

NATÁLIA DI GIUSEPPE QUAN

**Análise comparativa da performance de elementos resistivos na soldagem por
resistência elétrica em compósitos PEI/fibras de carbono**

Guaratinguetá - SP
2016

NATÁLIA DI GIUSEPPE QUAN

**Análise comparativa da performance de elementos resistivos na soldagem por
resistência elétrica em compósitos PEI/fibras de carbono**

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

Orientadora: Prof^ª Dr^a. Michelle Leali Costa
Coorientadora: Mse Samia Danuta Brejão de Souza

Guaratinguetá - SP
2016

Q1a

Quan, Natália Di Giuseppe

Análise comparativa da performance de elementos resistivos na soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras de carbono / Natália Di Giuseppe Quan – Guaratinguetá, 2017.

114 f. : il.

Bibliografia: f. 111-114

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientadora: Profª. Drª Michelle Leali Costa

Coorientadora: Profª Drª Samia Danuta Brejão de Souza

1. Soldagem. 2. Trabalhos em chapas de metal. 3. Materiais compostos. I. Título

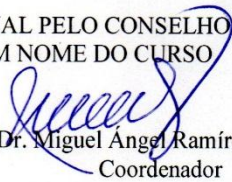
CDU 621.791

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

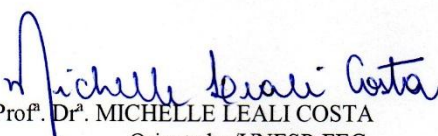
NATÁLIA DI GIUSEPPE QUAN

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

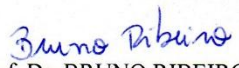
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. Miguel Ángel Ramírez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^ª Dr.^ª MICHELLE LEALI COSTA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
UNESP-FEG


Prof. Dr. BRUNO RIBEIRO
Membro Externo

Dezembro de 2016

DADOS CURRICULARES

Natália Di Giuseppe Quan

NASCIMENTO	22.11.1992 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Quan Poe Mam Vanda Di Giuseppe Quan
2012/2017	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá UNESP-FEG

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À Unesp de Guaratinguetá, a todos os seus funcionários e professores.

À minha orientadora, Prof. Dra. Michelle Leali Costa, que sempre me incentivou e auxiliou desde o início do projeto de pesquisa.

À Samia Danuta Brejão de Souza e à Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão, por todo auxílio e apoio na pesquisa.

Aos técnicos da Unesp de Guaratinguetá, obrigada por toda a ajuda dada a este trabalho:

Wilson Roberto Monteiro, Manoel Francisco dos S Filho, Domingos Hasmann Neto, Odir Vieira da Silva, Elton Luiz Espindola e José Manoel Bernardes.

À FAPESP (Projeto-2013/26510-5) pelo financiamento deste estudo.

A todos aqueles que me ajudaram, de forma direta ou indiretamente.

“Aprender é a única coisa de que
a mente nunca se cansa, nunca
tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

A soldagem por resistência elétrica já é conhecida e amplamente utilizada nos processos de união de chapas metálicas. Porém, materiais compósitos poliméricos conduzem pouco a corrente elétrica, dificultando a utilização deste método para sua união. Assim, é necessária a introdução de material condutor para promover a passagem de corrente elétrica na interface a ser soldada. O elemento resistivo é considerado como o elemento crucial de todo o processo por resistência elétrica para compósitos. Por não ser possível sua remoção dos materiais unidos depois da solda, este é considerado como “contaminante”, porém, é o principal contribuinte para a qualidade da solda. Neste sentido, a proposta deste trabalho foi avaliar comparativamente o desempenho de dois elementos resistivos (malha metálica de diferentes mesh e tecido de fibra de carbono) na soldagem por resistência elétrica de compósitos de PEI (poli-éter-imida) com fibras de carbono. Para isto, ensaios mecânicos (*lap shear* e Iosipescu) e de análise térmica (DMA - análise dinâmico mecânica e TMA – análise termomecânica) foram conduzidos juntamente com ensaios morfológicos de microscopia óptica. Além disso, amostras de compósitos produzidos com a malha metálica foram submetidas tanto a condicionamento em câmara de radiação ultravioleta (UV) quanto em câmara higrotérmica para posterior avaliação pelos mesmos ensaios mecânicos, de análise térmica e microscopia. O elemento resistivo que se mostrou mais adequado para o processo de soldagem por resistência elétrica do compósito de PEI/fibra de carbono foi a malha metálica de 300 mesh. Os maiores valores de resistência ao cisalhamento Iosipescu e ao *lap shear* foram obtidos com esta malha metálica. Em geral, as amostras condicionadas em câmara higrotérmica com as malhas de 200 e 300 mesh apresentaram menores valores de transição vítrea, de coeficiente de expansão térmica linear, resistência ao cisalhamento e à tração quando comparadas com as amostras não condicionadas. Já o condicionamento por exposição à radiação ultravioleta afetou apenas o coeficiente de expansão térmica dos laminados.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem por resistência elétrica. Elemento resistivo. Poli-éter-imida. Malha metálica.

ABSTRACT

The electrical resistance welding is already known and widely used in the process of joining sheet metal. However, composites do not conduct electrical current, making it difficult to use this method for their union. Consequently, it requires the introduction of a resistive material to promote the passage of the current in the interface to be welded. This heating element is considered a crucial part of the process for composite electric resistance and it is essential for transmitting the energy required for the welding of these materials. Since the metal mesh cannot be removed after the weld, it is considered as a "contaminant", nonetheless is the foremost contributor to the quality of the joint. Therefore, the aim of this study was to comparatively evaluate the performance of two heating elements (stainless steel of different metal mesh and carbon fibers) in electrical resistance welding of composite PEI (polyétherimide) reinforced with carbon fibers. Mechanical testing (Lap shear and Iosipescu) and thermal analysis (DMA - dynamic mechanical analysis and TMA - thermomechanical analysis) were conducted together with morphological analysis of optical microscopy. In addition, composites samples produced with stainless steel metal mesh were submitted to both ultraviolet radiation chamber and hygrothermal chamber for further evaluation by the same mechanical tests, thermal and microscopic analysis. The heating element more appropriate for the electrical resistance welding of composite PEI/carbon fibers was the stainless steel of 300 metal mesh. The highest shear strength values of Iosipescu and Lap shear were obtained with this metal mesh. In general, samples submitted to hygrothermal conditioning in a climatic chamber with the stainless steel of 200 and 300 metal mesh showed lower values of glass transition temperature, coefficient of linear thermal expansion, shear and tensile strength, compared with the samples non submitted to hygrothermal chamber. On the other hand, the exposure to UV radiation affected only the coefficient of linear thermal expansion of the laminate.

KEYWORDS: Electrical resistance welding. Resistive material. Polyétherimide. Stainless steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Principais materiais utilizados na fabricação da aeronave Boeing 787.....	20
Figura 2-Fluxograma de desenvolvimento deste trabalho.....	22
Figura 3-Tecido Cetim.	25
Figura 4-Tecido laço diagonal.....	25
Figura 5-Tecido plano.	26
Figura 6-Estrutura química do PEI.....	30
Figura 7-Técnicas de junção para compósitos termoplásticos.	31
Figura 8-Etapas de união durante o processo de soldagem de um compósito termoplástico...33	
Figura 9-Classificação das tecnologias de soldagem por fusão.	34
Figura 10-Distribuição da temperatura na peça e no eletrodo.....	35
Figura 11-Sistema esquemático da soldagem por resistência elétrica.....	37
Figura 12-Princípio básico por resistência elétrica.	39
Figura 13-Malha metálica nas dimensões de corte para utilização como elemento resistivo para a soldagem dos laminados.	41
Figura 14-Representação esquemática das malhas metálicas utilizadas.	42
Figura 15-Tecido de fibra de carbono utilizado como elemento resistivo na soldagem dos laminados.....	43
Figura 16-Máquina de soldagem por resistência elétrica disponível na UNESP-Guaratinguetá.	44
Figura 17-Posicionamento das amostras de lap shear na prensa.	45
Figura 18-Dimensões para corte dos corpos de prova extraídos do laminado PEI/fibras contínuas (dimensões em mm).	46
Figura 19-Marcação das amostras das regiões a serem unidas pelo processo de soldagem por resistência de compósitos.	47
Figura 20-Equipamento de DMA disponível na UNESP-Guaratinguetá.....	48
Figura 21-Equipamento de TMA disponível na UNESP-Guaratinguetá.	50
Figura 22-Equipamento de TGA disponível na UNESP-Guaratinguetá.	51
Figura 23-Máquina universal de ensaios Shimadzu.....	52
Figura 24-Dimensões em milímetros dos cdp's utilizados para testes de lap shear de juntas soldadas.....	53

Figura 25-Desenho esquemático do ensaio de lap shear.	53
Figura 26-Modos de falha típicos observados durante o ensaio de lap shear em compósitos: intralaminar, interfacial e fratura.	54
Figura 27-Desenho esquemático das dimensões de amostra do ensaio Iosipescu.	55
Figura 28-Dispositivo próprio do ensaio Iosipescu.	55
Figura 29-Amostras para realização do ensaio Iosipescu.	56
Figura 30-Amostras submetidas ao condicionamento higrotérmico.	57
Figura 31-Câmara de condicionamento higrotérmico da marca Marconi modelo MA 835/UR.	58
Figura 32-Estufa utilizada no processo de ciclo de secagem.	59
Figura 33-Dessecador utilizado no processo de ciclo de secagem.	59
Figura 34-Amostras no condicionamento higrotérmico.	60
Figura 35-Câmara de radiação ultravioleta UV.	61
Figura 36-Seção transversal do compósito PEI/fibra de carbono na lupa Zeiss Stemi 2000, com ampliação de 40x.	63
Figura 37-Curvas de TGA/DTG do compósito de PEI/fibra de carbono.	64
Figura 38-Resultados de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono.	66
Figura 39-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibras de carbono.	68
Figura 40-Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo um tecido de fibra de carbono.	71
Figura 41-Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo uma malha de aço inox de 100 mesh.	71
Figura 42-Efeito do aquecimento e fuga de corrente com elemento resistivo na soldagem de compósitos: a) início da soldagem do compósito b) durante a soldagem do compósito c) fim do processo de soldagem.	74
Figura 43-Modos de falha típicos observados durante o ensaio de lap shear em compósitos: intralaminar, interfacial e fratura.	76
Figura 44-(a) Fotografia da junta soldada indicando a região fraturada após a realização do ensaio mecânico de lap shear (b) Micrografia da região fraturada do ensaio de lap shear (6,7X) (c) Micrografia da região fraturada do ensaio de lap shear (10X).	77
Figura 45-Fotografia ampliada da região fraturada após a realização do ensaio mecânico de lap shear b) Microscopia da região fraturada por lap shear com ampliação de 20X, de um laminado PEI/fibra de carbono (estudo de caso).	78
Figura 46-Gráfico da tensão da deformação proveniente do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono soldada.	80

Figura 47-Gráfico da tensão em função da deformação do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono não soldada.....	81
Figura 48-Amostra ensaiada do compósito PEI/fibra de carbono.....	82
Figura 49-Compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio de Iosipescu....	82
Figura 50-Compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio de Iosipescu....	83
Figura 51-Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8X.	83
Figura 52-Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8X.	84
Figura 53-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com a malha metálica de 200 mesh.....	85
Figura 54-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com malha metálica de 300 mesh.	86
Figura 55-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com a malha metálica de 200 mesh.....	87
Figura 56-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com a malha metálica de 300 mesh.....	88
Figura 57-Absorção de umidade de compósitos PEI/fibra de carbono soldados.	89
Figura 58-Resultados de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com malha metálica de 200 mesh.....	93
Figura 59-Resultados de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 300 mesh.	94
Figura 60-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 200 mesh.	95
Figura 61-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 300 mesh.	96
Figura 62-Compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio lap shear.	98
Figura 63-Compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio lap shear.	98
Figura 64-Interface do compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio de Iosipescu.	99
Figura 65-Interface do compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio de Iosipescu.	99
Figura 66-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento em câmara UV, soldado com malha metálica de 200 mesh.	103
Figura 67-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibra de carbono com condicionamento em câmara UV, soldado com a malha metálica de 300 mesh.	104

Figura 68-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono após condicionamento em câmara UV, soldado com a malha metálica de 200 mesh.....	105
Figura 69-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono após condicionamento em câmara UV, soldado com a malha metálica de 300 mesh.....	106
Figura 70-Compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio lap shear.	108
Figura 71-Compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio lap shear.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Principais propriedades das matrizes termoplásticas usualmente utilizadas para aplicações aeronáuticas.....	28
Tabela 2-Principais propriedades do polímero PEI.....	29
Tabela 3 - Dimensões da malha metálica fornecidas pelo fornecedor.	42
Tabela 4 - Composição química das malhas de aço inox AI 304 utilizadas.	42
Tabela 5-Condições de soldagem utilizadas para cada elemento resistivo estudado	72
Tabela 6-Resultados do ensaio de <i>lap shear</i> para os compósitos de PEI/fibra de carbono soldado com malha metálica de 100 mesh e fibra de carbono	72
Tabela 7-Resultados do ensaio Iosipescu para as amostras de PEI/fibra de carbono soldadas com diferentes malhas metálicas	79
Tabela 8-Valores de resistência ao cisalhamento Iosipescu do compósito PEI/fibra de carbono	81
Tabela 9-Resultados do ensaio de Iosipescu para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas	91
Tabela 10-Resultados do ensaio de <i>lap shear</i> para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas	92
Tabela 11-Resultados do ensaio de DMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas	94
Tabela 12-Resultados do coeficiente de expansão térmica linear obtidos do ensaio de TMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas	96
Tabela 13-Resultados do ensaio de <i>lap shear</i> para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas	101
Tabela 14-Resultados do ensaio de Iosipescu para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas	102
Tabela 15-Resultados do ensaio de DMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh expostas à radiação UV comparadas com as amostras não condicionadas.....	104
Tabela 16-Resultados do coeficiente de expansão térmica linear obtidos do ensaio de TMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh condicionadas por UV comparadas com as amostras não condicionadas	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for testing and Materials</i>
Cdp's	Corpos de prova
DMA	Análise Dinâmico Mecânica (<i>Dynamic mechanical analysis</i>)
DMT	Departamento de materiais e tecnologia
DTG	Termogravimetria Derivada (<i>Derivative thermogravimetry</i>)
E'	Módulo de Armazenamento
E''	Módulo de Perda
EPI's	Equipamentos de proteção individual
FC	Fibra de carbono
HS	Tecido cetim (<i>Harness satin</i>)
LSS	Ensaio de <i>Lap Shear</i> (<i>Lap Shear Strength</i>)
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PEI	Poli(éter-imida)
PPS	Poli(sulfeto de fenileno)
PSU	Polisulfona
TMA	Análise termomecânica (<i>Thermomechanical analysis</i>)
TGA	Análise termogravimétrica (<i>Thermogravimetric analysis</i>)
Tg	Temperatura de Transição vítrea
Tserv	Temperatura de serviço
tan δ	Fator de Perda ou amortecimento (E''/ E')
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"
UV	Radiação ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Dureza Shore
E	Calor
I	Intensidade da corrente
R	Resistência elétrica
t	Parâmetro adimensional de tempo
ϵ_T	Deformação térmica
ΔT	Variação de temperatura
α	Coefficiente de expansão térmica linear
T	Temperatura
σ	Tensão de cisalhamento Iosipescu
F	Força aplicada no corpo de prova
A	Área da secção do corpo de prova

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2 OBJETIVO	21
1.3 METODOLOGIA.....	21
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	23
2.2 FIBRAS PARA COMPÓSITOS	24
2.3 TERMOPLÁSTICOS.....	26
2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS AVANÇADOS	27
2.5 PEI (POLI(ÉTER-IMIDA)).....	28
2.6 TÉCNICAS DE UNIÃO	30
2.7 TÉCNICAS DE UNIÃO POR FUSÃO (SOLDAGEM) PARA COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS	32
2.8 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	34
2.9 ELEMENTO RESISTIVO	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 MATERIAIS	40
3.1.1 Elementos resistivos utilizados	40
3.1.1.1 Malha metálica.....	40
3.1.1.2 Fibra de Carbono	43
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS PEI.....	43
3.3 EQUIPAMENTOS E ENSAIOS.....	44
3.3.1 Sistema de soldagem.....	44
3.3.2 Preparo das amostras dos laminados	46
3.3.3 Processo de soldagem das amostras dos laminados.....	47
3.3.4 Análise dinâmico-mecânica (DMA)	48
3.3.5 Análise Termomecânica (TMA)	49
3.3.6 TGA (Análise Termogravimétrica).....	51

3.3.7 Lap Shear	51
3.3.8 Iosipescu	54
3.3.9 Microscopia óptica.....	56
3.4 CONDICIONAMENTOS AMBIENTAIS	57
3.4.1 Condicionamento Higrotérmico.....	57
3.4.2 Condicionamento em câmera UV	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO LAMINADO COMO RECEBIDO	62
4.1.2 Análises térmicas	63
4.1.2.1 Análise termogravimétrica-TGA	63
4.1.2.2 Análise Dinâmico-mecânica- DMA	65
4.1.2.3 Análise Termomecânica- TMA	66
4.2 SOLDAGEM DOS COMPÓSITOS COM OS ELEMENTOS RESISTIVOS	69
4.2.1 Efeito do elemento resistivo (aquecimento) na soldagem do compósito PEI/fibra de carbono	69
4.2.2 Caracterização morfológica.....	75
4.2.2.1 Análise da fratura pelo ensaio de lap shear	75
4.2.3 Caracterização mecânica	79
4.2.3.1 Ensaio Iosipescu	79
4.2.4 Caracterização térmica	84
4.2.4.1 Análise dinâmico-mecânica - DMA	84
4.2.4.2 TMA - Análise termomecânica.....	86
4.3 CONDICIONAMENTOS	88
4.3.1 Compósito PEI/Fibra de carbono com condicionamento Higrotérmico	88
4.3.1.1 Caracterização Mecânica	90
4.3.1.1.1 Ensaio de Iosipescu	90
4.3.1.1.2 Ensaio de Lap Shear	91
4.3.1.2 Caracterização térmica.....	92
4.3.1.2.1 Análise dinâmico-mecânica (DMA).....	92
4.3.1.2.2 Análise termomecânica (TMA).....	95

4.3.1.3 Caracterização por Microscopia Óptica.....	97
4.3.2 Caracterização dos compósitos PEI/Fibra de carbono com condicionamento em câmara UV.....	100
4.3.2.1 Caracterização mecânica	100
4.3.2.1.1 Ensaio de Lap Shear	100
4.3.2.1.2 Ensaio de Iosipescu	101
4.3.2.2 Caracterização térmica.....	102
4.3.2.2.1 Análise dinâmico-mecânica (DMA).....	102
4.3.2.2.2 Análise termomecânica (TMA).....	105
4.3.2.3 Caracterização por microscopia óptica	107
5 CONCLUSÕES.....	109
5.1 PRODUÇÃO CIENTÍFICA GERADA	110
REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

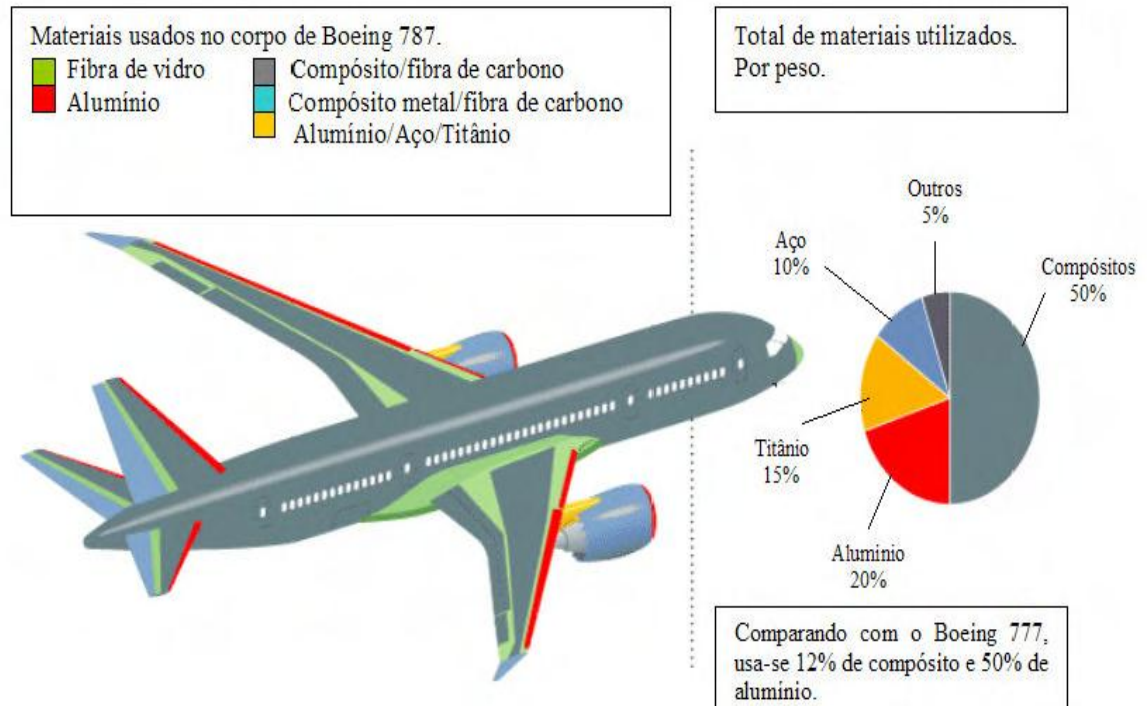
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, a utilização de compósitos estruturais na indústria aeronáutica vem crescendo demasiadamente devido, principalmente, a estes materiais proporcionarem redução de peso do veículo, economia de combustível, aumento da autonomia em voo, e aumento de produtividade e integração de peças, possibilitando uma redução do custo final de componentes processados em compósitos poliméricos da ordem de até 25% em relação às ligas metálicas tradicionais, sendo o seu uso substancial tanto no interior, quanto no exterior das aeronaves (SEENA, 2002).

Desta forma, componentes estruturais de aeronaves para fins civil e militar, tais como: flapes, leme, carenagens, empenagens, aileron, tanques de combustível, profundor, cone de cauda entre outros, que anteriormente eram fabricados em ligas de alumínio, titânio e aços especiais, estão hoje sendo fabricados na sua grande maioria em estruturas laminadas de compósitos avançados. Exemplos destas aplicações podem ser observados na aeronave Boeing 787 Dreamliner (Figura 1), tendo sido este o primeiro avião comercial a ser fabricado com material compósito utilizando, como reforço, a fibra de carbono. Este é produzido (em massa) com 50% de material compósito, 20% de liga de alumínio 2024-T3, 15% de titânio, 10% de aço e 5% de outros materiais. Devido à incorporação de compósitos poliméricos em sua estrutura, esta aeronave pesa apenas 130 toneladas, contra as 180 toneladas de seu concorrente direto, a aeronave da Airbus A330 (REZENDE; BOTELHO, 2000).

Recentemente, muitos componentes destinados à indústria aeronáutica, que anteriormente utilizavam compósitos com matriz termorrígida, vêm sendo substituídos por aqueles que apresentam matriz termoplástica, devido às melhores propriedades obtidas, possibilidade de reaproveitamento do mesmo e a facilidade na fabricação de peças grandes e complexas (DA COSTA, 2011), que serão integradas para formar o componente desejado, temperatura de serviço mais elevada e grande versatilidade na produção em série, exibindo propriedades mecânicas iguais ou superiores às apresentadas pelos compósitos termorrígidos.

Figura 1-Principais materiais utilizados na fabricação da aeronave Boeing 787.



Fonte: Grandine, (2010).

Para a integração destes compósitos, várias técnicas estão sendo estudadas e utilizadas visando a união de componentes específicos, como aplicações de adesivos, uso de rebites e técnicas de soldagem (AGEORGES, YE E HOU, 2001). Dentre estas técnicas, a soldagem é a técnica mais vantajosa para a união das peças e reparo das mesmas, pois este método gera a união com qualidade superior em comparação com as outras técnicas atualmente disponíveis (uniões mecânica e adesiva) (SOUZA, 2013).

A soldagem por resistência elétrica já é conhecida e amplamente utilizada nos processos de união de placas metálicas. Nestes materiais a união ocorre com a corrente passando transversalmente entre as duas peças a serem soldadas. Com o contato gera-se uma resistência a propagação da corrente elétrica causando, assim, um aquecimento local. Por consequência ocorrerá uma fusão localizada na região de interface entre as duas partes que se deseja soldar (BATES; COUZENS; KENDALL, 2005; AGEORGES; YE; HOU, 2001). Por outro lado, materiais compósitos não conduzem bem a corrente elétrica dificultando a utilização deste método para sua união. Desta forma, tem-se a necessidade de introdução de um material condutor para promover a passagem de corrente elétrica na interface a ser soldada (BATES; COUZENS; KENDALL, 2005).

Dentre os polímeros termoplásticos utilizados como matriz para compósitos estruturais destaca-se o poli(éter-imida) (PEI), pois este apresenta características tais como: elevados valores de resistência e rigidez em elevadas temperaturas; boas propriedades elétricas e elevada resistência química (CATSMAN, 2005).

1.2 OBJETIVO

Este trabalho de pesquisa visa avaliar comparativamente o desempenho de elementos resistivos, malhas metálicas e fibra de carbono, na soldagem por resistência elétrica de compósitos termoplásticos de PEI reforçados com fibras de carbono. Os materiais serão avaliados por meio de ensaios mecânicos (*lap shear* e *Iosipecu*) e por análises térmicas (DMA e TMA) juntamente com ensaios morfológicos (microscopia óptica). Além disso, amostras de compósitos produzidas com a malha metálica serão submetidas à câmara de radiação ultravioleta e à câmara higrotérmica para posterior avaliação pelos ensaios mecânicos, térmicos e morfológicos e comparação com os resultados das amostras não condicionadas. A partir deste estudo poderá se determinar qual elemento resistivo é o mais adequado para ser usado como elemento resistivo na soldagem por resistência elétrica em compósitos termoplásticos.

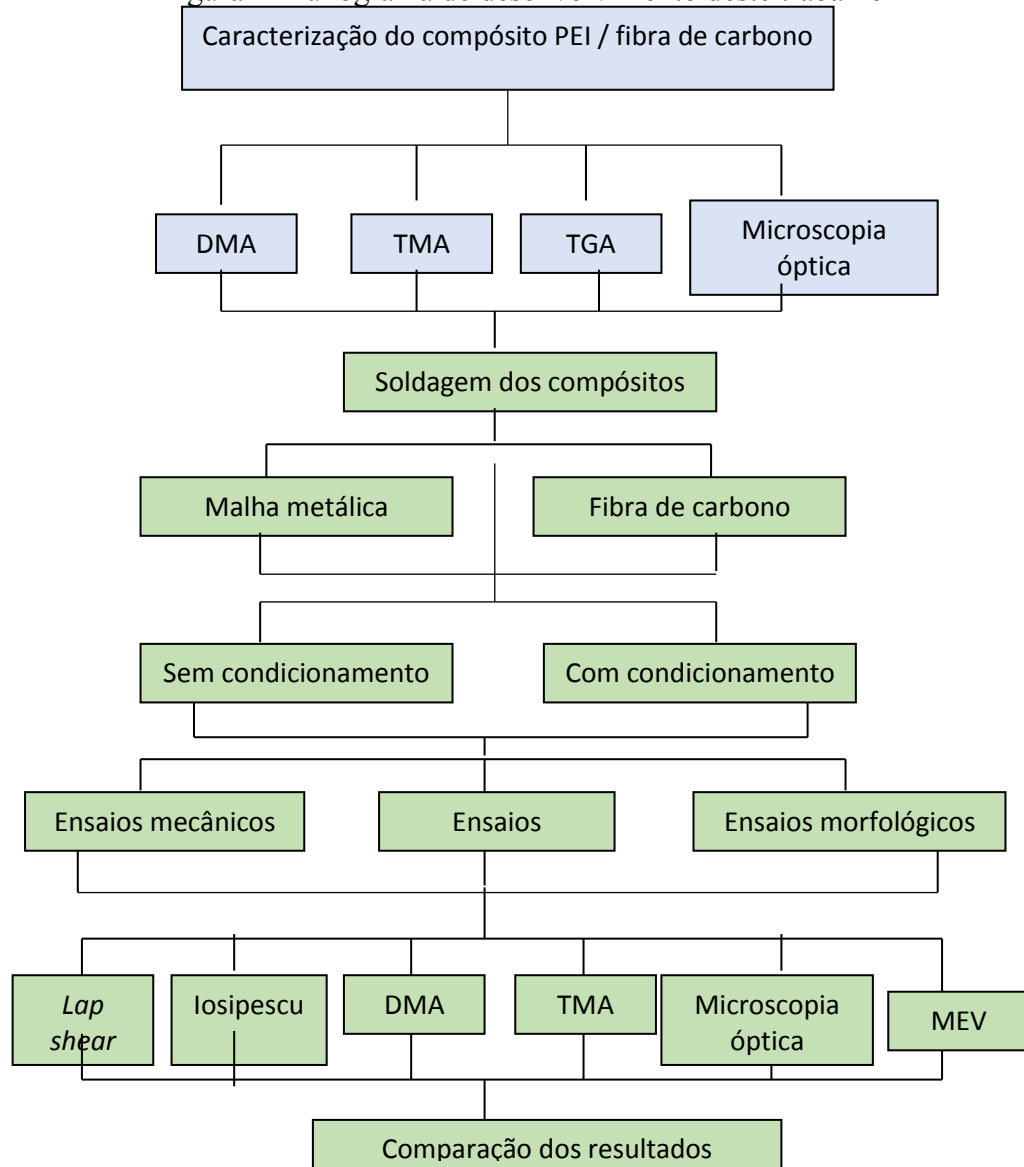
1.3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto, o presente trabalho foi desenvolvido em etapas de análise, apresentadas ao longo de corpo desse trabalho de conclusão de curso. Além deste Capítulo 1-Introdução, este trabalho é composto por outros cinco capítulos.

O Capítulo 2 aborda a Revisão da Literatura, onde é apresentada uma coletânea de informações a respeito do assunto abordado, dando fundamentação científica ao estudo experimental realizado.

No capítulo 3, denominado Materiais e Métodos, o trabalho realizado é apresentado em detalhes, abordando de forma sistemática: o material utilizado, equipamentos, procedimentos e a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. O fluxograma de desenvolvimento é encontrado na figura 2. Os quadrados em azul representam as etapas de caracterização do compósito PEI/fibra de carbono como recebido, e os em verde, as etapas referentes aos laminados soldados.

Figura 2-Fluxograma de desenvolvimento deste trabalho



Fonte: Produção do próprio autor

No capítulo 4 são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos, com ênfase na caracterização mecânica, térmica e morfológica dos compósitos PEI/fibra de carbono soldados com as malhas metálicas de 200 e 300 mesh, assim como a avaliação da influência dos condicionamentos higrotérmico e em câmara UV.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste Trabalho de Graduação de forma objetiva, assim como as produções técnico-científicas geradas durante o período de graduação de Engenharia de Materiais da UNESP, Campus de Guaratinguetá.

Por fim, é apresentada todas as Referências da literatura consultadas, disposta em ordem alfabética.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito apresenta dois componentes ou mais na sua constituição, sendo que um é o elemento reforçante e outro a matriz e devem estar unidos por uma interface. A necessidade desse tipo de material deve-se ao fato de que há uma grande melhoria nas propriedades do mesmo, pois há a combinação das propriedades das fases que o constituem (CALISTER, 2006).

As propriedades mecânicas do material são definidas pela fase de reforço, as quais devem ser minuciosamente escolhidas. Porém, deve ser observada a ocorrência de variações no comportamento mecânico do componente causadas pelo processo de fabricação do reforço. Os reforços mais comuns na indústria são as fibras de carbono, de vidro e de aramida (BOTELHO; COSTA; REZENDE, 2011).

A matriz é responsável pela estrutura do compósito, mantendo cada um dos componentes em suas posições relativas e transmitindo o esforço por todo o material. Nos compósitos avançados, a matriz pode ser metálica, polimérica ou cerâmica. O uso de matrizes poliméricas permite a obtenção de excelentes propriedades mecânicas, pois os compósitos apresentam baixa massa específica (0,9 a 1,5 g/cm³), além de permitir a construção de peças de geometria complexa devido à maior flexibilidade do material (BOTELHO, COSTA, REZENDE, 2011; AUTAR, 2006; NETO, PARDINI, 2006; SCHAWARTZ, 1997).

Atualmente, a maior parte da estrutura dos aviões é construída com titânio, aço e alumínio. Todavia, as fábricas já utilizam outros materiais, à base de plástico e fibra de carbono, para deixar as aeronaves comerciais mais leves. Essas combinações de plásticos e fibras de carbono, materiais compósitos, apresentam menor peso e grande resistência. Estudos mostram que no Boeing 777, por exemplo, 70% do peso é alumínio; 11%, aço; 7%, titânio; e 11% são materiais compósitos. No Airbus A-380, o maior avião de passageiros do mundo, com três andares e capacidade para 555 pessoas, 61% do peso é alumínio; 3%, aço; 7%, titânio; e 25% são compósitos. Já na aeronave Embraer 170, com capacidade para 70 a 80 assentos, a proporção de alumínio no peso é maior do que nos aviões dos concorrentes — 81% —, enquanto a proporção de compósitos é menor: 13% (SIMÕES, 2008).

A tendência, para o futuro, é que compósitos mais bem adaptados à função que vão preencher na estrutura do avião, com mais resistência ou durabilidade ou leveza, possam substituir mais alumínio e aço na composição dessa estrutura (SIMÕES, 2008).

Assim, o uso de compósitos tem tido um destaque crescente na indústria, principalmente nas áreas espacial e aeronáutica. Esses materiais possuem vantagens como alta rigidez e elevada resistência mecânica (BOTELHO; COSTA; REZENDE, 2011).

2.2 FIBRAS PARA COMPÓSITOS

O uso de fibras para a produção dos compósitos reforçados se deve ao fato de apresentarem alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. A fim de conferir estas propriedades mecânicas, tecidos de fibras são utilizados na constituição dos compósitos estruturais. Tratando-se de aplicações, grande parte dos reforços vem sendo utilizados na forma de fibras (vidro, carbono ou aramida), garantindo uma adequada transmissão e repartição dos esforços aplicados pelo reforço. Embora a fibra de carbono apresente custo elevado, possui alta resistência específica às solicitações de tensão, podendo superar em mais de cinco vezes a resistência específica das ligas de aço (AQUINO et al., 2007).

Reforços na forma de carbono são comumente utilizados em compósitos avançados com matriz polimérica, uma vez que as fibras de carbono apresentam os maiores módulos e resistências específicas, são capazes de reter seus elevados módulos de tração em temperaturas elevadas e, a temperatura ambiente, não são afetadas pela umidade ou por variedades de solventes, ácidos e bases. Além do mais, exibem uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos reforçados com estas fibras possuam propriedades especificamente engenheiradas (CALLISTER, 2006).

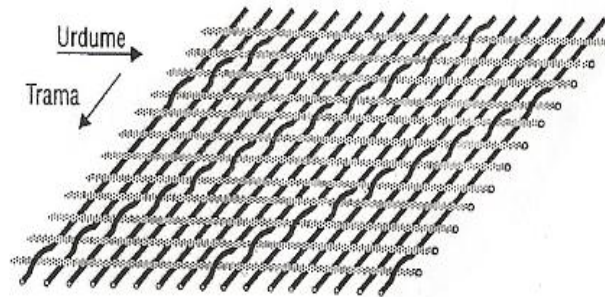
As fibras de carbono são produzidas basicamente a partir de precursores orgânicos. Entre estes, as fibras usadas em aplicações aeroespaciais são aquelas que derivam das fibras de poliacrilonitrila (PAN) (PARDINI; NETO, 2006). O processo de produção das fibras de carbono a partir da PAN é relativamente complexo e envolve etapas de tensionamento, extrusão, tratamento térmico, oxidação, carbonização, etc. Consequentemente, o resultado são fibras de alta qualidade (alto módulo elástico e resistência à tração) e alto custo (AVIAÇÃO.ORG, 2013).

As fibras podem ser classificadas conforme a orientação de seus tecidos, isto é, a disposição da trama e do urdume em sua formação. Esta disposição pode ser comumente dividida em: tecido do tipo cetim, tipo diagonal e tipo plano (PARDINI et al, 2006).

O tecido cetim (ou *satín*) é formado por cabos que apresentam maior comprimento em relação às sobrepassagens (Figura 3). Este tecido tem por característica a facilidade de ajuste às superfícies de contorno complexas. Trata-se de um entrelaçamento na forma de três cabos

acima e um abaixo, gerando, assim, um lado com predominância de cabos de urdume e o outro de cabos de trama. A flexão dos cabos, distribuídos de maneira assimétrica no tecido HS, é, então, associada ao tensionamento. Também, observa-se o acoplamento entre tensões normais e tensões de cisalhamento (NETO, PARDINI; 2006).

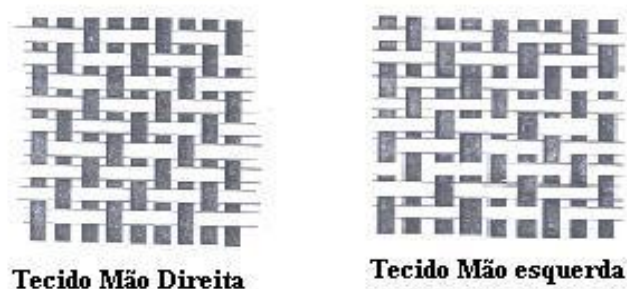
Figura 3-Tecido Cetim.



Fonte: Neto e Pardini (2006).

O tecido laço diagonal é caracterizado por apresentar linhas diagonais na parte superior do tecido. Nesse tipo de tecido são colocados dois cabos da trama sobre um cabo do urdume, um abaixo e dois acima, e assim sucessivamente, dessa forma formando as diagonais. Esse tipo de tecido possui duas variações, o tecido diagonal mão direita, que possui as diagonais começando da parte inferior esquerda e chegando a parte superior direita, e o tecido diagonal mão esquerda, que começa na parte inferior direita e termina a sua ondulação na parte superior esquerda. (NETO; PARDINI, 2006) (Figura 4).

Figura 4-Tecido laço diagonal.

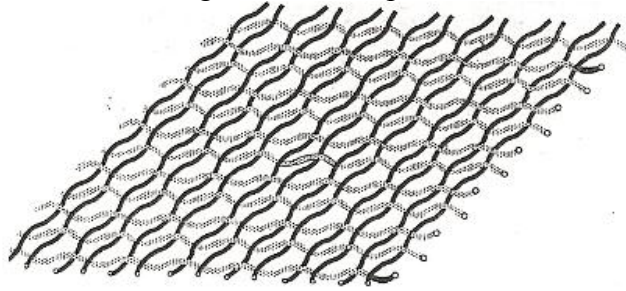


Fonte: Neto e Pardini (2006).

Os tecidos de fibra de carbono planos são os mais disseminados para aplicação aeronáutica (Figura 5). Destaca-se o tecido *plain weave* pela facilidade de manuseio e processo de fabricação e, principalmente, por exibir ótimas propriedades mecânicas, tal como ótima

resistência ao impacto. Esse tecido é formado pelo entrelaçamento de cabos de trama e urdume segundo um padrão. Vale ressaltar que não é possível notar diferenças no comportamento do material quando as fibras possuem direções diferentes (NETO,PARDINI, 2006; MORGAN, 2005).

Figura 5-Tecido plano.



Fonte: Neto e Pardini (2006).

2.3 TERMOPLÁSTICOS

Os polímeros termoplásticos são constituídos de macromoléculas individuais que não estão ligadas entre si por ligações primárias, mas ao invés disso por fracas forças intermoleculares tais como forças de van der Waals e ligações de hidrogênio. Com a aplicação de calor, essas forças intermoleculares, também chamadas de ligações secundárias, são temporariamente quebradas possibilitando que as macromoléculas se movam uma em relação à outra, fluindo para diferentes configurações caso exista uma pressão sendo aplicada sobre estas. No resfriamento, as moléculas podem se rearranjar, e ter suas ligações secundárias restauradas, resultando em sólido com um novo formato. Portanto, os polímeros termoplásticos podem ser fundidos e solidificados quantas vezes forem necessárias, diferentemente de polímeros termorrígidos que são solidificados apenas uma vez (MALLICK, 2008).

Polímeros termoplásticos se liquefazem por aquecimento e se solidificam por resfriamento, caracterizando um processo reversível (MANO, 2000). Possuem alta massa molar, constituídos de cadeias lineares que são emaranhadas permitindo que o material apresente integridade física, mas que são passíveis de deformação plástica quando submetidos a tensões (PARDINI; NETO, 2006). As propriedades de termoplásticos são influenciadas pela morfologia, pelo grau de cristalinidade e pela orientação da rede polimérica, as quais são diretamente relacionadas às condições de processamento (YOUNG; LOVELL, 1991).

Dentre as diversas vantagens dos termoplásticos, destacam-se: melhor dureza, tempo de processamento mais curto, resistência ambiental, maiores possibilidades de reciclagem e vida

útil ilimitada. Tratando-se dos compósitos termoplásticos, as principais vantagens são o baixo custo e a produção em massa. Na última década, muitas técnicas de processamento foram desenvolvidas para a sua fabricação (HOU; YE; MAI, 1999).

2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS AVANÇADOS

O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos poliméricos avançados baseia-se na formação de um conjunto de materiais que combine elevada resistência e rigidez, aliados à baixa massa específica, tornando-os muito atrativos para fins aeronáuticos (PARDINI, NETO, 2006; REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2006; DA SILVA, 2005).

Ainda que os compósitos com matrizes termorrígidas sejam bastante utilizados na indústria aeronáutica, estes estão sendo progressivamente substituídos por compósitos com matrizes termoplásticas, por não enrijecerem e serem conformados e reaquecidos várias vezes. Estes materiais apresentam menor absorção de água, maior temperatura de serviço, maior resistência ao impacto, grande versatilidade de produção em série e diminuição do ciclo de produção, com propriedades mecânicas similares ou superiores às obtidas para os compósitos termorrígidos (REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2006; DA SILVA, 2005). Além do mais, compósitos termoplásticos apresentam alta tolerância a danos, excelente resistência à corrosão, alta resistência à ruptura, resistência ao impacto e à fadiga, baixos custos de armazenamento e vida de prateleira infinita (MANO, 2000).

Desse modo, compósitos termoplásticos oferecem várias vantagens de processamento e desempenho mecânico quando comparados aos termorrígidos. Como já mencionado, no setor aeronáutico, o uso de compósitos termoplásticos é promissor na construção de fuselagens, permitindo com isto uma redução de peso em torno de 25%, em relação às estruturas metálicas utilizadas. Adicionalmente, os compósitos termoplásticos têm continuamente se mantidos como uma alternativa de aplicação em estruturas, devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância a danos em relação aos termorrígidos. Devido à natureza reciclável e reformável, compósitos termoplásticos são selecionados para aplicações ambientalmente sustentáveis. Desta forma, estes apresentam uma ampla gama de aplicações em transporte terrestre, aeroespacial, e estruturas marinhas (ABRAHÃO A.B.R.M. et.al, 2015).

Vários polímeros de última geração estão sendo utilizados na obtenção destes compósitos termoplásticos destacando-se: PEI (poli(éter-imida)), PPS (poli(sulfeto de fenileno)) , PEEK (poli(éter-éter-cetona)), PSU (polisulfona), entre outros, atendendo a requisitos de resistência mecânica na faixa de -60 a 80°C , utilizando processos como a

moldagem por compressão a quente, a pultrusão reativa e a injeção. (REZENDE et al, 2011, OLIVEIRA et al.).

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades de alguns polímeros de última geração.

Tabela 1-Principais propriedades das matrizes termoplásticas usualmente utilizadas para aplicações aeronáuticas.

Propriedades	Unidade	PPS Techtron®	PEEK Ketrion® 1000	PEI Ultem® 1000
Mecânica				
Resistência à tração	MPa	93,08	115,00	100,00
Módulo de elasticidade	GPa	3,7	4,6	3,6
Elongamento na ruptura	%	15	14	80
Física				
Massa específica	g/cm ³	1,35	1,39	1,28
Absorção de água (24hrs)	%	0,01	0,05	0,25
Térmicas				
Fusão	°C	282	340	-
Coef. de expansão térmica	(x 10 ⁻⁵ . °C ⁻¹)	5,04	5,04	5,58
Condutividade térmica	(x 10 ⁻⁴ kW/m.K)	2,88	2,45	1,23
T _g	°C	n.a.	150	210
T _{serv.}	°C	218	250	171

Fonte: Boedeker (2011).

Dentre os polímeros termoplásticos utilizados como matriz para compósitos destaca-se o poli(éter-imida) (PEI), pois é facilmente conformado em alta escala e amolecido, diferente dos outros polímeros de engenharia citados anteriormente (REZENDE et al, 2011, OLIVEIRA et al.)

2.5 PEI (POLI(ÉTER-IMIDA))

O poli(éter-imida) é um termoplástico de engenharia, desenvolvido na década de 70 pela GeneralElectric Inc. É um polímero termoplástico cuja estrutura é amorfa, caracterizado pela elevada resistência mecânica e rigidez, tanto à temperatura ambiente (em torno de 100 MPa)

quanto a temperaturas superiores (em torno de 50% da resistência à temperatura ambiente quando submetido a temperaturas entre 170 e 190 °C) (CATSMAN, 2005).

O PEI exibe coloração âmbar, é resistente à chama e solúvel em solventes parcialmente halogenados. É ainda resistente a álcoois, ácidos e solventes de hidrocarbonetos, além de suportar bem a radiação ultravioleta e os raios gamas. É comumente utilizado como matriz de compósitos termoplásticos em função de seu custo, propriedades e facilidade de manuseio (MAZUR et al, 2008). Apresenta alta estabilidade térmica, com Tg a 220°C, notáveis módulos de elasticidade (3,6 GPa) e resistência à tração (100 MPa) (MAZUR et al, 2008).

Sua estrutura química consiste em repetidas imidas aromáticas e unidades éter, como demonstrado na Figura 6. Apresenta boas propriedades elétricas, ampla resistência química e rigidez em altas temperaturas (BOTELHO et al, 2009, PARDINI, 2006). A Tabela 2 apresenta algumas das principais propriedades da PEI.

Tabela 2-Principais propriedades do polímero PEI.

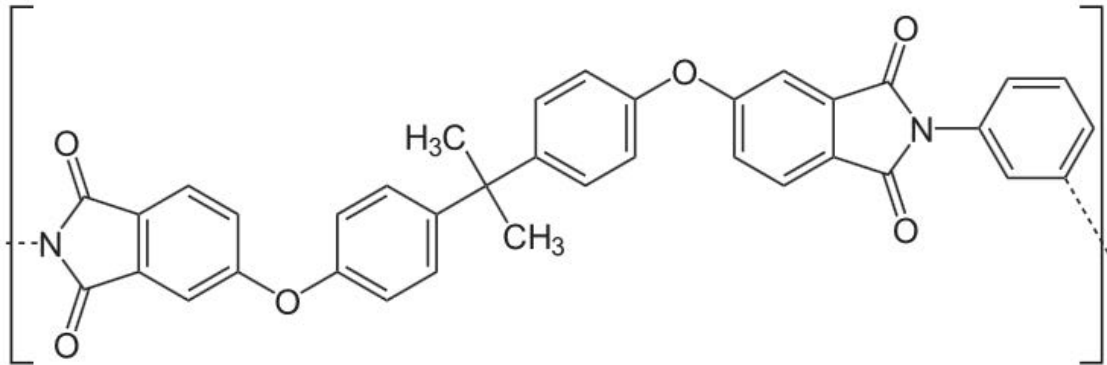
Propriedades PEI		
Físicas	Massa específica (g/cm ³)	1,35
	Absorção de água (%)	0,24
	Dureza Shore (D)	85,5
Mecânicas	Resistência à tração (MPa)	100
	Módulo de elasticidade (GPa)	3,6
	Elongação (%)	44,9
Térmicas	Temperatura de Transição Vítrea (°C)	210 – 220
	Temperatura Máxima de serviço (°C)	200
	Condutividade térmica (W/m.K)	0,25
	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁵ /°C)	5-6
Elétricas	Resistividade (Ω.cm)	10 ¹⁵ -10 ¹⁷
	Constante Dielétrica	3,1-3,2
	Força Dielétrica (kV/mm)	28-33

Fonte: Souza e Marinicci, (2010); Chazerain, (2009).

As temperaturas de processamento do PEI normalmente variam de 350 a 425°C para moldagem por compressão a quente. Essa propriedade os torna uma boa escolha para estruturas de aeronaves (GINGER, 2006), principalmente em painéis de assoalho, iluminação, assentos e outras estruturas secundárias e terciárias (AMANCIO-FILHO, 2011). As principais aplicações para o poli(éter-imida) são, no momento, discos rígidos para computadores, placas de circuitos

eletrônicos, partes estruturais de automóveis e compósitos para aplicação aeroespaciais (PAN et al., 2005).

Figura 6-Estrutura química do PEI.



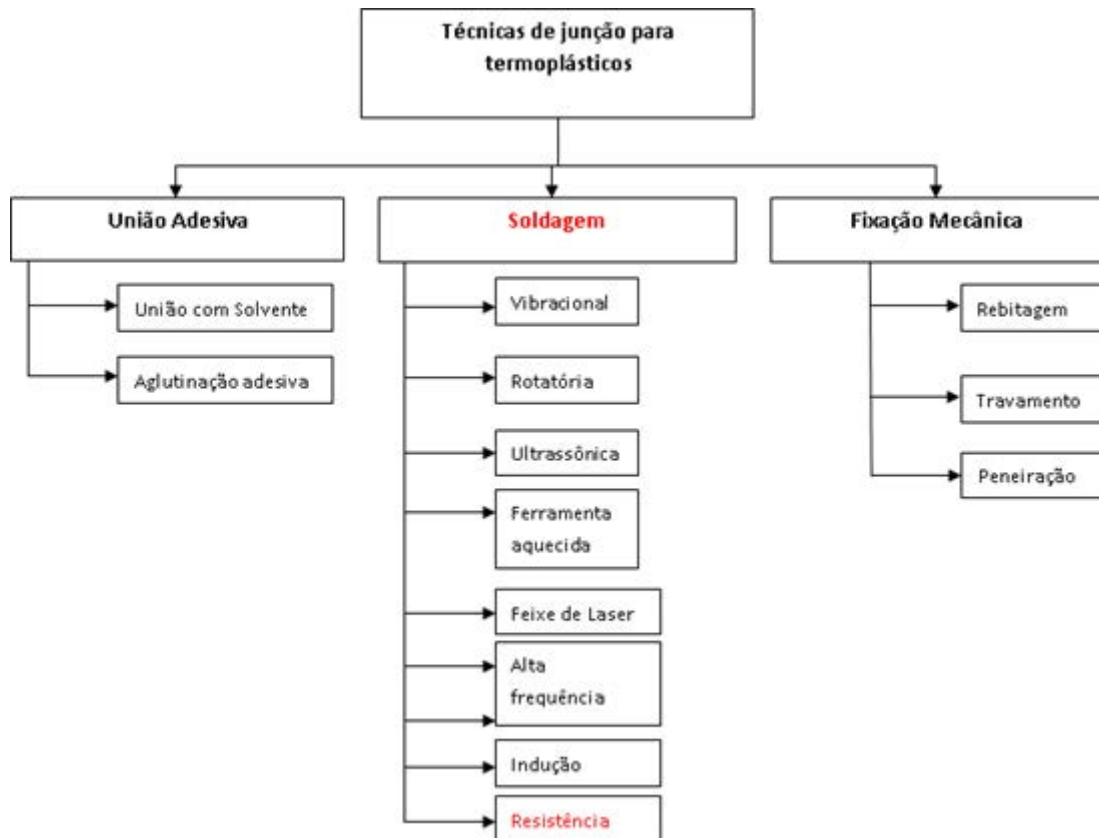
Fonte: Azevedo (2008).

2.6 TÉCNICAS DE UNIÃO

A inclusão de uniões em compósitos estruturais é necessária pelas limitações inerentes no processo de fabricação e de importância na inspeção, reparo e montagem para com estes materiais. A fim de obter uma estrutura integrada, esta é dependente da relação custo/benefício e do desenvolvimento de processos eficientes de união e montagem rápida. Neste caso, a união de compósitos termoplásticos pode ser um processo crítico na confecção de peças estruturais, por gerarem pontos de concentração de irregularidades e, sendo assim, mais suscetível à fratura (COSTA, 2011).

Em geral, pode-se classificar a união de compósitos termoplásticos por técnicas de união adesiva, fixação mecânica e união por fusão (Figura 7). Porém, a união por fusão ou soldagem é a técnica que apresenta maior potencial para aplicação em montagem, junção e reparo dos componentes destes materiais além de apresentar uma série de vantagens em relação a outras formas de união (YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Figura 7-Técnicas de junção para compósitos termoplásticos.



Fonte: Yosefpour, Hojjati e Immarigeon (2004).

Um método que vem sendo empregado pela indústria aeronáutica consiste na utilização de sistemas adesivos, a partir de colas especiais e resinas. Este método é adequado somente se o adesivo utilizado suportar a tensão de cisalhamento, a qual o componente estará submetido, caso contrário, a união das partes será desfeita, causando falhas no mesmo por delaminação. Além do mais, necessita de extensa preparação da superfície (YOUSEFPOUR, HOJJATI, IMMARIGEON, 2004; SOUZA, 2013).

A fixação mecânica de componentes aeronáuticos em compósitos é feita unindo as partes com rebites ou parafusos. Porém, estes se comportam como concentradores de tensão e geram problemas relacionados à corrosão galvânica, apresentam diferenças no coeficiente de expansão térmica ao comparar materiais compósitos aos rebites metálicos, além de poderem causar danos às fibras ou delaminações entre as camadas, devido à perfuração, que podem causar fratura precoce do componente (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012).

A soldagem é o processo no qual a junção de duas ou mais partes é alcançada através da fusão local e consolidação de suas interfaces. Nesse sentido, exige o amolecimento/fusão e subsequente resfriamento dos materiais, na região da interface a ser soldada. Compósitos termoplásticos podem ser aquecidos de diversas maneiras e inúmeras técnicas existem para

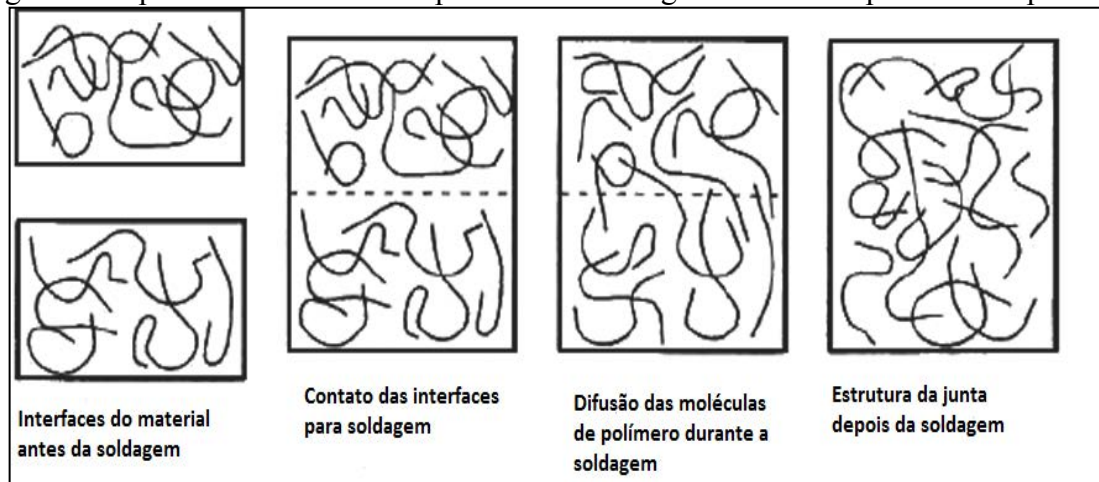
alcançar o calor necessário para amolecer/fundir a matriz polimérica. Estas técnicas de fusão podem envolver a entrada direta do calor, a geração de calor através a fricção (rotacional, vibração e ultrassônica), assim como, a geração de calor por meio de uma corrente elétrica ou de um campo eletromagnético (resistência, indução, e micro-ondas). Dentre esses métodos, a soldagem por resistência elétrica é a técnica mais vantajosa. Trata-se de um processo rápido e necessita de aparelhos simples e de baixo custo, além de precisar de pouca ou nenhuma preparação da superfície (HOU; YE; MAI, 1999).

2.7 TÉCNICAS DE UNIÃO POR FUSÃO (SOLDAGEM) PARA COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

A inclusão de uniões em compósitos estruturais é necessária pelas limitações inerentes no processo de fabricação e de importância na inspeção, reparo e montagem para com estes materiais. Os métodos de união por fusão ou soldagem são promissoras tecnologias que vem sendo empregadas nas indústrias dedicadas ao processamento de compósitos termoplásticos, pois a eficiência de união das peças soldadas adquire o maior número de propriedades de adesão (AGEORGES; YE; HOU, 2000; YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

A união de determinadas partes de um componente é conseguida pela aproximação dos átomos ou moléculas das estruturas a serem unidas. Os princípios de ligação de componentes termoplásticos utilizando as técnicas classificadas pelos métodos de fusão ou soldagem consistem basicamente na preparação da superfície a ser soldada (quando necessário), aquecimento do polímero na região interface para o estado viscoso que fisicamente causa a inter difusão das cadeias poliméricas e no esfriamento do polímero, desta forma, obtêm-se uma união consolidada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004). A Figura 8 apresenta as principais etapas envolvidas no processo de soldagem de um compósito termoplástico.

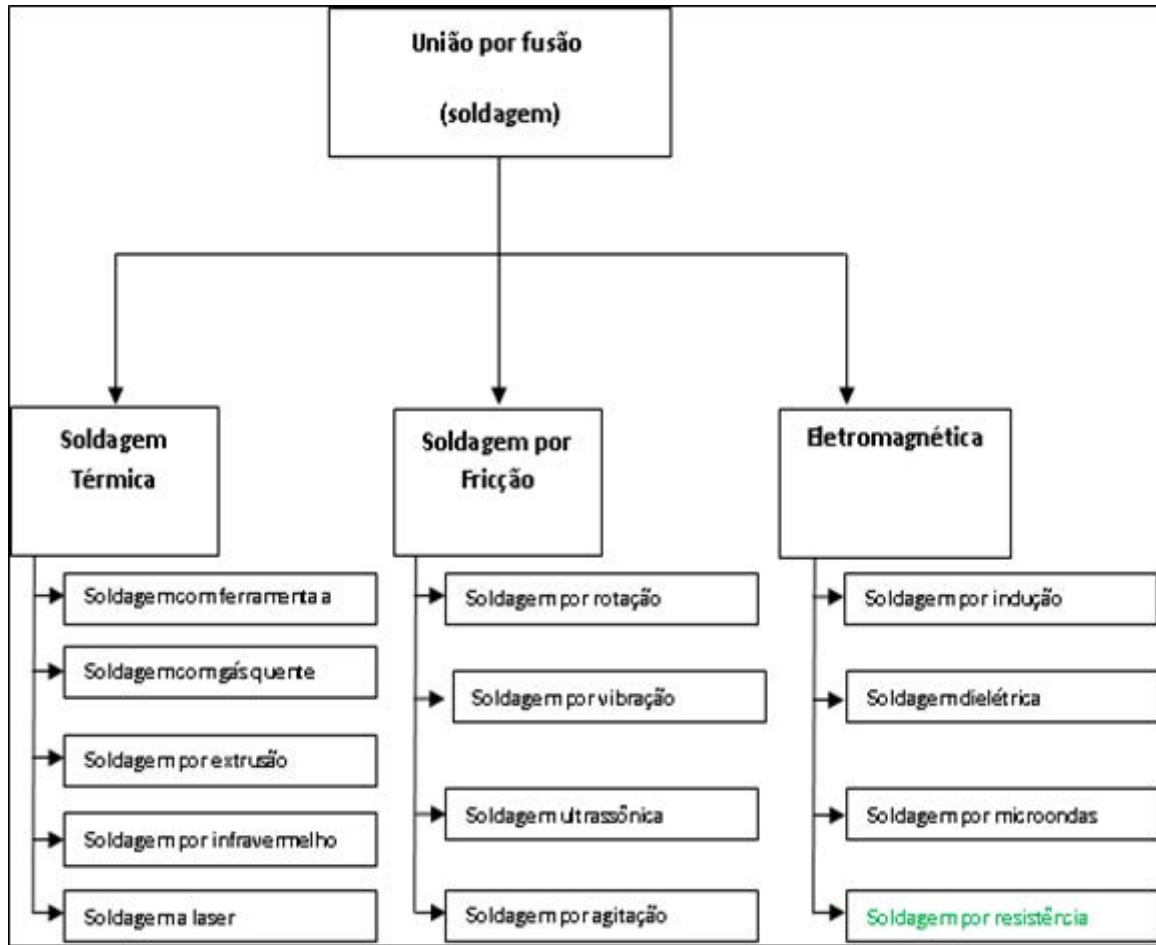
Figura 8-Etapas de união durante o processo de soldagem de um composto termoplástico.



Fonte: Da Costa (2011).

Todas as técnicas disponíveis para a soldagem de compósitos termoplásticos são adaptáveis para automação para inspeção *online*. Além disso, estas técnicas fornecem reprodutibilidade e necessitam de um mínimo de preparo de superfície, diminuindo desta forma o custo do processo. Portanto, a soldagem é um processo muito atrativo para união de compósitos de matriz termoplástica, por ser um processo rápido e simples, em que a união das peças é adquirida pela fusão e consolidação na região interfacial das partes a serem soldadas. As técnicas de união por fusão podem ser classificadas de acordo com a tecnologia utilizada para gerar o aquecimento. A Figura 9 apresenta as principais técnicas de união por fusão em que os processos de aquecimento são geralmente classificados como soldagem térmica, soldagem por fricção e soldagem eletromagnética (AGEORGES; YE; HOU, 2000; YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Figura 9-Classificação das tecnologias de soldagem por fusão.



Fonte: Yosefpour, Hojjati e Immarigeon (2004).

Dentre as tecnologias apresentadas na Figura 9, destacam-se a soldagem por vibração, ultrassom, infravermelho, indução e resistência elétrica, pois estas se complementam em termos de resistência das juntas, eficiência de processamento e amplitude de campos de aplicação (HOU et al, 1999; YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

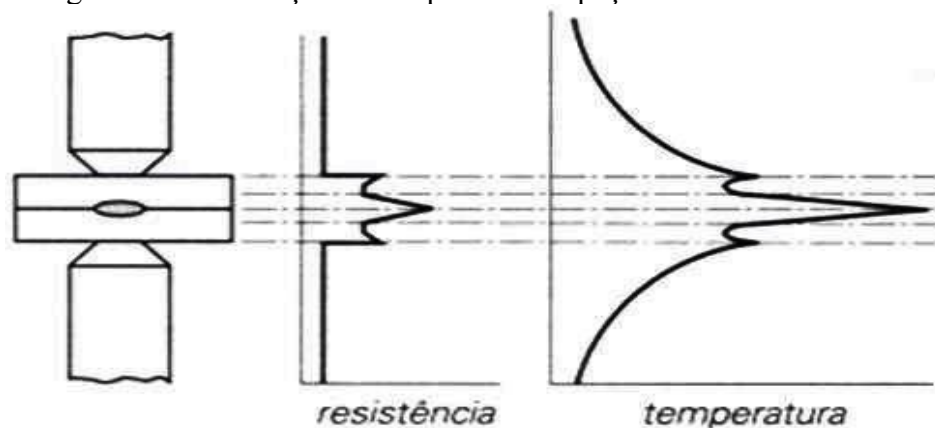
2.8 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A soldagem por resistência elétrica compreende um grupo de processos nos quais as peças a serem soldadas são pressionadas entre os eletrodos onde a corrente elétrica de alta intensidade proporciona calor para atingir o seu ponto de fusão. A união de peças metálicas é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo pelo calor gerado pela corrente na junta. Os processos de soldagem por resistência permitem a soldagem de diferentes metais cuja soldabilidade é controlada pela resistividade, pela condutividade térmica, pela temperatura

de fusão e por suas características metalúrgicas. Assim, metais com elevada resistividade, baixa condutividade térmica e ponto de fusão também relativamente baixo, como as ligas não ferrosas, são facilmente soldáveis por esses processos. Todo o processo baseia-se na lei de Joule ($E = I^2 \times R \times t$), onde o calor (E) é proporcional ao tempo (t), resistência elétrica (R) e a intensidade da corrente (I) com pressão exercida em todo o processo (METALURGICA MARIMAX Ltda, 2004).

Uma importante característica da soldagem por resistência é o rápido aquecimento que ela produz. A Figura 10 mostra a distribuição de temperatura na peça e no eletrodo.

Figura 10-Distribuição da temperatura na peça e no eletrodo.



Fonte: Infosolda (1997).

Para unir peças por resistência em um tempo muito curto, é necessário haver altas correntes para aquecer e fundir as partes. Como nos compósitos termoplásticos a maioria das matrizes não conduz corrente elétrica, é necessário um implante eletricamente resistivo na região interfacial, sendo este, geralmente constituído de malhas metálicas ou tecido de fibras de carbono (YOUSEFPOUR, HOJJATI, IMMARIGEON, 2004; AGEORGES, YE, HOU, 2001; STAVROV, BERSEE, 2005; BATES et al., 2009; NINO, AHMED, BERSEE, 2009). O processo de soldagem ocorre quando a temperatura na região de soldagem aumenta até certo ponto, onde a matriz começa a amolecer ou fundir (BATES et al., 2009; NINO, AHMED, BERSEE, 2009; YOUSEFPOUR, HOJJATI, IMMARIGEON, 2004; AGEORGES, YE, HOU, 2001).

Existem dois aspectos fundamentais que devem ser levados em consideração para se estabelecer a janela de processamento mais apropriada durante o processo de soldagem por resistência elétrica: o superaquecimento na região de soldagem, que pode causar degradação térmica da matriz termoplástica e interferir no controle da passagem de corrente na interface de

soldagem; e a propagação do calor, que pode provocar migração da matriz e movimentação da fibra (COSTA, 2011).

A soldagem por resistência é considerada um processo promissor para aplicações aeronáuticas, dentre as técnicas disponíveis de união por fusão, já que é consideravelmente rápida (de 1 a 5 minutos de processo), necessita de pouca ou nenhuma preparação de superfície (AGEORGES, YE, 2001), utiliza equipamentos simples e de baixo custo, podendo ainda ser utilizada em reparos (DUBÉ et al., 2009; AGEORGES, YE, 2001) e em reprocessamento de um determinado componente após inspeção não destrutiva (YOUSEFPOUR, HOJJATI, IMMARIGEON, 2004; STAVROV, BERSEE, 2005; AGEORGES, YE, 2001; TALBOT, YOUSEFPOUR, HUBERT, 2005).

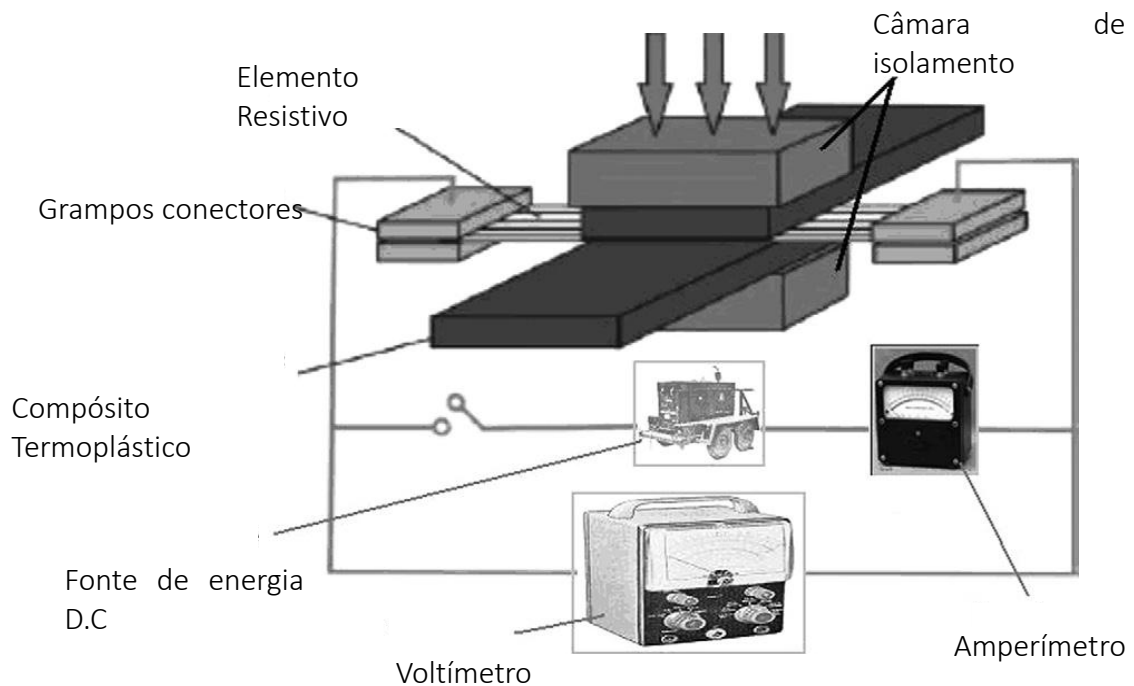
Uma vez que o elemento resistível permanece na ligação, a compatibilidade dos materiais entre o elemento resistível e os elementos comuns do processo é importante. Para obter uma boa qualidade de soldagem, a resistência do elemento resistível deve ser determinada de modo a ajustar o nível de energia durante o processo (AGEORGES; HOU, 2001).

O processo é composto por vários componentes padrões: compósitos prensados por pressão com o elemento resistível entre eles, grampos conectores para a passagem de corrente, câmara de isolamento, fornecimento de energia elétrica, dispositivos de fixação, fios, voltímetro e amperímetro. As medições de temperatura do processo são feitas por termopares, pequenos grampos que são presos nos elementos resistíveis (AGEORGES; HOU, 2001 1a).

O isolamento é um dos elementos essenciais do processo de solda por resistência. Através de procedimentos experimentais e modelagem é possível verificar que, sem isolamento suficiente, a própria soldagem não pode ser realizada (STRATOV; BERSEE, 2003). Sem o devido isolamento, as perdas de calor no processo poderão ser tão elevadas, que a temperatura necessária para a união dos elementos não poderá ser obtida, pelo menos, sem fusão total na maior parte do compósito (STAVROV; BERSEE, 2005). O mecanismo de aplicação de pressão fornece uma distribuição uniforme de pressão sobre os corpos de prova. Qualquer equipamento que satisfaça essa exigência básica pode ser utilizado, a partir de grampos de passagem de correntes e um computador controlando todo o processo de soldagem do equipamento (AGEORGES; HOU, 2001 1a).

O processo da soldagem por resistência elétrica pode ser observado na Figura 11.

Figura 11-Sistema esquemático da soldagem por resistência elétrica.



Fonte: Panneerselvam; Aravindan e Noorul Haq (2012).

O fornecimento de energia elétrica pode ser tanto de corrente contínua ou alternada, pois ambos são aplicáveis para o processo de soldagem. Dificuldades podem surgir do fato de que a fonte de alimentação pode ser um fator limitante para o nível de potência ou o tamanho da solda. O dispositivo de fixação dos elementos resistivos por outro lado, é essencial para a realização de uma pesquisa que produz soldagens satisfatórias com qualidade consistente, especialmente nos casos em que o elemento de aquecimento de fibra de carbono é usado (STAVROV; BERSEE, 2005). Dispositivos de fixação são geralmente bastante simples. Eles são feitos de metais diferentes, com boas características de condutores (latão, cobre) e a conexão real é obtida através da aplicação de uma determinada pressão de aperto (ALI; et al, 2004).

Embora a soldagem por resistência elétrica ainda não seja uma técnica de junção totalmente desenvolvida, já é aplicada com sucesso na indústria aeroespacial, como por exemplo, pela fabricante holandesa Fokker. É utilizada para unir estruturas relativamente grandes e complexas (STAVROV; BERSEE, 2005).

2.9 ELEMENTO RESISTIVO

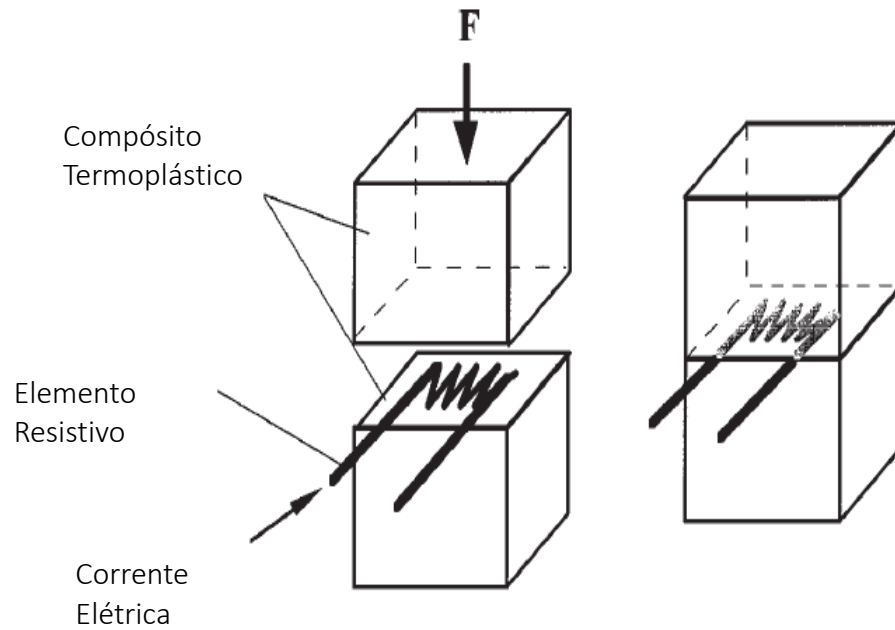
O elemento de aquecimento, ou elemento resistivo, supre a necessidade da transferência de energia durante o processo de soldagem de compósitos (CHAWLA, 1998). É considerado um elemento crucial, controlado pelo processo de eletrofusão, que fornece energia e contribui para a qualidade dos materiais soldados (STAVROV; BERSEE, 2005). Este elemento permanece aderido à solda, tornando-se necessária a existência de uma compatibilidade entre esse e o restante do material (STAVROV, BERSEE, 2005; SOUZA, 2013).

A princípio, qualquer material que conduza eletricidade pode ser utilizado como elemento resistivo. Porém, na literatura, são descritos e usados as malhas metálicas e o tecido de fibra de carbono (STAVROV; BERSEE, 2005). Em comparação aos *prepregs* unidirecionais, o emprego de tecidos de carbono como elemento resistivo fornece melhores uniformidades de temperatura e propriedades mecânicas. Mesmo assim, outros materiais têm sido utilizados para esta finalidade (NINO et al., 2008).

Todavia, a malha metálica apresenta algumas desvantagens, pois pode ser um concentrador de tensões, atuar como contaminante, resultar em um aumento significativo de peso, favorecer a degradação ambiental, apresentar diferentes coeficientes de expansão térmica, quando comparada com os demais constituintes presentes no compósito e causar corrosão (STAVROV; BERSEE, 2005).

A Figura 12 representa a soldagem por resistência elétrica, destacando-se o elemento resistivo (*resistance heating element*).

Figura 12-Princípio básico por resistência elétrica.



Fonte: Hou; Ye e Mai (1999).

As malhas metálicas estão disponíveis em diferentes categorias, com diâmetros de fios e larguras diferentes. A fim de se obter um bom desempenho mecânico, os efeitos desses dois parâmetros na qualidade da solda, devem ser investigados (DUBÉ et al., 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir encontram-se relacionados os materiais, equipamentos, procedimentos e a metodologia utilizados para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

3.1 MATERIAIS

Os laminados de PEI reforçados com fibras de carbono foram adquiridos da empresa TenCate (Holanda). Os elementos resistivos utilizados foram as malhas metálicas de aço inox de 100, 200 e 300 mesh e foram adquiridas da empresa SOLOTEST e o tecido de fibra de carbono, do tipo *plain weave*, da empresa americana Hexcel.

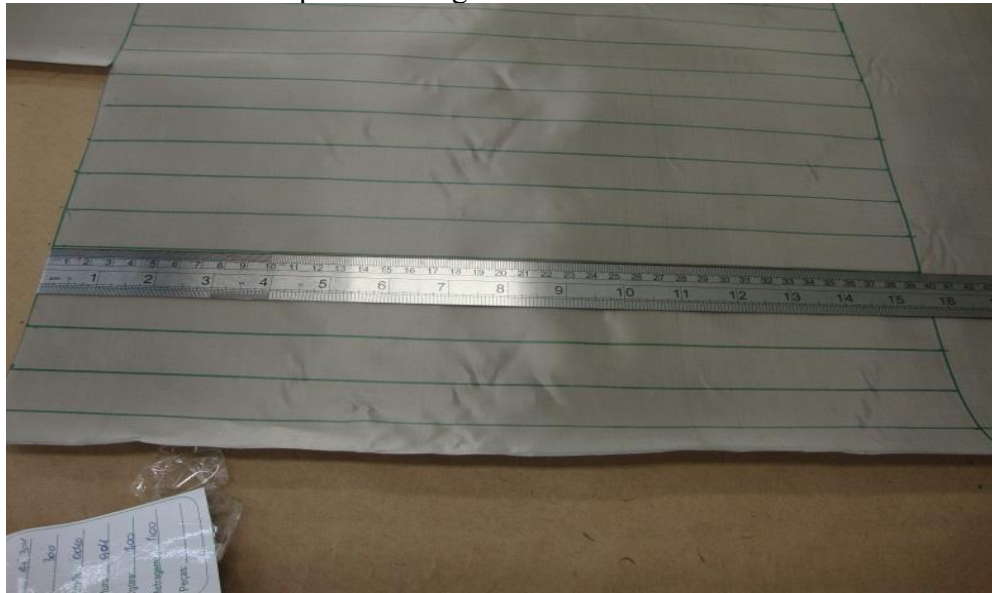
Os laminados de PEI/fibras de carbono foram confeccionados com tecidos na configuração 8 HS com espessuras nominais entre 2,0 a 3,5mm, e com configuração $(0/90)_{5s}$, contendo aproximadamente 50% em volume de fibras.

3.1.1 Elementos resistivos utilizados

3.1.1.1 Malha metálica

Como elementos resistivos utilizados para os testes de soldagem com os compósitos foram utilizadas malhas metálicas de aço inox AI 304 de 100, 200 e 300 mesh. As malhas, em forma de telas, foram produzidas pela empresa SOLOTEST, sendo adquiridas comercialmente da empresa TEGAPE. Para utilização destes elementos resistivos na soldagem dos laminados termoplásticos, as malhas foram cortadas nas dimensões de 40 cm de comprimento por 2,5 cm de largura, como ilustrado na Figura 13.

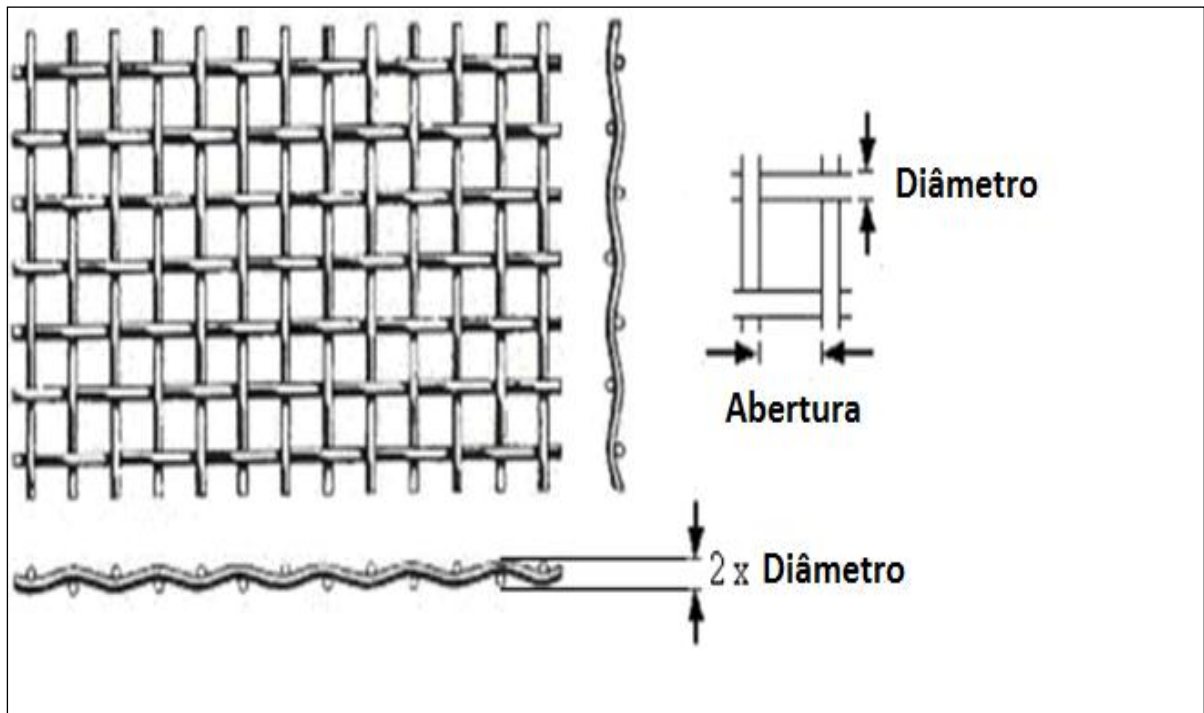
Figura 13-Malha metálica nas dimensões de corte para utilização como elemento resistivo para a soldagem dos laminados.



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 14 apresenta, de forma representativa, a configuração das malhas metálicas, sendo evidenciado o posicionamento da trama e urdume deste material. As características técnicas do fornecedor para as malhas de aço inox AI 304 são apresentadas na Tabela 3 e a composição química do material das malhas metálicas são apresentadas pela Tabela 4.

Figura 14-Representação esquemática das malhas metálicas utilizadas.



Fonte: Labrandero (2009).

Tabela 3 - Dimensões da malha metálica fornecidas pelo fornecedor.

Material	Mesh	Diâmetro do fio (mm)	Abertura (mm)
AI 304	200	0,06	0,07
AI 304	100	0,10	0,15
AI 304	300	0,04	0,04

Fonte: Tegape (2013)

Tabela 4 - Composição química das malhas de aço inox AI 304 utilizadas.

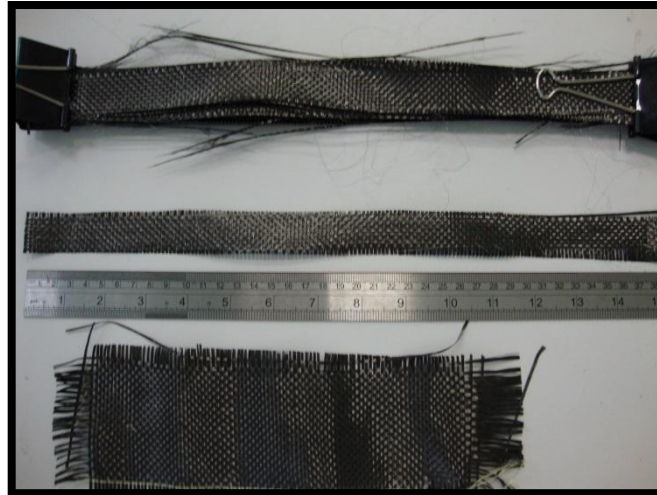
Composição química (%)	Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Cromo	Níquel
Aço AI 304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00	8,00

Fonte: Abinox (2013).

3.1.1.2 Fibra de Carbono

As fibras de carbono foram adquiridas da empresa americana Hexcel. Trata-se de fibras na forma de tecido plano (*plain weave*), contendo 3000 monofilamentos. As imagens da fibra de carbono utilizadas são apresentadas na Figura 15.

Figura 15-Tecido de fibra de carbono utilizado como elemento resistivo na soldagem dos laminados



Fonte: Produção do próprio autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS PEI

Antes da realização da soldagem, os laminados termoplásticos foram caracterizados como adquiridos. A caracterização dos laminados PEI foi realizada com o objetivo de estudar comparativamente os efeitos do processo de soldagem por resistência elétrica nas propriedades mecânicas, estruturais, térmicas e morfológicas destes materiais. Os ensaios realizados para a caracterização dos laminados foram: microscopia óptica; termogravimetria, análise dinâmico-mecânica e análise termomecânica. Posteriormente, a soldagem foi realizada utilizando-se como elemento resistivo as malhas metálicas de 200 e 300 mesh. Os ensaios e condicionamentos ambientais realizados para o estudo comparativo foram: análise dinâmico-mecânica, análise termomecânica, *lap shear*, Iosipescu, microscopia óptica, condicionamento em câmara higrotérmica e condicionamento em câmara UV. A seguir estão detalhados os ensaios e condicionamentos realizados em ambas as etapas do trabalho.

3.3 EQUIPAMENTOS E ENSAIOS

3.3.1 Sistema de soldagem

O processo de soldagem foi realizado em uma soldadora por resistência elétrica, construída para este propósito, disponível no Laboratório de Polímeros e Compósitos da do Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais da UNESP- Guaratinguetá (Figura 16).

Figura 16-Máquina de soldagem por resistência elétrica disponível na UNESP-Guaratinguetá.



Fonte: Produção do próprio autor

Para utilizar a soldadora, é necessário o uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), devido ao risco que há no possível desprendimento de gases do compósito utilizado, e à alta amperagem (acima de 38A, com elevado tempo de soldagem, 300s, por exemplo) que passa pela máquina. Desse modo, luvas anti-estática, máscara de gás, protetor auricular, jaleco de manga comprida, sapatos fechados e calça comprida devem ser utilizados. Estes itens previnem a ocorrência de acidentes pessoais, como por exemplo, intoxicação devido aos gases liberados na soldagem, causados pela degradação do polímero.

A fim de iniciar o processo de soldagem, os corpos de prova e a malha metálica foram devidamente alocados na prensa. O posicionamento dos corpos de prova para ensaio e a ligação

das extremidades da malha metálica aos terminais positivo e negativo de uma fonte de alimentação elétrica, foi realizado manualmente pelo operador (Figura 17).

Figura 17-Posicionamento das amostras de *lap shear* na prensa.



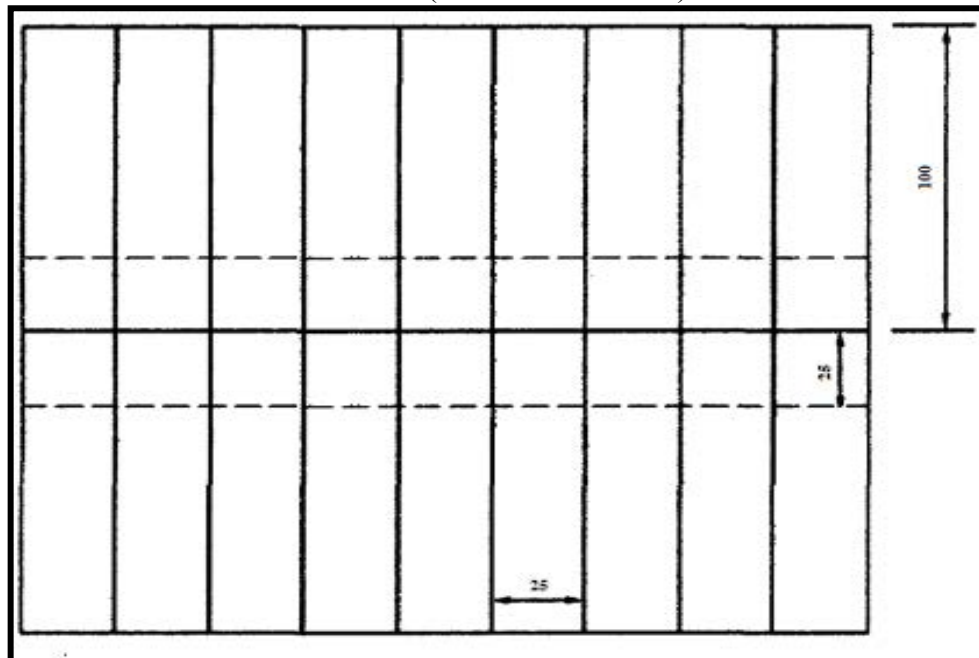
Fonte: Produção do próprio autor

Todo o sistema de soldagem foi controlado por um software operacional, que comandou os dispositivos atuadores e realizou a leitura dos dados do processo para registro. O software de controle é responsável pela liberação da pressão necessária a partir de uma válvula reguladora para que os cilindros da prensa apliquem a força solicitada nos corpos de prova. Estabilizada a força aplicada, o software comanda a fonte de alimentação elétrica para a aplicação de corrente e tensão definidas, responsáveis pelo aquecimento da malha metálica e, por contato, o aquecimento dos corpos de prova. As forças aplicadas, bem como a corrente e tensão, permaneceram atuadas até que o tempo definido para soldagem na configuração do ensaio tenha sido atingido, sendo interrompidos automaticamente ao término deste período.

3.3.2 Preparo das amostras dos laminados

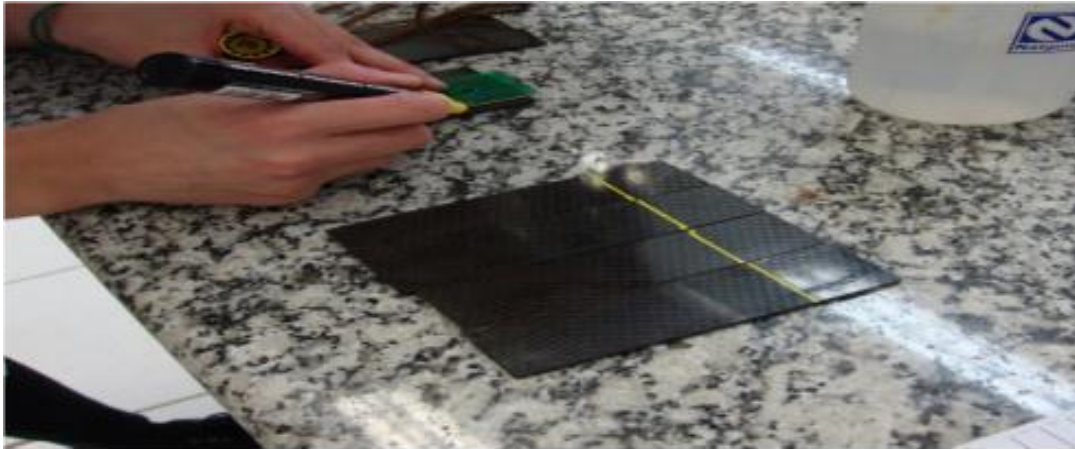
Antes do início do processo de soldagem, a superfície dos laminados foi limpa com álcool etílico. Em seguida estes foram marcados nas dimensões como apresentadas na Figura 18. As amostras foram cortadas nas dimensões de 100 mm de comprimento por 25 mm de largura. Em seguida as amostras foram cortadas em serra de fita, lixadas as laterais das amostras e limpas novamente com álcool etílico, marcadas as regiões para união (Figura 19) e assim submetidas ao processo de soldagem.

Figura 18-Dimensões para corte dos corpos de prova extraídos do laminado PEI/fibras contínuas (dimensões em mm).



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 19-Marcação das amostras das regiões a serem unidas pelo processo de soldagem por resistência de compósitos.



Fonte: Produção do próprio autor

3.3.3 Processo de soldagem das amostras dos laminados

O processo de soldagem consistiu em aquecer, via efeito Joule, com o uso de corrente elétrica, a malha metálica (utilizada como elemento resistivo/elemento de aquecimento) ou outro elemento resistivo (fibra de carbono) posicionado entre corpos de prova sobrepostos. Com o aquecimento da malha em contato com o material dos corpos de prova, estes passaram pelo processo de aquecimento. Sendo aplicada a força (pressão de soldagem) aliada à aplicação contínua de corrente elétrica sobre este sistema, ocorreu a fusão/amolecimento dos materiais em contato com o elemento resistivo. Desligando-se a fonte de corrente elétrica, os materiais se resfriaram produzindo a soldagem dos corpos de prova.

O processo de soldagem foi realizado por meio do software de controle da soldadora. Todo o processo posterior, até sua finalização, foi realizado por este software de controle, que comandou os dispositivos atuadores e realizou a leitura dos dados do processo para registro, conforme definido na configuração de cada um dos ensaios realizados.

Iniciado um ensaio, o software de controle faz com que uma válvula reguladora libere a pressão necessária para que os cilindros da prensa apliquem a força solicitada sobre os corpos de prova nas configurações do processo. Estabilizada a força aplicada, o software comanda a fonte de alimentação elétrica para a aplicação de corrente e tensão pré-definidas, responsáveis pelo aquecimento da malha metálica e, por contato, o aquecimento dos corpos de prova. A força aplicada, bem como a corrente e tensão, permaneceu atuadas até que o tempo definido para soldagem na configuração do ensaio tenha sido atingido, sendo interrompidos automaticamente ao término deste período.

3.3.4 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

As análises dinâmico-mecânicas foram realizadas utilizando-se o equipamento DMA 6100 da SII-Nanotechnology (Figura 20). O modo usado foi do tipo *dual cantilever* (modo de flexão), na frequência de 1 Hz; amplitude de 10 μm ; força aplicada de 2000 mN; aquecimento de 35 °C até 180 °C, com taxa de 3 °C/min; atmosfera inerte de N₂ com fluxo de 100 mL/min. O ensaio foi baseado na norma ASTM D 7028 (2010).

Figura 20-Equipamento de DMA disponível na UNESP-Guaratinguetá.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise térmica dinâmico-mecânico tem sido amplamente usada como uma técnica de caracterização de polímeros através da detecção dos processos de relaxação, tanto macroscópico quanto molecular. Essa técnica fornece informações a respeito do módulo elástico (E'), do módulo de dissipação viscosa (E'') e do amortecimento mecânico ou atrito interno ($\tan\delta = E''/E'$) de um material, quando sujeito a uma solitação dinâmica. (CANEVAROLO JR., 2007). A partir dessas variáveis, é possível correlacionar propriedades como tenacidade, resistência ao impacto, tempo de vida sob fadiga, envelhecimento, resistência à propagação de trincas, módulo de amortecimento, rigidez; obter informações a respeito do grau de vulcanização (cura) e do efeito de modificadores, carga e outros aditivos. Uma das utilizações mais comuns da técnica de DMA é a determinação da temperatura de transição vítrea

(Tg), que apresenta grande vantagem de ser um método direto de medição. (CANEVAROLO JR., 2007).

Os critérios para a seleção da Tg dos dados de DMA são geralmente a temperatura *onset* obtida no módulo de perda (E''), a temperatura de pico em E'' ou a temperatura de pico em $\tan\delta$. A curva $\tan\delta$ é a que mais aparece na literatura como critério de seleção, devido à facilidade de visualização dos picos que ocorrem em $\tan\delta$ e pelo fato de se eliminar os efeitos dos erros instrumentais associados ao equipamento, uma vez que se faz a relação entre E''/E' . Já considerando-se a norma ASTM D7028, a Tg deve ser determinada pela temperatura *onset* no E' , uma vez que é mais conservativa, portanto, mais segura no caso de aplicações aeroespaciais. Muitos fatores influenciam na medição de Tg por DMA, podendo ser arranjados em três grupos: fatores instrumentais, teste de frequência e características do material, em termos de cristalinidade, teor de umidade, orientação das cadeias poliméricas e a história térmica do polímero (AZEVEDO; MOTHÉ, 2002).

Especificamente para compósitos poliméricos, é importante o estabelecimento da Tg para ser definida a região de trabalho de um determinado componente (a Tg define a temperatura de trabalho no caso de termorrígidos). No presente caso, a temperatura de trabalho para compósitos termoplástico é definida com base em suas temperaturas de transição vítrea, degradação e fusão/amolecimento associadas (ORTIZ, 2008).

Foram realizadas as análises por DMA nos compósitos PEI/fibra de carbono com o objetivo de avaliar comparativamente a influência do processo de soldagem na temperatura de transição vítrea das amostras com e sem condicionamentos, soldadas com diferentes malhas metálicas.

3.3.5 Análise Termomecânica (TMA)

As análises termomecânicas foram obtidas utilizando-se o equipamento TMA/SS 6100 (Thermo Mechanical Analysis), marca SII- Nanotechnology Inc. – Seiko, modelo EXSTAR6000, SW Muse Standard Analysis Versão 6.2U, disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP, Campus de Guaratinguetá (Figura 21). Este equipamento foi calibrado em altura, temperatura e força, de acordo com as especificações do fornecedor, e checado periodicamente com padrões. As análises foram realizadas nas amostras de compósitos produzidas, da temperatura ambiente até 180°C, a taxa de aquecimento de 3°C/min no modo de expansão térmica sob atmosfera de nitrogênio (100 mL/min). Os ensaios foram baseados nas normas ASTM E1545, para obtenção da Tg e E831 para determinação do coeficiente de expansão térmica linear.

Figura 21-Equipamento de TMA disponível na UNESP-Guaratinguetá.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise termomecânica mede a deformação de um material sob a carga não oscilatória em função de um programa controlado de temperatura, ou do tempo na temperatura constante. As experiências de TMA são conduzidas geralmente sob o carregamento estático com variedade de configurações do corpo de prova no modo de medida, tensão, compressão, torção ou em flexibilidade. Os vários acessórios estão disponíveis para permitir que os instrumentos operem em modos especiais tais como relaxação da tensão, carregamento flexível, carregamento de tração dos filmes e fibras, reometria de configuração de placas paralelas e dilatométrica de volume (AZEVEDO; MOTHÉ, 2002).

O tipo de corpo de prova utilizado determina o modo de operação do instrumento, a maneira em que a força é aplicada à amostra e a quantidade dessa tensão. A medida mais comum em TMA é o coeficiente de expansão térmica linear (AZEVEDO; MOTHÉ, 2002).

De forma geral, a análise termomecânica pode ser utilizada no estudo das mudanças nas dimensões (comprimento, espessura ou largura) de uma amostra a partir de variações da temperatura do material (ICHIMURA, 1985).

Dentro de uma faixa linear de temperatura limitada, pode-se considerar que há uma relação linear entre as deformações térmicas (ϵ_T) de expansão (+), ou contração (-), sofridas por um material e a variação de temperatura (ΔT) a ele imposta. Deve-se recordar que as deformações normais de um componente são adimensionais e representam o quociente de uma variação de comprimento em relação ao comprimento inicial do mesmo. A relação linear ente

estas duas grandezas ($\epsilon_T/\Delta T$), é definida pelo coeficiente de expansão térmica linear (α) do material (NETO, PARDINI, 2006).

3.3.6 TGA (Análise Termogravimétrica)

Análises termogravimétricas foram realizadas utilizando o analisador termogravimétrico SII Nanotechnology Exstar 6000, série TG/DTA 6200, como apresentado na Figura 22, com o intuito de avaliar a amostra como recebida para se conhecer a temperatura de degradação dos materiais a serem soldados. Para isso, esta análise foi realizada utilizando-se a taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob fluxo constante de nitrogênio de 100 mL/min e em uma faixa de temperaturas compreendida entre 30°C a 800°C.

Figura 22-Equipamento de TGA disponível na UNESP-Guaratinguetá.



Fonte: Produção do próprio autor

3.3.7 Lap Shear

Os ensaios de *lap shear* foram realizados na máquina universal de ensaios Shimadzu, baseando-se na norma ASTM D1002-10. As amostras de teste foram colocadas nas garras da máquina de ensaio universal e tracionadas a 1,3 mm / min (0,05 in / min) até falha (Figura 23).

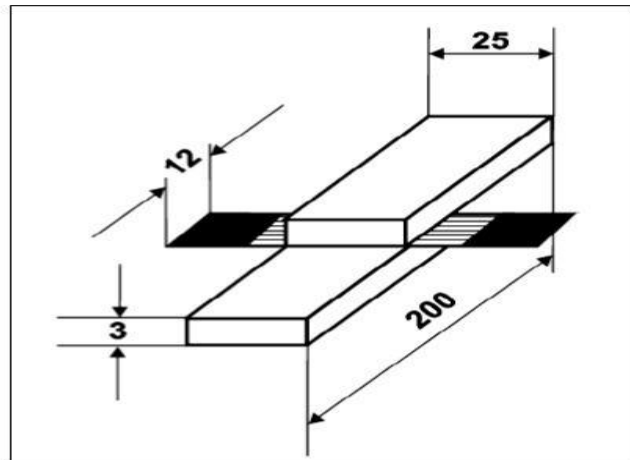
Figura 23-Máquina universal de ensaios Shimadzu.



Fonte: Produção do próprio autor

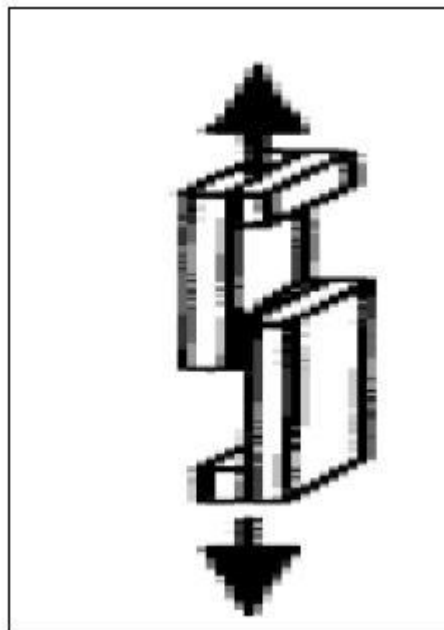
O teste de *Lap-Shear* (LSS) consiste em um importante método para avaliar a resistência ao cisalhamento de compósitos e é de longe o método mais comumente utilizado para investigar a eficiência de superfícies soldadas por resistência elétrica para materiais compósitos. Trata-se de um teste envolvendo solicitações de tração longitudinal da amostra soldada até a ruptura. O detalhamento das dimensões dos corpos de prova e o desenho esquemático do ensaio de *Lap Shear* são apresentados nas Figuras 24 e 25 (AGEORGES; HOU, 2001).

Figura 24-Dimensões em milímetros dos cdp's utilizados para testes de *lap shear* de juntas soldadas.



Fonte: Stavrov e Bersee (2004).

Figura 25-Desenho esquemático do ensaio de *lap shear*.

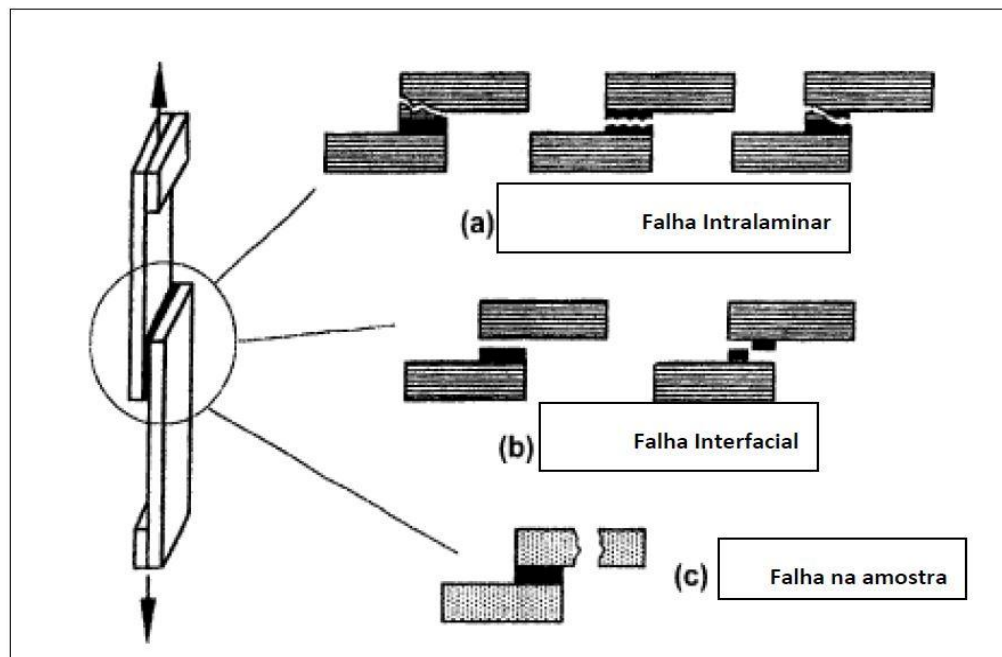


Fonte: Stavrov e Bersee (2004).

A observação visual do modo de falha de amostras testadas durante este ensaio também pode fornecer algumas informações sobre a qualidade da solda. Três tipos de modos de falha de amostras são observados durante o ensaio de *lap shear* em compósitos sendo estes: intralaminar; interfacial e fratura da amostra, como apresentado esquematicamente na Figura 26. O modo de falha intralaminar é considerado nestes casos, quando a fratura ocorre na estrutura com grandes quantidades de material, no elemento de aquecimento (rompimento do elemento de aquecimento) ou dentro ambos. Este tipo de falha geralmente é acompanhado de

maiores valores de resistência do teste de *lap shear*, implicando, assim, melhor qualidade de solda. A falha interfacial ocorre na interface entre o laminado e o elemento de aquecimento ou resistivo e rendimentos mais baixos de valores da resistência mecânica observada no ensaio de *lap shear*, geralmente como parâmetro de resposta a baixa eficiência do processo de soldagem (STAVROV e BERSEE, 2004).

Figura 26-Modos de falha típicos observados durante o ensaio de *lap shear* em compósitos: intralaminar, interfacial e fratura.

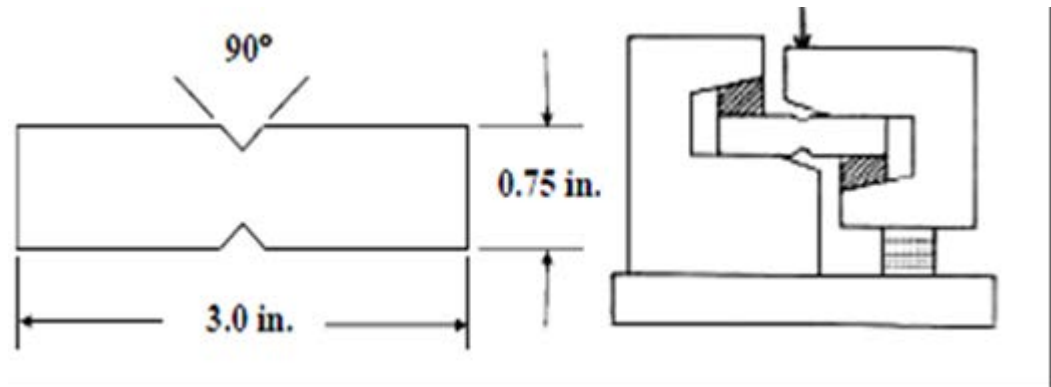


Fonte: Stavrov e Bersee (2004).

3.3.8 Iosipescu

Este método de teste foi projetado para produzir dados de propriedades de cisalhamento para especificações de materiais, pesquisa e desenvolvimento, garantia de qualidade e design e análises estruturais. Tanto as propriedades de cisalhamento no plano ou interlaminar podem ser avaliadas, dependendo da orientação do sistema de coordenadas do material em relação ao eixo de carregamento. Os fatores que influenciam na resposta do procedimento são: materiais e seus métodos da preparação, configuração do empilhamento, preparação e condicionamento da amostra, condições ambientais dos testes, alinhamento e fixação da amostra, velocidade dos testes, tempo de exposição na temperatura requerida, volume de vazios e volume percentual de reforço. Para a realização deste ensaio foram utilizados os dispositivos próprios como ilustrado nas Figuras 27 e 28, de acordo com a norma ASTM D5379.

Figura 27-Desenho esquemático das dimensões de amostra do ensaio Iosipescu.



Fonte: Stavrov e Bersee (2004).

Figura 28-Dispositivo próprio do ensaio Iosipescu.



Fonte: Produção do próprio autor

As amostras de Iosipescu foram lixadas a fim de retirar os retalhos laterais das malhas, e realizaram-se os entalhes, como ilustrados na Figura 29.

Figura 29-Amostras para realização do ensaio Iosipescu.



Fonte: Produção do próprio autor

A tensão de cisalhamento foi calculada de acordo com a equação 1.

$$\sigma = F/A \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: σ = tensão de cisalhamento Iosipescu; F = força aplicada no corpo de prova; A = área da secção do corpo de prova.

3.3.9 Microscopia óptica

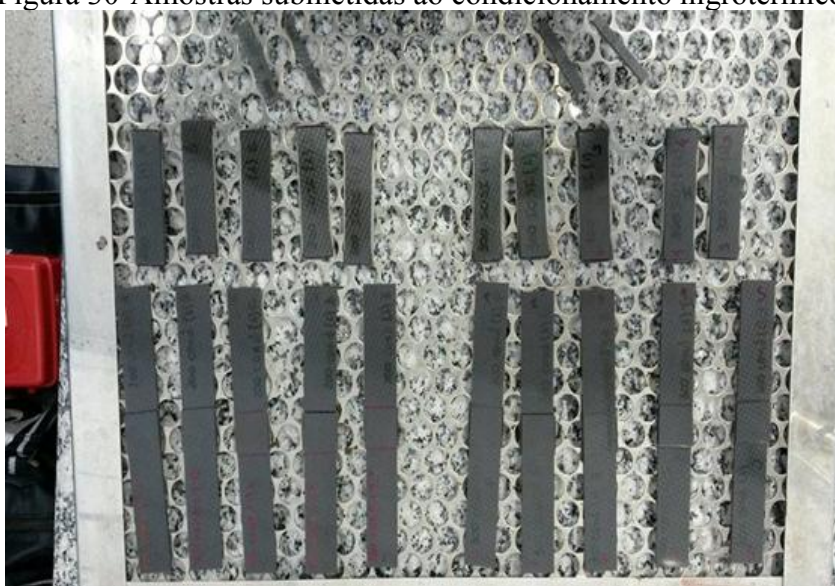
A fim de avaliar da eficiência do processo de soldagem por resistência elétrica, realizaram-se análises por microscopia óptica utilizando um microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000. Não foi necessário o uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.4 CONDICIONAMENTOS AMBIENTAIS

3.4.1 Condicionamento Higrotérmico

A fim de avaliar o efeito do condicionamento higrotérmico nos compósitos PEI/fibra de carbono soldados com as malhas metálicas de 200 e 300 meshes, foram submetidas a este condicionamento cinco amostras para o ensaio Iosipescu, cinco amostras para o ensaio *lap shear* e duas amostras para o ensaio de DMA e TMA para cada malha metálica, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30-Amostras submetidas ao condicionamento higrotérmico.



Fonte: Produção do próprio autor

Utilizou-se uma câmara de climatização computadorizada da marca Marconi modelo MA 835/UR, disponível no Laboratório de Condicionamento Ambiental do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT), do campus UNESP/Guaratinguetá (Figura 31). A câmara é calibrada para manter, por monitoramento automático, o valor da temperatura com incerteza de 1%. A exposição higrotérmica em câmara de climatização é baseada na norma ASTM D 5229/D 5229M-92 (*Moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials*) para materiais compósitos a serem submetidos a ensaios mecânicos na condição úmida. As amostras foram condicionadas na câmara por um período de 4 semanas, à temperatura de 80°C e umidade relativa de 90%, ou seja, tempo suficiente para que o material ficasse saturado de umidade.

A absorção de umidade das amostras foi monitorada em função do tempo, a partir da medição da variação de massa dos corpos de prova. A finalidade era atingir a condição de equilíbrio (saturação), ou seja, sem variação significativa de ganho de massa.

Figura 31-Câmara de condicionamento higrotérmico da marca Marconi modelo MA 835/UR.



Fonte: Produção do próprio autor

Antes de efetuar o condicionamento higrotérmico as amostras passaram por um ciclo de secagem em estufa a vácuo da marca Quimis, modelo Q819V2 (Figura 32), pertencente ao Laboratório de Cerâmica do DMT por 24 horas e 110°C, de modo a garantir a eliminação do teor de umidade inicialmente presente no material. Em seguida, foram colocadas no dessecador com sílica gel por aproximadamente 40 minutos (Figura 33). Após a pesagem em uma balança analítica Shimadzu AUX220, com precisão da ordem de 0,1 mg, pertencente ao Laboratório de Condicionamento Ambiental do DMT, as amostras foram novamente colocadas em estufa por 3 horas e esse processo se repetiu até ocorrer a estabilização das massas. Em seguida, esses

corpos de prova e amostras de acompanhamento foram transferidos para a câmara de climatização e o condicionamento foi iniciado.

Figura 32-Estufa utilizada no processo de ciclo de secagem.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 33-Dessecador utilizado no processo de ciclo de secagem.



Fonte: Produção do próprio autor

Na primeira semana, as amostras foram removidas da câmara todos os dias, por pequenos intervalos de tempo e pesadas. Depois, as amostras passaram a ser retiradas três vezes por semana, objetivando acompanhar o ganho de massa ao longo do tempo. Esse procedimento foi realizado até que o material atingisse a saturação de umidade. Nesse período de controle de ganho de massa, as amostras de acompanhamento foram retornadas imediatamente a câmara higrotérmica após a pesagem (Figura 34).

Figura 34-Amostras no condicionamento higrotérmico.



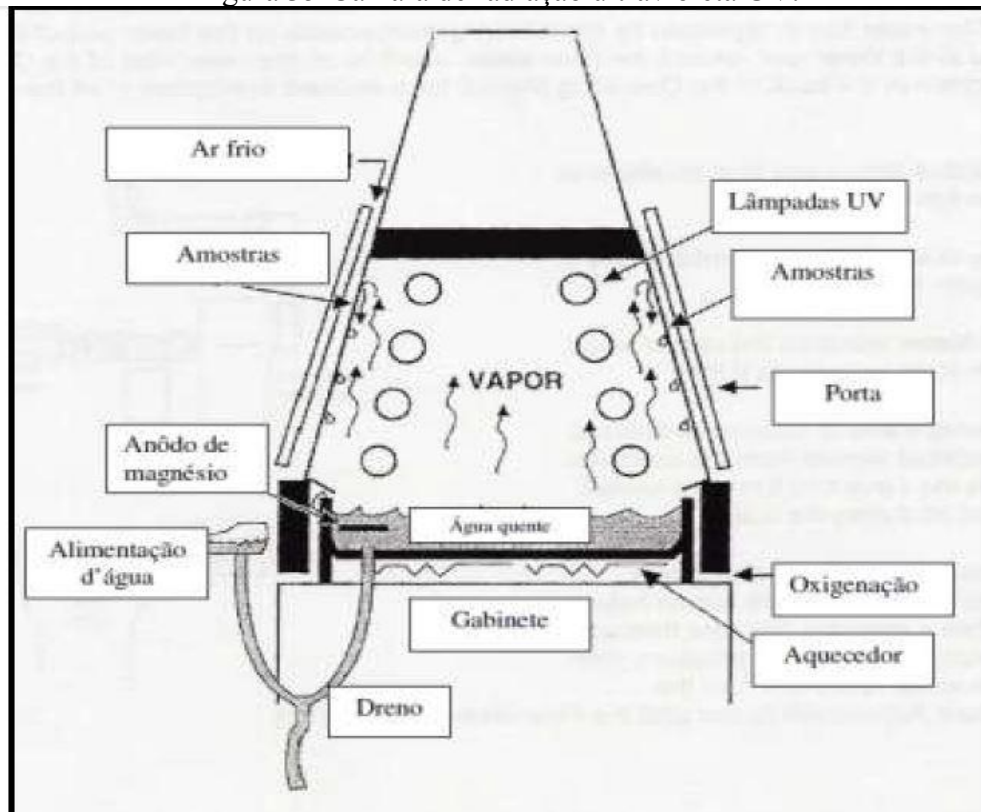
Fonte: Produção do próprio autor

3.4.2 Condicionamento em câmara UV

Para avaliar o efeito do condicionamento por radiação UV nos compósitos PEI/fibra de carbono, foram submetidas a esse condicionamento cinco amostras para o ensaio de *lap shear* e duas amostras para o ensaio de DMA e TMA para cada malha metálica.

Foi utilizada uma câmara de envelhecimento por UV adquirida a partir do projeto FAPESP nº 2005/54358-7. Esse equipamento foi operado utilizando lâmpadas fluorescentes UVB com irradiância de $0,76 \text{ W/m}^2$ a 313 nm, conforme especificado na norma ASTM G154, alternando entre ciclos de 8 horas de radiação UV e 4 horas de condensação, durante um mês, aproximadamente. A Figura 35 apresenta um desenho esquemático do funcionamento da câmara UV. O sistema de luz UV é composto pela intensidade de radiação aplicada e pelos tipos de luz utilizada (UVB-313 ou UVA-340) e o sistema de umidade é composto pela condensação e/borrifação de água.

Figura 35-Câmara de radiação ultravioleta UV.



Fonte: Mazur (2010).

O tempo mínimo de exposição requerido para produzir mudanças substanciais nas propriedades de interesse deve ser avaliado. Uma vez submetidos à radiação UV, as amostras foram testadas com ensaios mecânicos para determinar a degradação de suas propriedades mecânicas (CHACON, 2008).

A exposição à radiação ultravioleta pode ser benéfica para promover a cura de materiais poliméricos durante sua manufatura. Contudo, considerando aplicações de compósitos estruturais, essa exposição, combinada com oxigênio, resulta em fotodegradação que leva à reação de radicais livres com o oxigênio (MAHIEUX, 2006). Dada exposição suficiente à radiação UV, haverá degradação da integridade da matriz que eventualmente afetará as propriedades mecânicas e físicas dos compósitos (JANA, ZHONG, 2011). Essa degradação se dá principalmente na forma de cisão das cadeias intermoleculares, o que leva à diminuição da massa molar do polímero.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em duas partes: a primeira que aborda um estudo preliminar dos laminados de PEI/fibra de carbono que foi realizado com o intuito de conhecer as propriedades mais importantes a serem levadas em consideração para entender o comportamento dos mesmos depois do processo de soldagem e como estes laminados iriam se comportar em relação às solicitações em serviço. E a segunda parte que envolve a soldagem dos compósitos de PEI/FC com os diferentes elementos resistivos, sua caracterização térmica, mecânica e morfológica tanto das amostras condicionadas higrotermicamente e por UV como sem condicionamento.

4.1 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO LAMINADO COMO RECEBIDO

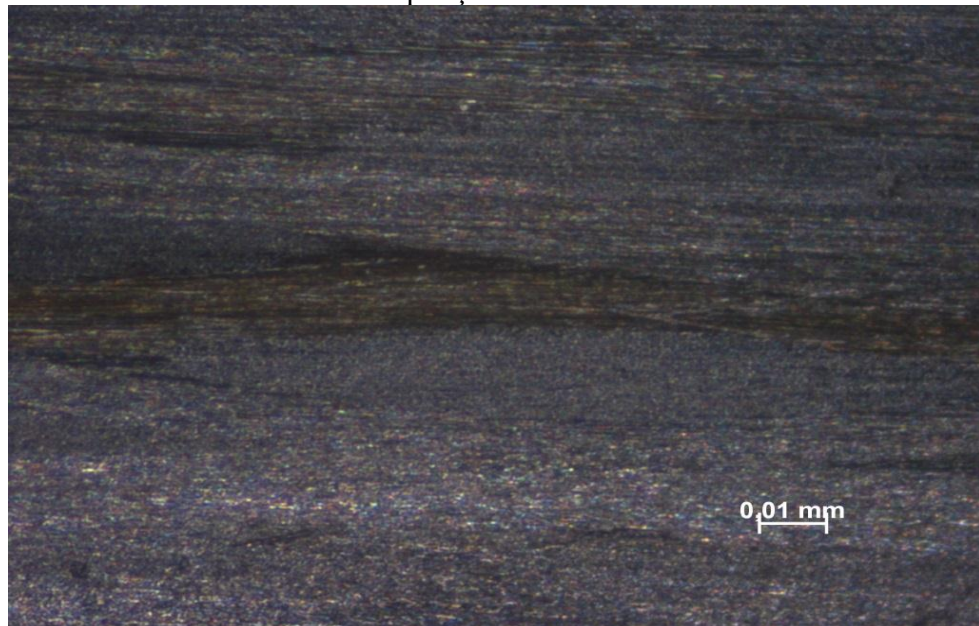
A utilização da técnica de microscopia óptica para compósitos tem muitos objetivos podendo-se citar: determinação da direção e propagação de trincas; avaliação de distribuição da homogeneidade de reforços fibrosos na matriz; verificação do grau de impregnação das fibras pela matriz assim como avaliar o teor fibra/matriz a partir da utilização de programas dedicados a esta finalidade (MARINUCCI, 2012).

Desta forma, durante o desenvolvimento deste trabalho, uma criteriosa análise microestrutural preliminar dos compósitos de PEI/fibras de carbono, como recebidos, foi realizada pela técnica de microscopia óptica utilizando amostras previamente polidas antes da realização do processo de soldagem.

A Figura 36 apresenta a imagem da seção transversal do compósito PEI/fibra de carbono na lupa Zeiss Stemi 2000, com ampliação de 40X. A partir dos resultados encontrados, pode-se observar que as camadas dos compósitos termoplásticos estudados apresentam-se bem compactadas, não sendo observados problemas oriundos de delaminação, nem regiões heterogêneas no que diz respeito à relação fibra/matriz. Desta forma, pode ser concluído que o compósito apresenta boa infiltração e uma adequada interface entre a matriz e o reforço.

Estas características são desejadas, pois estão diretamente relacionadas com melhores propriedades mecânicas e físicas dos materiais processados. Desta forma, a fotomicrografia obtida do laminado confirma que o processo de moldagem utilizado produziu um compósito adequado, apresentando poucos vazios ou defeitos intrínsecos ao processo de fabricação que poderiam interferir nos resultados obtidos a partir dos ensaios mecânicos.

Figura 36-Seção transversal do compósito PEI/fibra de carbono na lupa Zeiss Stemi 2000, com ampliação de 40x.



Fonte: Produção do próprio autor

4.1.2 Análises térmicas

4.1.2.1 Análise termogravimétrica-TGA

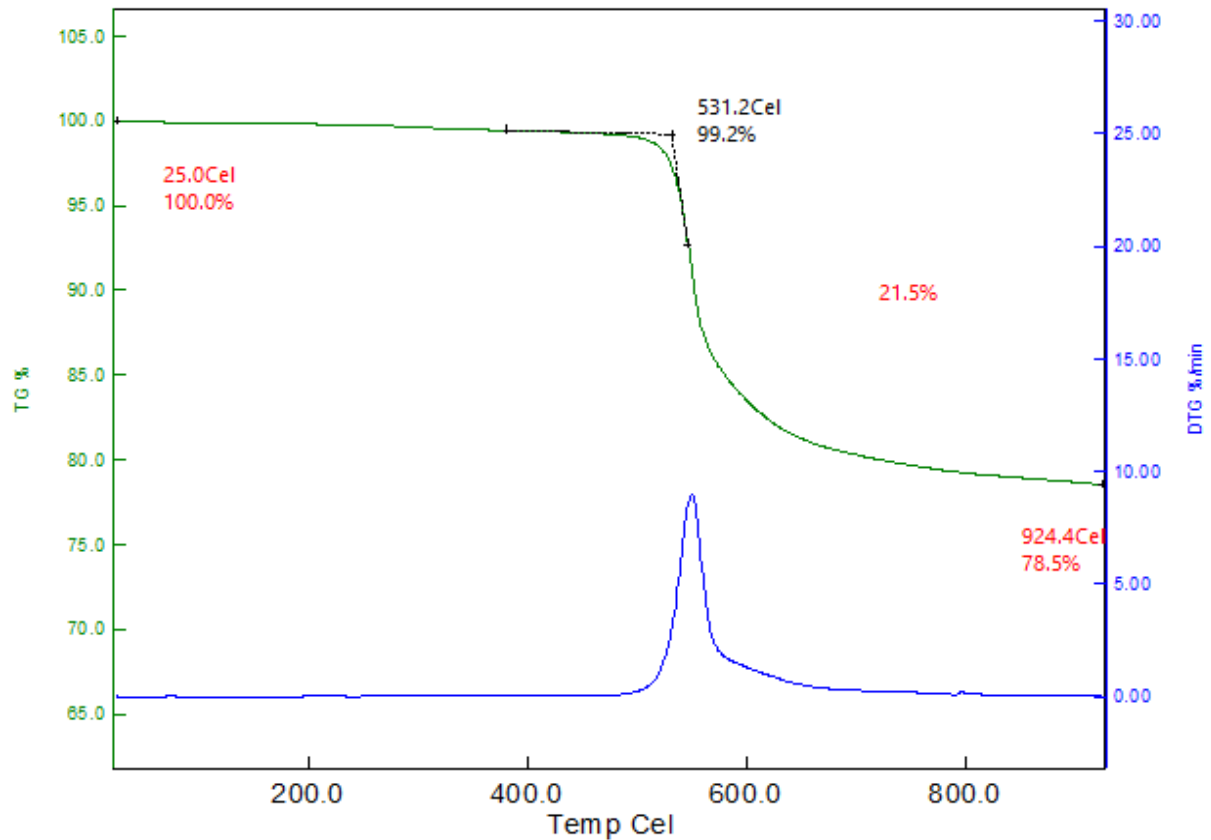
A partir da análise de termogravimetria (TGA) em compósitos pode ser evidenciado as reações de degradação da matriz polimérica, provocando perda de massa desta matriz. A variação da massa em função do tempo ou da temperatura é um registro de instabilidade térmica de um material (DE PAOLI, 2009).

Com o objetivo de se conhecer a temperatura máxima que pode ser atingida durante o processo de soldagem, assim como, se conhecer o comportamento termo-degradativo da matriz PEI, foram realizadas análises de TGA em todas as amostras estudadas. O resultado da análise termogravimétrica encontra-se apresentado na Figura 37 para os compósitos PEI/ fibra de carbono.

A partir dos resultados provenientes da análise termogravimétrica apresentada na Figura 37, foi possível identificar as temperaturas de início e final de degradação das cadeias poliméricas do compósito, bem como a porcentagem em massa de degradação do material PEI/fibra de carbono. A temperatura de início de degradação do PEI/fibra de carbono foi de aproximadamente de 480°C, apresentando uma perda de massa de total de 22%, e um resíduo final de 78,5%, correspondente a cinzas da matriz e a fibra de carbono utilizada no compósito. Pode-se ainda afirmar, com base na derivada, que o processo de decomposição térmica da

matriz polimérica em atmosfera de nitrogênio se dá através de uma única etapa, devido a presença de apenas um pico na derivada (DTG).

Figura 37-Curvas de TGA/DTG do compósito de PEI/fibra de carbono.



Fonte: Produção do próprio autor

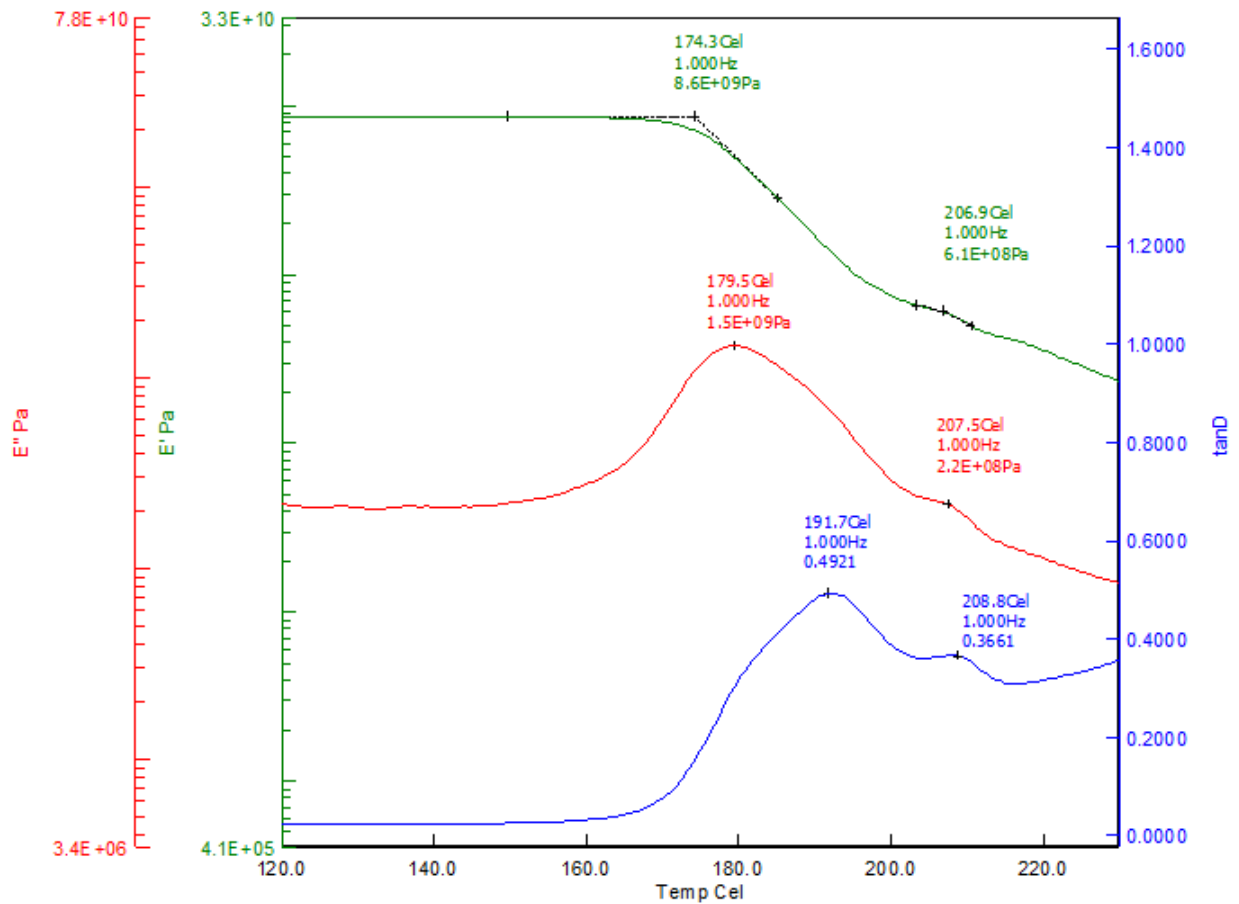
Assim, para a determinação da janela de processamento dos materiais estudados no presente trabalho, será considerada a temperatura de degradação obtida por TGA e a temperatura de transição vítrea do PEI, obtida no presente trabalho e por literatura ($T_g = 175^{\circ}\text{C}$ - 216°C) (JUNIOR; FARIA, 2012). De acordo com a literatura (WISE, 1999), para a soldagem de polímeros termoplásticos, especificamente aqueles que são amorfos, como é o caso do PEI, a temperatura que se deve ter como referência para o processo de soldagem é a de transição vítrea (T_g) (ou seja, a soldagem deve ocorrer em temperatura superior da T_g do material estudado), tendo o cuidado de não ultrapassar a temperatura de degradação do polímero em questão. A partir da T_g as cadeias atingem maior mobilidade, permitindo transferência de massa por difusão através da interface (WISE, 1999). Assim, a janela de processamento para o presente trabalho será de 175°C a 490°C .

4.1.2.2 Análise Dinâmico-mecânica- DMA

Com o objetivo de avaliar a influência do processo de soldagem na temperatura de transição vítrea das amostras estudadas, foram realizadas as análises por DMA no compósito antes da solda. Assim, a determinação da T_g é importante na especificação da temperatura de trabalho do material, ou seja, estabelecer em quais temperaturas o material pode atuar de forma segura, sem que suas características físico-químicas e mecânicas mudem significativamente, ao passar pela temperatura de transição vítrea. Nesse caso, algumas aplicações aeronáuticas exigem que o material trabalhe com uma margem de segurança a partir da transição vítrea do material (ORTIZ, 2008). Em se tratando da determinação da temperatura de transição vítrea por DMA, o material está sujeito a três formas de determinação, sendo estas: *onset* do módulo de armazenamento (E'), pico no módulo de perda (E'') e pico no módulo $\tan \delta$. A correlação entre essas propriedades permite levantar dados dos materiais como cristalinidade ou grau de cura, orientação, massa molar, propriedades como tenacidade, resistência ao impacto, rigidez, envelhecimento e tempo de vida sob fadiga (CANEVAROLO JR., 2007).

A Figura 38 apresenta a curva de DMA obtida para o compósito de PEI/fibra de carbono. Observa-se que a transição vítrea obtida pelo método de *onset* de E' foi 174°C, enquanto, pelo pico de E'' foi de 180°C e por $\tan \delta$ foi de 192°C. Estes resultados estão ligeiramente menores que o informado pela literatura que é de 220°C (MAZUR et al, 2008). Porém, deve-se lembrar que a T_g não é pontual e sim uma faixa de transição. Além disso, a curva de DMA mostra que a matriz polimérica utilizada deve possuir características bem particulares, não sendo constituída exclusivamente de um tipo de PEI, uma vez que se observam transições na região de 205°C, sugerindo a presença de outros componentes na matriz polimérica.

Figura 38-Resultados de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono.



Fonte: Produção do próprio autor

4.1.2.3 Análise Termomecânica- TMA

A análise termomecânica é a técnica a partir da qual a deformação de uma substância, sob carga não oscilatória, é medida em função da temperatura ou tempo (este quando a temperatura é constante), enquanto a substância é submetida a um programa controlado de temperatura (ICHIMURA, 1985).

De forma geral, a análise termomecânica pode ser utilizada no estudo das mudanças nas dimensões (comprimento, espessura ou largura) de uma amostra a partir de variações da temperatura do material (ICHIMURA, 1985).

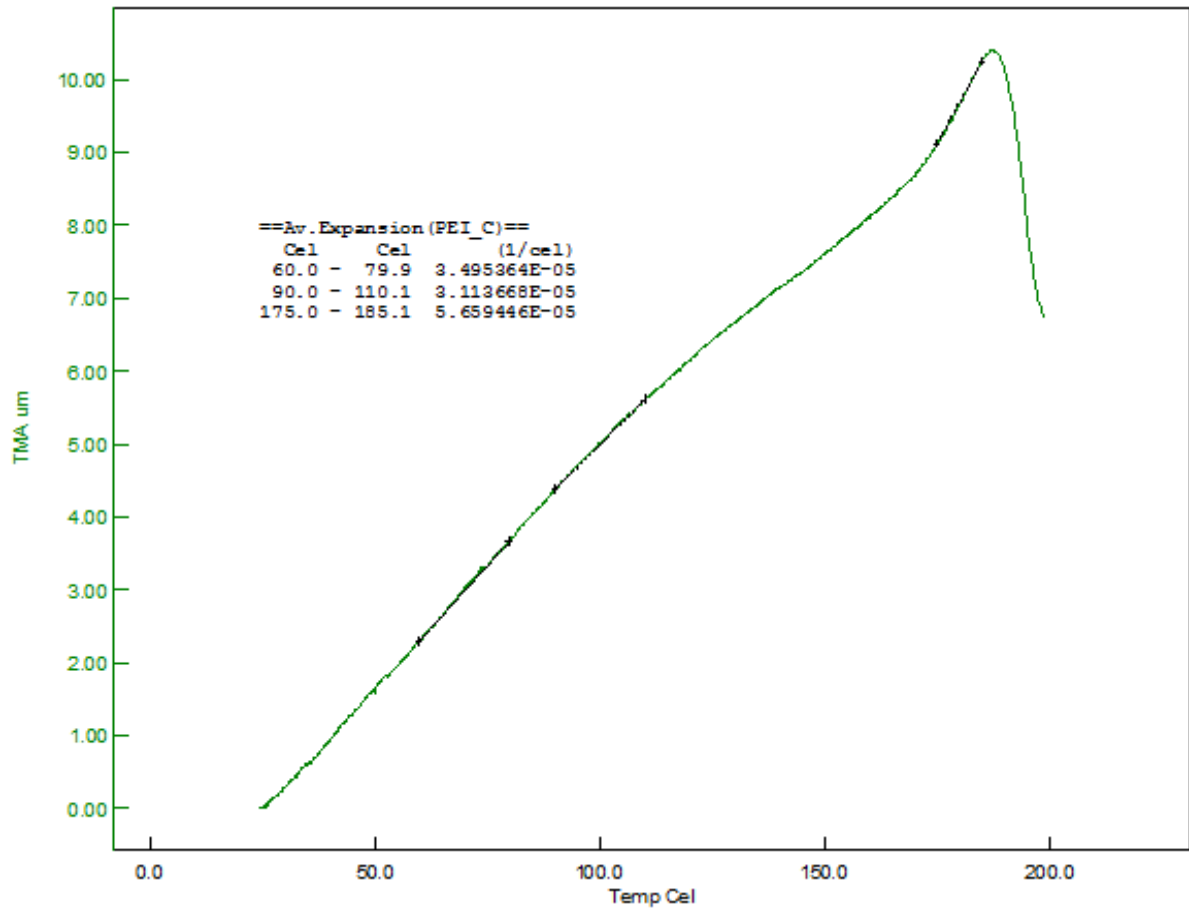
Em geral, os polímeros expandem-se mais que os materiais cerâmicos. Os metais puros, normalmente, apresentam coeficiente de expansão térmica, α , intermediários entre os valores elevados dos polímeros (exemplo, epóxi $44-120.10^{-6}C^{-1}$) e os reduzidos dos cerâmicos ($0,81.10^{-6}C^{-1}$), sendo que algumas ligas especiais (exemplo, Fe-Ni-Co) podem possuir baixos coeficientes de expansão térmica (CALLISTER, 2001). No caso de compósitos poliméricos

reforçados com fibras de carbono, devido ao baixo α da fibra de carbono sendo estes de $-0,26.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ (longitudinal) e $26.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ (transversal), os laminados multidirecionais tipicamente possuem α (1,8 a $9,0.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$) menores que os metais (alumínio $23.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$) (NETO, PARDINI, 2006).

Normalmente, para $\Delta T > 0$ o material expande e para $\Delta T < 0$ ocorre uma contração, pois na maioria dos casos α é positivo. Entre os materiais que apresentam esta variação negativa podem-se citar as fibras não isotrópicas de aramida ($-2,33. 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ (long) e $41. 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ (transv.)) e de carbono, nas quais α é negativo na direção longitudinal e positivo na transversal dos filamentos. As matrizes termorrígidas utilizadas nos compósitos poliméricos apresentam coeficientes de expansão térmica positivos e razoavelmente elevados (NETO, PARDINI, 2006).

A Figura 39 apresenta os valores de α encontrados para o compósito estudado no presente trabalho em diferentes temperaturas, a primeira em 60°C , 90°C e 175°C (próximo a T_g , que medida por TMA foi de 176°C). A partir deste estudo, pode-se observar que α variou entre $34.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $56. 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. O valor de α do compósito de PEI/fibra de carbono encontra-se dentro da faixa descrita na literatura para sistemas de resinas termorrígidas convencionais utilizadas em compósitos poliméricos, tais como a resina epóxi (varia de 15 a $100.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) e a resina fenólica (de 40 a $80.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) (OLIVEIRA, 2011).

Figura 39-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibras de carbono.



Fonte: Produção do próprio autor

4.2 SOLDAGEM DOS COMPÓSITOS COM OS ELEMENTOS RESISTIVOS

4.2.1 Efeito do elemento resistivo (aquecimento) na soldagem do compósito PEI/fibra de carbono

O tipo de elemento condutor de corrente elétrica consiste em um importante parâmetro a ser considerado no processo de soldagem por resistência elétrica. Como este elemento é o responsável por gerar aquecimento na interface para solda e também fica contido na junta soldada depois da operação, isto o torna um importante parâmetro a ser estudado no processo de soldagem por resistência elétrica para compósitos. Dentro deste contexto, a resistência do elemento de aquecimento é um dos parâmetros mais críticos no processo de solda por resistência (DUBÉ et al, 2011).

O grande interesse na utilização de fibras de carbono como elemento resistivo reside na sua compatibilidade com o material de reforço dos laminados, quando utilizado em compósitos também reforçados com fibras de carbono. No entanto, trabalhos disponíveis em literatura (STAVROV; BERSEE; BEUKERS, 2003; HOU et al, 2009), vêm apresentando que as utilizações de malhas de aço inoxidável são mais eficientes quanto a transmissão de calor na região a ser soldada do compósito termoplástico apresentando, desta forma, maiores janelas de processamento, maior força de adesão após soldagem e menor sensibilidade a variações de parâmetros do processo.

Alguns estudos publicados recentemente (EVENO; GILLESPIE, 1988; HOU et al, 1999) mostram que a fibra de carbono possui uma resistência específica de aproximadamente $0,2 \Omega$. Entretanto, quando estas fibras são submetidas a temperaturas de até 340°C , foi evidenciado um decréscimo entre 6,3 a 16% de sua resistência elétrica, enquanto que a malha metálica de aço inox apresenta um ganho de resistência elétrica de até 25%, nestas mesmas condições operacionais (DUBÉ et al, 2007; HOU et al, 1999).

Baseando-se nestas informações, foi também avaliado o elemento resistivo mais apropriado para a soldagem de compósitos de PEI visando aplicações aeronáuticas. Para isso, foram analisados dois tipos de elementos resistivos: a malha de aço e tecido de fibras de carbono.

Para este trabalho, inicialmente, foi realizado um estudo preliminar da soldagem dos laminados para a determinação das faixas mais apropriadas de corrente elétrica aplicada com o intuito de elevar a temperatura na região interfacial por efeito Joule, utilizando, para isso, as condições mínimas de pressão e tempo de soldagem da máquina soldadora. Desta forma, foi

primeiramente realizada a soldagem de amostras do laminado PEI/fibra de carbono, utilizando valores de pressão e tempo mínimo, sempre verificando se houve a soldagem das peças, variando-se a corrente elétrica. Quando era observado a não ocorrência da soldagem devido à utilização de uma baixa corrente elétrica, primeiramente a corrente era mantida constante, variando-se apenas a pressão e o tempo de soldagem. O critério adotado para a obtenção do valor de corrente elétrica máxima foi a observação visual sobre se houve a degradação polimérica na junta soldada.

A corrente elétrica, a pressão e o tempo de soldagem iniciais utilizados para estes testes preliminares foram: 29 A, 0,7 MPa e 50 s, respectivamente (ABRAHÃO, 2015). Estes ensaios foram realizados dentro do limite de valores máximos e mínimos de capacidade do sistema de soldagem construído.

Os resultados do desempenho destes elementos de aquecimento foram avaliados a partir da resistência obtida por *lap shear* após estes serem utilizados na soldagem de compósitos de PEI/fibra de carbono (uma vez que a principal vantagem da utilização de fibras de carbono é justamente evitar a utilização de um material não previsto na composição do compósito, foi selecionado um laminado com o mesmo elemento de reforço). Com relação ao elemento de aquecimento metálico foram selecionadas, para este estudo, malhas de 100, 200 e 300 mesh de aço inox AI 304. Associado a isso, também foi utilizada uma fibra de carbono comercial. Desta forma, foram utilizados quatro diferentes elementos de aquecimento para soldar amostras de PEI/fibras de carbono.

As Figuras 40 e 41 ilustram a utilização de fibras de carbono e da malha metálica, respectivamente, durante o processo de soldagem dos compósitos PEI/fibras de carbono e as condições de soldagem para cada elemento resistivo são apresentadas na Tabela 5.

Figura 40-Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo um tecido de fibra de carbono.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 41-Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo uma malha de aço inox de 100 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 5-Condições de soldagem utilizadas para cada elemento resistivo estudado.

Elemento resistivo		Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)
Malha metálica	100 mesh	30	34,0	1,85
	200 mesh	30	31,0	1,85
	300 mesh	30	31,5	1,85
Fibra de carbono		30	33,0	1,85

Fonte: Produção do próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 5, foram utilizados diferentes valores de corrente elétrica para as diferentes malhas metálicas. Esta alteração foi necessária, uma vez que foi observado que a transmissão do calor do elemento resistivo de 100 mesh para a matriz PEI não foi eficiente quando utilizado, resultando em compósitos delaminados após sua soldagem. O mesmo efeito ocorreu quando da utilização de fibras de carbono. Desta forma, pode ser evidenciado que, utilizando-se o menor valor possível de corrente elétrica, as malhas de 200 e 300 mesh se mostraram mais eficientes.

Quando utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 5, mesmo visualmente, foi observado que a utilização da fibra de carbono e da malha de 100 mesh como elementos resistivos proporcionaram juntas soldadas com união mais fracas, quando comparadas às provenientes de elementos resistivos de aço com 200 e 300 mesh. Esta constatação inicial foi comprovada a partir de ensaios *lap shear*, conforme evidenciado pelos valores apresentados Tabela 6.

Tabela 6-Resultados do ensaio de *lap shear* para os compósitos de PEI/fibra de carbono soldado com malha metálica de 100 mesh e fibra de carbono.

Elemento Resistivo	Tensão (MPa)	Desvio Padrão
Fibra de Carbono	0,27	0,12
Malha metálica de 100 mesh	2,74	0,25
Malha metálica de 200 mesh	7,77	0,40
Malha metálica de 300 mesh	20,7	0,94

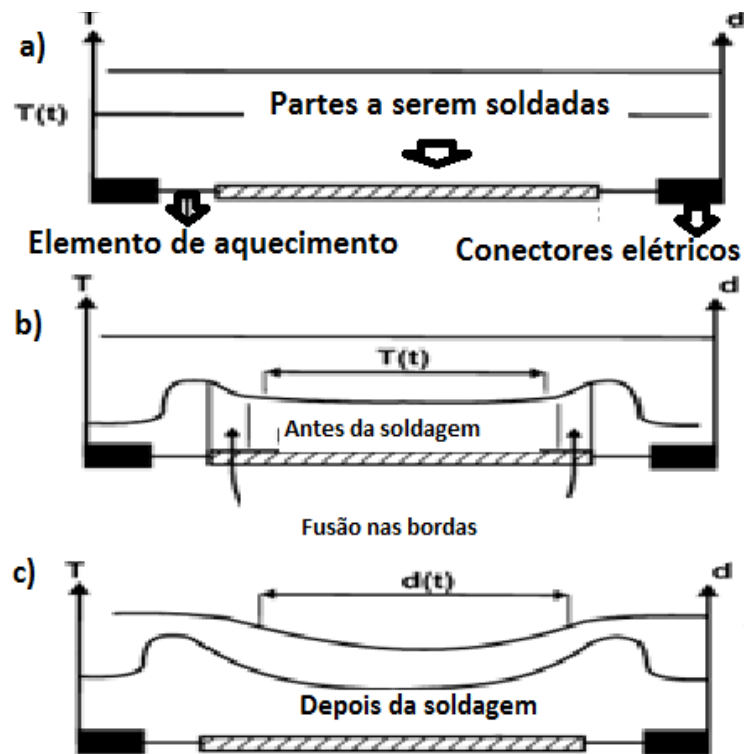
Fonte: Produção do próprio autor

Como pode ser evidenciado a partir da Tabela 6, verifica-se que com a utilização da malha metálica de 300 mesh obtém-se um incremento no valor de resistência por *lap shear*, obtido anteriormente utilizando as mesmas condições de soldagem, porém, com a malha de 200 mesh, sugerindo um melhor desempenho na soldagem quando da utilização de elementos resistivos com menores diâmetros de abertura da malha.

Uma provável causa para este comportamento pode estar associada ao fenômeno de “corrente de fuga”. Em termos gerais a “corrente de fuga” gera o aquecimento preferencial resultando de um aquecimento local acima do ponto de fusão/amolecimento do compósito que ocorre no interior do elemento de aquecimento, podendo ser esta a causa dos resultados de uniões fracas dos materiais após soldagem. Este fato ocorre devido, principalmente, a dois fatores: mau contato entre os conectores elétricos com o elemento ou rompimento de filamentos do elemento de aquecimento durante o processo de soldagem.

O segundo fator costuma ser frequente quando são utilizadas fibras de carbono como elemento de aquecimento (MCKNIGHT SH, HOLMES ST e GILLESPIE JR, 1997). Nestes casos pode ocorrer a geração do defeito de borda causando, principalmente, o aquecimento excessivo nas extremidades da junta soldada. Este fenômeno gera uma transferência pobre de calor a partir do elemento de aquecimento para o ar por convecção natural, em oposição ao que ocorre, por exemplo, na pilha de soldagem por condução. Esta diferença pode levar a severos gradientes térmicos das bordas ao centro e rápida fusão/amolecimento do material em áreas localizadas. Ainda, no que se refere ao comportamento de uma fuga de corrente, a resistência do elemento de aquecimento apresenta três fases distintas, como ilustra a Figura 42.

Figura 42-Efeito do aquecimento e fuga de corrente com elemento resistivo na soldagem de compósitos: a) início da soldagem do compósito b) durante a soldagem do compósito c) fim do processo de soldagem



Fonte: Stavrov e Bersee (2004).

Como pode ser observado a partir da ilustração da Figura 42 (a), no início da soldagem a resistência diminui quase linearmente, em função do aumento da temperatura. Após um determinado tempo, durante a soldagem (Figura 42(b)), a resistência diminui subitamente, devido à perda do sinal de corrente (fuga de corrente) para o laminado ocorrendo, desta forma, o estabelecimento de novos caminhos para passagem de corrente na região de soldagem, causando diminuição da resistência acentuada. Nesta fase, o aquecimento é reduzido na região central da junta soldada o que leva a uma distribuição irregular da temperatura no material como um todo. Neste caso, quase nenhuma junção ocorre na parte central das amostras, enquanto que nas bordas ocorre a degradação térmica (STAVROV; BERSEE, 2004).

Várias soluções para o defeito de borda observado na utilização de fibras de carbono como elemento resistivo foram discutidas na literatura, envolvendo tanto o isolamento do elemento de aquecimento quanto à utilização de um aumento no nível de potência a ser utilizado durante o processo de soldagem (MCKNIGHT SH, HOLMES ST e GILLESPIE JR, 1997).

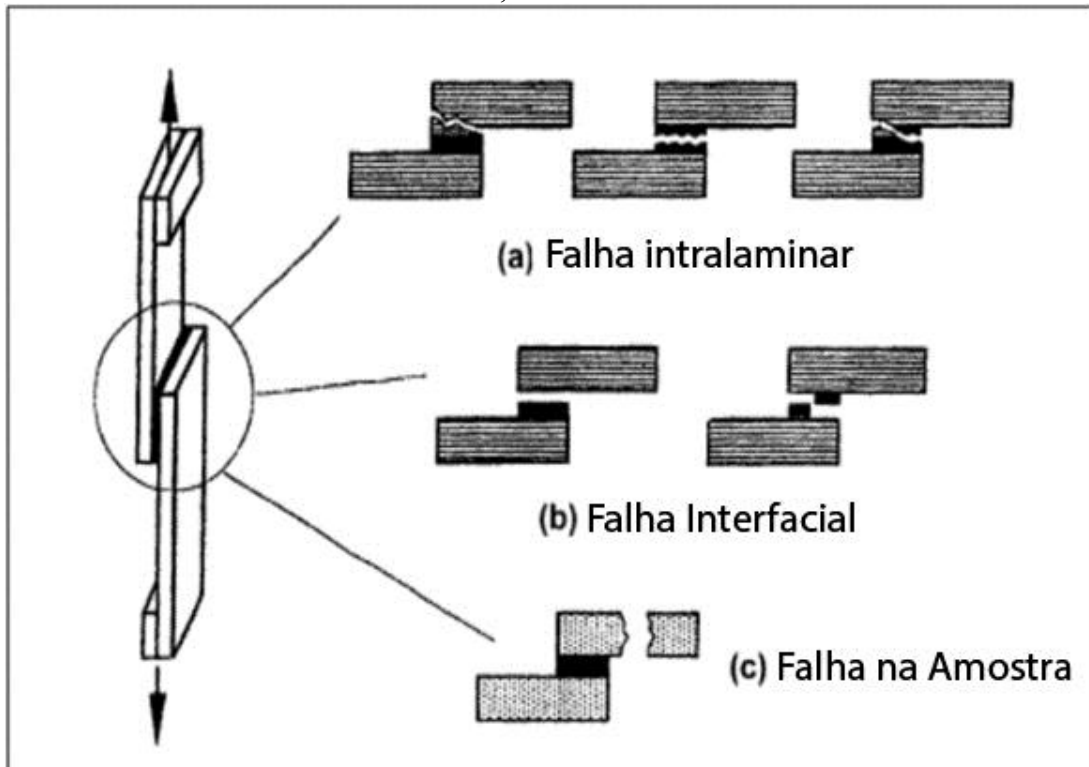
Assim, com base nos dados da Tabela 6 pode-se observar que os valores das resistências obtidas para os compósitos soldados com a fibra de carbono e a malha metálica de 100 mesh foram muito baixos em relação ao esperado, o que torna o uso desse elemento resistivo inviável. Assim, deu-se continuidade ao trabalho considerando apenas o estudo comparativo dos elementos resistivos das malhas metálicas de 200 e 300 mesh, na soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibra de carbono, produzindo amostras para estudo sem condicionamento e com condicionamento higrotérmico e em câmara UV.

4.2.2 Caracterização morfológica

4.2.2.1 Análise da fratura pelo ensaio de *lap shear*

A observação visual do modo de falha de amostras testadas durante o ensaio de *lap shear* também pode fornecer algumas informações importantes sobre a qualidade da solda utilizada. Desta forma, de acordo com a literatura (ALI, MEHDI e IMMARIGEON, 2004; AMANCIO, 2011; GRANDINE, 2010) três tipos de modos de falha podem ocorrer durante o ensaio de *lap shear* em compósitos sendo estes: intralaminar; interfacial e fratura da amostra, como apresentado esquematicamente na Figura 43.

Figura 43-Modos de falha típicos observados durante o ensaio de *lap shear* em compósitos: intralaminar, interfacial e fratura

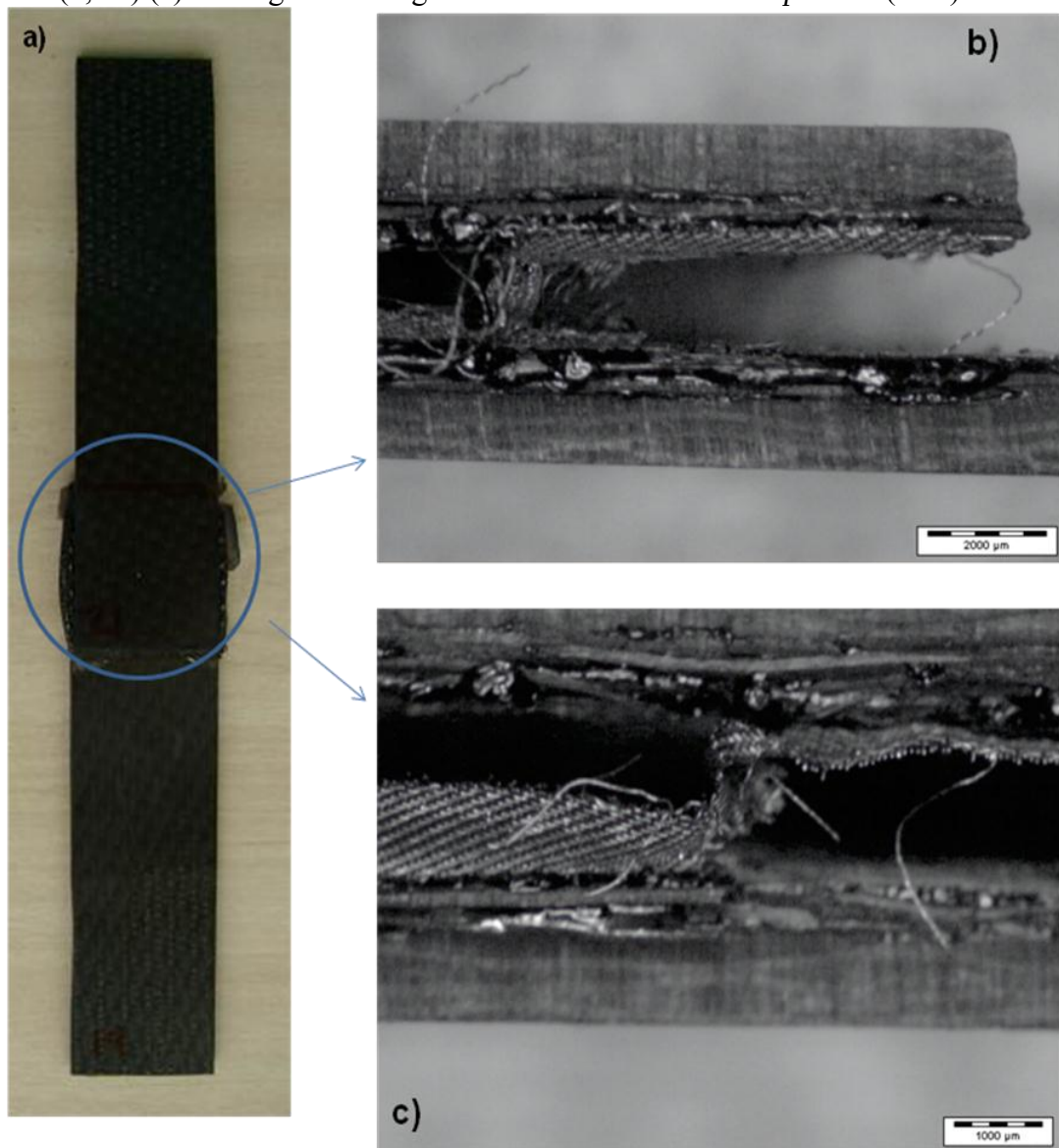


Fonte: Stavrov e Bersee (2004).

O modo de falha intralaminar é considerado nestes casos, quando a fratura ocorre na estrutura com grandes quantidades de material, no elemento de aquecimento (rompimento do elemento de aquecimento) ou em ambos. Este tipo de falha geralmente é acompanhado de maiores valores de resistência do teste de *lap shear*, implicando, assim, melhor qualidade da solda. A falha interfacial ocorre na interface entre o laminado e o elemento de aquecimento ou resistivo e valores mais baixos da resistência mecânica são observados durante o ensaio, geralmente, sendo estes utilizados como parâmetro de resposta a baixa eficiência do processo de soldagem (STAVROV e BERSEE, 2004).

Desta forma, neste trabalho foram fotografadas as amostras soldadas e após a realização dos ensaios de *lap shear*, como ilustrado na Figura 44 (a). Adicionalmente, foi realizada uma fotografia ampliada da região fraturada para verificação do tipo de fratura que se deve ao comportamento do elemento resistivo/matriz polimérica, ilustrado na Figura 44 (b) e (c).

Figura 44-(a) Fotografia da junta soldada indicando a região fraturada após a realização do ensaio mecânico de *lap shear* (b) Micrografia da região fraturada do ensaio de *lap shear* (6,7X) (c) Micrografia da região fraturada do ensaio de *lap shear* (10X).



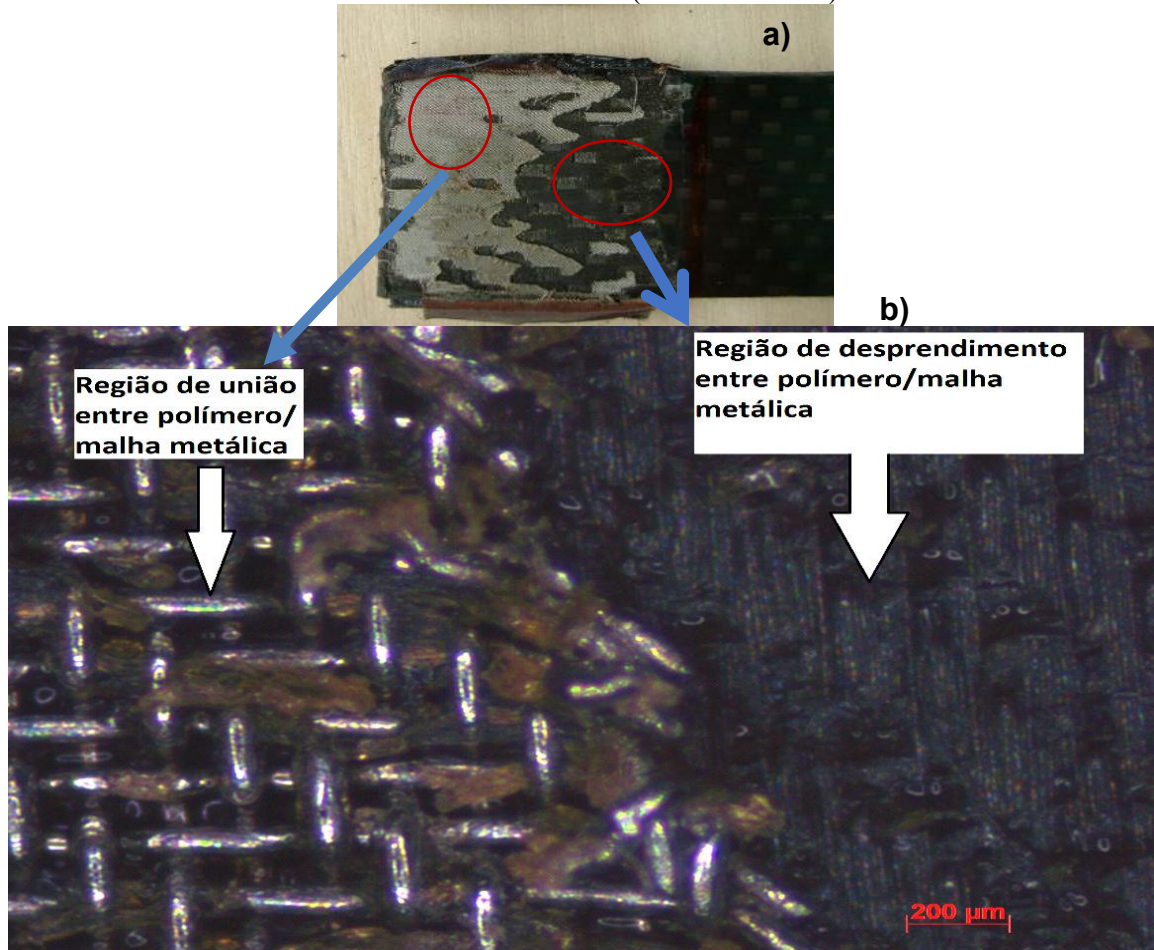
Fonte: Abrahão (2015).

Por meio da análise morfológica pode-se evidenciar que a fratura na região soldada provocou o desprendimento das fibras com a malha metálica como evidenciado pela seta. O desprendimento da malha ocorreu em ambas as regiões ensaiadas, e está evidenciado por meio de setas, como comprovado na Figura 44 (c). Isto pode ser explicado devido a aplicação de forças atrativas em sentidos opostos.

Como pode ser observado também a partir da Figura 44 (c), o tipo de falha obtido pelo ensaio *lap shear* a princípio é do tipo intralaminar. Este resultado colabora com o aspecto positivo de junção do material nas condições estabelecidas com a utilização do planejamento

experimental. Sequencialmente foi realizada análise morfológicas das amostras depois do ensaio de *lap shear* utilizando a soldagem nas condições otimizadas (Figura 45).

Figura 45-Fotografia ampliada da região fraturada após a realização do ensaio mecânico de *lap shear* b) Microscopia da região fraturada por *lap shear* com ampliação de 20X, de um laminado PEI/fibra de carbono (estudo de caso).



Fonte: Abrahão (2015).

A partir desta avaliação, foram evidenciadas as duas regiões principais de fratura referentes ao ensaio por *lap shear* sendo estas: a região da malha metálica em união com a matriz polimérica e a região polimérica fundida que foi solidificada durante o processamento de soldagem (desprendida da malha metálica). Estas observações indicam boa união das partes soldadas do compósito.

4.2.3 Caracterização mecânica

4.2.3.1 Ensaio Iosipescu

No ensaio de Iosipescu foram ensaiadas cinco amostras de cada tipo de malha metálica. A tensão ao cisalhamento foi obtida por meio da equação 1, apresentada em Materiais e Métodos.

A Tabela 7 apresenta os resultados de tensão de cisalhamento Iosipescu para as amostras dos compósitos PEI/ fibra de carbono soldadas com as malhas metálicas de 200 e 300 mesh.

Tabela 7-Resultados do ensaio Iosipescu para as amostras de PEI/fibra de carbono soldadas com diferentes malhas metálicas.

Elemento Resistivo	Tensão (MPa)	Desvio Padrão
Malha metálica de 200 <i>mesh</i>	120,55	9,16
Malha metálica de 300 <i>mesh</i>	118,58	12,16

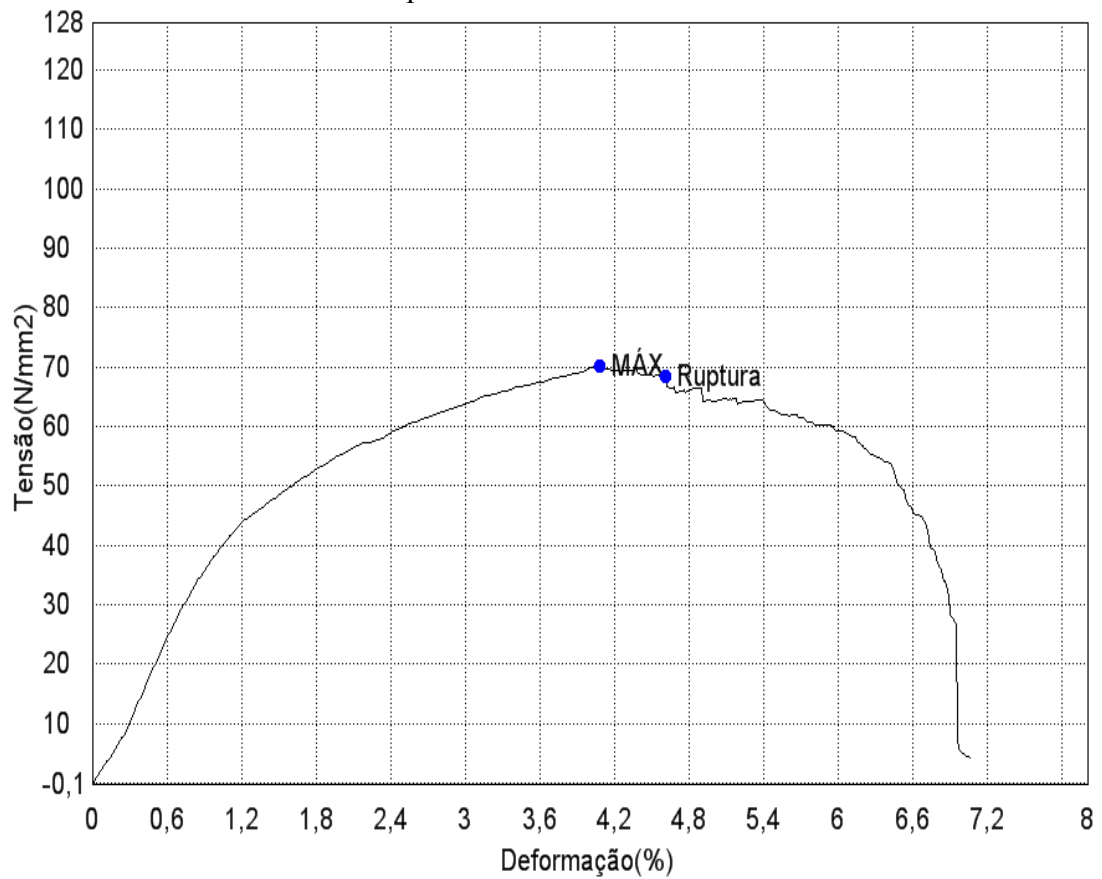
Fonte: Produção do próprio autor

Observa-se que os valores de tensão obtidos no ensaio de Iosipescu para os compósitos soldados com as malhas metálicas de 200 e 300 meshes foram muito próximos. Dessa maneira, o tamanho do mesh da malha metálica não influenciou nos valores obtidos.

A partir da análise das curvas de tensão x deformação, foi observado que os laminados apresentaram comportamentos semelhantes de deformação plástica antes de falhar. Todos os compósitos apresentaram um crescimento monotônico da tensão e um desvio na região elástica. Ao atingir o valor máximo de tensão de cisalhamento, não houve uma redução abrupta de carga como esperado para tal ensaio, ou seja, houve um decaimento suave até a conclusão do ensaio. Este comportamento é característico de uma fratura dúctil, provavelmente, devido à natureza viscoelástica da matriz termoplástica utilizada. As tensões encontradas, quando comparadas a valores de outros compósitos tradicionalmente utilizados pela indústria aeroespacial, mostraram-se superiores: 88,3 MPa e 93,2 MPa para compósitos de resina epóxi com fibras de vidro e carbono, respectivamente (CHAZERAIN,2009).

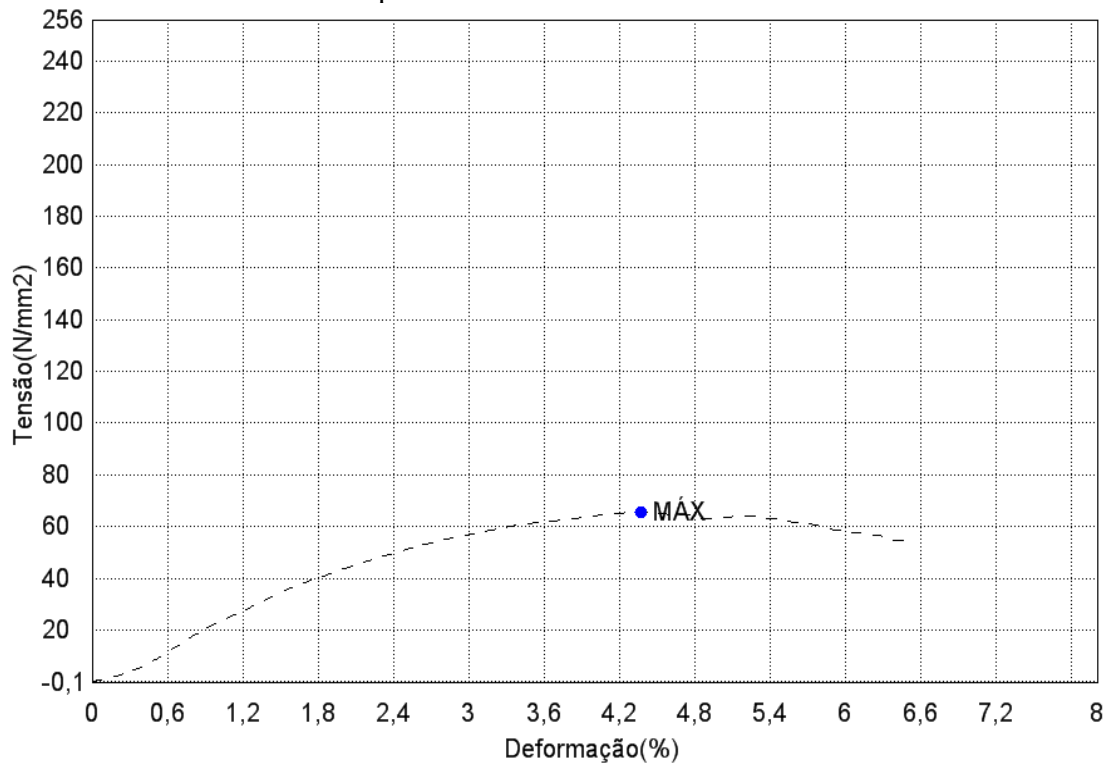
As Figuras de 46 e 47 são representativas das curvas de tensão de cisalhamento em função da deformação das amostras do compósito PEI/ fibra de carbono soldadas e não soldadas (ABRAHÃO, 2015).

Figura 46-Gráfico da tensão da deformação proveniente do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono soldada.



Fonte: Abrahão (2015).

Figura 47-Gráfico da tensão em função da deformação do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono não soldada.



Fonte: Abrahão (2015).

A Tabela 8 apresenta os principais resultados provenientes dos ensaios de cisalhamento Iosipescu para as amostras sem solda e com solda. A partir destes resultados pode ser evidenciado que a soldagem alterou os valores da tensão de cisalhamento, uma vez que ocorreu um aumento de aproximadamente 20% na resistência ao cisalhamento Iosipescu. Este resultado pode ser explicado pela presença da malha metálica fornecer uma resistência adicional aos esforços cisalhantes.

Tabela 8-Valores de resistência ao cisalhamento Iosipescu do compósito PEI/fibra de carbono com e sem solda.

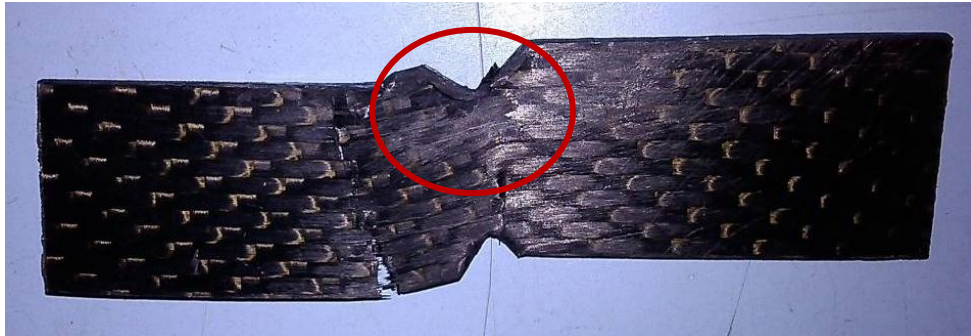
Compósitos	Resistência ao Cisalhamento (MPa)	Desvio (±)
PEI/fibra de carbono ²	119,19	1,99
PEI/fibra de carbono ¹	100,40	0,4

Na Tabela: ¹ PEI/fibra de carbono sem solda; ² PEI/fibra de carbono com solda.

A análise do modo de falha interfacial, embasado no conhecimento da qualidade da adesão fibra/resina, é condição essencial para explicar a resistência ao cisalhamento

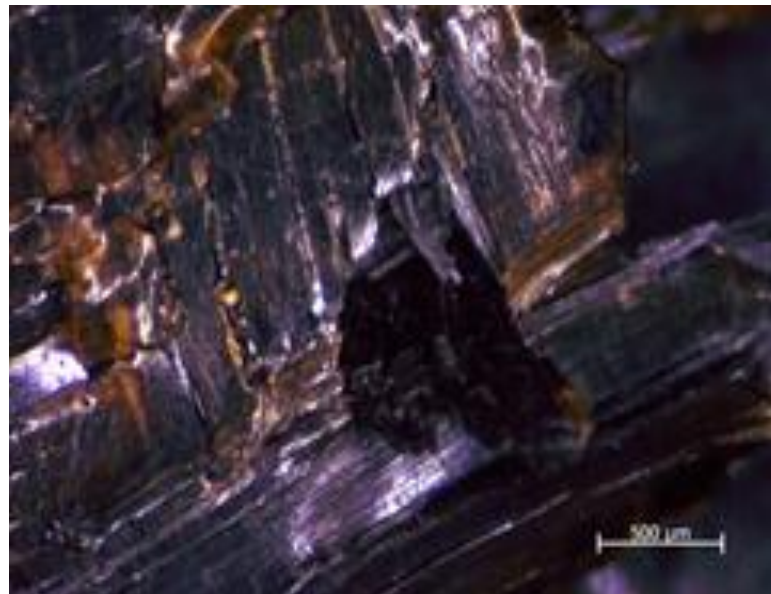
interlaminar. Uma análise fractográfica envolvendo os laminados *post-mortem* submetidos ao cisalhamento Iosipescu foi realizada neste trabalho por microscopia óptica. Desta forma, as micrografias ilustradas nas Figuras 48 a 52 evidenciam as imagens ampliadas dos corpos de prova após estes serem ensaiados na região do entalhe evidenciada na Figura 48.

Figura 48-Amostra ensaiada do compósito PEI/fibra de carbono.



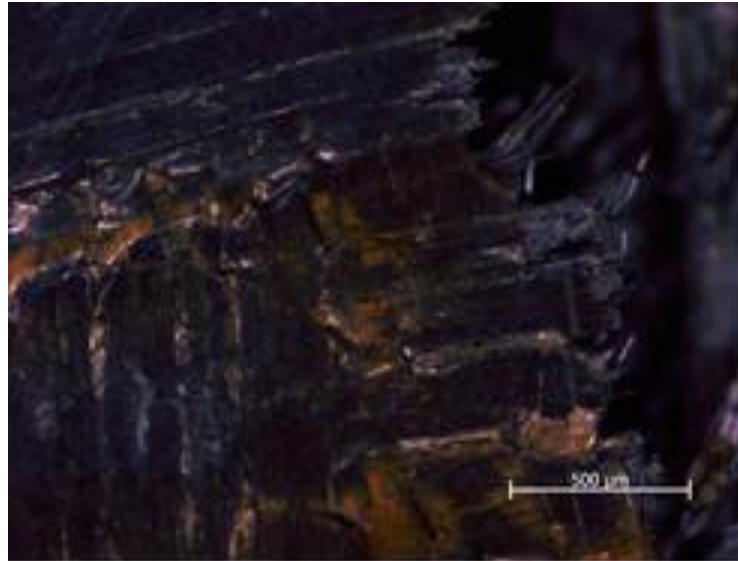
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 49-Compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio de Iosipescu.



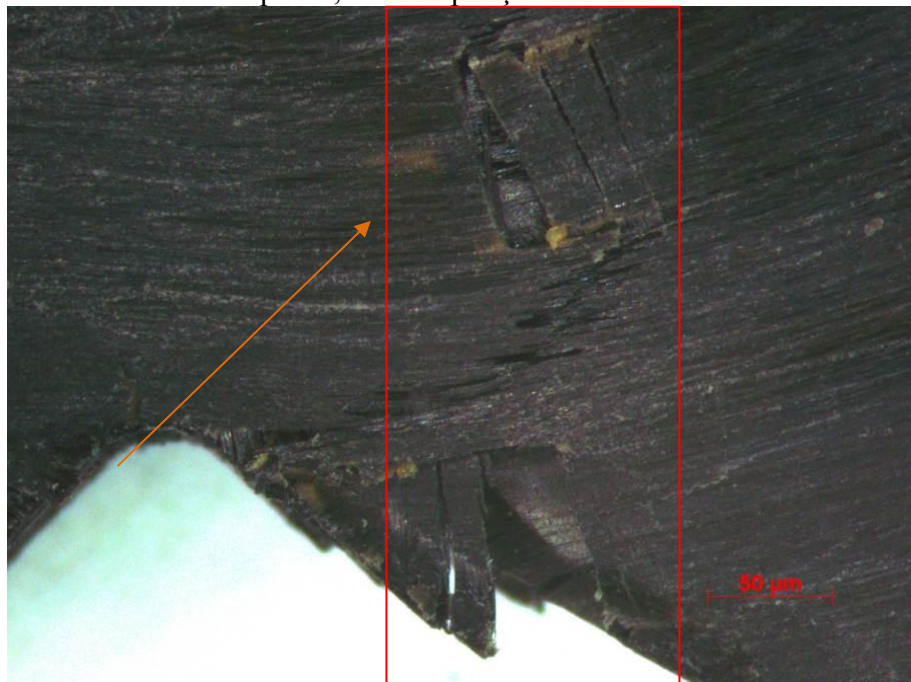
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 50-Compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio de Iosipescu.



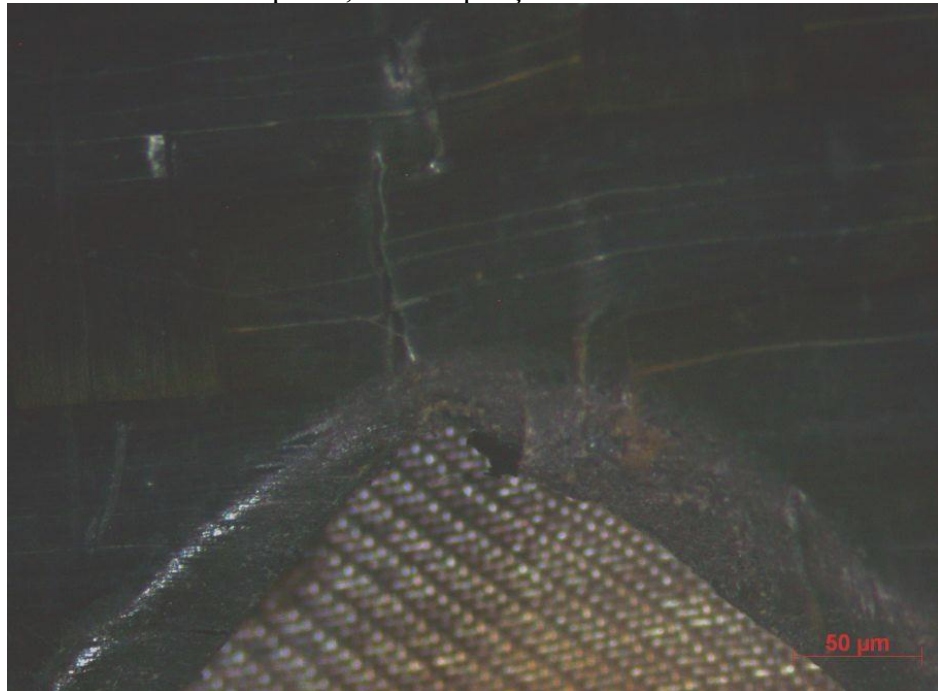
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 51-Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8X.



Fonte: Abrahão (2015).

Figura 52-Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8X.



Fonte: Abrahão (2015).

Nas Figuras 51 e 52, pode ser observado que em ambos os casos ocorreram fraturas interlaminares e translaminares quando solicitado por cisalhamento Iosipescu, mostrando que para esta solicitação mecânica, a presença da malha metálica não interferiu, a princípio, consideravelmente na morfologia da fratura. Porém, realizando uma análise mais aprofundada pode ser observado, a partir da Figura 51 (laminado não soldado), uma fratura provavelmente evidenciada por um processo de microflambagem seguido de uma fratura translaminar mais intensa do que ocorre em materiais soldados.

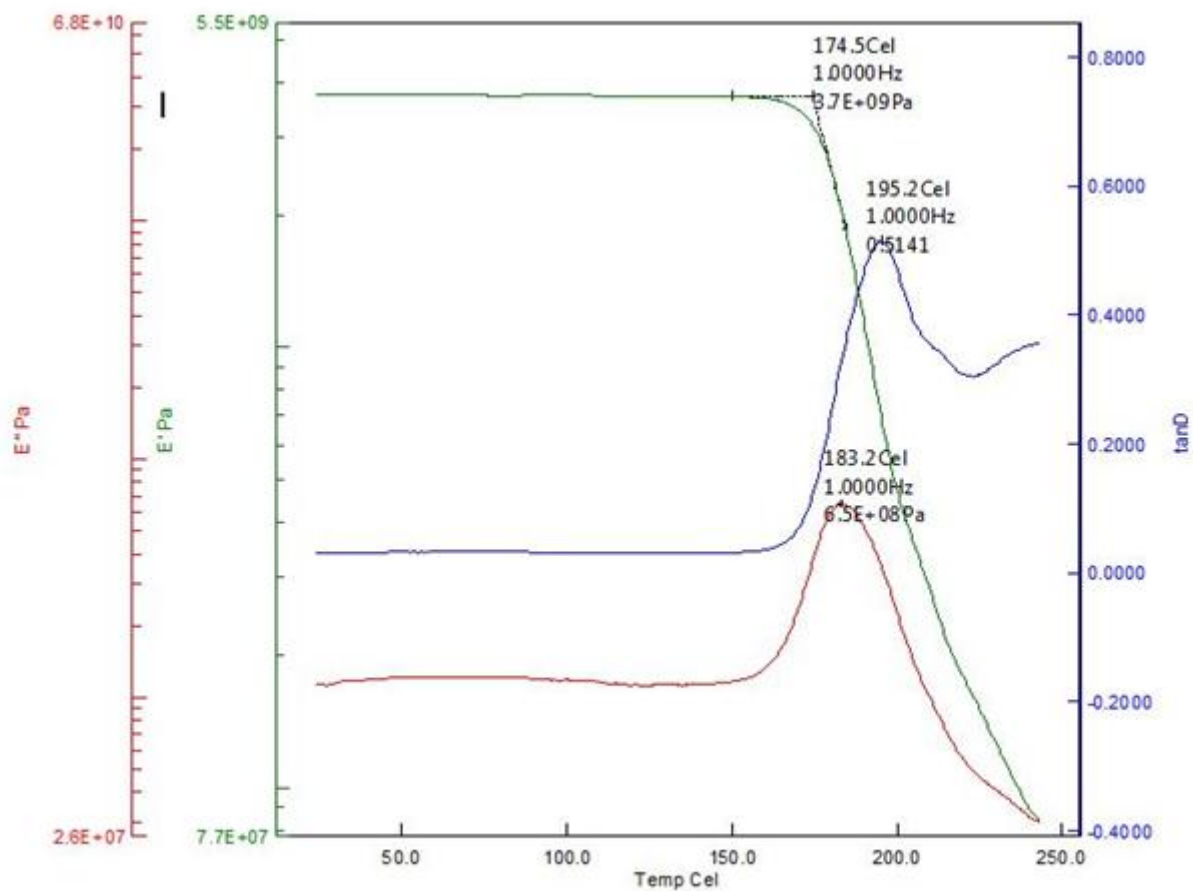
4.2.4 Caracterização térmica

4.2.4.1 Análise dinâmico-mecânica - DMA

As Figuras 53 e 54 apresentam as curvas de DMA obtida para o compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento soldado com a malha metálica de 200 e 300 mesh, respectivamente. Observa-se que a transição vítrea para o laminado soldado com a malha metálica de 200 mesh, obtida pelo método de *onset* de E' foi de 175°C, enquanto pelo pico de E'' foi de 183°C e por $\tan \delta$ foi de 195°C. Já para os compósitos soldados com a malha metálica de 300 mesh, a transição vítrea obtida pelo método de *onset* de E' foi de 173°C, ao passo que pelo pico de E'' foi de 182°C e por $\tan \delta$ foi de 197°C. Avalia-se então que o tipo

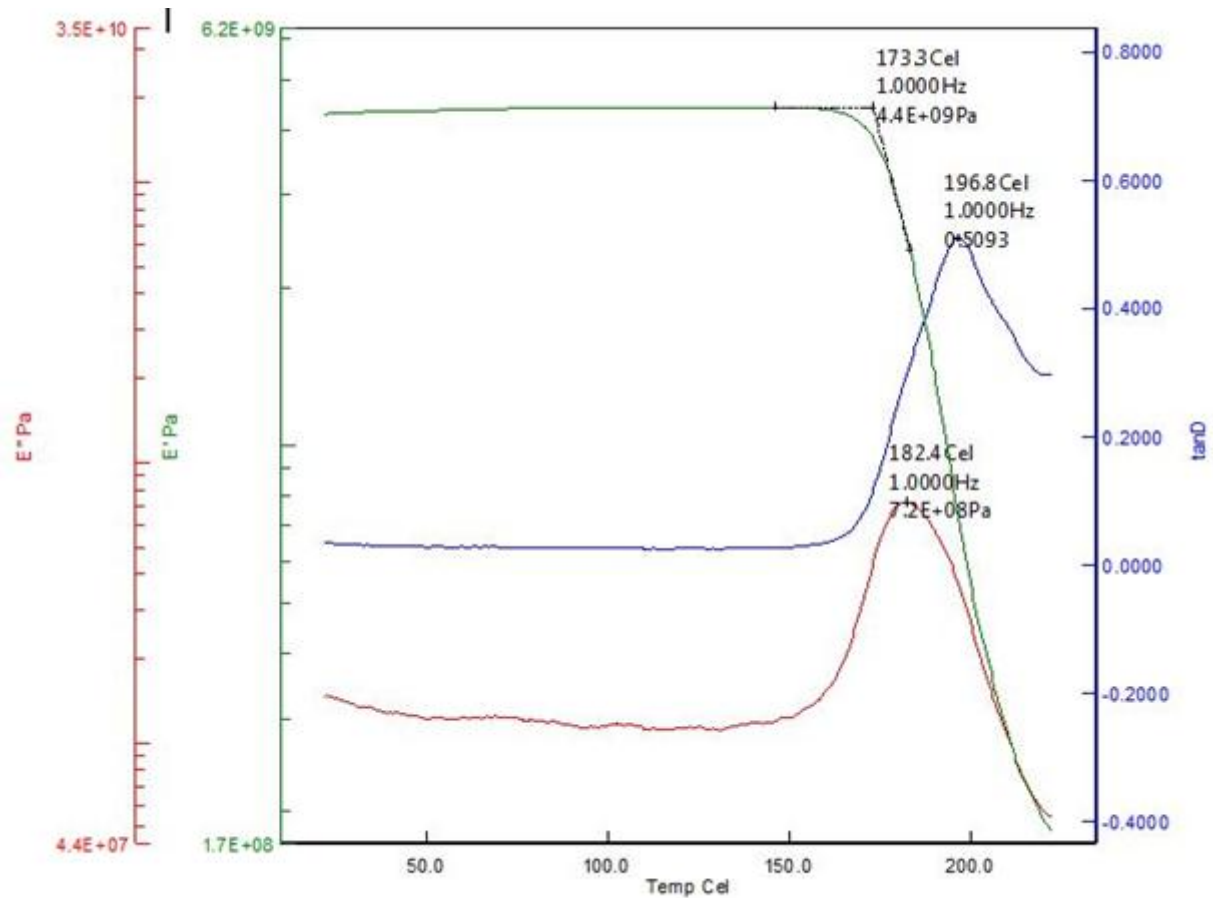
de malha metálica não tem influência sobre a Tg uma vez que os valores da mesma não se alteraram em função da malha metálica utilizada na soldagem. Além disso, quando comparados com os valores de Tg encontrados para o compósito de PEI/fibra de carbono sem solda observa-se também que os valores não se alteraram, indicando que o processo de soldagem não afetou a matriz polimérica, uma vez que o valor de Tg não foi modificado.

Figura 53-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com a malha metálica de 200 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 54-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com malha metálica de 300 mesh.

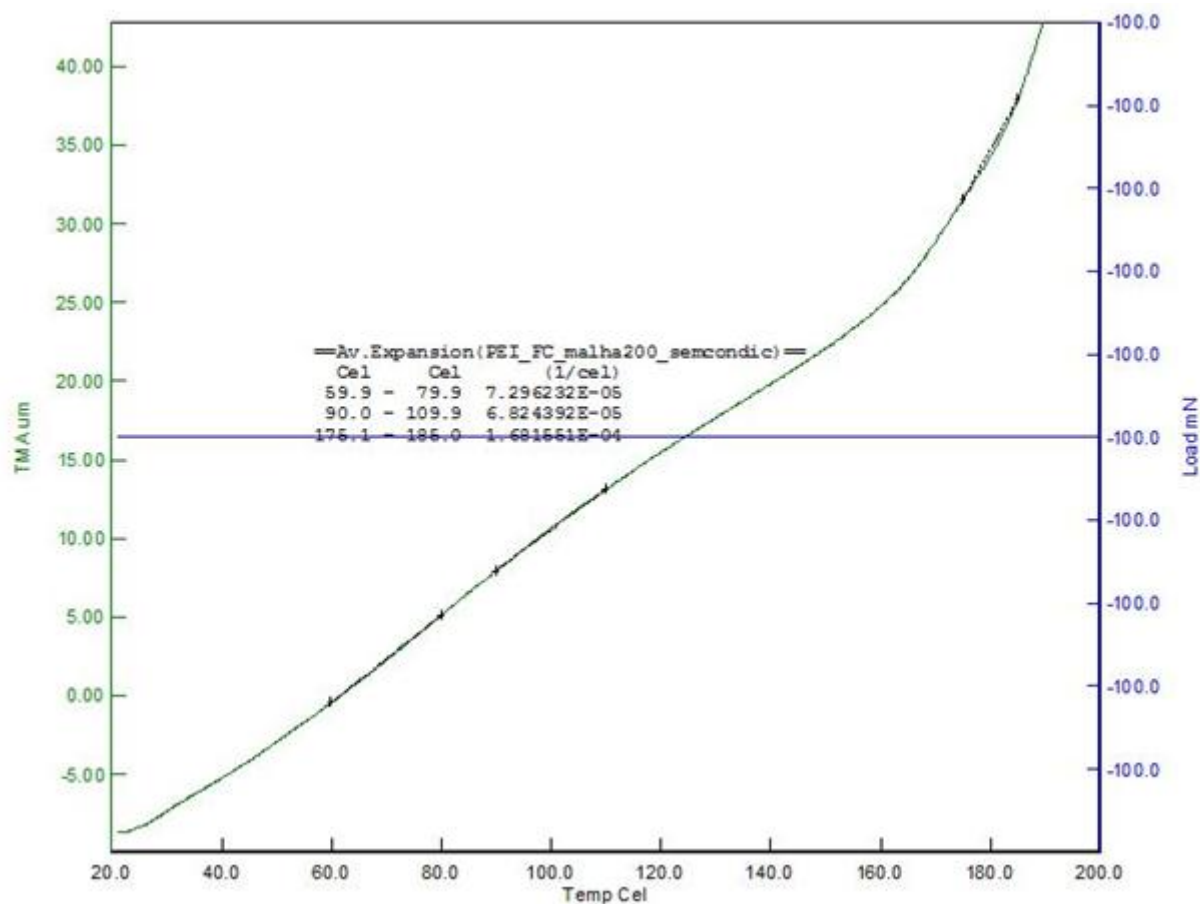


Fonte: Produção do próprio autor

4.2.4.2 TMA - Análise termomecânica

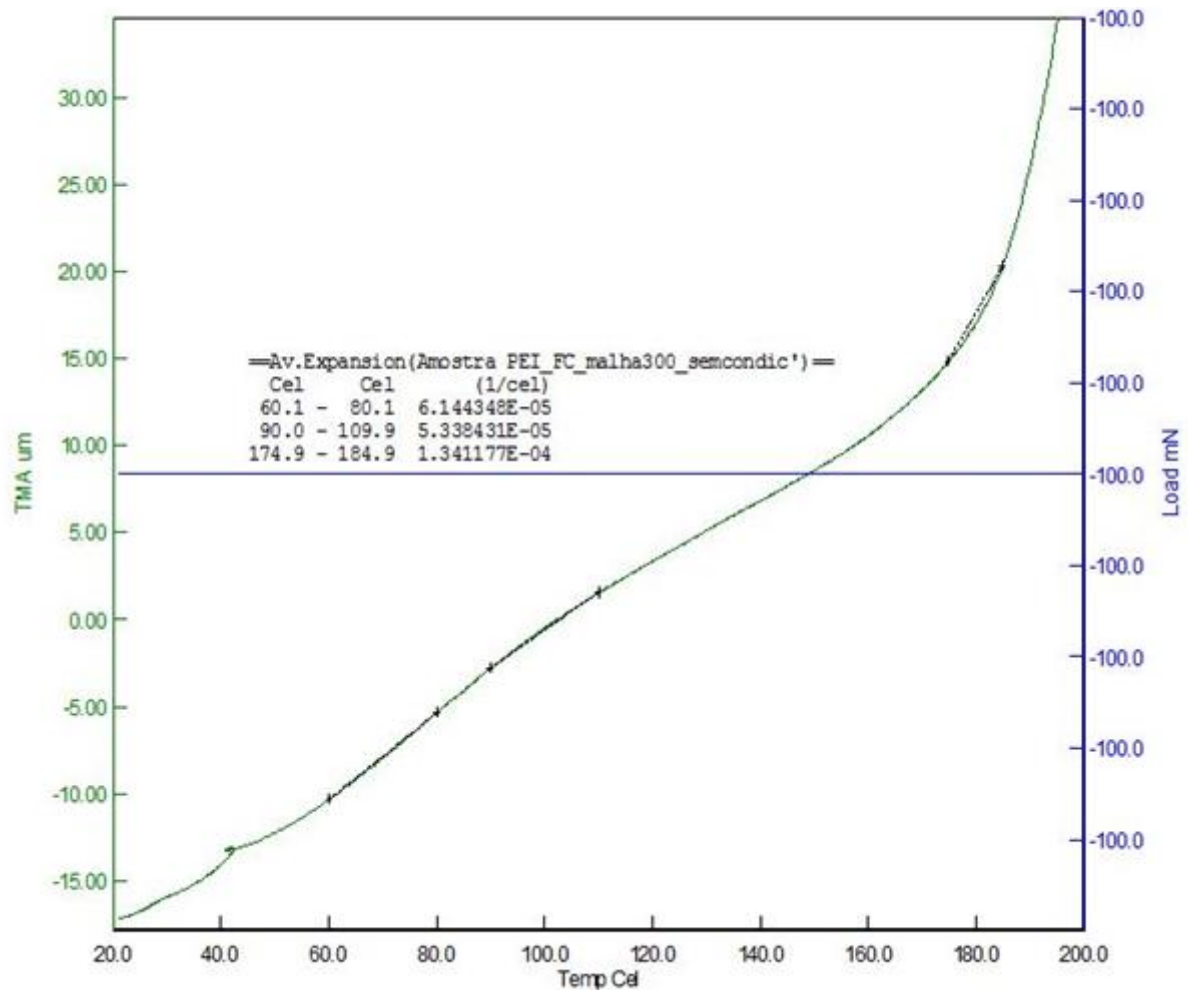
As Figuras 55 e 56 apresentam os valores de α encontrados para os compósitos soldados com as malhas metálicas de 200 e 300 mesh, respectivamente, em diferentes temperaturas, 60°C, 90°C e 175°C (próximo a Tg). Pode-se observar que α variou entre $72.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $168.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para o compósito soldado com a malha metálica de 200 mesh e entre $61.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $134.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para o compósito soldado com a malha de 300 mesh. Comparando-se com os resultados de coeficiente de expansão térmica linear dos compósitos de PEI/fibra de carbono (34 a $56.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) sem solda observa-se que os valores aumentaram ligeiramente, estando dentro da mesma ordem de grandeza. Isto indica que a malha metálica não reduz o coeficiente de expansão térmica linear do compósito polimérico como era esperado, devido a presença de um elemento metálico (que possui menor alfa) que por sua vez possui um α menor (aço inox $11,7.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

Figura 55-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com a malha metálica de 200 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 56-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono sem condicionamento, soldado com a malha metálica de 300 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

4.3 CONDICIONAMENTOS

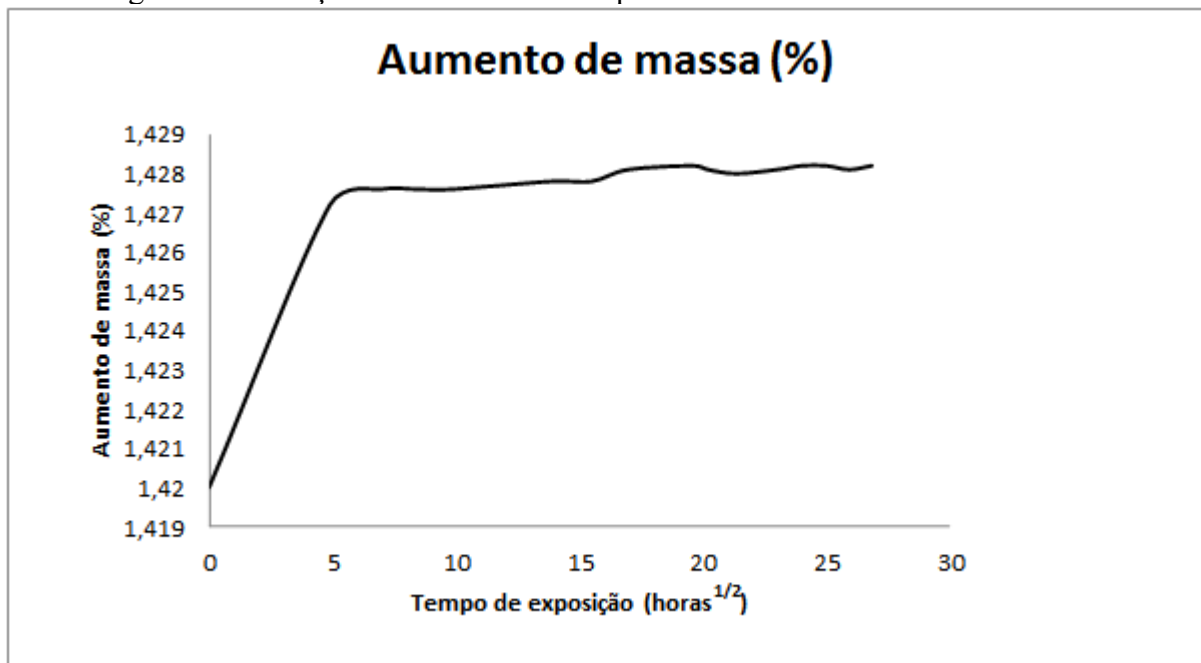
4.3.1 Compósito PEI/Fibra de carbono com condicionamento Higrotérmico

Os efeitos da umidade presente na atmosfera sempre devem ser considerados no projeto estrutural de componentes (BOTELHO et al, 2010). A umidade penetra na matriz polimérica pelo processo de difusão até que a concentração de equilíbrio seja atingida, e esse mecanismo é acentuado pelo aumento da temperatura. Neste caso, a umidade pode gerar a expansão volumétrica da matriz polimérica, causando pequenas tensões internas e variações dimensionais. A taxa de absorção de umidade no compósito pode ser aumentada por picos térmicos acima de 140°C, durante pequenos intervalos de tempo, que favorecem o surgimento de danos na forma de trincas superficiais no laminado, microtrincas na matriz e/ou na interface

fibra/resina. Como resultado, a umidade absorvida nos compósitos de matriz polimérica pode reduzir a resistência mecânica e a rigidez do laminado, podendo gerar mudanças significativas nas características físico-químicas da matriz (BOTELHO et al, 2010). Por esse motivo, é importante avaliar o efeito do condicionamento higrotérmico nas propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos PEI /fibra de carbono, soldados com as malhas de 200 e 300 mesh.

A Figura 57 apresenta o gráfico representativo do ganho de massa em função do tempo de exposição das amostras de compósitos de PEI /fibra de carbono soldadas, expostas a 80°C e 90% RH (umidade relativa), ou seja, tempo suficiente para a saturação de umidade do material.

Figura 57-Absorção de umidade de compósitos PEI/fibra de carbono soldados.



Fonte: Produção do próprio autor

Analisando-se a curva de absorção de umidade das amostras PEI/fibra de carbono soldadas, pode-se observar que após um determinado período de exposição, não se verifica o aumento na massa das amostras, indicando o alcance do ponto de equilíbrio. Tal estabilização ocorreu após aproximadamente 720 horas de exposição ao condicionamento higrotérmico, sendo que as amostras absorveram aproximadamente 1,4% de umidade.

As amostras absorvem água lentamente, alcançando um estado conhecido como pseudo-equilíbrio nas primeiras semanas de exposição, mantendo a quantidade de água praticamente a mesma depois de um determinado período. A água permanece no compósito como água livre e tende, com o passar do tempo, a penetrar na matriz polimérica pelo gradiente de concentração. O processo de absorção de umidade se torna mais lento, com a contínua exposição e muitos

autores atribuem a esse período o início do processo de relaxação da cadeia polimérica e o preenchimento higrotérmico dos vazios existentes (TAIARIOL, 2011).

Relacionado ao processo de absorção de umidade da matriz polimérica, outros mecanismos devem ser levados em consideração tais como o transporte através de microtrincas e vazios e a capilaridade. O mecanismo de capilaridade envolve o fluxo de água ao longo da interface/matriz seguido pela difusão através da interface até a matriz polimérica. O transporte de umidade por meio de microtrincas envolve tanto o fluxo como o armazenamento de água nos vazios e em outras formas de microdefeitos. Como o fluxo de água é proporcional ao gradiente de concentração, amostras expostas a ambientes com maiores teores de umidade podem apresentar maiores valores de absorção de umidade. Dependendo do caso, esta difusão pode ainda gerar a entrada de umidade para regiões de volume livre, muitas vezes, resultando em um processo de *inchamento* da matriz polimérica (TAIARIOL, 2011).

4.3.1.1 Caracterização Mecânica

4.3.1.1.1 *Ensaio de Iosipescu*

A Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento Iosipescu para as amostras de compósitos de PEI/fibra de carbono soldadas com malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh bem como a comparação com as amostras não condicionadas. Observa-se que após o condicionamento, as amostras soldadas com a malha metálica de 200 mesh tiveram uma redução de aproximadamente 17% na sua resistência ao cisalhamento, mesmo considerando o desvio padrão. Já as amostras soldadas com a malha metálica de 300 mesh não apresentaram redução significativa, lembrando que estatisticamente, quanto mais disperso os valores em relação à média, maior o desvio padrão. Isto indica que apesar de ambas as amostras terem absorvido a mesma quantidade de umidade (1,4%), o condicionamento higrotérmico afetou mais a resistência ao cisalhamento das amostras soldadas com malha metálica de 200 mesh.

As amostras não condicionadas soldadas com as malhas de 200 e 300 mesh apresentaram valores semelhantes de resistência ao cisalhamento Iosipescu. Já as amostras condicionadas soldadas com malha metálica de 300 mesh apresentaram um valor de resistência ao cisalhamento Iosipescu ligeiramente maior que as amostras soldadas com a malha 200 mesh. Em geral, pode-se estabelecer uma tendência em que a resistência mecânica do material soldado

aumenta com o aumento do mesh da malha metálica (foi observado também para o ensaio de *lap shear*).

Tabela 9-Resultados do ensaio de Iosipescu para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas.

Elemento Resistivo	Tensão (MPa) amostra não condicionada	Tensão (MPa) para amostra condicionada
Malha metálica de 200 mesh	120,50 ± 9,16	99,30 ± 11
Malha metálica de 300 mesh	118,60±12,16	109,70 ± 7,14

Fonte: Produção do próprio autor

4.3.1.1.2 Ensaio de Lap Shear

A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio de *lap shear* para as amostras de compósitos de PEI/fibra de carbono soldadas com malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh bem como a comparação com as amostras não condicionadas. Observa-se que após o condicionamento, as amostras soldadas com a malha metálica de 200 mesh tiveram uma redução de aproximadamente 12% na sua resistência ao *lap shear*, mesmo considerando o desvio padrão. Já as amostras soldadas com a malha metálica de 300 mesh tiveram uma redução na resistência ao *lap shear* de 25%. Ou seja, para o ensaio de *lap shear* as amostras com malha metálica de 300 mesh foram mais afetadas pelo condicionamento higrotérmico do que as amostras de malha metálica de 200 mesh.

Novamente, observa-se o mesmo comportamento verificado anteriormente onde as amostras soldadas com malha metálica de 300 mesh possuem maior resistência ao *lap shear* que as amostras soldadas com a malha metálica de 200 mesh. Assim como observado também nas amostras não condicionadas, para o ensaio de *lap shear*, quanto maior o mesh da malha metálica, maior o valor da tensão obtida.

Tabela 10-Resultados do ensaio de *lap shear* para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas.

Elemento Resistivo	Tensão (MPa) amostra não condicionada	Tensão (MPa) para amostra condicionada
Malha metálica de 200 <i>mesh</i>	$7,77 \pm 0,40$	$6,83 \pm 0,75$
Malha metálica de 300 <i>mesh</i>	$20,67 \pm 0,94$	$15,36 \pm 1,62$

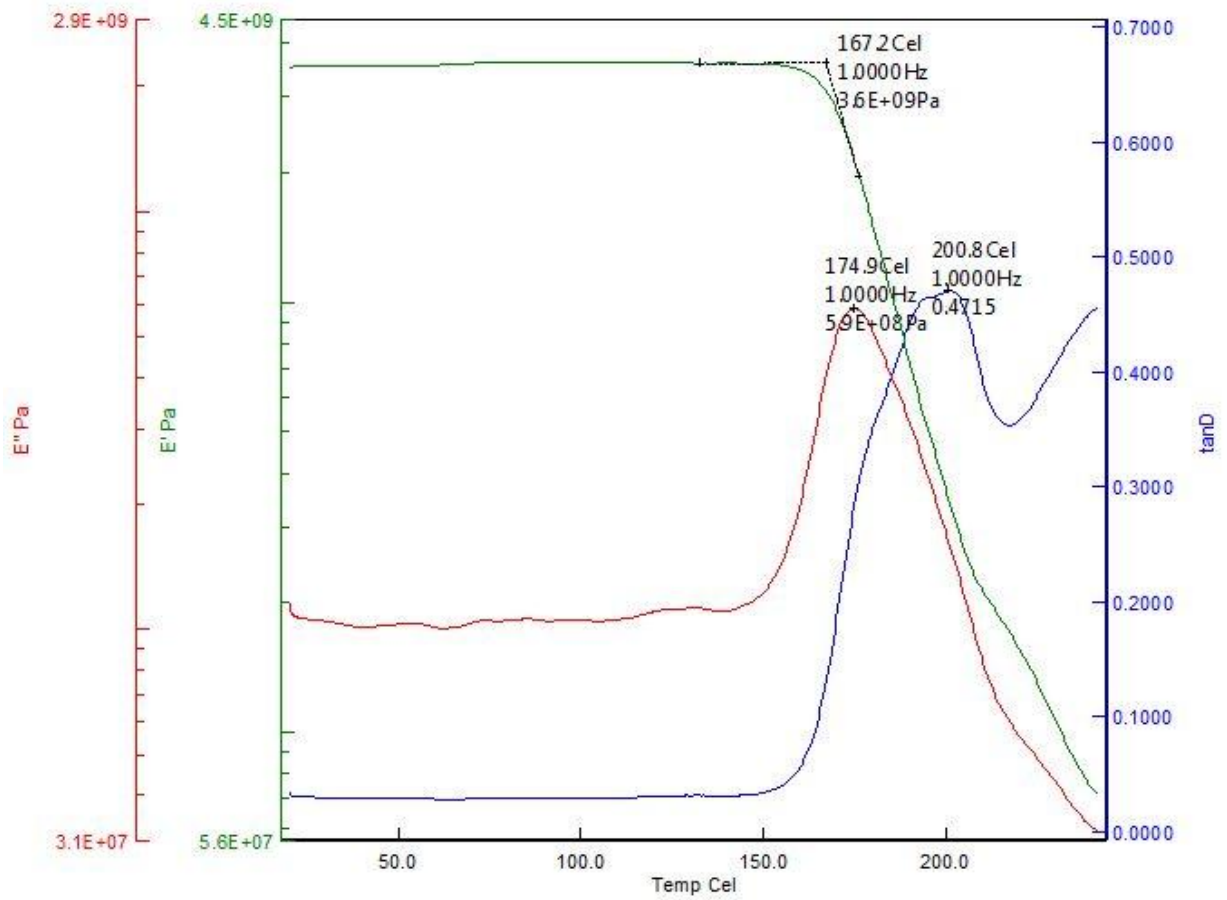
Fonte: Produção do próprio autor

4.3.1.2 Caracterização térmica

4.3.1.2.1 *Análise dinâmico-mecânica (DMA)*

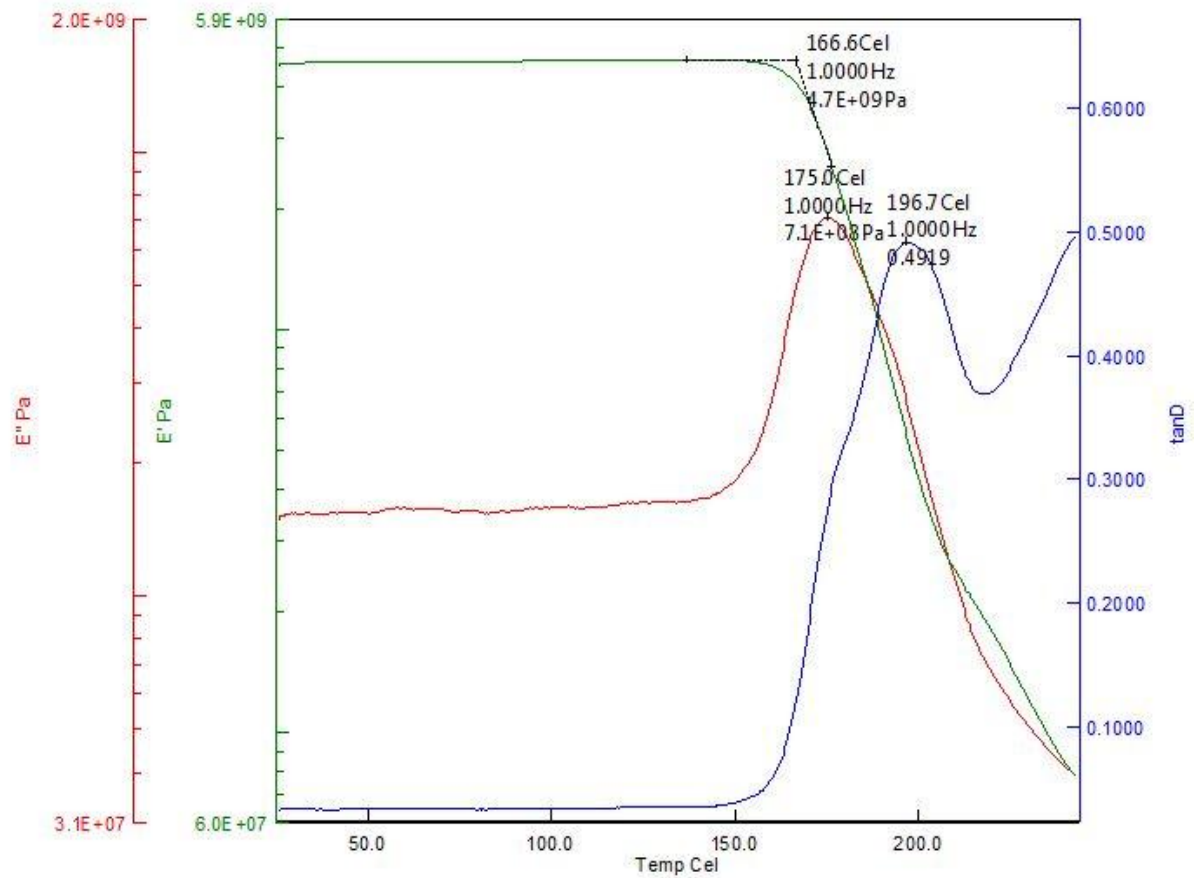
A Figura 58 e 59 apresentam as curva de DMA obtidas para o compósito de PEI/fibra de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 200 e 300 mesh, respectivamente. A Tabela 11 resume os dados de temperatura de transição vítrea obtidas pelos método de *onset* de E' , pico em E'' e pico em $\tan \delta$ para as amostras condicionadas e não condicionadas com malha metálica de 200 e 300 mesh. Observa-se novamente que o valor da T_g não varia independente do tipo de malha metálica utilizada na soldagem mesmo após o condicionamento. Porém, o condicionamento reduz a T_g obtida pelo *onset* de E' e E'' em aproximadamente 4% para a amostra soldada com malha de 200 mesh e em 3% para a amostra soldada com a malha de 300 mesh quando comparadas com as amostras sem condicionamento. Provavelmente isto ocorre devido ao efeito plasticizante que a umidade confere a matriz polimérica, sendo portanto, necessária menor quantidade de energia (menor temperatura) para movimentar a cadeia polimérica (BOTELHO, E. C.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C., 2011)

Figura 58-Resultados de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com malha metálica de 200 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 59-Resultados de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 300 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 11-Resultados do ensaio de DMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas.

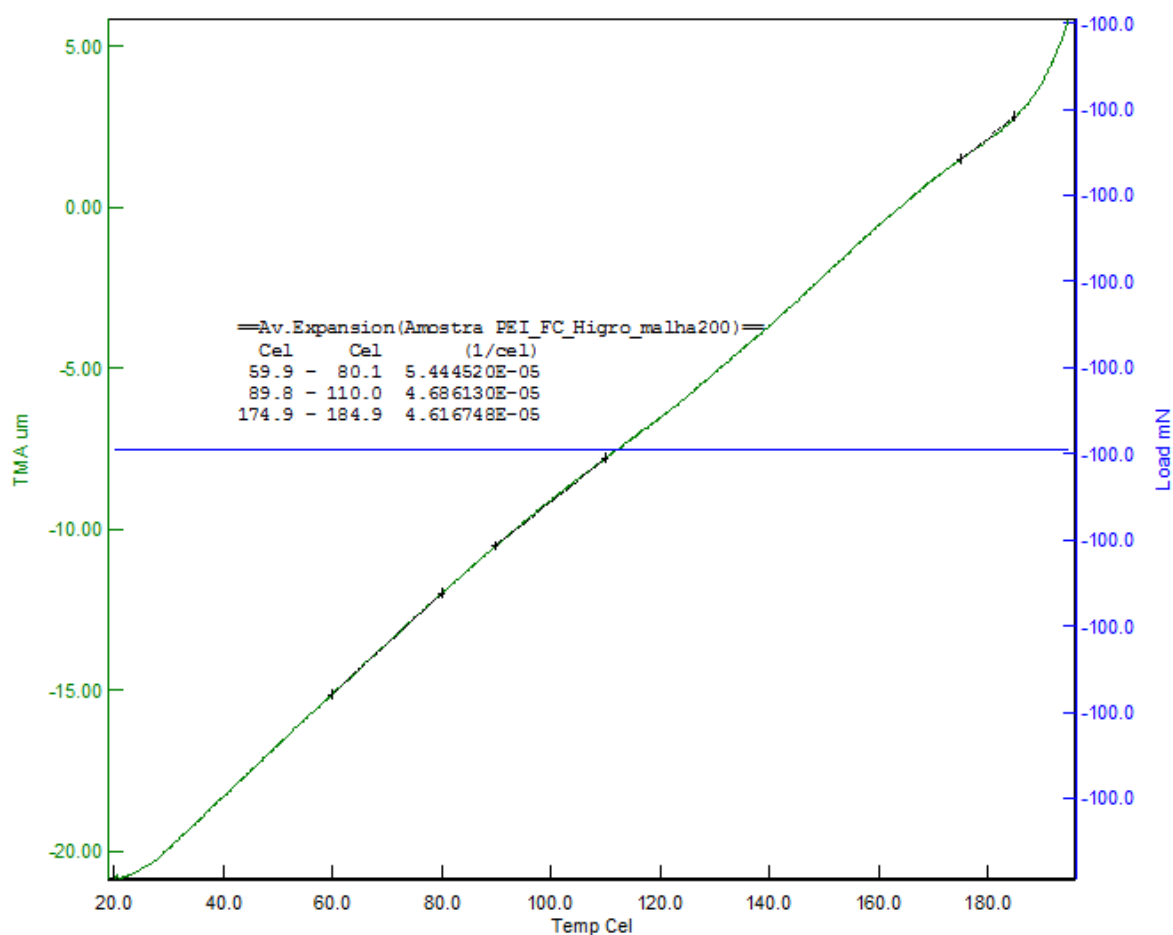
Não condicionada				Condicionada		
Malha metálica	Tg por E' (°C)	Tg por E'' (°C)	Tg por tan delta (°C)	Tg por E' (°C)	Tg por E'' (°C)	Tg por tan delta (°C)
200 mesh	175	183	195	167	175	201
300 mesh	173	182	197	167	175	197

Fonte: Produção do próprio autor

4.3.1.2.2 Análise termomecânica (TMA)

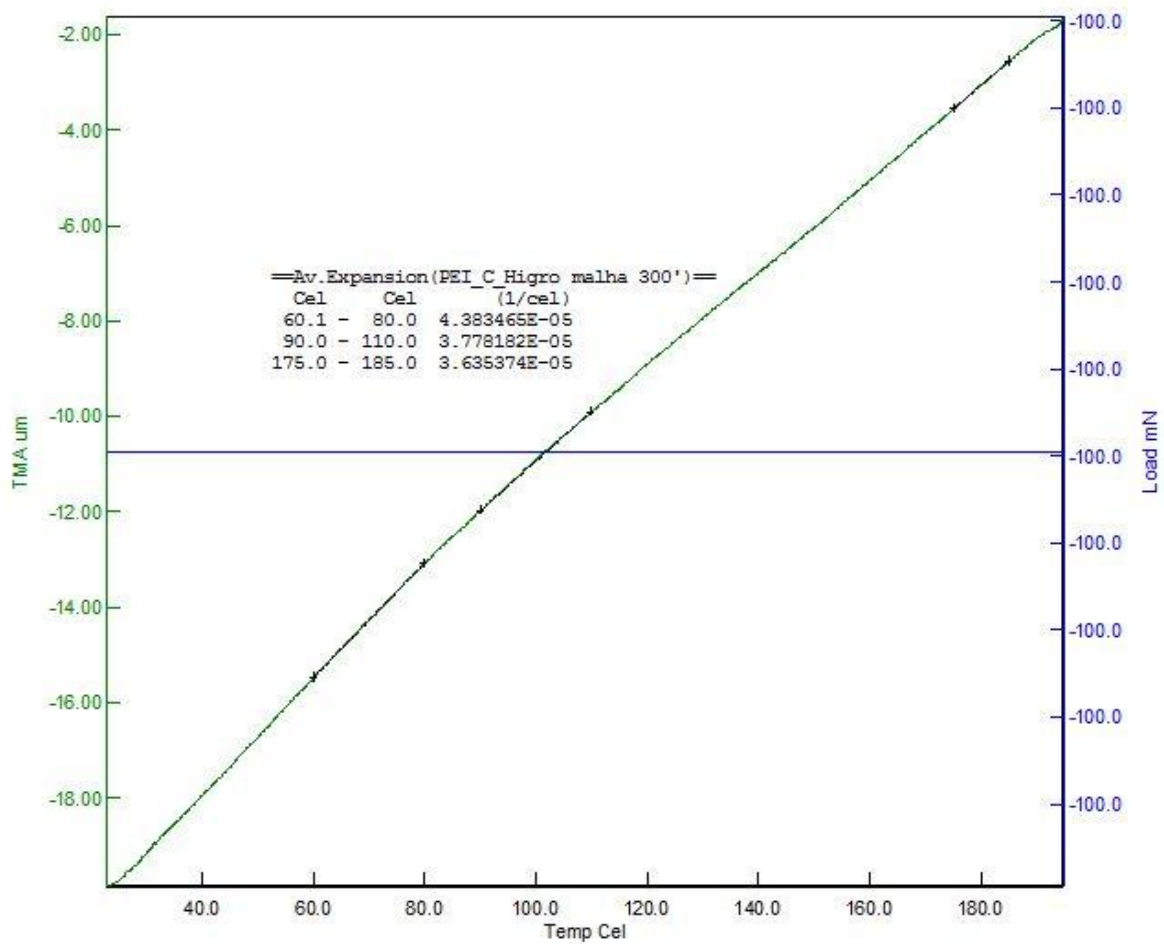
As Figuras 60 e 61 apresentam os valores de α encontrados para os compósitos soldados com as malhas metálicas de 200 e 300 meshes, respectivamente, após condicionamento higrotérmico, em diferentes temperaturas, 60°C, 90°C e 175°C a partir dos ensaios de TMA. A Tabela 13 resume os dados do coeficiente de expansão térmica linear obtidos para as amostras soldadas com malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh com e sem condicionamento.

Figura 60-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 200 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 61-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento higrotérmico, soldado com a malha metálica de 300 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 12-Resultados do coeficiente de expansão térmica linear obtidos do ensaio de TMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas.

α para amostras não condicionada				α para amostras condicionada		
Malha metálica	60°C	90°C	175°C	60°C	90°C	175°C
200 mesh	$72.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$68.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$168.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$54.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$47.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$46.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
300 mesh	$61.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$53.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$134.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$43.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$38.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$36.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Fonte: Produção do próprio autor

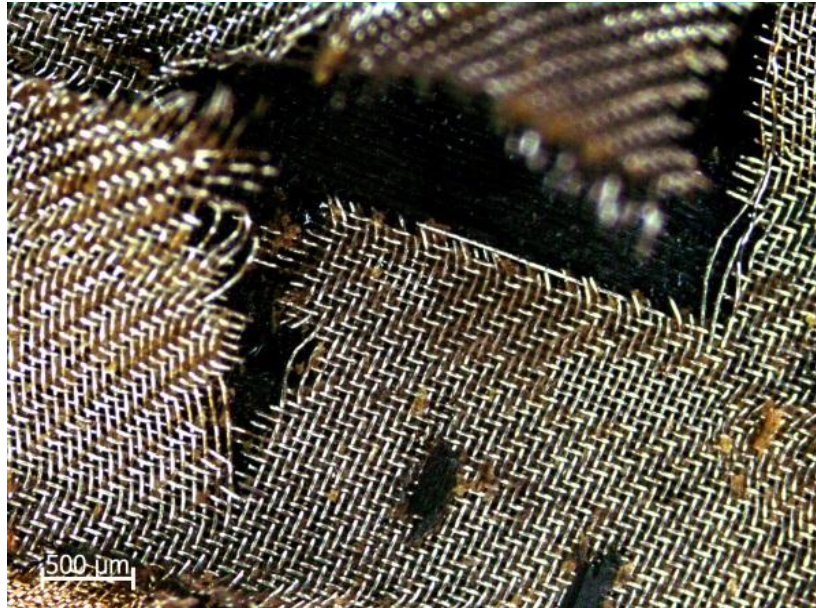
Com base nos gráficos das Figuras 60 e 61 e os resultados da Tabela 12 pode-se observar que o coeficiente de expansão térmica linear reduziu seu valor após o condicionamento higrotérmico para todas as temperaturas estudadas e para ambos tipos de malha metálica. Para as amostras soldadas com malha de 200 e 300 mesh, considerando as temperaturas de 60°C e 90°C, a redução de α foi de 25% a 30%. Já à temperatura de 175°C, a redução de α para ambas as malhas foi de 73%. Ou seja, o condicionamento afeta o coeficiente de expansão térmica linear das amostras soldadas aproximando seu valor das amostras sem solda (α entre 34 e 56 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Além disso, outro comportamento interessante a ser observado é que em geral, para as amostras não condicionadas o α aumenta com o aumento da temperatura, porém, para as amostras condicionadas o efeito é contrário, ou seja, o α diminui com o aumento da temperatura.

4.3.1.3 Caracterização por Microscopia Óptica

As Figuras 62 e 63 apresentam as imagens obtidas via microscópio óptico do compósito PEI/fibra de carbono soldado com as malhas metálicas de 200 e 300 mesh, respectivamente, após ensaio de *lap shear*. Observa-se que a malha metálica se descolou do laminado em ambos os casos.

Já as Figuras 64 e 65 apresentam as imagens obtidas via microscópio óptico do compósito PEI/fibra de carbono soldado com as malhas metálicas de 200 e 300 mesh, respectivamente, após ensaio de cisalhamento Iosipescu. Novamente, observa-se que a malha metálica se deslocou do laminado em ambos os casos.

Figura 62-Compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio *lap shear*.



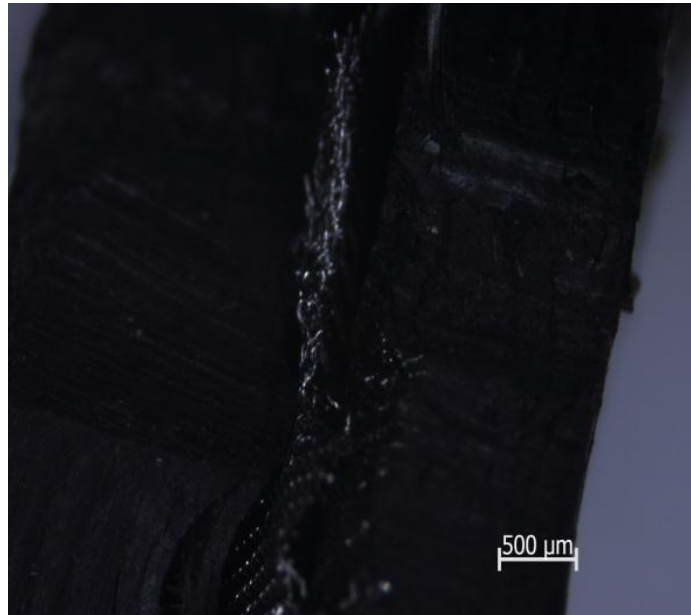
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 63-Compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio *lap shear*.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 64-Interface do compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio de Iosipescu.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 65-Interface do compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio de Iosipescu.



Fonte: Produção do próprio autor

4.3.2 Caracterização dos compósitos PEI/Fibra de carbono com condicionamento em câmara UV

A ação conjunta da umidade com a radiação ultravioleta pode aumentar ainda mais a degradação de compósitos de matriz polimérica. As microtrincas originadas na superfície do material exposto à radiação ultravioleta atuam como caminhos que facilitam ainda mais a migração de umidade para dentro do material. O vapor d'água condensado é capaz de remover produtos solúveis resultantes das reações foto-oxidativas e expor novas superfícies à radiação ultravioleta (KUMAR, SINGH, NAKAMURA, 2002). A resistência à degradação por ultravioleta pode ser melhorada por meio do uso de fotoestabilizadores, os quais são usualmente classificados como uma função do seu modo de ação: absorvedores de UV, filtros, supressores de estados excitados (*quencher*) e estabilizantes à luz (PAOLI, 2008; CHACON, 2008). Porém, a longo prazo, a exposição à radiação ultravioleta pode levar ainda a significativa deterioração das propriedades mecânicas, principalmente quando aliada a altas temperaturas ambientes (KUMAR, SINGH, NAKAMURA, 2002).

Os absorvedores de UV atuam absorvendo a energia luminosa na região do ultravioleta e a dissipando em forma de energia térmica, através de reações químicas, a partir do estado excitado, que regeneram o estado fundamental da molécula do absorvedor. Os filtros têm a função de filtrar a luz do comprimento de onda que provoca reações fotoquímicas na superfície do polímero. No caso dos supressores, ocorre transferência de energia entre os estados excitados, uma vez que os *quenchers* possuem estados excitados de energia mais baixa que os localizados nos polímeros responsáveis por processos degradativos (PAOLI, 2008).

Assim, amostras de compósitos de PEI soldados com malha metálica de 200 mesh e 300 mesh foram submetidos ao condicionamento por radiação UV e seus comportamentos mecânicos e térmicos foram avaliados.

4.3.2.1 Caracterização mecânica

4.3.2.1.1 Ensaio de Lap Shear

A Tabela 13 apresenta os resultados do ensaio de *lap shear* para as amostras de compósitos de PEI/fibra de carbono soldadas com malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh bem como a comparação com as amostras não condicionadas. Observa-se que após o condicionamento por UV, as amostras soldadas com a malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh não tiveram redução do valor de *lap shear*, ou seja, a exposição à radiação ultravioleta

parece não afetar a resistência ao *lap shear* das amostras estudadas quando comparadas com as amostras sem condicionamento.

Novamente, observa-se o mesmo comportamento verificado anteriormente onde as amostras soldadas com malha metálica de 300 mesh possuem maior resistência ao *lap shear* que as amostras soldadas com a malha metálica de 200 mesh. Assim como observado também nas amostras não condicionadas, para o ensaio de *lap shear*, quanto maior o mesh da malha metálica, maior o valor da tensão obtida.

Tabela 13-Resultados do ensaio de *lap shear* para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas.

Elemento Resistivo	Tensão (MPa) amostra não condicionada	Tensão (MPa) para amostra condicionada
Malha metálica de 200 <i>mesh</i>	$7,77 \pm 0,40$	$7,23 \pm 0,75$
Malha metálica de 300 <i>mesh</i>	$20,67 \pm 0,94$	$20,54 \pm 1,62$

Fonte: Produção do próprio autor

4.3.2.1.2 *Ensaio de Iosipescu*

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de *Iosipescu* para as amostras de compósitos de PEI/fibra de carbono soldadas com malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh bem como a comparação com as amostras não condicionadas. Assim como ocorre no ensaio *lap shear*, a exposição à radiação ultravioleta parece não afetar a resistência ao *Iosipescu*, visto que não houve discrepância dos valores de resistência das amostras após serem submetidas ao condicionamento UV. Contudo, diferentemente do ensaio de *lap shear*, o tamanho do mesh não influenciou nos resultados, considerando que os valores de tensão obtidos foram bastante próximos para ambas as malhas.

Tabela 14-Resultados do ensaio de Iosipescu para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh comparadas com as amostras não condicionadas.

Elemento Resistivo	Tensão (MPa) amostra não condicionada	Tensão (MPa) para amostra condicionada
Malha metálica de 200 <i>mesh</i>	120,5 ± 9,16	119,12 ± 5,56
Malha metálica de 300 <i>mesh</i>	118,6 ±12,16	118,42± 3,43

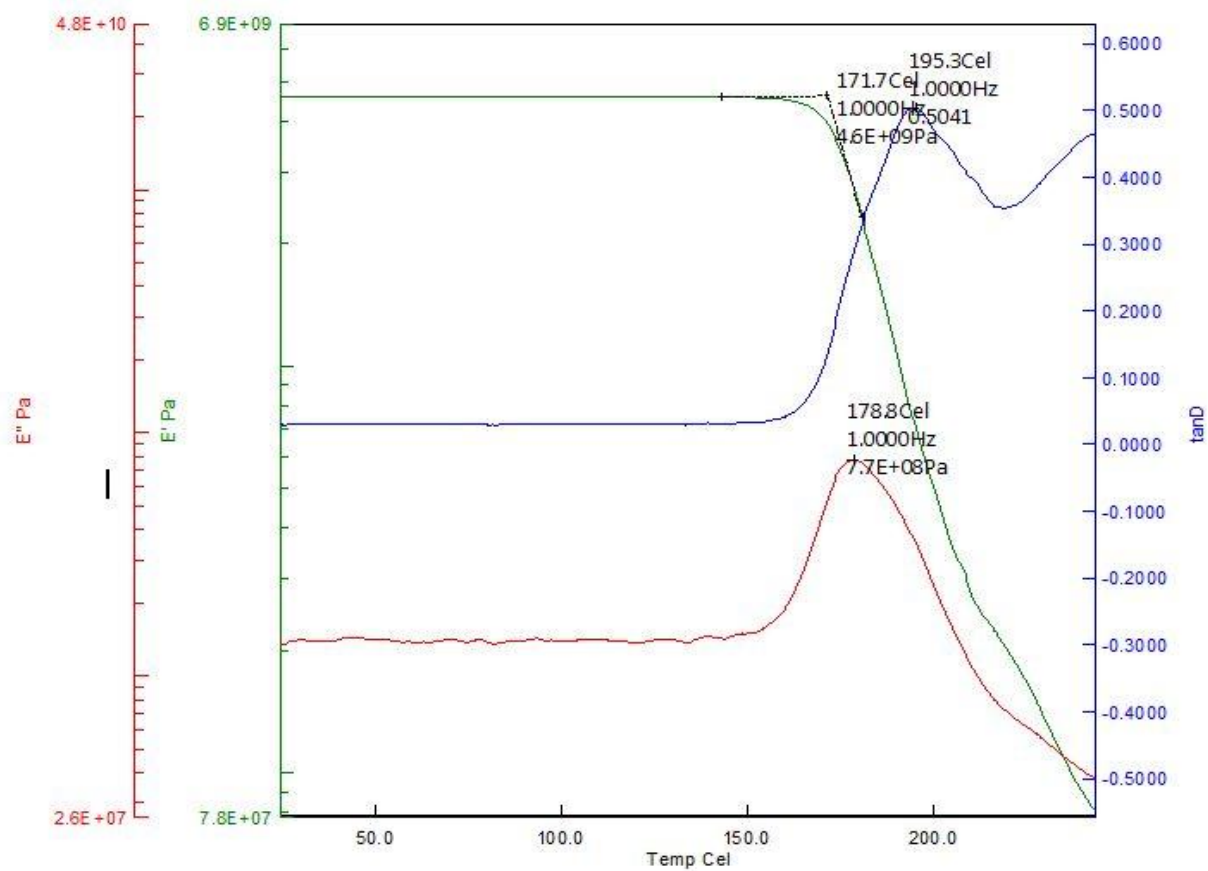
Fonte: Produção do próprio autor

4.3.2.2 Caracterização térmica

4.3.2.2.1 *Análise dinâmico-mecânica (DMA)*

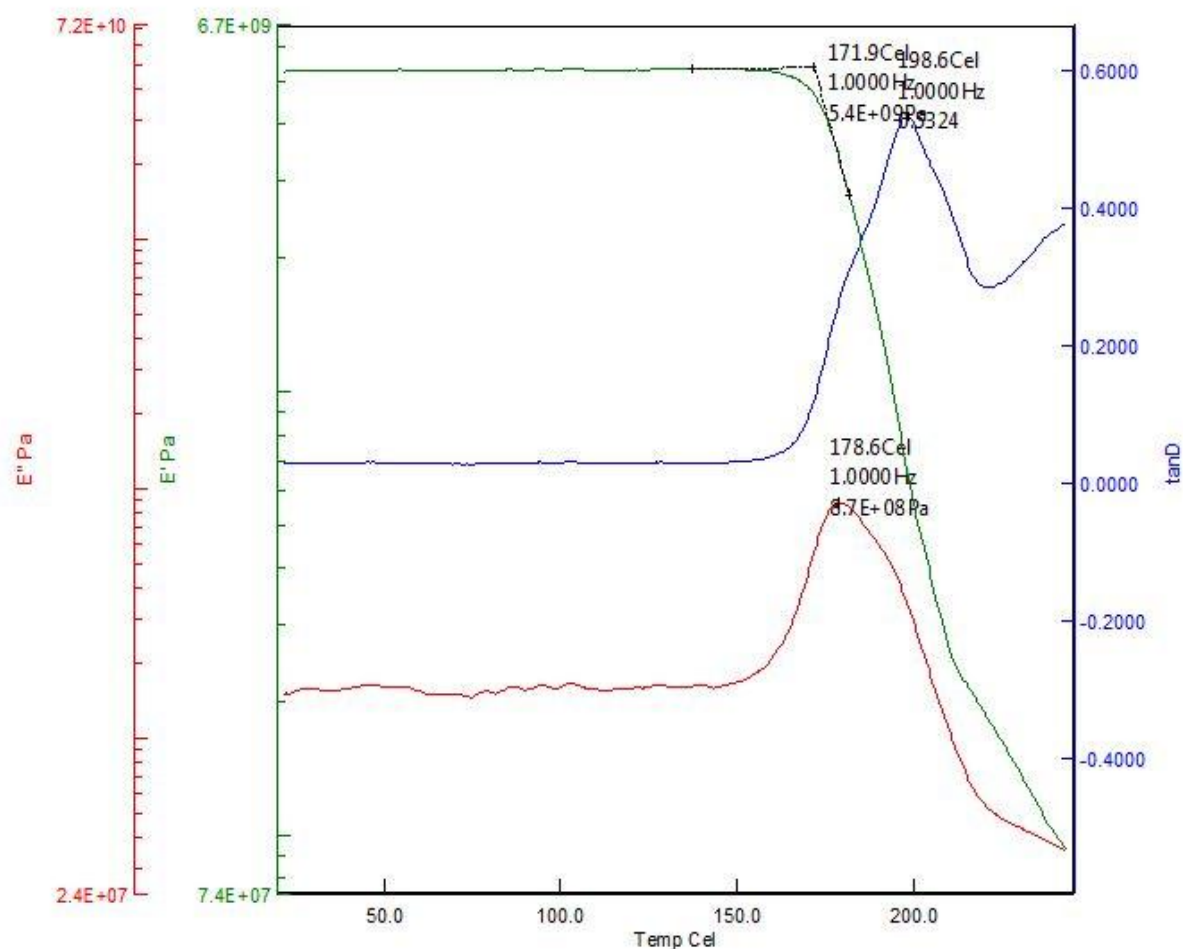
As Figuras 66 e 67 apresentam as curvas de DMA obtidas para o compósito de PEI/fibra de carbono com condicionamento UV, soldado com a malha metálica de 200 e 300 mesh, respectivamente. A Tabela 15 resume os dados de temperatura de transição vítrea obtidas pelos métodos de *onset* de E' , pico em E'' e pico em $\tan \delta$ para as amostras condicionadas e não condicionadas com malha metálica de 200 e 300 mesh. Observa-se novamente que o valor da T_g não varia independentemente do tipo de malha metálica utilizada na soldagem mesmo após o condicionamento. O valor de T_g não varia após a exposição à radiação UV, indicando que o processo, no tempo estudado, não degrada a matriz polimérica dos compósitos.

Figura 66-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibras de carbono com condicionamento em câmara UV, soldado com malha metálica de 200 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 67-Curvas de DMA do compósito de PEI/fibra de carbono com condicionamento em câmara UV, soldado com a malha metálica de 300 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 15-Resultados do ensaio de DMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh expostas à radiação UV comparadas com as amostras não condicionadas.

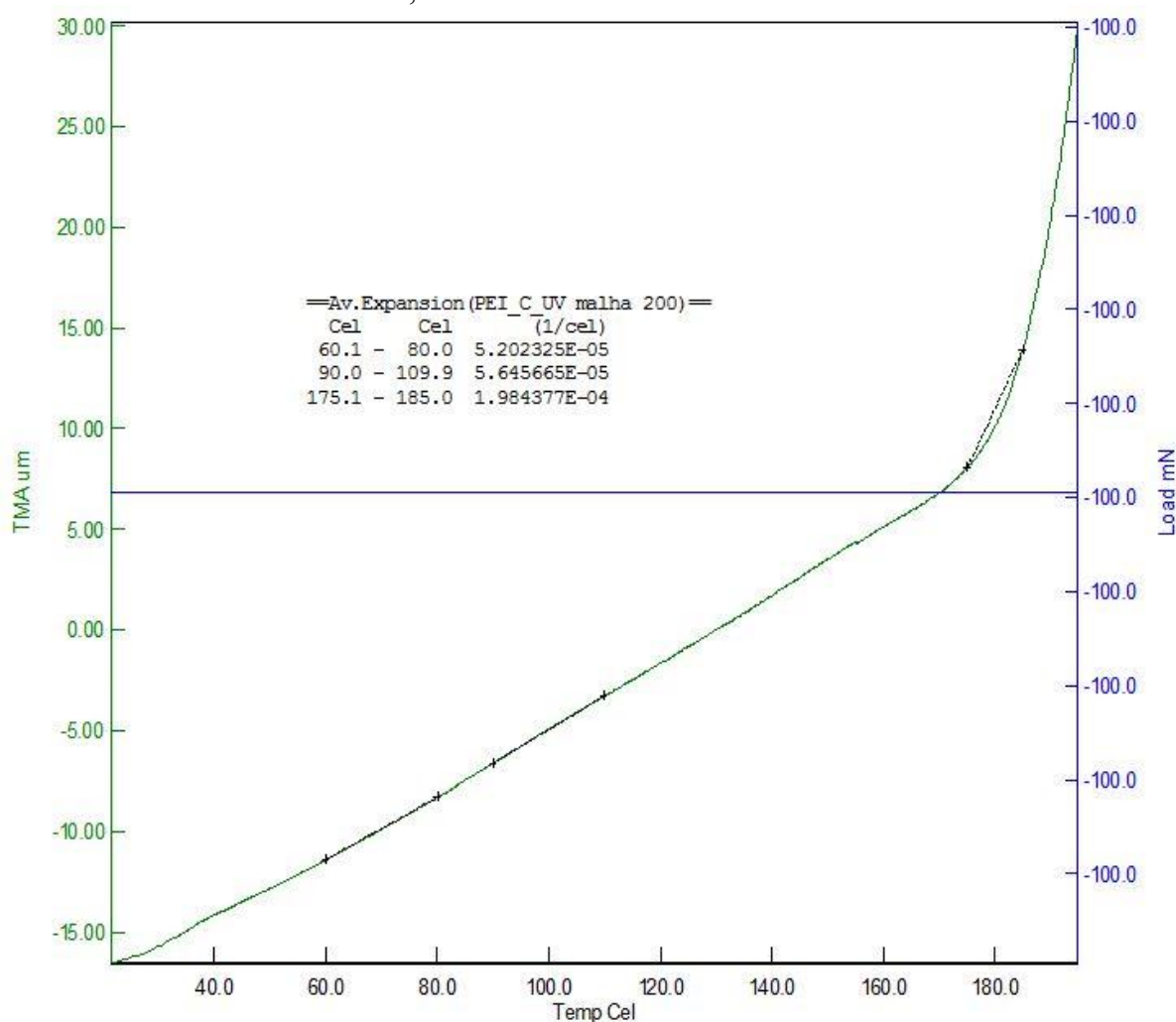
Malha metálica	Condicionada			Não condicionada		
	Tg por E' (°C)	Tg por E'' (°C)	Tg por $\tan \delta$ (°C)	Tg por E' (°C)	Tg por E'' (°C)	Tg por $\tan \delta$ (°C)
200 mesh	175	183	195	172	179	195
300 mesh	173	182	197	172	179	199

Fonte: Produção do próprio autor

4.3.2.2.2 Análise termomecânica (TMA)

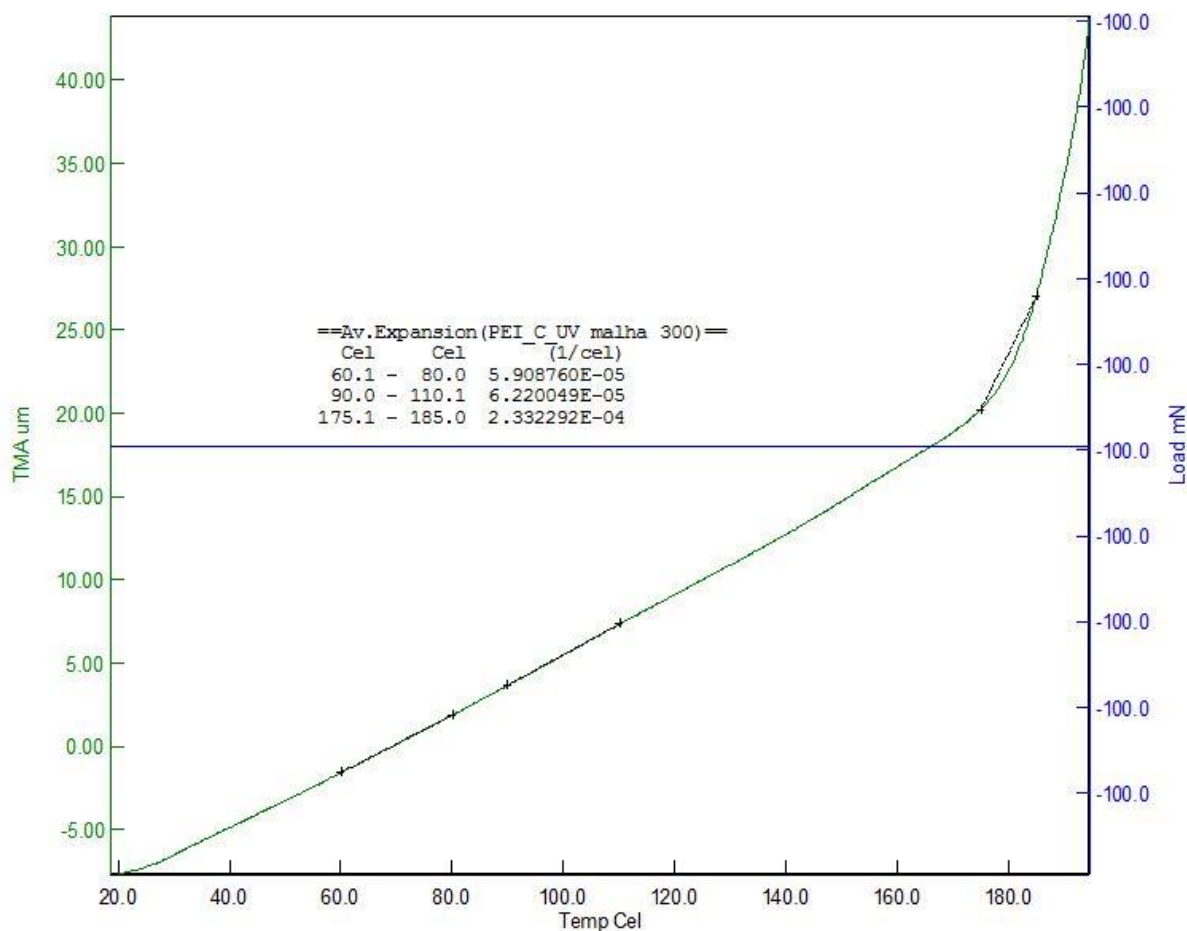
As Figuras 68 e 69 apresentam os valores de α encontrados para os compósitos soldados com as malhas metálicas de 200 e 300 meshes, respectivamente, após condicionamento em câmara UV, em diferentes temperaturas, 60°C, 90°C e 175°C, a partir dos ensaios de TMA. A Tabela 16 resume os dados do coeficiente de expansão térmica linear obtidos para as amostras soldadas com malha metálica de 200 mesh e de 300 mesh com e sem condicionamento UV.

Figura 68-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono após condicionamento em câmara UV, soldado com a malha metálica de 200 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 69-Resultados de TMA do compósito de PEI/fibra de carbono após condicionamento em câmara UV, soldado com a malha metálica de 300 mesh.



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 16-Resultados do coeficiente de expansão térmica linear obtidos do ensaio de TMA para as amostras soldadas com malha metálica de 200 e 300 mesh condicionadas por UV comparadas com as amostras não condicionadas.

α para amostras não condicionada				α para amostras condicionada		
Malha metálica	60°C	90°C	175°C	60°C	90°C	175°C
200 mesh	$72.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$68.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$168.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$52.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$56.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$198.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
300 mesh	$61.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$53.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$134.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$59.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$62.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$233.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Fonte: Produção do próprio autor

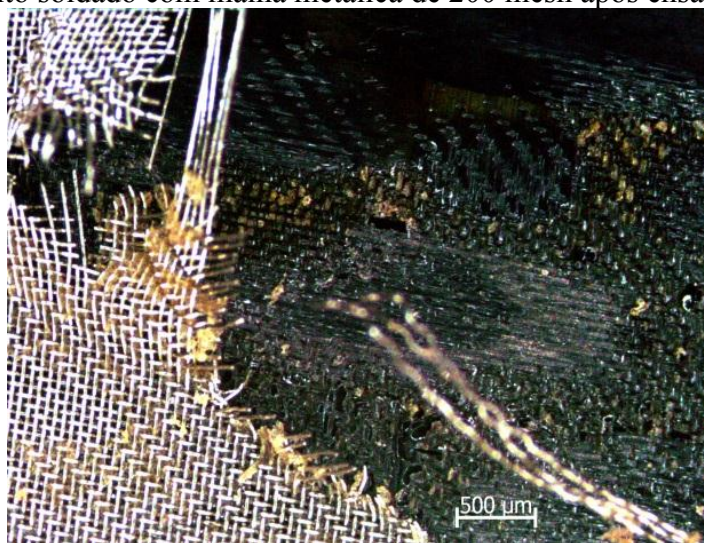
Com base nos gráficos das Figuras 68 e 69 e os resultados da Tabela 16 pode-se observar que o coeficiente de expansão térmica linear reduziu seu valor após o condicionamento UV para todas as temperaturas de 60°C e para ambos tipos de malha metálica. No caso, das amostras soldadas com malha de 200 mesh a redução de α foi de 27% e de 3% para as amostras soldadas com malha de 300 mesh quando comparadas com as amostras sem condicionamento.

Deve-se mencionar que o grande aumento no valor de coeficiente de expansão térmica linear para a temperatura de 175°C, deve-se ao fato que o mesmo foi medido na região da Tg do material, ou seja, estes valores não podem ser considerados para discussões uma vez que foram medidos na região de transição entre o estado vítreo e borrachoso. Assim, para as amostras condicionadas, só os dados de α a 60°C e 90°C que foram considerados como válidos e usados para discussão.

4.3.2.3 Caracterização por microscopia óptica

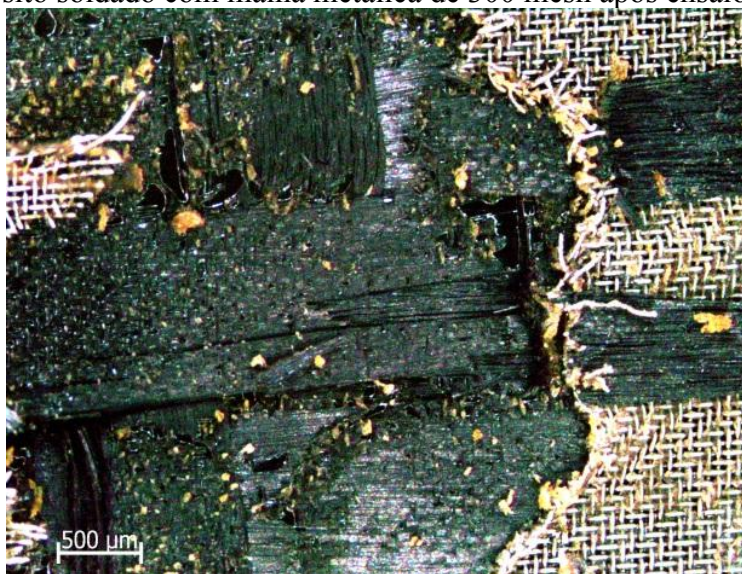
As Figuras 70 e 71 apresentam as imagens obtidas via microscópio óptico do compósito PEI/fibra de carbono soldado com as malhas metálicas de 200 e 300 mesh após o condicionamento UV, respectivamente, e após ensaio de *lap shear*. Observa-se que a malha metálica se descolou do laminado em ambos os casos.

Figura 70-Compósito soldado com malha metálica de 200 mesh após ensaio *lap shear*.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 71-Compósito soldado com malha metálica de 300 mesh após ensaio *lap shear*.



Fonte: Produção do próprio autor

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, podem ser listadas as seguintes conclusões:

- A partir do estudo dos laminados como recebidos foi possível avaliar as principais propriedades dos compósitos de PEI/fibra de carbono quanto a suas características mecânicas e térmicas a serem relacionadas ao estudo da soldagem dos mesmos. As propriedades térmicas foram avaliadas com o intuito principal de se determinar as temperaturas de transição vítrea (175°C); degradação térmica da matriz polimérica (490°C) e o coeficiente de expansão térmica linear ($34 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$) para o estabelecimento das faixas de valores mais apropriadas para a soldagem.
- O elemento resistivo que se mostrou mais adequado para o processo de soldagem por resistência elétrica do compósito de PEI/fibra de carbono foi a malha metálica de 300 mesh. Os maiores valores de resistência ao cisalhamento Iosipescu e ao *lap shear* foram obtidos com esta malha metálica. Para o ensaio de *lap shear*, quanto maior o mesh da malha metálica utilizada, maior o valor da resistência obtida.
- As amostras soldadas de compósitos de PEI/fibra de carbono absorveram 1,4% de umidade após condicionamento em câmara higrotérmica. Os ensaios de Iosipescu mostraram uma redução na resistência ao cisalhamento de 17% para a malha metálica de 200 mesh e para a malha metálica de 300 mesh, não houve diminuição significativa. Nos ensaios de *lap shear* as amostras de 200 mesh apresentaram uma redução da resistência de 12% e de 25% para as amostras soldadas com malha metálica de 300 mesh. Os valores de temperatura de transição vítrea, para ambas as malhas metálicas, foram reduzidos em aproximadamente 4% quando comparados com as amostras não condicionadas. Os valores do coeficiente de expansão térmica linear apresentaram uma redução de 25% a 30%, nas temperaturas de 60°C à 90°C .
- O condicionamento por exposição à radiação ultravioleta não afeta os valores de resistência ao *lap shear* dos compósitos de PEI/fibra de carbono soldados com malha de 200 e 300 mesh e também não afetam os valores de Tg destas amostras. Em geral, o α dos compósitos de PEI/fibra de carbono soldados diminui após a exposição a radiação ultravioleta.

5.1 PRODUÇÃO CIENTÍFICA GERADA

Abaixo estão listados os trabalhos científicos gerados a partir das atividades desenvolvidas neste trabalho.

N. G. Quan, A.B.R.M. Abrahão, S. D. B. Souza, M.L Costa; L.R.O. Hein; E.C. Botelho. Comparative study of the performance of heating elements in electrical resistance welding in PEI/carbon fibers composites. **XII Encontro da SBPMat**, 29 de setembro a 3 de outubro, Campos de Jordão, São Paulo, 2013.

N. G. Quan, S.D.B. Souza, A.B.R.M. Abrahão, L.R.O. Hein, E.C. Botelho, M.L. Costa. Avaliação Mecânica dos Compósitos PEI/Fibras de Carbono Soldados por Resistência Elétrica com Diferentes Elementos Resistivos. **13º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 18 a 22 de outubro, Natal, 2015.

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 em Engenharia Mecânica-Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 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**, v.32, n.6, p.839-857, 2001.
- ALI, Y; MEHDI, H; IMMARIGEON, J. P. Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. **Journal of thermoplastic composite materials**, Quebec, Canada: Aerospace Manufacturing Technology Center, p. 303-341, 2004.
- ALMEIDA, A. et al; Poliuretana derivada de óleos vegetais exposta ao intemperismo artificial. **Polímeros**, São Carlos, v.16, n.3, 2006.
- AMANCIO, F. S. T. **Rebitagem por Fricção. Desenvolvimento de uma Nova Técnica de União para Juntas Híbridas do Tipo Polímero-Metal**. Parte I: Processo e microestrutural, São Paulo: Soldagem e Inspeção, out/dez 2011, p. 387 – 395.
- AQUINO, E. M. F; SARMENTO, L. P. S; SILVA, R. V. Moisture effect on Degradation of Jute/Glass Hybrid Composites. **Journal of reinforced Plastics and Composites**, United States: Thousand Oaks, 2007, p. 219-233.
- AUTAR, K. K. **Mechanichs of composite materials**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- ZANATTA, R.; AVIAÇÃO.ORG. **Os materiais compósitos e suas aplicações na indústria aeroespacial** .24.mai2012. Disponível em:<<http://www.aviacao.org/especiais/materiais-compósitos/>>. Acesso em: 19 de agos. 2014.
- AZEVEDO, M; **Plásticos especiais**: Demanda por resinas de alto desempenho cresce e prognóstico se mostram promissores, QD Ltda,2008. Disponível em:<<http://www.quimica.com.br/revista/pm402/plastico-especiais/plasticos-especiais02.html>>. Acesso em: 14 jul.2014.
- BATES, P. J, et.al.Shear strength and meltdown behavior of reinforced polypropylene assemblies. **Composites: Part A**, v.40, p.28–35, 2009.
- BOTELHO, E. C.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.
- BOTELHO E.C. et al. Efeito do condicionamento higrotérmico nas propriedades elásticas de um compósito de fibra de vidro/epóxi, **8º congresso brasileiro de polímeros**, 2010.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. São Paulo: LTC, 2010.702 p.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: ArtLiber, 2007. 448 p.

CATSMAN, P. **Polyetherimide (PEI): Substituting metal**. Alemanha: Kunststoffe, 2005, p.143-147.

CHAWLA, KK. **Composite materials, science and engineering**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 483 p.

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 do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

DA SILVA, J.F.M.G. **Pré-Impregnados de matriz termoplástica: fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamentar**.2005.301f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2005.

DUBÉ, M. et.al. Fatigue failure characterisation of resistance-welded thermoplastic composites. **International Journal of Fatigue**, v.31, p.719–725, 2009.

DUBÉ, M. **Static and fatigue behaviour of thermoplastic composite laminates joined by resistance welding**. 2007.162f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - McGill University, Montréal, 2007.

DUBÉ, M.; et al. Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, Québec, v. 48, p. 911-919, 2012.

EVENO EC, GILLESPIE Jr. JW. Resistance welding of graphite polyetheretherketone composites: an experimental investigation. **J Thermoplast Compos Mater**, p.322–38, 1998.

GINGER G., Thermoplastic composites gain leading edge on the A380. **United States: High Performance Thermoplastics**, p. 50 – 55, 2006.

HOU, M., YE, L. MAI, Y. W. An Experimental Study of Resistance Welding of Carbon Fiber Fabric Reinforced Polyetherimide (CF Fabric/PEI). **Composite Materials**, v.6, p 35–49, 1999.

ICHIMURA, Y. **The anisotropy of thermal expansion and shrinkage**. Tóquio: SII NanoTechnology Inc., TA n.21, jun 1985. Disponível em: <http://www.siint.com/en/documents/technology/thermal_analysis/application_TA_021e.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2015.

INFOSOLDA; **Soldagem por resistência – característica**,1997. Disponível em:<<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/182-soldagem-por-resistencia-caracteristicas.html>>. Acesso em:02 fev.2015.

KUMAR, B. G.; SINGH, R. P.; NAKAMURA, T. Degradation of carbon fiber reinforced epoxy composites y ultraviolet radiation and condensation. **Journal of Composites Materials**, v. 36, n. 24, p. 2713 – 2734, 2002.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: Materials, Manufacturing and Design**. 3ed. New York: CRC Press, 2008.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000, p. 197.

MAZUR, R.L.; et al. Avaliação Térmica e Reológica da Matriz Termoplástica PEEK Utilizada em Compósitos Aeronáuticos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.18, n.3, p. 237-243, 2008.

METALURGICA MARIMAX Ltda. **Soldagem por resistência**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/256-apostila-solda-por-resistencia.html>>. Acesso em: 20 de julho 2014.

MORGAN, P. **Carbon fibers and their composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006,313p.

NINO, G. F.; AHMED, T. J.; BERSEE, H. E. N. Thermal NDI of resistance welded composite structures. **Composites: Part B**, v. 40, n.3, p 237–248, 2009.

OLIVEIRA, G.H.; GUIMARÃES, V.A.; BOTELHO, E.C. Influência da Temperatura no Desempenho Mecânico de Compósitos PEI/Fibras de Vidro. **Polímeros**, v. 19, n. 4, p. 305-312, 2009.

ORTIZ, E. C. **Avaliação do comportamento dinâmico-mecânico de compósito carbono/epóxi/termoplástico em espectro amplo de frequências**. 2008. 174f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2008.

PAN, W.et al. Electrical and structural analysis of conductive polyaniline/polyacrylonitrile composites. **Eur. Polym. J**, p. 2127 – 2133, 2005.

PANNEERSELVAM, K.; ARAVINDAN, S.; NOORUL HAQ, A. Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites. **Materials and Design**, Tamilnadu, v. 41, p. 453-459, May 2012.

PAOLI, M. A. **Degradação e estabilização térmica de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2008, 228p.

PARDINI, L. C.; NETO, F. L., **Compósitos Estruturais**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

REZENDE, M.C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, C.B.; **Compósitos Estruturais: Teoria e Prática**. São Paulo: Art Liber, 2011. 396p.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials: processing, fabrication, and applications**. Upper Saddle River: Prentice-Hall,1997.v.2.

SIMÕES, J. **Embraer do futuro.** Disponível em: <<http://montagemdeavioes.blogspot.com.br/2009/10/embraer-do-futuro.html>>. Acesso em: 10 nov.2016.

SOUZA, S.D. **Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de PPS /fibras contínuas com aplicações aeronáuticas.**2013.143f. Trabalho de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá,2013.

STAVROV D.; BERSEE H. E. N. **Thermal aspects in resistance welding of thermoplastic composites.** Proceedings of ASME Summer Heat Transfer Conference, Las Vegas, Jul. 2003.

STAVROV, D.; BERSEE, H. E. N. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, p.39-54, 2005.

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

TAIARIOL, T.S; **Influência do condicionamento ambiental sobre as propriedades viscoelásticas de compósitos aramida/epóxi.**2011.69f.Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

TALBOT, E.; YOUSEFPOUR, A.; HUBERT, P. **Thermal Behaviour During Thermoplastic Composites Resistance Welding.**v.1, p.1-5, 2005.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. **An introduction to polymers.** Londres: Chapman & Hall, 1991, p. 443.

YOUSEFPOUR, A.; HOJJATI M.; IMMRIGEON, P.J. Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v.17, 2004.

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