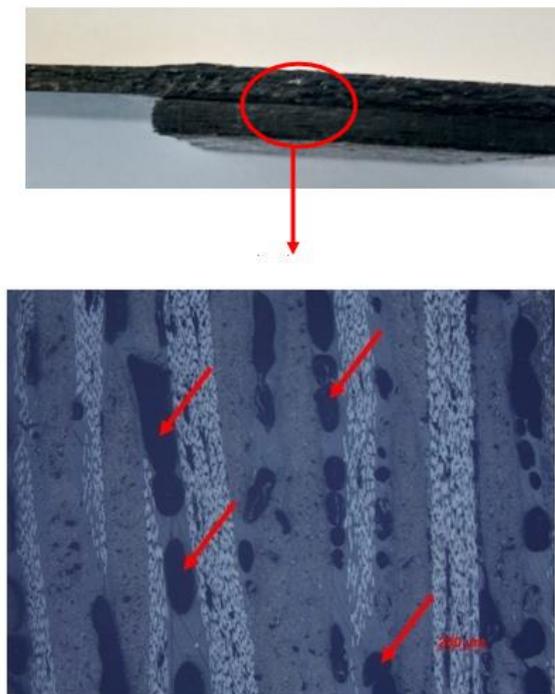
foram analisadas por microscopia ótica, sendo os resultados apresentados nas seções que seguem.

4.3.1 Amostras sem condicionamento

Após a realização do ensaio *Lap shear* nas amostras sem exposição aos condicionamentos ambientais foi observado a ocorrência da fratura do tipo Intralaminar.

Foi analisada a microestrutura das amostras de juntas sem a exposição ao condicionamento ambiental, para verificação posterior comparativa. A microestrutura da amostra da junta rompida no ensaio LSS do material como recebido soldado que apresentou maior valor de resistência está apresentada na Figura 31.

Figura 30-Microscopia ótica da amostra que apresentou maior valor de resistência obtido com ampliação de 50x.



Fonte: (AUTOR, 2019)

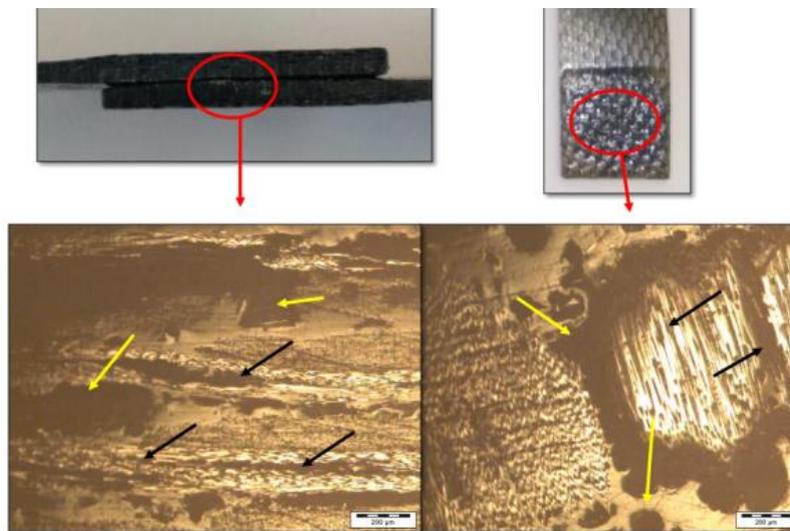
A Figura 31 evidencia maior quantidade de vazios na região polimérica soldada (matriz do material compósito), indicados pelas setas vermelhas, o que explica maior resistência mecânica obtida por não haver muita degradação da fibra, que pode ser comprovado por menores áreas de vazios apresentados na região da fibra.

4.3.2 Caracterização da amostra após imersão em ácido

Através da análise visual das amostras após condicionamento em meio ácido foi possível observar uma mudança na coloração destas, passando do preto para um tom amarelado, isto devido à absorção do ácido nítrico pela matriz polimérica.

Após o ensaio de imersão em ácido Nítrico foi realizada a análise por meio de microscopia ótica. Na Figura 32 é apresentado estrutura da amostra 1 na ampliação de 50x

Figura 31- Microscopia da amostra 1 após ensaio de imersão em meio ácido com ampliação de 50x.

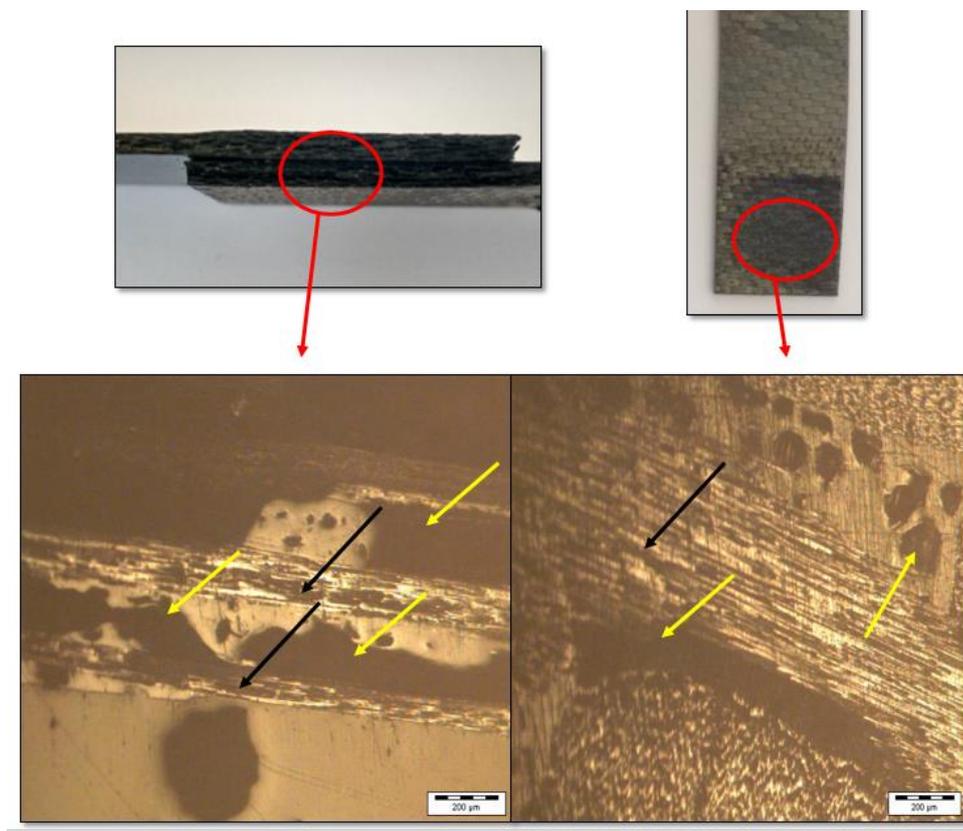


Fonte: (AUTOR, 2019).

A partir da análise microscópica foi observada a presença de grande quantidade de vazios presentes na resina polimérica (setas amarelas) com um tamanho maior do que comparado com a amostra que não foi submetida aos condicionamentos. Adicionalmente, foram identificadas diversas áreas de degradação da fibra de carbono (setas pretas) resultado da presença de uma abertura entre as interfaces soldadas e do efeito “Cavalo de Tróia”, causando grande degradação do polímero e o ataque à região fibrosa, ocasionando a quebra das fibras (setas pretas) e conseqüentemente perda da resistência mecânica como discutido na seção 4.2.1.

Foi realizada a microscopia ótica na junta soldada que foi submetida ao ensaio de *lap shear*, para avaliação da absorção do ácido e degradação da fibra. A Figura 33 mostra a microscopia da amostra.

Figura 32-Microscopia da amostra 3 após *LapShear* com ampliação de 50x.



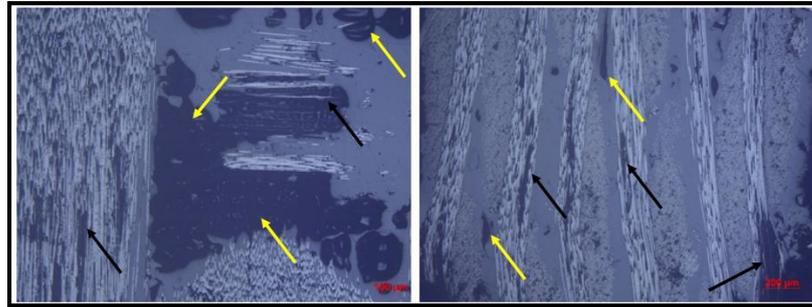
Fonte: (AUTOR, 2019).

Na amostra 3 rompida foi observado a presença de grande quantidade de vazios na resina (setas amarelas) devido a absorção do ácido. Foi observado também uma menor degradação da área fibrosa, quando comparada a amostra 1, devido a uma melhor proteção desta pela resina.

4.3.3 Condicionamento Higrotérmico

Para a análise do efeito do condicionamento ambiental nas juntas soldadas foi realizada a análise microscópica das amostras que apresentaram maior e menor valor de resistência mecânica (6,42 MPa e 11,37 MPa). Na Figura 34 é apresentada a microscopia da amostra que apresentou menor valor de resistência no ensaio *Lap Shear*.

Figura 33- Microscopia da amostra que apresentou menor valor de resistência com ampliação de 50 X.

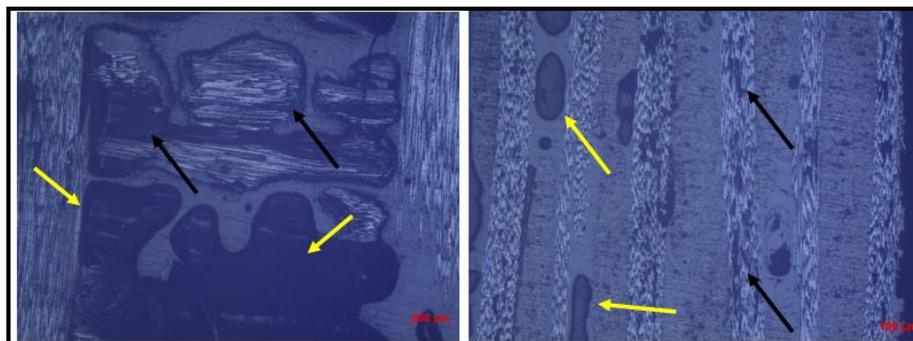


Fonte: (AUTOR, 2019).

Na imagem é notada a presença de vazios na matriz polimérica (setas amarelas), isto devido à absorção de água que gera aumento do volume livre da matriz polimérica, resultando na expansão das cadeias macromoleculares por plasticização, reduzindo as ligações secundárias do material diminuindo a resistência mecânica e rigidez do material, conforme visto por REIS (2016). Observa-se também que em algumas regiões há a quebra de fibras (setas pretas) devido à difusão Fickiana que segundo Faria (2008), é a quebra das cadeias pela difusão da umidade no compósito; atingindo e degradando a fibra resultando na diminuição da resistência mecânica.

Percebe-se também que a queda na resistência mecânica entre as amostras condicionadas analisadas se dá por uma deficiência no processo de soldagem devido à presença de ruídos (variáveis não controláveis do processo), que influenciam diretamente na qualidade da junta. A Figura 35 apresenta a microscopia da amostra que apresentou maior valor de resistência após ser submetida ao condicionamento higrotérmico.

Figura 34- Microscopia da amostra que apresentou maior valor de resistência com ampliação de 50 X.



Fonte: (AUTOR, 2019).

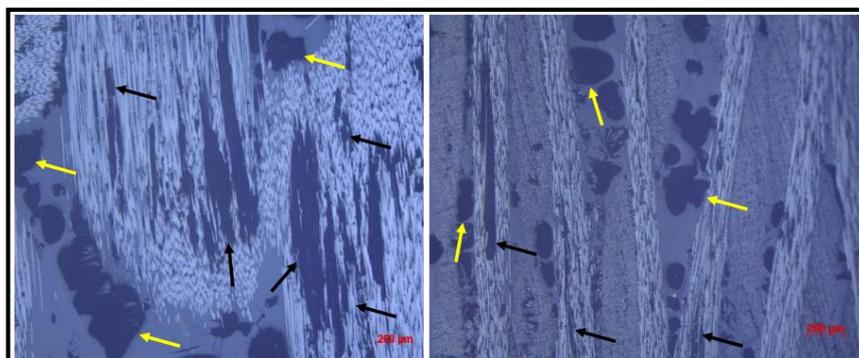
Através da microscopia da amostra é possível observar também a presença de vazios na região da matriz (setas amarelas) e de quebras nas regiões fibrosas (setas pretas). Os vazios na resina se dão pela plasticização e também pela eficiência do processo de soldagem, onde este forneceu uma união efetiva resultando num maior valor de resistência mecânica.

Quando comparada a microscopia das amostras submetidas ao condicionamento Higrotérmico com a do material como recebido observa-se que no material condicionada há uma maior presença de vazios na matriz e a expansão das fibras devido a difusão da umidade e quebra das cadeias o que, de acordo com Quan (2016) resulta na diminuição da resistência e rigidez do material.

4.3.4 Caracterização da amostra após condicionamento Ultravioleta (UV)

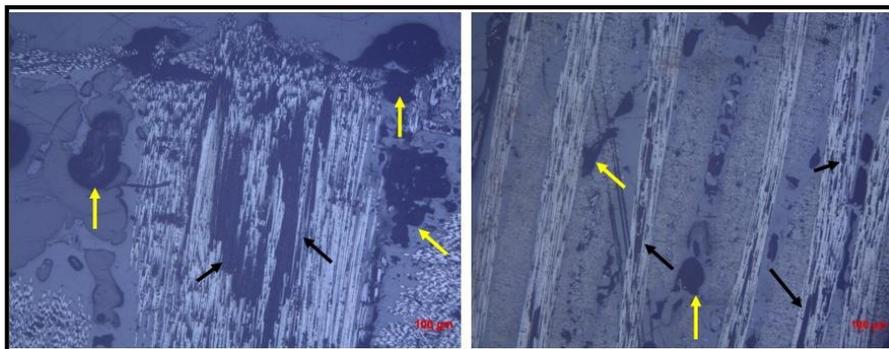
Na análise de microscopia ótica foram utilizadas as amostras condicionadas que apresentaram os valores de resistência de 2,4 MPa e 14,39 MPa, representando respectivamente o menor e maior valor de resistência encontrados. É possível ver no gráfico que a amostra 3 condicionada apresentou menor valor de resistência (0,85 MPa), entretanto esta não foi utilizada para análise devido a apresentar um valor muito discrepante com relação as outras, provavelmente devido a deficiências provenientes do processo de soldagem. A microscopia das amostras com menor e maior valor de resistência são apresentados nas Figuras 36 e 37 respectivamente.

Figura 35- Microscopia da amostra condicionada por ultravioleta que apresentou menor valor de resistência, com ampliação de 50X.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 36- Microscopia da amostra condicionada por ultravioleta que apresentou maior valor de resistência, com ampliação de 50X.



Fonte: (AUTOR, 2019)

Analisando-se as imagens obtidas através da microscopia ótica é possível verificar que a ação da umidade juntamente com os raios ultravioletas gerou grandes vazios na fase matriz e causou degradação da área fibrosa, devido á liberação de moléculas de água e pela foto-oxidação; tendo isto resultado na elevada queda de resistência mecânica do material condicionado quando comparado com o recebido. De acordo com Oliveira (2012) a radiação ultravioleta, se tratando de um ambiente não-penetrante causa a degradação superficial de materiais compósitos. Entretanto, neste caso a soldagem causou uma fragilização permitindo assim a penetração dos raios UV, causando a degradação das fibras internas do material.

5. CONCLUSÃO

A partir do planejamento experimental e da análise de variância foi possível determinar as melhores condições para a soldagem do compósito PEI/Fibra de Carbono pelo processo oxiacetileno, sendo, entretanto, utilizados neste trabalho os parâmetros reais (que apresentaram maior valor de resistência mecânica) indicados pelo programa.

Após o ensaio de condicionamento ambiental em meio ácido, foi observado uma mudança na coloração das amostras devido a absorção do ácido, e o rompimento de duas juntas devido a penetração do ambiente agressivo entre as interfaces soldadas. Através do *Lap Shear* foi evidenciado uma diminuição significativa da resistência mecânica da junta, e por meio da microscopia ótica foi observado a degradação da fibra, devido a absorção do ácido nítrico entre a interface fibra-resina.

No ensaio de condicionamento ambiental Higrotérmico observou-se um ganho de massa inicial nas primeiras 24 horas de ensaio. Após este período o material atingiu o pseudo-equilíbrio, onde passou a absorver a umidade mais lentamente e em menor quantidade até que sua massa passou a ser estável. Notou-se também a ocorrência de uma diminuição significativa da resistência mecânica devido á plasticização da resina e da quebra de fibras devido a difusão Fickiana.

No ensaio de condicionamento ultravioleta foi observado um ganho de massa entre a primeira e segunda semana de ensaio, enquanto que entre a segunda e quinta semana houve uma queda de massa devido á fotodegradação. Notou-se também uma queda significativa na resistência mecânica do material devido a degradação causada pela radiação ultravioleta.

Quando comparadas as microscopias dos ensaios de condicionamento realizados com a das amostras do material como recebido foi observado que tanto no ensaio UV quanto no de imersão em meio ácido não houve muito a degradação da matriz polimérica, enquanto que na amostra do condicionamento Higrotérmico ficou evidenciado a presença de grandes vazios na resina devido á absorção da umidade. Tanto nos ensaios de imersão em ácido, higrotérmico e UV foi observada também a ocorrência da degradação da fibra em grandes dimensões, isto provavelmente devido ao processo de soldagem, que causou a fragilização das juntas permitindo assim a penetração e ação dos condicionamentos nas fibras internas do material.

5.1. Sugestão de trabalhos futuros

- Realizar outros tipos de ensaios mecânicos para análise da junta soldada obtida nas melhores condições de soldagem;
- Realizar o condicionamento ambiental em juntas de outro compósito polimérico utilizando a técnica de oxiacetileno.
- Estudo de outras juntas obtidas por outras técnicas utilizando os condicionamentos ambientais deste trabalho.

5.2. Produção acadêmica

5.2.1. Simpósio

X Simpósio de Tecnologia e IV jornada da Iniciação Científica. ANÁLISE MICROESTRUTURAL COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES ATAQUES PARA O AÇO INOX DUPLEX UNS 31803. 2017.

XI Simpósio de Tecnologia e V jornada da Iniciação Científica. SOLDAGEM MADEIRA POR FRICÇÃO ROTACIONAL DIRETO. 2018.

XI Simpósio de Tecnologia e V jornada da Iniciação Científica. PROJETO DE UM DEIONIZADOR DE ÁGUA PORTÁTIL DE BAIXO CUSTO. 2018.

5.2.2. Congressos

V CIMATECH - Congress of Industrial Management and Aeronautical Technology. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR OXIACETILENO PARA COMPÓSITO PEI FIBRA DE CARBONO. 2018.

V CIMATECH - Congress of Industrial Management and Aeronautical Technology. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA5083 NA CORROSÃO EM AMBIENTE SALINO. 2018.

5.2.3. Artigos científicos

CINTRA, I. L. R.; RIBEIRO, M. P. S.; KUROTAKI, L. K.; ABRAHÃO, A. B. R. M., BOTELHO, E. C.; MARQUES, L. F. **Otimização do processo de soldagem por oxiacetileno para compósito PEI/fibra de carbono.** Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo. Vol. 38. pp. 14-18, 2019.

RIBEIRO, M.P.S.*, ABRAHÃO, A. B. R.M. SILVA, L. L. G. SARTORI, A. SANTOS, R. F. CINTRA, I. L. R. **Avaliação da influência do aquecimento da liga de alumínio AA5083 na corrosão em ambiente salino.** Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo. Vol. 38. pp. 14-18, 2019.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, A. B. R. M. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. 2015. 200f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

AGEORGES, C.; YE, L.; HOU, M. **Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 839-857, 2001

ALEXANDRINO, E. M. **Compósitos poliméricos de poli (éter imida) / polianilina: preparação e caracterização**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS (ABMACO). **Compósitos 1: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. [s.d].

ASTM D1002-10(2019), **Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)**, ASTM International, West Conshohocken, PA,

ASTM G154-16, **Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org. DOI: 10.1520/G0154-16.

BARROS, A. F. **Preparação, caracterização físico-química e avaliação do comportamento térmico e mecânico de blendas de poli (tereftalato de etileno) (PET) e poli (éter imida) (PEI), PET/PEI'**. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

BATISTA, N.L.; BOTELHO, E.C. **Influência do intemperismo no desempenho visco elástico de laminados PEI/fibras de Carbono com aplicações aeroespaciais**. Congresso Brasileiro de polímeros, 2009, Iguazu.

BRACARENCE, A. C. **Processo de Soldagem Por Chama Oxi-gás – OFW**. Belo Horizonte. 2000. Apostila de Soldagem.

CALLISTER, W. D., RETHWISH D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMPOS, M. C. **Revestimento a Frio e a Quente de Laminados Compósitos Poliméricos de Fibra de Carbono para Resistência a Abrasão Severa**. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia– UNESP campus Bauru. Bauru. 2018.

CELI, R. **Chuva ácida: o que é, causas e consequências**. 2019. Disponível em: <<https://www.stoodi.com.br/blog/2019/02/27/chuva-acida-o-que-e/>>. Acesso em: 26/06/2019.

COMPARINO, A. PASSOS, G. GRAZIADEI, H. SILVA, P. H. F. LOUZADA, F. **Metodologia De Superfície De Resposta: Uma Introdução Nos Softwares R Estatística.** São Carlos. USP. [s.d].

COSTA, A.P. BOTELHO, C. E. PARDINI, L.C. **Efeito da Degradação Ambiental nas Propriedades de Cisalhamento de Compósitos PPS/Fibra de Carbono.** Vol 21, nº 3, p. 161-167. 2011.

DA COSTA, A.P. **Efeito do condicionamento ambiental em compósitos soldados de PPS/Fibras contínuas.** 2011. 134f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica-Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

DAMATO, Cesar Augusto. **Efeito do condicionamento ambiental nas propriedades de cisalhamento e visco elásticas de compósitos híbridos metal fibra.** 2010. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

DUARTE, M. A. V. MEOLA, T. **Curso de Planejamento Experimental. Uberlândia-MG.2007.**

FARIA, M. C. M. **Avaliação Do Efeito Higrotérmico Nas Propriedades Mecânicas De Compósitos De PPS/Fibras Contínuas.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 166 f. 2008.

FARIA, M. C. M.; CIOFFI, M. O. H.; BOTELHO, E. C. "Análise do efeito higrotérmico no comportamento em fadiga de compósitos de PPS/fibras de carbono." *Polímeros* (2012).

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos.** 2002. 133 f. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

LEITE, V. R. Estado Da Arte Dos Materiais Compósitos Na Indústria Aeronáutica. **Revista Ciências Exatas,** Taubaté, Vol 20, Nº2. 2014.

MAGALHÃES, L. **Chuva ácida.** Disponível em: < <https://www.todamateria.com.br/chuva-acida/>>. Acesso em: 26/06/2019.

MARQUES, L.S. NARITA, N. E. DA COSTA, G. G. **Avaliação dos Comportamentos Mecânico e Térmico de Laminados de PPS/Fibra de Carbono Processados em Autoclave sob Diferentes Ciclos de Consolidação.** São José dos Campos, Vol 20, nº 4, p 309-314. 2010.

MAZUR, R. L. **Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas.** 2010. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

NETO, B.N; SCARMINIO, I.S; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos**. 4ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2010.

OLIVEIRA, C. F. P. DEMARQUETTE, N. R. CARASTAN, D. J. - Fotodegradação de compósitos de poliestireno/argila montmorilonita: efeito do tipo de argila e presença de sal. *Revista Polímeros*. 2012.

QUAN, N. D. G. "Análise comparativa da performance de elementos resistivos na soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras de carbono." (2016): 114-f.

RABELLO, M. S.; WHITE, J. R. Fotodegradação do Polipropileno. Um Processo Essencialmente Heterogêneo. *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 1997.

REIS, J. F.. **Influência do condicionamento higrotérmico no comportamento mecânico de compósitos soldados de PEI/fibras de carbono**. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

REZENDE, M. C. **Fractografia de Compósitos Estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia. São José dos Campos**. Vol 17, nº 3. 2007. Disponível em :<<http://www.scielo.br/pdf/po/v17n3/003.pdf>>. Acesso em 24 fev 2007.

RODRIGUES, M.I; IEMMA A.F. **Planejamento de experimentos e Otimização de processos uma estratégia sequencial de planejamentos**. Editora Casa do Pão, Campinas 2005.

ROSA, B. M. **Avaliação Do Condicionamento Higrotérmico Em Compósitos Fibra De Carbono/Epóxi E Titânio Anodizado**. 73 f. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SANTOS, A. L. **Estudo Da Modificação Superficial De Fibras De Carbono Por Meio De Tratamentos A Plasma Para O Aumento Da Adesão Na Interface De Compósitos De Fibra De Carbono/PPS**. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SANTOS, B.A. CARVALHO, J. A. **Estudo dos parâmetros para soldagem do compósito PEI/ fibra de carbono pelo processo oxiacetileno**. Monografia. Tecnologia Mecânica: Processos de Soldagem, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba. 2018.

SOUZA, S.D.B. **Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de PPS/Fibras contínuas com aplicações aeronáuticas**. 2013. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica- Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013

STAVROV D, BERSEE HEN. **Experimental investigation of resistance welding of thermoplastic composites with metal mesh heating element**. SAMPE-Europeconferenceproceedings, Paris, France; 2004.

VIEIRA, P. R.; VIEIRA, J.; CARVALHO, E. M. Análise das propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro. **ENGEVISTA**, V. 18, n. 2, p. 363-374, Dez 2016.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processo e metalurgia**. São Paulo: Edgard Bluncher Ltda., 1992.

WISE, R.J. **Thermal Welding of polymers**. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 1999.

YOUSEFPOUR, A.; HOJJATI, M.; IMMARIGEON, J.-P. **Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites**. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 17, n. 4, p. 303–341, 2004.