

ANA BEATRIZ RAMOS MOREIRA ABRAHÃO

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA EM COMPÓSITOS PEI/FIBRAS CONTÍNUAS PARA
APLICAÇÕES AERONÁUTICAS**

**Guaratinguetá
2015**

ANA BEATRIZ RAMOS MOREIRA ABRAHÃO

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA EM COMPÓSITOS PEI/FIBRAS CONTÍNUAS PARA
APLICAÇÕES AERONÁUTICAS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na área de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Michelle Leali Costa

Guaratinguetá
2015

A159o

Abrahão, Ana Beatriz Ramos Moreira

Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas / Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão – Guaratinguetá, 2015

200 f : il.

Bibliografia: f. 169-179

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Michelle Leali Costa

1. Materiais compostos 2. Compósitos poliméricos 3. Soldagem elétrica I. Título

CDU 620.1(043)

ANA BEATRIZ RAMOS MOREIRA ABRAHÃO

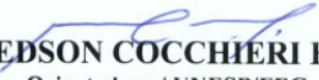
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
Orientadora / UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ MARIA FERNANDES MARLET
EMBRAER/SJC


Prof. Dr. EVANDRO LUIS NOHARA
UNITAU


Prof. Dr. GERALDO MAURICIO CÂNDIDO
AMR/IAE/DCTA


Profª. Drª. MARIA ODILA HILÁRIO CIOFFI
UNESP/FEG

Junho de 2015

DADOS CURRICULARES

ANA BEATRIZ RAMOS MOREIRA ABRAHÃO

NASCIMENTO 01.03.1980 – Pindamonhangaba / SP

FILIAÇÃO José Cândido Alves Moreira
 Vilma Aparecida Ramos Moreira

1999/2005 Curso de Graduação
 Engenharia Industrial Química – Escola de Engenharia de Lorena

2005/2007 Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, nível
de Mestrado, na Escola de Engenharia de Lorena.

2011/2015 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de
Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade
Estadual Paulista.

A meus pais e minhas irmãs por todo apoio, dedicação e investimento em meus estudos.

A meu marido Douglas pelo incentivo, respeito e paciência pela minha ausência em vários momentos para a elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me permitir o dom da vida e nascer e conviver perto de pessoas muito especiais e queridas, pela saúde intelectual e física.

Para meus pais por todo investimento, dedicação e amor que me criaram e educaram e por sempre incentivar e respeitar minhas escolhas.

Para meu marido Douglas pela grande paciência nos finais de semana e dias que me dediquei a este trabalho, pelo amor e ajuda nos serviços de casa.

Á meu orientador Edson por ser um profissional acessível, inteligente, dedicado, paciente e por ser referência por possuir além de tudo caráter humano.

A minha coorientadora Michelle por sempre presente apesar da distância, pela sempre disponibilidade, presteza e atenção para as dúvidas técnicas deste trabalho.

Aos meus amigos e funcionários da FEG: Júnior, Samia, Luiza, Natassia, Nathalia, Elton, Marina; Jonas, aos técnicos :Manoel e principalmente ao Sr. Wilson por além de toda ajuda e paciência tornou-se um verdadeiro amigo.

Aos meus alunos e amigos queridos da Fatec: Luíz, Jamile, Flávio, Edilon, Fernando, Sueli, Daniele, Profº César, Profª Eloísa, Profª Sonia, Carlos Eduardo, Daurya, Nicolas, Flávio, João Vítor, Rafael, Rayana, Ariela, Adilson, Vinícius, Rodrigo, Luís Felipe, Angélica, Ana Carolina e Denise que caminharam junto comigo neste trabalho, ajudando sofrendo e se empenhando para eu conseguir conciliar o meu trabalho com a pesquisa.

“ Buscai primeiro o reino de Deus, e sua justiça, e todas as outras coisas vos serão acrescentadas”.

(Mateus capítulo 6 versículo 33 na Bíblia Sagrada)

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

RESUMO

As matrizes poliméricas atualmente disponíveis para compósitos avançados têm evoluído progressivamente como alternativa para a indústria aeronáutica sendo que nos últimos anos diversas matrizes termoplásticas especiais e de alto desempenho mecânico vem sendo estudadas para utilização na fabricação de compósitos avançados. Dentre as matrizes termoplásticas mais utilizadas na área aeronáutica destaca-se a poli(éter-imida) (PEI) por apresentar baixo custo, boas propriedades mecânicas e ser de fácil manuseio. Por outro lado, um dos principais problemas da utilização de compósitos termoplásticos em aplicações estruturais consiste em sua união efetiva para a integração de componentes. Entre os diversos métodos disponíveis destinados à soldagem, a utilização do processo de soldagem por resistência elétrica vem sendo considerado como um dos mais promissores para união de compósitos. O presente trabalho tem como objetivo a otimização do processo de soldagem por resistência elétrica utilizando compósitos de matriz constituída do polímero termoplástico PEI reforçado por fibras contínuas de vidro, carbono e por um sistema híbrido constituído de fibras de carbono e de vidro, com foco em aplicações aeronáuticas. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um planejamento experimental para a determinação e otimização dos melhores parâmetros sendo aqui considerados tempo, corrente elétrica e pressão na soldagem de laminados em estudo. Além disso, foram avaliados 4 tipos de elementos resistivos (malhas metálicas de aço inox de 100, 200 e 300 mesh e fibra de carbono com bronze). Os melhores parâmetros de otimização foram determinados a partir de ensaios de *Lap Shear*. Baseando-se nos resultados encontrados quanto à otimização destes sistemas, foi concluído que para o compósito PEI/ fibra de vidro os melhores valores experimentais foram obtidos a partir da utilização de corrente elétrica de 27,50 A, pressão de 1,85 MPa e tempo de 175 s. Para o compósito de fibra de carbono estes foram: corrente de 30 A, pressão de 0,7 MPa e tempo de 50 s. Já para o compósito híbrido os melhores valores foram encontrados quando da utilização de corrente, pressão e tempo para a soldagem de 33A, 0,7MPa e 50s, respectivamente. Após a avaliação das condições mais adequadas para a soldagem destes três materiais, o compósito reforçado com fibra de carbono foi selecionado como estudo de caso (prova de conceito), uma vez que o processo de soldagem especificamente para este material

permite a integração de componentes aeronáuticos com aplicações primárias. Esta escolha foi também baseada por este laminado apresentar os valores mais elevados de *Lap Shear* (valor máximo de 24 MPa) após soldagem e pela falta de trabalhos em literatura científica envolvendo a otimização do processo de soldagem para sistema. Finalmente, foi realizada a comprovação do modelo de otimização do sistema a partir de análises estatísticas e feita a caracterização mecânica da junta soldada dos materiais selecionados para o estudo de caso.

Palavras-Chave: Compósitos Termoplásticos, Poli(éter-imida), Soldagem por Resistência Elétrica.

ABRAHÃO, A.B.R.M. **Optimization of electrical resistance welding process in PEI / continuous fibers composites for aeronautical application.** 2015. 200 f. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Thermoplastic composites reinforced with continuous fibers are being studied in a wide range of applications, such as commercial use for their low cost and for engineering with higher associated value. Currently, available polymer matrices for advanced composites have been progressively developed as an alternative for the aeronautical industry and, in the latest years, several special and high performance thermoplastic matrices have been studied for their use in manufacturing advanced composites. Among the thermoplastic matrixes, the poly (ether imide) (PEI) should be highlighted due mainly to its low cost, good mechanical properties, and for being easy to be handled. Moreover, a major problem concerning the use of thermoplastic polymer composites for structural applications is their effectiveness in the integration of structural components. Among the methods available for welding these composites is the use of the electrical resistance welding process which has been considered as the most promising for joining composites. The present work aims to optimize the welding process using electrical resistance matrix composites, consisting of thermoplastic polymer PEI reinforced by glass fiber, carbon fiber and a hybrid system consisting of carbon fiber and glass fiber for aeronautical applications. For the development this work, an experimental design was carried out to determine optimal parameters of time, electrical current and pressure on the welding of the laminates used in this study. Also it was evaluate 4 types of resistive elements (metal mesh stainless steel 100, 200 and 300 mesh, and carbon fiber with bronze). The best optimization parameters were confirmed from the Lap Shear tests. From the main results of these optimization, it was concluded that, for PEI / glass fiber laminates, the best acquired experimental values of current, time and pressure for the welding were 27.50 A, 1.85 MPa and 175 seconds, respectively. For carbon fiber laminates, the best values were: 30 A, 0.7 MPa and 50 seconds, respectively. For the hybrid laminates, the best values were 33A, 0.7 MPa and 50 seconds, respectively. Subsequently, the efficiency of the welding process was evaluated for PEI/ carbon fiber composites as a case of study. This choice was based on this laminate presented the highest values of shear lap after the welding, the scarcity of

publications for this purpose, and the interest in integrating components for primary structures applications. Finally it was used a optimization model in order to confirm the found results and the mechanical characterization of the welded joint for the case of study have been performed.

Keywords: Thermoplastic Composites. poly (ether imide). Electrical resistance welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais materiais utilizados na fabricação da aeronave Boeing 787.....	26
Figura 2- Vista explodida de uma aeronave EMB 145, mostrando partes fabricadas em compósitos avançados.	30
Figura 3- Fórmula estrutural do polímero termoplástico PEI.....	36
Figura 4 - Técnicas de junção para compósitos termoplásticos	38
Figura 5 - Etapas de união durante o processo de soldagem de um compósito termoplástico: a) ilustração das amostras e b) ilustração comportamento matriz	40
Figura 6 - Classificação das tecnologias de soldagem por fusão.	41
Figura 7 - Sistema de soldagem por resistência elétrica para união de compósitos.....	43
Figura 8- Ciclo de soldagem típico para compósitos termoplásticos.....	44
Figura 9 - Junções poliméricas mais comuns de utilização.....	48
Figura 10 - Modos de sollicitações de junções poliméricas: a) clivagem; b) tração; c) corte...	49
Figura 11- Geometrias utilizadas para avaliação da soldagem de compósitos para ensaios:. a) Lap Shear b)DCB	50
Figura 12- Dimensões em milímetros dos corpos de prova utilizados para testes de Lap Shear de juntas soldadas.	51
Figura 13-Desenho esquemático do ensaio de Lap Shear.	51
Figura 14 - Janela de processamento típico de solda por resistência	53
Figura 15 - Efeito de potência de entrada em teste de Lap Shear.	57
Figura 16 - Curvas de soldagem de compósito de fibra de carbono / PEI soldadas sob pressão constante.	59
Figura 17- Desenho da parte frontal de compósitos termoplásticos soldados para componentes das aeronaves da Airbus A340 e A380.....	62
Figura 18- Detalhe da soldagem por resistência elétrica para montagem da peça frontal dos termoplásticos soldados para componentes das aeronaves da Airbus A340 e A380.	62
Figura 19- Modelo geral de um processo ou sistema.	64
Figura 20. Gráfico de superfície de resposta utilizado em MSR.....	68
Figura 21 - Representação da matriz teste para o planejamento 23.	69
Figura 22- Representação de condução de experimentos com três variáveis independentes por delineamento composto central rotacional (CCR).....	70

Figura 23 - Interpretação geométrica dos efeitos das variáveis estudadas no planejamento 23:	
a) efeitos principais; b) efeitos das interações.	72
Figura 24- Fluxograma apresentando as principais etapas realizadas neste trabalho de pesquisa.	73
Figura 25-Laminado PEI/ fibra de vidro com código de identificação do fornecedor.	74
Figura 26- Amostras dos laminados PEI/ fibra de vidro dimensionadas para os ensaios de Lap Shear.....	75
Figura 27- Laminado PEI/ híbrido com código de identificação do fornecedor.	75
Figura 28- Amostras dos laminados PEI/ híbrido dimensionadas para os ensaios de Lap Shear.	76
Figura 29 - Laminado PEI/ fibra de carbono com código de identificação do fornecedor.....	76
Figura 30- Amostras dos laminados PEI/ fibra de carbono dimensionadas para os ensaios de Lap Shear.	77
Figura 31- Malha metálica nas dimensões de corte para utilização como elemento resistivo para a soldagem dos laminados.....	78
Figura 32- Representação esquemática das malhas metálicas utilizadas.....	78
Figura 33- Imagens do tecido de fibra de carbono utilizadas como elemento resistivo na soldagem dos laminados.	79
Figura 34- Ensaios de caracterização realizados para os laminados de PEI.....	80
Figura 35- Equipamento de Ultrassom utilizado.	82
Figura 36- Equipamento de TGA da SII Nanotechnology, modelo 6200.	83
Figura 37- Equipamento utilizado para a análise dinâmico-mecânica dos laminados em estudo.	84
Figura 38- Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000.....	85
Figura 39- Sistema utilizado de microscopia eletrônica de varredura.	86
Figura 40- Desenho do projeto da máquina de soldagem de compósitos.....	87
Figura 41- Desenho da mesa da prensa com um corpo de prova posicionado para soldagem.	88
Figura 42- Dimensões para corte dos corpos de prova extraídos do laminado PEI/fibras contínuas (dimensões em mm).....	91
Figura 43- Procedimento de corte com utilização de serra de fita dos laminados para soldagem.	91
Figura 44- Marcação das amostras da regiões a serem unidas pelo processo de soldagem por resistência de compósitos.....	92

Figura 45- Foto da máquina de soldagem por resistência elétrica utilizada no presente trabalho	93
Figura 46- Imagem do desenho da vista expandida da cabine de soldagem da máquina.....	93
Figura 47- Amostras do compósito PEI/fibra de carbono antes da soldagem para os testes de Lap Shear.	94
Figura 48- Soldagem das amostras do compósito PEI/fibra de carbono destinadas aos testes de Lap Shear	94
Figura 49- Modo de ensaio antes de soldagem de testes de Lap Shear do compósito PEI/fibra de carbono.....	94
Figura 50- Modo de ensaio durante a soldagem de testes de Lap Shear do compósito PEI/fibra de carbono.....	94
Figura 51- Tela de comando do software utilizado da soldadora.	95
Figura 52- Detalhe da amostra no momento da falha durante o ensaio Lap Shear.	98
Figura 53-Imagem da seção transversal da amostra do compósito PEI/fibra de vidro com ampliação de 20 X.	100
Figura 54- Imagem da seção transversal da amostra do compósito PEI/fibra de carbono com ampliação de 20X.	100
Figura 55- Imagem da seção transversal da amostra do compósito PEI/híbrido com ampliação de 20 X.	100
Figura 56- Resultados de ultrassom dos laminados de PEI reforçados com: a) fibras de vidro; b) fibras de carbono; c) laminado híbrido; d) escala de atenuação de cores.	102
Figura 57- Análise termogravimétrica do compósito PEI/fibra de Vidro	103
Figura 58- Análise termogravimétrica do compósito PEI/fibra de carbono.....	104
Figura 59- Análise termogravimétrica do compósito PEI/híbrido.	105
Figura 60- Resultados da temperatura atingida durante o processo de soldagem por resistência elétrica para o compósito PEI/fibra de vidro.	110
Figura 61- Resultados preliminares referentes aos parâmetros de soldagem para o compósito PEI/fibras de carbono.	111
Figura 62 - Resultados preliminares referentes aos parâmetros de soldagem para o compósito PEI/híbrido.	112
Figura 63- Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente ao laminado PEI/fibra de vidro.	123
Figura 64- Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente ao laminado PEI/fibra de carbono.	123

Figura 65- Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente ao laminado PEI/híbrido.	124
Figura 66- a) Superfície de resposta e b) curvas de nível para o laminado PEI/fibra de vidro em função do tempo e da corrente elétrica aplicada.	126
Figura 67. a) Superfície de resposta e b) curvas de nível para o laminado PEI/fibra de carbono em função do tempo e da corrente elétrica aplicada.	127
Figura 68. a) Superfície de resposta e b) curvas de nível para o laminado PEI/híbrido em função do tempo e da corrente elétrica aplicada.	128
Figura 69- Valores experimentais obtidos em função dos valores preditos pelo modelo estatístico na soldagem do laminado PEI/fibra de vidro.	129
Figura 70- Valores experimentais obtidos em função dos valores preditos pelo modelo estatístico na soldagem do laminado PEI/fibra de carbono.	129
Figura 71- Valores experimentais obtidos em função dos valores preditos pelo modelo estatístico na soldagem do laminado PEI/híbrido.	130
Figura 72- Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo um tecido de fibra de carbono.	133
Figura 73- Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo uma malha de aço inox de 100 mesh.	133
Figura 74- Valores de resistência ao cisalhamento (Lap Shear) em função do elemento resistivo utilizado	135
Figura 75- 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.	136
Figura 76- Imagem da disposição das malhas metálicas para a soldagem dos laminados. ...	137
Figura 77- Imagem da disposição da fibra de carbono para a soldagem dos laminados.	138
Figura 78- Valores de soldagem referente a utilização da malha metálica de 100 mesh.	138
Figura 79 - Valores de soldagem referente a utilização da malha metálica de 200 mesh.	138
Figura 80 - Valores de soldagem referente a utilização da malha metálica de 300 mesh.	138
Figura 81 - Valores de soldagem referente a utilização da fibra de carbono com bronze.	139
Figura 82- Valores preditos pelo programa considerando as variáveis tempo e corrente de soldagem para o compósito PEI/fibras de carbono.	144
Figura 83 - Superfície de resposta do planejamento experimental referente ao compósito PEI/fibra de carbono com o valor de pressão de 0,74 MPa.	144

Figura 84– Tela do software da máquina de soldagem com o valor de temperatura atingida no momento da solda nas condições selecionadas.	147
Figura 85- Microscopia da região transversal da amostra de PEI/fibras de carbono soldado (6,5X).....	148
Figura 86 – Microscopia da região transversal da amostra soldada de PEI/fibras de carbono soldado (10X).	148
Figura 87 – Microscopia da região transversal da amostra de PEI/fibras de carbono soldado (20X).....	148
Figura 88 – Microscopia da região transversal da amostra soldada de PEI/fibras de carbono com ampliação de 40X.	148
Figura 89- Gráfico de DMA obtido para o compósito PEI/fibra de carbono soldado.....	149
Figura 90. a)Amostra de compósito PEI/fibra de carbono sem solda após o ensaio de ILSS. b) Micrografia apresentando o início da fratura na região fraturada pelo ensaio de ILSS do laminado PEI/fibra de carbono não soldado.....	153
Figura 91-a)Amostra de compósito PEI/fibra de carbono com solda após o ensaio de ILSS. b) Micrografia do fim da fratura na região fraturada pelo ensaio de ILSS.....	154
Figura 92- Gráfico da tensão em função da deformação proveniente do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono soldada.....	155
Figura 93- Gráfico da tensão em função da deformação do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono não soldada.....	156
Figura 94- Amostra ensaiada do compósito PEI/fibra de carbono.....	157
Figura 95 - Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8 X.	157
Figura 96 - Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8 X.	158
Figura 97- Modos de falha típicos observados durante o ensaio de Lap Shear em compósitos: intralaminar, interfacial e fratura.	159
Figura 98- 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).	160
Figura 99. 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).....	161

Figura 100- Micrografia da região soldada do laminado PEI/fibras de carbono após a realização do ensaio de Lap Shear. com ampliação de 100X.	162
Figura 101- Micrografia da região soldada após ensaio de Lap Shear com ampliação de 500X.	163
Figura 102-Análise de EDS da região de interação da matriz polimérica e malha metálica da amostra soldada de PEI/fibras de carbono (a); espectro elementar da região analisada (b).	164
Figura 103- Análise de EDS da região de separação da matriz polimérica e malha metálica da amostra soldada de PEI/fibras de carbono (a); e espectro elementar da região analisada (b) após a realização do ensaio Lap Shear.	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades do polímero PEI.....	37
Tabela 2- Trabalhos desenvolvidos com soldagem por resistência elétrica para compósitos termoplásticos de matriz PEI.....	63
Tabela 3 - Dimensões das malha metálicas.....	79
Tabela 4 - Composição química das malhas de aço inox AI 304 utilizadas.	79
Tabela 5- Condições máximas e mínimas operacionais da máquina de soldagem utilizada. ..	88
Tabela 6 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliadas segundo planejamento experimental estrela rotacional para o laminado de PEI/fibra de vidro.....	97
Tabela 7 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliados segundo planejamento experimental estrela rotacional para o laminado de PEI/fibra de carbono.	97
Tabela 8 – Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliados segundo planejamento experimental estrela rotacional para o compósito PEI/ fibra de vidro e carbono (híbrido).....	97
Tabela 9 - Valores encontrados de temperatura de transição vítrea a partir dos módulos de elasticidade e de perda e da tangente de perda dos compósitos estudados.....	106
Tabela 10- Ensaio iniciais para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/ fibra de vidro.	108
Tabela 11- Ensaio iniciais para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/ híbrido.....	108
Tabela 12- Ensaio iniciais para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/ fibra de carbono.	109
Tabela 13- Resultados de Lap Shear (tensão) da soldagem para avaliação da melhor direção da fibra.....	112
Tabela 14 - Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (Lap Shear) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de vidro.....	114
Tabela 15 - Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (Lap Shear) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/ fibra de carbono.	115

Tabela 16 - Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (Lap Shear) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/ híbrido.	116
Tabela 17-Valores máximos obtidos pelo ensaio de Lap Shear nos experimentos realizados nas condições de soldagem dos compósitos estudados.....	117
Tabela 18 - Critérios para validação de modelos.....	118
Tabela 19- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/fibra de vidro nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.	119
Tabela 20- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/fibra de carbono nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.	120
Tabela 21- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/híbrido nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.	121
Tabela 22- Valores das variáveis estudadas otimizadas e reais obtidas para valores máximos da variável resposta para o laminado PEI/ fibra de vidro.	130
Tabela 23- Valores das variáveis estudadas otimizadas e reais obtidas para valores máximos da variável resposta para o laminado PEI/ fibra de carbono.....	131
Tabela 24- Valores das variáveis estudadas otimizadas e reais obtidas para valores máximos da variável resposta para o laminado PEI/ híbrido.	131
Tabela 25- Condições de soldagem utilizadas para cada elemento resistivo estudado.	134
Tabela 26 - Valores calculados com os dados experimentais (tempo de 50 segundos, corrente de 31,5 amperes e pressão de 1,85 MPa) para os elementos resistivos estudados.....	139
Tabela 27- Valores das variáveis estudadas e resposta correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de carbono utilizando como elemento resistivo a malha de aço com 300 mesh.	141
Tabela 28 – Análise de variância e dos efeitos frente ao processo estudado utilizando a malha de aço com 300 mesh como elemento resistivo.....	141
Tabela 29 - Soluções das melhores condições de soldagem propostas a partir do programa para o laminado PEI/fibra de carbono com elemento resistivo de aço com 300 mesh..	143
Tabela 30- Condições experimentais e valores de Lap Shear preditos pelo modelo e o obtido experimentalmente.	143

Tabela 31 - Valores das variáveis adquiridas experimentalmente (reais) e propostas pelo modelo estatístico otimizado a partir dos valores máximos das respostas variáveis para os laminados PEI/fibra de carbono soldados com aço com 300 mesh.....	145
Tabela 32- Condições experimentais e valores de Lap Shear preditos pelo modelo e o obtido experimentalmente.....	146
Tabela 33- Valores de temperatura de transição vítrea encontrada a partir dos módulos de elasticidade e de perda, assim como da tangente de perda do compósito estudado com e sem solda.	150
Tabela 34- Valores de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS).....	151
Tabela 35 - Valores de resistência ao cisalhamento ILSS do PEI/fibra de carbono com e sem solda.....	151
Tabela 36 - Valores de tensão de cisalhamento por Iosipescu para os compósitos como recebidos.....	155
Tabela 37 - Valores de resistência ao cisalhamento Iosipescu do compósito utilizado como estudo de caso.....	156
Tabela 38- Análise elementar por EDS da região da amostra ilustrada pela Figura 104 (PEI/fibras de carbono na região de soldagem).....	164
Tabela 39 - Análise elementar por EDS da região da amostra ilustrada pela Figura 103.....	165

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
1.2 OBJETIVOS	27
1.2.1 Geral.....	27
1.2.2. Específicos.....	27
1.3 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	28
1.4 METODOLOGIA UTILIZADA.....	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS AVANÇADOS.....	30
2.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS TERMOPLÁSTICOS	32
2.3 MATERIAIS HÍBRIDOS	34
2.4 PEI (poliéter-imida)	35
2.5. TÉCNICAS DE UNIÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS	37
2.6 TÉCNICAS DE UNIÃO POR FUSÃO (SOLDAGEM) PARA COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS	39
2.7 PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS	42
2.8 DESEMPENHO EM SERVIÇO.....	44
2.8.1 Falha e Fratura.....	45
2.8.1.1 Fratura de juntas poliméricas.....	47
2.9 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS	49
2.9.1 Lap Shear	51

2.10 FATORES DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA MATERIAIS COMPÓSITOS	52
2.10.1 Elementos resistivos.....	54
2.10.2 Potência e energia de entrada.....	55
2.10.3 Pressão de soldagem	58
2.10.4 Calor e temperatura	59
2.11 ESTUDOS DE CASOS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS	60
2.12 MÉTODO ESTATÍSTICO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS	64
2.12.1 Otimização de processos	65
2.12.2 Planejamentos fatoriais.....	68
2.12.2.1 Planejamento fatorial completo 2 ³	69
2.12.2.2 Central Composite Design – CCD.....	70
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	73
3.1. LAMINADOS TERMOPLÁSTICOS	74
3.2. ELEMENTOS RESISTIVOS UTILIZADOS	77
3.2.1 Malha metálica.....	77
3.2.2 Fibra de Carbono	79
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS PEI/FIBRAS CONTÍNUAS	80
3.3.1 ILSS	80
3.3.2 Ensaio por Cisalhamento Iosipescu	81
3.3.3 Análise por Ultrassom (C-scan).....	81
3.3.4 TGA	82
3.3.5 DMA.....	83
3.3.6 Análise Morfológica.....	84
3.3.6.1 Microscopia óptica	84

3.3.6.2 MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura	85
3.3.6.3 Microanálise por Energia Dispersiva.....	86
3.4 SISTEMA DE SOLDAGEM	86
3.4.1. Descrição do projeto da máquina e utilização.....	88
3.4.1.1 Itens de segurança	90
3.4.2 Preparo das amostras dos laminados.....	90
3.4.2 Processo de soldagem das amostras dos laminados	92
3.5 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO.....	96
3.5.1 Planejamento experimental.....	96
3.5.2 Teste Lap Shear.....	98
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS COMO RECEBIDOS.....	99
4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	99
4.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	101
4.3.1 Ultrassom	101
4.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS LAMINADOS.....	103
4.4.1 Termogravimetria (TGA).....	103
4.4.2 DMA	105
4.5 DETERMINAÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA OS LAMINADOS.....	107
4.5.1 Estudo preliminar das condições e faixas de parâmetros de soldagem ..	107
4.5.2 Aplicação do Planejamento Experimental.....	113
4.5.2.1 Modelos empíricos para as respostas na soldagem dos compósitos	122
4.6 ESTUDO DE CASO – SOLDAGEM DO COMPÓSITO DE PEI/FIBRA DE CARBONO	131
4.6.1 Efeito do elemento resistivo (aquecimento) na soldagem do compósito PEI/fibra de carbono.....	132

4.6.2.1	Cálculos envolvendo elementos resistivos	137
4.7	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DO COMPÓSITO PEI/FIBRA DE CARBONO E ELEMENTO DE AQUECIMENTO.....	140
4.8	CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA JUNTA SOLDADA DO MATERIAL SELECIONADO PARA ESTUDO DE CASO.....	146
4.8.1	Avaliação microestrutural	147
4.8.2	Caracterização térmica	149
4.8.3	Caracterização mecânica	150
4.8.3.1	ILSS	150
4.8.3.2	Iosipescu	154
4.9	ANÁLISE DA FRATURA PELO ENSAIO DE LAP SHEAR.....	158
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	166
5.1	CONCLUSÕES.....	166
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	167
	REFERÊNCIAS	169
	ANEXOS	180
	APÊNDICES.....	183

1. INTRODUÇÃO

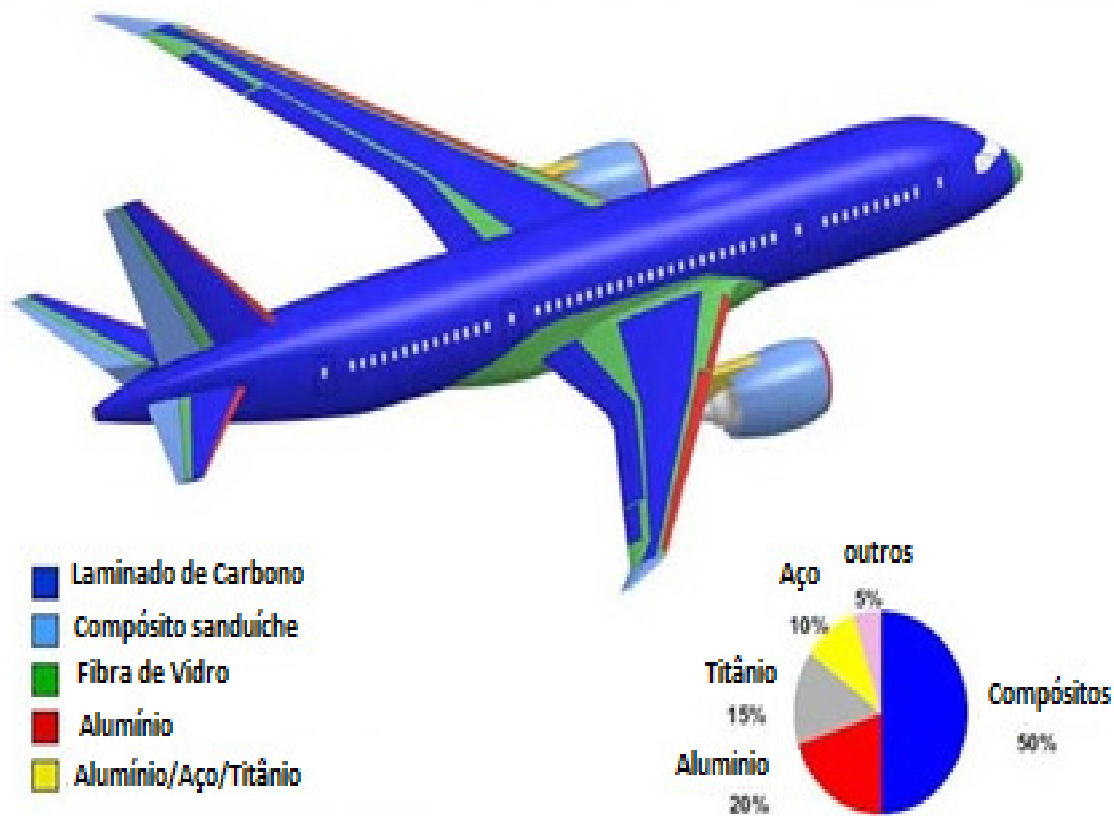
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, a utilização de compósitos estruturais na indústria aeronáutica vem crescendo constantemente devido, principalmente, a estes materiais proporcionarem redução de peso da aeronave, economia de combustível, aumento da autonomia em voo, aumento de produtividade e integração de peças, possibilitando uma redução do custo final da aeronave processados em compósitos poliméricos da ordem de até 25% em relação aos obtidos a partir das ligas metálicas tradicionais, sendo atualmente o seu uso substancial tanto no interior, quanto no exterior das aeronaves (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009)

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 esta a primeira aeronave comercial a ser fabricada com a maioria dos componentes em material compósito utilizando, como reforço, a fibra de carbono. Esta aeronave é produzida (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 (CÂNDIDO; ALMEIDA; REZENDE, 2000a; FREISSINET, 2014).

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 et al., 2012), 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 por compósitos termorrígidos.

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



Fonte: (FREISSINET, 2014)

Apesar de sua grande utilização na indústria aeronáutica, atualmente existe uma constante preocupação sobre a integração das diversas partes constituintes de uma aeronave. Para a integração destes compósitos, várias técnicas estão sendo estudadas e utilizadas visando a união de componentes específicos, como aplicação de adesivos, uso de rebites e técnicas de soldagem (AGEORGES; YE; HOU, 2000). Dentre estas técnicas, a por soldagem vem sendo considerada a 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 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Nestes materiais a união ocorre a partir da temperatura gerada pela passagem de corrente elétrica transversalmente entre as duas peças a serem soldadas. A partir do contato gera-se uma resistência a propagação da corrente elétrica causando, assim, um aquecimento local

provocado por efeito Joule. Por consequência, ocorrerá uma fusão localizada na região de interface entre as duas partes que se deseja soldar (AGEORGES; YE; HOU, 2006; NINO et al., 2009). 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 satisfatória de corrente elétrica na interface a ser soldada (DA COSTA et al., 2012).

Dentre os polímeros termoplásticos mais 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 (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O principal objetivo associado a este trabalho consiste na utilização de ferramenta estatística de planejamento de experimentos, para a otimização do processo de soldagem por resistência elétrica de compósitos de PEI/fibras contínuas com aplicações aeronáuticas.

1.2.2. Específicos

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Estabelecimento e aperfeiçoamento das condições de processo de soldagem por resistência elétrica para compósitos de PEI reforçados por fibras contínuas, utilizando a ferramenta estatística de planejamento experimental;
- Estudo de caso envolvendo o laminado de PEI/fibras de carbono com seleção das condições de soldagem;
- Estudo de elemento resistivo mais apropriado para a soldagem dos laminados em estudo, estabelecendo as condições otimizadas a partir de planejamento experimental;
- Análise das amostras soldadas nas condições estabelecidas por otimização experimental a partir de sua caracterização térmica (DMA), mecânica (ILSS e Iosipescu) e microestrutural (microscopia ótica e eletrônica).

1.3 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de doutorado encontra-se na avaliação da viabilidade para a utilização do processo de soldagem por resistência elétrica visando à integração de laminados termoplásticos para aplicações aeronáuticas. A inovação deste trabalho encontra-se na realização de um estudo sistemático envolvendo o estabelecimento das variáveis mais adequadas (tempo, corrente elétrica e pressão) por planejamento experimental, a serem utilizadas neste processo (inovação incremental) e na avaliação de uma prova de conceito envolvendo a caracterização de laminados termoplásticos soldados reforçados com fibras de carbono. Associado a este fato, a literatura apresenta uma reduzida quantidade de trabalhos envolvendo processos de soldagem para compósitos de PEI reforçados por fibras contínuas, principalmente quando reforçados por fibras de carbono, sendo este trabalho inédito no Brasil, até o momento.

A execução deste trabalho contribuirá para o desenvolvimento de tecnologias nacionais de utilização e fabricação em escala industrial deste produto de interesse, principalmente, da área aeronáutica.

1.4 METODOLOGIA UTILIZADA

O presente trabalho foi executado de maneira sistemática, adotando diversas etapas. Além deste Capítulo 1 (Introdução), o conteúdo deste trabalho encontra-se estruturado em outros 5 Capítulos, 2 Anexos e 14 Apêndices, como se segue:

- Capítulo 2 - Revisão da Literatura – Neste capítulo é apresentada uma coletânea de informações a respeito do assunto abordado nesta tese, dando fundamentação científica ao estudo experimental realizado;

- Capítulo 3 - Materiais e Métodos – Na metodologia, o trabalho realizado é apresentado em detalhes abordando: o material utilizado; a caracterização inicial do material como recebido; as avaliações estatísticas utilizadas para o planejamento experimental; o processo de soldagem por resistência elétrica; o estudo por ensaios mecânicos e análises térmicas do material não soldado e soldado e a avaliação fractográfica após a realização dos ensaios mecânicos;

- Capítulo 4 – Resultados e Discussão – neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir desta pesquisa, envolvendo a obtenção das principais variáveis otimizadas para os laminados reforçados com fibras de vidro, de carbono e para o sistema híbrido, assim como a avaliação de uma prova de conceito envolvendo o laminado de PEI/fibras de carbono soldado;

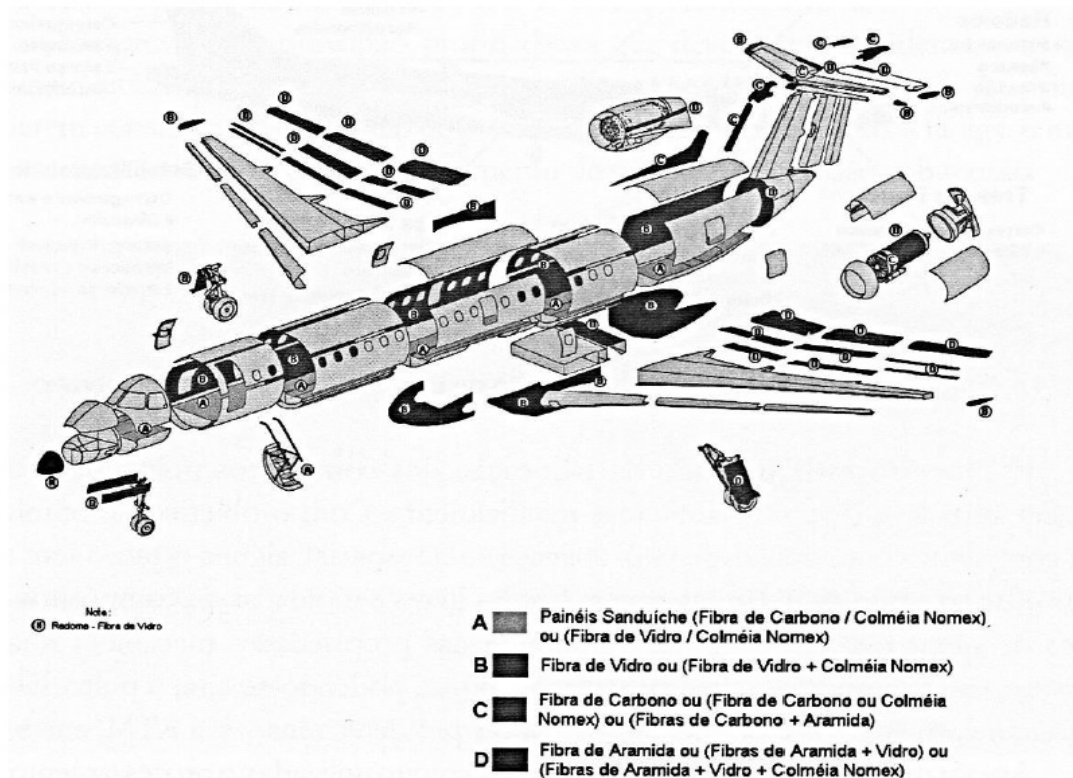
- Capítulo 5 – Considerações Finais – neste item são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS AVANÇADOS

Segundo REZENDE, COSTA e BOTELHO (2011) os compósitos avançados são materiais de engenharia constituídos de fibras de reforço, dispersas em uma matriz metálica, cerâmica ou polimérica. Tratando-se do último tipo de matriz, a combinação de propriedades do compósito é resultado da união de reforços com matrizes poliméricas que os tornam atrativos principalmente para aplicações estruturais (FELTRAN, 2008). Desta forma, o desenvolvimento da tecnologia dos compósitos poliméricos avançados tem como uma de suas finalidades a formação de um conjunto de materiais que combine elevadas resistência e rigidez aliado à baixa massa específica, o que os tornam muito atrativos para fins aeronáuticos como apresentado na Figura 2 (CÂNDIDO; ALMEIDA; REZENDE, 2000a; REZENDE; BOTELHO, 2000).

Figura 2- Vista explodida de uma aeronave EMB 145, mostrando partes fabricadas em compósitos avançados.



Fonte: (CÂNDIDO; ALMEIDA; REZENDE, 2000).

Nos últimos anos, o número de peças e estruturas metálicas substituídas por compósitos poliméricos, não somente na aviação militar, mas também em projetos de aeronaves civis vem crescendo substancialmente. Um exemplo deste fato por ser visto na aeronave A380 da Airbus, onde 22% de sua massa total é constituída de materiais compósitos. Portanto, a aplicação de materiais compósitos já é uma realidade principalmente na indústria aeroespacial (MICKAGUE, 2001; NETO; PARDINI, 2006). O Quadro 1 apresenta alguns exemplos de aplicação de compósitos poliméricos na indústria aeronáutica.

Quadro 1- Exemplos de aplicação de materiais compósitos na indústria aeronáutica.

Aeronave	Estrutura	Materiais	Fornecedor	Referência
Airbus A340- 500/600	Nervura da asa	Fibra de Carbono/ PEEK	ICI	MICKAGUE, 2001
		Fibra de Carbono/ PEI	Ten Cate	
	Nervuras e perfis do caixão da asa e painéis de acesso à asa.	Carbono/PPS	Ten Cate	
Airbus A 380	Bordo de ataque da asa (revestimento e nervuras)	Carbono/PPS	Não informado	
Casa C295	Nervuras e reforçadores	AS4/PEEK ou Carbono/PEI	Não informado	DIAZ E RUBIO, 2003
Lockheed –F22	Portas de acesso laterais (região do cockpit)	Carbono/PEEK	Não informado	
Gulfstream G-V	Painéis estruturais do piso	PEI	Não informado	MICKAGUE, 2001
Gulfstream IV/V	Nervuras do leme	PEI		

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 hoje utilizadas (BOTELHO; REZENDE, 2002; MAZUR et al., 2008; SILVA; REZENDE, 2003). Atualmente, as principais vantagens associadas aos compósitos poliméricos termoplásticos, quando comparados aos termorrígidos, são: maior facilidade de produção de partes com formatos complexos; produção em escala industrial de estruturas complexas; maior resistência ao impacto; maior vida de prateleira; são recicláveis e apresentam a possibilidade de integração por soldagem (LIBRANTZ; RAMBO; LIBRANTZ, 2006).

2.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS TERMOPLÁSTICOS

Apesar dos polímeros termorrígidos serem responsáveis pela maior demanda de matrizes para compósitos avançados, principalmente com aplicações aeroespaciais, a utilização de matrizes termoplásticas têm continuamente evoluído como uma alternativa para aplicações estruturais, devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto, maior temperatura de serviço, menor absorção de umidade, maior tolerância a danos, menor custo de processamento em grande escala, menores custos de transporte e estocagem, maior facilidade na execução de reparos e maiores possibilidades de integração e de reciclagem de rejeitos (GATTI; SILVA; TARPANI, 2006; MARQUES et al., 2010).

De acordo com BANDEIRA (2011), quando se aquecem os polímeros termoplásticos, as ligações intermoleculares são temporariamente rompidas e passa a existir uma maior mobilidade molecular que permite sua reconfirmação com mudança de estado físico da matéria. Com o resfriamento posterior, o estado físico anterior é reestabelecido, uma vez que as ligações secundárias são também reestabelecidas.

Recentes avanços melhoraram as propriedades mecânicas e térmicas das matrizes termoplásticas, facilitando o emprego deste tipo de material como matriz para compósitos estruturais. Esses avanços tornaram-nas mais competitivas com as resinas termorrígidas tradicionais, especialmente para a indústria de transporte, onde estas são utilizadas em painéis, armações de portas, engrenagens, etc. O aumento da massa molar e da cristalinidade das matrizes termoplásticas gerou um consequente aumento da temperatura de amolecimento para esta classe de materiais, aumentando a gama de temperaturas de serviço, além de melhorar as propriedades mecânicas dos mesmos. Adicionalmente as propriedades dos

compósitos termoplásticos, estes podem atingir tenacidade à fratura interlaminar (G_{Ic}) de até 5000 J/m^2 , enquanto termorrígidos tenacificados podem atingir, no máximo, 300 J/m^2 (BONELLI et al., 2005; PARDINI, 2006; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004)

O uso de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas também tem sido ampliado no setor aeroespacial devido, principalmente, ao aumento significativo de sua resistência à fadiga, maiores valores de resistências ao impacto e ao fogo, baixa absorção de umidade, temperatura de serviço mais elevada e grande versatilidade na produção em série, exibindo propriedades mecânicas iguais ou superiores às apresentadas pelos compósitos termorrígidos (BOTELHO, 2002).

Atualmente existem diversas rotas para o processamento dos compósitos termoplásticos, sendo a principal delas realizada via laminação e consolidação adequada de pré-impregnados poliméricos termoplásticos (também denominados semi-pregs). À medida que pré-impregnados de matriz termoplástica de melhor qualidade e custo mais acessível foram surgindo no mercado, deu-se também o aparecimento de tecnologias de transformação mais rentáveis que permitiam fabricar os componentes finais utilizados em diversas indústrias. O comprimento a impregnar, pressão a aplicar, viscosidade do polímero e geometria e disposição espacial das fibras são os principais fatores que devem ser avaliados com o intuito de garantir uma adequada e completa impregnação do reforço por um polímero (SILVA, 2005).

As propriedades dos compósitos termoplásticos podem ser influenciadas pelo grau de cristalinidade, pela morfologia e pela orientação da rede polimérica, às quais estão diretamente relacionadas às condições de processamento (PARDINI; NETO, 2006; PARDINI; PEREZ, 1996)

Recentemente, vários polímeros de última geração estão sendo utilizados na obtenção destes compósitos destacando-se: poliamidas; poliimidas; PEEK (poli(éter-éter-cetona)); PEI (poli(éter-imida)); PPS (poli(sulfeto de fenileno)); PSU (polisulfona); dentre outros, atendendo a requisitos de resistência mecânica na faixa de -60 a 82°C , utilizando processos como moldagem por compressão a quente, pultrusão reativa, e cura em autoclave. Dentre estes, as poli (éter-imidas) são boas candidatas como matriz impregnante de compósitos termoplásticos em função de seu custo, propriedades e facilidade de manuseio (MAZUR et al., 2008; OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009).

2.3 MATERIAIS HÍBRIDOS

Os compósitos com matriz polimérica reforçados simultaneamente com tecidos de fibras de carbono e de vidro encontram-se na categoria de compósitos híbridos. O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos híbridos, combinando laminados poliméricos reforçados com fibras longas, tem como uma de suas finalidades formarem um conjunto de materiais que combine elevados valores de resistência mecânica e rigidez e baixa massa específica. Estes compósitos apresentam uma melhor combinação de propriedades mecânicas quando comparados àqueles que contêm apenas um único tipo de fibra como, por exemplo, o laminado PEI/fibra de carbono. As fibras de carbono são resistentes e apresentam elevada rigidez, proporcionando um reforço de baixa massa específica, no entanto, apresentam elevado custo e baixa disponibilidade no mercado. As fibras de vidro são de menor custo de obtenção, porém, apresentam propriedades mecânicas inferiores às observadas para as fibras de carbono (DA SILVA et al., 2008; SEENA, 2002).

Os compósitos híbridos vêm se tornando comuns, sendo estes geralmente constituídos de várias camadas (estrutura do tipo laminado), com vários tipos de fibras compondo a estrutura do material. As fibras podem estar dispostas em uma única camada, como ocorre mediante a utilização de tecido híbrido, ou camada por camada (tecidos ou fitas constituídos de um único tipo de fibra por camada). Estes compósitos são projetados para beneficiar as diferentes propriedades das fibras empregadas (SILVA, 2005; DA SILVA, 2008).

O laminado híbrido vidro/carbono apresenta propriedades atrativas quando comparado com os laminados convencionais, podendo-se destacar que este é mais resistente e tenaz, possuindo maior resistência ao impacto e pode ser produzido a um menor custo quando comparado ao compósito totalmente reforçado com fibras de carbono, por exemplo. Além disso, este compósito proporciona parte de sua estrutura como um material condutor, e parte como um compósito isolante, sendo esta propriedade muitas vezes de grande interesse para o processo de soldagem. Adicionalmente, estes compósitos se destacam por apresentarem: melhorias das propriedades mecânicas quando comparados aos compósitos reforçados apenas por fibra de vidro; diminuição da absorção de umidade e aumento da resistência ao envelhecimento ambiental (CÂNDIDO; ALMEIDA; REZENDE, 2000b; DA SILVA et al., 2008; AQUINO; SARMENTO; SILVA, 2007).

2.4 PEI (poliéter-imida)

Os polímeros que integram a classe de poliimidas são os mais antigos e conhecidos plásticos de alto desempenho em função do seu custo, propriedades e facilidade de manuseio; desta forma, estes se tornaram fortes candidatos para utilização como matriz de impregnação de compósitos termoplásticos. Dentre as propriedades marcantes deste grupo de polímeros para aplicação aeronáutica destacam-se: excelentes propriedades mecânicas; estabilidade dimensional e térmica; excelente resistência à oxidação; boa resistência química; excelente resistência ao desgaste e auto retardamento de chama (BONELLI et al., 2005; SOUZA, 2010; MARINUCCI 2011; MANO, 2010).

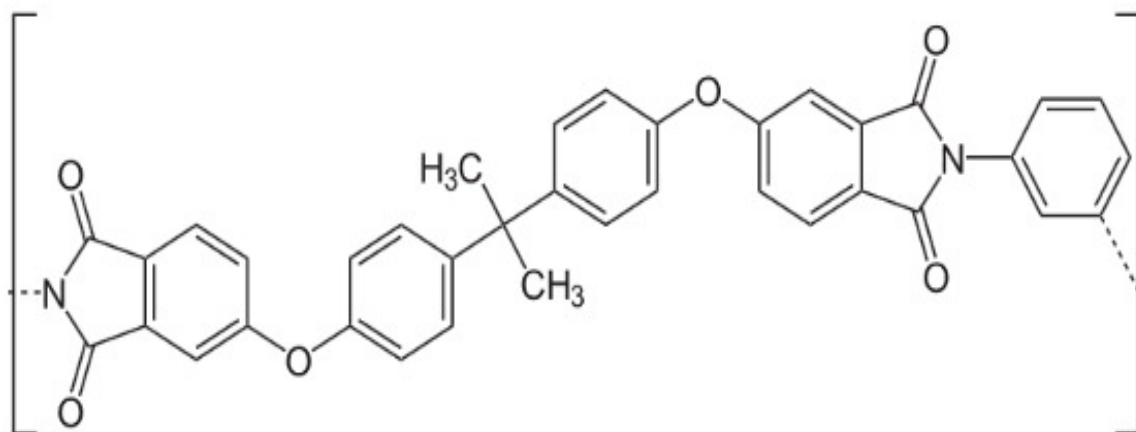
As poliimidas termoplásticas caracterizam-se por apresentarem boa resistência mecânica a altas temperaturas, que lhes permitem um uso contínuo em temperaturas de até 260°C. O poliéter-imida (PEI) é um termoplástico de engenharia, desenvolvido na década de 1970 pela empresa General Electrics Inc, porém, sendo utilizada desde 1982. Este polímero consiste de um material amorfo, transparente e de coloração amarelada, apresentando elevada temperatura de transição vítrea, caracterizado por elevados valores de 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), resistência inerente a chama com baixa evolução de fumaça, elevada resistência química e elevado índice de oxigênio (aproximadamente 47%). O PEI é um material isolante, podendo apresentar valores de resistividade elétrica da ordem $10^{17} \Omega/\text{cm}$ (CATSMAN, 2005).

A estrutura química do PEI consiste em repetidas imidas aromáticas e unidades éter (Figura 3). Diferentes de outros polímeros de engenharia, o PEI pode ser facilmente fundido e produzido em alta escala. A estrutura amorfa do PEI não é muito afetada por ciclos térmicos de processamento, contribuindo para uma excelente estabilidade dimensional e elevadas propriedades mecânicas isotrópicas, comparado com outros polímeros amorfos ou semicristalinos (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009).

A presença de anéis aromáticos na estrutura do PEI é uma importante característica destes polímeros de alto desempenho. Estes anéis estão ligados por um ou dois átomos e não há a presença de grupos parafinílicos ou ramificações o que faz com que a energia de ligação da estrutura seja elevada. Adicionalmente, a elevada Tg (em torno de 210°C) permite que o PEI seja utilizado em aplicações que requerem elevadas temperaturas (até 150°C) e a flexibilidade da sua molécula proporciona um bom amolecimento durante seu processamento,

assim como boa resistência química (CATSMAN, 2005; ADHIKARI; MAJUMDAR, 2004; NETO, 2009).

Figura 3- Fórmula estrutural do polímero termoplástico PEI.



Fonte: (BARROS, 2007).

O PEI é convencionalmente obtido pelo processo de polimerização pela condensação de diaminas e dianídeos, sendo definido como polímero termoplástico amorfo de alto desempenho em relação às propriedades que apresenta. Estas propriedades tratam de: elevada resistência química a combustíveis; bases diluídas; soluções salinas; álcoois; ácidos minerais e hidrocarbonetos aromáticos. Apesar de ser resistente a estas substâncias, este pode ser atacado por bases fortes e compostos parcialmente halogenados. Considerando outras propriedades, este apresenta ainda elevada resistência térmica, excelente módulo de elasticidade e resistência a tração em elevadas temperaturas, excelente estabilidade dimensional, baixa fluência e baixo coeficiente de expansão térmica (SOUZA, 2010).

Desta forma, as excelentes propriedades do PEI o tornam uma boa escolha para ser utilizado como matriz em compósitos aplicados a estruturas de aeronaves, principalmente em painéis de assoalho, iluminação, assentos e outras estruturas secundárias e terciárias (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009; AMANCIO, 2011). A Tabela 1 apresenta algumas das principais propriedades do PEI.

Tabela 1 - 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
	Ductibilidade (%)	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; MARINUCCI, 2010; AGEORGES; YE; HOU, 2000)

2.5. TÉCNICAS DE UNIÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

Compósitos de matriz termoplástica são considerados materiais de alto desempenho estrutural, entretanto, existem limitações associadas à sua utilização para o campo de aplicações em engenharia tais como a eficiência de união e integração de seus componentes. Em diversos setores da engenharia, a inclusão de conexões é necessária devido às limitações no processo de fabricação e de importância na inspeção, reparo e montagem para com estes materiais. Para a obtenção de uma estrutura adequada é necessário uma relação custo/benefício e de desenvolvimento de processos eficientes de junção e montagem rápida. De forma geral, a união de compósitos termoplásticos é classificada por técnicas de fixação mecânica, união adesiva e união por fusão (soldagem), como ilustrado na Figura 4 (AGEORGES; YE; HOU, 2006; DA COSTA et al., 2012).

Figura 4 - Técnicas de junção para compósitos termoplásticos



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

As tradicionais técnicas de união de compósitos termoplásticos não são satisfatórias para o campo industrial, principalmente por requererem no processamento tempos extensivos e devido às peças unidas estarem suscetíveis a defeitos provenientes dos processos de integração. Entretanto, novas descobertas mostraram que a devida otimização das técnicas de soldagem oferecem grandes vantagens com a eliminação de concentrações de tensões provocadas por orifícios na estrutura quando rebitadas ou na demora do processo de cura de sistemas adesivos constituídos de resinas termorrígidas (AMANCIO, 2011; DA COSTA et al., 2012; AGEORGES; YE; HOU, 2001).

As técnicas por fixação mecânica apresentam desvantagens tais como: concentrações de tensões no material; criação de delaminações; introdução de umidade entre as juntas; possibilidade de corrosão e extenso trabalho e tempo requeridos (DA COSTA, 2011; (STAVROV; BERSEE, 2005).

Por outro lado, as técnicas por união adesiva, apesar de serem mais favoráveis quando comparadas às por fixação mecânica, também apresentam uma série de dificuldades para o processamento de compósitos termoplásticos, principalmente quando consideradas as dificuldades de processamento em relação ao controle em ambientes industriais, como longo tempo de cura dos adesivos utilizados que são à base de resina epóxi (HOU, 1999; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Dentre as técnicas disponíveis para a integração de compósitos, a união por fusão ou soldagem é o método que apresenta maior potencial para aplicação em montagem, união e reparo dos componentes destes materiais. As principais vantagens associadas ao processo por fusão ou soldagem em comparação às outras técnicas citadas anteriormente incluem o reduzido tempo de processamento, reduzida preparação de amostra e baixa irregularidade na interface do material. Os principais problemas relacionados às outras técnicas de união de compósitos são a necessidade de tempos longos de processamento e a presença de áreas de concentração de tensão nas peças unidas (AGEORGES; YE; HOU, 2000; DUBÉ et al., 2007; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

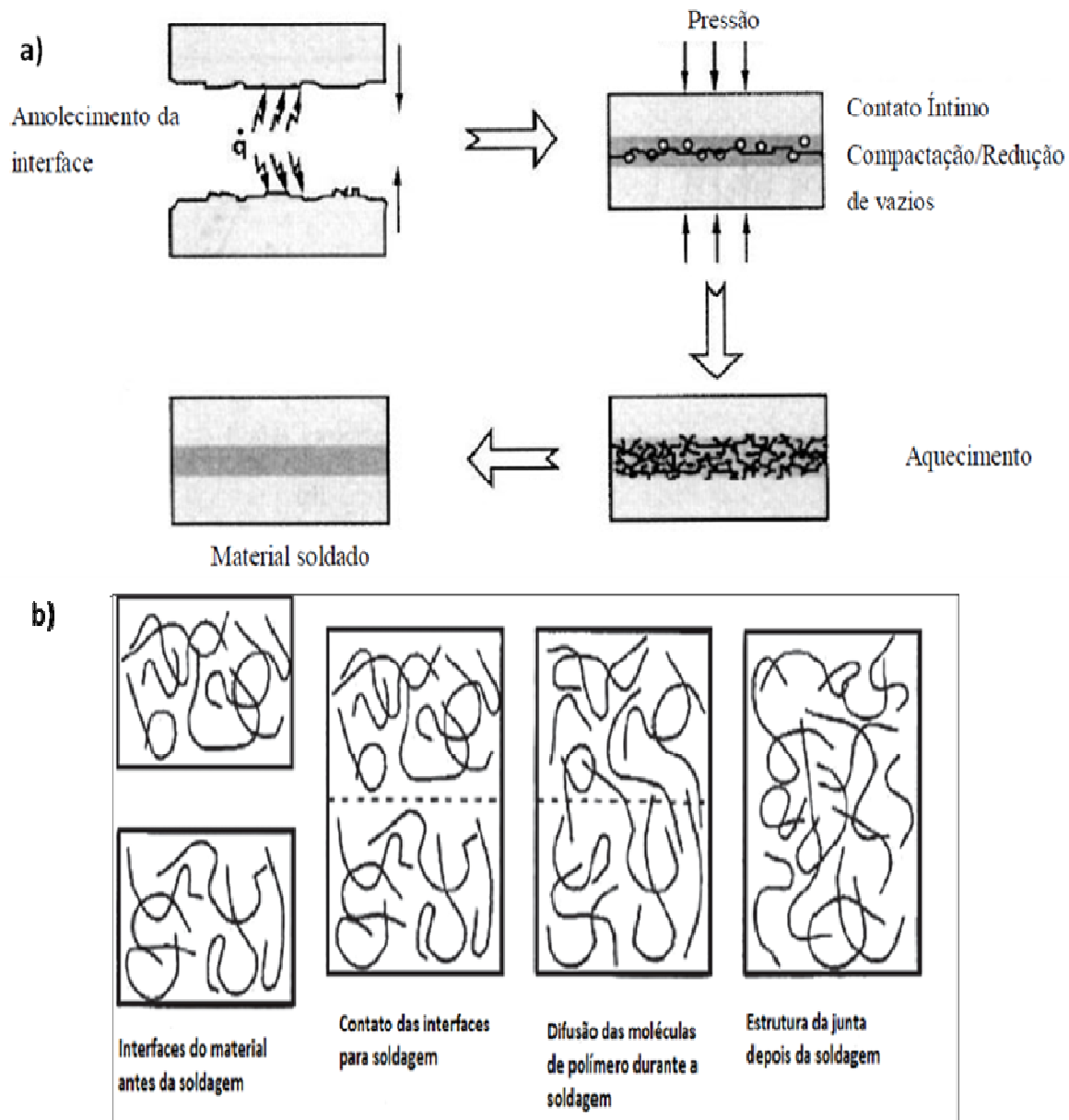
2.6 TÉCNICAS DE UNIÃO POR FUSÃO (SOLDAGEM) PARA COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

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 maior qualidade das juntas em um tempo menor em relação as outras técnicas disponíveis (AGEORGES; YE, 2001a).

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, aquecimento do polímero na região interfacial para o estado viscoso que fisicamente causa a interdifusão das cadeias poliméricas e no esfriamento do polímero, desta forma, obtêm-se uma união consolidada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; DUBÉ et al., 2008).

A Figura 5 apresenta as principais etapas envolvidas no processo de soldagem de um compósito termoplástico.

Figura 5 - Etapas de união durante o processo de soldagem de um compósito termoplástico: a) ilustração das amostras e b) ilustração comportamento matriz

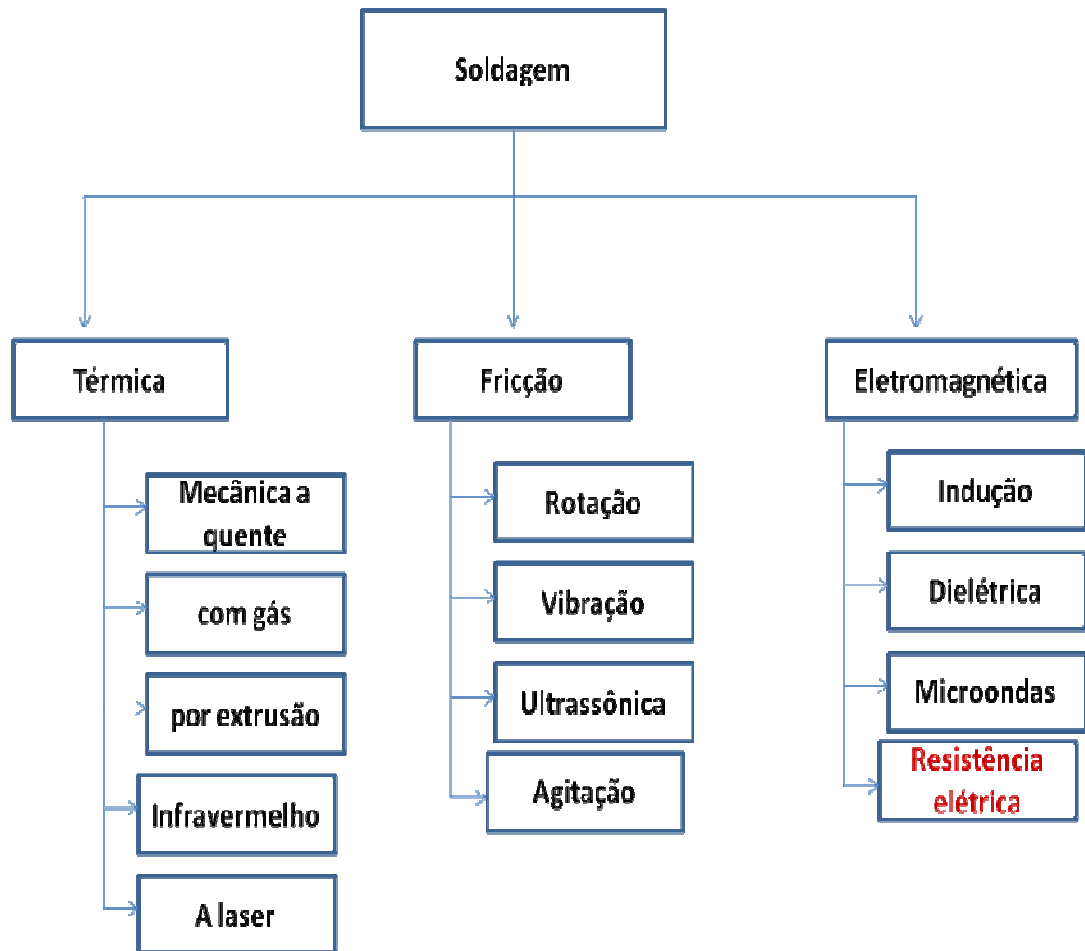


Fonte:(DA COSTA, 2011).

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 6 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; BATES; COUZENS; KEDAL, 2001; YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; WISE, 1999).

Figura 6 - Classificação das tecnologias de soldagem por fusão.



Fonte:(YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004)

Dentre as tecnologias apresentadas na Figura 6, 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 (BATES, 2005; HOU, 1999).

2.7 PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

A soldagem por resistência elétrica possui como vantagens a economia de material, pois não necessita de consumíveis de soldagem ou meios auxiliares para a união, descarta o uso de rebites, parafusos, porcas, e também não precisa do serviço de usinagem, além de poder ser utilizada na união de peças com arquitetura complexa (AGEORGES; YE, 2001b; DUBE et al., 2012).

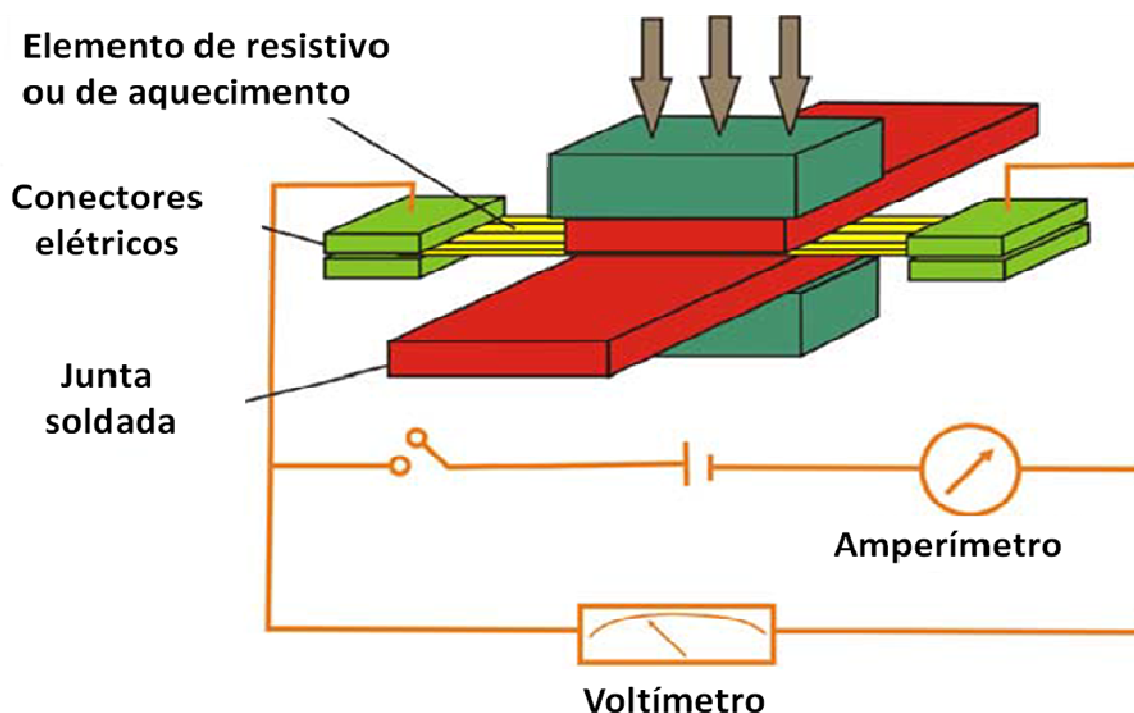
Esta técnica compreende um grupo de processos nos quais a união de peças é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, a partir do calor gerado na junta por meio da passagem de uma corrente elétrica associada à aplicação de uma pressão controlada, devendo ocorrer a fusão da matriz polimérica na região de contato dos materiais a serem soldados. Quando a corrente elétrica passa por um elemento resistivo, um aquecimento local é gerado segundo a lei de Joule, onde a energia (E) dissipada para o resistor é proporcional à resistência (R), corrente (I) e ao tempo de passagem desta corrente elétrica, como representado pela equação (1) (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

$$E = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

A soldagem por resistência elétrica consiste em um método rápido, que normalmente utiliza uma malha metálica de aço inox ou fibra de carbono como elemento resistivo. A temperatura gerada, a partir do efeito Joule, aumenta gradativamente à medida que a corrente elétrica passa. A Figura 7 ilustra o processo esquemático do método para soldagem de compósitos termoplásticos.

O processo de soldagem por resistência elétrica para compósitos é composto por vários componentes padrões sendo estes: compósitos prensados com o elemento resistivo entre estes: grampos conectores para a passagem de corrente; fornecimento de energia elétrica; dispositivos de fixação; fios; voltímetro e amperímetro. As medições de temperatura do processo são realizadas por termopares (STAVROV; BERSEE, 2003)

Figura 7 - Sistema de soldagem por resistência elétrica para união de compósitos



Fonte:(STAVROV; BERSEE, 2005)

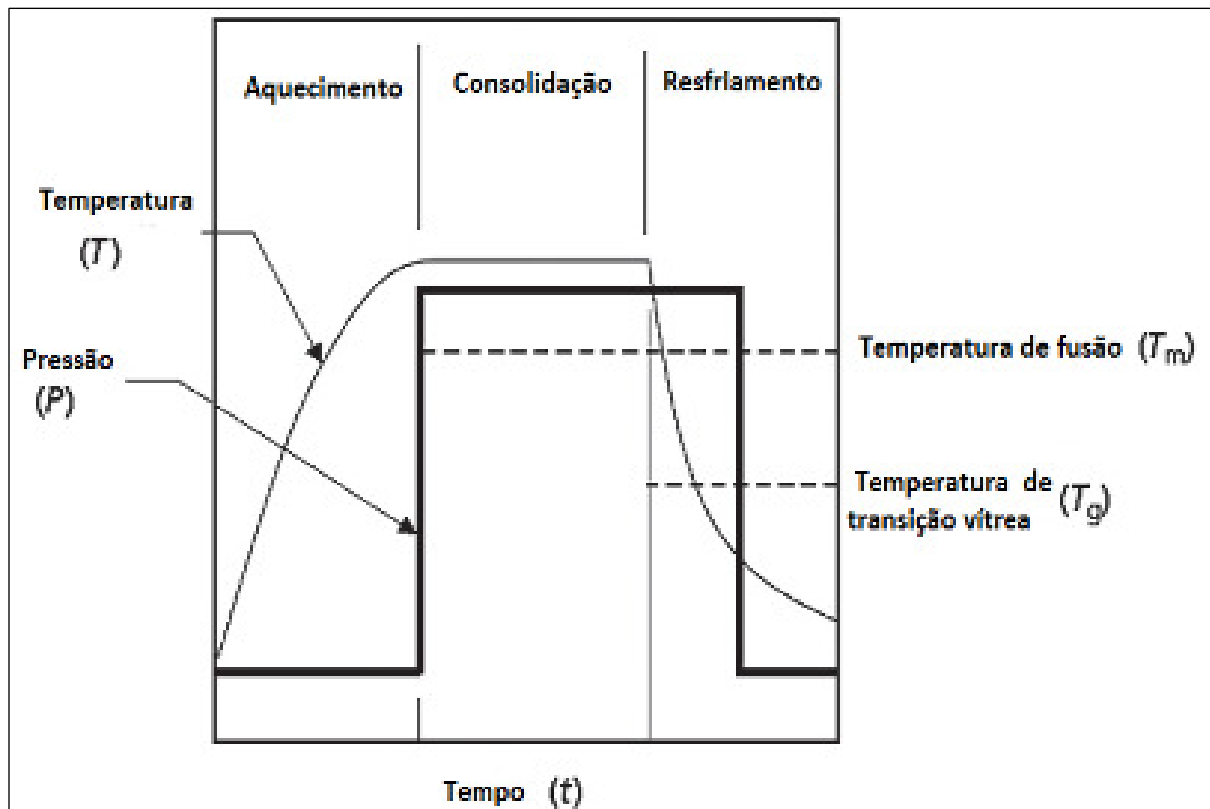
O isolamento térmico é um dos elementos essenciais do processo de solda por resistência, consistindo em utilização de materiais que conservam o máximo da energia térmica durante a soldagem sem a perda de calor para o ambiente. Vários investigadores verificaram, a partir de procedimentos experimentais e teóricos que, sem isolamento suficiente, a soldagem não pode ser realizada (AHMED et al., 2006; STAVROV; BERSEE, 2004).

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 (DUBÉ et al., 2008; AGEORGES; HOU, 2001).

A soldagem por resistência elétrica aplicada a compósitos termoplásticos tem um grande potencial para a integração de compósitos termoplásticos de alto desempenho, especialmente quando se trata de aplicações aeroespaciais. Entretanto, parâmetros como isolamento térmico, entrada de energia, tempo de soldagem, orientação da fibra, e o tipo de elemento resistivo a ser utilizado vem sendo estudados para melhoria da qualidade e desempenho das juntas soldadas (DUBÉ et al, 2007).

Quando a temperatura de soldagem atinge uma temperatura superior a de transição vítrea (T_g), para polímeros amorfos, e a T_m (temperatura de fusão) para semicristalinos, a matriz termoplástica começa o processo de difusão das moléculas (reptação). Neste processo a pressão tem que ser aplicada durante toda a soldagem com o intuito de promover a proximidade entre as superfícies dos laminados possibilitando, assim, a difusão molecular na interface entre as partes a serem unidas (HOU et al, 1999; YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; AGEORGES; YE, 2001; DA COSTA, 2012; WISE, 1999). A Figura 8 ilustra o ciclo típico para soldagem de compósitos termoplásticos

Figura 8- Ciclo de soldagem típico para compósitos termoplásticos.



Fonte: (DA COSTA 2012).

2.8 DESEMPENHO EM SERVIÇO

Os compósitos poliméricos estruturais, quando colocados em serviço, estão expostos a uma série de esforços mecânicos que podem causar danos irreversíveis (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009; NOHARA, 2005). Tratando-se de estruturas laminadas fabricadas em compósitos para utilização no setor aeronáutico, existe uma série de estudos para avaliação do seu desempenho em serviço. Além de estarem submetidos a uma série de

carregamentos mecânicos, estes estarão expostos a severas condições ambientais. Os principais fatores ambientais que podem afetar o desempenho dos compósitos em aplicações na área aeronáutica são: a umidade; temperaturas elevadas; fluidos corrosivos e radiação ultravioleta. Estes fatores não somente limitam as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos estruturais, mas também causam a deterioração destes materiais ao longo do tempo de exposição. Este fato ocorre devido à perda de adesão entre a fibra e a matriz ou também pela degradação química do polímero constituinte do compósito (CÂNDIDO; ALMEIDA; REZENDE, 2000; BATISTA; BOTELHO, 2009).

As propriedades elásticas dos materiais compósitos podem ser determinadas por testes mecânicos dinâmicos e estáticos e seu valor geralmente encontra-se relacionado, principalmente, à presença de elementos de reforço nestes materiais. As tensões mecânicas são originadas dos esforços que atuam na estrutura do material, podendo ser estes de tração, compressão e cisalhamento. Estas tensões mecânicas são originadas dos esforços que agem na estrutura. Ainda, de acordo com a literatura (SILVA; REZENDE, 2003; RIBEIRO et al, 2009; SILVA et al, 2011), em aplicações aeronáuticas, os componentes estruturais podem ser submetidos tanto a esforços mecânicos quanto a ciclos de variação de temperatura. Nos compósitos poliméricos, repetitivos ciclos de variação de temperatura podem resultar no desenvolvimento de fadiga térmica do laminado, devido à diferença do coeficiente de expansão térmica existente entre a matriz e as fibras de reforço, ao nível microscópico, e também devido à diferença no coeficiente de expansão térmica existente entre camadas adjacentes, quando empilhadas em diferentes orientações.

A ação conjunta de todos estes fatores no comportamento e durabilidade dos compósitos é um fenômeno bastante complexo que ocorre a nível molecular. O estudo deste fenômeno e a moldagem do comportamento resultante são tarefas cruciais para a determinação da vida útil e segurança das estruturas produzidas em material compósito (NOGUEIRA, 2004).

2.8.1 Falha e Fratura

O processo de fratura de materiais compósitos de elevado desempenho estrutural é relativamente complexo, pois envolve a manifestação de mecanismo de dano intralaminar e/ou mecanismo de dano interlaminar. A identificação dos aspectos observados na topologia da superfície de fratura para revelar as informações sobre o modo de falha, direção de propagação da falha e possível influência das condições ambientais, dependendo da situação

em que a fratura foi produzida, é difícil podendo conduzir a interpretações equivocadas. Além disso, as características da topologia da superfície de fratura dos compósitos dependem de vários e diferentes fatores, tais como a situação do meio em que foi produzida, configuração do material utilizado no processo de fabricação, plano de falha atuante na microestrutura, tipo e natureza do carregamento mecânico imposto ao laminado (CÂNDIDO et al., 2012).

Em relação à isotropia dos materiais compósitos poliméricos, a distribuição de tensões na ponta de uma trinca no material compósito depende das suas propriedades elásticas e da orientação da trinca em relação aos eixos de simetria do material. Ainda, que o aumento das tensões geradas pela solicitação mecânica possa ocorrer, neste local, uma concentração de tensão faz surgir uma microtrinca e, ao mesmo tempo, provocar sua propagação. Em compósitos poliméricos com reforço na forma contínua, a falha pode ser dividida em três tipos básicos: intralaminar, interlaminar e translaminar, às quais mostram o plano de fratura em relação aos constituintes microestruturais do material (MARINUCCI, 2011; DE MOURA, 2005; MORAIS; MAGALHÃES, 2005).

A delaminação ou modo de fratura interlaminar é o mecanismo de dano interlaminar que se manifesta com maior potencial e é um fator limitante da vida útil de um componente estrutural aeronáutico. Este tipo de dano pode ser introduzido durante o processo de fabricação do compósito ou ocorrer durante a vida em serviço do componente. Normalmente, a formação do dano é influenciada pelo estado tridimensional de tensões interlaminares que se desenvolve na vizinhança da borda livre do laminado ou produzida por carregamento acidental de baixa velocidade de impacto na superfície do componente (CÂNDIDO, et al., 2012).

Uma das ferramentas essenciais desenvolvida para obter informações e compreender como sucede o processo de falha nos compósitos é a fractografia. Essa ferramenta consiste em identificar os aspectos fractográficos impressos na topologia da superfície de fratura e estabelecer as relações entre a presença ou ausência desses aspectos com a sequência de eventos da fratura, podendo levar à determinação do carregamento e condições dos esforços no momento da falha. A fractografia confirma ou remove as suspeitas que possam recair sobre os modos de falha ocorridos. As técnicas fractográficas podem ser empregadas no estudo sistemático dos micromecanismos da fratura de amostras padronizadas submetidas à caracterização experimental, falhas de subcomponentes estruturais testados em laboratórios e na análise “post-mortem” de componentes ou estruturas que falham em serviço, especificamente na investigação de acidentes aeronáuticos. O procedimento da análise utiliza a inspeção visual inicial e a óptica macroscópica, seguida da microscópica óptica,

microscópica eletrônica de varredura e, em alguns casos, microscópica eletrônica de transmissão. A análise deve atentar não somente para a identificação e documentação da superfície de fratura, mas também para as informações que ajudam a determinar as causas da falha e possibilitar o avanço no domínio do entendimento e confiança no comportamento estrutural do sistema compósito (BOTELHO; REZENDE, 2002b; CÂNDIDO et al., 2012)

Em todos os estágios da vida de um compósito, o estudo sistemático da microestrutura e da superfície de fratura, por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, proporciona informações essenciais sobre a qualidade do material, o processo de fabricação, os micromecanismos de propagação de dano, as causas de falhas em amostras, subcomponentes ou componentes, em apoio aos processos de qualificação, certificação e desenvolvimento de modelos analíticos e análise de falhas de componentes em serviço. Em sendo assim, o uso da análise fractográfica está aumentando continuamente e tem sido reconhecida como uma ferramenta de fundamental importância nas interpretações de aspectos da fratura de compósitos estruturais utilizados em aeronaves (SALERNO, 2013; CÂNDIDO et al., 2012).

2.8.1.1 Fratura de juntas poliméricas

A união envolvendo materiais poliméricos tem atualmente um vasto campo de aplicações, que envolve setores de embalagens até a indústria aeronáutica. Entre as principais vantagens das juntas coladas, pode-se citar:

- a elevada resistência mecânica, se a junta for bem concebida;
- economia de peso e no número de peças em relação às ligações parafusadas e rebitadas;
- minimização de problemas de corrosão, sobretudo nas ligações de materiais diferentes;
- capacidade de vedação e de isolamento térmico;
- amortecimento de vibrações, devido ao comportamento viscoelástico das colas;
- boa resistência à fadiga, para a qual contribuem fortemente a ausência de furos e do respectivo efeito de concentração de tensões;
- boa aparência estética;
- o fato de ser, frequentemente, a opção mais econômica dentre as disponíveis (PEREIRA, 2002).

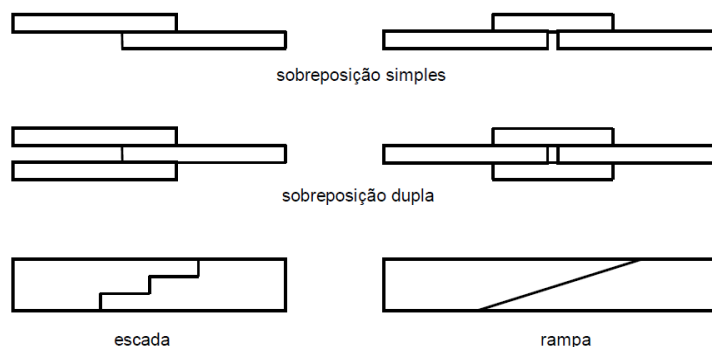
As juntas coladas são particularmente interessantes para unir materiais avançados de alta resistência, como é o caso dos compósitos de matriz polimérica (MEI; CHUNG, 2000 BRITO JÚNIOR, 2007).

As uniões rebitadas e parafusadas alternativas são muito menos eficientes do que nos materiais metálicos, devido à baixa ductilidade e à fraca resistência ao esmagamento dos compósitos. Porém, as juntas coladas apresentam várias limitações, dentre estas podem ser citadas:

- as dificuldades atuais no projeto rigoroso das juntas, que conduzem à adoção de métodos empíricos ou de processos de cálculo bastante conservadores;
- sensibilidade a cargas de clivagem;
- necessidade de procedimentos de limpeza e de preparação das superfícies;
- o tempo que pode ser necessário para desenvolver a resistência (tempo de cura para matrizes termorrígidas);
- dificuldades associadas aos processos de inspeção;
- impossibilidade de desmontagem sem destruição da junta;
- elevada sensibilidade à exposição ambiental (temperatura, humidade, radiação UV, etc.) e à fluência.

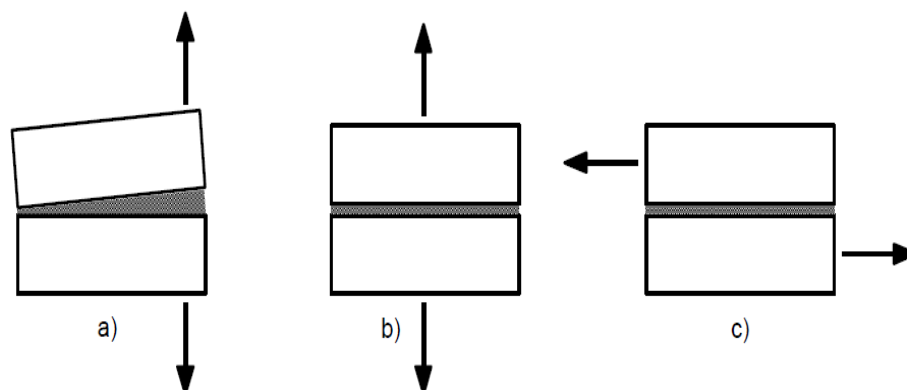
A Figura 9 apresenta os principais tipos de juntas coladas. Atualmente, as mais utilizadas são as juntas das sobreposições simples e dupla. As juntas em escada e em rampa têm elevado desempenho e aplicam-se, sobretudo, na aeronáutica para peças de materiais compósitos com uma espessura relativamente elevada (acima de 5 mm). Os custos associados à fabricação destas juntas são bastante superiores aos custos das juntas de sobreposição (PEREIRA, 2002). Em relação às solicitações mecânicas, as junções poliméricas podem ser configuradas de três formas principais como ilustra a Figura 10.

Figura 9 - Junções poliméricas mais comuns de utilização.



Fonte: (PEREIRA, 2002).

Figura 10 - Modos de solicitações de junções poliméricas: a) clivagem; b) tração; c) corte.



Fonte: (ADAMS, 1987).

2.9 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

A soldagem por resistência elétrica, também conhecida por eletrofusão, fusão por resistência elétrica ou soldagem por implante de elemento resistivo, vem sendo amplamente aplicada em metais e, nos últimos anos, passou a ser utilizada também em compósitos com aplicações aeronáuticas. No entanto, os métodos de inspeção da solda, não acompanharam o ritmo de desenvolvimento da técnica em si. Atualmente, os mesmos métodos que vem sendo utilizados para testes convencionais de adesão são utilizados para avaliar a resistência e a qualidade das soldas (AMANCIO, 2011; DA COSTA et al., 2012).

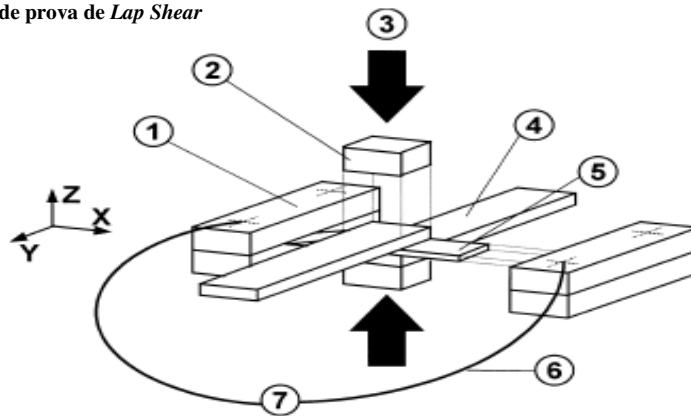
Além da realização de ensaios mecânicos, várias alternativas e métodos de avaliação são utilizados para a aquisição de mais informações sobre a qualidade de juntas soldadas de materiais compósitos. Dentre estes, dois conjuntos gerais de métodos de ensaio podem ser distinguidos: ensaios mecânicos e técnicas de avaliação por análises térmicas e ensaios morfológicos. No primeiro conjunto dois métodos são amplamente utilizados e descritos na literatura, sendo estes: teste de *Lap Shear* e teste de resistência ao cisalhamento DCB (STAVROV; BERSEE, 2005). O segundo conjunto é composto por vários métodos alternativos de avaliação normalmente utilizados para estudar a qualidade do interior do material tais como: DSC (calorimetria exploratória diferencial); técnicas de microscopia e ultrassom (DUBÉ, et al 2007; ROJEK; STABOK; WRÓBEL, 2005).

O teste de cisalhamento *Lap Shear* (Figura 11 a) têm como principal vantagem ser um método muito simples, e com geometria adequada para avaliação e otimização da

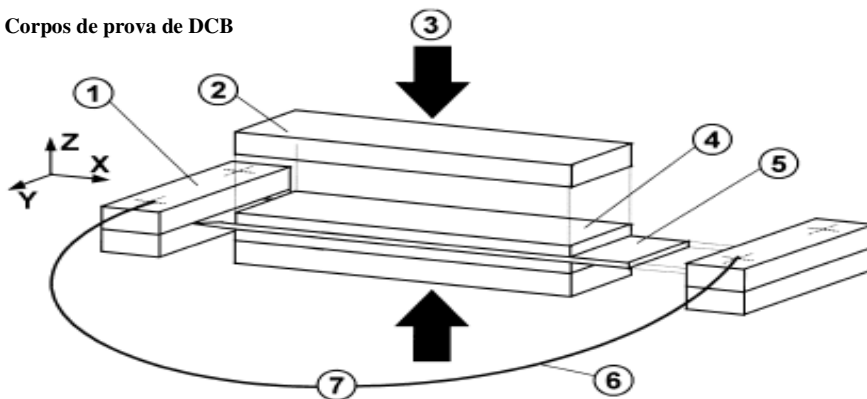
soldagem por resistência. No entanto, uma vez que a soldagem por resistência para compósitos deve ser um processo para aplicações na indústria aeroespacial, é necessário que a geometria da amostra represente uma típica estrutura aeroespacial, a fim de melhor representar os casos de carregamento em uma situação real. Desta forma, uma avaliação mais detalhada do material soldado em situação de serviço é recomendada pela literatura (AGEORGES et al., 1998; DUBÉ et al., 2007; STAVROV; BERSEE, 2004; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004)

Figura 11- Geometrias utilizadas para avaliação da soldagem de compósitos para ensaios: a) Lap Shear b) DCB

a) Corpos de prova de *Lap Shear*



b) Corpos de prova de DCB



1- Braçadeira de Bronze

2- Material Isolante

3- Pressão de soldagem

4- Laminado

5- Elemento resistivo (de aquecimento)

6- Fio elétrico

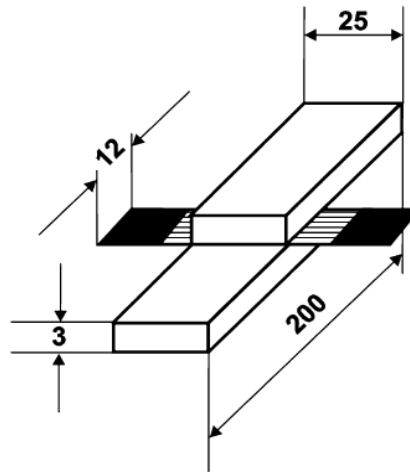
7- Fonte de alimentação

Fonte: (AGEORGES; YE; HOU, 2000)

2.9.1 Lap Shear

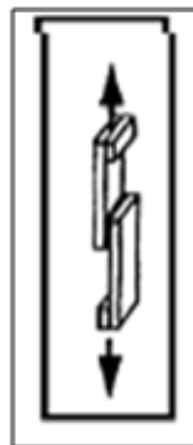
O teste de *Lap Shear* (LSS) consiste em um importante método para avaliar a resistência ao cisalhamento de compósitos e este vem sendo o método mais comumente utilizado para investigar a eficiência de superfícies soldadas por resistência elétrica para materiais compósitos. Trata-se de um teste envolvendo solicitações de tração longitudinal da amostra soldada até a ruptura. Este teste costuma ser realizado seguindo a norma ASTM D 1002. O detalhamento das dimensões dos corpos de prova e o desenho esquemático do ensaio de *Lap Shear* são apresentados nas Figuras 12 e 13

Figura 12- Dimensões em milímetros dos corpos de prova utilizados para testes de *Lap Shear* de juntas soldadas.



Fonte: (STAVROV e BERSEE, 2004).

Figura 13-Desenho esquemático do ensaio de *Lap Shear*.



Fonte: (AGEORGES; YE, 2001).

2.10 FATORES DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA MATERIAIS COMPÓSITOS

Há uma série de fatores que podem afetar o processo de soldagem por resistência elétrica como pode ser observado no Quadro 2, sendo estes classificados como “condições de contorno” e “parâmetros do processo”. O primeiro apresenta as condições de partida e as decisões a serem tomadas antes da conclusão de uma solda. Uma vez concluído essa etapa, os parâmetros do processo, cuja gama de variação é determinada pelas condições de contorno, permitem modificar a qualidade final da estrutura soldada (STAVROV; BERSEE, 2005).

Quadro 2 - Fatores que afetam o processo de soldagem.

Condições de contorno	▪ Natureza do material do substrato ➡ preparação de superfície. ▪ Natureza do agente de aquecimento. ▪ Dimensões da área a ser soldada. ▪ Método para aplicação de corrente elétrica. ▪ Método para aplicação de pressão de consolidação.
Parâmetros do processo	▪ Pressão de consolidação. ▪ Intensidade de corrente ➡ aliada com a temperatura do processo. ▪ Tempo de soldagem.

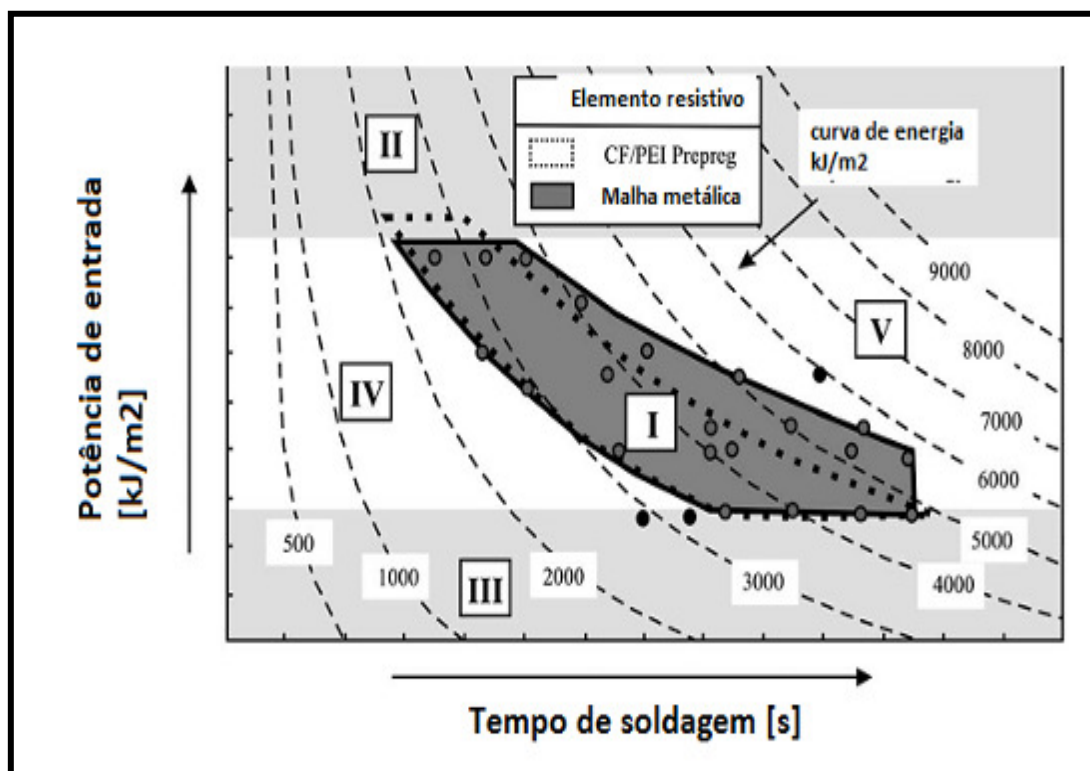
Fonte: (STAVROV; BERSEE, 2005).

De acordo com a literatura, 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 consequentemente 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 (DA COSTA, 2011).

Para a obtenção do intervalo dos parâmetros, os corpos de prova primeiramente devem ser soldados utilizando a combinação mínima de valores, a qual deve ser diferente para cada compósito estudado (AGEORGES et al., 1998a; DUBE et al., 2012). Várias combinações de

parâmetros que conduzem à realização da soldagem com propriedades aceitáveis são apresentados como uma forma de janela de processamento. Um exemplo típico de uma janela de processamento para a soldagem de compósitos PEI/fibra de carbono é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Janela de processamento típico de solda por resistência



Fonte: (HOU, 1999)

O comportamento deste diagrama pode ser dividido em cinco regiões: a região I é a janela de processamento, neste caso, amostras soldadas nos ajustes do processo nesta região deve sempre produzir soldas com boas características, cada linha de fronteira divide a janela de processamento das outras quatro regiões onde soldagens aceitáveis não podem ser alcançadas; as regiões II e III que se encontram acima e abaixo da janela de processamento onde: os níveis de energia dessas regiões causam a deterioração da matriz (região II) ou as perdas de calor excessivas para o material (Região III) levam à soldagem incompleta e articulações fracas; as regiões IV e V encontram-se dentro do intervalo aceitável para a alimentação, porém, estes parâmetros resultam em soldagens com tempos ineficientes, resultando em compósitos com delaminações. Enquanto que na região IV, do diagrama da Figura 14, o tempo de soldagem é demasiado curto e a entrada de energia não é suficiente

para uma solda completa ser alcançada, na região V ocorre uma soldagem em um tempo muito longo, resultando em fusão excessiva da matriz, causando grande distorção estrutural e instável geometria do corpo de prova soldado (HOU, 2006).

2.10.1 Elementos resistivos

O elemento resistivo, condutor ou de aquecimento como encontrado por definições da literatura é considerado a “chave” de todo o processo de soldagem por resistência elétrica para compósitos. Este é essencial para transmitir a energia necessária para a soldagem de materiais compósitos, sendo que este não é removido dos materiais unidos depois da solda, tornando-se, assim, um constituinte do compósito final (DUBE et al., 2012; HOU, 1999; STAVROV; BERSEE, 2005)

De acordo com a equação (2), pode ser observado que a resistência do elemento aquecedor é proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional a sua largura:

$$R = \gamma \cdot L / W \quad [\Omega] \quad (2)$$

Sendo:

R = resistência do elemento aquecedor, (Ω);

γ = resistividade específica do material (Ω);

L = comprimento do elemento resistivo (m);

W = largura do elemento resistivo (m).

Genericamente, para o processo de soldagem por resistência, muitos materiais condutores de eletricidade podem ser utilizados como elementos de aquecimento, entretanto, somente dois materiais são descritos na literatura: as fibras de carbono e a malha metálica de aço inoxidável. A fibra de carbono tem sido muito utilizada e estudada como elemento resistivo devido à sua elevada condutividade elétrica associada ao fato desta já estar presente em compósitos constituídos de fibras de carbono como reforço. No entanto, a utilização de malhas metálicas como elemento resistivo, oferece vantagens à soldagem quando comparadas com as fibras de carbono que vão desde custo mais acessível até a possibilidade de maior transmissão de energia durante o processo. Por outro lado, a implantação do metal nos materiais a serem soldados pode causar contaminação e maior possibilidade de criação de

pontos de corrosão, especialmente em compósitos constituídos de polímeros semicristalinos ((AGEORGES; YE; HOU, 2000).

O fato do elemento de aquecimento permanecer na junta após a soldagem faz com que o elemento de aquecimento de fibra de carbono seja mais adequado no sentido de permitir maior compatibilidade com os laminados, principalmente se estes forem constituídos de fibra de carbono(STAVROV; BERSEE, 2003).

Diversos estudos foram concluídos baseando-se no fato de que laminados de PEI reforçados por fibras contínuas de carbono ou de vidro podem ser satisfatoriamente soldados usando como elemento de aquecimento a malha de aço inoxidável. Porém, existem poucos trabalhos na literatura abordando uma avaliação criteriosa sobre qual tipo de malha (100, 200, 300 mesh, etc.) é a mais adequada para um determinado processo de soldagem, sendo esta uma das inovações desta tese de doutorado.

As análises de fratura nestes estudos mostraram-se muito satisfatórias em relação ao processo de união entre a malha metálica e a matriz de polímero (HOU et al., 1999). A soldagem por resistência utilizando malha de aço inoxidável como elemento resistivo é geralmente de fácil execução, quando comparada a utilização de fibra de carbono para esta finalidade, produzindo soldas com melhor consistência e mais resistentes (HOU; YE; MAI, 1999; STAVROV; BERSEE, 2003).

Em relação aos problemas relacionados à utilização da malha metálica há também a questão da penalidade de peso e de diferenças do coeficiente de expansão térmica dos constituintes do compósito e do elemento resistivo, assim como a questão da susceptibilidade à corrosão, especialmente quando é utilizada malha de metal com matrizes termoplásticas. Nestes casos, o implante metálico pode comprometer a resistência à corrosão do compósito e um cuidado especial deve ser tomado para o conjunto soldado na aplicação em que pode ocorrer influência corrosiva do ambiente (AGEORGES; YE; HOU, 2000; STAVROV; BERSEE, 2005).

2.10.2 Potência e energia de entrada

O nível de potência é amplamente considerado como o parâmetro mais importante para um processo de soldagem por resistência. Também conhecido como densidade de potência, este representa energia por unidade de área e pode ser calculado segundo a equação 3, na soldagem por resistência elétrica.

$$P = \frac{I^2 \cdot R}{L \cdot W} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

onde: I corresponde a corrente elétrica para o aquecimento do elemento (A), R representa a resistência do elemento de aquecimento (Ω); L representa o comprimento da zona soldada (m); e w , a largura da zona soldada (m). Esta densidade de potência multiplicada pelo tempo durante a qual a corrente está passando pelo circuito, resulta em rendimentos de entrada de energia para a soldagem, podendo este ser calculado a partir da equação 4.

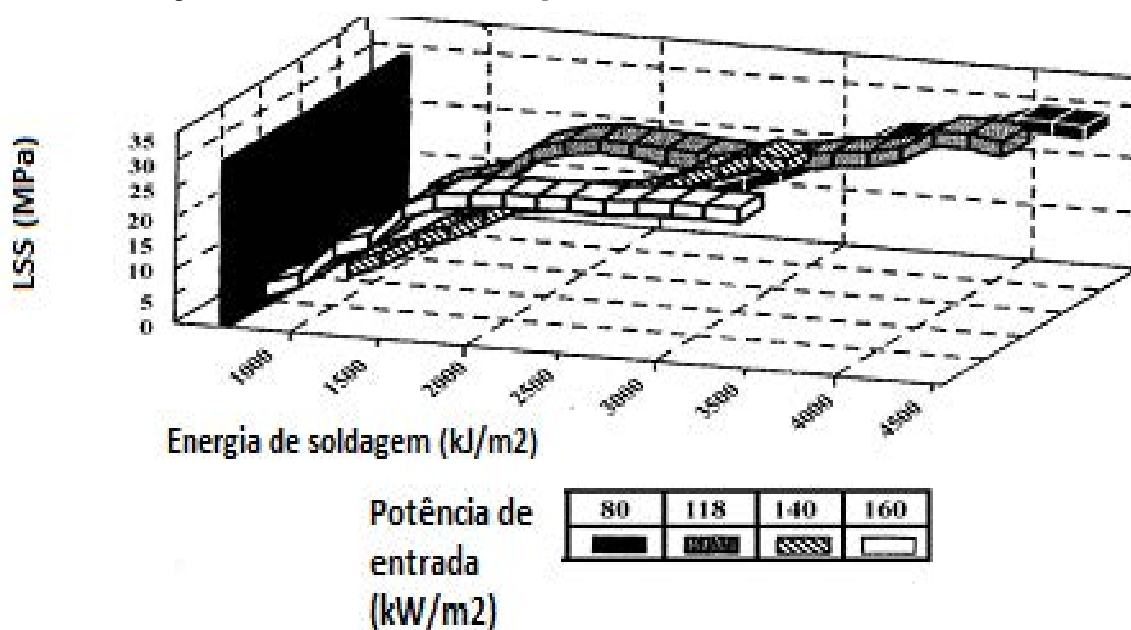
$$E = P \cdot t \left[\frac{kJ}{m^2} \right] \quad (4)$$

Onde: P representa o nível de potência (W/m^2); e t o tempo de corrente elétrica (s). Estes dois parâmetros combinados governam o processo e determinam a qualidade e a resistência da soldagem. Embora para cada situação de soldagem com compósitos com diferentes tipos de materiais e elementos de aquecimento sejam utilizadas faixas de potência diferentes, estes valores são tipicamente distribuídos em três grupos: baixa potência ($10-75 \text{ kW/m}^2$), potência intermediária ($75-130 \text{ kW/m}^2$) e alto nível de potência (valores superiores a 130 kW/m^2). Entretanto, os processos atuais de soldagem combinam níveis de energia com tempo de aplicação da mesma, podendo-se diferenciar dois casos típicos: 1) baixo nível de energia associado aos tempos mais elevados de aplicação; 2) elevada potência e baixo tempo de aplicação. No primeiro caso, um nível de baixa potência aplicado durante tempos longos de soldagem resulta em perdas excessivas de calor do material, enquanto que o segundo caso, um alto nível de energia aplicada durante um curto período de tempo de soldagem produz gradientes de altas temperaturas na interface da solda. Ambos os fenômenos determinam níveis mínimos e máximos de potência que podem ser aplicados ao processo de soldagem. Quando o nível de energia é muito baixo, a quantidade de entrada de energia que é direcionada para o interior do material é exageradamente grande, resultando em baixa temperatura na junta e a soldagem não acontece. Por outro lado, quando o nível de energia é muito elevado, a matriz nas extremidades da amostra começa a deteriorar-se antes da

finalização do processo de soldagem. Ambos os casos resultam em juntas de qualidades da soldagem inferiores. Experimentos de soldagem para investigar a influência dos níveis de potência e energia de entrada do processo devem ser realizados no intervalo entre esses dois níveis de contorno de referência, que são determinados antecipadamente por meio de estudos experimentais (STAVROV; BERSEE, 2005).

O efeito do nível de potência e de energia de entrada pode ser determinado pelo monitoramento de resultados provenientes de ensaios por *Lap Shear* e outros métodos de avaliação de falhas das juntas soldadas. Um estudo da influência da resistência ao cisalhamento de amostras soldadas de compósitos PEI/fibra de carbono em quatro diferentes níveis de potência como uma função da energia de entrada (tempo) foram investigadas (AGEORGES et al., 1998a; HOU, 1999, 2006). Os resultados deste estudo são apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Efeito de potência de entrada em teste de *Lap Shear*.



Fonte: (HOU, 1999).

A partir deste estudo, duas tendências gerais podem ser identificadas: os valores maiores de energia necessários para os maiores valores de ruptura pelo ensaio de *Lap Shear* (LSS), são alcançados utilizando-se valores menores de potência de entrada. A primeira e segunda tendências encontram-se de acordo com a discussão anterior sobre os níveis de potência. A segunda tendência mostra que em níveis mais baixos de energia, a quantidade de calor perdido no interior do material e o ambiente é muito maior, pois a taxa de aquecimento

(gradiente de temperatura) da interface é inferior. Isto significa que mais tempo de soldagem (entrada de energia superior) é necessário para fundir a mesma quantidade de matriz na interface (HOU; FRIEDRICH, 1992).

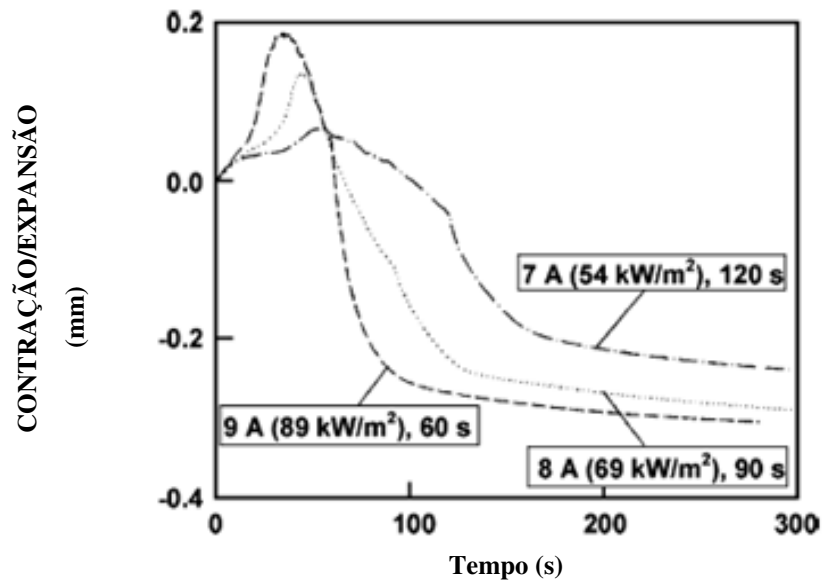
2.10.3 Pressão de soldagem

O controle de aplicação da pressão é outro fator importante para qualidade da soldagem pelo processo de resistência elétrica, uma vez que a pressão deve ser constantemente aplicada durante a soldagem para promover o essencial contato entre as peças e prevenir a separação da junta durante o tempo de aquecimento. A compressão sofrida pelas peças a serem soldadas por meio dos eletrodos é de vital importância para garantir a boa qualidade da solda, pois esta afeta a resistência da face de contato entre os materiais e, como consequência, do calor gerado. Decrescendo a resistência aumenta-se a intensidade de corrente (considerando a tensão constante) e aumenta o aquecimento produzido. Entretanto, decrescendo a pressão ou a força nos eletrodos, também aumenta o aquecimento na face dos eletrodos podendo resultar em um desgaste excessivo dos mesmos (WAINER; BRANDI; DE MELO, 2008).

Os valores de pressão de compactação obtidos por alguns estudos (AGEORGES; YE, 2002; YOSEPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON 2004; STAVROV; BERSEE, 2005) situam-se na faixa de 0,5 a 1,5 MPa e tem a função de promover o fluxo da resina fundida durante o processo. A soldagem por resistência sob uma pressão constante em um polímero amorfo PEI foi estudada por AGEORGES, YE e HOU (2000); o registro de pico em relação à contração do material produz a curva de pressão de soldagem, apresentada na Figura 16 para diferentes níveis de potência.

A expansão térmica e as contrações volumétricas causadas a partir da compressão da matriz com a passagem do fluxo de calor são dois fenômenos dominantes durante a soldagem. Este fenômeno causa a variação de espessura da amostra soldada que ocorre como resultado dos processos associados de compressão e aquecimento. Ainda, a partir deste estudo, pode-se observar que não houve nenhuma fase inicial de contração, somente de expansão volumétrica, porém, após um determinado tempo e devido à pressão aplicada constantemente, foi observada uma contração que permaneceu com comportamento constante em todas as faixas estudadas de valores de corrente (AGEORGES; YE; HOU, 2001; AHMED et al., 2006).

Figura 16 - Curvas de soldagem de compósito de fibra de carbono / PEI soldadas sob pressão constante.



Fonte: (AGEORGES; YE , 2000).

2.10.4 Calor e temperatura

De acordo com a literatura, a transferência de calor uniforme em uma junta soldada e a distribuição homogênea de temperatura, é essencial para obtenção do melhor desempenho e qualidade da soldagem (DA COSTA et al., 2012; DUBE et al., 2012; DUBÉ et al., 2007; PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012).

As taxas de aquecimento podem influenciar significativamente no processo de soldagem, enquanto que as taxas de resfriamento tem um impacto substancial sobre a cristalinidade e na rigidez, especialmente quando termoplásticos semicristalinos estão envolvidos. A geração de calor a partir do elemento de aquecimento como citado segue a lei de Joule (equação 1). O aumento da temperatura para um corpo de prova adiabático pode ser expresso a partir da equação 5 (STAVROV; BERSEE, 2005).

$$\Delta T = \frac{E}{cp.m} \quad (5)$$

Onde: E é a entrada de energia (J); cp , calor específico (J/g.°C); e m a massa de um elemento de aquecimento (kg). A equação evidencia que a variação de temperatura depende linearmente da energia de entrada no sistema de soldagem.

O resfriamento é um dos fatores que podem afetar diretamente as propriedades dos materiais poliméricos no final da soldagem. O aumento das perdas de calor em uma transformação adiabática, com altos níveis de taxas de resfriamento podem causar tensões residuais e, conseqüentemente, empenamento. Este aumento de perdas de calor também pode afetar a cristalinidade em casos onde são utilizados materiais termoplásticos semicristalinos. Portanto, taxas de resfriamento que resultam de níveis intermediários de potência também são geralmente recomendadas para levar a cristalinidade a um grau aceitável (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

As medições de temperatura são normalmente realizadas de forma transiente usando termopares incorporados nas amostras a serem soldada. Esta obtenção de dados confiáveis de medições de temperatura durante a soldagem, encontra-se ligada a um certo número de dificuldades operacionais como a corrente elétrica no elemento de aquecimento interferindo na medida de temperatura das amostras. O termopar eletricamente isolado é uma solução podendo ser feito, colocando-o entre a primeira e segunda camada no interior do laminado ou cobrindo-o com uma película isolante separando o termopar do elemento resistivo (AGEORGES; YE; HOU, 2000; AHMED et al., 2008; DUBE et al., 2012).

2.11 ESTUDOS DE CASOS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS

Investigações recentes de soldagem de compósitos termoplásticos por resistência elétrica incluem trabalhos experimentais e de modelagem. A maioria dos trabalhos de soldagem de compósitos por resistência elétrica encontrados em literatura apresentam soluções quanto à transferência de calor e análises de consolidação associadas à cristalização de matrizes termoplásticas (MEHDI; IMMARIGEON, 2004; PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; HAQ, 2012), enquanto que os trabalhos experimentais investigam os efeitos dos parâmetros e melhores condições de soldagem (DUBE et al., 2012; NINO et al., 2009).

A maioria dos estudos relacionados ao processo de solda por resistência elétrica em relação a vários tipos de materiais compósitos vem sendo desenvolvidos principalmente para aplicações na área aeroespacial. Nas duas últimas décadas, constatou-se que o material mais

investigado para estas aplicações foi o compósito poli(éter-cetona) (PEEK)/fibra de carbono (AGEORGES; YE; HOU, 2001; AGEORGES; YE, 2001b; AGEORGES et al., 1998b; DUBÉ et al., 2007, 2008).

Atualmente, compósitos de PEI (poli(éter-imida)) reforçados com fibras de vidro e de carbono tem despertado grande interesse entre os pesquisadores devido à sua aplicação em peças de aeronaves (AGEORGES; YE; HOU, 2000, 2001; AGEORGES; YE, 2001a; AGEORGES et al., 1998a; DUBE et al., 2012; HOU, 2006). Dentre estes trabalhos foi constatado o estudo de diferentes tipos de elementos de aquecimento, laminados de compósitos e condições de soldagem.

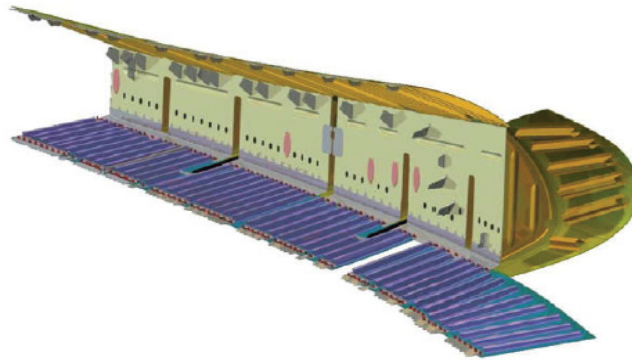
A Tabela 2 relaciona alguns processos de soldagem por resistência elétrica para compósitos termoplásticos, nos quais pode ser verificada a influência de diversas variáveis em que a qualidade da junta soldada é dependente, por exemplo, da corrente elétrica, do tempo, da temperatura, da potência de entrada, e do tipo de elemento resistivo utilizado.

A partir dos resultados provenientes na Tabela 2, é possível verificar que valores elevados de energia de soldagem geram maiores valores de resistência por *Lap Shear* das juntas soldadas, identificados pelos valores de corrente elétrica ou potência de entrada (AGEORGES; YE, 2001b; DUBÉ et al., 2007; HOU, 1999).

Também pode ser observado, a partir de uma análise da Tabela 2, que a utilização de energia mais elevada combinada com o elemento resistivo constituído de malha metálica e de menor diâmetro de fio contribui para o valor máximo de 47 MPa registrado no ensaio de *Lap Shear* (DUBÉ, 2011).

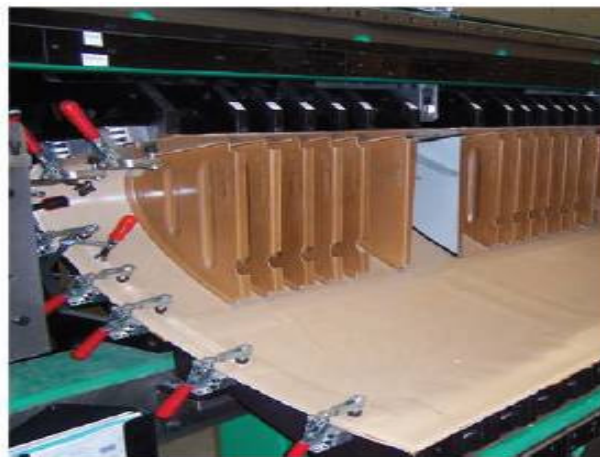
Baseando-se nestes estudos, (NINO et al, 2009) demonstraram o potencial desta técnica para aplicação em compósitos termoplásticos em escala industrial. Estes autores utilizam o processo de soldagem por resistência para a produção de componentes das aeronaves da Airbus A340 e A380, como ilustrado nas Figuras 17 e 18.

Figura 17- Desenho da parte frontal de compósitos termoplásticos soldados para componentes das aeronaves da Airbus A340 e A380.



Fonte: (NINO et al, 2009).

Figura 18- Detalhe da soldagem por resistência elétrica para montagem da peça frontal dos termoplásticos soldados para componentes das aeronaves da Airbus A340 e A380.



Fonte: (NINO et al, 2009).

Na busca de maiores valores de resistência à ruptura adquiridos por ensaios de *Lap Shear* destacam-se alguns trabalhos utilizando laminados de fibra de carbono com matriz de PEEK (poliéter–cetona) e PPS (polisulfeto de fenileno)(AGEORGES et al., 1998a; DUBÉ et al., 2008; MARQUES et al., 2010).

Com a utilização de malha de aço Inox como elemento resistivo, chegou-se a valores de forças de cisalhamento de até 50 MPa para compósitos APC-2/AS4 (CF/PEEK) (PANNEERSELVAN; ARAVINDAN; HAQ, 2012).

Tabela 2- Trabalhos desenvolvidos com soldagem por resistência elétrica para compósitos termoplásticos de matriz PEI.

Materiais	Elemento de Aquecimento	Potência de entrada (KW/m ²)	Condições utilizadas de processamento			Lap Shear (MPa)	Referência
			Corrente (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)		
Fibra de Carbono/ PEI	Malha Metálica com diâmetro de 25µm e abertura de 30 µm	100	30 a 32	0,2	40	34,46	HOU, 1999
Fibra de Carbono/PEI	Alumínio/prepreg PEI unidirecional	69	*ni	0,5	90	24	AGEORGES, YE e HOU, 2000
Fibra de Carbono/PEI com Fibra de Carbono/Epóxi	Fibra de carbono recoberta com filme de PEI	*ni	6,1	0,4	120	20	AGEORGES ; YE, 2001
PEI/ Fibra de carbono	Malha metálica	54	*ni	0,6-0,9	80	17,8	SIERKSMA, 2002
PEI/ Fibra de Vidro	Malha metálica	50- 140	*ni	0,6-0,9	*ni	24	STRAVROV; BERSEE, 2004
PEI/ Fibra de Carbono	Malha metálica com 0,2 mm de diâmetro e abertura de 0,86mm	80-90	*ni	0,8	50-90	30	NINO et al, 2009
PEI/Fibra de Carbono	Malha metálica com diâmetro de 0,04mmm e abertura de 0,09mm	35,55	40	1	90	47	DUBÉ et al, 2012
PEI/ Fibra de Vidro						33	
Compósito PEI/ Fibra de carbono e Alumínio 7075-T6	Filme de PEI+fibra de vidro e fibra de carbono prepreg	90	8,7	0,4	600	25	AGEORGES ; YE 2001

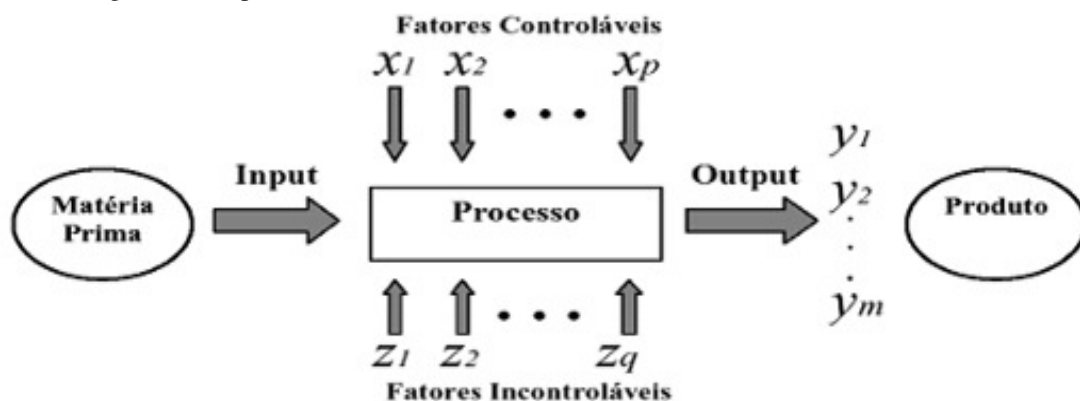
*ni- não informado

2.12 MÉTODO ESTATÍSTICO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

Há diversos caminhos para se atingir o objetivo da melhoria de um processo com a utilização da estatística, mais precisamente, pode-se realizá-lo a partir de um planejamento experimental. Para este propósito, é necessário conhecer, principalmente, o número de variáveis independentes a serem estudadas em relação a uma variável resposta, inicialmente se tratando em aplicação de trabalhos de pesquisa ou mesmo em processos industriais (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Os experimentos são utilizados para estudar o desempenho de processos e sistemas. Desta forma, o processo conforme apresentado na Figura 19, definido como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transforma um material de entrada em um produto de saída, onde este pode possuir uma ou mais respostas. Algumas variáveis do processo são controláveis enquanto outras não, embora estas possam ser controláveis para efeito de teste. Na maioria das situações, os fatores não controláveis são chamados de ruído (MONTGOMERY, 2005).

Figura 19- Modelo geral de um processo ou sistema.



Fonte: (MONTGOMERY, 2005).

O planejamento experimental *Design of Experiments* (DOE), é uma ferramenta essencial dentro da engenharia no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização sendo o principal objetivo a otimização. O Quadro 3 apresenta, de maneira resumida, as principais características relacionadas a cada uma destas técnicas de planejamento experimental. As técnicas mais utilizadas no projeto e análise de experimentos

são o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, o Método de Taguchi e a Metodologia da Superfície de Resposta.

Quadro 3 - Características fundamentais das principais técnicas do projeto e análise de experimentos (NILO JÚNIOR, 2003).

Planejamento Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
Fatorial Completo 2^K	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores com os respectivos níveis.	Não identifica variações intermediárias, pois considera 2 níveis.	Em processos onde há o domínio prévio e a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(K-1)}$	Permite uma pré análise do processo com número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região.	Corridas que demandam maior tempo e maior custo.
Taguchi	Permite a análise de processos que possuem um grande número de variáveis com reduzido número de experimentos.	Fornecer uma ideia do processo, mas com informações dos modelos matemáticos não confiáveis.	Processos que possuam dispersão de dados elevadas.
Metodologia de Superfície de resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Podem provocar erros nas extrapolações pois estes são realizados em menores números de corridas.	Otimização de processo, principalmente naqueles bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: (NILO JÚNIOR, 2003).

2.12.1 Otimização de processos

A partir destas ferramentas estatísticas ainda é possível a elaboração de um modelo matemático que, quando validado estatisticamente, pode ser usado para a obtenção de superfície de resposta e assim pode-se determinar as condições otimizadas de um determinado processo, conhecendo-se as significâncias estatísticas das respostas (RODRIGUES e IEMMA, 2005; NETO; SCARMINIO e BRUNS, 2010).

Em matemática, o termo otimização, ou programação matemática, refere-se ao estudo de problemas em que se busca minimizar ou maximizar uma função a partir da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável. Em

problemas de engenharia, de administração, de logística, de transporte, de economia, de biologia ou de outras ciências, quando se consegue construir modelos matemáticos bastante representativos dos respectivos sistemas dinâmicos em estudo, é possível aplicar as técnicas matemáticas de otimização para maximizar ou minimizar uma função previamente definida como índice de desempenho (ID), ou índice de performance (IP), visando encontrar uma "solução ótima" do problema, isto é, que resulte no melhor desempenho possível do sistema, segundo este critério de desempenho previamente definido (ID). Um problema que envolve otimização de processo, refere-se quando possui um objetivo de resolução por meio de uma função, em que é utilizada para maximizar ou minimizar um valor de uma variável resposta que forneça o desempenho do sistema em estudo. Este problema de otimização pode conter muitas variáveis, sejam estas inteiras, reais, binárias etc, sendo que otimizar consiste em determinação de valores ótimos destas variáveis, ou seja, adquirir faixas em que possam proporcionar o melhor valor da variável resposta de interesse (COLACK; SONMEZ; KALENDERROGLU, 2002). A técnica considerada mais conveniente para otimização de processos é conhecida como Metodologia de superfície de resposta (MSR).

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), de acordo com Montgomery (2005), é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas na modelagem e na análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis, onde o objetivo é a otimização desta resposta. A MSR foi desenvolvida no início da década de 50, sendo aplicada inicialmente na indústria química com considerável sucesso. Nos últimos 20 anos, esta técnica tem sido amplamente aplicada em vários contextos industriais, como na fabricação de semicondutores e de artigos eletrônicos, dentre outros. Esta técnica experimental permite, ainda, a obtenção de modelos matemáticos que, apesar de empíricos, possibilitam o levantamento e a comprovação de hipóteses científicas que buscam explicar relações de causa e efeito entre os resultados experimentais e as variáveis em estudo. Apesar de amplamente utilizada nas últimas décadas, a metodologia de superfície de resposta vem sendo utilizada para estudo de soldagem de compósitos apenas nos últimos anos (PANNEERSELVAM, ARAVINDAN E HAQ, 2012; NETO; SCARNIO; BRUNS, 1995), sendo este tipo de trabalho ainda pouco relatado em literatura.

Para a maioria dos problemas, observa-se que a relação entre as respostas e as variáveis independentes é desconhecida; desta forma, o primeiro passo em MSR é encontrar uma aproximação conveniente para representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo. Geralmente, funções polinomiais são empregadas para descrever tais relações. Portanto, se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis

independentes, a função de aproximação é um modelo de primeira ordem, como mostra a Equação 6 (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (6)$$

Onde: y – Resposta de interesse;

β_i – Coeficientes a serem estimados;

x_i – Variáveis independentes;

k – Número de variáveis independentes;

ε – Erro experimental.

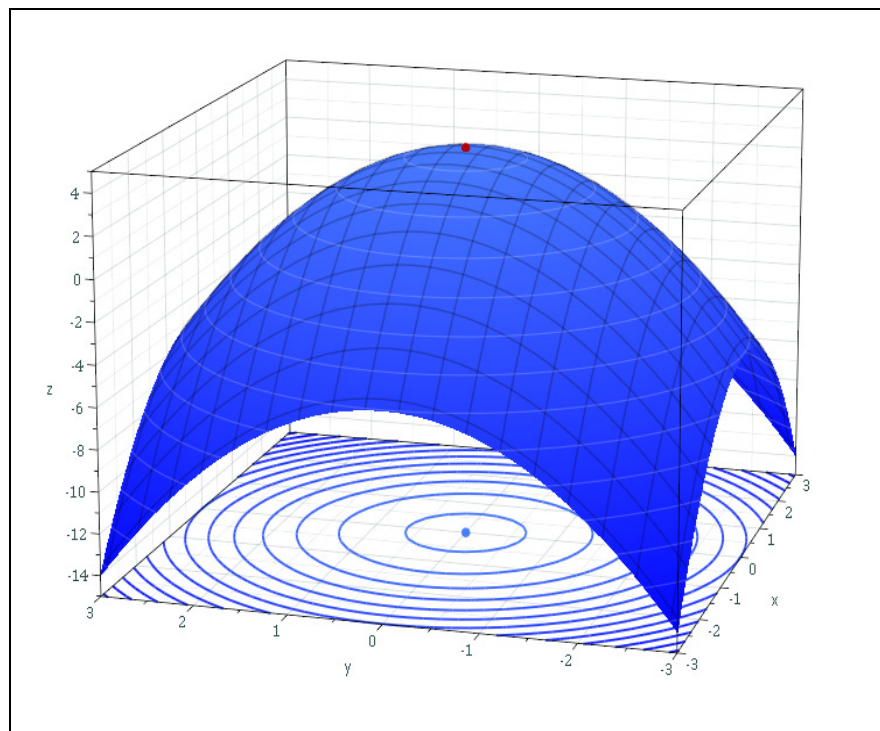
Se há curvatura no sistema, então se utiliza um polinômio de ordem mais elevada, como o apresentado pelo modelo de segunda ordem (Equação 7).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

Muitos problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os polinômios aproximados como indicado nas equações 6 e 7 anteriormente apresentadas. Naturalmente, é improvável que o modelo polinomial seja uma aproximação razoável para todo o espaço experimental coberto por variáveis independentes. Porém, para uma região específica, tais modelos são eficientes (AZEVEDO et al., 2006).

Resumidamente, a técnica MSR consiste em duas etapas principais: modelagem e deslocamento, sendo estas repetidas tantas vezes quanto necessárias com o objetivo de se atingir uma região ótima (máxima ou mínima) da região investigada. A modelagem é realizada ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos fatoriais. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada. A Figura 20 ilustra o gráfico de superfície de resposta que é construído para determinação dos valores otimizados a partir de modelos construídos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995; MENDES, 2011).

Figura 20. Gráfico de superfície de resposta utilizado em MSR.



Fonte: (NILO JÚNIOR, 2003).

2.12.2 Planejamento fatoriais

Em casos que existem vários fatores de interesse em um determinado experimento, um planejamento fatorial deve ser utilizado. A resolução de um problema por meio de um planejamento estatístico conhecido como o planejamento experimental fatorial é utilizado para solução de um projeto experimental, usando de um número menor de medidas, mas que ao mesmo tempo consegue-se explorar todo o espaço experimental de interesse. Entretanto, antes de definir o procedimento experimental mais adequado é necessária uma análise profunda do processo, buscando-se todas as informações possíveis disponíveis na literatura, para que se possam levar em conta todas as variáveis a serem estudadas, as faixas de estudo para cada variável considerada e o efeito de cada fator nas respostas de interesse. O efeito de um fator é definido como a mudança em seu nível, sendo este considerado como nível principal (RODRIGUES e IEMMA, 2005; MOTGOMERY, 2004).

No caso do planejamento fatorial completo é necessário a realização de no mínimo 20 ensaios (8 ensaios fatoriais, 6 ensaios nos pontos axiais e 3 ensaios no ponto central) para testar um modelo de 2ª ordem. A região de estudo é maior com número de ensaios a serem realizados, podendo-se calcular o erro experimental quando se toma o cuidado de repetir pelo

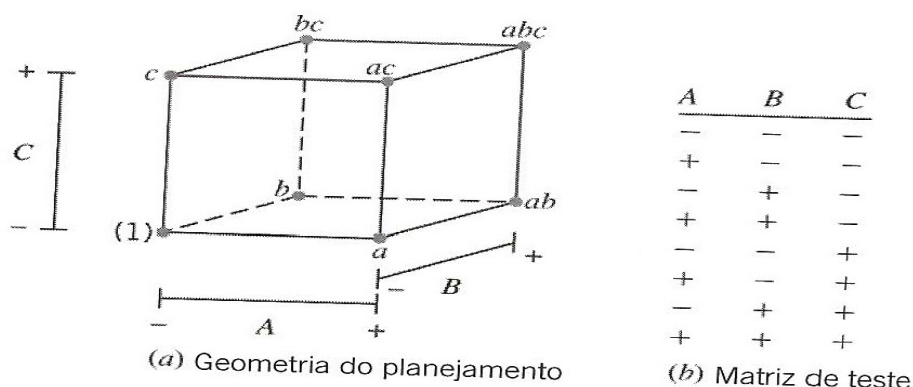
menos 3 vezes a condição do ponto central, indispensável para avaliar a reprodutividade do processo.

2.12.2.1 Planejamento fatorial completo 2^3

O planejamento fatorial 2^3 considera dois níveis para cada fator, consistindo em oito combinações considerando fatores e níveis. Os efeitos calculados em um fatorial 2^3 são interpretados geometricamente como um cubo em que os oito ensaios da matriz do planejamento correspondem aos vértices deste cubo, como ilustrado na Figura 21 (RODRIGUES; IEMMA, 2005; MOTGOMERY, 2004).

Este planejamento permite os três efeitos das variáveis sobre as respostas estudadas, sendo estas estimadas junto com as interações das variáveis. Entretanto, quando se deseja avaliar duas ou três variáveis ou fatores independentes em um processo ou experimento, recomenda-se um delineamento composto central rotacional (CCR) (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995; MENDES, 2011).

Figura 21 - Representação da matriz teste para o planejamento 2^3 .

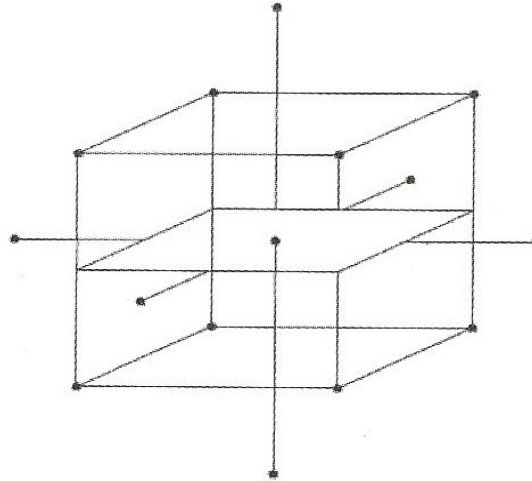


Fonte: (MOTGOMERY, 2004).

Determinados modelos estatísticos obtidos do planejamento experimental apresentam-se diferentemente de um modelo linear. Neste caso, deve-se partir para modelos quadráticos. Normalmente, quando são utilizados estudos envolvendo níveis de fatores menores ou iguais ao número de variáveis, precisa-se ampliar o planejamento. Esta ampliação pode ser realizada de diversas maneiras, sendo que a mais comum é denominada como planejamento composto central rotacional. Para se realizar um planejamento deste tipo deve ser acrescentado ao

planejamento inicial um conjunto de valores das variáveis, porém girando-se de 45° em relação orientação de partida, como ilustrado na Figura 22 (RODRIGUES; IEMMA, 2005).

Figura 22- Representação de condução de experimentos com três variáveis independentes por delineamento composto central rotacional (CCR).



Fonte: (RODRIGUES e IEMMA, 2005).

2.12.2.2 Central Composite Design – CCD

O *design* quadrático denominado *Box-Wilson Central Composite Design*, ou, como mais comumente é conhecido, *Central Composite Design (CCD)*, para k fatores é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo (2^k) ou fracionário (2^{k-p}), um *design* com um determinado número de pontos centrais e um grupo de níveis extras denominados de pontos axiais (2^k), os quais permitem a estimativa da curvatura que representa a tendência das variáveis com a resposta estudada. Se a distância entre o centro do *design* e o ponto fatorial (+1; -1) for aproximadamente igual a 1 (em módulo), a distância do centro ao ponto axial será maior que a unidade. Esta distância é comumente representada por α e depende de certas propriedades desejadas para o experimento e do número de fatores envolvidos, observação também válida para os pontos centrais. O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores envolvidos no experimento. Os pontos axiais representam novos valores extremos para cada fator, ou seja, há uma extrapolação que permite um maior comportamento do modelo fora dos níveis determinados inicialmente (BUTTON, 2005).

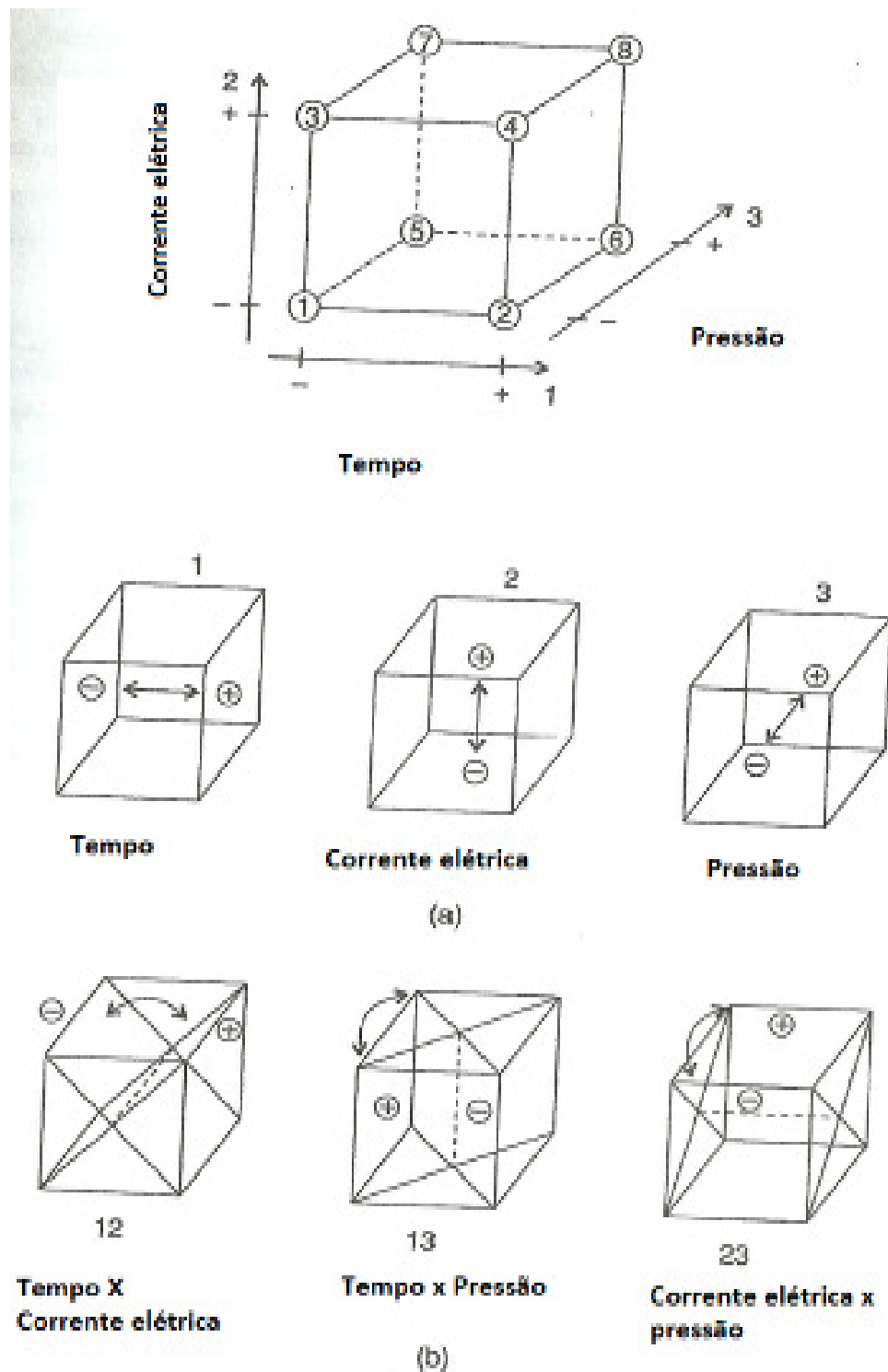
Há três tipos de CCD, dependendo de onde se localizam os pontos axiais sendo estes: Circunscrito (CCC); Inscrito (CCI) e Face Centrada (CCF). O arranjo denominado circunscrito (CCC) corresponde ao CCD original. Em termos resumidos, fazendo-se algumas comparações entre os três tipos de *designs*, pode-se dizer que o tipo CCC fornece uma boa qualidade na predição das respostas em todo o espaço experimental, pois requerem cinco níveis para cada fator e a extrapolação dos pontos axiais fora dos níveis +1 e -1. O tipo CCI, contudo, não apresenta a mesma qualidade na predição das respostas, pois trabalha apenas dentro da amplitude dos níveis da parte fatorial. Já o tipo CCF permite uma qualidade de predição dentro do espaço experimental relativamente alta e não exige a utilização de pontos além da amplitude dos níveis da parte fatorial. Entretanto, sua precisão na estimativa dos coeficientes quadráticos puros é relativamente pobre, pois requer apenas três níveis para cada fator. O arranjo de face centrada (CCF) dispõe seus pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha = +1$ ou $\alpha = -1$. Este arranjo requer três níveis para cada fator. A classe de planejamento mais utilizada para ajustar o modelo de segunda ordem é o CCC onde a distância α é dada pela equação 8 (NETO; SCARMINIO e BRUNS, 1995):

$$\alpha = (2k)^{1/4} \quad (8)$$

Para o propósito deste trabalho, foi adotado um planejamento fatorial de tipo (CCD) para k fatores ($k = 3 =$ pressão de consolidação, intensidade de corrente, tempo de soldagem) e considerando o teste de *Lap Shear* como variável de resposta. Este planejamento foi necessário devido ao fato de não ser possível a realização de todas as combinações empiricamente, uma vez que isso demandaria muito tempo e material.

Os efeitos das variáveis calculadas por um fatorial 2^3 podem ser interpretados como contrastes geométricos. A Figura 23 mostra a interação dos fatores estudados (tempo, corrente e pressão) com os respectivos níveis dos experimentos realizados, dentro do espaço amostral definido.

Figura 23 - Interpretação geométrica dos efeitos das variáveis estudadas no planejamento 2^3 : a) efeitos principais; b) efeitos das interações.



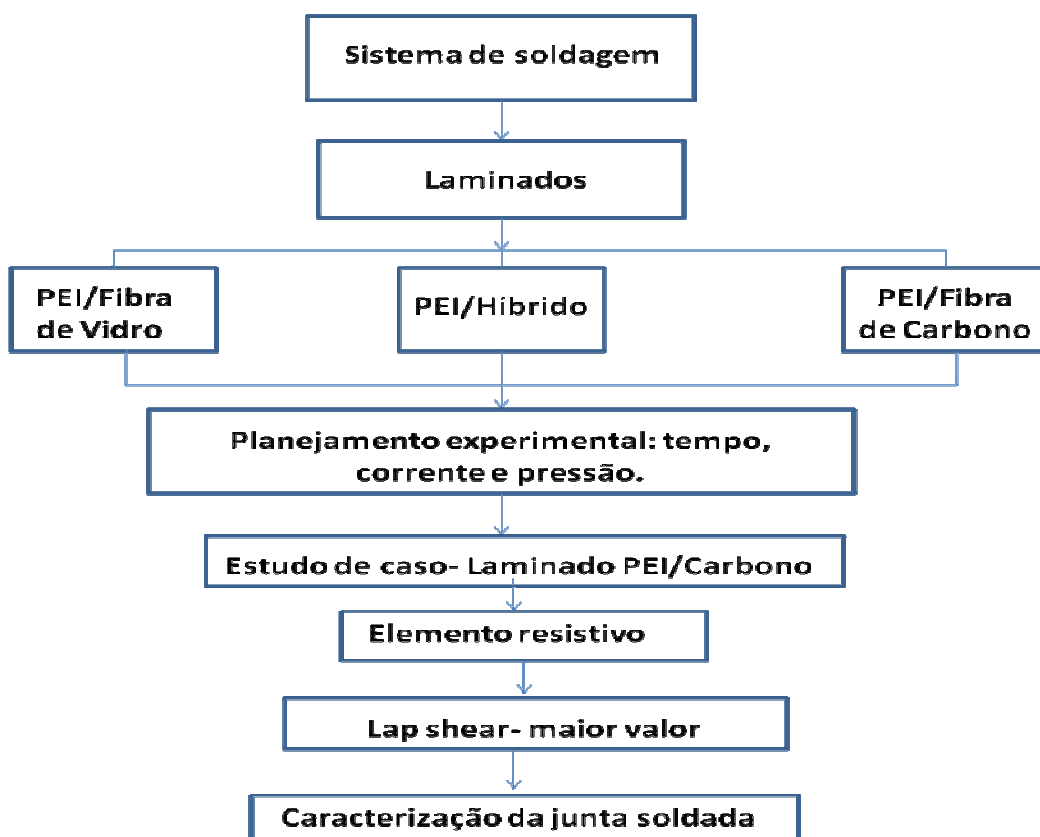
Fonte: (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo objetiva apresentar, de forma sistemática, o desenvolvimento experimental desta tese de doutorado. A Figura 24 apresenta as principais etapas realizadas neste trabalho de pesquisa.

Durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, foram soldados três tipos de laminados de PEI, sendo estes laminados de fibra de vidro, laminado de fibra de carbono e laminado híbrido (fibra de carbono e vidro), utilizando um planejamento experimental com o intuito de identificar as melhores condições do processo considerando: tempo, pressão e corrente elétrica. Posteriormente, foi avaliada a influência do elemento resistivo utilizado para a soldagem em um estudo de caso envolvendo os laminados reforçados com fibras de carbono. Finalmente, a qualidade da soldagem foi avaliada por meio de ensaios mecânicos e análises térmica e morfológica neste estudo de caso.

Figura 24- Fluxograma apresentando as principais etapas realizadas neste trabalho de pesquisa.



Fonte: O autor.

3.1. LAMINADOS TERMOPLÁSTICOS

Os laminados termoplásticos avaliados neste trabalho foram os compósitos PEI/fibras de vidro, PEI/fibra de carbono e PEI/híbrido, todos processados e fornecidos pela empresa holandesa *TEN CATE Advanced Composites*.

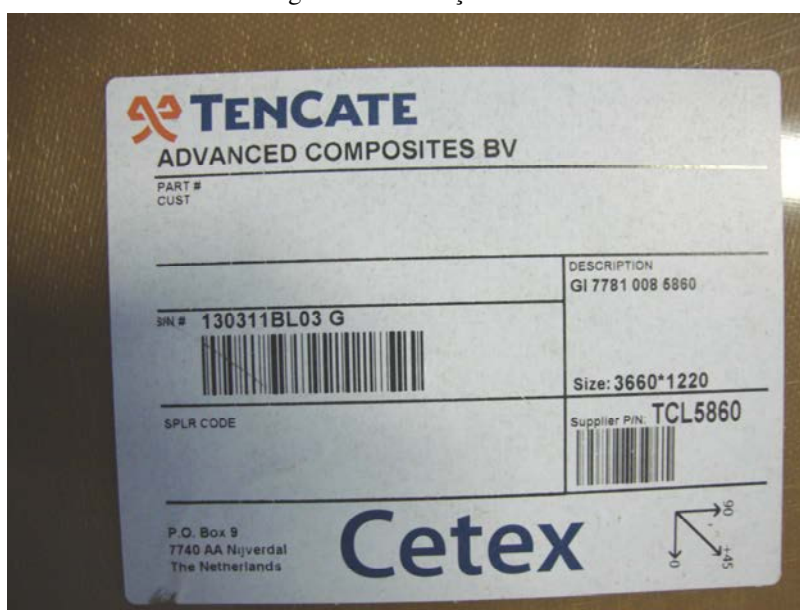
Os laminados de PEI/fibras de vidro e PEI/fibras de carbono foram confeccionados com tecidos na configuração 8 HS com espessuras nominais entre 2 a 3,5mm, e com configuração $(0/90)_{5s}$ contendo, aproximadamente, 50% em volume de matriz.

Os laminados híbridos foram confeccionados com fibras de carbono, apresentando como primeira e última camada lâminas de PEI/fibras de vidro. A configuração de camadas utilizadas para a construção deste laminado foi: $(0/90)_{fv}$, $(0/90)_{fc}$, $(\pm 45)_{fc}$, $(0/90)_{fc}$, $(\pm 45)_{fc}$, $(0/90)_{fc}$, $(0/90)_{fv}$ (sendo fv = fibras de vidro (8HS) e fc = fibras de carbono (8 HS)).

As camadas externas de PEI/fibra de vidro foram colocadas no laminado com a função de isolar o material, não permitindo a ocorrência de curto circuito durante a passagem de corrente elétrica. Todos estes laminados termoplásticos foram processados a partir de sistemas *semipregs*, moldados em autoclave.

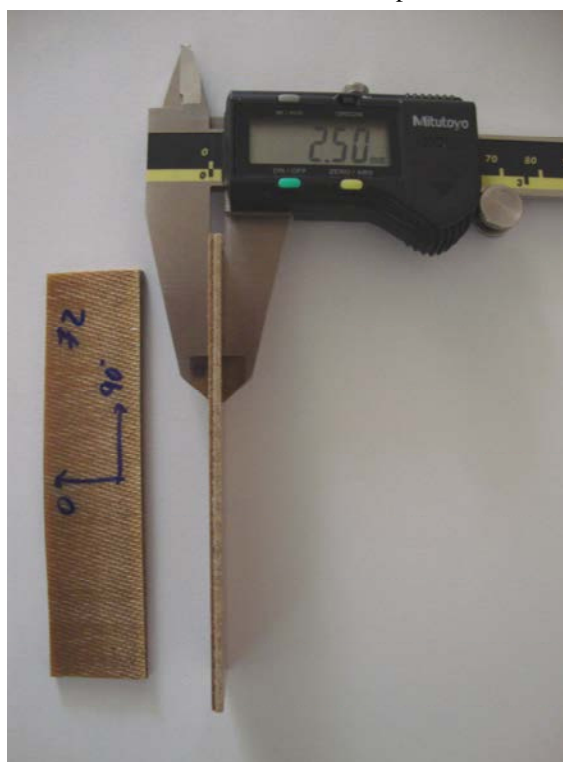
As Figuras de 25 a 30 ilustram os laminados com os códigos correspondentes de identificação como fornecidos pela empresa *TENCATE Advanced Composites*, assim como as amostras dimensionadas para o ensaio de *Lap Shear*.

Figura 25-Laminado PEI/ fibra de vidro com código de identificação do fornecedor.



Fonte: O autor.

Figura 26- Amostras dos laminados PEI/ fibra de vidro dimensionadas para os ensaios de *Lap Shear*.



Fonte: O autor.

Figura 27- Laminado PEI/ híbrido com código de identificação do fornecedor.



Fonte: O autor.

Figura 28- Amostras dos laminados PEI/ híbrido dimensionadas para os ensaios de *Lap Shear*.



Fonte: O autor.

Figura 29 - Laminado PEI/ fibra de carbono com código de identificação do fornecedor.



Fonte: O autor.

Figura 30- Amostras dos laminados PEI/ fibra de carbono dimensionadas para os ensaios de *Lap Shear*.



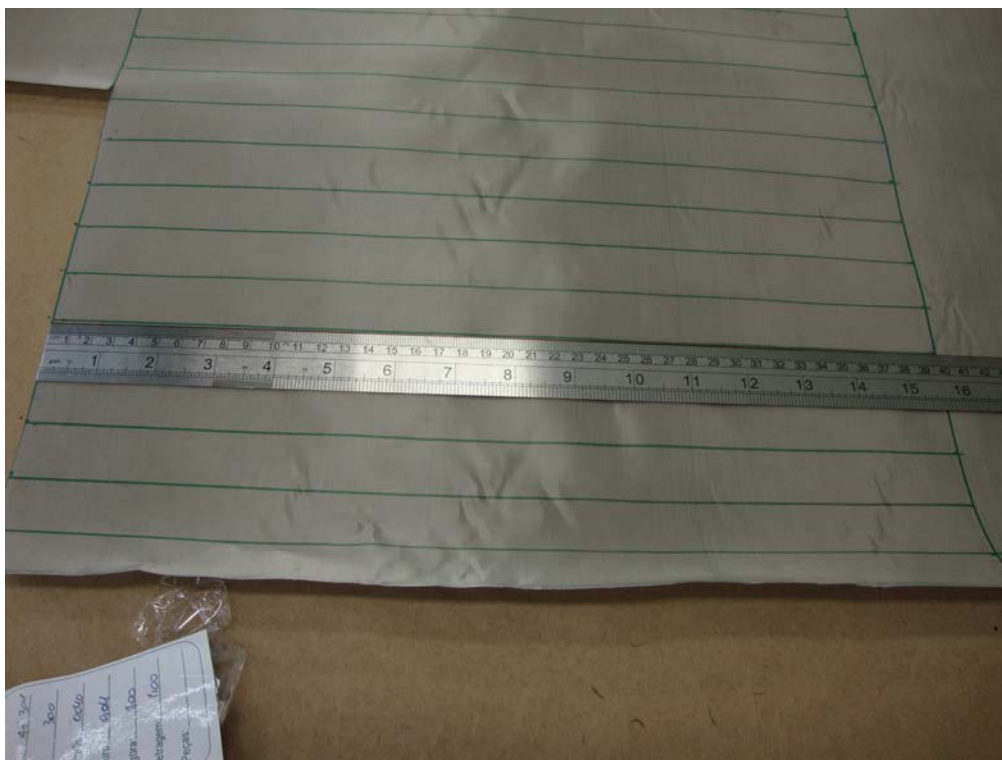
Fonte: O autor.

3.2. ELEMENTOS RESISTIVOS UTILIZADOS

3.2.1 Malha metálica

Como elementos resistivos utilizados para os testes preliminares de soldagem com os compósitos foram utilizadas malhas metálicas de aço inox AI 304 de 200 mesh , e malhas de 100 e 300 mesh para a conclusão dos trabalhos realizados como estudo de caso envolvendo os laminados de fibra de carbono. As malhas, em forma de telas, 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 31.

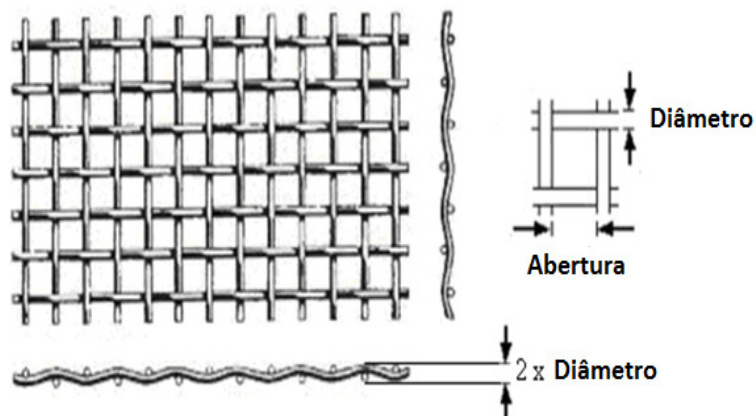
Figura 31- Malha metálica nas dimensões de corte para utilização como elemento resistivo para a soldagem dos laminados.



Fonte: O autor.

A Figura 32 apresenta, de forma representativa, a configuração das malhas metálicas, com 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 32- Representação esquemática das malhas metálicas utilizadas



Fonte: (LABRANDERO, 2009).

Tabela 3 - Dimensões das malha metálicas.

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).

3.2.2 Fibra de Carbono

As fibras de carbono foram adquiridas da empresa americana Hexcel, a partir de um projeto regular da FAPESP nº 2011/09062-3. Trata-se de fibras na forma de tecido plano (*plain weave*), contendo 3000 monofilamentos. As imagens da fibra de carbono utilizadas neste trabalho são apresentadas na Figura 33.

Figura 33- Imagens do tecido de fibra de carbono utilizadas como elemento resistivo na soldagem dos laminados.

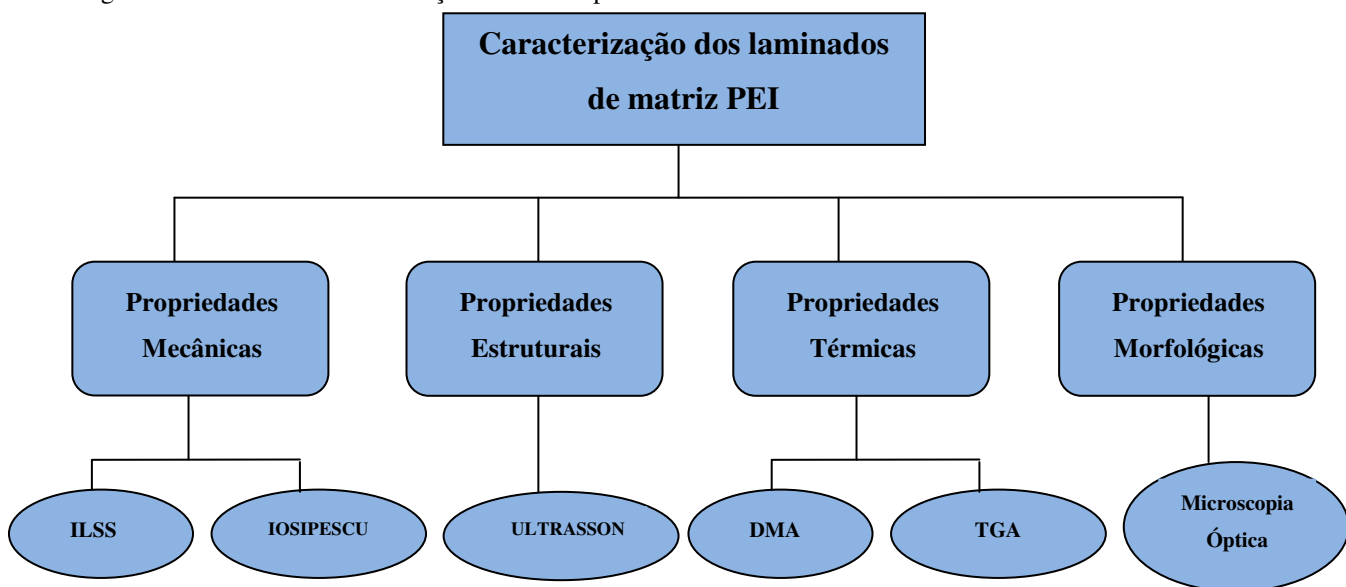


Fonte: O autor.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS PEI/FIBRAS CONTÍNUAS

Antes da realização da soldagem, os laminados termoplásticos foram caracterizados como adquiridos. A caracterização dos laminados PEI foi realizada com o objetivo de estudo comparativo dos 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 são ilustrados na Figura 34 e detalhados a seguir.

Figura 34- Ensaios de caracterização realizados para os laminados de PEI



Fonte: O autor.

3.3.1 ILSS

Compósitos estruturais são materiais formados por um arranjo de camadas, sendo que na interface entre estas existe, normalmente, uma região muito fina de matriz polimérica que age como um elemento de ligação entre duas camadas adjacentes. Uma falha associada à interface entre as camadas de um compósito polimérico é denominada delaminação, que pode provocar a separação entre as camadas do material e conduzir a uma fratura. Por ser uma fratura que ocorre somente com o material polimérico, quase sempre apresenta um valor de resistência baixo se comparado à resistência global do compósito. Um método para se determinar a resistência aparente da interface entre as camadas é o ensaio ILSS (cisalhamento interlaminar) cujo objetivo principal é medir a resistência do material em estudo (MARINUCCI, 2011).

Desta forma, o ensaio de ILSS (*Interlaminar short beam*) foi realizado neste trabalho com o intuito de avaliar o cisalhamento interlaminar e comparar esta propriedade com o cisalhamento na região soldada. Os ensaios foram realizados com uma célula de carga de 10 kN em uma máquina universal de ensaios mecânicos da Shimadzu, modelo AG-X, de acordo com a norma ASTM D2344. Com este propósito, 10 (dez) corpos de provas foram ensaiados para cada caso estudado.

3.3.2 Ensaio por Cisalhamento Iosipescu

O método de cisalhamento por Iosipescu é realizado em um corpo de prova retangular com entalhes em V. As dimensões dos corpos de prova e os ensaios foram baseados na norma ASTM D5379. Para este ensaio, o entalhe possui um raio padronizado de 1,3mm, com o propósito de evitar interferências nos resultados devido à presença de cantos vivos. O corte dos corpos de prova e a confecção do entalhe foram realizados na Unesp, campus de Guaratinguetá.

3.3.3 Análise por Ultrassom (C-scan)

A qualidade da consolidação dos compósitos laminados como recebidos foi avaliada com a utilização de inspeção acústica (C-scan) para detectar a presença de defeitos induzidos durante o processamento. O equipamento que foi utilizado para estas análises não destrutivas foi o MI-SCAN Modelo PSS-600, adaptado com o software MUIS32 (Matec Ultrasonics Inspection Software), para converter os sinais em imagens (Figura 35).. Este equipamento encontra-se disponível na Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Guaratinguetá. Utilizando-se deste equipamento, os laminados processados foram varridos com velocidade de 150 mm/s e frequência de 2,25 MHz.

Figura 35- Equipamento de Ultrassom utilizado.



Fonte: O autor.

3.3.4 TGA

A partir da análise de termogravimetria (TGA) em compósitos podem ser evidenciadas as reações de degradação da matriz polimérica, formando materiais voláteis, provocando, desta forma, perda de massa desta matriz. A variação da massa em função do tempo ou da temperatura é um registro da estabilidade térmica de um determinado material (DE PAOLI, 2008). Para a avaliação da temperatura de degradação da matriz polimérica PEI, foi realizada a análise termogravimétrica (TGA) em um analisador modelo TG-DTA 6200 da marca SII-Nanotechnology (Figura 36), utilizando método dinâmico com aquecimento de 35°C até 1000°C, taxa de aquecimento de 10 °C/min e uma atmosfera de ar sintético (fluxo de 100 mL/min). Para todas as amostras analisadas foi utilizada uma massa de aproximadamente 10 mg. Em se tratando de processos de soldagem, esta análise é de grande importância permitindo estabelecer, de forma adequada, a janela de processamento por soldagem.

Figura 36- Equipamento de TGA da SII Nanotechnology, modelo 6200.



Fonte: O autor.

3.3.5 DMA

Os ensaios dinâmico-mecânicos têm encontrado uma aplicação cada vez mais intensa na investigação do comportamento viscoelástico de polímeros, sistemas poliméricos monofásicos e polifásicos abrangendo blendas poliméricas, copolímeros e compósitos, e especialmente na determinação das suas temperaturas de transição vítrea (T_g). A versatilidade da técnica de DMA encontra-se relacionada à grande sensibilidade aos processos macroscópicos, microscópicos e de relaxação molecular das cadeias poliméricas (DE PAOLI, 2008; NOGUEIRA, 2004).

Neste trabalho, a temperatura de transição vítrea foi avaliada por DMA, utilizando-se do equipamento DMA 6100 da marca SII-Nanotechnology (Figura 37). O modo utilizado neste trabalho foi do tipo *dual cantilever* (modo de flexão), nas frequências de 0,5 Hz, 1Hz, 2 Hz, 5Hz e 10 Hz; amplitude de 10 μm ; força aplicada de 2000 mN; aquecimento de 35°C até 180°C, com taxa de aquecimento de 3°C/min; atmosfera de ar sintético com fluxo de 100 mL/min.

Figura 37- Equipamento utilizado para a análise dinâmico-mecânica dos laminados em estudo.



Fonte: O autor.

3.3.6 Análise Morfológica

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

3.3.6.1 Microscopia óptica

Para a caracterização dos laminados e avaliação da eficiência do processo de soldagem por resistência, foram realizadas análises por microscopia óptica utilizando um Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000 como apresentado na Figura 38. Para as análises por microscopia óptica, os materiais utilizados foram: um microscópio óptico com aumento de 50x a 1000x do fabricante Olympus e um estereoscópio com aumento de 6,7x a 45x.

Figura 38- Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000.



Fonte: O autor.

3.3.6.2 MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

Para uma análise mais detalhada da fratura na região soldada, resultante do ensaio de *Lap Shear*, foram avaliadas imagens, de amostras não recobertas dos três compósitos estudados, utilizando o MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) ambiental Zeiss Evo LS-15, usando o modo de pressão estendida (EP), onde a pressão interna da câmara foi ajustada de acordo com cada tipo de amostra, entre 30 e 100 Pa, para a compensação, por íons positivos de nitrogênio, do efeito de carregamento eletrostático (“*charge-up*”), devido à baixa condutividade das amostras. O gás utilizado na câmara foi nitrogênio com grau 5.0 (pureza de 99,999%). Foram amostrados sinais de elétrons retroespalhados (BSE) utilizando o detector Zeiss 4Q-BSD, semiconductor de quatro quadrantes, e o de elétrons retroespalhados, usando o detector Zeiss VPSE-G3, específico para pressões até 400 Pa, que coleta fótons gerados pela quebra de moléculas de N_2 por elétrons secundários, que emergem da amostra.

3.3.6.3 Microanálise por Energia Dispersiva

O ensaio de microanálise por energia dispersiva foi realizado em corpos de prova soldados, com a finalidade de identificar os picos dos elementos contidos no compósito e em amostras soldadas para analisar como a malha metálica e o processo de soldagem afetaram a matriz polimérica. Com esta finalidade, foi utilizado o detector de microanálise por energia dispersiva de raios-X Inca x-act da Oxford Instruments montado no microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15 e controlado pelo sistema Inca Energy 250, disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP-Guaratinguetá. O conjunto de microscopia eletrônica e microanálise utilizados são apresentados na Figura 39.

Figura 39- Sistema utilizado de microscopia eletrônica de varredura.



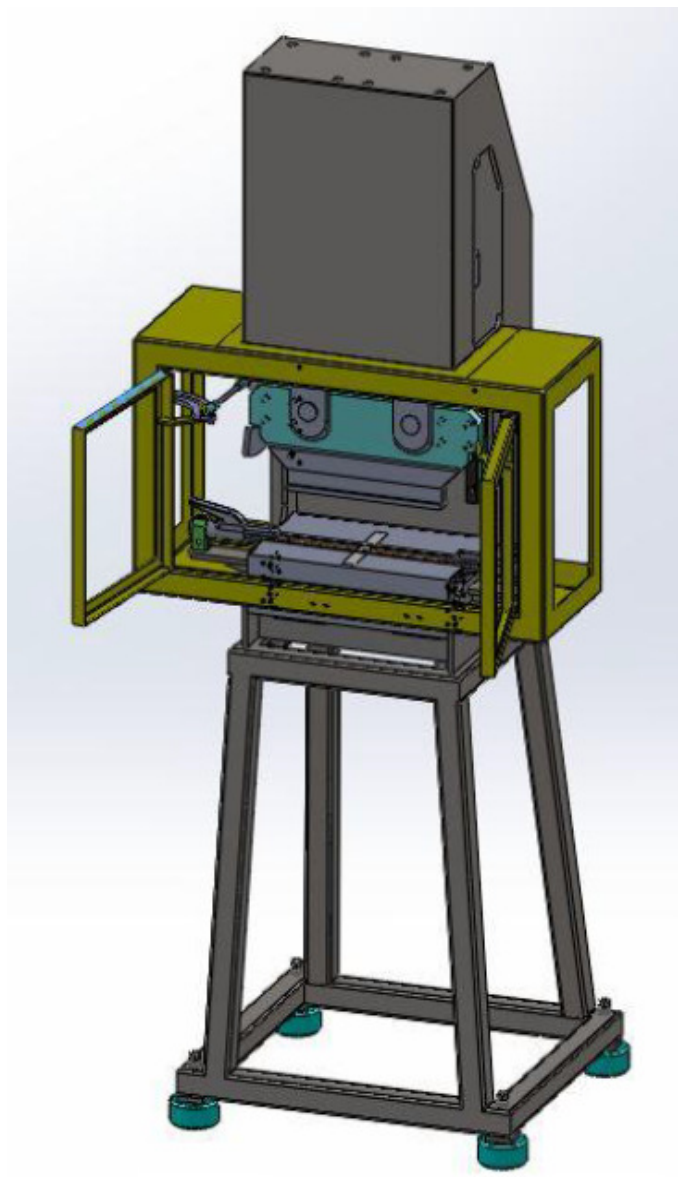
Fonte: O autor.

3.4 SISTEMA DE SOLDAGEM

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada uma máquina de soldagem por resistência elétrica para compósitos, sendo esta confeccionada pela empresa AUMEK semelhante ao sistema desenvolvido por NINO et al., 2009, que consiste basicamente em uma máquina de prensagem com conectores elétricos integrados resistivos na forma de aproximadamente 0,05mm de espessura, para garantir aquecimento e pressão local durante o processo de soldagem, como ilustrado pela Figura 40. O projeto da máquina soldadora bem

como as condições de operação foram desenvolvidos e determinados com a parceria dos alunos e professores da FEG- Unesp com a equipe de projetos da empresa AUMEK.

Figura 40- Desenho do projeto da máquina de soldagem de compósitos



Fonte: O autor.

A descrição fornecida com os parâmetros principais da máquina estão apresentados no Anexo 2. As condições máximas e mínimas das variáveis da máquina são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5- Condições máximas e mínimas operacionais da máquina de soldagem utilizada.

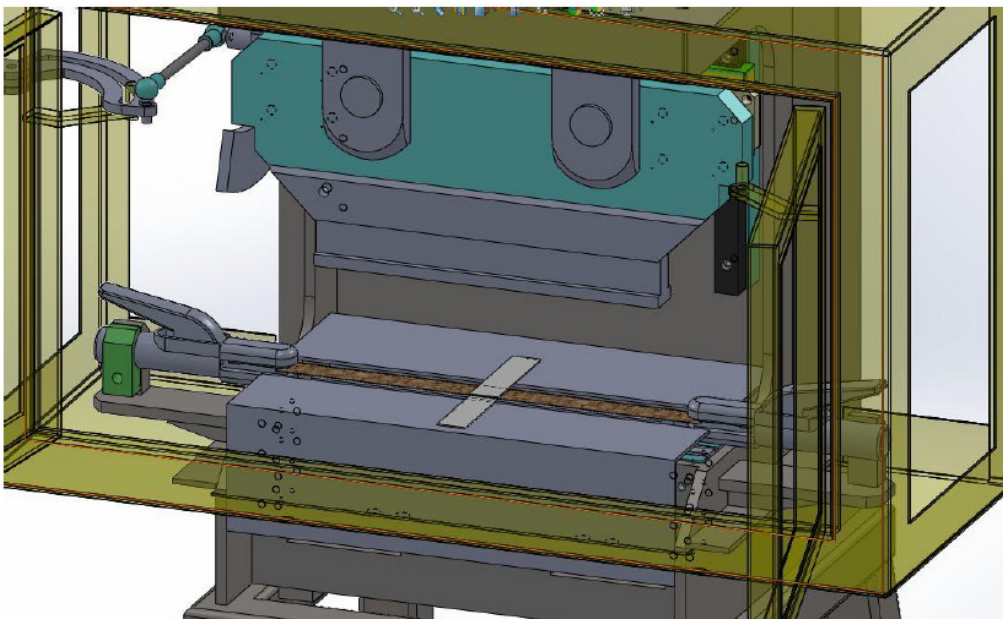
Largura corpos de prova (cm)	Pressão (MPa)	Corrente (A)
2 a 4	0,7 a 3	5 a 70

3.4.1. Descrição do projeto da máquina e utilização

O equipamento, objeto deste projeto de encargo, se destina a realização de ensaios em laboratório com a finalidade de estudos da soldagem de materiais compósitos por meio de aquecimento.

O processo consiste em aquecer, com o uso de corrente elétrica, uma malha metálica posicionada entre dois corpos de prova sobrepostos. Com o aquecimento da malha em contato com o material dos corpos de prova estes também se aquecem. Com a aplicação de força sobre eles ocorrerá a fusão dos materiais, desligando a fonte de corrente que provoca o aquecimento, os materiais se resfriam produzindo a soldagem dos corpos de prova. O processo de soldagem deverá atender inicialmente a soldagem para configuração do ensaio mecânico de *Lap Shear*, como ilustrado no desenho esquemático da Figura 41.

Figura 41- Desenho da mesa da prensa com um corpo de prova posicionado para soldagem.



Fonte: O autor.

Para o processo de soldagem, os corpos de prova e a malha deverão ser posicionados na mesa da prensa Figura 41.

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, será realizado manualmente pelo operador da prensa.

O operador deverá também estabelecer a configuração do ensaio, que definirá os valores dos parâmetros que interferem no processo de soldagem, sendo eles: tensão, corrente, força aplicada as amostras e tempo de soldagem.

Depois de configurado o ensaio, seu início se dará pelo comando do operador, realizado por meio do software de controle da prensa, e todo o processo posterior até sua finalização será realizado por este software de controle, que comandará os dispositivos atuadores e realizará a leitura dos dados do ensaio para registro conforme definido para a configuração do ensaio sendo executado.

Iniciado um ensaio, o software de controle deverá fazer com que uma válvula reguladora libere a pressão necessária para que os cilindros da prensa apliquem a força nos corpos de prova solicitada nas configurações do ensaio. Estabilizada a força aplicada o software deverá comandar a fonte de alimentação elétrica para liberação de corrente e tensão definidos, responsáveis pelo aquecimento da malha metálica e, pelo contato, o aquecimento dos corpos de provas.

A força aplicada bem como a corrente e tensão, permanecerão atuadas até que o tempo definido para soldagem na configuração do ensaio seja atingido, sendo desligados automaticamente ao término deste período.

O ciclo operacional da prensa deverá constar dos seguintes passos:

1. Operador posiciona corpos de prova com malha na prensa;
2. Operador fecha as portas de acesso à área de prensagem;
3. Operador ajusta variáveis no software de controle da prensa;
4. Operador dispara início do processo de soldagem;
5. O martelo de prensagem se posiciona sobre o corpo de prova e é aplicada a força solicitada;
6. Após o tempo de ajuste da força, definido nas opções de ajuste no software de controle da prensa, o sistema libera a corrente e tensão da fonte de alimentação;
7. Decorrido o tempo de soldagem ajustado pelo operador a corrente e tensão são desligadas;

8. A prensa continua aplicando a força por tempo definido nas opções de ajuste no software de controle da prensa, transcorrido este tempo o martelo da prensa é suspenso;
9. O operador confirma final de ensaio no software de controle da prensa;
10. Operador poderá acessar a área de prensagem.

3.4.1.1 Itens de segurança

O projeto mecânico da prensa deverá fornecer meios que dificultem o acesso do operador ao interior da máquina durante o processo de ensaio, para isto as seguintes características serão adotadas no projeto da prensa:

A área de soldagem terá acesso bloqueado por uma porta, durante o processo de soldagem a área estará enclausurada;

A porta sempre que aberta, irá se posicionar de modo a impedir que o martelo da prensa desça até a área de ajuste dos corpos de prova;

Um sensor será instalado na porta de acesso à área de soldagem, o sinal será utilizado pelo *software* para somente comandar a pressão nos atuadores pneumáticos e liberar a corrente e tensão da fonte de alimentação quando a porta estiver fechada;

O *software* terá um botão de interrupção do ensaio, que quando acionado todos os acionamentos serão desligados.

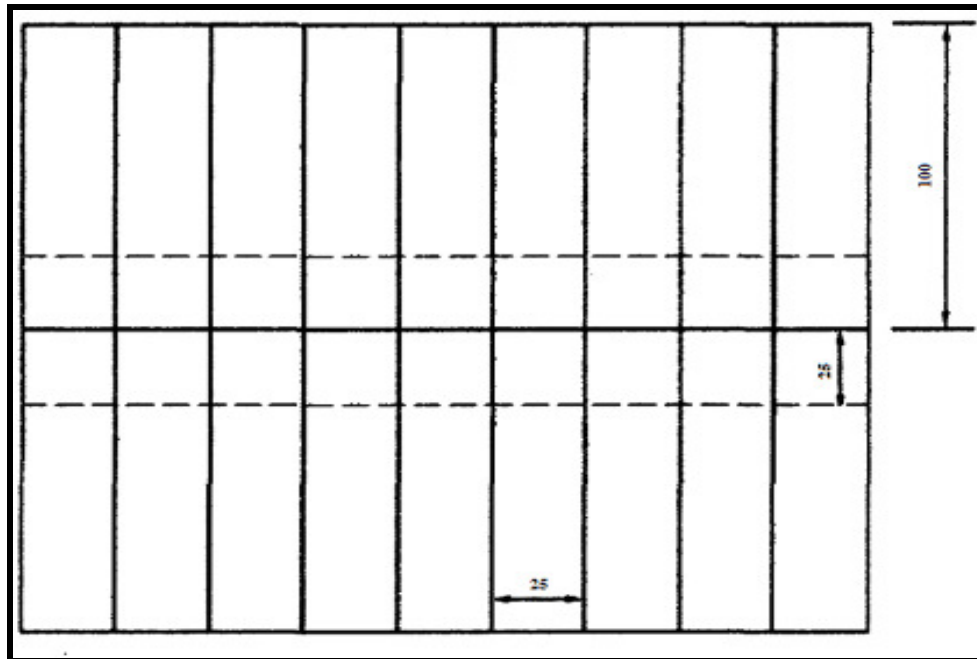
Na soldagem deve-se sempre seguir os procedimentos de segurança conforme a Instrução de trabalho descrita no Apêndice A.

3.4.2 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 42. 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 (Figura 43), lixadas as laterais das amostras e limpas novamente com álcool etílico, marcadas as regiões para união (Figura 44) e assim submetidas ao processo de soldagem.

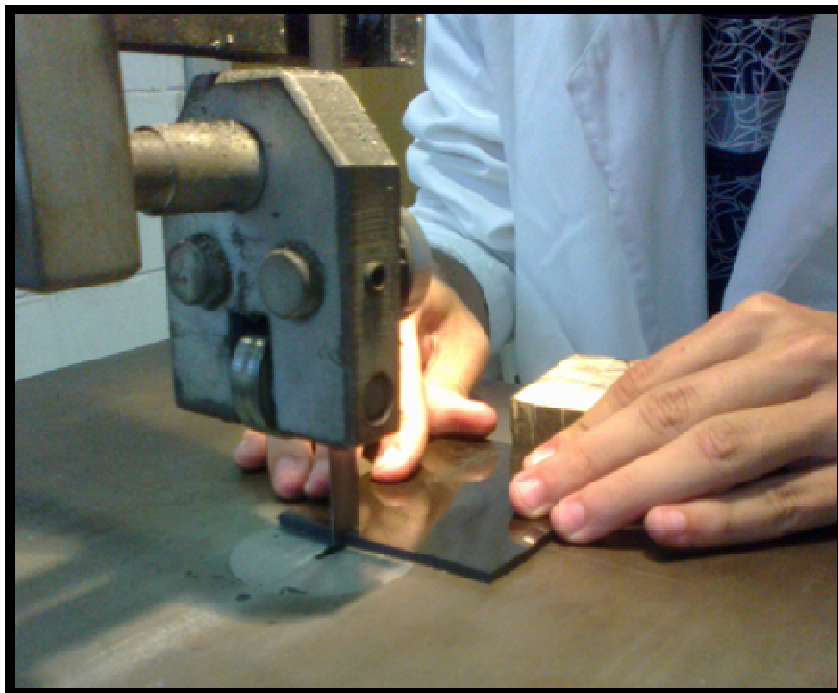
A partir de cada laminado foram extraídos 152 corpos de prova para o processo de soldagem.

Figura 42- Dimensões para corte dos corpos de prova extraídos do laminado PEI/fibras contínuas (dimensões em mm).



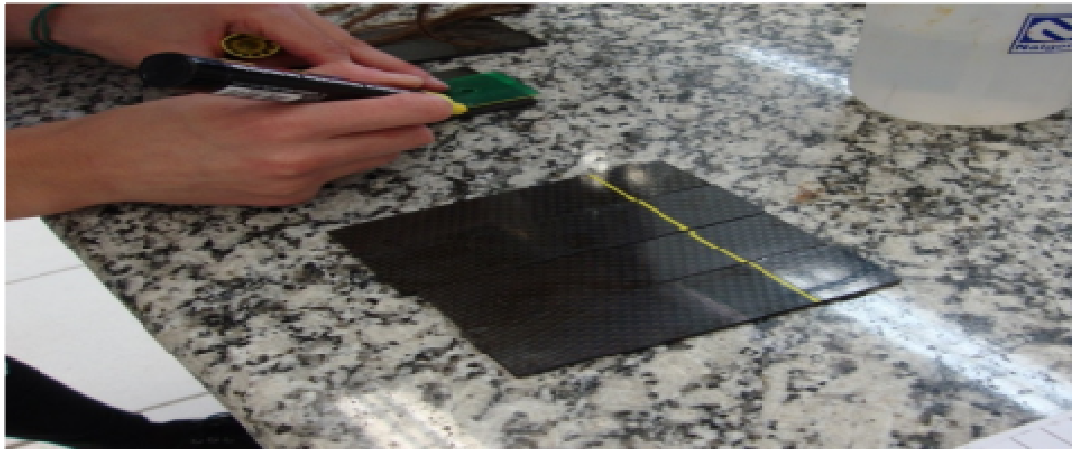
Fonte: O autor.

Figura 43- Procedimento de corte com utilização de serra de fita dos laminados para soldagem.



Fonte: O autor.

Figura 44- Marcação das amostras das regiões a serem unidas pelo processo de soldagem por resistência de compósitos



Fonte: O autor.

3.4.2 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 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 o amolecimento dos materiais em contato com o elemento resistivo. Desta forma, para este trabalho as temperaturas de soldagem utilizadas foram na faixa de 218 a 419 ° C, devido estes valores para o polímero PEI satisfazerem as condições estabelecidas pela TWI (WISE, 1999) e por esta faixa de temperatura ter se mostrado a mais adequada durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

As imagens da máquina de soldagem utilizada são ilustradas pelas Figuras 45 e 46. Desligando-se a fonte de corrente elétrica, os materiais se resfriaram produzindo a soldagem dos corpos de prova. As Figuras 47 a 50 ilustram os passos para a soldagem dos corpos de prova de PEI/fibra de carbono.

Figura 45- Foto da máquina de soldagem por resistência elétrica utilizada no presente trabalho



Fonte: O autor.

Figura 46- Imagem do desenho da vista expandida da cabine de soldagem da máquina



Fonte: O autor.

Figura 47- Amostras do compósito PEI/fibra de carbono antes da soldagem para os testes de *Lap Shear*.

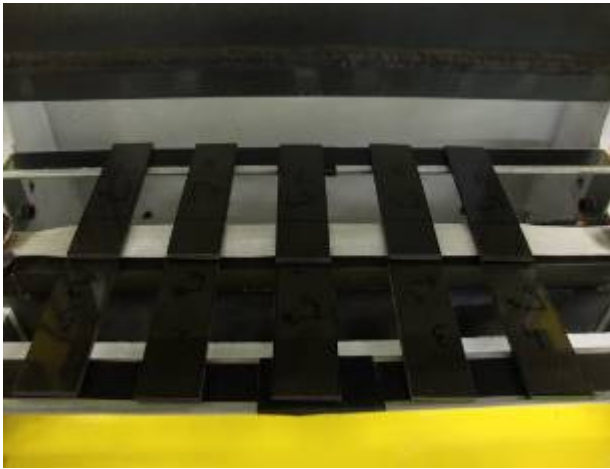


Figura 48- Soldagem das amostras do compósito PEI/fibra de carbono destinadas aos testes de *Lap Shear*



Figura 49- Modo de ensaio antes de soldagem de testes de *Lap Shear* do compósito PEI/fibra de carbono.



Figura 50- Modo de ensaio durante a soldagem de testes de *Lap Shear* do compósito PEI/fibra de carbono.



Fonte: O autor.

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, permaneceram atuadas até que o tempo definido para soldagem na configuração do ensaio tenha sido atingido, sendo interrompidos automaticamente ao término deste período. A imagem da tela de comando do *software* utilizado da soldadora é apresentada na Figura 51.

Figura 51- Tela de comando do *software* utilizado da soldadora.

Sistema de Soldagem

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Guaratinguetá

Dados de ensaio

Identificador Ensaio PEI- melhor condição

Requisitante Ana Beatriz

Operador Bia

Arquivo gravação dados: C:\Soldagem\Ensaios\PEI- melhor condição híbrido std 9 300mesh .txt

Ajuste dos dados do ensaio

Comprimento (cm) 2,5

Largura (cm) 2,5

Ajuste Pressão (MPa) 1,85

Tempo soldagem (seg) 30

Tempo pré-soldagem (seg) 10

Tempo pós-soldagem (seg) 10

Corrente (A) 31,5

Valores Calculados de área do CDP

Área (cm²) 6,25

Pressão (Kg/cm²) 18,9

Pressão (Kgf) 117,9

Fonte: O autor.

3.5 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO

3.5.1 Planejamento experimental

Para a determinação dos melhores parâmetros para o processo de soldagem pelo processo de resistência elétrica, foi utilizado o planejamento experimental *Central Composite Design* (CCD) para k fatores ($k = 3 =$ pressão de consolidação, intensidade de corrente elétrica, tempo de soldagem) que é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo 2^3 , um *design* com um determinado número de pontos centrais (nesse trabalho, foram feitas cinco replicatas no ponto central), e adicionalmente apresenta um grupo de níveis extras denominados de pontos axiais em um CCD, sendo este igual ao dobro do número de fatores envolvidos no experimento ($2^3 = 8$). Foram também realizadas cinco replicatas do fatorial completo (2^3) e seis replicatas dos pontos axiais. Portanto, tendo-se $(8+5)*5 + 6 = 75$ experimentos. A utilização deste tipo de planejamento foi baseada em seu ineditismo, uma vez que não foram encontrados trabalhos na literatura científica, até o momento, abordando este tipo de otimização do processo de soldagem em compósitos estruturais. O planejamento experimental foi realizado considerando como variáveis: pressão, corrente e tempo no processo.

Como resposta foi realizado o ensaio de *Lap Shear*. Os níveis reais e codificados das variáveis em estudo para o PEI/fibra de vidro, PEI/fibra de carbono e PEI/híbrido estão apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

Os resultados obtidos foram analisados com auxílio dos *software* Estatística versão 5 (StatSoft Inc., USA) e *Design-Expert* 6.0 (Stat-Ease Corporation, USA). Este último *software* foi também empregado para determinação dos valores máximos de tensão de ruptura (MPa).

Tabela 6 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliadas segundo planejamento experimental estrela rotacional para o laminado de PEI/fibra de vidro.

Variáveis		Níveis				
Reais	Codificadas	- α	-1	0	+1	+ α
Tempo (s)	X ₁	30	50	175	300	350
Corrente (A)	X ₂	24	25	27,5	30	32
Pressão (MPa)	X ₃	0,7	0,7	1,85	3	3

Tabela 7 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliados segundo planejamento experimental estrela rotacional para o laminado de PEI/fibra de carbono.

Variáveis		Níveis				
Reais	Codificadas	- α	-1	0	+1	+ α
Tempo (s)	X ₁	30	50	175	300	350
Corrente (A)	X ₂	27	30	31	32	35
Pressão (MPa)	X ₃	0,7	0,7	1,85	3	3

Tabela 8 – Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliados segundo planejamento experimental estrela rotacional para o compósito PEI/ fibra de vidro e carbono (híbrido).

Variáveis		Níveis				
Reais	Codificadas	- α	-1	0	+1	+ α
Tempo (s)	X ₁	30	50	175	300	350
Corrente (A)	X ₂	27	31	31,5	33	36
Pressão (MPa)	X ₃	0,7	0,7	1,85	3	3

3.5.2 Teste *Lap Shear*

O teste *Lap Shear* (LSS) é atualmente considerado como sendo o método mais utilizado para a investigação da resistência de ruptura de juntas soldadas pelo processo de resistência elétrica. Este método consiste em aplicação de força de tração em corpos de prova soldados até a ruptura. Os ensaios foram realizados na máquina de tração marca Shimadzu baseando-se nas normas ASTM D1002-10 e ASTM D2344. A tensão de ruptura da junta é calculada pela fórmula simples, representada pela Equação (9) (STAVROV; BERSEE, 2005).

$$T = \frac{F_{m\acute{a}x}}{L.b} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (9)$$

onde T = Tensão de ruptura (N/mm^2), L = comprimento da sobreposição da solda (mm), b = largura da sobreposição (mm) e $F_{m\acute{a}x}$ = força máxima de tração (N). Este método foi utilizado com a finalidade de se determinar a variável resposta do planejamento experimental. O método consiste em aplicação de força de tração em corpos de prova soldados até a ruptura. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da SHIMADZU, modelo AG-X, com uma célula de carga de 50 kN. As amostras foram posicionadas nas garras da máquina de ensaio universal e tracionadas a 1,5 mm / min (0,05 in / min) até a falha ocorrer, como mostra a Figura 52.

Figura 52- Detalhe da amostra no momento da falha durante o ensaio *Lap Shear*.



Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS COMO RECEBIDOS

Uma criteriosa avaliação dos laminados, como recebidos, foi realizada com o intuito de conhecer as propriedades mais importantes a serem estudadas para se entender o comportamento dos mesmos durante e após o processo de soldagem. Algumas propriedades da matriz PEI e de seus respectivos compósitos reforçados com fibras de vidro e carbono, fornecidos pela empresa TENCATE, encontram-se apresentadas no Anexo A desta tese de doutorado.

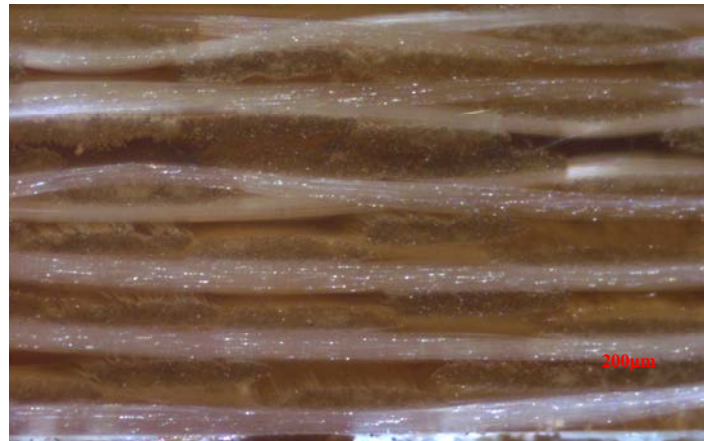
4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

A utilização da técnica de microscopia óptica para a avaliação da qualidade de compósitos tem muitos objetivos que podem ser citados, tais como: determinação da direção e propagação de trincas; avaliação de distribuição da homogeneidade de reforços fibrosos na matriz; verificar o 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, 2011).

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

As Figuras 53 a 55 apresentam as imagens da seção transversal das amostras dos laminados de compósitos obtidas por microscopia óptica que permitem observar observar, principalmente, a compactação das fibras com o polímero.

Figura 53-Imagem da seção transversal da amostra do compósito PEI/fibra de vidro com ampliação de 20 X.



Fonte: O autor.

Figura 54- Imagem da seção transversal da amostra do compósito PEI/fibra de carbono com ampliação de 20X.



Fonte: O autor.

Figura 55- Imagem da seção transversal da amostra do compósito PEI/híbrido com ampliação de 20 X.



Fonte: O autor.

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 ocorreu uma boa infiltração da matriz no reforço e uma adequada interface fibra/matriz foi alcançada. Estas características são desejadas, pois estão diretamente relacionadas com melhores propriedades mecânicas e físicas dos materiais processados. Desta forma, as micrografias obtidas dos laminados confirmam 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.

4.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

4.3.1 Ultrassom

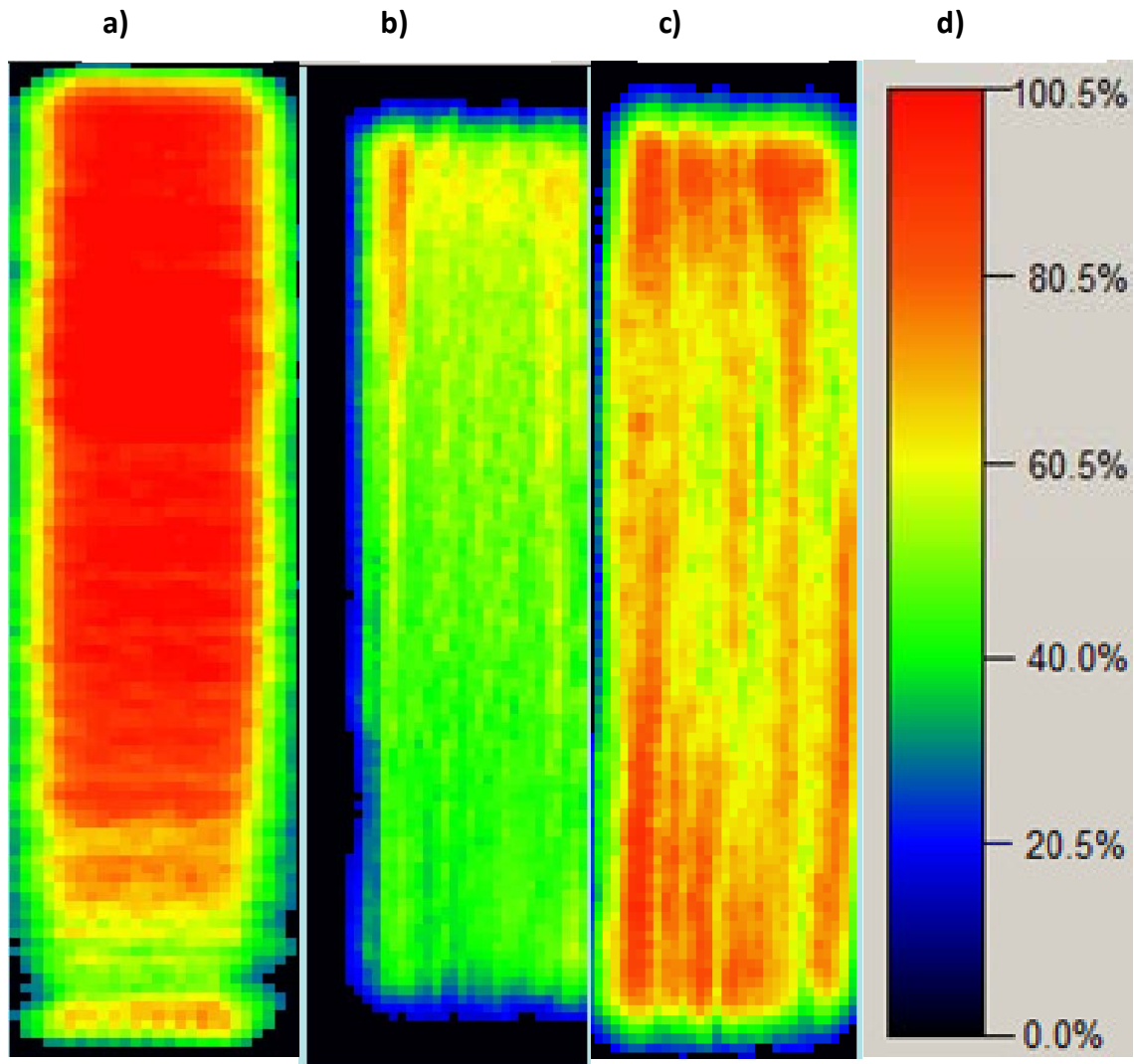
O padrão de qualidade dos compósitos termoplásticos como recebidos foi também avaliado utilizando-se da técnica por inspeção ultrassônica, a fim de se analisar a boa consolidação dos mesmos. As Figuras 56 (a) a 56 (c) são representativas das amostras de PEI/fibras de vidro, PEI/fibras de carbono e PEI/híbrido, respectivamente.

O laminado PEI/fibra de vidro(Figura 56 a)) apresentou uma melhor consolidação quando comparado com o PEI/Fibra de carbono e o PEI/híbrido, com transmissão do sinal ultrassônico variando entre 60 e 100% na região central do laminado. Já o laminado de PEI/fibra de carbono apresentou uma consolidação menos homogênea na região central do laminado e ausência de transmissão do sinal ultrassônico nas extremidades laterais e principalmente nos cantos do laminado. Portanto, as imagens obtidas pela inspeção ultrassônica foram também utilizadas para se determinar as regiões das quais as amostras e corpos de prova foram extraídos, visando obter uma melhor homogeneidade do material em estudo.

A Figura 56 (d) apresenta a escala de cores para padronização das análises de ultrassom realizadas. As análises das amostras apontam que o nível de atenuação encontra-se relacionado ao grau de compactação dos materiais que compõem os laminados estudados e adquiridos pela empresa TENCATE. Pode-se observar, a partir dos resultados provenientes da

Figura 56, que a região de coloração mais escura representa regiões do laminado com maior grau de compactação.

Figura 56- Resultados de ultrassom dos laminados de PEI reforçados com: a) fibras de vidro; b) fibras de carbono; c) laminado híbrido; d) escala de atenuação de cores.



Fonte: O autor.

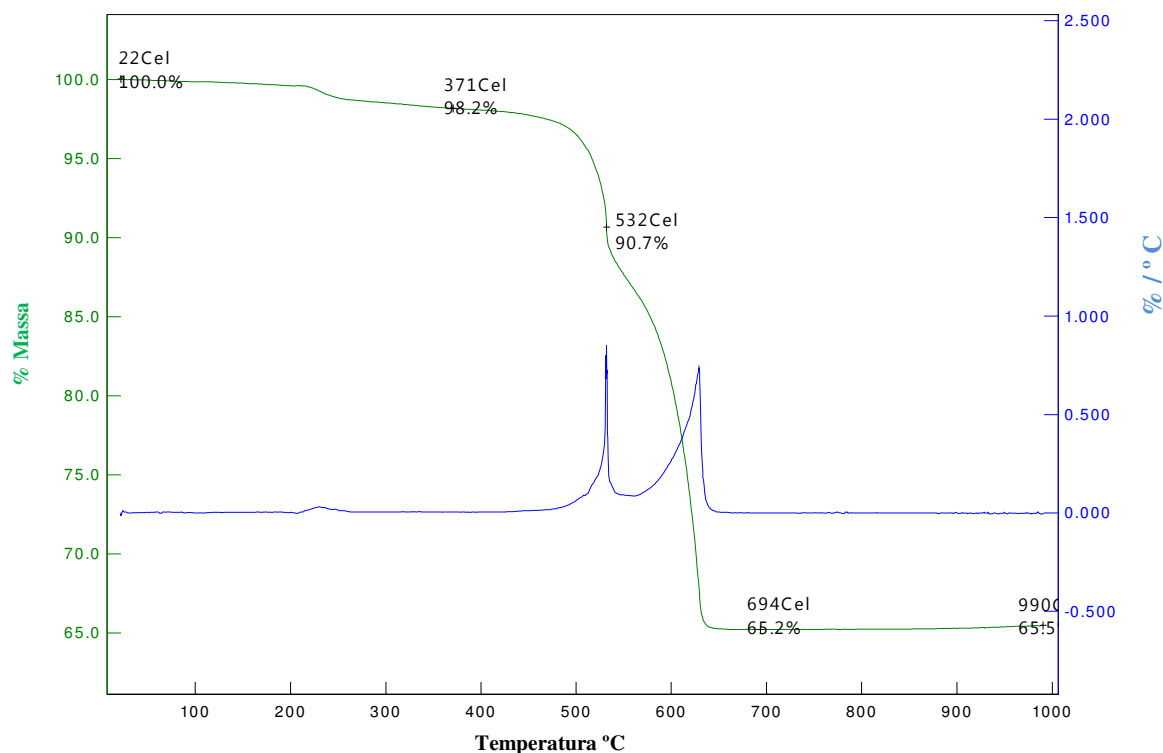
A partir destes resultados, foi também observado que todos os compósitos de PEI avaliados apresentaram uma boa homogeneidade no que diz respeito à distribuição da matriz polimérica. Este fato permite concluir que todas as amostras apresentaram uma boa compactação das camadas, corroborando com as observações obtidas por microscopia óptica.

4.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS LAMINADOS

4.4.1 Termogravimetria (TGA)

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. Os resultados das análises termogravimétricas (TGA) encontram-se apresentados nas Figuras 57, 58 e 59 para os compósitos PEI/ fibra de vidro, PEI/fibra de carbono e PEI/híbrido, respectivamente.

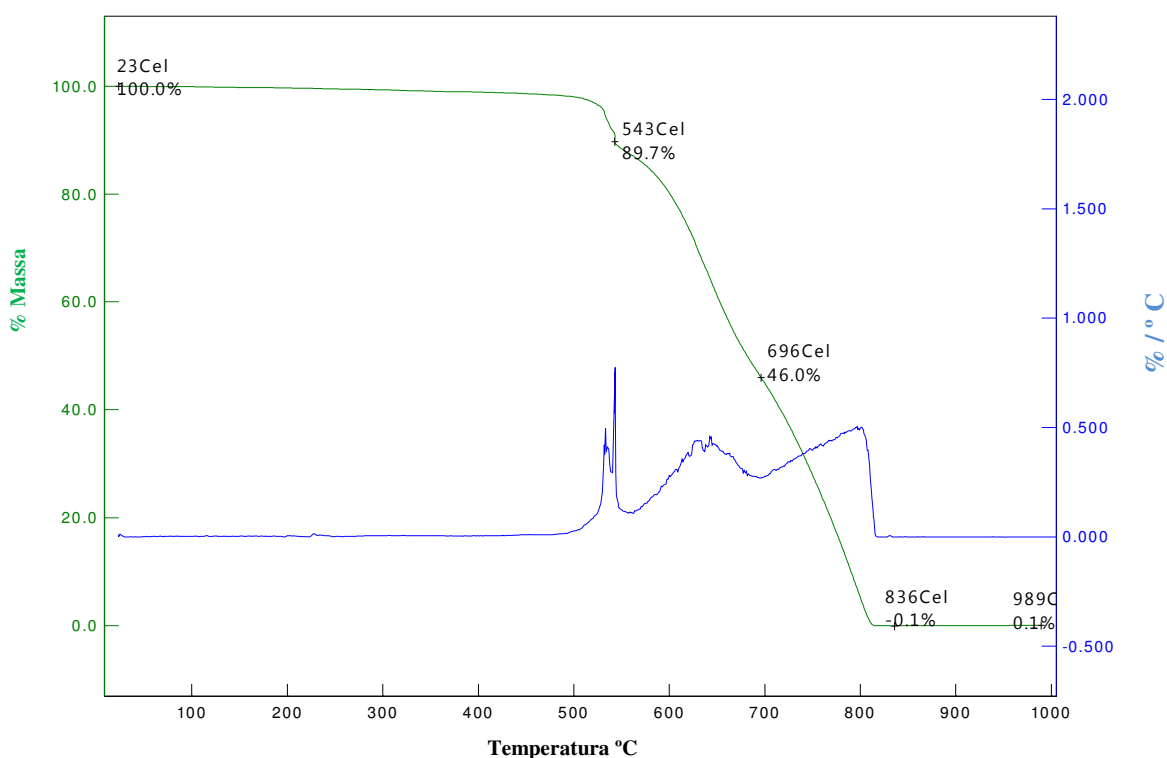
Figura 57- Análise termogravimétrica do compósito PEI/fibra de Vidro



A partir dos resultados provenientes da análise termogravimétrica apresentada na Figura 57, foi possível identificar as temperaturas de início e final de degradação das cadeias poliméricas dos compósitos, bem como a porcentagem em massa de degradação do material PEI/fibra de vidro. A temperatura de início de degradação do PEI/fibra de vidro foi de aproximadamente de 371°C, apresentando uma perda de massa de 1,8%, sendo a temperatura de final de degradação em torno de 694°C.

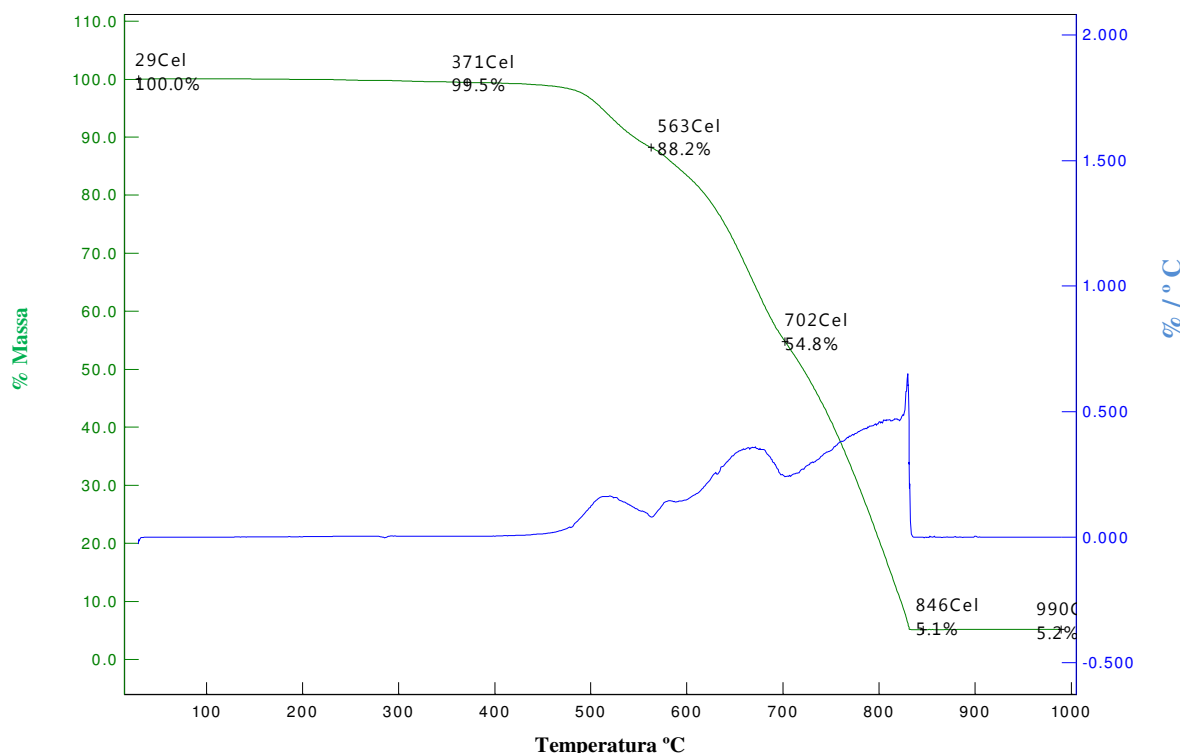
Na Figura 58, referente ao laminado PEI/fibra de carbono, foi possível observar o início de degradação do material ocorre na temperatura de 430°C. Como a análise foi realizada em ar sintético a fibra de carbono foi termo-oxidada não restando resíduo final na análise. Já na Figura 59 referente a análise de TGA para o laminado PEI/híbrido, a temperatura inicial de degradação ocorre em torno de 420°C e a temperatura final em 846 °C, com degradação de 95 %.

Figura 58- Análise termogravimétrica do compósito PEI/fibra de carbono.



Na Figura 58, referente ao laminado PEI/fibra de carbono, foi possível observar o início de degradação do material ocorre na temperatura de 430°C. Como a análise foi realizada em ar sintético a fibra de carbono foi termo-oxidada não restando resíduo final na análise. Já na Figura 59 referente a análise de TGA para o laminado PEI/híbrido, a temperatura inicial de degradação ocorre em torno de 420°C e a temperatura final em 846 °C, com degradação de 95 %.

Figura 59- Análise termogravimétrica do compósito PEI/híbrido.



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, obtidas por DMA para os três laminados estudados e comparados com a literatura ($T_g = 180^{\circ}\text{C}$ - 216°C)(OLIVEIRA; BOTELHO, 2007; OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009). 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).

4.4.2 DMA

A técnica de DMA apresenta sensibilidade de aproximadamente três ordens de grandeza superior à de uma técnica de análise térmica convencional como, por exemplo, DSC. Esta característica é particularmente interessante para a determinação de T_g em compósitos,

pois devido aos vários componentes presentes neste tipo de material torna-se difícil ou imprecisa a determinação da sua T_g utilizando-se, por exemplo, a técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC) (DE PAOLI, 2008).

A determinação da temperatura de transição vítrea (T_g) por DMA pode ser realizada de três formas sendo estas a partir do: *onset* do módulo de armazenamento (E'); pico no módulo de perda (E'') e pico no módulo $\tan \delta$ (fator de perda). A razão adimensional entre o módulo de perda (E'') e o módulo de armazenamento (E') estabelecem o amortecimento interno ou atrito interno das macromoléculas do polímero, ou seja, fator de perda $\tan \delta$, sendo este a medida comparativa da energia dissipada com a energia armazenada pelo material, considerado o indicador mais sensível de todos os movimentos moleculares que estão ocorrendo no material (MARINUCCI, 2011).

Desta forma, para este trabalho foram avaliadas as temperaturas de transição vítrea pela técnica de DMA dos três laminados estudados, soldados e não soldados, com a finalidade de verificar se, durante o processo de soldagem, irão ocorrer variações significativas nesta propriedade. A Tabela 9 resume os valores obtidos de T_g para os materiais estudados, obtidos a partir das curvas de DMA como apresentadas nos Apêndices B, C e D desta tese.

Tabela 9 - Valores encontrados de temperatura de transição vítrea a partir dos módulos de elasticidade e de perda e da tangente de perda dos compósitos estudados.

<i>Compósito</i>	<i>T_g por E'</i> ($^{\circ}C$)	<i>$T_g E''$</i> ($^{\circ}C$)	<i>$T_g \tan \delta$</i> ($^{\circ}C$)
<i>PEI/fibra de vidro</i>	182,0	185,3	203,0
<i>PEI/ fibra de carbono</i>	173,6	176,8	193,2
<i>PEI/ híbrido</i>	173,2	180,0	196,8

Uma vez que a literatura reporta que a temperatura de transição vítrea para a matriz PEI é da ordem de $180^{\circ}C$ (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009) e que as térmicas de DMA podem resultar em diferenças de até $10^{\circ}C$ para avaliar esta propriedade (BOTELHO, 2002), pode-se concluir que os valores de T_g para todos os laminados avaliados encontram-se de acordo com os apresentados em literatura.

4.5 DETERMINAÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA OS LAMINADOS

Neste trabalho, as principais variáveis a serem abordadas no processo de soldagem por resistência elétrica são a corrente elétrica, o tempo de soldagem, e a pressão aplicada durante a soldagem. A corrente elétrica a ser utilizada no processo de soldagem possui um limite inferior, abaixo do qual o aquecimento não é suficiente para promover a fusão da matriz na região de soldagem. Este valor depende, principalmente, da área de contato entre os eletrodos e da temperatura de fusão/amolecimento da matriz polimérica. Aumentando-se a intensidade de corrente elétrica, pode-se diminuir o tempo de fluxo desta, entretanto, há um limite superior que, se excedido, provocará o aquecimento de toda espessura do material entre os eletrodos, com possíveis penetrações excessivas destes na superfície do material, além deste aquecimento poder elevar a temperatura para valores próximos daqueles necessários para degradar a matriz polimérica. Desta forma, primeiramente é necessário à obtenção de uma janela de processo de soldagem, envolvendo as temperaturas mínimas e máximas que o processo poderá ocorrer com eficiência e sem que ocorra a degradação da matriz polimérica. Condições ótimas de operação e resultados são, quase sempre, obtidas nesta situação (AGEORGES et al., 1998) . Desta forma, esta etapa do trabalho apresenta a determinação dos valores mais apropriados de pressão, corrente elétrica e pressão a serem utilizados durante o processo de soldagem por resistência elétrica.

4.5.1 Estudo preliminar das condições e faixas de parâmetros de soldagem

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 vidro, 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: 20 A, 0,7 MPa e 50 s, respectivamente. Estes ensaios foram realizados dentro do limite de valores máximos e mínimos de capacidade do sistema de soldagem construído. Os valores preliminares, referentes aos testes para a obtenção da faixa de valores dos parâmetros de interesse no processo de soldagem por resistência do compósito PEI/fibra de vidro são apresentados na Tabela 10.

Com base nos ensaios utilizando o laminado de fibra de vidro também foram realizados ensaios para determinação dos parâmetros para a soldagem dos laminados de PEI/fibra de carbono e PEI/híbrido. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 10- Ensaios iniciais para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/ fibra de vidro.

Ensaio Preliminares	Corrente elétrica (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Situação após ensaio
1	20	0,7	50	Não soldou
2	20	3,0	300	Não soldou
3	25	0,7	50	Soldou sem degradação
4	30	0,7	50	Soldou sem degradação
5	35	0,7	50	Soldou com degradação

Tabela 11- Ensaios iniciais para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/ híbrido.

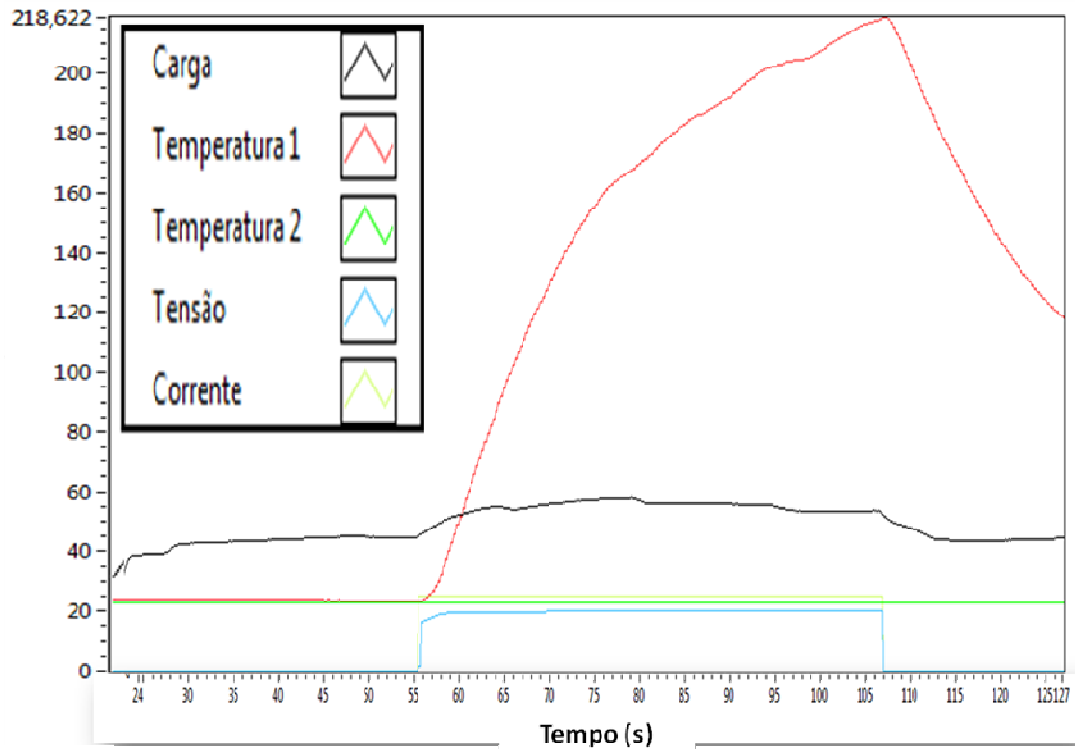
Ensaio Preliminares	Corrente elétrica (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Situação após ensaio
1	25	0,7	50	Não soldou
2	27	3,0	300	Não soldou
3	29	0,7	50	Soldou sem degradação
4	30	0,7	50	Soldou sem degradação
5	35	0,7	50	Soldou com degradação

Tabela 12- Ensaios iniciais para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/ fibra de carbono.

Ensaio Preliminares	Corrente elétrica (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Situação após ensaio
1	29	0,7	50	Não soldou
2	30	0,7	50	Soldou
3	32	0,7	50	Soldou sem degradação
4	32	3,0	300	Soldou sem degradação
5	37	0,7	50	Soldou com degradação

A temperatura é o fator referente ao aquecimento suficiente para que as peças formem juntas sem degradação do material e com valor máximo de resistência de união. Esta temperatura não deve exceder valores muito acima da temperatura de transição vítrea do polímero na superfície diretamente em contato com o eletrodo, caso contrário poderá ocorrer a degradação do material. O tempo de soldagem é o tempo necessário para a corrente fluir e desenvolver a junção das peças (WAINER; BRANDI; DE MELO, 2008; MARQUES et al., 2010). As Figuras 60, 61 e 62 apresentam os resultados provenientes dos ensaios preliminares indicando a temperatura máxima atingida durante o processo.

Figura 60- Resultados da temperatura atingida durante o processo de soldagem por resistência elétrica para o compósito PEI/fibra de vidro.

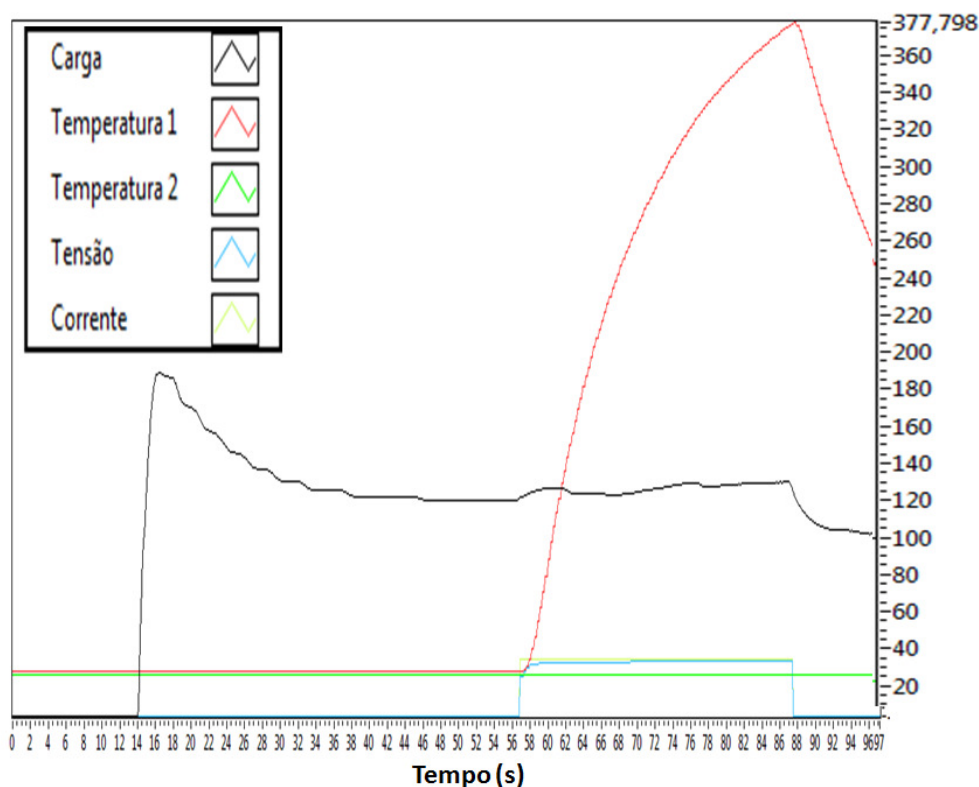


Fonte: O autor.

Como pode ser observado, a temperatura máxima atingida na Figura 60, foi de 218° C, inferior a temperatura de degradação observada a partir dos resultados de TGA e próxima a temperatura de transição vítrea para esta matriz polimérica (aproximadamente 180°C) obtida por DMA como os laminados estudados. Foi também realizada a análise de temperatura para o ensaio 4 (Tabela 10) em que será adotado buscando-se valores máximos de soldagem até o limite de degradação para o laminado PEI/fibra de carbono. Para o laminado PEI/fibra de carbono, o valor de temperatura máxima atingido é apresentado na Figura 61. A temperatura máxima atingida neste caso foi de 378°C, sendo que a temperatura de degradação inicial observada para este laminado pela técnica de TGA foi de 430 °C.

Referente ao ensaio 4 da Tabela 11, a imagem da tela do *software* é apresentada na Figura 62.

Figura 61- Resultados preliminares referentes aos parâmetros de soldagem para o compósito PEI/fibras de carbono.

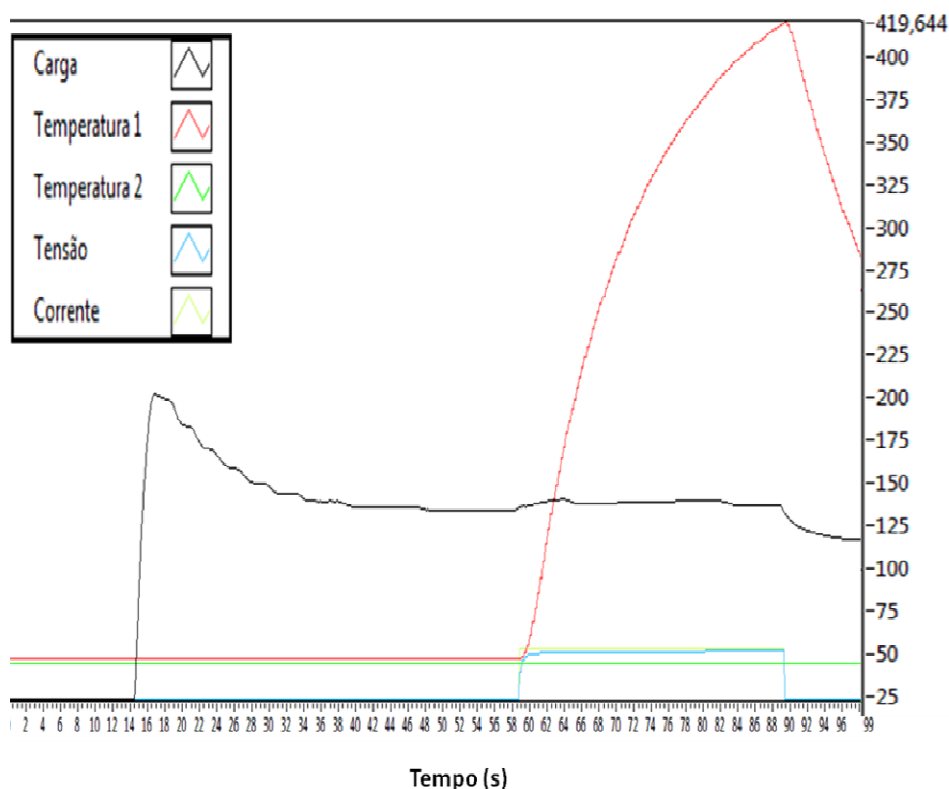


Fonte: O autor.

A Figura 62 apresenta os resultados preliminares para a avaliação dos parâmetros mais adequados para a soldagem de compósitos PEI/híbrido. A temperatura máxima atingida para esta avaliação foi de 419°C (este material começa a se degradar em 420°C) .

Em todos os materiais estudados, para a soldagem, foi mantida a pressão mínima (0,7MPa) no tempo mínimo (50s) para a garantia da soldagem para a definição dos valores de corrente elétrica. Nesta etapa ainda de definição dos parâmetros de soldagem, também foi realizada uma avaliação preliminar comparando-se a influência do sentido das fibras (0 e 90°) na soldagem adotando-se o teste de *Lap Shear* para esta avaliação. Para este estudo, foi selecionado o compósito reforçado com fibras de carbono. Os parâmetros de soldagem foram: corrente elétrica de 30A, pressão de 0,7MPa e tempo de soldagem de 50 segundos. Os resultados provenientes deste estudo encontram-se apresentados na Tabela 13.

Figura 62 - Resultados preliminares referentes aos parâmetros de soldagem para o compósito PEI/híbrido.



Fonte: O autor.

Tabela 13- Resultados de *Lap Shear* (tensão) da soldagem para avaliação da melhor direção da fibra.

Direção da fibra soldagem	0°	90°
	Tensão de Ruptura (MPa)	
Ensaio		
1	16,56	21,74
2	16,19	26,10
3	15,20	27,23
4	14,00	22,81
5	16,01	21,51
Média	15,59	23,88
Desvio padrão (±)	1,02	2,62

Os valores apresentados na Tabela 13 indicam que a utilização de laminados a 90° proporcionam melhores resultados de soldagem, no que se refere à avaliação por *Lap Shear*.

4.5.2 Aplicação do Planejamento Experimental

Esta seção teve como objetivo determinar os parâmetros de soldagem para os laminados estudados, utilizando como variáveis independentes: pressão; corrente elétrica e tempo de soldagem, baseando-se nos ensaios preliminares anteriormente apresentados. Como variável de resposta para o estudo deste processo foi adotada a tensão de ruptura obtida a partir do ensaio *Lap Shear*.

Como foi apresentado no Capítulo anterior, o planejamento experimental denominado *Central Composite Design* (CCD) para $k = 3$ fatores, é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo 2^3 ; um *design* com um determinado número de pontos centrais (nesse trabalho, foram avaliadas seis replicatas no ponto central), que adicionalmente apresenta um grupo de níveis extras denominados de pontos axiais. O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores envolvidos no experimento ($2 \times 3 = 6$). Para este estudo foram avaliadas cinco replicatas do fatorial completo (2^3) e cinco replicatas dos pontos axiais. Portanto, tendo-se $(8+6) \times 5 + 5 = 75$ experimentos para cada laminado estudado. Os resultados individuais de todos os ensaios realizados são apresentados nos Apêndices E e F.

A matriz experimental e os resultados obtidos dos experimentos realizados com os compósitos PEI/fibra de vidro, PEI/fibra de carbono e PEI/ híbrido são apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16, respectivamente. Os resultados foram avaliados utilizando-se o programa *Design-Expert 6.0* (Stat-Ease Corporation, USA).

Na Tabela 14 verifica-se que os valores de tensão de ruptura obtidos a partir do ensaio *Lap Shear* encontram-se entre 0,5 a 11,67 MPa para laminados de PEI/fibras de vidro soldados, sendo o maior valor obtido no ensaio 17.

Em relação aos valores obtidos de *Lap Shear* na soldagem do compósito de PEI/fibra de carbono, os resultados situaram-se na faixa entre 5,21 e 23,9 MPa sendo os valores obtidos maiores em relação ao compósito de fibra de vidro. Ainda, a partir dos resultados encontrados, foi observado que o maior valor de resistência *Lap Shear* foi encontrado para a combinação proveniente do experimento 1 (Tabela 15).

Tabela 14 - Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*Lap Shear*) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de vidro.

Experimento	Variáveis Estudadas						Variável
	Codificadas			Reais			Resposta
	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	-1	-1	-1	50	25,00	0,70	1,01
2	+1	-1	-1	300	25,00	0,70	3,39
3	-1	+1	-1	50	30,00	0,70	4,93
4	+1	+1	-1	300	30,00	0,70	11,97
5	-1	-1	+1	50	25,00	3,00	1,89
6	+1	-1	+1	300	25,00	3,00	4,95
7	-1	+1	+1	50	30,00	3,00	9,64
8	+1	+1	+1	300	30,00	3,00	11,18
9	- α	0	0	50	27,50	1,85	10,09
10	+ α	0	0	300	27,50	1,85	11,64
11	0	- α	0	175	23,30	1,85	0,50
12	0	+ α	0	175	31,70	1,85	7,69
13	0	0	- α	175	27,50	0,70	11,42
14	0	0	+ α	175	27,50	3,00	11,34
15	0	0	0	175	27,50	1,85	10,01
16	0	0	0	175	27,50	1,85	11,56
17	0	0	0	175	27,50	1,85	11,67
18	0	0	0	175	27,50	1,85	10,79
19	0	0	0	175	27,50	1,85	10,09

Tabela 15 - Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*Lap Shear*) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/ fibra de carbono.

Experimento	Variáveis Estudadas						Variável
	Codificadas			Reais			Resposta
	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	-1	-1	-1	50	30	0,70	23,88
2	+1	-1	-1	300	30	0,70	14,30
3	-1	+1	-1	50	32	0,70	22,80
4	+1	+1	-1	300	32	0,70	10,19
5	-1	-1	+1	50	30	3,00	21,23
6	+1	-1	+1	300	30	3,00	13,32
7	-1	+1	+1	50	32	3,00	20,98
8	+1	+1	+1	300	32	3,00	13,14
9	- α	0	0	300	31	1,85	23,82
10	+ α	0	0	350	31	1,85	12,15
11	0	- α	0	175	27	1,85	21,65
12	0	+ α	0	175	35	1,85	5,21
13	0	0	- α	175	31	0,70	12,68
14	0	0	+ α	175	31	3,00	14,22
15	0	0	0	175	31	1,85	15,12
16	0	0	0	175	31	1,85	13,73
17	0	0	0	175	31	1,85	15,00
18	0	0	0	175	31	1,85	12,00
19	0	0	0	175	31	1,85	13,00

Tabela 16 - Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*Lap Shear*) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/ híbrido.

Experimento	Variáveis Estudadas						Variável
	Codificadas			Reais			Resposta
	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	-1	-1	-1	50	25,00	0,70	19,65
2	1	-1	-1	300	25,00	0,70	11,33
3	-1	-1	-1	50	30,00	0,70	20,25
4	1	-1	-1	300	30,00	0,70	4,11
5	-1	1	1	50	25,00	3,00	14,12
6	1	1	1	300	25,00	3,00	11,80
7	-1	1	1	50	30,00	3,00	19,74
8	1	1	1	300	30,00	3,00	9,75
9	- α	0	0	50	27,50	1,85	10,70
10	+ α	0	0	300	27,50	1,85	10,00
11	0	- α	0	175	23,30	1,85	17,61
12	0	+ α	0	175	31,70	1,85	3,95
13	0	0	- α	175	27,50	0,70	15,20
14	0	0	+ α	175	27,50	3,00	12,03
15	0	0	0	50	25,00	0,70	9,00
16	0	0	0	50	25,00	0,70	10,00
17	0	0	0	50	25,00	0,70	8,00
18	0	0	0	50	25,00	0,70	7,50
19	0	0	0	50	25,00	0,70	7,50

Os valores obtidos de tensão de ruptura na soldagem do compósito PEI/híbrido (fibra de carbono e vidro) apresentaram-se intermediários aos valores obtidos pelo compósito com fibra de vidro e o compósito com fibra de carbono. Neste estudo, os valores de *Lap Shear* na soldagem do compósito híbrido se apresentou na faixa de 3,95 a 20,25 MPa, sendo o valor máximo observado para a combinação realizada no experimento 3 (Tabela 16).

Portanto, analisando-se os valores obtidos para os três compósitos estudados em relação ao valor mais elevado da variável resposta, a tensão de ruptura da junta soldada, para o compósito de fibra de carbono se sobressaiu em relação aos demais. Estes valores são apresentados e comparados na Tabela 17.

Tabela 17-Valores máximos obtidos pelo ensaio de Lap Shear nos experimentos realizados nas condições de soldagem dos compósitos estudados.

Compósito soldado	Condições utilizadas			Valor máximo de tensão de ruptura obtido (MPa)
	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	
PEI/Fibra de Vidro	300	30	0,7	11,67
PEI/Fibra de Carbono	50	30	0,7	23,88
PEI/híbrido	50	30	0,7	20,25

Desta forma, pode-se concluir que, embora tenha sido utilizada a mesma matriz polimérica e o mesmo tipo de tecido como reforço, a utilização de diferentes tipos de fibras resultam em diferentes qualidades da soldagem (valores de tensão de ruptura), provavelmente devido às diferenças de distribuição de calor na região de soldagem promovida por estes reforços.

Com o intuito de assegurar a confiabilidade na análise estatística realizada anteriormente, neste trabalho optou-se também pela realização da análise de variância. A análise de variância é um procedimento estatístico, que se refere à soma dos quadrados calculados a partir das informações retiradas do processo. Esta é utilizada para medir o efeito individual dos fatores (PANNEERSELVAM; ARAVIDAN; HAQ, 2012; BUTTON, 2005).

Segundo Moldaviski e Cohen (1996) equações podem ser estatisticamente validadas a partir dos seguintes testes:

- 1) Análise de variância (ANOVA) que determina a significância de cada termo e fornece estimativa da qualidade do ajuste;
- 2) Coeficiente de correlação (R^2);
- 3) Falta de ajuste, que indica se a diferença entre os valores experimentais e os valores calculados pelo modelo podem ser explicados pelo erro experimental. Esses testes podem ser realizados com base nos critérios de aceitabilidade expostos na Tabela 18.

Tabela 18 - Critérios para validação de modelos.

ANOVA	R^2	Falta de ajuste	Modelo Validado
	$R^2 > 0,9$	-----	Sim
$p < 0,10$	$0,7 < R^2 < 0,9$	$p > 0,01$	Sim
		$p < 0,01$	Não
	$R^2 < 0,7$	-----	Não
$p > 0,10$	-----	-----	Não

Fonte: (MOLDAVISKI; COHEN, 1996).

Para este trabalho, a avaliação dos efeitos das variáveis empregadas sobre a variável resposta foi também possível utilizando a análise de variância (ANOVA), com a qual se verificou um melhor ajuste dos resultados com modelo quadrático. Neste estudo, adotou-se como critério da análise que uma determinada variável afetou estatisticamente a resposta, quando o nível de significância obtido for inferior a 5 %, ou seja, um nível de significância estatística de 95%. Valores de "Prob> p" menores que 0,05 indicam termos do modelo são significativos. Neste caso, a corrente e o tempo foram considerados termos significativos do modelo, considerando-se o nível de confiança de 95%.

Os resultados obtidos foram avaliados utilizando-se o programa *Design-Expert* 6.0 (StatEase Corporation, USA). Este último programa foi também empregado para determinação dos valores máximos de tensão de ruptura (MPa) das juntas soldadas, possíveis de serem obtidos dentro da faixa de valores estudados. Neste caso, o *software* executa um algoritmo de otimização numérica baseado na função de "desejabilidade" e também fornece os valores referentes à análise de variância (ANOVA). De posse da construção do modelo, a significância do mesmo é verificada por meio da Análise de Variância (ANOVA), sendo que este teste avalia se o modelo é estatisticamente significativo. Pelo ANOVA também é possível verificar quais são os termos significativos do modelo e quais podem ser removidos. Os modelos são ajustados por meio do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído. Associado com este coeficiente tem-se o R^2 ajustado (R^2 (adj.)), que leva em consideração o fato de que o R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população (RODRIGUES; IEMMA, 2005). Os resultados da ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis de tempo, pressão e temperatura para a soldagem dos compósitos de PEI/fibra de vidro são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/fibra de vidro nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.

Fator	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p
Modelo	281,12	9	31,24	15,73	< 0,0001*
X ₁	24,24	1	24,24	12,21	0,0058*
X ₂	108,93	1	108,93	54,87	< 0,0001*
X ₃	3,92	1	3,92	1,97	0,1904
X ₁ ²	6,20	1	6,20	3,12	0,1016
X ₂ ²	101,99	1	101,99	51,38	< 0,0001*
X ₃ ²	2,47	1	2,47	1,24	0,2909
X ₁ X ₂	1,22	1	1,22	0,61	0,4515
X ₁ X ₃	2,90	1	2,90	1,46	0,2545
X ₂ X ₃	0,27	1	0,27	0,14	0,7177
Erro residual	19,85	10	1,99		
Falta de ajuste	17,49	5	3,50	7,42	0,0232
Erro Puro	2,36	5	0,47		
R²	0,8747				

*p: Valores significativos para $p < 0,05$, X₁:tempo codificado; X₂:corrente codificada; X₃:pressão codificada.

Os resultados da ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis: tempo, pressão e corrente para a soldagem dos compósitos de PEI/ fibra de carbono são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/fibra de carbono nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.

Fator	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p
Modelo	456,11	9	50,68	18,11	< 0,0001*
X ₁	271,12	1	271,12	96,90	< 0,0001*
X ₂	127,38	1	127,38	45,53	< 0,0001*
X ₃	0,004	1	0,004	0,0015	0,9693
X ₁ ²	68,07	1	68,07	24,33	0,0008*
X ₂ ²	0,14	1	0,14	0,051	0,8260
X ₃ ²	0,001	1	0,001	0,0003	0,9853
X ₁ X ₂	1,10	1	1,10	0,39	0,5458
X ₁ X ₃	5,17	1	5,17	1,85	0,2072
X ₂ X ₃	2,82	1	2,82	1,01	0,3416
Erro residual	25,18	9	2,80		
Falta de ajuste	18,12	5	3,62	2,05	0,2529
Erro Puro	7,06	4	1,77		
R²	0,8954				

*p: Valores significativos para $p < 0,05$, X₁: tempo codificado; X₂:corrente codificada; X₃:pressão codificada.

Os resultados da ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente para a soldagem dos compósitos de PEI/ híbrido são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21- Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/híbrido nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.

Fator	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p
Modelo	372,61	9	41,40	5,90	0,0072*
X ₁	146,65	1	146,65	20,89	0,0013*
X ₂	74,56	1	74,56	10,62	0,0099*
X ₃	0,96	1	0,96	0,14	0,7198
X ₁ ²	74,48	1	74,48	10,61	0,0099*
X ₂ ²	8,62	1	8,62	1,23	0,2965
X ₃ ²	79,23	1	79,23	11,29	0,0084*
X ₁ X ₂	29,99	1	29,99	4,27	0,0687
X ₁ X ₃	18,45	1	18,45	2,63	0,1394
X ₂ X ₃	12,98	1	12,98	1,85	0,2070
Erro residual	63,17	9	7,02		
Falta de ajuste	48,87	5	9,77	2,73	0,1757
Erro Puro	14,30	4	3,58		
R²	0,7101				

*p: Valores significativos para $p < 0,05$, X₁:tempo codificado; X₂:corrente codificada; X₃:pressão codificada.

A partir deste estudo, verificou-se que, na soldagem do compósito PEI/fibra de vidro, as variáveis significativas foram a corrente elétrica e o tempo. Isto é constatado na Tabela 19, que mostra o teste de significância dos efeitos das variáveis independentes (tempo, corrente e pressão) sobre a variável resposta a tensão de ruptura avaliada a partir do teste de *Lap Shear*. Com esta análise verificou-se que a tensão de ruptura (variável resposta) das amostras soldadas foi dependente das variáveis independentes tempo e corrente elétrica, sendo que, a corrente também foi significativa considerando o efeito quadrático. Entretanto, a pressão e as interações desta variável não foram significativas para variável resposta considerada. Em relação ao valor de R² obtido, mais de 87,47% da variabilidade experimental pode ser explicada pelo modelo quadrático relativo à variável resposta. Para a soldagem do compósito

PEI/fibra de carbono, observou-se com a análise de variância que os fatores significativos do processo foram tempo, corrente elétrica e tempo quadrático, considerando o modelo quadrático. Este modelo também foi considerado significativo em nível de significância de 95% e o valor de R^2 obtido indica que mais de 89,54% da variabilidade experimental podem ser explicadas por este modelo. O modelo proposto para a análise da soldagem do laminado PEI/híbrido foi estatisticamente significativo sem falta de ajuste ao nível de confiança de 95%, e mais de 71% da variabilidade experimental podendo ser explicada pelo modelo ($R^2=0,7101$). Em relação às significâncias das variáveis independentes estudadas neste trabalho, foram significativas, de acordo com a análise de variância, o tempo, a corrente elétrica, o tempo quadrático e a pressão quadrática.

O teste p (Tabelas 19 a 21) indicou significância estatística ao nível de 99% de confiança, não sendo constatada falta de ajuste para nenhum dos modelos avaliados (nível de confiança de 90%). Verifica-se, ainda, a partir do valor de R^2 que todas as equações ajustadas foram capazes de explicar mais de 70% da variabilidade dos valores experimentais. Desta forma, considerou-se que os modelos estatísticos obtidos foram adequados para descrever o processo de soldagem dos laminados em função do tempo, da corrente elétrica e pressão aplicada.

4.5.2.1 Modelos empíricos para as respostas na soldagem dos compósitos

Os valores residuais de um experimento fatorial desempenham papel importante na garantia de adequação de modelo. Do ponto de vista matemático, eles são a diferença entre as observações e as médias dos valores reais correspondentes (MONTGOMERY, 2004). Os gráficos de probabilidade normal podem auxiliar na análise do grau de ajuste do modelo relacionado ao planejamento fatorial. A partir das Figuras 63 a 65 pode-se observar que os valores de resíduos em ajuste estão independentes e normalmente distribuídos em torno da reta nos casos avaliados.

Figura 63- Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente ao laminado PEI/fibra de vidro.

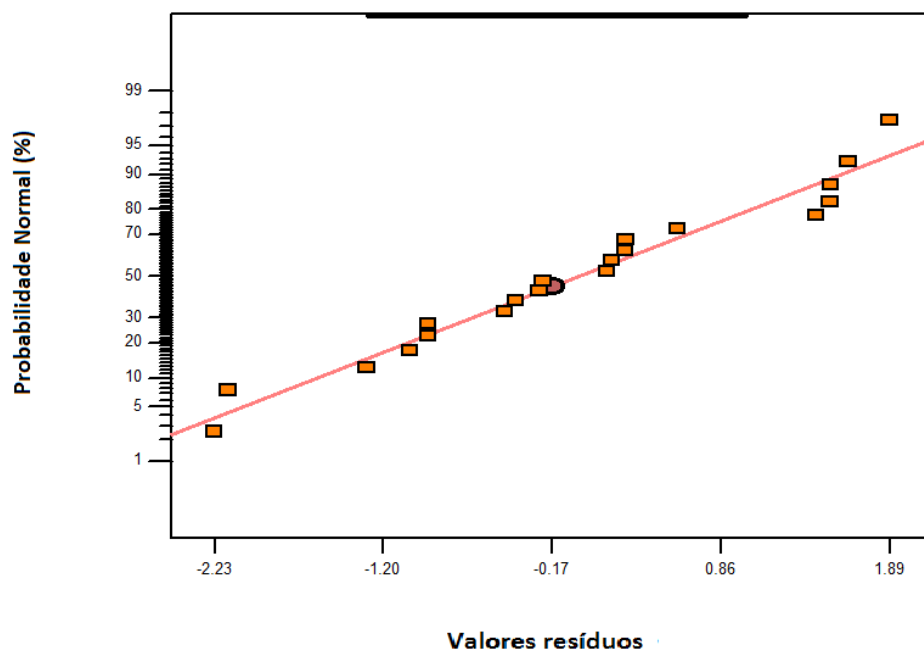


Figura 64- Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente ao laminado PEI/fibra de carbono.

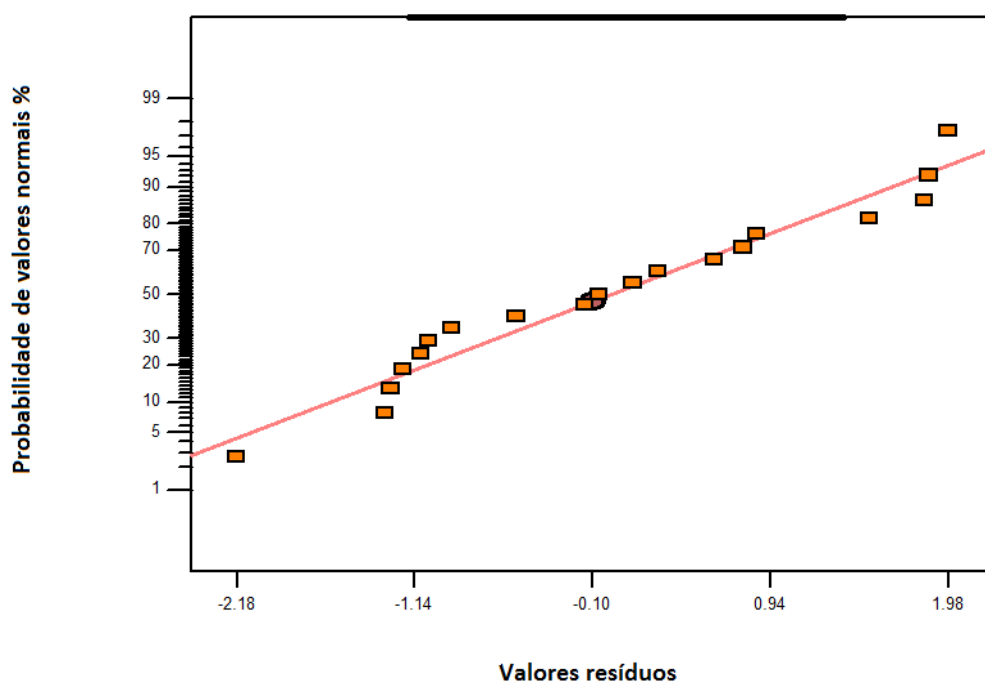
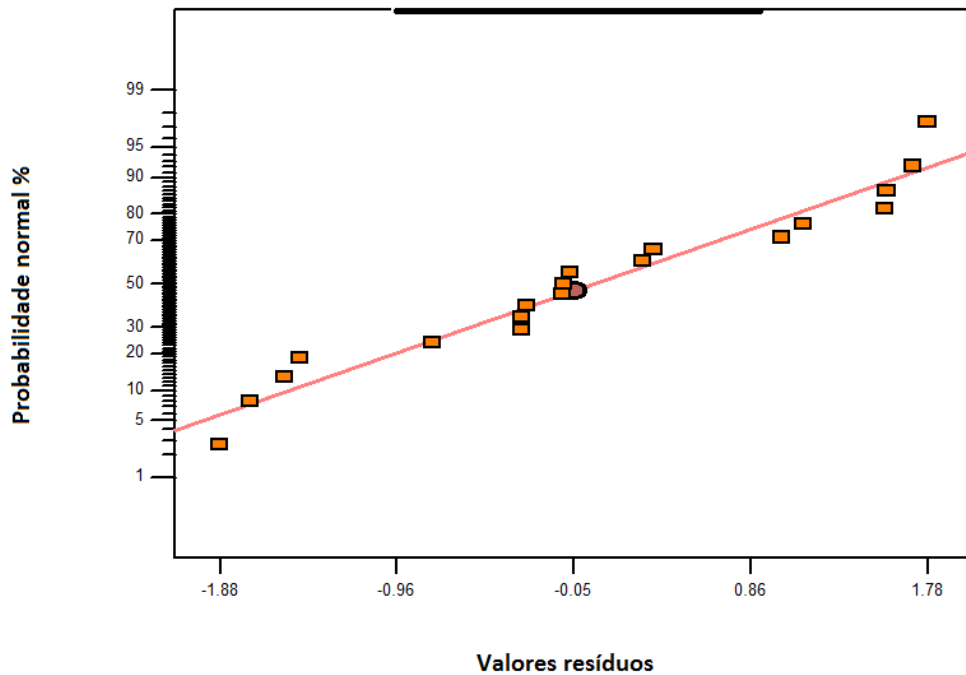


Figura 65- Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente ao laminado PEI/híbrido.



Nos gráficos apresentados anteriormente, pode-se verificar nos três casos avaliados um modelo bem ajustado com relação às variáveis estudadas, sendo este capaz de representar a informação sistemática contida nos dados e deixando os resíduos na parte aleatória, isto é, o ruído contido nas medições. Este fato pode ser observado nos valores próximos à reta de ajuste. A partir dos resultados das tabelas de ANOVA, foi possível compor os modelos estatísticos incluindo os coeficientes correspondentes aos efeitos significativos para o processo de soldagem dos laminados estudados utilizando-se do elemento resistivo malha de aço inox de 200 mesh. Os coeficientes relativos aos efeitos não significativos foram excluídos dos modelos. Os modelos obtidos são apresentados pelas equações 10 a 12, correspondendo aos modelos da soldagem dos laminados PEI/fibra de vidro, PEI/fibra de carbono e PEI/híbrido, respectivamente. Os modelos para os laminados estudados foram validados como sendo do tipo quadrático não apresentando falta de ajuste na ordem de 95%.

$$\text{Lap Shear (MPa)} = -333,33 + 0,017121 \cdot X_1 + 24,26747 \cdot X_2 - 0,42683 \cdot X_2^2 \quad (10)$$

$$\text{Lap Shear (MPa)} = 52,12 - 0,032 \cdot X_1 - 1 \cdot X_2 + 2,12 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 - 2,97 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (11)$$

$$\text{Lap Shear (MPa)} = 169,96 + 0,24 \cdot X_1 - 8,13 \cdot X_2 - 8,66 \cdot 10^{-5} \cdot X_1^2 + 3,20 \cdot X_3^2 - 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (12)$$

Em que: X_1 = Tempo de soldagem em segundos; X_2 = corrente aplicada em Amperes e X_3 = pressão aplicada nas peças na soldagem em MPa.

Geralmente, para a estimativa dos coeficientes definidos pelos modelos das equações (2.6) e (2.7) tipicamente utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (*Ordinary Least Squares* – OLS). Desta forma, constrói-se uma função aproximada relacionando as respostas de interesse com as variáveis de processo. Empregando-se, ainda, o programa *Design-Expert*, para este trabalho procedeu-se à busca dos valores máximos de resistência obtidos por *Lap Shear* dentro dos valores para as variáveis estudadas.

A partir das condições otimizadas foram construídos, utilizando-se o mesmo programa, gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis buscando-se os maiores valores preditos pelo modelo dos ensaios de *Lap Shear*.

As superfícies de resposta com as regiões de otimização são apresentadas nas Figuras 66 a 68.

Analisando estatisticamente os resultados provenientes da soldagem do laminado PEI/fibra de vidro (Figura 66) o valor máximo da variável resposta predita pelo programa de acordo com os resultados experimentais foi de 12,64 MPa, que indicou o emprego das variáveis independentes estudadas em valores aprimorados dentro das faixas pré-determinadas, sendo estas: 218,4s, 29,11 A e 0,7 MPa.

Para a soldagem do compósito PEI/fibra de carbono o valor máximo da resistência obtida a partir do teste de *Lap Shear* foi de 24,55 MPa, que indicou o emprego das variáveis independentes estudadas em valores aprimorados das faixas estipuladas sendo estas de 51,90s; 30,22 A e 0,99 MPa (Figura 67).

Finalmente, para a análise da soldagem do compósito híbrido (Figura 68), esta apresentou valor do teste de *Lap Shear* de 20,29 MPa, com os valores das variáveis independentes aprimoradas de 50,17s; 30,41 A e 0,7MPa.

Adicionalmente, as Figuras 69 a 71 mostram os valores experimentais obtidos, assim como os resultados teóricos previstos pelo software *Design-Expert* para os modelos estudados.

Figura 66- a) Superfície de resposta e b) curvas de nível para o laminado PEI/fibra de vidro em função do tempo e da corrente elétrica aplicada.

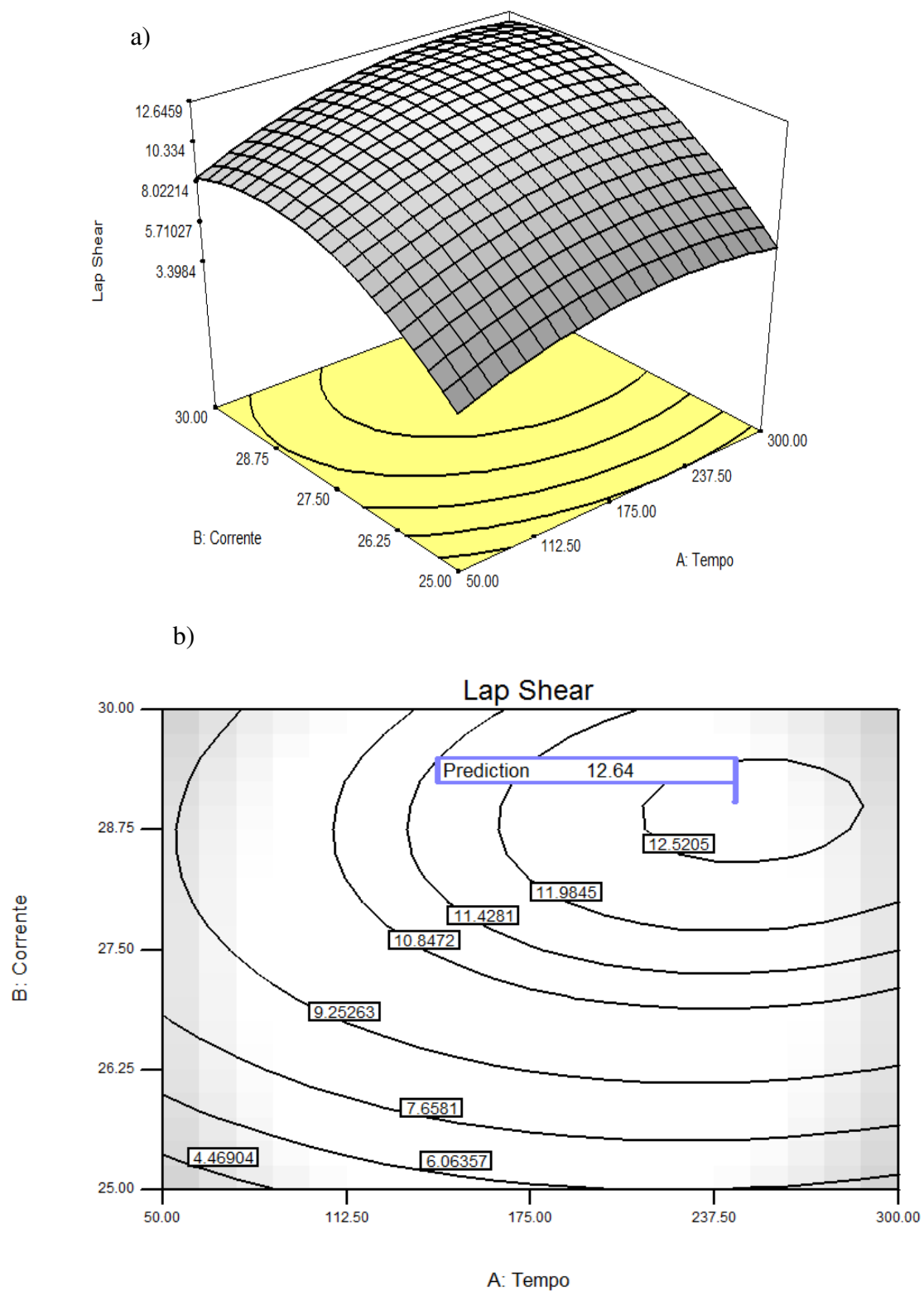


Figura 67. a) Superfície de resposta e b) curvas de nível para o laminado PEI/fibra de carbono em função do tempo e da corrente elétrica aplicada.

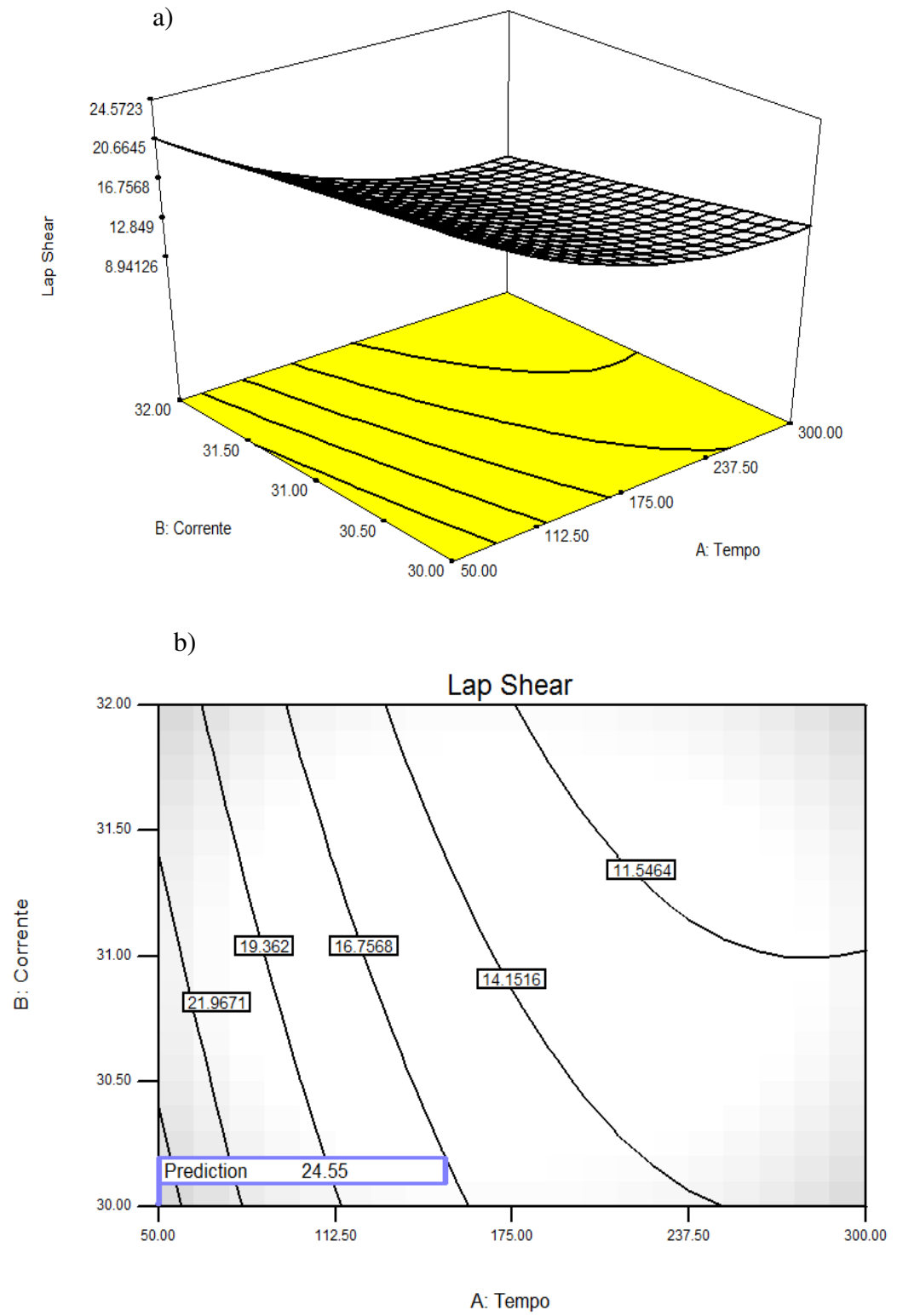


Figura 68. a) Superfície de resposta e b) curvas de nível para o laminado PEI/híbrido em função do tempo e da corrente elétrica aplicada.

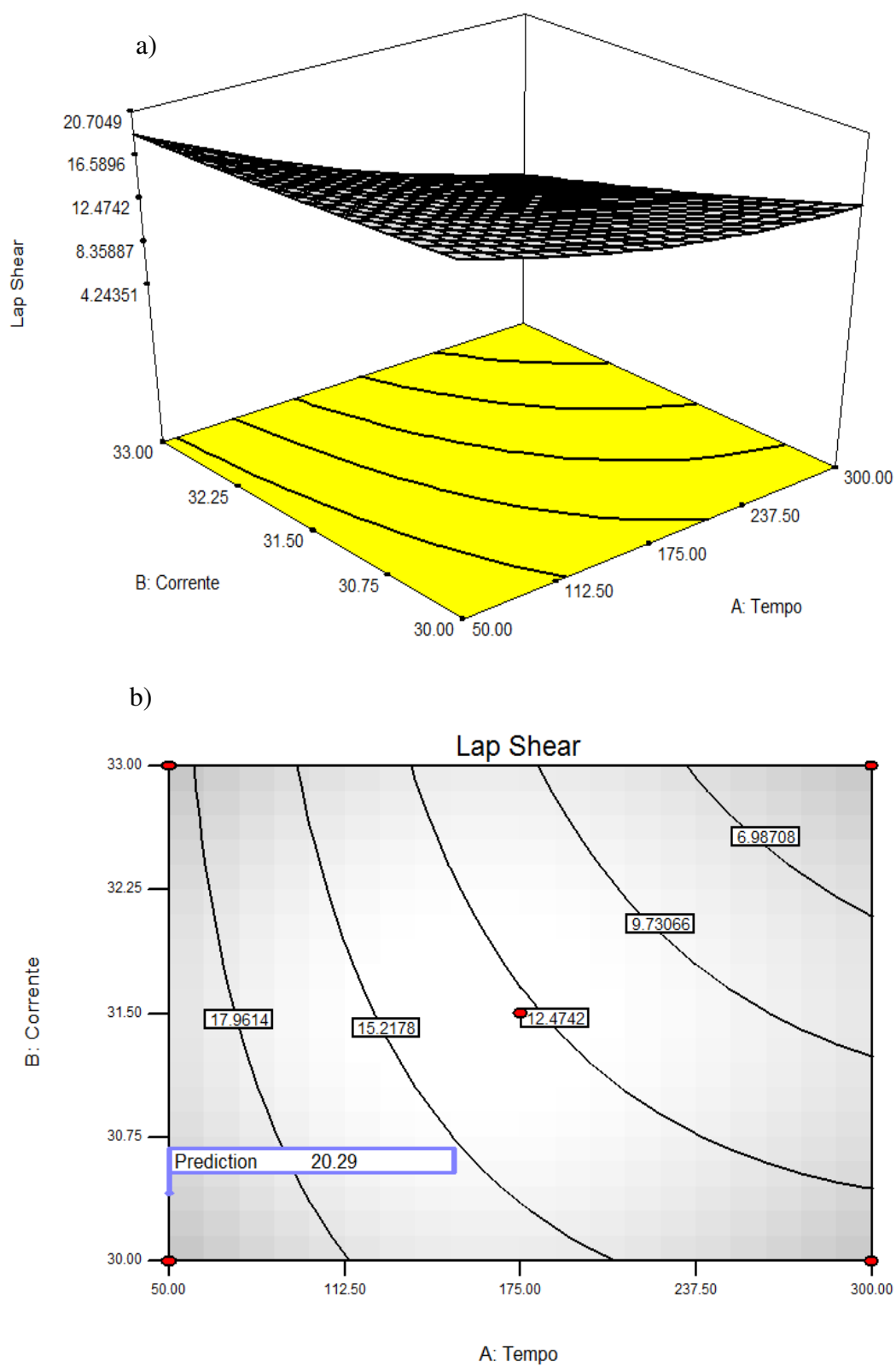


Figura 69- Valores experimentais obtidos em função dos valores preditos pelo modelo estatístico na soldagem do laminado PEI/fibra de vidro.

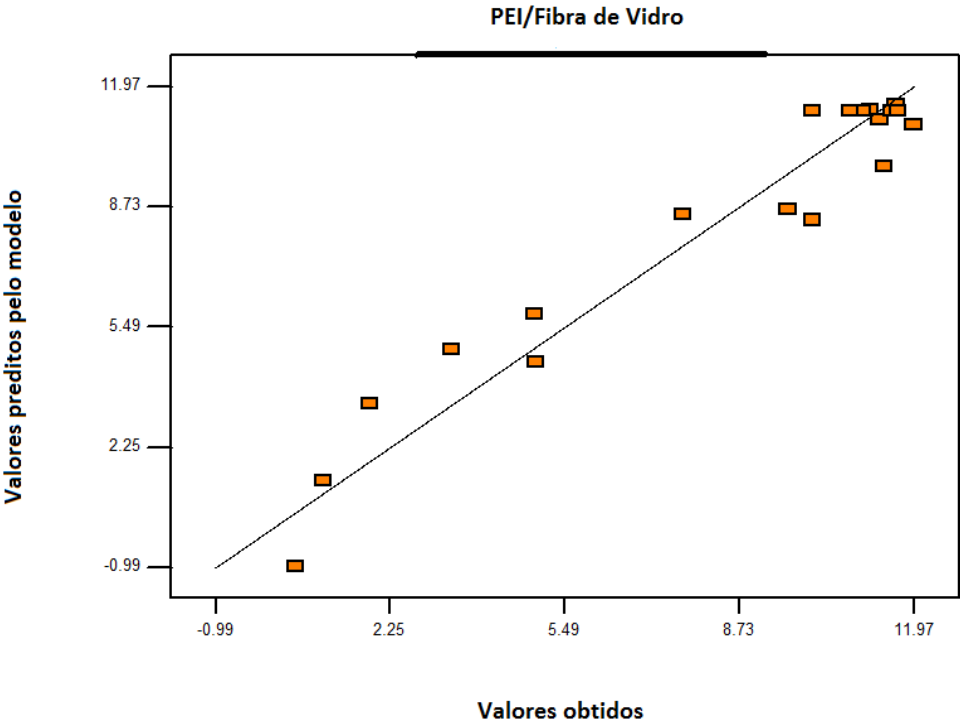


Figura 70- Valores experimentais obtidos em função dos valores preditos pelo modelo estatístico na soldagem do laminado PEI/fibra de carbono.

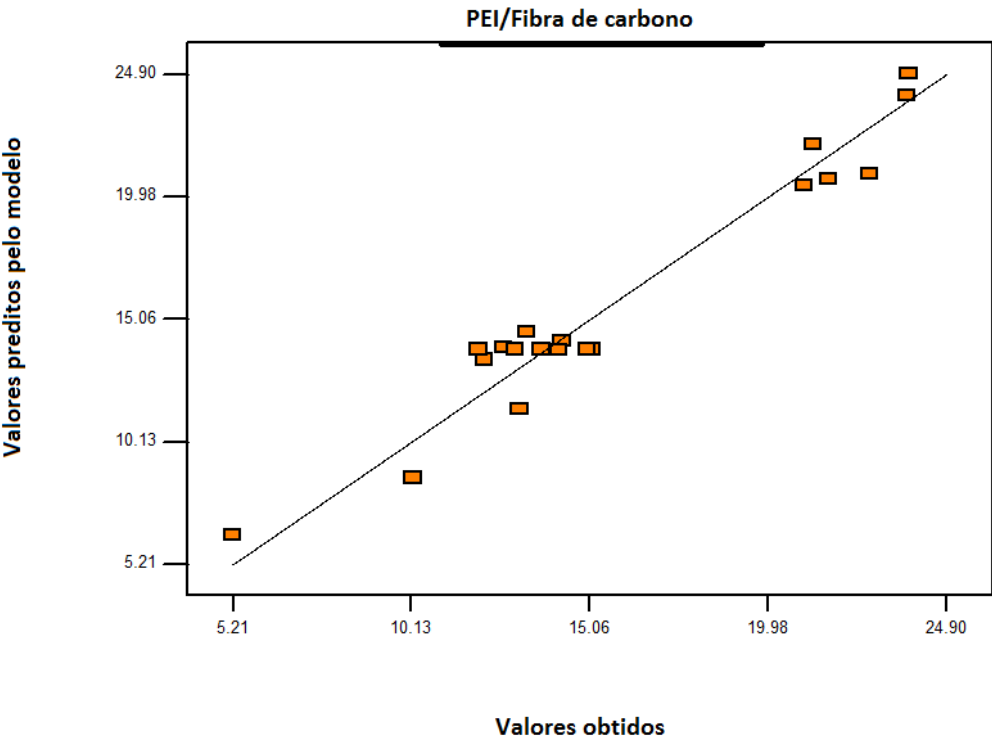
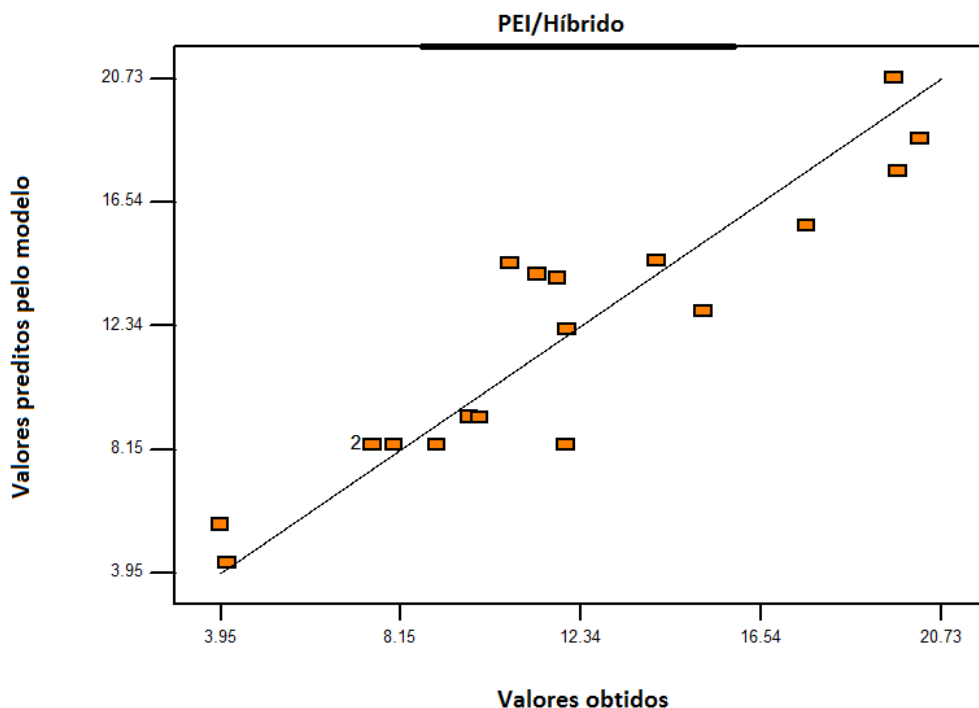


Figura 71- Valores experimentais obtidos em função dos valores preditos pelo modelo estatístico na soldagem do laminado PEI/híbrido.



A partir da comparação entre os valores experimentais e do modelo teórico apresentado nas Figuras 69 a 71, pode ser concluído que o delineamento composto central rotacional utilizado neste estudo foi muito eficiente para a avaliação dos fatores e também para determinação das condições otimizadas do processo de soldagem. Desta forma, os modelos utilizados foram eficientes sendo possível construir superfícies de respostas correspondentes e definir regiões de interesse. Os resultados obtidos da otimização do processo de soldagem dos laminados estudados encontram-se apresentados nas Tabelas 22 a 24.

Tabela 22- Valores das variáveis estudadas otimizadas e reais obtidas para valores máximos da variável resposta para o laminado PEI/ fibra de vidro.

Valores	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Lap Shear (MPa)
Otimizados	218,40	29,11	1,89	12,64
Reais	300,00	27,50	1,85	11,97

Tabela 23- Valores das variáveis estudadas otimizadas e reais obtidas para valores máximos da variável resposta para o laminado PEI/ fibra de carbono.

Valores	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
Otimizados	51,90	30,22	0,99	24,55
Reais	50,00	30,00	0,70	23,88

Tabela 24- Valores das variáveis estudadas otimizadas e reais obtidas para valores máximos da variável resposta para o laminado PEI/ híbrido.

Valores	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
Otimizados	50,17	30,41	0,7	20,29
Reais	50,00	30,00	0,7	19,65

Portanto, a partir da análise dos resultados do estudo realizado nesta etapa de trabalho, pode-se verificar que o laminado PEI/ fibra de carbono apresentou os maiores valores com relação à análise por *Lap Shear* comparado aos laminados PEI/fibra de vidro e PEI/híbrido, sendo o elemento resistivo utilizado para a soldagem, até este momento, a malha de aço de 200 mesh.

4.6 ESTUDO DE CASO – SOLDAGEM DO COMPÓSITO DE PEI/FIBRA DE CARBONO

Como apresentado anteriormente, para este trabalho foi selecionado como prova de conceito, a avaliação do compósito soldado de PEI/fibra de carbono. A escolha deste compósito foi devida, principalmente, a três fatores sendo estes: ter apresentado os maiores valores de *Lap Shear* após ter sido soldado; interesse por integração de peças com aplicação primária e por existirem poucos trabalhos publicados em literatura envolvendo particularmente a soldagem deste compósito (ineditismo). Desta forma, dois trabalhos foram realizados: avaliação sistemática do elemento resistivo mais eficiente para a soldagem deste compósito; e avaliação da qualidade da soldagem deste compósito a partir de ensaios mecânicos, térmicos e morfológicos.

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

O tipo de elemento condutor de corrente elétrica consiste em outro 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 que este 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 a utilização 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, 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, 1999).

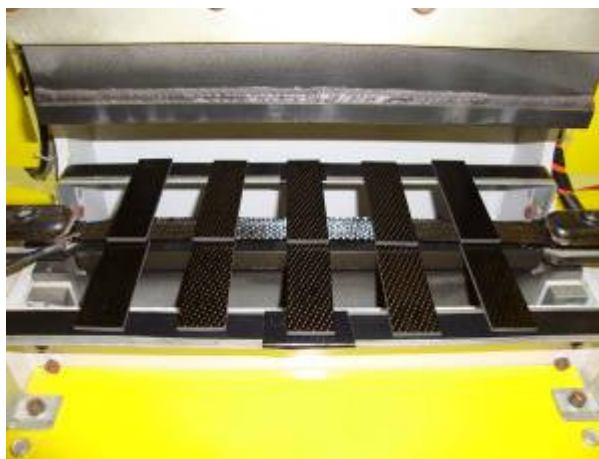
Baseando-se nestas informações, foi também avaliado o elemento resistivo mais apropriado para a soldagem de compósitos de PEI visando aplicações aeronáuticas. Para isso, foram analisados dois tipos de elementos resistivos: a malha de aço e tecido de fibras de carbono.

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 com fios de bronze, que vem sendo utilizada pela EMBRAER com o intuito de dissipar a corrente elétrica em função de uma determinada estrutura em compósitos ser atingida por descargas elétricas provenientes de raios. Desta forma, foram utilizados quatro diferentes elementos de aquecimento para soldar amostras de PEI/fibras de carbono.

As Figuras 72 e 73 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 25.

Figura 72- Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo um tecido de fibra de carbono.



Fonte: O autor.

Figura 73- Amostras de PEI/fibras de carbono dispostas para a soldagem utilizando como elemento resistivo uma malha de aço inox de 100 mesh.



Fonte: O autor.

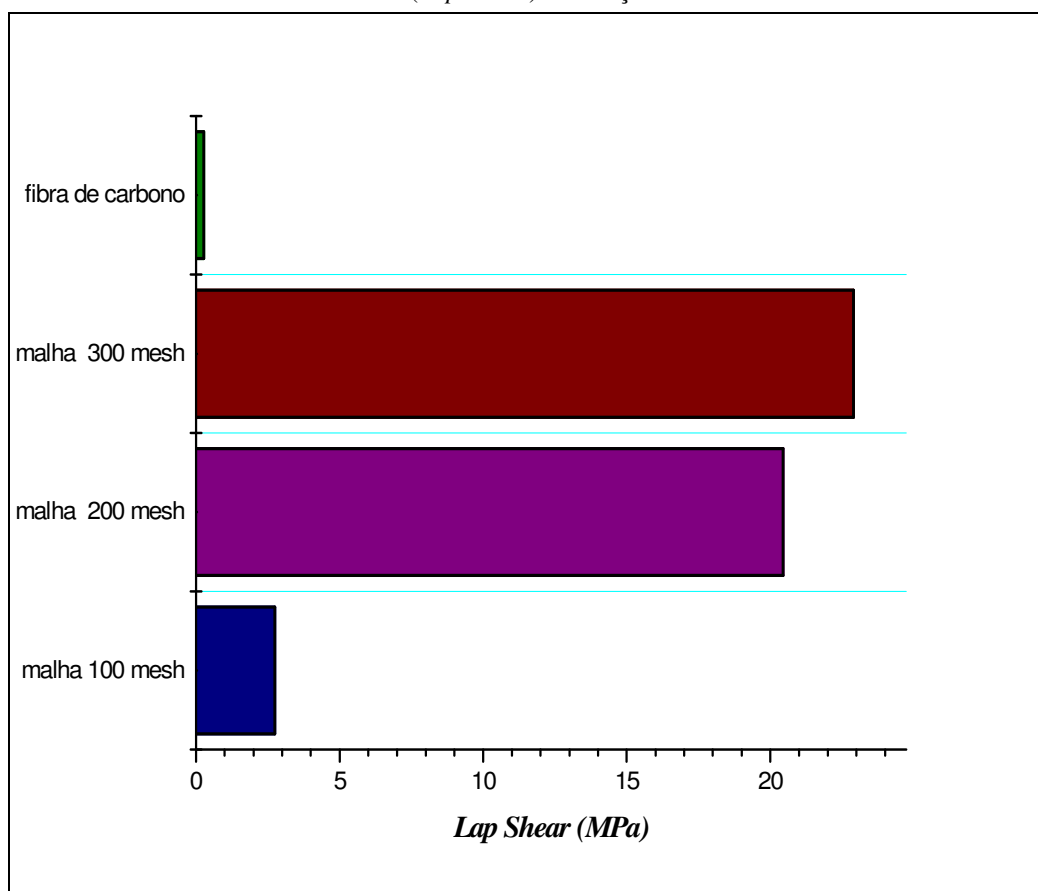
Tabela 25- Condições de soldagem utilizadas para cada elemento resistivo estudado.

Elemento resistivo		Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)
Malha metálica	100 mesh	50	34	0,7
	200 mesh	50	30	0,7
	300 mesh	50	30	0,7
Fibra de carbono com bronze		30	33	0,7

Como pode ser observado na Tabela 25, 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, quando da utilização do menor valor possível de corrente elétrica, as malhas de 200 e 300 mesh se mostraram mais eficientes.

Quando utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 25, 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 na Figura 74.

Figura 74-Valores de resistência ao cisalhamento (*Lap Shear*) em função do elemento resistivo utilizado



Fonte: O autor.

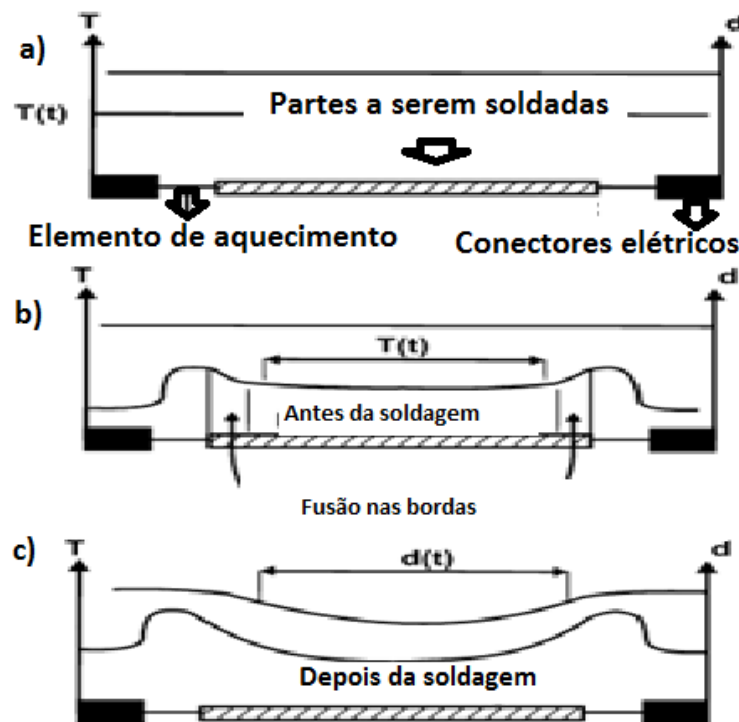
Como pode ser evidenciado a partir da Figura 74, verifica-se que com a utilização da malha metálica de 300 mesh obtém-se um incremento no valor de resistência por *Lap Shear*, obtido anteriormente utilizando as mesmas condições de soldagem, porém, com a malha de 200 mesh, sugerindo um melhor desempenho 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 (AGEORGES; YE; HOU, 2000; AHMED et al., 2008). 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 75.

Figura 75- 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; BERSEE, 2004).

Como pode ser observado a partir da ilustração da Figura 75 (a), no início da soldagem a resistência diminui quase linearmente, em função do aumento da temperatura. Após um determinado tempo, durante a soldagem (Figura 75 (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 a utilização de um aumento no nível de potência a ser utilizado durante o processo de soldagem (MCKNIGHT SH, HOLMES ST e GILLESPIE JR, 1997).

4.6.2.1 Cálculos envolvendo elementos resistivos

Para uma melhor avaliação do efeito do elemento resistivo na soldagem de compósitos, foram realizados ensaios na máquina soldadora para cálculos de parâmetros utilizando as equações 1, 2, 3, 4 e 5. Para a obtenção dos valores de corrente e tensão foram conectados os elementos resistivos nas condições selecionadas e ligada a máquina para a soldagem, mas sem a presença das amostras dos laminados de compósitos. As Figuras 76 e 77 ilustram os elementos resistivos malha de aço e fibra de carbono na câmara para a soldagem.

Figura 76- Imagem da disposição das malhas metálicas para a soldagem dos laminados.



Fonte: O autor.

Figura 77- Imagem da disposição da fibra de carbono para a soldagem dos laminados.



Fonte: O autor.

As condições utilizadas para os testes comparativos com os elementos resistivos foram de 31,5 A de corrente, pressão de 1,85 MPa e em um tempo de 30 segundos. Após a soldagem foram registrados pelo *software* da máquina os valores de tensão e de corrente elétrica para cada elemento resistivo testado, como ilustrado nas Figuras 78, 79, 80 e 81, para as malhas metálicas de 100, 200, 300 mesh e fibra de carbono com bronze respectivamente.

Figura 78- Valores de soldagem referente a utilização da malha metálica de 100 mesh.

Dados Corpo Prova			Dados Ensaio		Execução do Ensaio				
Comprimento (cm):	2,5	Tempo pré-soldagem (seg):	10	Pressão (MPa):	1,85	Temperatura (°C):	220,5	Corrente Lida (A):	31,515
Largura (cm):	2,5	Tempo soldagem (seg):	30	Corrente (A):	31,5	Max Temp:	220,5	Tensão Lida (V):	12,29
Área (cm2):	6,25	Tempo pós-soldagem (seg):	20	Pressão (Kg):	117,9	Carga Aplicada (Kg):	126,4	Potência Real (W):	387,5

Figura 79 - Valores de soldagem referente a utilização da malha metálica de 200 mesh.

Dados Corpo Prova		Dados Ensaio		Execução do Ensaio					
Comprimento (cm):	2,5	Tempo pré-soldagem (seg):	10	Pressão (MPa):	1,85	Temperatura (°C):	400,2	Corrente Lida (A):	31,513
Largura (cm):	2,5	Tempo soldagem (seg):	30	Corrente (A):	31,5	Max Temp:	400,2	Tensão Lida (V):	23,52
Área (cm2):	6,25	Tempo pós-soldagem (seg):	20	Pressão (Kg):	117,9	Carga Aplicada (Kg):	131,4	Potência Real (W):	741,2

Figura 80 - Valores de soldagem referente a utilização da malha metálica de 300 mesh.

Dados Corpo Prova			Dados Ensaio		Execução do Ensaio	
Comprimento (cm): 2,5	Tempo pré-soldagem (seg): 10	Pressão (MPa): 1,85	Temperatura (°C): 360,6	Corrente Lida (A): 31,513		
Largura (cm): 2,5	Tempo soldagem (seg): 30	Corrente (A): 31,5	Max Temp: 360,6	Tensão Lida (V): 23,70		
Área (cm2): 6,25	Tempo pós-soldagem (seg): 20	Pressão (Kg): 117,9	Carga Aplicada (Kg): 127,1	Potência Real (W): 747		

Figura 81 - Valores de soldagem referente a utilização da fibra de carbono com bronze.

Dados Corpo Prova		Dados Ensaio		Execução do Ensaio	
Comprimento (cm): 2,5	Tempo pré-soldagem (seg): 10	Pressão (MPa): 1,85	Temperatura (°C): 139,7	Corrente Lida (A): 31,515	
Largura (cm): 2,5	Tempo soldagem (seg): 30	Corrente (A): 31,5	Max Temp: 139,7	Tensão Lida (V): 12,35	
Área (cm ²): 6,25	Tempo pós-soldagem (seg): 20	Pressão (Kg): 117,9	Carga Aplicada (Kg): 109,3	Potência Real (W): 389,2	

A partir dos valores reais adquiridos na soldagem, foram calculadas as resistências de cada elemento de aquecimento, a potência e por fim o calor específico do material. Estes valores foram calculados utilizando as equações 2, 3, 4 e 5 e são apresentados na Tabela 26. O detalhamento dos cálculos com os dados adquiridos na máquina são apresentados no Apêndice O.

Tabela 26 - Valores calculados com os dados experimentais (tempo de 50 segundos, corrente de 31,5 amperes e pressão de 1,85 MPa) para os elementos resistivos estudados.

Elemento Resistivo	Resistência (Ω)	Resistividade específica (Ω)	Potência (W)	Energia (J)	Calor específico ($J/^{\circ}C. g$)
100 mesh	0,38	0,024	387,14	11624	40,04
200 mesh	0,70	0,044	741,11	22233	23,71
300 mesh	0,75	0,047	747,30	22410	31,50
Fibra de Carbono	0,41	0,024	409,63	12288,9	123,5

Fonte: O autor.

Os valores de resistência elétrica quando maiores, maior a liberação de calor e assim a tendência será a de se elevar a temperatura. Para os valores de calor específico (c_p), maiores valores correspondem a maior retenção de calor e baixa capacidade para aquecimento (LEANDRO, 2013).

Os valores calculados encontrados corroboram com os resultados anteriores obtidos de maiores valores de *Lap-Shear* que foram adquiridos com a utilização do elemento resistivo malha metálica de 300 mesh (este elemento resistivo apresentou valores maiores de resistência, resistividade e menor valor de calor específico, proporcionando valores maiores de potência e energia transferida).

4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DO COMPÓSITO PEI/FIBRA DE CARBONO E ELEMENTO DE AQUECIMENTO

Uma vez que, a partir dos resultados anteriores, foi identificado que a malha de aço com 300 mesh foi a mais adequada a ser utilizada como elemento resistivo proporcionando o maior valor de *Lap Shear*, foi necessária a realização de otimização quanto aos parâmetros anteriormente obtidos quando da utilização da malha de 300 mesh. Desta forma, foi realizada uma nova avaliação estatística visando concluir as condições ótimas de soldagem para o compósito PEI/fibra de carbono.

Como dito anteriormente, para este trabalho, foi adotado um planejamento Fatorial do tipo (CCD) para k fatores ($k = 3$ = pressão de consolidação; intensidade de corrente elétrica; e tempo de soldagem) e considerando o teste de *Lap Shear* como variável de resposta.

A matriz experimental e os resultados obtidos a partir do planejamento CCD, considerados agora para a utilização de uma malha de aço com 300 mesh como elemento resistivo, são apresentados na Tabela 27. Os experimentos de 1 a 8 correspondem ao fatorial completo 2^3 , e foram realizados em triplicatas.

Os experimentos de 8 a 14 correspondem aos pontos axiais, e também foram realizados em triplicatas. Finalmente, os experimentos de 14 a 19 correspondem as cinco replicatas no ponto central. No experimento 12 foi necessário interromper o ensaio, antes de sua conclusão (ensaio interrompido aos 90s), pois durante este processo de soldagem foi observada a degradação do material (devido à alta intensidade da corrente elétrica aplicada).

Esta técnica de planejamento experimental permite, ainda, a obtenção de modelos matemáticos que, apesar de empíricos, possibilitam o levantamento e a comprovação de hipóteses científicas que buscam explicar relações entre causa e efeito dos resultados experimentais e as variáveis de estudo. A partir dos resultados experimentais apresentados na Tabela 27 foi também realizada a análise de variância (ANOVA) pelo programa estatístico *Design Express*, versão 6.0.6. Esta análise encontra-se apresentada na Tabela 28.

Tabela 27- Valores das variáveis estudadas e resposta correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de carbono utilizando como elemento resistivo a malha de aço com 300 mesh.

Experimento	Variáveis Estudadas						Variável
	Codificadas			Reais			Resposta
	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Lap Shear (MPa)
1	-1	-1	1	50,00	30,00	0,70	23,64
2	1	-1	-1	300,00	30,00	0,70	18,9
3	-1	-1	-1	50,00	33,00	0,70	20,57
4	1	-1	-1	300,00	33,00	0,70	15,15
5	-1	1	1	50,00	30,00	3,00	23,73
6	1	1	1	300,00	30,00	3,00	17,56
7	-1	1	1	50,00	33,00	3,00	22,91
8	1	1	1	300,00	33,00	3,00	16,52
9	$-\alpha$	0	0	30,00	31,50	1,85	24,41
10	α	0	0	350,00	31,50	1,85	18,67
11	0	$-\alpha$	0	175,00	25,50	1,85	22,89
12	0	α	0	175/90	37,50	1,85	7,88
13	0	0	$-\alpha$	175,00	31,50	0,70	17,02
14	0	0	α	175,00	31,50	3,00	20,10
15	0	0	0	175,00	31,50	1,85	13,26
16	0	0	0	175,00	31,50	1,85	19,05
17	0	0	0	175,00	31,50	1,85	23,77
18	0	0	0	175,00	31,50	1,85	18,16
19	0	0	0	175,00	31,50	1,85	18,09

Tabela 28 – Análise de variância e dos efeitos frente ao processo estudado utilizando a malha de aço com 300 mesh como elemento resistivo.

Variáveis	SQ	GL	MQ	Valor de F	Teste de p
Modelo	175,69	3	58,56	8,45	0,0016*
Tempo	52,17	1	52,17	9,84	0,0068*
Corrente	118,06	1	118,06	15,11	0,0015*
Pressão	5,46	1	5,46	0,39	0,5402

Na Tabela: SQ – soma quadrática; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrática. *p< 0,05 (variáveis significativas).

Com relação à análise estatística das variáveis do processo de soldagem, observou-se que o tempo e a corrente foram significativos em relação a variável resposta analisada. Estes valores são apresentados na Tabela 8. Este teste demonstra que os resultados obtidos tem um grau de confiabilidade de 95%. O modelo proposto apresentou ajustado para uma equação linear que descreve o processo.

Portanto, neste caso, as variáveis significativas são tempo e corrente. Da mesma forma, o programa indica que a redução do modelo para um fatorial 2^2 , considerando somente as variáveis significativas, poderia ocasionar melhorias, pois a variável pressão não teve significância na resposta estudada.

O modelo utilizado de regressão, neste caso, pode ser representado pela equação (13):

$$Lap\ Shear = +57,93788 - (0.020862 * Tempo) - (1,14533 * Corrente) \quad (13)$$

De acordo com a literatura, os valores obtidos de resistência via ensaios de *Lap Shear* para o laminado soldado de PEI/fibras de carbono encontram-se entre 23 MPa e 34 MPa (HOU; YE; MAI, 1999, AGEORGES; YE; HOU, 2000). Desta forma, os resultados encontrados neste estudo estão próximos aos reportados em literatura.

A partir dos resultados obtidos da soldagem de compósitos PEI/fibra de carbono utilizando como elemento resistivo o aço com 300 mesh e da utilização do programa *Design-Expert*, foram obtidos os resultados otimizados quanto ao tempo, corrente elétrica e pressão, conforme apresentado na Tabela 29.

A partir destes resultados encontrados, foram plotados os gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis comparando estes com o maior valor predito a partir do modelo gerado com os resultados de *Lap Shear*. Os valores sugeridos pelo programa, em relação aos maiores valores adquiridos da variável resposta do material estudado, são apresentados na Figura 82. A curva referente à superfície de resposta do compósito PEI/fibra de carbono é apresentada na Figura 83.

Tabela 29 - Soluções das melhores condições de soldagem propostas a partir do programa para o laminado PEI/fibra de carbono com elemento resistivo de aço com 300 mesh.

Ensaio	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Lap Shear (MPa)
1	50,00	30,00	3,00	23,98
2	50,00	30,02	3,00	23,96
3	50,00	30,00	2,89	23,93
4	54,88	30,18	3,00	23,67
5	50,00	30,00	1,86	23,43
6	50,00	30,51	3,00	23,39

Empregando-se, ainda, o programa estatístico *Design- Expert 6.0*, procedeu-se com a busca da validação do modelo nas condições de tempo, corrente e pressão de soldagem em que se obteve valores máximos de *Lap-Shear* dentro da região estudada para o material selecionado no estudo de caso. De acordo com os valores adquiridos e preditos pelo programa apresentado na Tabela 29 e na Figura 82, optou-se por fazer a soldagem nas condições preditas pelo modelo, ou seja, no tempo de 50s, com uma corrente de 30 A e uma pressão de 0,30 MPa. Desta forma, novos experimentos foram realizados nas condições estabelecidas, o que permitiu a confirmação dos valores preditos pelos modelos estatísticos.

As condições experimentais e os resultados da variável resposta (*Lap Shear*) preditos otimizados pelos modelos e os obtidos experimentalmente estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30- Condições experimentais e valores de *Lap Shear* preditos pelo modelo e o obtido experimentalmente.

Condições experimentais		Valor predito pelo modelo	Limite Inferior	Limite superior	Valor experimental obtido
Pressão (MPa)	0,7				
Corrente (A)	30	23,98	22,45	24,08	24,02
Tempo (s)	50				

Conforme pode ser observado, os resultados obtidos estão de acordo com o previsto pelo modelo, dentro do intervalo de confiança de 95%.

Figura 82- Valores preditos pelo programa considerando as variáveis tempo e corrente de soldagem para o compósito PEI/fibras de carbono.

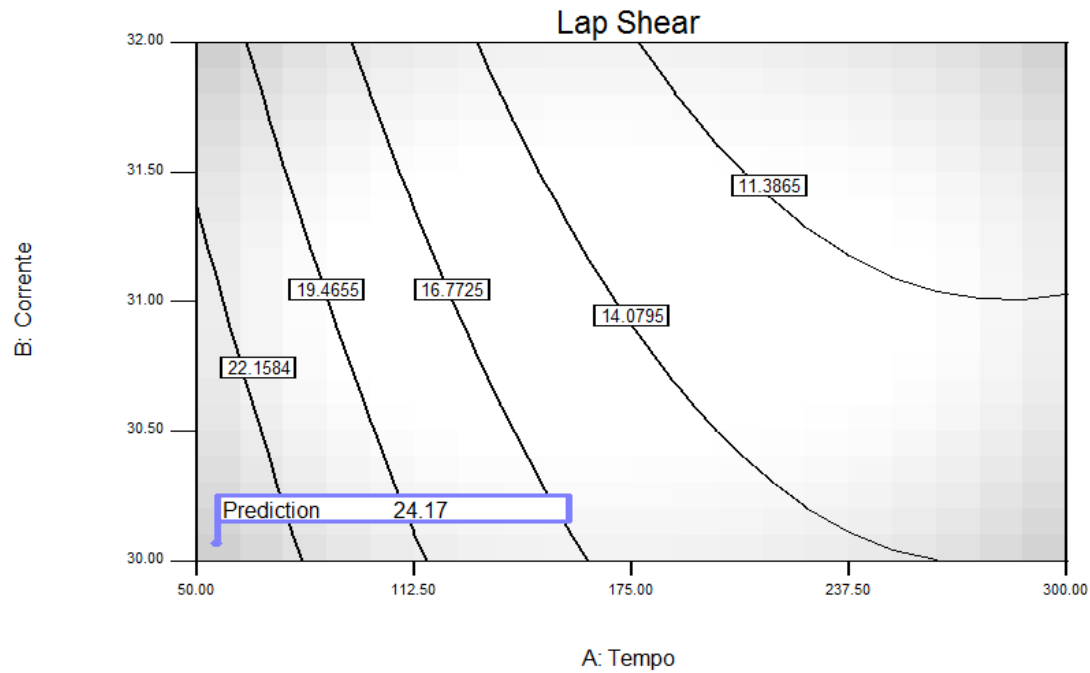
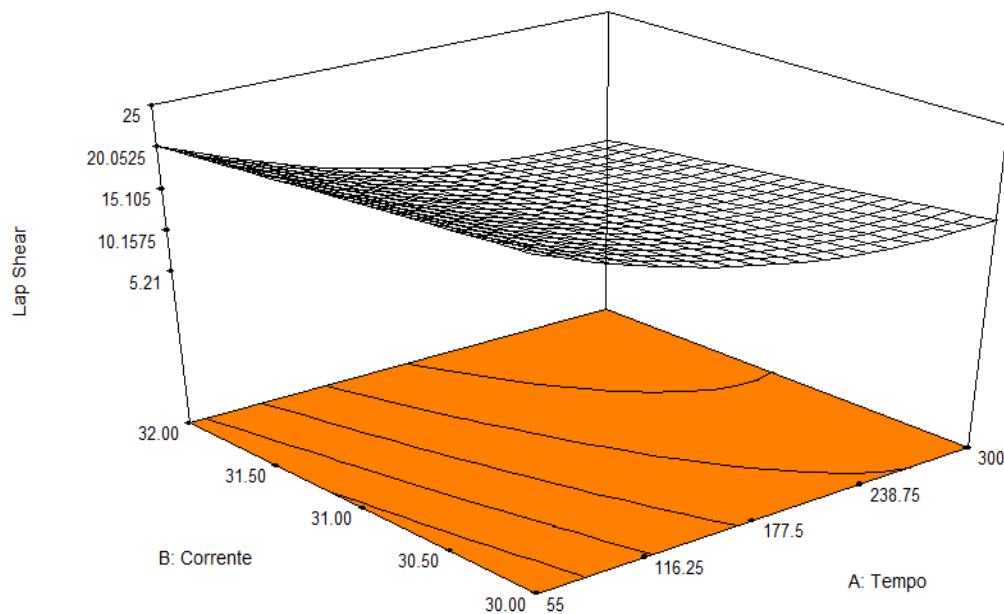


Figura 83 - Superfície de resposta do planejamento experimental referente ao compósito PEI/fibra de carbono com o valor de pressão de 0,74 MPa.



Utilizando-se deste programa, procedeu-se a pesquisa dos valores máximos do ensaio *Lap Shear* dentro da gama de valores para estas variáveis. A partir destes valores otimizados,

os gráficos de superfície de resposta foram construídos relacionando-os aos valores das variáveis estudadas, que atingiram o maior valor previsto pelo modelo de teste do ensaio *Lap Shear*.

Tabela 31 - Valores das variáveis adquiridas experimentalmente (reais) e propostas pelo modelo estatístico otimizado a partir dos valores máximos das respostas variáveis para os laminados PEI/fibra de carbono soldados com aço com 300 mesh.

Valores	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
<i>Reais</i>	<i>30,0</i>	<i>31,5</i>	<i>1,85</i>	<i>24,41</i>
<i>Preditos</i>	<i>50,0</i>	<i>30,0</i>	<i>0,70</i>	<i>23,98</i>

No gráfico de superfície de resposta apresentado na Figura 83 (a) verifica-se que os valores mais elevados de *Lap Shear* correspondem a valores de tempo de soldagem de 50 segundos e de corrente elétrica de 30 A. Estes valores são condizentes com os valores reais encontrados nos experimentos para valores de resposta máximos, como é apresentado na Tabela 31.

Empregando-se, ainda, o programa estatístico Design- Expert 6.0, procedeu-se com a busca da validação do modelo nas condições de tempo, corrente e pressão de soldagem em que se obteve valores máximos de *Lap Shear* dentro da região estudada para o material selecionado no estudo de caso. De acordo com os valores adquiridos e preditos pelo programa apresentado na Tabela 31 e na Figura 82, optou-se por fazer a soldagem nas condições preditas pelo modelo, ou seja, no tempo de 50s, com uma corrente de 30 A e uma pressão de 0,30 MPa. Desta forma, novos experimentos foram executados nas condições estabelecidas, o que permitiu a confirmação dos valores preditos pelos modelos estatísticos.

As condições experimentais e os resultados da variável resposta (*Lap Shear*) preditos otimizados pelos modelos e os obtidos experimentalmente estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32- Condições experimentais e valores de *Lap Shear* preditos pelo modelo e o obtido experimentalmente.

Condições experimentais		Valor			Valor experimental obtido
		predito pelo modelo	Limite Inferior	Limite superior	
Pressão (MPa)	0,7				
Corrente (A)	30	23,98	22,45	24,08	24,02
Tempo (s)	50				

Conforme pode ser observado, os resultados obtidos estão de acordo com o previsto pelo modelo, dentro do intervalo de confiança de 95%.

4.8 CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA JUNTA SOLDADA DO MATERIAL SELECIONADO PARA ESTUDO DE CASO

Adotando as condições operacionais obtidas anteriormente com valores otimizados pelo estudo estatístico (corrente, pressão e tempo), foram efetuados ensaios para caracterização da junta soldada.

Esta etapa do trabalho tem como principal objetivo avaliar, por meio de ensaios de caracterização, a qualidade da junta soldada obtida nas condições selecionadas de processamento. A junta selecionada para caracterização foi a composta de PEI/ fibras de carbono utilizando como elemento resistivo a malha metálica de 300 mesh. As condições de soldagem utilizadas para a obtenção desta junta foram: corrente elétrica de 31 A, pressão de soldagem de 1,85 MPa e tempo de soldagem de 30 s.

O comportamento, frente ao aquecimento que o material sofreu durante o processo de solda, será analisado com ensaios para verificação principalmente de perda de propriedades em relação ao material sem solda. Na condição selecionada a região de soldagem do material atingiu a temperatura em torno de 262 °C, como ilustrado pela Figura 84 da tela do software da máquina de soldagem no momento da solda.

Figura 84– Tela do software da máquina de soldagem com o valor de temperatura atingida no momento da solda nas condições selecionadas.

Dados Corpo Prova	Dados Ensaio		Execução do Ensaio	
Comprimento (cm): 2,5	Tempo pré-soldagem (seg): 10	Pressão (MPa): 1,85	Temperatura (°C): 261,9	Corrente Lida (A): 31,509
Largura (cm): 2,5	Tempo soldagem (seg): 30	Corrente (A): 31,5	Max Temp: 261,9	Tensão Lida (V): 28,71
Área (cm²): 6,25	Tempo pós-soldagem (seg): 10	Pressão (Kg): 117,9	Carga Aplicada (Kg): 114,5	Potência Real (W): 904,8

Com as amostras de junta soldada submetidas às condições apresentadas na Figura 84, foram realizadas as análises morfológica, térmica e mecânica para comparação com os resultados dos ensaios com o material não soldado.

Os resultados destes ensaios selecionados para a caracterização da melhor junta soldada obtida neste trabalho são apresentados nas seções a seguir. Desta forma, foram soldados corpos de provas constituídos de PEI/fibras de carbono com elemento resistivo metálico de 300 mesh destinados aos ensaios de microscopias óptica e eletrônica, DMA, Iosipescu e de cisalhamento, ILSS.

4.8.1 Avaliação microestrutural

Os laminados soldados foram avaliados por microscopia óptica (MO) e também por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As Figuras 85 a 88 apresentam imagens da região transversal de um corpo de prova soldado de PEI/fibras de carbono obtidas por microscopia óptica, utilizando a melhor combinação de parâmetros obtida a partir da avaliação estatística do processo. As setas vermelhas indicam a interface soldada para o PEI/fibras de carbono, sendo que os pontos brilhantes nas figuras representam regiões da malha metálica utilizada como elemento resistivo.

Figura 85- Microscopia da região transversal da amostra de PEI/fibras de carbono soldado (6,5X).

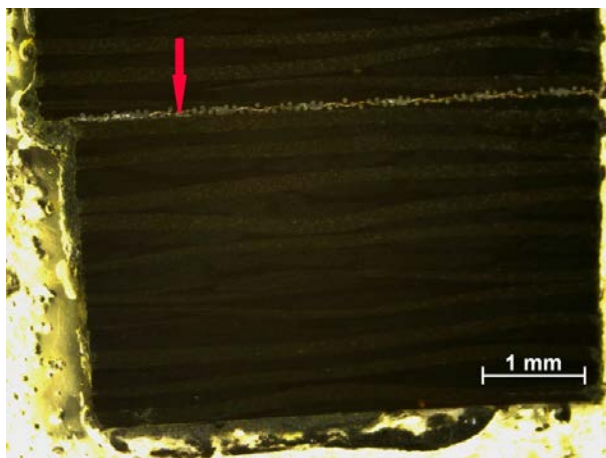
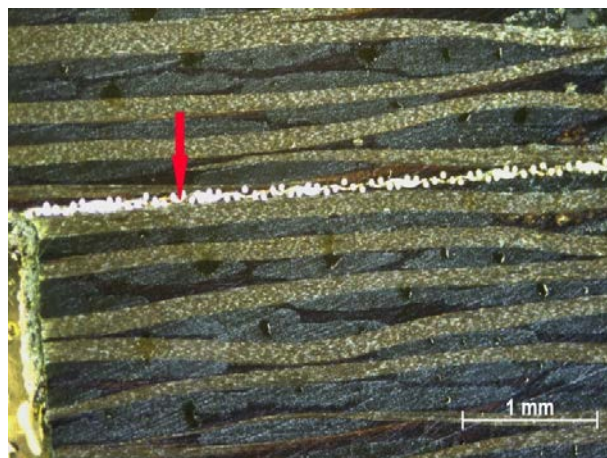


Figura 86 – Microscopia da região transversal da amostra soldada de PEI/fibras de carbono soldado (10X).

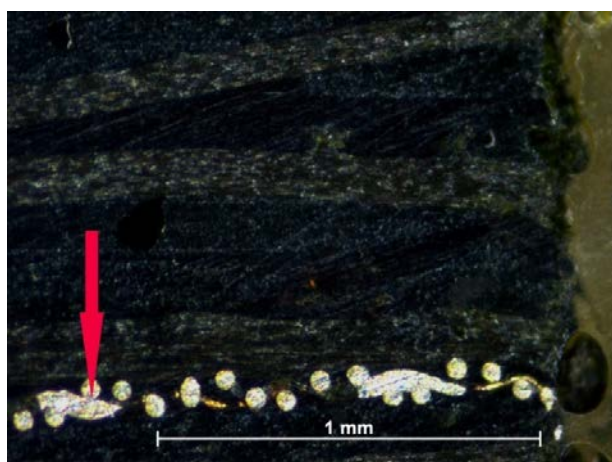


Fonte: O autor.

Figura 87 – Microscopia da região transversal da amostra de PEI/fibras de carbono soldado (20X).



Figura 88 – Microscopia da região transversal da amostra soldada de PEI/fibras de carbono com ampliação de 40X.



Fonte: O autor.

A partir destes resultados pode ser observado que o processo de soldagem apresentou uma interface homogênea entre as lâminas soldadas em relação à região em que não houve interferência do aquecimento local durante o processo de soldagem. Adicionalmente, nas micrografias foi possível identificar evidências de a boa interação do elemento resistivo com a matriz e de boa solidificação do polímero PEI após a finalização do processo de soldagem.

4.8.2 Caracterização térmica

Neste estudo de caso, apenas a comparação entre os resultados obtidos dos laminados de PEI/fibras de carbono são apresentados, entretanto, esta análise foi análoga para os laminados reforçados com fibras de vidro e para o híbrido como visto anteriormente.

Uma vez que a literatura reporta que a temperatura de transição vítrea para a matriz PEI é da ordem de 180°C (NETO, 2009) e que as medidas realizadas em diferentes equipamentos de DMA podem resultar em diferenças de até 20°C para avaliar esta propriedade (BANDEIRA, 2011), pode-se concluir que os valores de T_g para todos os laminados avaliados encontram-se de acordo com os valores apresentados em literatura.

A Figura 89 apresenta os resultados de DMA obtidos para os laminados soldados de PEI/fibra de carbono. A Tabela 33 apresenta os principais resultados da Figura 89 e Apêndice C.

Figura 89- Gráfico de DMA obtido para o compósito PEI/fibra de carbono soldado.

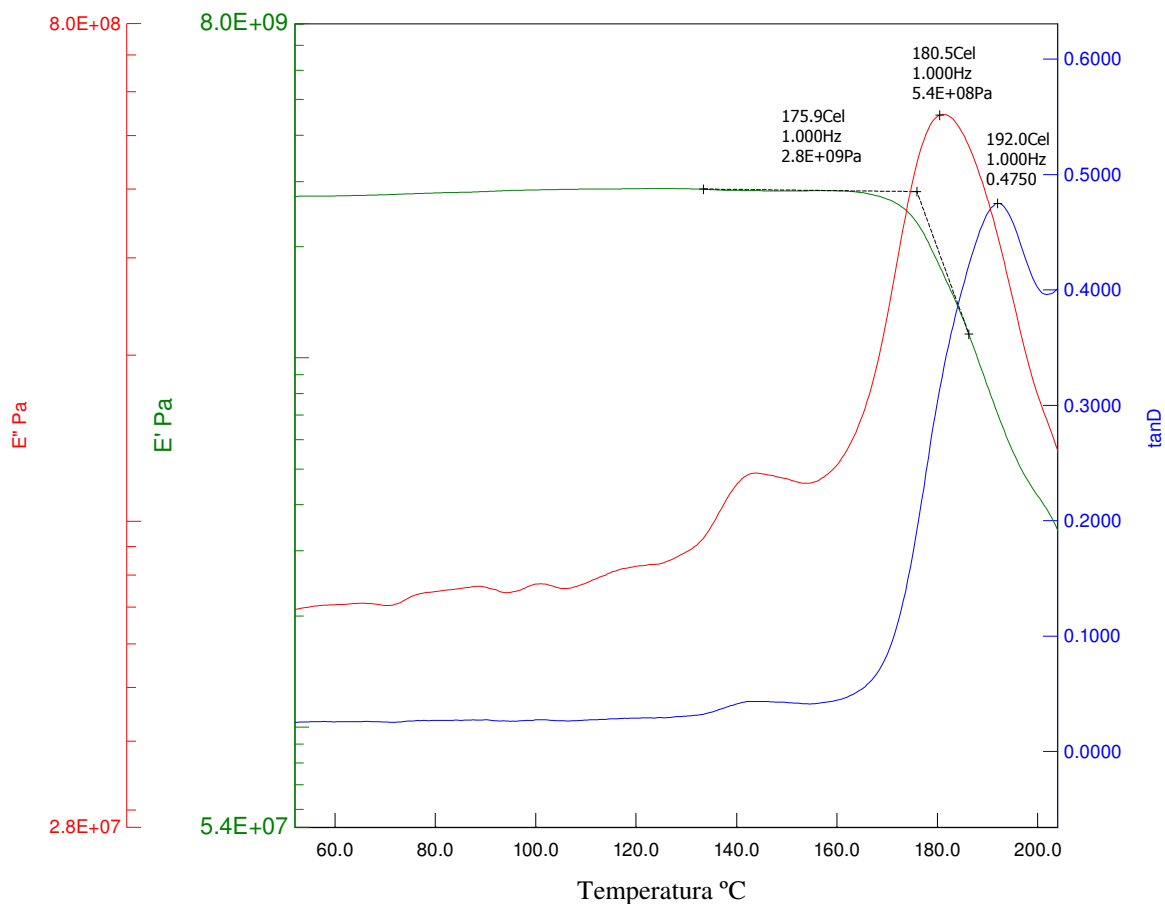


Tabela 33- Valores de temperatura de transição vítrea encontrada a partir dos módulos de elasticidade e de perda, assim como da tangente de perda do compósito estudado com e sem solda.

<i>Compósito</i>	<i>Tg por E'</i> (°C)	<i>Tg E''</i> (°C)	<i>Tg tan δ</i> (°C)
<i>PEI/fibra de carbono¹</i>	176	181	192
<i>PEI/fibra de carbono²</i>	173	180	197

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

A partir destes resultados pode ser observado que os valores das temperaturas de transição vítrea para o material sem solda (180°C) foram similares aos encontrados para o material soldado. Desta forma, pode-se concluir que o processo de soldagem não interfere na temperatura de trabalho do componente termoplástico.

4.8.3 Caracterização mecânica

4.8.3.1 ILSS

A Tabela 34 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio de cisalhamento interlaminar por *short-beam* (ensaio em três pontos ou ILSS) para os laminados PEI/fibra de carbono, PEI/fibra de vidro e PEI/híbrido como recebidos. A partir da análise realizada foi observado um aumento gradativo da resistência ao cisalhamento até este atingir um valor crítico onde ocorre o cisalhamento entre as camadas do compósito.

De acordo com os resultados observados neste trabalho, os laminados estudados apresentaram valores próximos de resistência ao cisalhamento aos encontrados em literatura (REZENDE; COSTA E BOTELHO, 2011), tendo sido estes calculados pela equação (14):

$$\tau = \frac{3}{4} * \frac{P}{wt} \quad (14)$$

Onde: τ – Resistência ao cisalhamento interlaminar;

P – Carga na falha [N];

w – Largura [mm];

t – Espessura [mm].

Tabela 34- Valores de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS)

Compósitos	Resistência ao cisalhamento (MPa)	
PEI/fibra de vidro	46,53	±2,65
PEI/fibra de carbono	47,95	±1,45
PEI/híbrido	59,73	±1,74

Os resultados obtidos da análise mecânica da junta soldada por ILSS em comparação com os valores do material sem solda deste estudo de caso (PEI/fibras de carbono) são apresentados na Tabela 35. Os resultados referentes aos ensaios estão apresentados pelos Apêndices L, M e N..

Tabela 35 - Valores de resistência ao cisalhamento ILSS do PEI/fibra de carbono com e sem solda.

Compósitos	Resistência ao Cisalhamento (MPa)	Desvio padrão (±)
PEI/fibra de carbono ¹	63,68	4,03
PEI/fibra de carbono ²	48,07	2,03

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

Os resultados obtidos mostram que houve aumento da resistência ao cisalhamento nas amostras soldadas, tendo sido este de até 32%. Este comportamento ocorreu, provavelmente, devido a presença do elemento de aquecimento (aço inoxidável), contribuindo, desta forma, para a melhoria desta propriedade mecânica do laminado.

Sabendo-se que uma boa adesão entre a fibra e a matriz é pré-requisito para uma boa transferência de tensão no laminado, 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.

O exame da superfície fraturada ou dos componentes falhados por técnicas de microscopia permite determinar a evolução dos eventos de danos e das condições que abrangem o processo de falha. Com a revelação dos detalhes pode-se tentar reconstituir a sequência de falhas determinando, por exemplo, o local onde se origina uma trinca e qual ou quais as causas provocam o seu início. Desse modo, é possível obter um melhor entendimento dos modos e das direções que as trincas se propagam, quais são os tipos de falhas presentes e um maior embasamento para identificar as condições envolvidas de carregamentos.

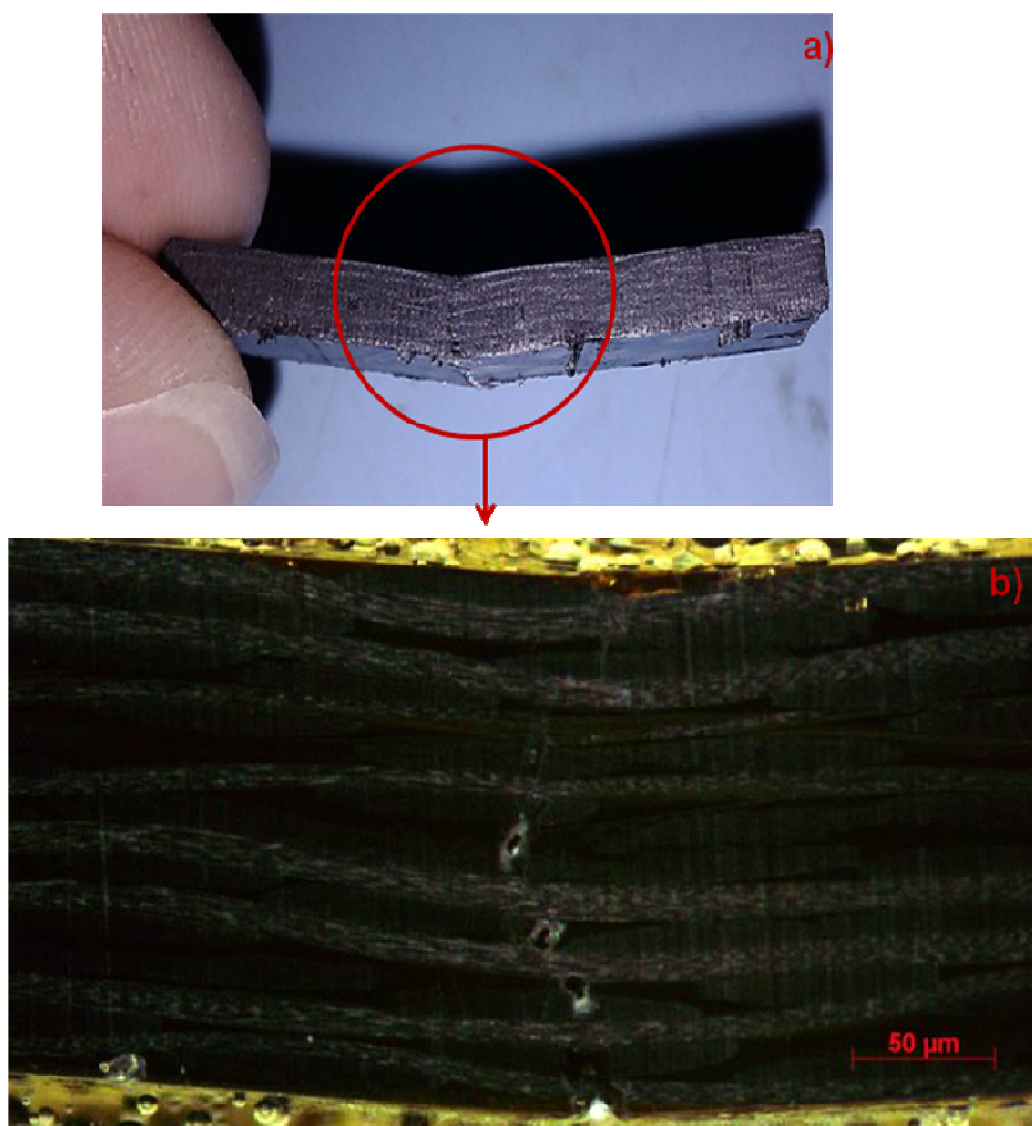
Desta forma, foi realizada uma análise por microscopia óptica com o intuito de avaliar o modo de falha proveniente dos ensaios de ILSS para os materiais analisados. As Figuras 90 e 91 apresentam entre a fratura dos compósitos soldados e não soldados após o ensaio mecânico e indicada as regiões que serão analisadas por microscopia

A partir dos resultados encontrados na Figura 91, pode ser observado que o laminado de PEI/fibra de carbono apresenta fratura translaminar quando solicitado por cisalhamento interlaminar; já quando da presença da solda metálica esta fratura ocorre de forma interlaminar, modificando o aspecto de falha deste laminado. Desta forma, a presença da malha metálica auxilia na formação de trincas na interface soldada, propagando-se em toda a extensão do corpo de prova. Entretanto, na amostra com solda a trinca se propaga até a região da solda não afetando a região onde é localizado o elemento resistivo, não se propagando para a parte superior.

Fraturas interlaminares têm a tendência de serem influenciadas pela fratura da matriz e pelo descolamento fibra/matriz. Em geral, as condições mais comuns, em que ocorre o descolamento fibra/matriz, são na interface sob o modo I e o modo II. Desta forma, fraturas interlaminares descrevem falhas orientadas entre as camadas, ocorrendo no plano do laminado, fraturando principalmente a matriz, com poucas ou nenhuma fratura de fibra. Fraturas translaminares são aquelas que ocorrem transversalmente ao plano do laminado, causando um significativo rompimento das fibras. Normalmente, encontram-se componentes

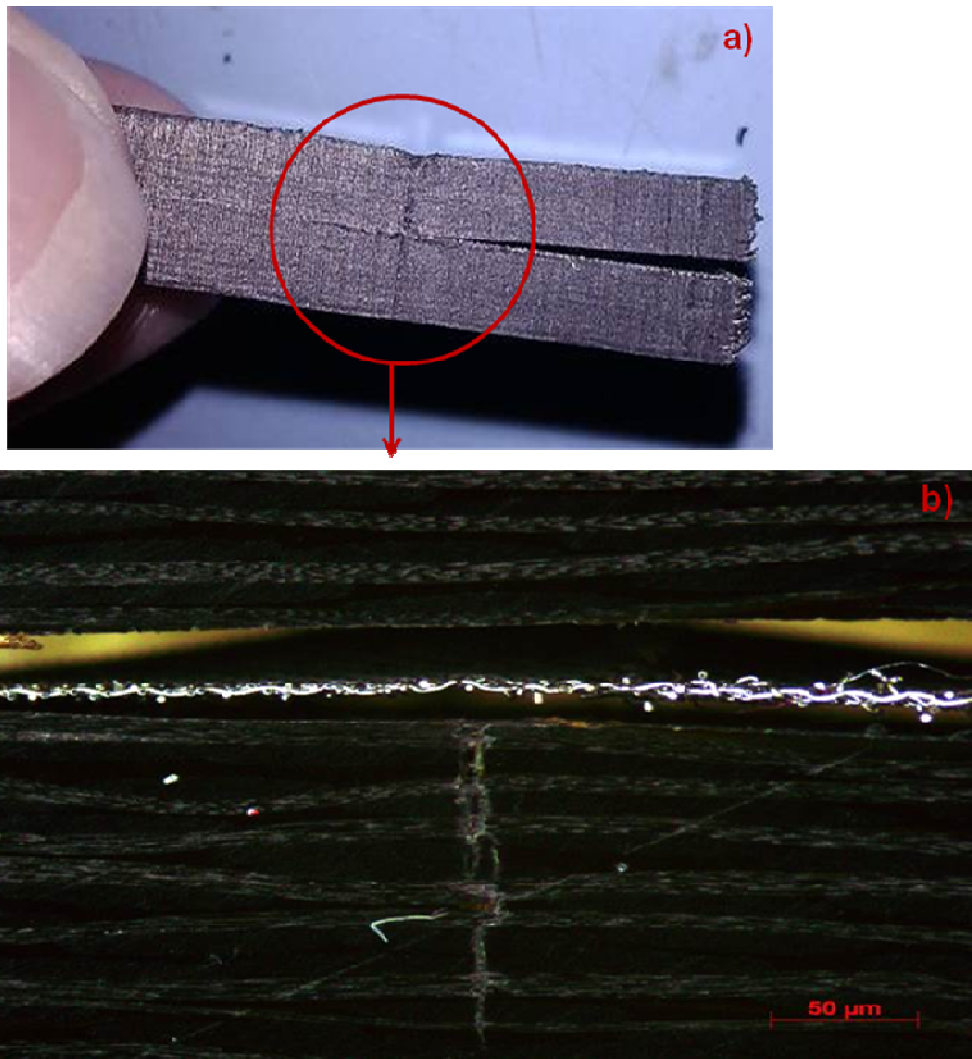
que apresentam os três tipos de fratura simultaneamente (BOTELHO; REZENDE, 2002; CÂNDIDO et al., 2012).

Figura 90. a) Amostra de compósito PEI/fibra de carbono sem solda após o ensaio de ILSS. b) Micrografia apresentando o início da fratura na região fraturada pelo ensaio de ILSS do laminado PEI/fibra de carbono não soldado



Fonte: O autor.

Figura 91-a) Amostra de compósito PEI/fibra de carbono com solda após o ensaio de ILSS. b) Micrografia do fim da fratura na região fraturada pelo ensaio de ILSS



Fonte: O autor.

4.8.3.2 Iosipescu

O Apêndice J apresenta as curvas de tensão de cisalhamento em função do deslocamento obtidas a partir do ensaio de cisalhamento Iosipescu e a Tabela 36 mostra os resultados de tensão de cisalhamento para as amostras dos compósito PEI/ fibra de vidro, PEI/ fibra de carbono e PEI/híbrido, como recebidas.

O principal objetivo deste ensaio foi a obtenção do valor de tensão cisalhante da região central onde as amostras foram solicitadas. De acordo com os resultados obtidos os compósitos PEI/híbrido e PEI/fibra de carbono foram os que apresentaram maiores valores de tensão de cisalhamento, devido à falha ocorrer entre fibras de carbono, em ambos os casos.

Tabela 36 - Valores de tensão de cisalhamento por Iosipescu para os compósitos como recebidos.

Compósito	PEI/ Fibra de Vidro	PEI/Fibra de Carbono	PEI/Híbrido
Tensão de cisalhamento (MPa) [0/90] _s	79,32 ±3,00	119,19±1,99	120,17±5,22

A partir da análise das curvas, 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 92 e 93 são representativas das curvas de tensão de cisalhamento em função da deformação das amostras do compósito PEI/ fibra de carbono soldadas e não soldadas (estudo de caso).

Figura 92- Gráfico da tensão em função da deformação proveniente do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono soldada

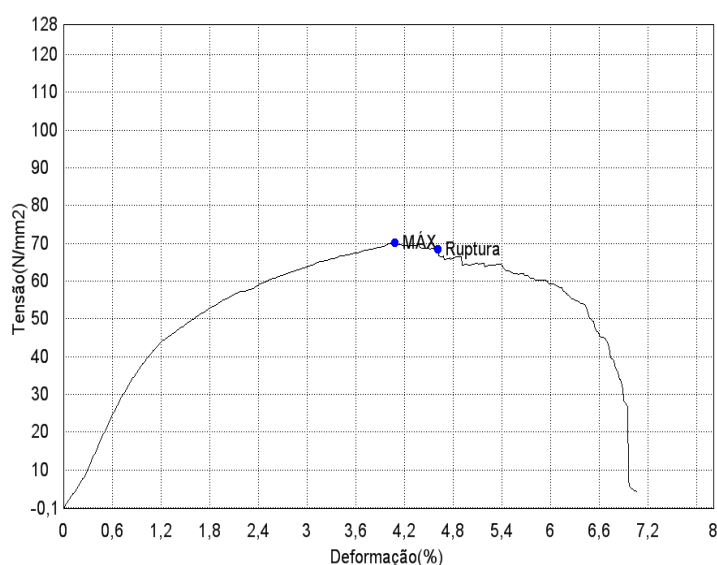
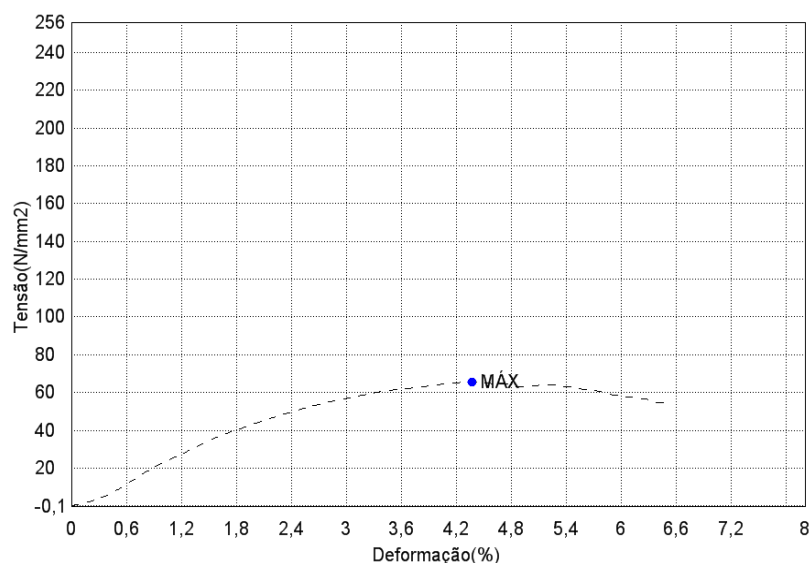


Figura 93- Gráfico da tensão em função da deformação do ensaio de Iosipescu para uma amostra de compósito PEI/fibra de carbono não soldada.



A Tabela 37 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 corrobora com os encontrados a partir do ensaio de cisalhamento ILSS e pode ser explicado pela presença da malha metálica fornecer uma resistência adicional aos esforços cisalhantes.

Tabela 37 - Valores de resistência ao cisalhamento Iosipescu do compósito utilizado como estudo de caso.

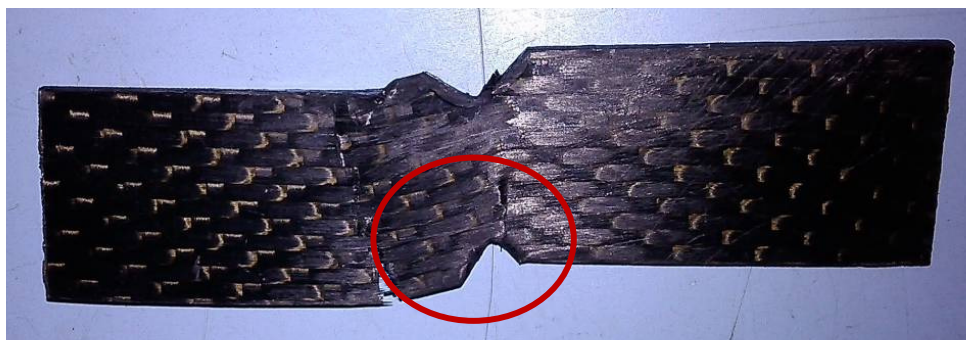
<i>Compósitos</i>	<i>Resistência ao Cisalhamento (MPa)</i>	<i>Desvio (±)</i>
<i>PEI/fibra de carbóno¹</i>	<i>119,19</i>	<i>1,99</i>
<i>PEI/fibra de carbóno²</i>	<i>100,40</i>	<i>0,4</i>

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

Da mesma forma, como foi apresentado anteriormente, que 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 95 e 96 evidenciam as imagens ampliadas dos corpos de prova após estes serem ensaiados na região do entalhe evidenciada na Figura 94.

Figura 94- Amostra ensaiada do compósito PEI/fibra de carbono.



Fonte: O autor.

Figura 95 - Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8 X.



Fonte: O autor.

Figura 96 - Imagem por microscopia óptica do laminado não soldado após o ensaio de Iosipescu, com ampliação de 8 X.



Fonte: O autor.

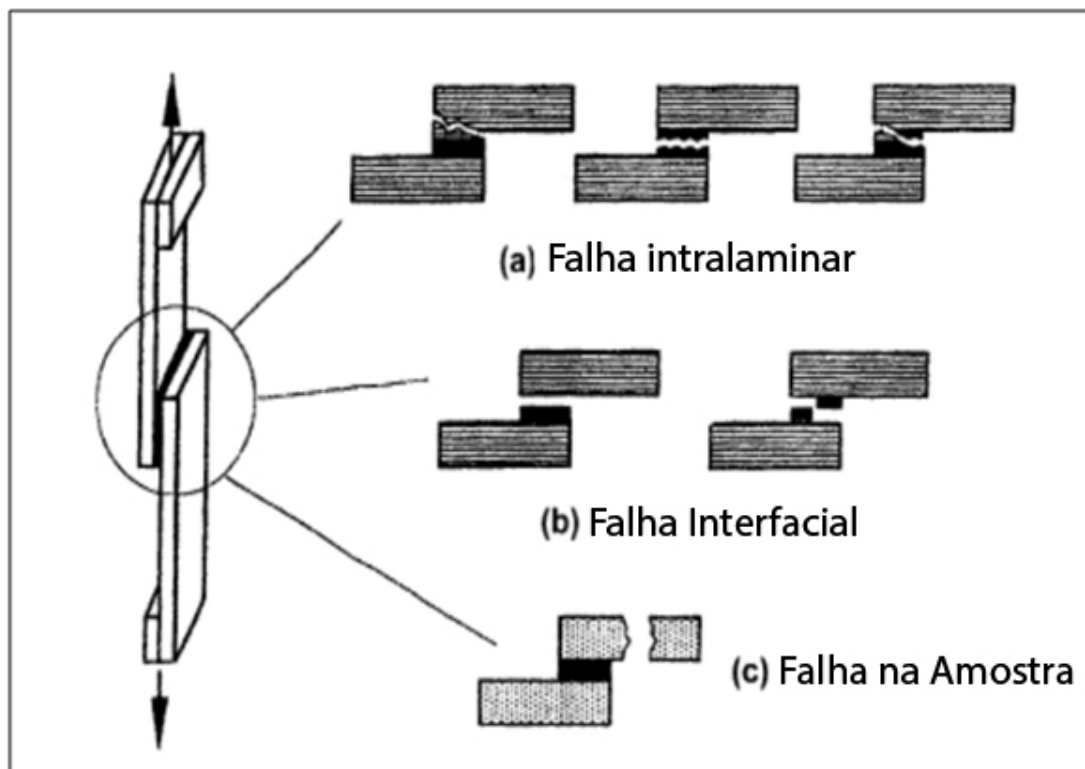
Nas Figuras 95 e 96, pode ser observado que em ambos os casos ocorreram fraturas interlaminares e translaminares quando solicitado por cisalhamento Iosipescu, mostrando que para esta solicitação mecânica, a presença da malha metálica não interferiu, a princípio, consideravelmente na morfologia da fratura. Porém, realizando uma análise mais aprofundada pode ser observado, a partir da Figura 95 (laminado não soldado), uma fratura provavelmente evidenciada por um processo de microflambagem seguido de uma fratura translaminar mais intensa da que ocorre em materiais soldados.

4.9 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 (MEDEIROS; TITA; NETO, 2011). 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 97

Figura 97- Modos de falha típicos observados durante o ensaio de Lap Shear em compósitos: intralaminar, interfacial e fratura.



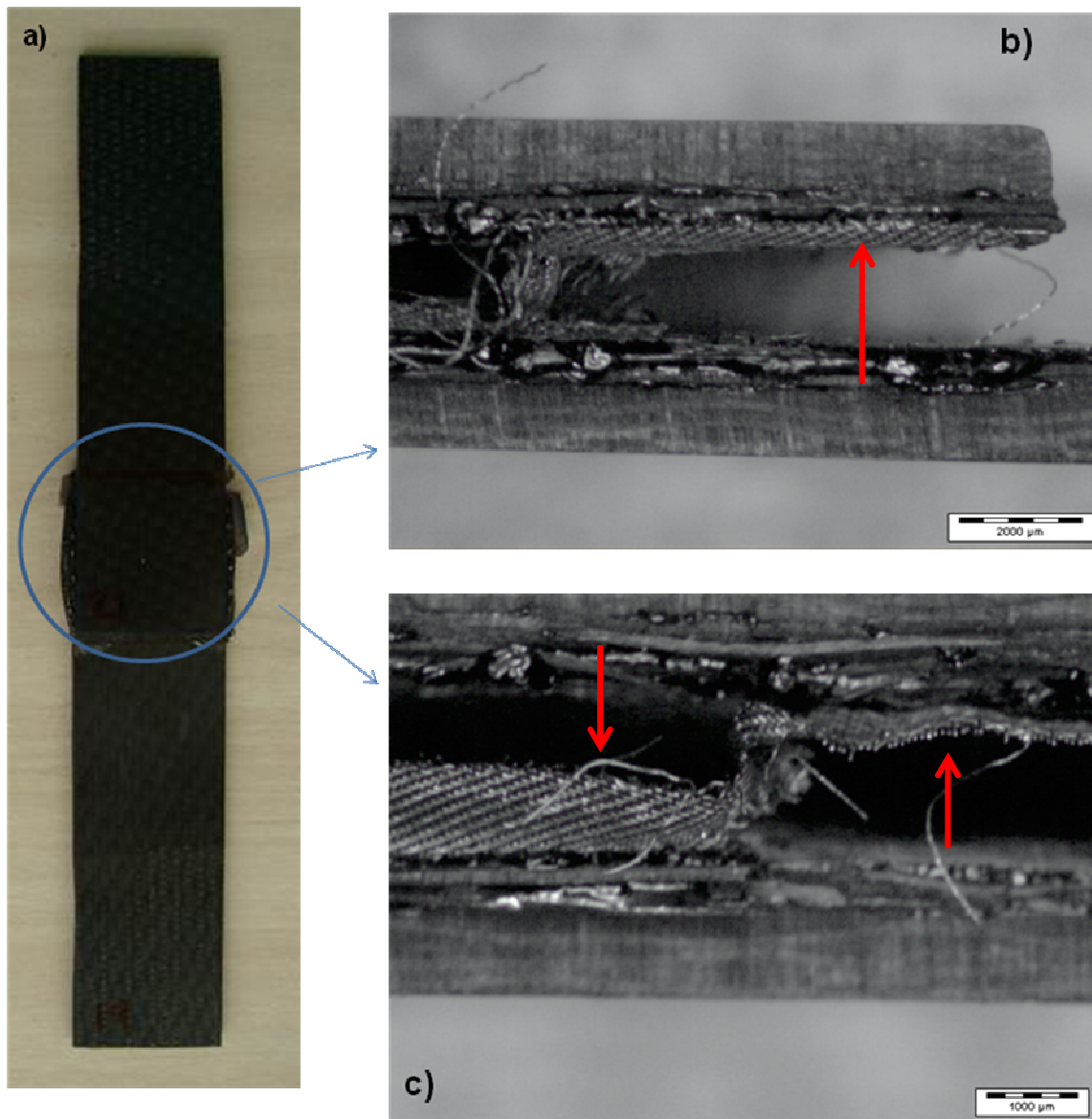
Fonte: (STAVROV e BERSEE, 2004).

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 98 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 98 b) e c).

Figura 98- 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).

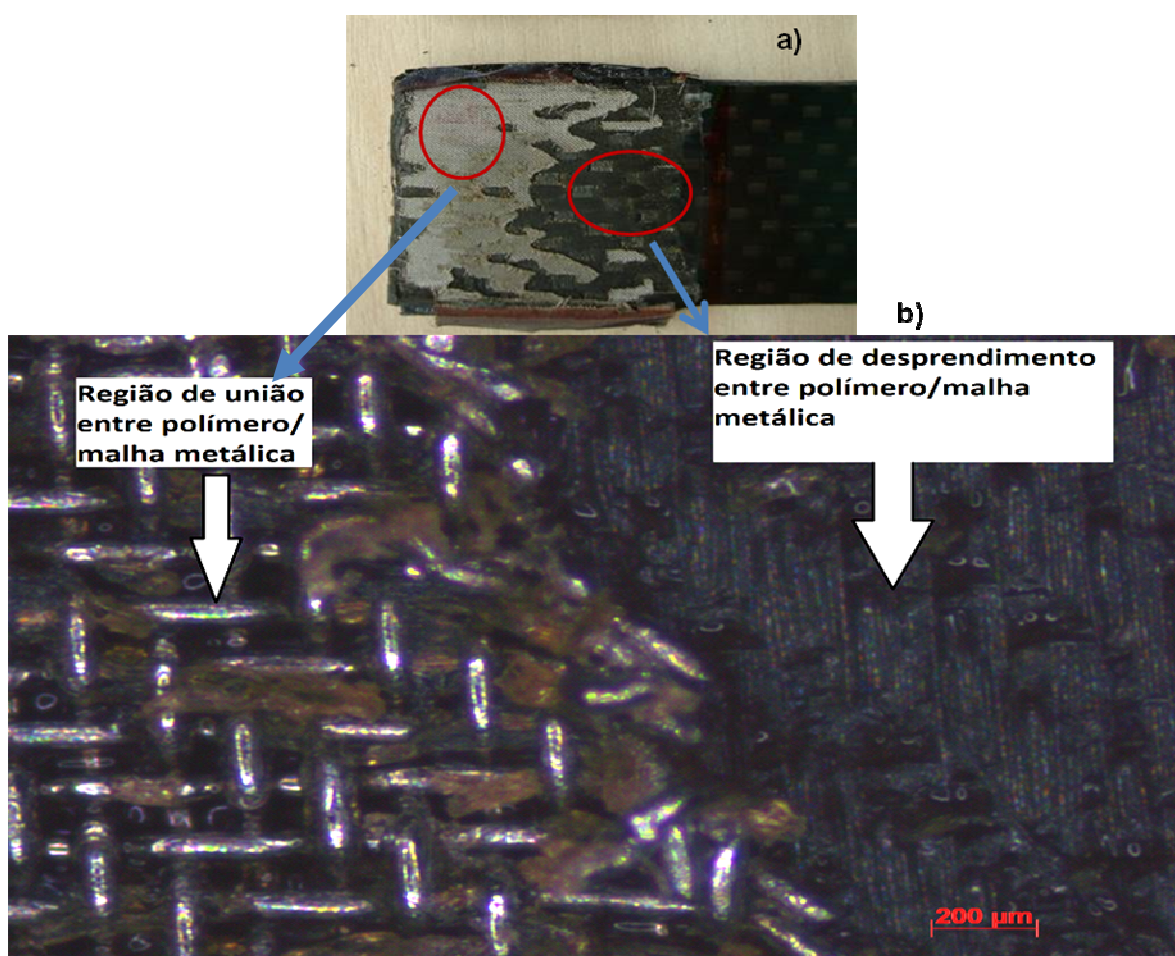


Fonte: o autor.

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 98 c). Isto pode ser explicado devido a aplicação de forças atrativas em sentidos opostos.

Como pode ser observado também a partir da Figura 98 c), o tipo de falha obtido pelo ensaio *Lap Shear* a princípio é do tipo intralaminar. Este resultado corrobora 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 99. 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).



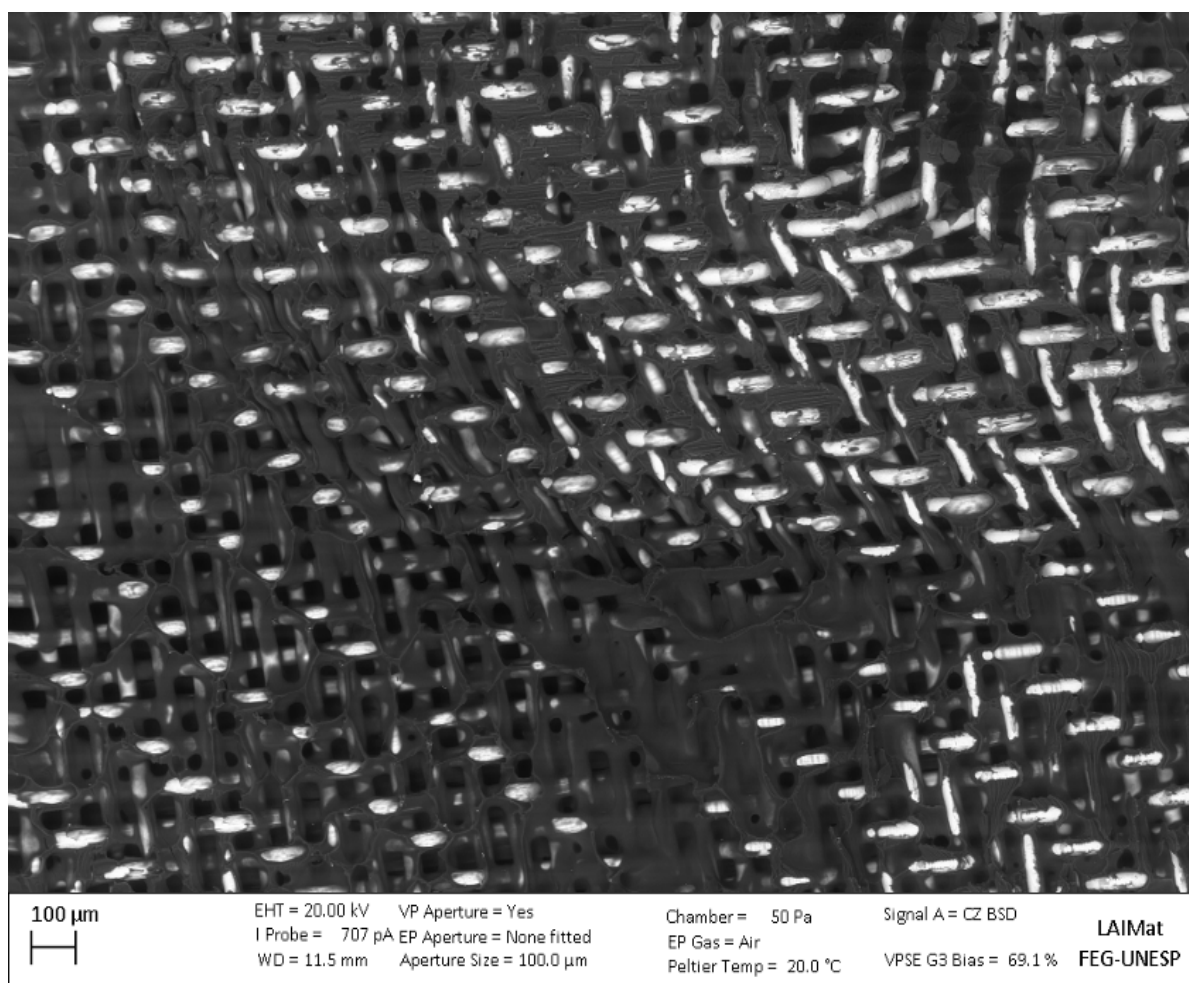
Fonte: o autor.

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 corroboram com as imagens anteriores fotografadas e indicam boa união das partes soldadas do compósito.

Com o intuito de confirmar as observações realizadas por microscopia óptica da região de falha dos compósitos de PEI/fibra de carbono soldados e ensaiados por *Lap Shear*, estudos envolvendo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e técnicas de microanálise por energia dispersiva também foram realizados. As micrografias obtidas por MEV são apresentadas nas Figuras de 100 e 101.

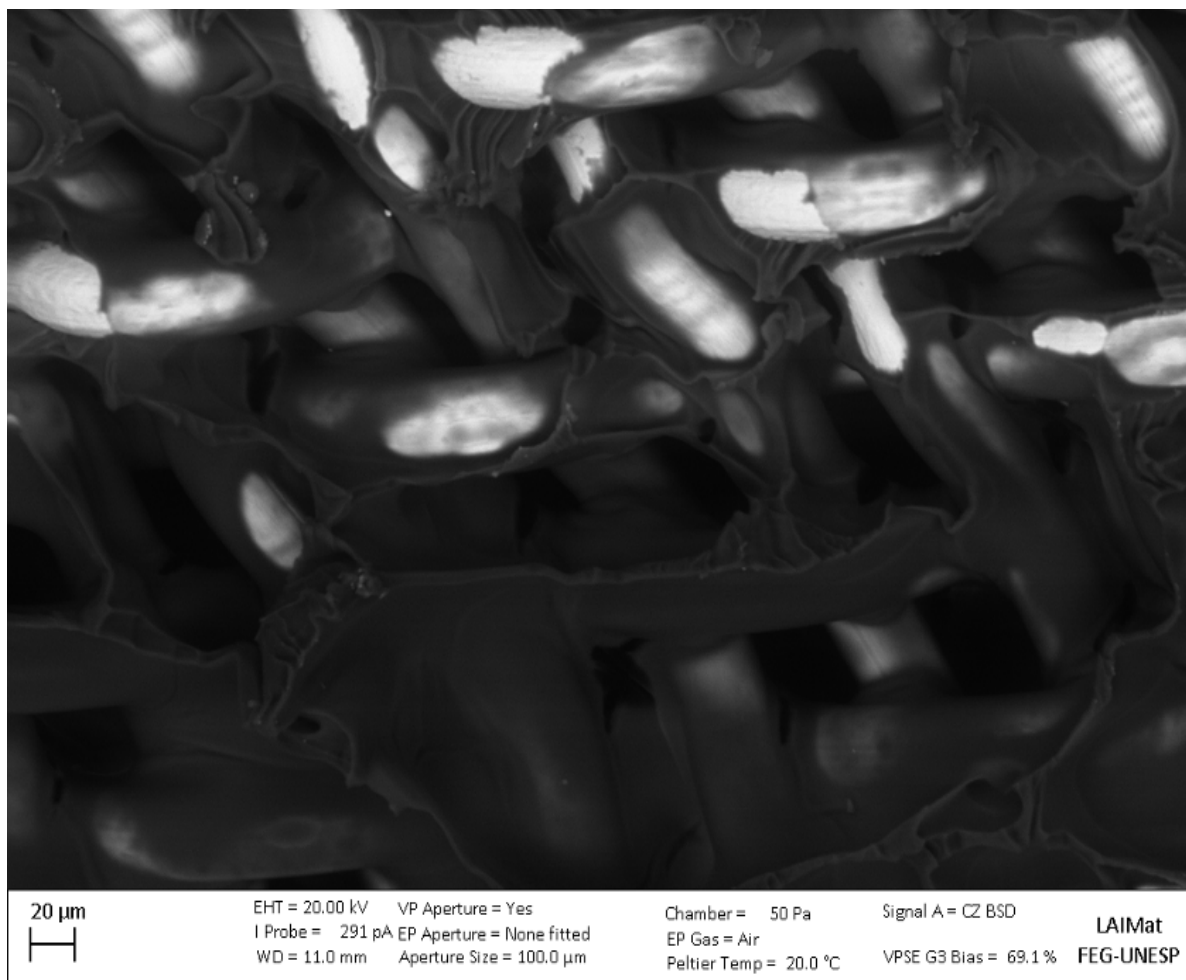
A partir destas imagens algumas áreas foram selecionadas para verificar a composição do material, e caso houvesse precipitados, qual seria a composição química destes. Com esta finalidade, foram utilizados dois tipos de detectores: VPSE (*Variable Pressure Secondary Electron*) e BSE (*Backscattered electron*). Cada detector revela um tipo de informação da amostra, evidenciando tanto a composição com o BSE quanto a topografia com o VPSE.

Figura 100- Micrografia da região soldada do laminado PEI/fibras de carbono após a realização do ensaio de *Lap Shear*. com ampliação de 100X.



Fonte: o autor.

Figura 101- Micrografia da região soldada após ensaio de *Lap Shear* com ampliação de 500X.



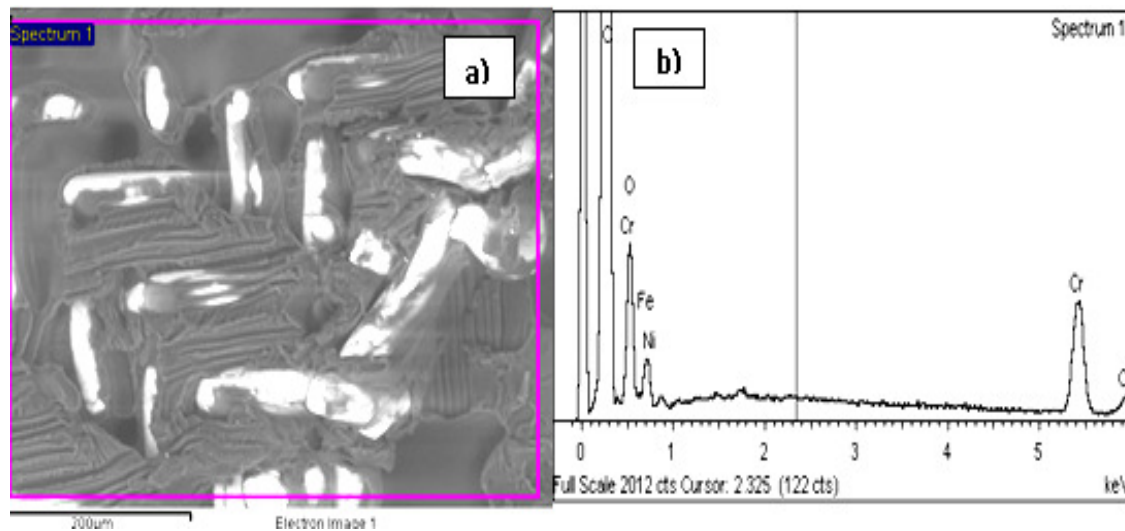
Fonte: o autor.

A partir da análise da Figura 100 pode-se observar que na região onde não foi observado o descolamento da malha metálica houve interação entre a matriz polimérica e o elemento resistivo de forma homogênea. Uma observação mais minuciosa deste comportamento pode ser evidenciada na Figura 100, sendo selecionada uma região apresentada na Figura 101, porém, com ampliação de 500 X. A Figura 101 evidencia, ainda, a total solidificação, de forma uniforme, do polímero após a fusão durante o processo de soldagem possibilitando a boa interação com o elemento resistivo e, desta forma, a boa qualidade da junta de acordo com o ensaio de *Lap Shear*.

A Figura 102 apresenta o diagrama obtido, a partir da análise de EDS, revelando os componentes químicos da amostra de PEI/fibras de carbono referente à região da solda. Esta avaliação foi realizada em amostras após serem submetidas ao ensaio de *Lap Shear*, evidenciando o contato entre o polímero (matriz) e o elemento resistivo ou mesmo problemas evidenciados após o aquecimento localizado na matriz por efeito Joule.

A região analisada encontra-se contida no retângulo rosa desta Figura. Cada pico refere-se a um elemento químico, sendo os mais evidenciados por esta análise o oxigênio e o carbono. A composição elementar quantitativa da região da amostra analisada é apresentada na Tabela 38.

Figura 102-Análise de EDS da região de interação da matriz polimérica e malha metálica da amostra soldada de PEI/fibras de carbono (a); espectro elementar da região analisada (b).



Fonte: o autor.

A partir dos resultados da Tabela 38 é possível observar os mesmos elementos encontrados na interação do laminado PEI/fibras de carbono e do elemento resistivo malha metálica utilizada de aço inox.

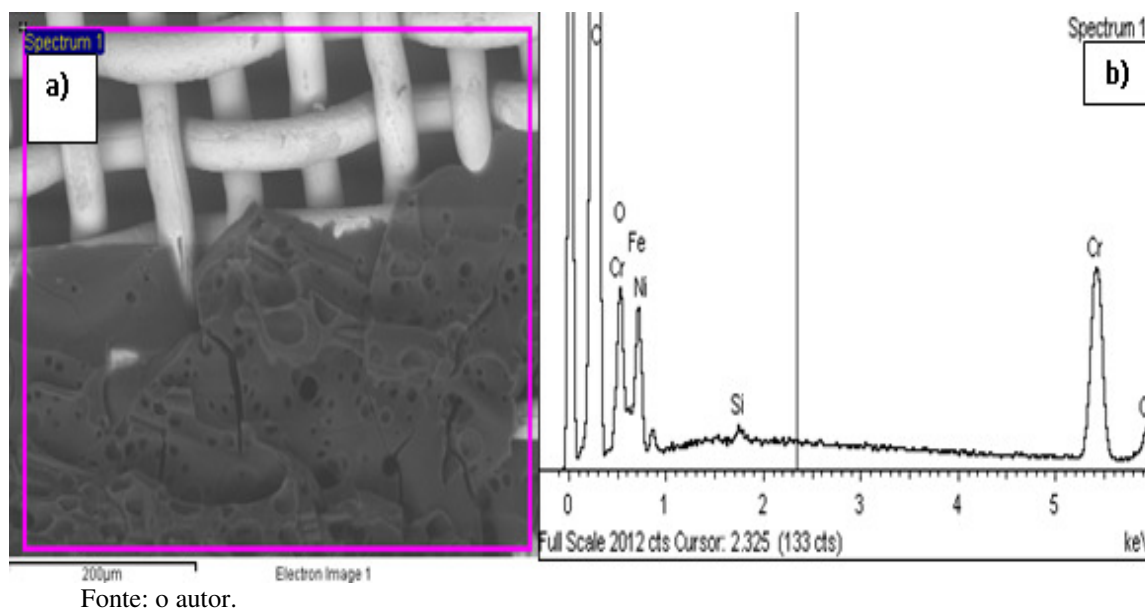
Tabela 38- Análise elementar por EDS da região da amostra ilustrada pela Figura 104 (PEI/fibras de carbono na região de soldagem).

Elemento	% Massa	% Massa Atômica
C	84,05	84,05
O	11,93	11,93
Cr	0,93	0,93
Fe	2,81	2,81
Ni	0,29	0,29

A segunda região selecionada refere-se à fratura em que é observada após a realização do ensaio por *Lap Shear*, envolvendo a separação entre o polímero solidificado e a malha

metálica (elemento de aquecimento ou resistivo). Para este caso, os resultados da análise elementar desta região são apresentados pela Figura 103 e pela Tabela 38.

Figura 103- Análise de EDS da região de separação da matriz polimérica e malha metálica da amostra soldada de PEI/fibras de carbono (a); e espectro elementar da região analisada (b) após a realização do ensaio *Lap Shear*.



Fonte: o autor.

Tabela 39 - Análise elementar por EDS da região da amostra ilustrada pela Figura103.

Elemento	% Massa	% Massa Atômica
C	70,72	86,29
O	9,09	8,33
Si	0,07	0,04
Fe	4,51	1,27
Cr	14,16	3,72
Ni	1,45	0,36

Como pode ser observado, quando as Tabelas 38 e 39, ambas provenientes da análise do EDS, são comparadas entre si, é que as porcentagens de carbono e oxigênio são as mais elevadas nas duas regiões selecionadas, pois são elementos constituintes da matriz polimérica.

Todos os elementos químicos identificados neste estudo tratam de constituintes da junta soldada e dos materiais de origem, não havendo nenhuma indicação de contaminante ou formação de um novo constituinte que possa interferir na qualidade da solda.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

- A partir do estudo dos laminados como recebidos foi possível avaliar as principais propriedades dos laminados de PEI quanto a suas características mecânicas e térmicas a serem relacionadas ao estudo da soldagem dos mesmos. Em relação as propriedades mecânicas, o compósito híbrido foi o que apresentou valores superiores de ILSS. As propriedades térmicas foram avaliadas com o intuito principal de se determinar as temperaturas de transição vítrea e degradação das matérias primas para o estabelecimento das faixas de valores mais apropriadas para a soldagem. Os três laminados apresentaram os mesmos valores de temperatura de transição vítrea, sendo esta próxima a 200°C.

- No estudo por planejamento experimental dos laminados para determinação das melhores condições de soldagem em relação ao maior valor de ruptura pelo ensaio de *Lap Shear*, utilizando-se como elemento resistivo a malha de 200 mesh, foi possível determinar as melhores condições de soldagem. Para o compósito PEI/ fibra de vidro os melhores valores experimentais adquiridos foram obtidos a partir da utilização dos laminados soldados com corrente elétrica de 27,50A, pressão de 1,85MPa e tempo de 175s. Para o compósito de fibra de carbono as melhores condições para soldagem foram: corrente elétrica de 30 A, pressão de 0,7MPa e tempo de 50s. Para o compósito híbrido as melhores condições de corrente elétrica, pressão e tempo para a soldagem foram 33A, 0,7MPa e 50s, respectivamente. Foi ainda possível neste estudo utilizar, com base nos resultados experimentais obtidos, modelos estatísticos característicos da soldagem dos compósitos estudados, com a indicação de valores otimizados fornecidos pelo programa estatístico *Designer express*. No caso do compósito PEI/fibra de vidro os parâmetros otimizados foram de 218,4s, 29,11A e 0,7MPa, sendo neste caso obtido como valor de resistência ao *Lap Shear* 12,64MPa. Para o PEI/fibra de carbono os valores otimizados foram de 51,19s, 30,03A e 0,8MPa, gerando como resposta a resistência ao *Lap Shear* o valor de 24,61MPa. Finalmente, para o compósito híbrido os parâmetros otimizados propostos pelo programa foram: tempo de 58,5s; corrente de 30,83A e pressão de 0,98MPa, resultando em uma resistência ao *Lap Shear* de 21,23MPa. Para este estudo o laminado de carbono apresentou os valores maiores da variável resposta adotada.

- Após a análise dos parâmetros de soldagem, o laminado soldado de PEI/fibras de carbono foi selecionado como estudo de caso. Para este laminado, foi realizado um estudo sobre o elemento resistivo mais adequado a ser utilizado para sua soldagem envolvendo

malhas metálicas de 100, 200 e 300 mesh, assim como um tecido de fibra de carbono contendo um fio metálico condutor. Dentre estes elementos o que se mostrou mais adequado para a soldagem deste sistema, devido a apresentar valores mais elevados de *Lap Shear* foi a malha de 300 mesh. Para a otimização das condições deste estudo de caso, utilizando o laminado PEI/ fibra de carbono e o elemento resistivo de aço inox de 300 mesh foi novamente realizado o planejamento experimental em que se obteve como valor real adquirido da variável resposta por *Lap Shear* 24,41MPa; utilizando-se uma corrente elétrica de 31,5A; uma pressão de 1,85MPa e um tempo de soldagem de 30s.

- A partir desta otimização, corpos de provas de PEI/fibra de carbono com malha metálica de 300 mesh foram preparados e ensaiados para validação do modelo estatístico que foi comprovado experimentalmente com a obtenção dos valores obtidos bem próximos aos preditos pelo programa estatístico.

- Finalmente a partir da caracterização térmica e mecânica das amostras nas condições otimizadas determinadas no estudo de caso, todos os resultados indicaram pequenas diferenças de propriedades do compósito soldado e não soldado, indicando que o processo de soldagem por resistência é apropriado para a integração de peças estruturais.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho e das linhas de pesquisa do grupo de pesquisa de soldagem de compósitos deixa-se as sugestões de trabalhos futuros:

- Realização de condicionamentos ambientais e caracterização nas juntas obtidas nas condições otimizadas deste trabalho.

- Estudo dos fatores econômicos e técnicos para desenvolvimento de projeto para utilização em escala industrial utilizando os resultados deste trabalho.

- Novos planejamentos experimentais para testes com elementos resistivos mais compatíveis e eficientes para com materiais compósitos soldados.

- Estudo da soldagem do laminado PEI/ Fibra de carbono com alumínio aeronáutico.

- Desenvolvimento e estudo de outros métodos de soldagem para os laminados estudados para comparativa com este já desenvolvido.

- Ensaio de fadiga nos laminados soldados visando avaliar a região interfacial onde se encontra a solda dos compósitos soldados.

- A avaliação de outros estudos de casos envolvendo os laminados reforçados com fibras contínuas de vidro e híbrido.

REFERÊNCIAS

ABINOX. **Associação Brasileira de Aço Inox.** Disponível:<
<http://www.abinox.org.br/biblioteca-tecnica-feinox-2013.php>. > Acesso em: 10/07/2013.

ADAMS RD. **Failure strength tests and their limitations.** in Engineered Materials Handbook, Volume 3: Adhesives and Sealants. ASM 1987.

ADHIKARI, B; MAJUMDAR, S. **Polymer in Sensor Applications.** Prog.Polym.Sci, 2004, p. 699 – 766.

AGEORGES, C. et al. Characteristics of resistance welding of lap-shear coupons. Part III. Crystallinity. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 29, n. 8, p. 921–932, 1998.

AGEORGES, C.; YE, L. Resistance Welding of Metal/Thermoplastic Composite Joints. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 14, n. 6, p. 449–475, 2001a.

AGEORGES, C.; YE, L. Simulation of impulse resistance welding for thermoplastic matrix composites. **Applied Composite Materials**, v. 8, n. 2, p. 133–147, 2001b.

AGEORGES, C.; YE, L.; HOU, M. Experimental investigation of the resistance welding for thermoplastic-matrix composites. Part I: heating element and heat transfer. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 7, p. 1027–1039, 2000.

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.

AHMED, T. J. et al. Induction welding of thermoplastic composites - An overview. **Composites Part a-Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 10, p. 1638–1651, 2006.

AHMED, T. J. et al. Heat emitting layers for enhancing NDE of composite structures. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 6, p. 1025–1036, 2008.

AQUINO, E. M. F.; SARMENTO, L. P. S.; SILVA, R. V. Moisture Effect on Degradation of Junte/Glass Hybrid Composites. **Journal of reinforced Plastics and Composites**, United States: Thousand Oaks, 2007, p. 219-233.

ALI, Y; MEHDI, H.; IMMARIGEON, J. P. Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. **Journal of thermoplastic composite materials**. Quebec, Canada: Aerospace Manufacturing Technology Center, 2004, p. 303-341.

AMANCIO, F. S. T. **Rebitagem por Fricção (“FricRiveting”). 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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (ASTM). **D5868**: Lap Shear Adhesion Test for Fiber Reinforced Plastics. Pennsylvania, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D1002-10**: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). Pensilvânia, Estados Unidos, American Society Test of Materials, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2344**. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. Pensilvânia, Estados Unidos, American Society Test of Materials, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5379**: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. Pensilvânia, Estados Unidos, American Society Test of Materials, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (ASTM). **D5868**: Lap Shear Adhesion Test for Fiber Reinforced Plastics. Pennsylvania, 2005.

AZEVEDO, M. G. DE et al. Estudo da inserção de grupos iônicos em polímeros termorresistentes através de planejamento de experimentos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, n. 4, p. 412–418, 2006.

BANDEIRA, C.F.; **Avaliação de Frequências não convencionais na obtenção de curvas de DMA de compósitos poliméricos**. 2011.177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

BARROS, F.B. **Preparação, caracterização físico-química e avaliação do comportamento térmico e mecânico de blendas de poli PET/PEI**. 2007, 216f Tese (Doutorado em ciências na área de físico-química), UFSCAR, São Paulo, 2007.

BATES, P; COUZENS, D; KENDALL, J. Vibration Welding of Continuously Reinforced Thermoplastic Composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, 2001, p. 344–354.

BATES, P.J. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. **Composites: Part A**, 36, 2005, 39–54.

BATISTA, N.L. BOTELHO, E.C. Influência do intemperismo no desempenho viscoelástico de laminados PEI/fibras de carbono com aplicações aeroespaciais. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros - realizado em Foz do Iguaçu - PR, no período de 13 a 17 de outubro de 2009.

BONELLI, C. M. C. et al. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava**. *Polímeros*, v. 15, n. 4, p. 256–260, 2005.

BRITO JUNIOR, C. A. R.; **Caracterização Dinâmico-Mecânica de Compósitos Metal-Fibra e Compósitos de Fibras de Carbono/Resina Epóxi para Uso Aeronáutico**. 2007. 151f. Dissertação (Mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2007.

BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. Caracterização Mecânica de Compósitos de Poliamida/Fibra de Carbono Via Ensaios de Cisalhamento Interlaminar e de Mecânica da Fratura. **Polímeros**, v. 12, n. 3, 2002.

BOTELHO, E. C. **Compósitos Aeronáuticos Processados a Partir de Fibra de Carbono Impregnada com Poliamida 6/6 Via Processo de Polimerização Interfacial**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2002.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005.

CÂNDIDO, G. M. et al. Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em modo I. **Polímeros**, v. 22, n. 1, p. 41–53, 2012.

CÂNDIDO, G. M.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Processamento de laminados de compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas. **Polímeros**, v. 10, n. 1, p. 31–41, 2000a.

CÂNDIDO, G. M, ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Hygrothermal Effects on the Tensile Strength of Carbon/Epoxy. Laminates with Molded Edges, **Materials research**, vol 3, n°. 2, 2000b.

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

COLACK, Z.S.; SONMEZ, F.O.; KALENDEROGLU, V. Process Modeling and Optimization of Resistance Welding for Thermoplastic Composites. **Journal of Composite Materials**, 36, n.6, 2002, 721-744.

COSTA L. M, REZENDE M.C, CUNHA J. A, **Influência de Diferentes Condições Higrotérmicas na Resistência à Tração de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi Modificada**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, nº 3, p. 193-201, 2006.

COSTA , M, L. ALMEIDA, S, F, M. REZENDE M.C **Hygrothermal Effects on Dynamic Mechanical Analysis and Fracture Behavior of Polymeric Composites**. Materials Research, vol. 8, nº 3, p. 335-340, 2005.

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

DA COSTA, A. P. et al. A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 4, n. 3, p. 255–265, 2012.

DA SILVA, R. V. et al. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 13, n. 1, p. 154–161, 2008.

DE MOURA, M.F.S.F; DE MORAIS, A.B; DE MAGALHÃES, A. G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. Editora Copyright, Porto, 2005.

DE PAOLI, M.A. **Degradação e estabilização de Polímeros**. Editora Artliber, São Paulo 2008.

DIAZ, J. RUBIO, L. Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fibre reinforced thermoplastic materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v.143, p.342-346, Dec 20 2003.

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**, v. 46, n. 8, p. 911–919, 2012.

DUBÉ, M. et al. Resistance welding of thermoplastic composites skin/stringer joints. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 12, p. 2541–2552, 2007.

DUBÉ, M. et al. Current leakage prevention in resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastics. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 6, p. 1579–1587, 2008.

EVENO EC, GILLESPIE Jr. JW. Resistance welding of graphite polyetheretherketone composites: an experimental investigation. **J Thermoplast Compos Mater** 1988;1:322–38.

FARIA, M.C. **Avaliação do efeito higrótérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de PPS/ fibras contínuas**. 2008. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica- Projetos e Materiais)- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

FELTRAN, M.B. **Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: uso de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira**. São Paulo: Escola Politécnica do Estado de São Paulo, 2008.

FREISSINET, S. **Worries About New Composite Made Airplane**. Disponível: < <http://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.htm>. > Acesso em: 23\04\2014.

GATTI, M. C. A.; SILVA, R. V. DA; TARPANI, J. R. Análise térmica do laminado PEEK/carbono submetido a diferentes rotas de processamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, n. 3, p. 332–339, 2006.

HOU, M. Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. **Composite Structures**, v. 47, n. 1-4, p. 667–672, 1999.

HOU, M. An Experimental Study of Resistance Welding of Carbon Fibre Fabric Reinforced Polyetherimide (CF Fabric / PEI). **Composite Material**. p. 35–49, 2006.

HOU, M.; FRIEDRICH, K. Resistance welding of continuous glass fibre-reinforced polypropylene composites. **Composites Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 153–163, 1992.

HOU, M.; YE, L.; MAI YW. An experimental study of resistance welding of carbon fibre fabric reinforced polyetherimide (CF Fabric/PEI) composite material. **Applied Composite Materials**; v. 6, p. 35–49, 1999.

LABRANDERO, S.D. **Characterization of metallic meshes used for resistance welding of thermoplastic composites**. Monografia de conclusão de curso. Faculty of aerospace engineering design and production of composite structures. Universidad carlos iii de madrid, 2009.

LIBRANTZ, H.; RAMBO, C.R.; LIBRANTZ, A.F.H. **Efeito do impacto dos raios nas aeronaves com estrutura composta de materiais compósitos**. Exacta, São Paulo, v.4, n.2, 2006, 259-271.

MARQUES, L. S. et al. Avaliação dos comportamentos mecânico e térmico de laminados de PPS/fibra de carbono processados em autoclave sob diferentes ciclos de consolidação. **Polímeros**, v. 20, n. 4, p. 309–314, 2010.

MANO, E.B. **Polímeros como materiais de Engenharia**. 5ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte 2009.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. Editora Artliber, São Paulo 2011.

MAZUR, R. L. et al. Avaliações térmica e reológica da matriz termoplástica PEKK utilizada em compósitos aeronáuticos. **Polímeros**, v. 18, n. 3, p. 237–243, 2008.

MEDEIROS, R.; TITA, V.; NETO, S.V. Método Experimental de Análise de Junções Metal-Compósito para Estruturas Aeronáuticas. **Revista UNIFA**, v.23, n.29, pg. 57-68, 2011.

MEI, Z.; CHUNG, D. D. L. Thermal stress-induced thermoplastic composite debonding, studied by contact electrical resistance measurement. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 20, n. 2, p. 135–139, 2000.

MEHDI, H.; IMMARIGEON, J. P. **Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites**. Journal of thermoplastic composite materials, Julho. 2004, vol. 4.

MENDES P. K. **Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)**. 2011. 93f Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Universidade). Universidade Federal de Itajubá, 2011.

MICKAGUE, L. **Termoplastic resins**. In: COMMITTEE, A.I.H. Ed. ASM Handbook:Vol 21, Composites: ASM Internacional, 2001.p.339-361.

MOLDAVISKI, N.; COHEN, S. **Determinants of liposome partitioning in aqueous twophase systems: Evaluation by means of a factorial design**. Biotechnology and Bioengineering. v.52, p. 529-537, 1996.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6 ed. New York: John Wiley, 2005. 643 p.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

NOGUEIRA, C. L., **Obtenção e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Avançados à Base de Matrizes de Polipropileno Reforçados com Fibra de Carbono**. 2004.135f. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2004.

NETO, L.P.O. **A aplicação da poliamida 6.6 em peças de alta performance para o mercado moveleiro**. 2009. 60f. Trabalho de graduação (Graduação em Tecnólogo em polímero), São Paulo: Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, 2009.

NETO, B.N; SCARMINIO, I.S; BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2ª edição. Campinas: Editora Unicamp, 1995.

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

NETO, F.L; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais : Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

NILO JÚNIOR, L. P. **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos.** 2003. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

NINO, G. F. et al. Thermal NDI of resistance welded composite structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 40, n. 3, p. 237–248, 2009.

NOGUEIRA, C. L. **Obtenção e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Avançados à Base de Matrizes de Polipropileno Reforçados com Fibra de Carbono.** Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 256 f. 135, 2004.

NOHARA, L.B. **Estudo da interface de compósitos termoplásticos estruturais processados a partir de moldagem por compressão a quente e suspensões poliméricas.** São José dos Campos: Instituto de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, 2005.

NOHARA, L.B.; KAWAMOTO, A.M.; TAKAHASHI, M.F.K.; WILLS.M.; NOHARA, E.L. **Síntese de um Poli (Ácido Âmico) para Aplicação como Interface em Compósitos Termoplásticos de Alto Desempenho.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 14, n 2, 2004, 122-128.

OLIVEIRA, G.H.; BOTELHO, E.C. CECEMM, 9º, 2007, Florianópolis. **Avaliação da Resistência à fadiga do Compósito de Fibras de Carbono/PEI Com Aplicações na Indústria Aeroespacial.** Florianópolis: UFSC, 2007. P. 1-10.

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.

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

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

PARDINI, L.C; PERES, R.J.C. Tecnologia de Fabricação de Pré-Impregnados para Compósitos Estruturais Utilizados na Indústria Aeronáutica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 2, 1996, 32-42.

PEREIRA, A.M.D. **Fratura de Juntas coladas**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Aveiro ,2002.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, 2000.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, C.B.; **Compósitos Estruturais: Teoria e Prática**. Editora ArtLiber, São Paulo 2011.

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

ROJEK, M.; STABOK, J.; WR'OBEL, G. Ultrasonic methods in diagnostics of epoxy-glass composites. **Journal of Materials Processing Technology**, 162– 163, 2005, 121–126.

RIBEIRO, B.; COSTA, M.L.; REZENDE, M.C.; BOTELHO, E.C. **Avaliação do Condicionamento Ambiental na resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos termoplásticos de PEI/Fibra de vidro**. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros - realizado em Foz do Iguaçu - PR, no período de 13 a 17 de outubro de 2009.

SALERNO, G. **Análise Numérica De Delaminação Em Materiais Compósitos Carbono-Epóxi**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 10, n. 2, p. 153-161, abr.-jun. 2013

SEENA, Y. A. **Comparison of the Mechanical Properties of Phenol Formaldehyde Composites Reinforced With Banana Fibres and Glass Fibres**. Composite Science and Technology, 2002, p.1857-1868.

SIERKSMA, D. **Resistance Welding of Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Composites**. Delft University of Technology (Thesis Report), 2002.

SILVA, F. BARBOSA, J.S. GARCIA.G.; FAEZ, R.; ALBERS, A.P.F. **Avaliação dos Parâmetros de Processamento nas Propriedades de Compósitos Termoplásticos**. X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, Jacareí, 2011.

SILVA, R. A.; REZENDE, M. C. Erosão em compósitos à base de fibras de vidro/kevlar e resina epóxi de uso aeronáutico. **Polímeros**, v. 13, n. 1, p. 79–86, 2003.

SOUZA, E. W. DE. **Estudo para fabricação de refletores automobilísticos utilizando um material compósito termofixo e um material termoplástico**. 2010.112f. Dissertação (Mestrado) Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, 2010.

SOUZA, E.W. MARINUCCI, G. **Estudo para fabricação de refletores automobilísticos utilizando um material compósito termofixo e um material termoplástico**. São Paulo: Instituto de Pesquisas energéticas e nucleares, Universidade de São Paulo, 2010.

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

STAVROV D, BERSEE HEN, BEUKERS A. The influence of the heating element on **resistance welding of thermoplastic composite materials**. Proceedings of ICCM-14 Conference. San Diego, July 2003. pg 581.

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

STAVROV, D.; BERSEE, H. E. N. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, n. 1, p. 39–54, 2005.

STAVROV, D.; BERSEE, H. E. N. **Thermal Aspects in Resistance Welding of Thermoplastic Composites**Heat Transfer: Volume 3, 2003. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1581459>

YOUNG, R. J. LOVELL, P. **An Introduction to Polymers**. Londres: Chapman & Hall, 1991.

VODICKA, R. **Thermoplastics for Airframe Applications: A Review of the Proprieties and Repair Methods for Thermoplastic Composites**. DSTO Aeornautical and Maritime Research Laboratory, Australia, 1996.

WAINER, E. BRANDI, S.D. DE MELLO, F.D.H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 6ª edição. São Paulo, Editora Blucher, 2008.

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

PEI PROPERTIES

Typical Neat Resin Properties			
Specific Gravity	1.27		
Tg	419°F (215°C)		
Melt temp	572°F (300°C)		
Dielectric constant	3.15 at 1MHz		
Loss tangent	0.0013 at 1MHz		
Moisture absorption	1.25%		
Flammability	V-0		
Tensile strength	15.2ksi (105MPa)		
Tensile modulus	0.475Msi (3.27GPa)		
Elongation at yield	7%		
Poisson's ratio	0.36%		
Compression strength	22.0ksi (152MPa)		

Mechanical properties 73°F (23°C)/50%RH			
Mass of fabric	5.90	oz/yd ²	200 g/m ²
Mass of fabric + resin	10.17	oz/yd ²	345 g/m ²
Resin content by volume	50	%	50 %
Resin content by weight	42	%	42 %
Moisture pick up	0.35	%	0.35 %
Fib thickness	0.0091	in	0.23 mm
Specific gravity	94.2	lb/ft ³	1.51 g/cm ³
Tg (DSC) (amorphous)	410	°F	210 °C
Tm	590	°F	310 °C

Mechanical properties -67°F (-55°C) Dry			
Tensile strength wet	98.9	ksi	682 MPa
Tensile modulus wet	8.1	Msi	56 GPa
Compression strength wet	102.1	ksi	704 MPa
Compression modulus wet	7.3	Msi	50 GPa
In plane shear strength	22.0	ksi	152 MPa
In plane shear modulus	595.5	ksi	4107 MPa
Open hole tensile strength	38.1	ksi	263 MPa

Carbon T300 3K SHS with PEI matrix			
8.26	oz/yd ²	300	g/m ²
14.24	oz/yd ²	475	g/m ²
50	%	47.5	%
42	%	37	%
0.35	%	0.1	%
0.0122	in	0.25	mm
94.2	lb/ft ³	1.92	g/cm ³
410	°F	90	°C
590	°F	120	°C

Glass fabric US style 7781 with PEI matrix			
8.85	oz/yd ²	300	g/m ²
13.21	oz/yd ²	448	g/m ²
50	%	50	%
33	%	33	%
0.35	%	0.35	%
0.0094	in	0.24	mm
118.1	lb/ft ³	1.91	g/cm ³
410	°F	210	°C
590	°F	310	°C

39.7	ksi	274	MPa
------	-----	-----	-----

ANEXO A- Fichas referentes aos laminados de PEI fornecidas pelo fabricante TEN-CATE.

Mechanical properties 73°F (23°C)/50%RH				
Tensile strength warp				
Tensile strength weft	103.2	ksi	712	MPa
Tensile modulus warp				
Tensile modulus weft	8.0	Msi	55	GPa
Compression strength warp				
Compression strength weft	95.4	ksi	658	MPa
Compression modulus warp				
Compression modulus weft	7.4	Msi	51	GPa
Flexual strength warp				
Flexual strength weft	118.9	ksi	820	MPa
Flexual modulus warp				
Flexual modulus weft	6.7	Msi	46	GPa
In plane shear strength	18.1	ksi	125	MPa
In plane shear modulus	487.1	ksi	3359	MPa
Open hole tensile strength	37.8	ksi	261	MPa
Open hole compressive strength	39.9	ksi	275	MPa
Mechanical properties 80°C Dry				
Tensile strength weft	101.6	ksi	701	MPa
Tensile modulus weft	8.1	Msi	56	GPa
Compression strength weft	80.6	ksi	556	MPa
Compression modulus weft	7.4	Msi	51	GPa
Flexual strength weft	117.2	ksi	808	MPa
Flexual modulus weft	7.1	Msi	49	GPa
In plane shear strength	17.5	ksi	121	MPa
In plane shear modulus	390.8	ksi	2695	MPa
Mechanical properties 176°F (80°C) conditioned at 122°F (50°C) and 95%RH for 7 days				
Flexual strength warp				
Flexual strength weft				
Flexual modulus warp				
Flexual modulus weft				

Carbon T300 3K 5HS with PEI matrix			
95.1	ksi	656	MPa
97.6	ksi	673	MPa
8.1	Msi	56	GPa
8.3	Msi	57	GPa
108.8	ksi	750	MPa
109.3	ksi	754	MPa
7.5	Msi	52	GPa
7.5	Msi	52	GPa
126.2	ksi	870	MPa
115.0	ksi	793	MPa
7.3	Msi	50	GPa
6.4	Msi	44	GPa
17.1	ksi	118	MPa
487.6	ksi	3363	MPa
39.2	ksi	270	MPa
38.9	ksi	268	MPa

Glass fabric US style 7781 with PEI matrix			
70.2	ksi	484	MPa
64.5	ksi	445	MPa
3.8	Msi	26	MPa
3.5	Msi	24	MPa
105.4	ksi	727	MPa
98.0	ksi	676	MPa
4.2	Msi	29	MPa
3.9	Msi	27	MPa
97.0	ksi	669	MPa
84.8	ksi	585	MPa
4.1	Msi	28	MPa
3.6	Msi	25	MPa

115.0	ksi	793	MPa
6.4	Msi	44	GPa

124.3	ksi	857	MPa
115.4	ksi	796	MPa
7.3	Msi	50	GPa
6.7	Msi	46	GPa

94.5	ksi	652	MPa
83.8	ksi	578	MPa
3.9	Msi	27	GPa
3.5	Msi	24	GPa

Mechanical properties 176°F (80°C) conditioned at 158°F (70°C) and 85%RH				
Tensile strength weft	92.9	ksi	641	MPa
Tensile modulus weft	8.0	Msi	55	GPa
Compression strength weft	76.3	ksi	526	MPa
Compression modulus weft	7.5	Msi	52	GPa
Flexual strength weft	109.0	ksi	752	MPa
Flexual modulus weft	6.5	Msi	45	GPa
In plane shear strength	15.8	ksi	109	MPa
In plane shear modulus	367.4	ksi	2534	MPa

Carbon T300 3K 5HS with PEI matrix			
112.1	ksi	773	MPa
8.0	Msi	55	GPa
87.7	ksi	605	MPa
7.8	Msi	54	GPa
108.0	ksi	745	MPa
6.4	Msi	44	GPa
15.8	ksi	109	MPa
371.5	ksi	2562	MPa

Flammability Properties														
	OSU		Flammability			SMOKE (4 min)		TOXICITY						
	Heat Release	Release Rate	Burn Length	After Flame	Drip Flame	Non-Flaming	Flaming	HCN	CO	NOx	SO2	HF	HCl	HBr
5 plies of 7781/PEI	10	12	37mm	0sec	N/D	1	30	0	35.3	1.3	0	0	0	
5 plies of 7781 PEI	0	13	50mm	0sec	N/D									
5 plies of 7781 PEI/ Pigmented White	3.51	14.06	1.7mm	0sec	N/D	1.31		2		0	0	1	0	0

ANEXO B- Informações da máquina soldadora fornecidas pelo Fabricante.



2.2. Características do equipamento

A prensa deverá ser capaz de soldar corpos de prova com as seguintes características:

- Comprimento corpo prova: 10, 20 e 30 cm
- Largura: 2, 3 e 4 cm
- Espessura: 3 a 5 mm

A força exercida sobre os corpos de prova para o processo de soldagem deverá ser configurável com valores indo de 40Kgf a 2280 Kgf . Este valor será fixo durante o processo de soldagem, ou seja, o valor especificado para um ensaio não será alterado durante a realização do ensaio. Este valor definirá o valor de pressão (Mpa) de acordo com a área dos corpos de prova listados acima.

A corrente fornecida para aquecimento da malha metálica deverá ser configurável com valores indo de 5 Amperes a 70 Amperes. Este valor será fixo durante o processo de soldagem, ou seja, o valor especificado para um ensaio não será alterado durante a realização do ensaio.

A tensão fornecida para aquecimento da malha metálica deverá ser configurável com valores indo de 5 Volts a 40 Volts. Este valor será fixo durante o processo de soldagem, ou seja, o valor especificado para um ensaio não será alterado durante a realização do ensaio.

A tensão e corrente acima poderão ser combinadas para se atingir valores de W/cm², de acordo com a área dos corpos de prova listados acima.

A fonte de alimentação pneumática será fornecida pelo contratante no local de instalação da prensa.

2.3. Software de Controle e Aquisição

O software de controle da prensa será executado em uma plataforma PC, com as seguintes características mínimas:

- Sistema operacional Windows 7;
- Processador 1,6 GHz Duo core;
- 2 GB de memória RAM;
- 160 GB de Hard Disk.

As configurações dos ensaios, serão realizadas por meio do software de controle da prensa, objeto de desenvolvimento deste projeto. Abaixo seguem as funcionalidades requeridas:

- Fornecer interface com o usuário para configuração dos dados de ensaio, sendo eles: força da prensa, corrente e tensão e tempos de prensagem e de soldagem;

Rua Búzios, 70 Chácaras Reunidas – São José dos Campos - SP

CEP: 12238-370 Tel: (12) 3019-0000

Site: www.aumek.com.br E-mail: aumek@aumek.com.br

APÊNDICES

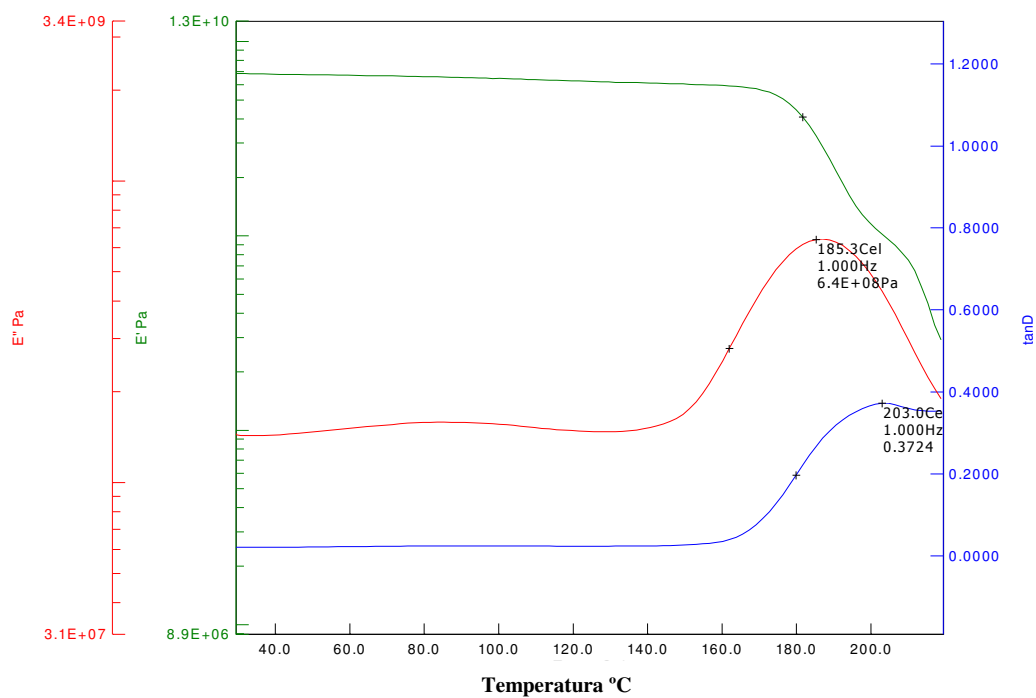
APÊNDICE A- Instrução de trabalho para a operação da máquina soldadora.

 UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA CAMPUS DE GUARATINGUETÁ DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIA Instrução de Trabalho		Data revisão:
 Laboratório Compósitos de	Operação da máquina soldadora de compósitos por resistência elétrica	Nº de pág.

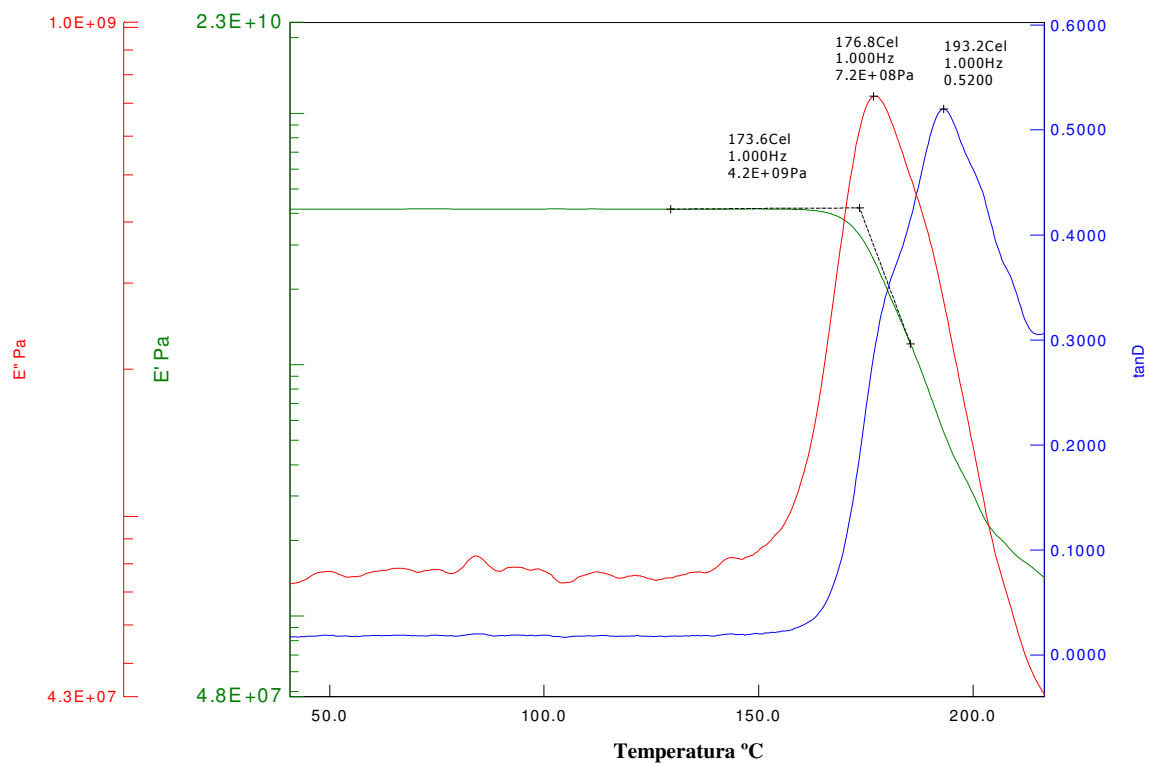
Etapas	Execução	Cuidados especiais técnicos e segurança	Ilustração
1- Acionamento da pressão externa para o sistema prensa da soldadora.	Liberar a pressão pela válvula no manômetro	Verificar se a pressão está a 6 Mpa, e se não há vazamentos.	
2- Liberação da pressão para a soldadora.	Empurrar o pistão que localiza-se na parte posterior da máquina.	Ruído elevado causado pela entrada de pressão. Utilizar protetor auricular.	
3- Acionar a parte elétrica da soldadora.	Ligar na tomada o fio Ligar a fonte Verificar conexões	Verificar se houve o acionamento da fonte.	
4- Acionar o software.	Ligar o computador e acionar o programa.	Verificar se o acionamento está correto	
5- Preparo para soldagem dos cps.	Colocar o elemento resistivo Colocar as amostras entre o elemento resistivo.	Utilizar luvas e óculos de proteção e protetor auricular	
6- Soldagem das amostras.	Ligar sistema de exaustão do local Fechar a porta de segurança Acionar o botão do software	Utilizar luvas e óculos de proteção e protetor auricular	
7- Retirada das amostras.	Desligar o software de funcionamento da máquina Retirar as amostras da cabine de soldagem pressionando os jacarés de passagem de corrente.	Utilizar luvas e óculos de proteção e protetor auricular	
8- Desligamento da máquina.	Desligar software Desligar fonte Despressurizar a prensa	Utilizar luvas e óculos de proteção e protetor auricular	

EPIs necessários para a atividade	Luvas, óculos, máscara de gases e avental de manga comprida.
--	--

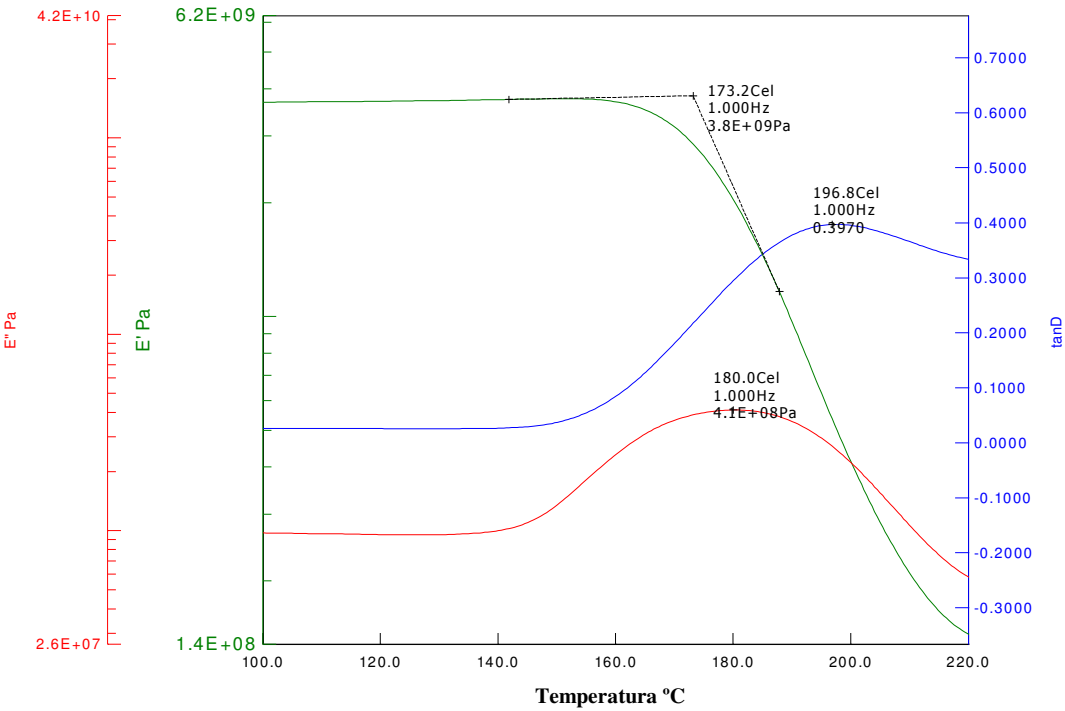
APÊNDICE B- Curva de DMA do laminado de PEI/VIDRO



APÊNDICE C- Curva de DMA do laminado de PEI Carbono



APÊNDICE D- Curva de DMA do laminado de PEI Híbrido.



APÊNDICE E- Tabela referente aos ensaios de soldagem realizados com o laminado PEI/fibra de vidro com malha de 200mesh.

Std planejamento	PEI-Vidro						
	Experimento	Tempo	Corrente	Pressão	Lapshear		
1	1	50	25	0,7	1,2		
	2	50	25	0,7	0,81	média	Desvio padrao
	3	50	25	0,7	0,99	1,012	0,21
	4	50	25	0,7	1,26		
	5	50	25	0,7	0,8		
2	6	300	25	0,7	4,55		
	7	300	25	0,7	3	média	Desvio padrao
	8	300	25	0,7	3,81	3,392	0,782668512
	9	300	25	0,7	2,6		
	10	300	25	0,7	3		
3	11	50	30	0,7	4,64		
	12	50	30	0,7	5,95	média	Desvio padrao
	13	50	30	0,7	5	4,93	0,668131724
	14	50	30	0,7	4,12		
	15	50	30	0,7	4,94		
4	16	300	30	0,7	12,97		
	17	300	30	0,7	10,62	média	Desvio padrao
	18	300	30	0,7	11,55	11,97	0,932925506
	19	300	30	0,7	12,66		
	20	300	30	0,7	12,05		
5	21	50	25	3	3,05		
	22	50	25	3	2,44	média	Desvio padrao
	23	50	25	3	1	1,886	0,899266368
	24	50	25	3	1,94		
	25	50	25	3	1		
6	26	300	25	3	3,5		
	27	300	25	3	3,86	média	Desvio padrao
	28	300	25	3	6,4	4,952	1,620037037
	29	300	25	3	7		
	30	300	25	3	4		
7	31	50	30	3	7,79		
	32	50	30	3	9,5	média	Desvio padrao
	33	50	30	3	10,78	9,64	1,547013251
	34	50	30	3	8,57		
	35	50	30	3	11,56		
8	36	300	30	3	9,09		
	37	300	30	3	12,14	média	Desvio padrao
	38	300	30	3	12,01	11,176	1,491452312
	39	300	30	3	12,52		
	40	300	30	3	10,12		

9	41	50	27,5	1,85	10,15		
	42	50	27,5	1,85	10,09	média	Desvio padrao
	43	50	27,5	1,85	10,12	10,092	0,046043458
	44	50	27,5	1,85	10,07		
	45	50	27,5	1,85	10,03		
10	46	300	27,5	1,85	11,57		
	47	300	27,5	1,85	11,7	média	Desvio padrao
	48	300	27,5	1,85	11,8	11,612	0,135535973
	49	300	27,5	1,85	11,47		
	50	300	27,5	1,85	11,52		
11	51	175	23,3	1,85	0,5		
	52	175	23,3	1,85	0,45	média	Desvio padrao
	53	175	23,3	1,85	0,6	0,506	0,070213959
	54	175	23,3	1,85	0,43		
	55	175	23,3	1,85	0,55		
12	56	175	31,7	1,85	7,5		
	57	175	31,7	1,85	8,7	média	Desvio padrao
	58	175	31,7	1,85	6,84	7,694	0,679764665
	59	175	31,7	1,85	7,53		
	60	175	31,7	1,85	7,9		
13	61	175	27,5	0,7	11,45		
	62	175	27,5	0,7	12,08	média	Desvio padrao
	63	175	27,5	0,7	11,23	11,492	0,342520072
	64	175	27,5	0,7	11,27		
	65	175	27,5	0,7	11,43		
14	66	175	27,5	3	11,37		
	67	175	27,5	3	11,35	média	Desvio padrao
	68	175	27,5	3	11,42	11,34	0,060827625
	69	175	27,5	3	11,27		
	70	175	27,5	3	11,29		
15-19	71	175	27,5	1,85	11,01		
	72	175	27,5	1,85	11,56	média	Desvio padrao
	73	175	27,5	1,85	11,67	10,094	1,859792999
	74	175	27,5	1,85	8,63		
	75	175	27,5	1,85	7,6		
	76	175	27,5	1,85	10,79		

APÊNDICE F- Tabela referente aos ensaios de soldagem realizados com o laminado PEI/fibra de carbono com malha de 200mesh.

PEI- Carbono								
Std planejamento	Amostras	Experimento	Tempo	Corrente	Pressão	Lapshear		
1	1	1	50	30	0,7	21,73	média	Desvio padrao
	2	2	50	30	0,7	26,1		
	3	3	50	30	0,7	27,23		
	4	4	50	30	0,7	22,81		
	5	5	50	30	0,7	21,51		
2	6	6	300	30	0,7	14,01	média	Desvio padrao
	7	7	300	30	0,7	14,6		
	8	8	300	30	0,7	14,62		
	9	9	300	30	0,7	10,8		
	10	10	300	30	0,7	17,3		
3	11	11	50	32	0,7	24,3	média	Desvio padrao
	12	12	50	32	0,7	22,13		
	13	13	50	32	0,7	21,7		
	14	14	50	32	0,7	22,25		
	15	15	50	32	0,7	23,4		
4	16	16	300	32	0,7	11,65	média	Desvio padrao
	17	17	300	32	0,7	9,15		
	18	18	300	32	0,7	10,54		
	19	19	300	32	0,7	11,52		
	20	20	300	32	0,7	8,09		
5	21	21	50	30	3	21,45	média	Desvio padrao
	22	22	50	30	3	21,4		
	23	23	50	30	3	20,2		
	24	24	50	30	3	22,8		
	25	25	50	30	3	20,3		
6	26	26	300	30	3	14,7	média	Desvio padrao
	27	27	300	30	3	12,2		
	28	28	300	30	3	14,92		
	29	29	300	30	3	12,4		
	30	30	300	30	3	12,4		
7	31	31	50	32	3	21,63	média	Desvio padrao
	32	32	50	32	3	23,67		
	33	33	50	32	3	21,43		
	34	34	50	32	3	19,77		
	35	35	50	32	3	18,4		
8	36	36	300	32	3	11,75	média	Desvio padrao
	37	37	300	32	3	13,85		
	38	38	300	32	3	14,7		

	39	39	300	32	3	12,8		
	40	40	300	32	3	12,57		
9	41	41	30	31	1,85	24,54	média	Desvio padrao
	42	42	30	31	1,85	24,15		
	43	43	30	31	1,85	23,67	23,82	0,52
	44	44	30	31	1,85	23,24		
	45	45	30	31	1,85	23,5		
10	46	46	350	31	1,85	14,05	média	Desvio padrao
	47	47	350	31	1,85	11,95		
	48	48	350	31	1,85	12,1	12,15	1,71
	49	49	350	31	1,85	9,5		
	50	50	350	31	1,85	13,13		
11	51	51	175	27	1,85	23,31	média	Desvio padrao
	52	52	175	27	1,85	20,39		
	53	53	175	27	1,85	20,53	21,65	1,23
	54	54	175	27	1,85	21,72		
	55	55	175	27	1,85	22,32		
12	56	56	175	35	1,85	3,66	média	Desvio padrao
	57	57	175	35	1,85	6,72		
	58	58	175	35	1,85	5,8	5,21	1,70
	59	59	175	35	1,85	3,14		
	60	60	175	35	1,85	6,73		
13	61	61	175	31	0,7	13,7	média	Desvio padrao
	62	62	175	31	0,7	10,65		
	63	63	175	31	0,7	10,43	12,68	2,41
	64	64	175	31	0,7	12,34		
	65	65	175	31	0,7	16,27		
14	66	66	175	31	3	13,07	média	Desvio padrao
	67	67	175	31	3	12,6		
	68	68	175	31	3	15,05	14,22	1,27
	69	69	175	31	3	15,17		
	70	70	175	31	3	15,19		
15-19	71	71	175	31	1,85	15,12	média	Desvio padrao
	72	72	175	31	1,85	13,73		
	73	73	175	31	1,85	14,98	13,54	1,59
	74	74	175	31	1,85	11,57		
	75	75	175	31	1,85	12,28		

APÊNDICE G- Tabela referente aos ensaios de soldagem realizados com o laminado PEI/Híbrido com malha de 200mesh.

Pei-Híbrido							
Std planejamento	Experimento (Amostras)	Tempo	Corrente	Pressão	Lapshear		
1	1	50	30	0,7	20,37		
	2	50	30	0,7	20,82	média	Desvio padrao
	3	50	30	0,7	19,1	19,65	2,204926303
	4	50	30	0,7	16,12		
	5	50	30	0,7	21,84		
2	6	300	25	0,7	8,64		
	7	300	25	0,7	13,7	média	Desvio padrao
	8	300	25	0,7	10,4	11,328	1,995725432
	9	300	25	0,7	12,8		
	10	300	25	0,7	11,1		
3	11	50	30	0,7	19,7		
	12	50	30	0,7	20,8	média	Desvio padrao
	13	50	30	0,7	19,5	20,248	0,669716358
	14	50	30	0,7	20,2		
	15	50	30	0,7	21,04		
4	16	300	30	0,7	3,5		
	17	300	30	0,7	5,05	média	Desvio padrao
	18	300	30	0,7	4	4,11	0,907193474
	19	300	30	0,7	5		
	20	300	30	0,7	3		
5	21	50	30	3	11,1		
	22	50	30	3	10,7	média	Desvio padrao
	23	50	30	3	16,3	14,12	2,948219802
	24	50	30	3	16,5		
	25	50	30	3	16		
6	26	300	30	3	10		
	27	300	30	3	12	média	Desvio padrao
	28	300	30	3	13	11,8	1,303840481
	29	300	30	3	11		
	30	300	30	3	13		
7	31	50	33	3	17,6		
	32	50	33	3	18,8	média	Desvio padrao
	33	50	33	3	20,5	19,74	1,492648653
	34	50	33	3	21,2		
	35	50	33	3	20,6		
8	36	300	33	3	11,2		
	37	300	33	3	8,78	média	Desvio padrao
	38	300	33	3	11,2	9,748	1,325488589
	39	300	33	3	8,78		
	40	300	33	3	8,78		
9	41	30	31,5	1,85	10,3		

	42	30	31,5	1,85	11,6	média	Desvio padrao
	43	30	31,5	1,85	9,4	10,7	1,367479433
	44	30	31,5	1,85	9,6		
	45	30	31,5	1,85	12,6		
10	46	350	31,5	1,85	10,07		
	47	350	31,5	1,85	9,98	média	Desvio padrao
	48	350	31,5	1,85	10,5	10,031	0,295601083
	49	350	31,5	1,85	9,905		
	50	350	31,5	1,85	9,7		
11	51	175	27	1,85	17,6		
	52	175	27	1,85	16,55	média	Desvio padrao
	53	175	27	1,85	19,16	17,608	1,270303113
	54	175	27	1,85	16,18		
	55	175	27	1,85	18,55		
12	56	175	36	1,85	4,4		
	57	175	36	1,85	3,92	média	Desvio padrao
	58	175	36	1,85	3,95	4,034	0,205012195
	59	175	36	1,85	3,95		
	60	175	36	1,85	3,95		
13	61	175	31,5	0,7	18,52		
	62	175	31,5	0,7	12,97	média	Desvio padrao
	63	175	31,5	0,7	13,33	15,204	2,735741216
	64	175	31,5	0,7	13,35		
	65	175	31,5	0,7	17,85		
14	66	175	31,5	3	12,5		
	67	175	31,5	3	11,58	média	Desvio padrao
	68	175	31,5	3	12,5	12,032	0,460347695
	69	175	31,5	3	11,58		
	70	175	31,5	3	12		
15-19	71	175	31,5	1,85	9		
	72	175	31,5	1,85	11,83	média	Desvio padrao
	73	175	31,5	1,85	7,4	8,736	1,845462002
	74	175	31,5	1,85	7,45		
	75	175	31,5	1,85	8		

APÊNDICE H- Resultados de *Lap Shear* do estudo dos elementos resistivos.

Elemento resistivo	Lap- shear (MPa)	Desvio Padrão
Malha aço inox 100 mesh	2.74	0.25
Malha aço inox 200 mesh	20.50	0.75
Malha aço inox 300 mesh	22.45	0.91
Fibra de Carbono c/ bronze	0.27	0.12

APÊNDICE I- Tabela referente aos ensaios de soldagem realizados com o laminado PEI/fibra de carbono com malha de 300mesh.

Std planejament o	PEI- Carbono- 300 mesh							
	Amostras	Experimento	Tempo	Corrente	Pressão	Laps hear	média	Desvio padrao
1	1	1	50	30	0,7	24,74		
	2	2	50	30	0,7	23,4	23,64	1,001798383
	3	3	50	30	0,7	22,78		
2	4	4	300	30	0,7	19,4		
	5	5	300	30	0,7	18,31	18,9	0,550545184
	6	6	300	30	0,7	18,99		
3	7	7	50	32	0,7	20,34		
	8	8	50	32	0,7	17,81	20,57	2,88189174
	9	9	50	32	0,7	23,56		
4	10	10	300	32	0,7	14,24		
	11	11	300	32	0,7	14,7	15,15	1,200041666
	12	12	300	32	0,7	16,51		
5	13	13	50	30	3	23,11		
	14	14	50	30	3	24,81	23,72	0,946202938
	15	15	50	30	3	23,24		
6	16	16	300	30	3	14,96		
	17	17	300	30	3	18,14	19,10333	4,69964183
	18	18	300	30	3	24,21		
7	19	19	50	32	3	24,21		
	20	20	50	32	3	20,8	22,90333	1,839302404
	21	21	50	32	3	23,7		
8	22	22	300	32	3	16,12		
	23	23	300	32	3	17,65	16,51333	0,99981665
	24	24	300	32	3	15,77		
9	25	25	30	31	1,85	25,17		
	26	26	30	31	1,85	23,73	24,41	0,723325653
	27	27	30	31	1,85	24,33		
10	28	28	350	31	1,85	17,43		
	29	29	350	31	1,85	19,61	18,66667	1,119211032
	30	30	350	31	1,85	18,96		
11	31	31	175	27	1,85	21,73		
	32	32	175	27	1,85	25,63	22,88333	2,388835142
	33	33	175	27	1,85	21,29		
12	34	34	175	35	1,85	7,4		
	35	35	175	35	1,85	9,5	7,88	1,441249458
	36	36	175	35	1,85	6,74		
13	37	37	175	31	0,7	16,92		
	38	38	175	31	0,7	15,62	17,02	1,452583905
	39	39	175	31	0,7	18,52		

14	40	40	175	31	1,85	18,81	média	Desvio padrao
	41	41	175	31	1,85	21,88	20,09333	1,595692117
	42	42	175	31	1,85	19,59		
15	43	43	175	31	1,85	13,25	média	Desvio padrao
16	44	44	175	31	1,85	19,05	18,69	5,269231443
17	45	45	175	31	1,85	23,77		
18	46	46	175	31	1,85	18,16	média	Desvio padrao
19	47	47	175	31	1,85	18,08	18,12	0,056568542

APÊNDICE J- Resultados do ensaio de Iosipescu para os laminados estudados PEI/ Vidro e PEI Carbono

Palavra-chave

Nome do produto

Nome do arquivo do eEnsaio de yosipescu 01 Nome do arquivo do mEnsaio de yosipescu 01

Data do relatório 2014/10/29

Data do ensaio 2014/10/29

Modo de ensaio

Simples

Tipo de ensaio

Compressão

Velocidade

0,5mm/min

Placa

Placa

Batch No:

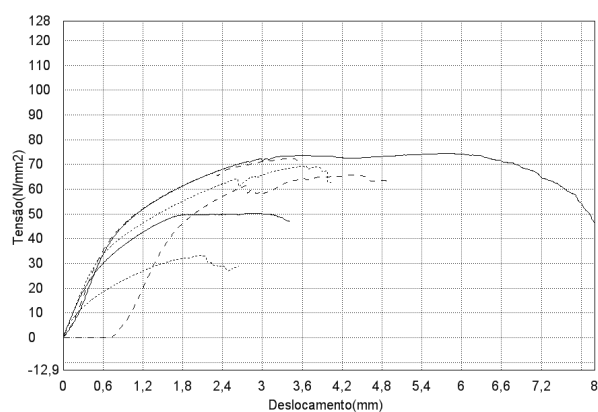
1

Sub-batch No:

10

Nome Parâmetros	Máx_Força Cálculo de áreas c	Máx_Deslocament Cálculo de áreas c	Ruptura_Força Sensibilidade: 10	Ruptura_Desloca Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm	N	mm
pei-c-1	4614,28	5,76640	3493,97	7,74140
Pei-c-2	4489,69	3,45806	-.-	-.-
pei-c-3	4268,28	3,60806	4143,20	3,97473
pei-v-1	2311,66	2,79973	-.-	-.-
pei-v-2	3051,14	4,34973	-.-	-.-
pei-v-3	1564,98	2,06640	-.-	-.-
Média	3383,34	3,67473	3818,59	5,85807
DesvioPadrão	1271,82	1,28331	205,305	1,19113
Máximo	4614,28	5,76640	4143,20	7,74140
Mínimo	1564,98	2,06640	3493,97	3,97473

Nome Parâmetros	Máx_Tensão Cálculo de áreas c	Ruptura_Tensão Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	N/mm2
pei-c-1	74,4808	56,3975
Pei-c-2	72,3979	-.-
pei-c-3	69,3821	67,3489
pei-v-1	50,2421	-.-
pei-v-2	65,7376	-.-
pei-v-3	33,3166	-.-
Média	60,9262	61,8732
DesvioPadrão	16,0401	3,46314
Máximo	74,4808	67,3489
Mínimo	33,3166	56,3975



APÊNDICE L- Resultados de Iosipescu para o laminado PEI/ carbono.

Palavra-chave

Nome do produto

Nome do arquivo do eEnsaio de yosipescu 01Nome do arquivo do mEnsaio de yosipescu 01

Data do relatório 2014/10/29

Data do ensaio 2014/10/29

Modo de ensaio Simples

Tipo de ensaio Compressão

Velocidade 0,5mm/min

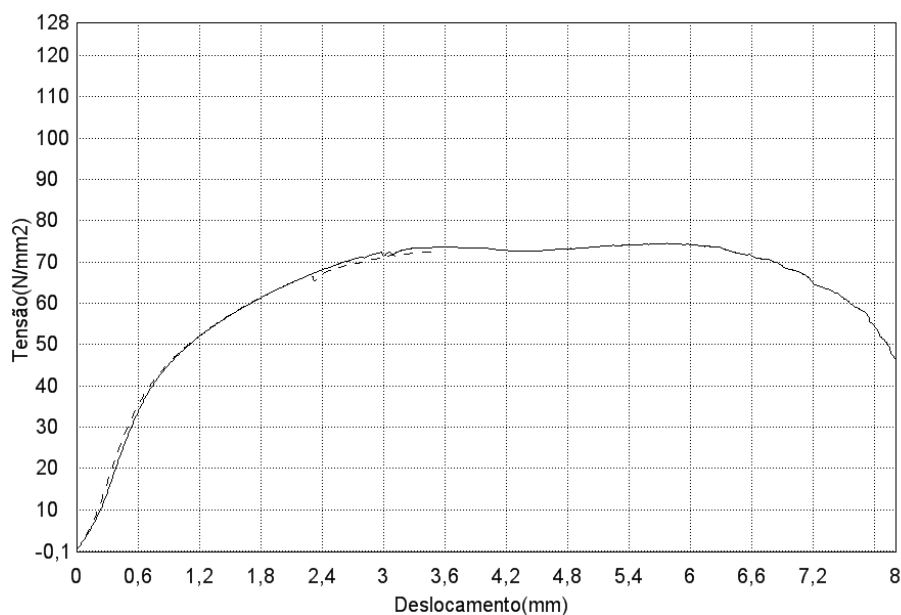
Placa Placa

Batch No: 1

Sub-batch No: 10

Nome	Máx_Força	Máx_Deslocament	Ruptura_Força	Ruptura_Desloca
Parâmetros	Cálculo de áreas c	Cálculo de áreas c	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm	N	mm
pei-c-1	4614,28	5,76640	3493,97	7,74140
Pei-c-2	4489,69	3,45806	-.-	-.-
Média	4551,99	4,61223	3493,97	7,74140
DesvioPadrão	88,0983	1,63224	-.-	-.-
Máximo	4614,28	5,76640	3493,97	7,74140
Mínimo	4489,69	3,45806	3493,97	7,74140

Nome	Máx_Tensão	Ruptura_Tensão
Parâmetros	Cálculo de áreas c	Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	N/mm2
pei-c-1	74,4808	56,3975
Pei-c-2	72,3979	-.-
Média	73,4394	56,3975
DesvioPadrão	1,47283	-.-
Máximo	74,4808	56,3975
Mínimo	72,3979	56,3975



Comentário

APÊNDICE M- Resultados de Iosipescu para o laminado PEI/ carbono soldado.

Palavra-chave

Nome do produto

Nome do arquivo do eEnsaio de yosipescu 03Nome do arquivo do mEnsaio de yosipescu 03

Data do relatório 2015/02/23

Data do ensaio 2015/02/23

Modo de ensaio Simples

Tipo de ensaio Compressão

Velocidade 0,5mm/min

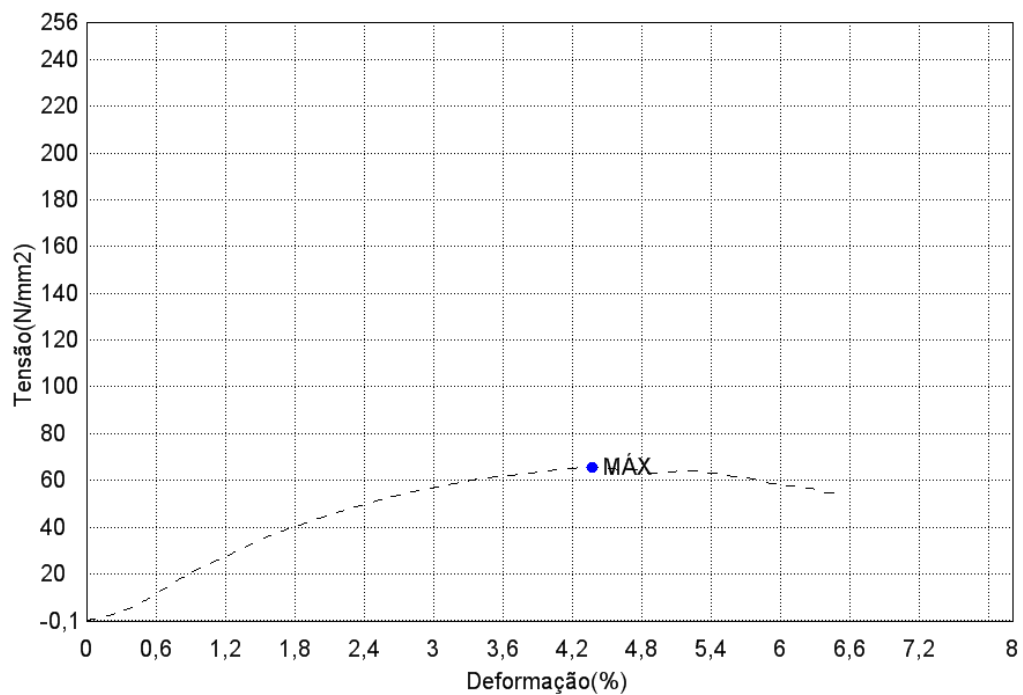
Placa Placa

Batch No: 1

Sub-batch No: 3

Nome	Máx_Força	Máx_Deslocament	Ruptura_Força	Ruptura_Desloca
Parâmetros	Cálculo de áreas c	Cálculo de áreas c	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm	N	mm
peic-1sems	2646,90	3,12473	2581,04	3,53308
Pei 1 sold	5058,82	3,43306	-,-	-,-
Média	3852,86	3,27890	2581,04	3,53308
DesvioPadrão	1705,49	0,21802	-,-	-,-
Máximo	5058,82	3,43306	2581,04	3,53308
Mínimo	2646,90	3,12473	2581,04	3,53308

Nome	Máx_Tensão	Ruptura_Tensão
Parâmetros	Cálculo de áreas c	Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	N/mm2
peic-1sems	70,0406	68,2978
Pei 1 sold	65,7095	-,-
Média	67,8751	68,2978
DesvioPadrão	3,06255	-,-
Máximo	70,0406	68,2978
Mínimo	65,7095	68,2978



APÊNDICE N- Dados de ILSS das amostras do compósito soldado e não soldado.

Palavra-chave

Nome do produto

Nome do arquivo do eEnsaio de Ilss carbono Nome do arquivo do mEnsaio de Ilss carbono

Data do relatório 2014/04/04

Data do ensaio 2014/04/04

Modo de ensaio Simples

Tipo de ensaio Dobr.3ptos

Velocidade 1mm/min

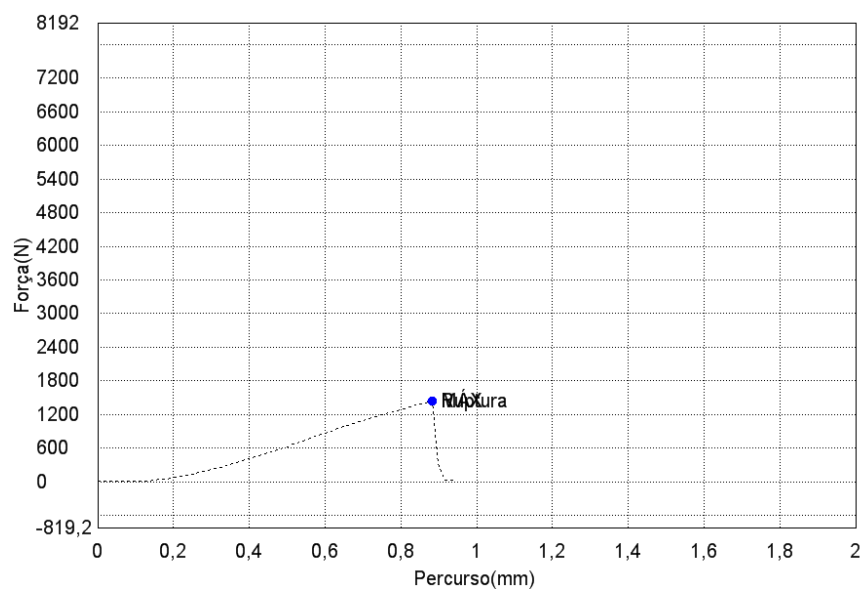
Placa Placa

Batch No: 1

Sub-batch No: 8

Nome	Máx_Força	Máx_Deslocament	Ruptura_Força	Ruptura_Desloca
Parâmetros	Cálculo de áreas c	Cálculo de áreas c	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm	N	mm
com solda	4930,47	1,21613	4925,61	1,23281
comsolda 2	4699,96	1,09946	4699,96	1,09946
comsolda 3	4598,06	1,34948	4598,06	1,34948
comsolda4	3212,13	0,84946	3212,13	0,84946
comsolda 5	3566,78	0,94946	3566,78	0,94946
semsolda 1	1448,00	0,59946	1448,00	0,59946
sem solda2	949,575	0,36613	946,743	0,38279
sem solda3	1434,07	0,88279	1434,07	0,88279
Média	3104,88	0,91405	3103,92	0,91821
DesvioPadrão	1626,29	0,32089	1626,05	0,31916
Máximo	4930,47	1,34948	4925,61	1,34948
Mínimo	949,575	0,36613	946,743	0,38279

Nome	Máx_Tensão	Ruptura_Tensão
Parâmetros	Cálculo de áreas c	Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	N/mm2
com solda	2004,05	2002,07
comsolda 2	1897,79	1897,79
comsolda 3	1985,62	1985,62
comsolda4	1717,70	1717,70
comsolda 5	2241,75	2241,75
semsolda 1	3090,39	3090,39
sem solda2	2436,27	2429,00
sem solda3	3404,46	3404,46
Média	2347,25	2346,10
DesvioPadrão	601,892	601,905
Máximo	3404,46	3404,46
Mínimo	1717,70	1717,70



APÊNDICE O- Cálculo da Resistência elétrica, resistividade elétrica, potencia, energia e calor específico para os elementos resistivos testados

-Para 300 mesh:

$$P = R \times i^2$$

Dados da máquina reais: $T_{máquina}=23,70 \text{ V}$ $i_{máquina \text{ real}}= 31,51 \text{ A}$

Resultados= $P_{máquina \text{ real calculada}}= 747,03 \text{ W}$ $R_{\text{real calculada (elemento resistivo)}}=0,75 \Omega$

$$\gamma = \frac{R.W}{L}$$

$$\gamma = \frac{0,75\Omega.0,025m}{0,4m} = \gamma_{calculada}=0,047 \Omega$$

$$E = P \times t$$

$$E = 746,79 \text{ W} . 30s \quad E_{calculada}=22410 \text{ J}$$

$$cp = \frac{E}{\Delta T.m}$$

$$cp = \frac{22410J}{(360,6-25)^{\circ}C.2,12g} \quad cp_{calculado}=31,50 \text{ J} . (^{\circ}C.g)^{-1}$$

-Para 200 mesh:

$$P = R \times i^2$$

Dados da máquina reais: $T_{máquina}=23,52 \text{ V}$ $i_{máquina \text{ real}}= 31,51 \text{ A}$

Resultados= $P_{máquina \text{ real calculada}}= 741,11 \text{ W}$ $R_{\text{real calculada (elemento resistivo)}}=0,703\Omega$

$$\gamma = \frac{R.W}{L}$$

$$\gamma = \frac{0,703\Omega.0,025m}{0,4m} = \gamma_{calculada}=0,044 \Omega$$

$$E = P \times t$$

$$E = 741,11 \text{ W} . 30s \quad E_{calculada}=22233,3 \text{ J}$$

$$cp = \frac{E}{\Delta T.m}$$

$$cp = \frac{22233,3J}{(400-25)^{\circ}C.2,5g} \quad cp_{calculado}=23,71 \text{ J.}^{\circ}C.g)^{-1}$$

-Para 100 mesh:

$$P = R \times i^2$$

Dados da máquina reais: $T_{máquina}=12,29 \text{ V}$ $i_{máquina \text{ real}}= 31,51 \text{ A}$

Resultados= $P_{máquina \text{ real calculada}}= 387,14 \text{ W}$ $R_{\text{real calculada (elemento resistivo)}}=0,38 \Omega$

$$\gamma = \frac{R.W}{L}$$

$$\gamma = \frac{0,38\Omega.0,025m}{0,4m} = \gamma_{calculada}=0,024 \Omega$$

$$E = P \times t$$

$$E = 387,14 \text{ W}.30s \quad E_{calculada}=11614,2 \text{ J}$$

$$cp = \frac{E}{\Delta T.m}$$

$$cp = \frac{11614,2J}{(220-25)^{\circ}C.4,5g} \quad cp_{calculado}=13,23 \text{ J.}^{\circ}C.g)^{-1}$$

-Para Fibra de carbono:

$$P = R \times i^2$$

Dados da máquina reais: $T_{máquina}=13 \text{ V}$ $i_{máquina \text{ real}}= 31,51 \text{ A}$

Resultados= $P_{máquina \text{ real calculada}}= 409,63 \text{ W}$ $R_{\text{real calculada (elemento resistivo)}}=0,41 \Omega$

$$\gamma = \frac{R.W}{L}$$

$$\gamma = \frac{0,41\Omega.0,025m}{0,4m} = \gamma_{calculada}=0,024 \Omega$$

$$E = P \times t$$

$$E = 409,63 \text{ W}.30s \quad E_{calculada}=12288,9 \text{ J}$$

$$cp = \frac{E}{\Delta T.m}$$

$$cp = \frac{12288,9J}{(139,7-25)^{\circ}C.2,12g} \quad cp_{calculado}=123,5 \text{ J.}^{\circ}C.g)^{-1}$$