

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2013

SAMIA DANUTA BREJÃO DE SOUZA

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA
COMPÓSITOS DE PPS/FIBRAS CONTÍNUAS COM APLICAÇÕES AERONÁUTICAS

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

Orientador: Edson Cocchieri Botelho
Co-orientador: Luis Rogerio de Oliveira Hein

Guaratinguetá
2013

S729a Souza, Samia Danuta Brejão de
Avaliação dos parâmetros de soldagem para compósitos de PPS/fibras contínuas com aplicações aeronáuticas / Samia Danuta Brejão de Souza – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
140 f : il.
Bibliografia: f. 118-123

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coorientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

1. Materiais compostos 2. Fibras de carbono 3. Fibras de vidro 4. Soldagem I. Título
CDU 620.1(043)

SAMIA DANUTA BREJÃO DE SOUZA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

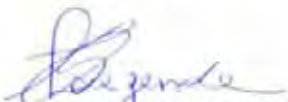
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
Orientador / UNESP-Feg


Prof. Dr. MIRABEL CERQUEIRA REZENDE
CTA - ITA


Prof. Dr. JOSÉ MARIA FERNANDES MARLET
EMBRAER

Junho de 2013

DADOS CURRICULARES

SAMIA DANUTA BREJÃO DE SOUZA

NASCIMENTO	16.11.1987 – FERNANDÓPOLIS / SP
FILIAÇÃO	Helena Fátima Brejão de Souza Luiz Paulino de Souza
2007/2011	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista UNESP

Dedicado
de modo especial à minha mãe, por ter percorrido
este caminho junto comigo.

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho e ao meu co-orientador, Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein, que jamais deixaram de me incentivar e auxiliar na pesquisa.

Aos meus pais, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

À doutoranda Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão por ter me auxiliado em toda a pesquisa e por se tornar uma amiga sempre presente.

Ao aluno de iniciação científica José Carlos Bravim Júnior por ter ajudado no decorrer da realização desta pesquisa.

Aos técnicos da Unesp de Guaratinguetá, obrigada por toda a ajuda dada a este trabalho: Wilson Roberto Monteiro, Manoel Francisco dos S Filho, Domingos Hasmann Neto, Odir Vieira da Silva, Elton Luiz Espindola e José Manoel Bernardes.

À EMBRAER pelo fornecimento dos laminados híbridos utilizados neste trabalho de pesquisa.

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

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- FAPESP – através do contrato nº 2012/03407-1
- Bolsa de Demanda Social – CAPES/Unesp.

Enquanto você não se der valor, não valorizará seu tempo. Enquanto
não der valor ao tempo, não fará nada de importante.

M. Scott Peck

SOUZA, S.D.B. **Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de PPS/fibras contínuas com aplicações aeronáuticas.** 2013. 143 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos poliméricos avançados tem como uma de suas funções a união de materiais que combinem características como: elevada resistência mecânica e rigidez aliadas à baixa massa específica. Um dos problemas principais de utilização de compósitos poliméricos em aplicações estruturais consiste em sua união efetiva para a integração de componentes. Neste sentido, estudos recentes mostram que a técnica de soldagem por resistência elétrica é um dos processos mais promissores para união de compósitos, por ser um método rápido e por necessitar de pouca preparação de superfície. Este trabalho tem como objetivo avaliar os melhores parâmetros de soldagem por resistência elétrica para laminados de PPS (poli(sulfeto de fenileno)) reforçados com fibras contínuas (vidro e carbono) e híbrido com aplicações aeronáuticas. Para esta finalidade, são avaliados os parâmetros mais adequados quanto ao tempo, corrente elétrica e pressão a serem utilizados no processo de soldagem. A caracterização dos materiais soldados é realizada por meio de ensaios mecânicos (*lap shear*), análises térmicas (DMA e TMA) e análise morfológica (microscopias óptica e eletrônica de varredura). Com a utilização do planejamento de experimentos, foi encontrado o melhor valor da variável resposta para cada laminado estudado, e desse modo a melhor combinação dos parâmetros de soldagem, sendo para o PPS/fibras de carbono (37,0A, 3,0MPa, 50,0s), para o PPS/fibras de vidro (32,0A, 1,85MPa, 175,0s) e para o laminado híbrido (38,5^a, 3,0MPa, 50,0s). Com relação à temperatura de transição vítrea dos compósitos, esta não foi afetada significativamente pelo processo de soldagem, viabilizando o método de soldagem estudado para a integração de componentes aeronáuticos.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos. Fibra de carbono. Fibra de vidro. PPS. Soldagem.

SOUZA, S.D.B. **Evaluation of resistance welding parameters for PPS/continuous fibers composites designed for aeronautical applications.** 2013. 143 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The technology improvement of advanced polymeric composites has as one of its functions the junction of materials that present unique properties such as high strength and stiffness allied with low density. One of the major problems of using polymer composites in structural application consists in the effective joint for integrating components. In this behalf, recent studies demonstrate that the technique of electrical resistance welding is one of the most promising for bonding composites, as a rapid method because it does not require much surface preparation. This work aims to evaluate the more appropriate parameters of electrical resistance welding for PPS (poly (phenylene sulfide)) laminates reinforced with fabric continuous fibers (glass and carbon) designed for aeronautical applications. For this purpose, the parameters will be evaluated leading into account time, electric current and pressure to be used in the welding process. The welded material characterization will be accomplished through mechanical testing (*lap shear*), thermal (DMA and TMA) and morphological analysis (using optical and scanning electron microscopes). Through the procedure of design of experiments, it was found the best value of the response variable for each laminate studied here, and thus the best combination of welding parameters, being for the PPS/carbon fibers (37.0 A, 3.0 MPa, 50.0s) for the PPS/glass fibers (32.0 A, 1.85 MPa, 175.0 s) and the hybrid laminate (38.5 A, 3.0 MPa, 50.0 s). In relation to the glass transition temperature of these composites, this was not significantly affected by the welding process, enabling the welding method for studying the integration of aeronautical components.

KEYWORDS: Composites. Carbon Fiber. Glass Fiber. PPS. Welding System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista explodida de uma aeronave (EMB-145), mostrando partes fabricadas em compósitos avançados (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)	23
Figura 2 – Mero de repetição da molécula de PPS (LEVY NETO; PARDINI, 2006)	25
Figura 3 – Molécula de PPS (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)	26
Figura 4 – Técnicas de união de compósitos estruturais (SOUZA, 2013)	28
Figura 5 – Ilustração de um modelo para soldagem por resistência elétrica (AGEORGES; YE, 1999).....	32
Figura 6 – Ilustração dos diferentes tipos de vibração em barras (PAIVA, 2002).....	40
Figura 7 – Fluxograma com as etapas do trabalho	43
Figura 8 – Soldadora utilizada neste trabalho	45
Figura 9 – Corpo de prova de PPS/fibras de carbono, após o ensaio de <i>lap shear</i>	49
Figura 10 – Equipamento Sonelastic utilizado.....	51
Figura 11 – Equipamento de inspeção por ultrassom utilizado na análise dos compósitos em estudo.....	52
Figura 12 – Equipamento utilizado para a caracterização dos laminados em estudo.....	53
Figura 13 – Equipamento de DSC da SII Exstar, modelo 6220	54
Figura 14 – Equipamento de TGA da SEIKO, modelo 6000	54
Figura 15 – Equipamento TMA utilizado para caracterização dos laminados em estudo	55
Figura 16 – Análise por microscopia óptica dos laminados de fibras de vidro:.....	57
a) região superficial; b) seção transversal.....	57
Figura 17 – Análise por microscopia óptica dos laminados de fibras de carbono:	58
a) região superficial; b) seção transversal.....	58
Figura 18 – Análise por microscopia óptica do laminado híbrido: a) seção transversal; b) seção transversal	58
Figura 19 – Resultados de ultrassom dos laminados de PPS a serem soldados: a) fibras de vidro; b) fibras de carbono (FARIA, 2012); c) laminado híbrido (COSTA, 2011); d) escala de atenuação de cores	60
Figura 20 – Resultados de DSC das amostras de PPS/fibras de carbono.....	62
Figura 21 – Resultados de DSC das amostras de laminado híbrido	62
Figura 22 – Resultados de DSC das amostras de PPS/fibras de vidro	63
Figura 23 – Resultados provenientes das análises de TGA para o PPS/fibras de carbono	64

Figura 24 – Resultados provenientes das análises de TGA para o laminado híbrido	64
Figura 25 – Resultados provenientes das análises de TGA para o PPS/fibras de vidro.....	65
Figura 26 – Determinação da quantidade adequada dos corpos de prova na soldadora, com a combinação do ponto médio dos parâmetros	67
Figura 27 – Imagem da malha metálica feita com a Lupa Zeiss	70
Figura 28 – Gráfico da superfície de resposta para o compósito PPS/fibras de carbono	78
Figura 29 – Gráfico da superfície de contorno para o compósito PPS/fibras de carbono	78
Figura 30 – Gráfico da superfície de resposta para o compósito PPS/fibras de vidro	79
Figura 31 – Gráfico da superfície de contorno para o compósito PPS/fibras de carbono	80
Figura 32 – Gráfico da superfície de resposta para o laminado híbrido.....	81
Figura 33 – Gráfico da superfície de contorno para o laminado híbrido.....	81
Figura 34 – Região transversal da amostra de PPS/fibras de carbono soldado: a) microscopia óptica com filtro de intensidade (50%) (5X); b) imagem obtida por estereoscopia (20X)	82
Figura 35 – Avaliação por estereoscopia da amostra de PPS/fibras de carbono soldado após ensaio de <i>Lap Shear</i> : a) 20X; b) 20X.....	83
Figura 36 – Região transversal do laminado híbrido soldado: a) microscopia óptica em campo claro; b) imagem obtida por estereoscopia	83
Figura 37 – Avaliação por estereoscopia do laminado híbrido após a realização do ensaio de <i>Lap Shear</i> : a) (10X); b) (20X).....	84
Figura 38 – Região transversal da amostra de PPS/fibras de vidro soldada:	84
a) microscopia óptica em campo claro (50X); b) imagem obtida por estereoscopia (10X).....	84
Figura 39 – Avaliação por estereoscopia da amostra de PPS/fibras de vidro soldada após o ensaio de <i>lap shear</i> : a) 20X; b) 10X	85
Figura 40 – Avaliação por MEV da amostra de PPS/fibras de carbono soldada após o ensaio de <i>lap shear</i>	86
Figura 41 – Avaliação por MEV do laminado híbrido soldado após a realização do ensaio de <i>lap shear</i>	87
Figura 42 – Análise por MEV de outra região do laminado híbrido soldado após o ensaio de <i>lap shear</i>	87
Figura 43 – Análise por MEV da amostra de PPS/fibras de vidro soldada após o ensaio de <i>Lap Shear</i> : a) BSE; b) VPSE.....	88
Figura 44 – Análise por EDS da superfície da amostra de PPS/fibra de vidro	89
Figura 45 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de vidro	90

Figura 46 – Análise de EDS de um precipitado localizado na superfície da amostra não soldada de PPS/fibras de vidro	91
Figura 47 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de vidro	91
Figura 48 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de vidro	92
Figura 49 – Análise por EDS do compósito PPS/fibras de carbono	93
Figura 50 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono.....	94
Figura 51 – Análise por EDS de um precipitado no compósito não soldado de PPS/fibras de carbono	95
Figura 52 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono.....	96
Figura 53 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono.....	97
Figura 54 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono.....	98
Figura 55 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido.....	99
Figura 56 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido.....	100
Figura 57 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido.....	101
Figura 58 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido.....	101
Figura 59 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido.....	102
Figura 60 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de carbono sem solda	106
Figura 61 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de carbono soldado.....	107
Figura 62 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito laminado híbrido sem solda	107
Figura 63 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito laminado híbrido soldado.....	108
Figura 64 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de vidro sem solda	108
Figura 65 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de vidro sem solda	108
Figura 66 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de carbono – sem solda	110
Figura 67 – Resultados de TMA para o laminado PPS/híbrido – sem solda	110
Figura 68 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de vidro – sem solda.....	111
Figura 69 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de carbono – soldado.....	111
Figura 70 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de híbrido – soldado	112
Figura 71 - Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de vidro – soldado.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais propriedades do PPS (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)	27
Tabela 2 – Faixa com os valores dos parâmetros para a soldagem do PPS/fibra de vidro.....	47
Tabela 3 – Faixa com os valores dos parâmetros para a soldagem do PPS/fibra de carbono ..	47
Tabela 4 – Faixa com os valores dos parâmetros para a soldagem do laminado híbrido.....	47
Tabela 5 – Principais resultados provenientes das curvas do DSC para os compósitos estudados	61
Tabela 6 – Janela de soldagem para as amostras em estudo	65
Tabela 7 – Valores para o <i>lap shear</i> com a combinação mínima dos parâmetros (0,7 MPa; 50,0 s; 29,5 A)	68
Tabela 8 – Valores para o <i>lap shear</i> com a combinação do ponto médio para os parâmetros. (1,85 MPa; 175,0 s; 32,25 A)	68
Tabela 9 – Valores para o <i>lap shear</i> com a combinação máxima dos parâmetros (3,0 MPa; 300,0 s; 35,0 A)	68
Tabela 10 – Combinações e valores da tensão por <i>lap shear</i> do planejamento – PPS/fibras de carbono	71
Tabela 11 – Estimativas dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente, valor de R^2 e valores de p para os valores dos ensaios de <i>Lap Shear</i> (MPa), segundo os resultados do planejamento fatorial completo para o material PPS/fibras de carbono.....	72
Tabela 12 – Combinações e valores da tensão por <i>lap shear</i> do planejamento – PPS/fibras de vidro.....	73
Tabela 13 – Estimativas dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente, valor de R^2 e valores de p para os valores dos ensaios de <i>Lap Shear</i> (MPa), segundo os resultados do planejamento fatorial completo para o material PPS/fibras de vidro	74
Tabela 14 – Combinações e valores da tensão por <i>lap shear</i> do planejamento – laminado híbrido.....	75
Tabela 15 – Estimativas dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente, valor de R^2 e valores de p para os resultados dos ensaios de <i>Lap Shear</i> (MPa), segundo os resultados do planejamento fatorial completo para o material laminado híbrido.....	76
Tabela 16 – Valores das variáveis estudadas aprimoradas propostas pelo modelo estatístico para valores máximos da variável resposta dos materiais soldados estudados	77
Tabela 17 – Valores obtidos das variáveis estudadas para a soldagem.....	77
Tabela 18 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de vidro.....	90

Tabela 19 - Análise do peso e porcentagem atômica de um precipitado localizado	91
sobre a superfície sem solda do PPS/fibras de vidro	91
Tabela 20 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de vidro, após a soldagem.....	92
Tabela 21 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de vidro, após a soldagem.....	93
Tabela 22 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono	94
Tabela 23 – Análise do peso e porcentagem atômica do precipitado encontrado sobre o PPS/fibras de carbono.....	95
Tabela 24 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono, após a soldagem.....	96
Tabela 25 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono, após a soldagem.....	97
Tabela 26 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono, após a soldagem.....	98
Tabela 27 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem	99
Tabela 28 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem	100
Tabela 29 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem	101
Tabela 30 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem	102
Tabela 31– Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem	103
Tabela 32 - Resultados provenientes da análise de vibração.....	104
Tabela 33 – Resultados de DMA para as amostras analisadas.....	106
Tabela 34 – Resultados de TMA para as amostras analisadas	113

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações Iniciais	19
1.2 Motivação	20
1.3 Objetivos.....	20
1.4 Metodologia.....	21
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Compósitos poliméricos avançados com aplicações aeronáuticas	23
2.2 Compósitos poliméricos termoplásticos.....	24
2.2.1 PPS (poli(sulfeto de fenileno))	25
2.3 Técnicas de união	27
2.3.1 Soldagem	29
2.3.2 Soldagem por resistência	29
2.3.3 Elemento resistivo	33
2.4 Planejamento de experimentos	33
2.4.1 Método de Taguchi.....	35
2.4.2 Planejamento fatorial.....	36
2.5 Avaliação do desempenho mecânico em laminados soldados	37
2.6 Avaliação estrutural e da cristalinidade.....	40
2.7 Avaliação do desempenho térmico em laminados soldados	41
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 Materiais	44
3.2 Sistema de soldagem	44
3.3 Planejamento experimental.....	47
3.4 Ensaaios Mecânicos	48
3.5 Ensaaios Morfológicos	49
3.5.1 Microscopia Óptica.....	49
3.5.2 Microanálise por Energia Dispersiva	50
3.6 Avaliação qualitativa da cristalinidade e de mudanças estruturais.....	50
3.6.1 Vibração via excitação por impulso	50
3.6.2 Ultrassom.....	52
3.7 Análise Térmica.....	53
3.7.1 DMA.....	53

3.7.2 DSC	53
3.7.3 TGA	54
3.7.4 TMA	55
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	57
4.1 Avaliação do laminado como fornecido	57
4.1.1 Avaliação Morfológica	57
4.1.2 Análises Térmicas.....	61
4.2 Definição do plano de ensaios	66
4.2.1 Avaliação preliminar dos parâmetros de soldagem	66
4.2.2 Resultados sobre a direção da malha metálica	69
4.2.3 Resultados do planejamento experimental	70
4.3 Avaliação pelas microscopias óptica e eletrônica de varredura	82
4.4 Avaliação estrutural dos laminados soldados.....	88
4.5 Avaliação das propriedades mecânicas	103
4.5.1 Vibração por impulso	103
4.6 Avaliação das propriedades térmicas	104
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
5.1 Conclusões.....	115
5.2 Trabalhos Futuros	116
REFERÊNCIAS	118
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	124
PRODUÇÃO CIENTÍFICA	126
ANEXO A	129
APÊNDICE A – neste apêndice são apresentados os experimentos e os resultados do processo de soldagem por resistência elétrica para o compósito PPS/Fibras de Carbono	135
APÊNDICE B – neste apêndice são apresentados experimentos e os resultados do processo de soldagem por resistência elétrica para o compósito PPS/Fibras de Vidro	138
APÊNDICE C – neste apêndice são apresentados os experimentos e resultados do processo de soldagem por resistência elétrica para o laminado híbrido.....	141

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os compósitos termoplásticos vêm ganhando grande destaque, devido ao avanço tecnológico conquistado pelas indústrias, principalmente a aeroespacial. 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 (COSTA, 2011). Peças essas que podem integrar para formar o componente desejado com temperatura de serviço mais elevada e maior versatilidade na produção em série, além de exibirem propriedades mecânicas iguais ou superiores às apresentadas pelos compósitos termorrígidos. Para realçar a importância dos polímeros termoplásticos, há projeções para a próxima década de que haverá um aumento de 35 a 80% em peso de compósitos termoplásticos na indústria aeronáutica (MARQUES et al., 2010).

A soldagem é a técnica mais vantajosa para a união de peças e reparo das mesmas, pois este método gera a união com qualidade superior, em comparação com as outras técnicas atualmente disponíveis (união mecânica e união adesiva), sendo necessária pouca preparação da superfície a ser soldada (limpeza com álcool isopropílico) e este ser um processo rápido (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004). Uma aplicação de peças soldadas, de PPS/fibras de vidro, já acontece nos bordos de ataque da aeronave Airbus 340-500/600 e nas aeronaves 380 (GARDINER, 2006). Desde 2006, a EMBRAER vem ampliando cada vez mais a utilização de compósitos termoplásticos em suas aeronaves, sendo estas peças produzidas em PEI (poli (éter-imida)) e PPS (poli (sulfeto de fenileno)) com fibras de vidro e carbono.

Os compósitos poliméricos, na sua maioria, não são bons condutores elétricos, e assim necessitam de um elemento de aquecimento que desempenha essa função durante o processo de soldagem. Geralmente, o mecanismo atribuído aos processos de soldagem é regido pelo processo de eletrofusão, fornecendo energia e contribuindo para a qualidade da solda (STAVROV; BERSEE, 2005).

Embora existam várias possibilidades, o elemento resistivo utilizado neste trabalho consiste em uma malha metálica, devido a diversos fatores, dentre os quais pode-se citar: ser mais fácil o seu manuseio (possibilidade de marcação da malha, corte no tamanho adequado,

e facilidade de armazenamento) em comparação, por exemplo, com o tecido de carbono. A malha de aço apresenta melhores soldas, maior resistência média à passagem de corrente elétrica, melhor consistência e uma solda menos sensível à variação dos parâmetros de soldagem (INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 2003). O aprisionamento de ar no interior da rede da malha metálica também é menor, quando comparada, por exemplo, com o tecido de fibra de carbono (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012).

Com o intuito de se analisar a influência das variáveis em um processo, por meio de critérios estatísticos e científicos, pode ser utilizado um método de planejamento experimental, sendo seus resultados retirados de um conjunto pré-definido de ensaios. Este método é utilizado quando se deseja aprimorar um determinado processo e, conseqüentemente, é possível a redução do número de ensaios, do custo, do tempo e da variabilidade dos resultados (minimizando erros experimentais) e contribuir para a viabilidade econômica e prática da experimentação (BUTTON, 2005).

1.2 Motivação

A principal motivação deste trabalho foi o estudo da viabilidade da utilização de compósitos soldados em aplicações aeronáuticas, a partir do estabelecimento das variáveis mais adequadas (tempo, corrente elétrica e pressão) utilizadas neste processo. A escolha das variáveis foi estabelecida a partir dos resultados obtidos quanto ao comportamento mecânico e da avaliação morfológica destes materiais, sendo utilizado um planejamento experimental para minimizar a quantidade de ensaios necessários para esta finalidade.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste no aprimoramento do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos de PPS reforçados com fibras de vidro, carbono e reforçado por ambas as fibras (híbrido) a partir da seleção mais apropriada dos parâmetros: tempo, pressão e corrente elétrica. Esta seleção foi baseada na avaliação morfológica dos laminados soldados e nos resultados provenientes dos ensaios mecânicos (*lap shear*), não-destrutivos (ultrassom e vibração por impulso), análises térmicas (DMA, DSC, TGA e TMA)

e ensaios morfológicos (microscopias óptica e eletrônica de varredura associada a microanálise).

1.4 Metodologia

Para alcançar o objetivo proposto, o presente trabalho foi desenvolvido em etapas apresentadas ao longo do corpo desta dissertação de mestrado. Além deste Capítulo 1 – Introdução, esta dissertação é composta por outros cinco capítulos, 1 anexo e 3 apêndices, sendo estes:

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

- Capítulo 3 - Materiais e Métodos – Na metodologia, o trabalho realizado é apresentado em detalhes, abordando, de forma sistemática, o material utilizado, a caracterização inicial do material como recebido, as avaliações estatísticas utilizadas para o planejamento experimental, 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 resultados obtidos;

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

Referências – neste item é apresentada toda a literatura consultada, disposta em ordem alfabética, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 10520 de 2007.

Anexo A – *Datasheet* da matriz polimérica PPS, dos compósitos PPS/fibras de carbono e PPS/fibras de vidro, fornecidos pela empresa holandesa TenCate.

Apêndice A – São mostrados os experimentos e os resultados do processo soldagem por resistência elétrica no compósito PPS/fibras de carbono.

Apêndice B – São mostrados os experimentos e os resultados do processo soldagem por resistência elétrica no compósito PPS/fibras de vidro.

Apêndice C – São mostrados os experimentos e os resultados do processo soldagem por resistência elétrica no compósito laminado híbrido.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos poliméricos avançados com aplicações aeronáuticas

As indústrias aeronáutica e espacial necessitam de componentes que tenham baixa densidade associada à elevada resistência mecânica e, dentro deste contexto, os compósitos constituídos de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas se destacam, impulsionando o desenvolvimento de materiais aeroespaciais (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; CHAWLA, 1998.).

Segundo REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011, compósitos consistem na combinação de dois ou mais materiais macro constituintes distintos, diferindo na composição química e/ou física, resultando em um material com propriedades superiores às de seus constituintes individuais (sinergia), porém apresentando uma interface reconhecível entre seus componentes.

O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos poliméricos avançados tem como uma de suas finalidades formar um conjunto de materiais que combine elevadas resistência e rigidez, aliados à baixa massa específica, tornando-os muito atrativos para fins aeronáuticos como ilustrado na Figura 1.

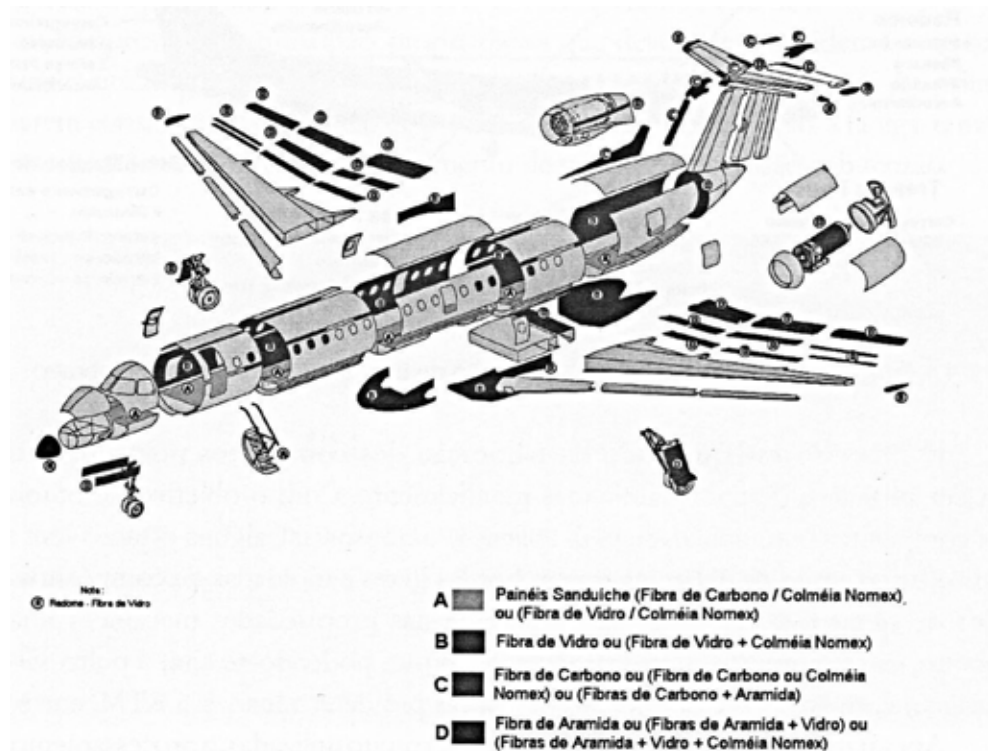


Figura 1 – Vista explodida de uma aeronave (EMB-145), mostrando partes fabricadas em compósitos avançados (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)

A formação do material compósito está relacionada com a interação física ou química da matriz polimérica e o reforço fibroso gerando transferência de esforços mecânicos entre os materiais constituintes. Atualmente, em se tratando de aplicações estruturais, a grande maioria dos reforços vem sendo utilizada na forma de fibras (vidro, carbono ou aramida), garantindo uma adequada transmissão e repartição dos esforços aplicados ao reforço. As fibras de vidro são os materiais mais utilizados como materiais de reforço para os compósitos termorrígidos e termoplásticos, pois combina elevada resistência à tração com baixo custo, quando comparadas às outras fibras disponíveis no mercado (FELTRAN, 2008; SILVA, 2005).

2.2 Compósitos poliméricos termoplásticos

As matrizes poliméricas termoplásticas possuem elevada massa molar e cadeias lineares ou ramificadas. As cadeias emaranhadas permitem a integridade física do material, mas estão sujeitas à deformação plástica, quando submetidas a elevadas tensões (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

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 (COSTA, 2011), que podem ser integradas para formar o componente desejado.

Os compósitos termoplásticos, quando comparados aos termorrígidos convencionais, apresentam as vantagens de possuírem maior resistência ao impacto, temperatura de serviço mais elevada, menor absorção de água, maior facilidade de reparos (SILVA et al., 2011; SILVA, 2005), maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância a danos (LEVY NETO; PARDINI, 2006), menor custo de processamento em grande escala, menores custos de transporte e estocagem, maior possibilidade de integração e de reciclagem de rejeitos (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011), maior resistência ambiental (elevadas temperaturas, umidade e fluidos agressivos), menor tempo de processamento, não-inflamabilidade e vida útil infinita (STAVROV; BERSEE, 2004).

A utilização de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas tem também sido ampliada no setor aeroespacial, devido, principalmente, aos 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. 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 (REZENDE et al., 2011; SILVA, 2005).

2.2.1 PPS (poli(sulfeto de fenileno))

Vários polímeros de última geração estão sendo utilizados na obtenção de compósitos destacando-se as: poliamidas; PPS (poli(sulfeto de fenileno)); poliimidas; PEEK (poli (éter-éter-cetona)); PEI (poli(éter-imida)); PSU (polisulfona); dentre outros, atendendo a requisitos de resistência mecânica na faixa de -60 a $+80^{\circ}\text{C}$, utilizando processos como a moldagem por compressão a quente, pultrusão reativa, moldagem em autoclave, extrusão e injeção. Dentre estes, o PPS é um bom candidato como matriz impregnante de compósitos termoplásticos em função de seu custo, propriedades e facilidade de manuseio (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009).

O PPS é um termoplástico homopolímero, linear e semicristalino (teor médio de cristalinidade de até 50%), que apresenta um anel de fenileno com um átomo de enxofre, o qual irá originar a cadeia principal desta macromolécula (LAGE; KAWANO, 1999). O mero de repetição da macromolécula está representada na Figura 2.

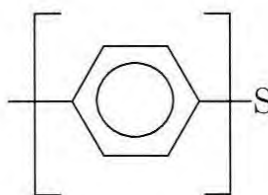


Figura 2 – Mero de repetição da molécula de PPS (LEVY NETO; PARDINI, 2006)

O PPS possui estrutura cristalina ortorrômbica, sendo que o grupo sulfeto define uma conformação ziguezague planar. As dimensões da célula unitária são: $a = 0,867$ nm; $b = 0,561$ nm e $c = 1,026$ nm. Os anéis de fenil estão inclinados de maneira alternada em relação ao plano da cadeia principal (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). A Figura 3 mostra a estrutura completa da molécula de PPS.

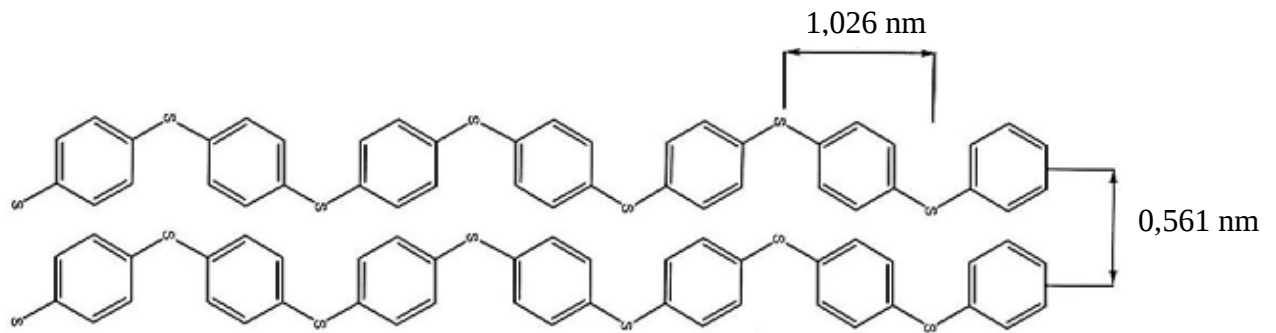


Figura 3 – Molécula de PPS (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)

O uso do PPS em aplicações aeronáuticas deve-se a algumas propriedades tais como: elevada estabilidade térmica, elevada resistência química, reduzida absorção de água e boas propriedades mecânicas. Esta matriz polimérica possui uma ampla gama de usos, que se estende desde os setores eletrônico e automobilístico até o petroquímico (LAGE; KAWANO, 1999). Além disso, possui excelente desempenho a altas temperaturas, com resistência inerente à chama, suporta o contato com metais até 260°C, apresenta boa estabilidade dimensional, elevada temperatura de deflexão (~227°C) e estabilidade na presença de líquidos orgânicos (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Devido ao processamento do PPS ocorrer em temperaturas menores que as de outros polímeros de elevado desempenho, tais como o PEEK e o PEKK (poli (éter-cetona-cetona)), e por apresentar boas propriedades mecânicas, quando utilizado em aplicações que requerem elevadas temperaturas de serviço (Tg do PPS puro = 89°C e Tg do PPS reforçado = 126°C), o PPS se destaca (MARQUES et al., 2010). As principais propriedades relacionadas ao PPS encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais propriedades do PPS (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)

PROCESSAMENTO	
Temperatura de transição vítrea (°C)	88
Temperatura de fusão (°C)	290
Temperatura de processamento (°C)	300-345
Temperatura de trabalho (°C)	240
Pressão de moldagem (MPa)	34,5-103,4
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Densidade	1,35
Absorção de água 24 h (%)	0,01-0,07
PROPRIEDADES TÉRMICAS	
Coeficiente de expansão linear (10^{-6}in/in/°F)	27-49
Temperatura de deflexão sob carga (°C)	100-135
Condutividade térmica (10^{-4}cal/s.cm.°C)	2,0-6,9
PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Tensão de ruptura sob tração (MPa)	48,3-86,2
Elongação na ruptura (%)	1-6
Tensão de ruptura sob compressão (MPa)	110,3
Tensão de ruptura sob flexão (MPa)	96,5-144,8
Módulo de elasticidade em tração (MPa)	3309,3
Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	3,8-4,1
Impacto Izod ent. (J/m)	<26,7
Custo (US\$/kg)	19,00

2.3 Técnicas de união

A inclusão de uniões em compósitos estruturais é necessária pelas limitações inerentes no processo de fabricação e de importância na inspeção, reparo e montagem para com estes materiais. Para a obtenção de uma estrutura integrada, esta é dependente da relação custo/benefício e do desenvolvimento de processos eficientes de união e montagem rápida. Neste caso, a união de compósitos termoplásticos pode ser um processo crítico na confecção

de peças estruturais, por gerarem pontos de concentração de irregularidades e, sendo assim, mais suscetível à fratura (COSTA, 2011).

Em geral, a união de compósitos termoplásticos pode ser classificada por técnicas de fixação mecânica, união adesiva e união por fusão (soldagem). No entanto, a união por fusão ou soldagem é a técnica que apresenta maior potencial para aplicação em montagem, junção e reparo dos componentes destes materiais além de apresentar uma série de vantagens em relação a outras formas de união (YOSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004). A Figura 4 apresenta as principais técnicas de união de compósitos estruturais, atualmente utilizadas.

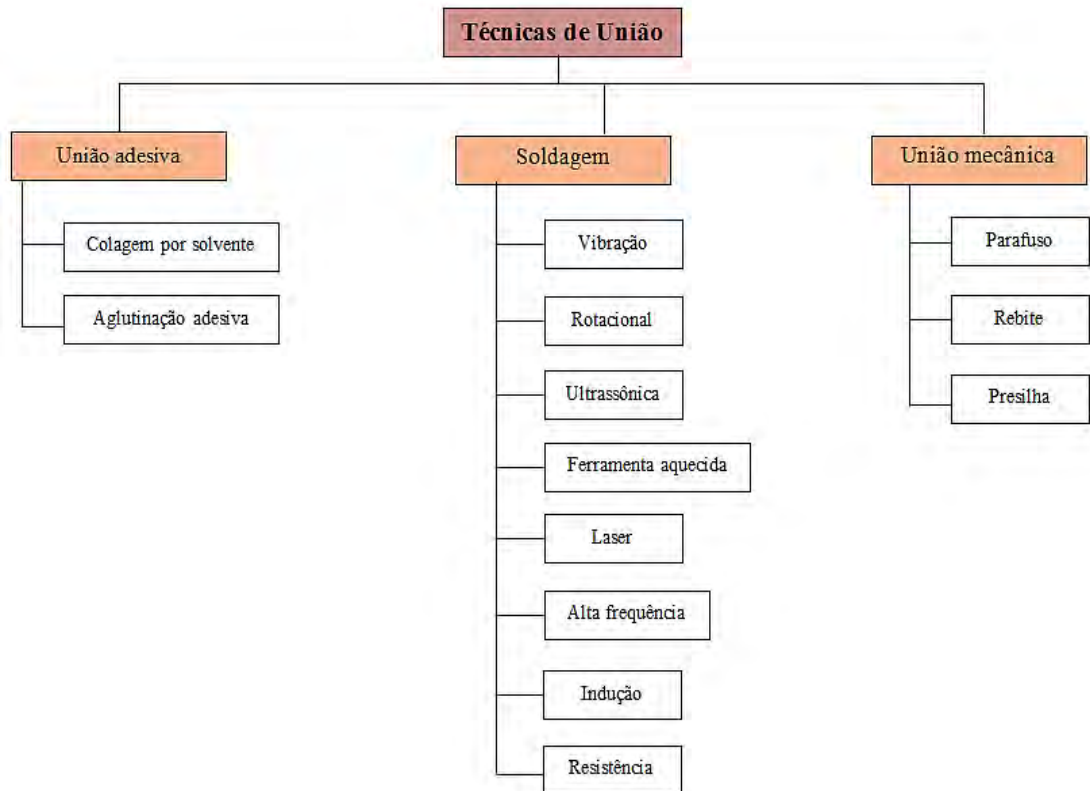


Figura 4 – Técnicas de união de compósitos estruturais (SOUZA, 2013)

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

Outro método que vem sendo empregado pela indústria aeronáutica consiste na utilização de sistemas adesivos, a partir de colas especiais e resinas. Este consiste em um método adequado somente se o adesivo utilizado suportar a tensão de cisalhamento, a qual o componente estará submetido, caso contrário, a união das partes será desfeita, causando falhas no mesmo por delaminação.

Dentro deste conceito, a soldagem é a técnica mais vantajosa para a união das peças e reparo das mesmas, pois este método gera a união com qualidade superior em comparação com as outras técnicas disponíveis (união mecânica e união adesiva), sendo necessária pouca preparação da superfície a ser soldada (limpeza com álcool isopropílico) e ser um processo rápido (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

2.3.1 Soldagem

Atualmente, várias técnicas de soldagem vêm sendo pesquisadas para a sua utilização na área aeronáutica, porém, três dentre estas vêm se mostrando mais promissoras, sendo essas as técnicas de soldagem por indução, ultrassom e resistência elétrica (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; STAVROV; BERSEE, 2005).

Para a união de compósitos termoplásticos, o interesse pela utilização dos processos de soldagem vem crescendo, pois estes são quimicamente inertes e possibilitam a eliminação de tensões residuais, normalmente resultantes do processo de união mecânica e ligação adesiva (BAERE; VAN PAEPEGEM; DEGRIECK, 2010). Atualmente, diversas técnicas de soldagem já estão sendo utilizadas pela indústria aeronáutica com reconhecidos ganhos de propriedades, agilidade de integração e facilidade de processo, tanto para o preparo de estruturas primárias quanto secundárias (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; AGEORGES; YE; HOU, 2000; COSTA, 2011).

2.3.2 Soldagem por resistência

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 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007).

A soldagem por resistência, também conhecida por eletrofusão, fusão por resistência elétrica ou soldagem por implante resistivo, vem sendo amplamente aplicada em metais, e nos últimos anos passou a ser utilizada também em compósitos com aplicações aeronáuticas (BATES et al., 2009). Este processo consiste na união das peças, na junta, por meio da fusão da matriz resultante da passagem da corrente elétrica (efeito Joule) e da aplicação uniforme de pressão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007). Na aplicação da corrente elétrica entre as partes a serem unidas, a geração de calor segue a Lei de Joule como apresentado na equação (1) (STAVROV; BERSEE, 2005; BATES et al., 2009; DUBÉ et al., 2009).

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

Sendo: E a energia dissipada pelo resistor; I a corrente elétrica aplicada; R a resistência na interface e t o tempo de soldagem.

Quando a energia cedida excede as perdas térmicas, a temperatura do material começa a aumentar, primeiramente na região da interface de soldagem, e então no restante do material durante a aplicação contínua de corrente (STAVROV; BERSEE, 2005). Nesse caso, é favorável manter a região termicamente afetada a mais próxima possível da superfície de adesão evitando, assim, a perturbação na estrutura do material como um todo (STAVROV; BERSEE, 2005).

Com a pressão aplicada, garante-se a passagem da corrente elétrica durante o tempo estipulado para a efetivação do processo de soldagem, e também se obtém a região soldada com baixa contaminação, seja por expulsão do material, seja por proteção da região que sofreu a fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007).

Em todos os processos de soldagem por resistência elétrica sempre estão envolvidos pressão mecânica juntamente com a passagem de corrente elétrica (em intensidade e tempo adequados) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007).

O processo de soldagem por resistência elétrica utiliza a propriedade de escoamento da matriz termoplástica quando aquecida acima da temperatura de amolecimento (para polímeros amorfos) ou acima da temperatura de fusão (para polímeros semicristalinos) (STAVROV; BERSEE, 2005). Com este aumento na temperatura da interface de soldagem, acima da temperatura de fusão/amolecimento da matriz, e com a pressão mantida constante, assegura-se o contato entre as partes, por meio da difusão molecular que ocorre (HOU; FRIEDRICH, 1992).

A técnica de soldagem por resistência tem como característica a possibilidade de fundir e resfriar a matriz polimérica, mas mantendo as propriedades do compósito, para assim formar a solda (INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 2007).

Tratando-se de compósitos termoplásticos, a maioria das matrizes não conduzem corrente elétrica (BATES et al., 2009). Assim, a soldagem de compósitos termoplásticos necessita de um implante eletricamente resistivo na região interfacial, sendo este, geralmente, constituído de malhas metálicas ou de fibras de carbono (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; COSTA, 2011; STAVROV; BERSEE, 2005; BATES et al., 2009; NINO et al., 2008). O processo de soldagem ocorre quando a temperatura na região de soldagem aumenta até certo ponto, onde a matriz começa a amolecer ou fundir (BATES et al., 2009; NINO et al., 2008; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; COSTA, 2011).

De acordo com a literatura, existem 3 tipos para aplicação da potência no elemento resistivo (DUBÉ et al., 2012):

- 1º) tensão com valor fixo;
- 2º) técnica por impulso: a tensão é aplicada na forma de intensos pulsos, seguida de pausas (1s a 3s). Neste caso, o processo promove melhor homogeneidade da temperatura ao longo da área soldada, de tal modo que o calor pode ser dissipado na soldagem durante as pausas;
- 3º) tensão em rampa, ou seja, a tensão aplicada aumenta à uma taxa fixa, gerando uma taxa, aproximadamente linear, de aquecimento constante, que facilita o controle do processo. Este aumento da voltagem em rampa varia de 1,5 a 9 V/min.

Processos de soldagem por resistência elétrica sempre possuem como principais variáveis a corrente elétrica, o tempo e a resistência elétrica do circuito (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007). O processo de soldagem por resistência elétrica vem sendo considerado como um dos mais promissores para aplicações aeronáuticas, dentre as técnicas disponíveis de união por fusão, pois este é razoavelmente rápido (de 1 a 5 minutos de processo), necessita de pouca ou nenhuma preparação de superfície (COSTA, 2011), utiliza equipamentos simples e de baixo custo, podendo ainda ser utilizados em reparos (DUBÉ et al., 2009; COSTA, 2011) e em reprocessamento de um determinado componente após inspeção não destrutiva (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; STAVROV, BERSEE, 2005; COSTA, 2011; TALBOT, 2005).

Apesar de ainda não ser considerada como uma técnica totalmente desenvolvida, este processo vem sendo utilizado com sucesso na indústria aeroespacial (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; STAVROV; BERSEE, 2005), principalmente pela Stork-Fokker na Holanda (STAVROV; BERSEE, 2005). A soldagem com resistência elétrica é

utilizada, principalmente, na união de componentes, muitas vezes grandes e complexos, destinados a asas de aeronaves como as da Airbus A340- 500/600 e A380 (NINO et al., 2008; DUBÉ et al., 2009). Para esta aplicação, lâminas de PPS reforçadas com fibras de vidro são soldadas entre si, utilizando como material resistivo malha de aço inox (NINO et al., 2008; DUBÉ et al., 2009).

Na Figura 5 encontra-se ilustrado um modelo do processo de soldagem por resistência elétrica.

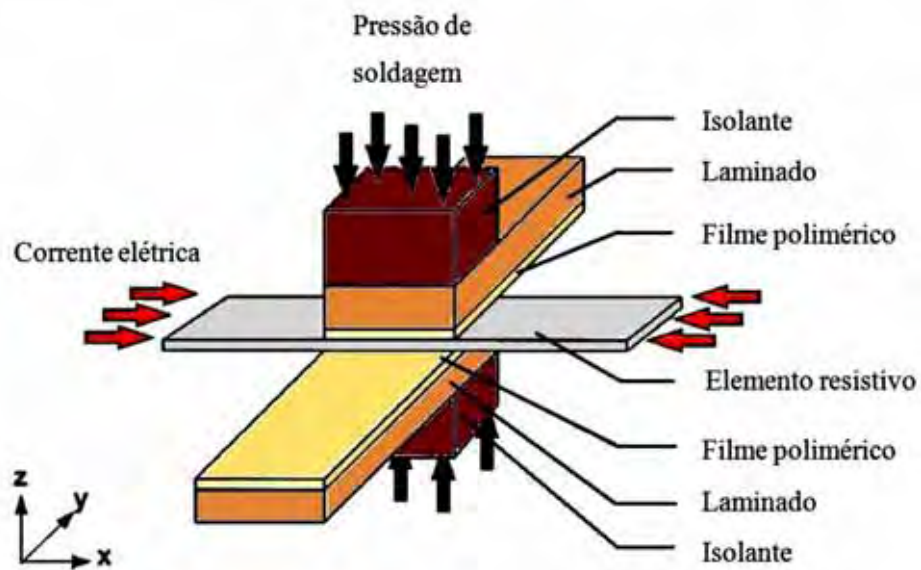


Figura 5 - Ilustração de um modelo para soldagem por resistência elétrica (AGEORGES; YE, 1999)

Para a maioria dos modelos desenvolvidos para a soldagem por resistência elétrica assume-se que a pressão aplicada deve ser constante, pois desta forma fornece uma distribuição equilibrada para o processo da soldagem (AGEORGES; YE; HOU, 2000).

Existem dois aspectos fundamentais que devem ser levados em consideração para se estabelecer a janela de processamento mais apropriada durante o processo de soldagem por resistência elétrica: o superaquecimento na região de soldagem, que pode causar degradação térmica da matriz termoplástica e interferir no controle da passagem de corrente na interface de soldagem; e a propagação do calor, que pode provocar migração da matriz e movimentação da fibra (COSTA, 2011).

Em seus trabalhos, (DAVIES; MOORE, 1990) estudaram a tensão de cisalhamento e a tenacidade à fratura (modo I) de compósitos termoplásticos unidos por diferentes tipos de métodos de colagens para laminados de fibra de carbono/PEEK. Deste modo, elevados valores de resistência em tração cisalhante (*lap shear*) (36 MPa) e tenacidade à fratura (2100 J/m²) foram observados e reportados.

Embora existam vários trabalhos reportando sobre a soldagem de compósitos com aplicações aeronáuticas, a técnica de soldagem por resistência ainda encontra-se em amadurecimento, e poucos trabalhos discutem a vida útil de compósitos soldados utilizados como estruturas aeroembarcadas.

2.3.3 Elemento resistivo

O elemento de aquecimento desempenha uma função crucial durante o processo de soldagem de compósitos, sendo seu mecanismo regido pelo processo de eletrofusão, fornecendo energia e contribuindo para a qualidade da solda (STAVROV; BERSEE, 2005). Este elemento permanece confinado na solda, desta forma, é necessário haver uma compatibilidade entre esse e o restante do material (STAVROV; BERSEE, 2005).

Na literatura, elemento resistivo também é conhecido como elemento de aquecimento, sendo este muito importante para o processo de soldagem, pois supre a necessidade da transferência de energia durante este processo (CHAWLA, 1998).

Qualquer material que conduza eletricidade, a princípio, pode ser usado como elemento resistivo, mas na literatura são descritos e usados, principalmente, o tecido de fibra de carbono e malhas metálicas (STAVROV; BERSEE, 2005). Sabe-se que tecidos de carbono, como elemento resistivo, fornecem melhores propriedades mecânicas e uniformidade de temperatura, quando comparados com o prepreg unidirecional, porém, tem sido feito o uso de outros materiais para esta finalidade (NINO et al., 2008).

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

2.4 Planejamento de experimentos

O planejamento experimental tem como objetivo analisar a influência das variáveis em um processo, por meio de critérios estatísticos e científicos, sendo os resultados retirados de um conjunto de ensaios. O planejamento é muito utilizado quando se deseja aprimorar ou desenvolver um processo, e quando isto é obtido consegue-se também a redução do número

de ensaios, do custo, do tempo e da variabilidade dos resultados (minimizar erros experimentais), contribuindo para a viabilidade econômica e a prática da experimentação (BUTTON, 2005).

Esta técnica pode também ser utilizada com outros objetivos, como (BUTTON, 2005):

- a) descobrir quais variáveis são mais influentes;
- b) atribuir valores às variáveis influentes de modo a melhorar e diminuir a variabilidade dos resultados;
- c) atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a influência das variáveis incontroláveis.

A utilização do planejamento experimental fornece também alguns ganhos, como (BUTTON, 2005):

- redução do número de ensaios sem perda de informação;
- caracterização simultânea de diversas variáveis;
- determinar a confiabilidade dos resultados;
- pesquisa em etapas, podendo acrescentar novos ensaios;
- descoberta das variáveis que influenciam no processo, com poucos ensaios;
- o processo é representado através de equações matemáticas;
- conclusão: retirada de ensaios qualitativos.

Para a definição dos ensaios em um planejamento experimental, atualmente 3 técnicas vêm sendo mais aplicadas, sendo estas (BUTTON, 2005):

Réplica: repetição do ensaio, sob condições pré-estabelecidas. É utilizada para determinar o erro experimental e verificar a influência de determinada variável no processo.

Aleatorização: os ensaios são realizados em uma sequência sem ordem, sendo este tipo de técnica uma exigência do planejamento experimental.

Blocos: o bloco é uma porção mais homogênea do material a ser analisado que o conjunto completo. Apresenta maior precisão e reduz a influência de variáveis incontroláveis. Envolve comparações entre as mesmas condições entre cada bloco.

No presente trabalho foi utilizada a técnica de aleatorização, para poder diminuir o erro experimental, e verificar quais variáveis eram as mais influentes.

Há um procedimento adequado para o planejamento e análise dos resultados, descrito por Montgomery (MONTGOMERY, 2003), sendo este:

- a) reconhecimento e definição do problema: realizar a soldagem dos compósitos de PPS/fibras de carbono, PPS/fibras de vidro e laminado híbrido.

- b) escolha das variáveis e das faixas de valores: as variáveis escolhidas foram corrente, tempo e pressão.
- c) escolha adequada da variável resposta: a variável resposta escolhida foi por meio do ensaio *lap shear*.
- d) delineamento dos experimentos (tamanho do corpo de prova, escolha da técnica para o planejamento experimental (réplica, aleatorização ou blocos)).
- e) execução dos experimentos;
- f) análise dos resultados;
- g) elaboração da conclusão.

2.4.1 Método de Taguchi

Esta técnica foi desenvolvida no Japão, no período pós-guerra, por Taguchi que, apesar das condições que o país passava, desejava obter produtos e processos que não apresentassem variações significativas em torno do valor estabelecido e que não fossem sensíveis às variações ambientais. Estes fatores foram conseguidos por meio de planejamentos experimentais (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2001).

Durante o desenvolvimento de um produto ou processo há fatores que podem ser controlados, e estes são chamados de *parâmetros* e há fatores que são difíceis de serem controlados ou mesmo impossíveis, e estes são chamados de *ruídos* (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

No planejamento deve-se realizar o arranjo interno (apenas com os parâmetros) e o arranjo externo (com os ruídos) e então realizar o cruzamento destes arranjos, e assim desenvolver todos os ensaios com as combinações fornecidas. Desse modo, as respostas obtidas serão parte da engenharia robusta, ou seja, pouco sensível à variação de ruídos.

O método de Taguchi é uma ferramenta poderosa que contribuiu para a qualidade do sistema. Esta técnica potencializa o processo, diminuindo o tempo, número de ensaios e variáveis, reduzindo, assim, a flutuação de erros que podem conter no sistema. O método de Taguchi está incluso nas técnicas de engenharia robusta, ou seja, descarta-se o empirismo e passa a utilizar os dados concretos retirados desta técnica para aperfeiçoar o processo (KHAW; LIM; LIM, 1995).

Com este método é possível também determinar o resultado ótimo e os fatores dominantes no processo (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012).

Dentre os principais conceitos inclusos nesta técnica, pode-se citar:

- variável resposta: é a variável do processo que deseja melhorar, especificamente para este trabalho, esta variável é obtida a partir do ensaio *lap shear*;
- interação entre os fatores: no caso deste trabalho, a interação existente ocorre entre as variáveis tempo, corrente e pressão.
- tabela ANOVA (Análise de variância): retirada dos programas Statística versão 5 (StatSoft Inc., USA) e Design-Expert 6.0.6 (Stat-Ease Corporation, USA).
- fator ruído: pode ser considerado, por exemplo, o ar-condicionado, a diferença de temperatura da sala e ruídos de outras máquinas em funcionamento.

No planejamento avaliado neste trabalho não foi considerado o arranjo externo, somente o arranjo interno. O arranjo externo refere-se às fontes de ruídos, como, por exemplo, as condições ambientais do laboratório (ar condicionado, porta aberta ou fechada, outras máquinas em funcionamento, etc). O arranjo interno é baseado nos parâmetros envolvidos no projeto, que neste caso, é a corrente, a pressão e o tempo (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2001).

Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância é um procedimento estatístico, que se refere à soma dos quadrados calculados a partir das informações retiradas do processo. Esta análise é utilizada para medir o efeito individual dos fatores considerados (KHAW; LIM; LIM, 1995)

A tabela ANOVA é descrita por meio da razão “sinal-ruído”, a qual designa a qualidade do processo. Esta tabela fornece a porcentagem de contribuição de cada fator individualmente e também proporciona uma ideia sobre qual será a melhor condição para a realização do experimento (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012).

2.4.2 Planejamento fatorial

Em um planejamento deve-se decidir quais são os fatores e as respostas de interesse, para então iniciá-lo. Os fatores são considerados como as variáveis de entrada, e as respostas são as variáveis de saída. Estas respostas, podem ou não, serem modificadas pelas variáveis de entrada, são também qualitativas ou quantitativas, e pode haver mais de uma resposta de interesse (neste caso, todas deverão ser consideradas) (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Após decidir os fatores e as respostas que serão consideradas, deve-se ter uma ideia clara do objetivo do planejamento e o que se deseja obter como resposta do ensaio.

Este tipo de planejamento é usado quando se deseja estudar a relação e a influência dos efeitos de duas ou mais variáveis no processo. Em cada ensaio, todas as combinações possíveis de cada variável são realizadas, e se o efeito de uma variável depende de outra, diz-se que há interação entre elas (BUTTON, 2005).

O planejamento fatorial completo é dado por 2^k , ou seja, contém 2 níveis (alto e baixo) com k fatores, sendo que estes são pré-determinados (BUTTON, 2005). Neste tipo de planejamento, o número de experimentos é igual a esse fator 2^k , cobrindo assim todo o espaço experimental (SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 2010).

Com este planejamento é possível descobrir quais são os fatores mais influentes no experimento a partir do melhor valor obtido da variável resposta.

2.5 Avaliação do desempenho mecânico em laminados soldados

Para a obtenção da melhor condição dos parâmetros de soldagem vem sendo abordado pela literatura a utilização do ensaio de *lap shear* (DUBÉ et al., 2007). Este é o teste mais comum usado para investigar as tensões existentes na região soldada de um corpo de prova (STAVROV; BERSEE, 2005).

Segundo a literatura, há três tipos de fratura que ocorrem no ensaio de *lap shear*: intralaminar, interlaminar e *coupon*. A fratura intralaminar pode ocorrer nas lâminas do compósito, no interior do elemento resistivo, ou em ambos os casos. Já a fratura interlaminar ocorre na interface entre o compósito e o elemento resistivo. A fratura *coupon* é aquela que ocorre longe da região soldada (HOU; FRIEDRICH, 1992).

Por meio do ensaio de *lap shear*, é possível comparar os resultados obtidos para vários compósitos soldados, e deste modo avaliar qual laminado soldado é mais viável para cada aplicação que se deseja usar. O laminado APC-2 soldado, sendo o elemento resistivo um filme de PEEK, foi elemento de estudo de alguns pesquisadores, os quais obtiveram valores semelhantes de tensão por *lap shear*. Por exemplo, (DON et al., 1990) obteve o valor de 44,8 MPa para a tensão de *lap shear*. Já um modelo de soldagem por resistência elétrica desenvolvido por (XIAO; HOA; STREET, 1992), o qual é utilizado pela Força Aérea dos Estados Unidos da América, em grandes peças produzidas por APC-2 com filmes de PEEK ou PEI (HEIMERDINGER, 1994), foi obtido o valor de 41,0 MPa para a tração cisalhante por *lap shear* destes laminados soldados.

Para o laminado soldado PP/fibras de vidro, foi obtido por (HOU; FRIEDRICH, 1992) o resultado de 9,45 MPa para a tração cisalhante por *lap shear*.

De acordo com um outro estudo realizado por (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012), para compósitos de PP/fibras de vidro soldados, o melhor valor de tração cisalhante por *lap shear* obtido foi de 8,62 MPa. Esse valor baixo deve-se à presença das fibras de vidro, as quais são menos resistentes à tração que as fibras de carbono. Este resultado confirma o estudo anterior, pois os resultados obtidos são próximos.

Para o laminado APC-2/AS4, foi obtido o valor de tração por *lap shear* de 28,7 MPa, por (McKNIGHT et al., 1997). Já para o mesmo laminado, porém utilizando como elemento resistivo PEEK/(APC-2AS4)/PEEK foi encontrado, por (ARIAS; ZIEGMAN, 1996) a tensão por *lap shear* de 72,4 MPa.

Para o laminado PEI/fibras de carbono soldado, sendo o elemento resistivo a malha metálica, (HOU; YE; MAI, 1998) obtiveram o valor de 31,0 MPa de tensão por *lap shear*, já (HOU et al., 2006) obteve, para o mesmo material soldado, o valor de 34,46 MPa para esta propriedade.

Para o laminado soldado, de epóxi/fibras de carbono com PEI/fibras de carbono, foi obtido o valor de 20,0 MPa de tensão por *lap shear* por (AGEORGES; YE, 2001).

Outra técnica que pode ser utilizada para a avaliação mecânica, porém sendo esta considerada como um ensaio não-destrutivo, é a técnica de vibração por impulso. Com o ensaio de vibração deseja-se obter os módulos elásticos do material, podendo estes serem caracterizados por métodos quase-estáticos, dinâmicos ou por ultrassom.

O método dinâmico permite obter informações tanto quantitativas, como o módulo elástico, quanto qualitativas de um componente mecânico e controlar as suas propriedades (como mudança de fase). Este método é normatizado e utilizado, principalmente, em materiais mais frágeis, como os compósitos reforçados por fibras cerâmicas contínuas.

O princípio do método dinâmico consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos. Estas frequências, em conjunto com as medidas de dimensões e massa, possuem uma relação única com os módulos elásticos. O método dinâmico possui a vantagem de empregar pequenas amostras, serem rápidos e não-destrutivos, como mencionado anteriormente, possibilitando o controle das propriedades do material e de sua variação, além da aplicação de baixas cargas (KANEKO, 1960; PICKETT, 1945).

Há três modelos de vibração que atualmente são utilizados para a avaliação da frequência natural de vibração que o material apresenta, e cada um deles é empregado

conforme a necessidade ou o tipo de geometria do corpo de prova a ser analisado (ATCP). São estes:

- Vibração longitudinal de barras:

Uma vez que a vibração ocorre na mesma direção do movimento da onda, este é considerado como o método de maior precisão para a obtenção do valor do módulo de Young. Para este ensaio, o corpo de prova deve ter seção transversal quadrada ou circular, porém, se a seção não seguir a geometria quadrada não é recomendado o uso deste ensaio para o fim proposto.

-Vibração flexional (ou transversal) de barras:

A vibração flexional, também usada para a determinação do módulo de Young, é mais indicada para barras delgadas, devido a razão que existe entre o comprimento e a seção transversal da barra.

-Vibração torcional de barras:

Este tipo de vibração é utilizado para o cálculo do módulo de cisalhamento e para a razão de Poisson.

A Figura 6 ilustra os três tipos de vibração que ocorrem nas barras.

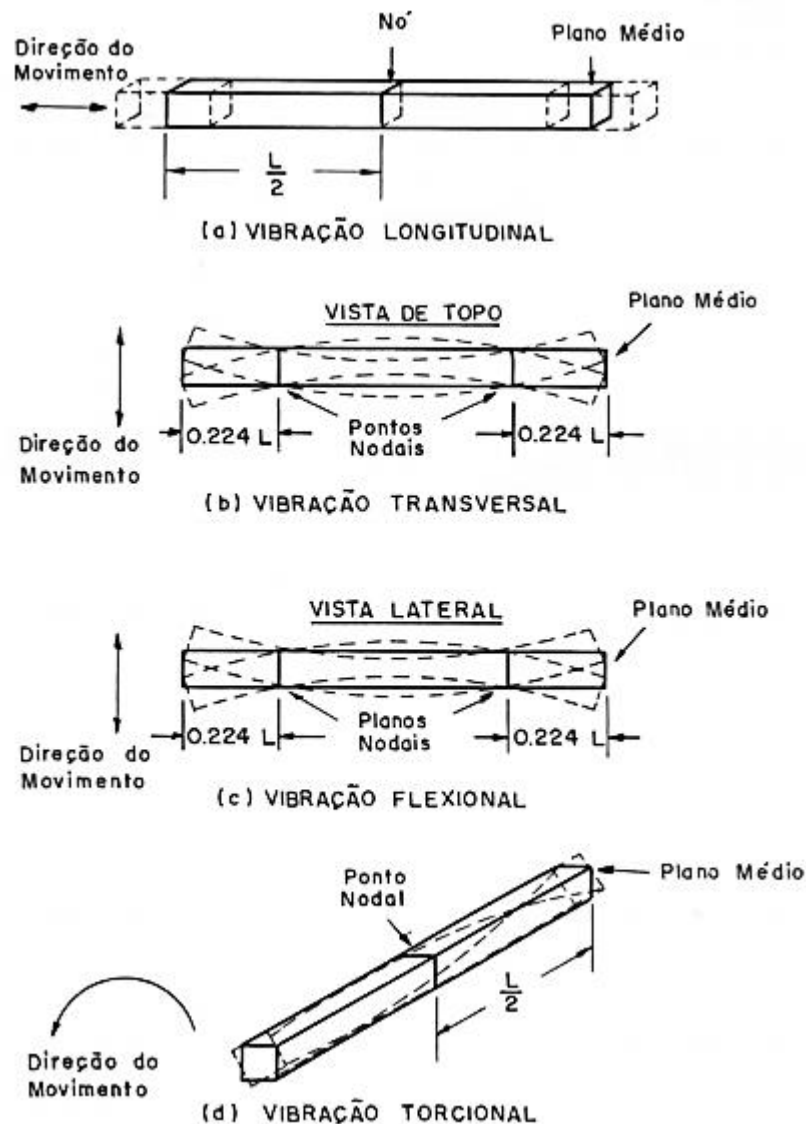


Figura 6 – Ilustração dos diferentes tipos de vibração em barras (PAIVA, 2002)

2.6 Avaliação estrutural e da cristalinidade

Os métodos dinâmicos não destrutivos permitem obter informações tanto quantitativas (módulos elásticos) quanto qualitativas sobre a integridade de um componente estrutural, além do controle de suas propriedades, como mudanças de fase, por exemplo.

Para uma caracterização preliminar da estrutura de um determinado compósito pode ser realizada a técnica de microanálise por energia dispersiva (EDS).

Esta técnica é realizada em conjunto com a microscopia eletrônica de varredura (MEV), visando identificar os principais elementos presentes na amostra. O feixe de elétrons é direcionado para uma superfície condutora e estes são refletidos para a amostra. O material absorve este feixe e o reflete novamente. Essa energia emitida depende do material que será

analisado, e é a partir desta que se obtém o diagrama com os elementos constituintes do material.

2.7 Avaliação do desempenho térmico em laminados soldados

O PPS é um polímero que se cristaliza bem lentamente, comparado com os outros polímeros, e isto se deve à existência do grupo aromático em sua composição. A cristalinidade máxima de amostras de PPS geralmente se encontra inferior a 50% (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). De acordo com a literatura, a entalpia de fusão do PPS é de 76,5 J/g e a temperatura de fusão ocorre próximo de 285°C (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

O padrão de cristalização do PPS é esferulítico. Esta estrutura apresenta uma organização em lamelas dominantes, seguidas pelo seu crescimento (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). Nesta estrutura esferulítica é possível reconhecer dois momentos da cristalização: quando estas estruturas são bem formadas, devido às temperaturas de fusão mais altas, constituem a população principal, e representam os picos mais altos no diagrama; já as estruturas mal formadas e pequenas representam a população secundária, associadas a temperaturas mais baixas durante a fusão e representam os picos mais baixos no diagrama.

Entre os fatores que podem causar alterações nas temperaturas de transição vítrea (região amorfa) e de fusão (região semicristalina) do material são os efeitos ambientais e, particularmente para este trabalho, a presença de malha metálica.

Para a avaliação da temperatura de transição vítrea, três técnicas vêm sendo mais utilizadas sendo estas: DMA (análise dinâmico-mecânica); TMA (análise termomecânica) e DSC (calorimetria exploratória diferencial).

A análise dinâmico-mecânica é a técnica na qual o comportamento mecânico ou viscoelástico do material, sob carga oscilatória, é medido em função da temperatura ou do tempo. Esta técnica é capaz de fornecer informações importantes a respeito do comportamento viscoelástico do sistema, a partir da análise das contribuições elástica e a viscosa (BATISTA, 2012).

Devido à natureza viscoelástica dos polímeros, a tensão e deformação não se encontram em fase. Os resultados das medições dinâmicas são geralmente expressos como módulo complexo, o qual é definido na equação (2):

$$E^* = E' + iE''$$

A resposta em fase da variação de deformação senoidal é a elástica, também denominada como módulo de armazenamento (E') e a resposta fora de fase é a viscosa, também denominada como módulo de perda (E''). O módulo de armazenamento, como o próprio nome sugere, indica a medida do quanto um material pode armazenar energia mecânica (elástica ou potencial). Este módulo caracteriza o comportamento elástico do material. Já a energia dissipada na forma de calor durante o experimento é traduzida em seu módulo de perda. A relação entre os dois módulos, E''/E' , é a tangente de perda, ou fator de dissipação, comumente conhecido como $\tan \delta$, sendo este relacionado com a propriedade do polímero em dissipar a energia da tensão aplicada (BATISTA, 2012).

A transição vítrea é um fenômeno bastante estudado com a utilização do DMA. Durante essa transição as cadeias moleculares de um polímero adquirem energia suficiente para superar as barreiras de energia necessárias à rotação de ligações. Sob estas condições o material passa do estado vítreo, caracterizado pela mobilidade limitada, para o estado de maior mobilidade, atingindo um equilíbrio termodinâmico. A diminuição do módulo de armazenamento (E') associado com esta mudança consiste de cerca de três ordens de grandeza para um polímero amorfo. A região de transição vítrea também é caracterizada pelo aumento no módulo de perda (E'') e na tangente de perda ($\tan \delta = E''/E'$) (BATISTA, 2012).

Muitas das informações obtidas por DMA também podem ser obtidas por TMA. A análise dinâmico-mecânica também pode ser utilizada para determinar o grau de cristalinidade, espectro de relaxação, orientação molecular, reticulação, separação de fase, mudanças estruturais ou morfológicas resultantes do processamento, e composição química em blendas poliméricas, copolímeros, compósitos poliméricos, etc (BATISTA, 2012).

A análise termomecânica consiste em medir as propriedades físicas e químicas do material em função da atmosfera, tempo e temperatura. Nas propriedades físicas, a alteração dimensional da amostra é dada em função da força aplicada, tempo e temperatura (ACOEM).

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo objetiva apresentar, de forma sistemática, o desenvolvimento experimental desta dissertação de mestrado. A Figura 7 apresenta as principais etapas realizadas neste trabalho de pesquisa.

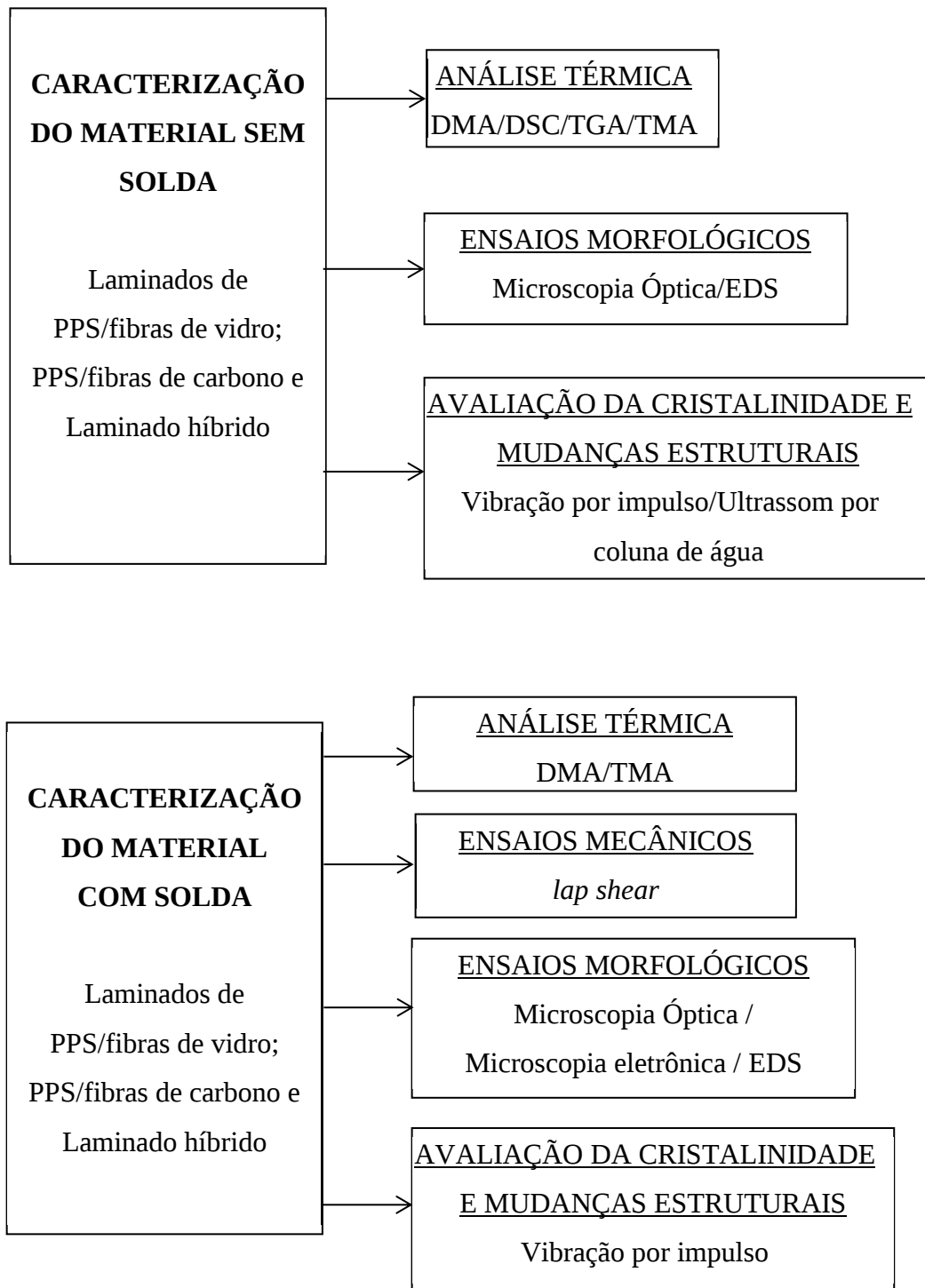


Figura 7 – Fluxograma com as etapas do trabalho

3.1 Materiais

Todos os laminados utilizados foram processados e fornecidos pela empresa holandesa Ten Cate Advanced Composites (Anexo A).

Os laminados de PPS/fibras de vidro foram preparados com tecidos de fibra de vidro do tipo 5HS, na configuração $(0/90)_{5s}$, com 10 camadas, contendo aproximadamente 50% em volume de matriz polimérica, proporcionando uma espessura final de aproximadamente 2,5 mm.

Os laminados de PPS/fibras de carbono foram preparados com tecidos de fibras de carbono do tipo 5HS, espessura de aproximadamente 2,5 mm e com configuração $(0/90)_{5s}$, também contendo aproximadamente 50% em volume de matriz.

O laminado híbrido de PPS (poli(sulfeto de fenileno))/fibra de carbono e fibra de vidro foram preparados com tecidos de fibras de vidro e de carbono. 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 (5 HS)). As camadas externas de PPS/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.

As placas de PPS/fibras de carbono e PPS/fibras de vidro tinham a dimensão de, aproximadamente, 450 mm X 450 mm, sendo que as direções 0° e 90° estavam sinalizadas na placa. Já as amostras do laminado híbrido foram cedidas na dimensão adequada para o ensaio de *lap shear*, ou seja, 100 mm X 25 mm.

A soldagem foi realizada com o auxílio de um elemento resistivo composto de uma malha metálica, sendo esta de aço-304, com 200 mesh, com a razão diâmetro/fio igual a 0,058 e abertura igual a 0,069 mm. Este aço contém na sua composição, além do ferro e do carbono, cromo e níquel.

3.2 Sistema de soldagem

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi construído e utilizado um sistema de soldagem (Figura 8) semelhante ao estudado por NINO, AHMED, BERSEE e BEUKERS (NINO et al., 2008), que consiste, basicamente, em uma máquina de prensagem com conectores elétricos integrados ao elemento resistivo (malha de aço inox de 200 mesh de,

aproximadamente, 0,05 mm de espessura), garantindo aquecimento e pressão local durante o processo de soldagem.

Para utilizar a soldadora, deve-se, sempre, usar os equipamentos de proteção individual (EPI's), tanto pelo risco que há no desprendimento de gases do compósito utilizado, quanto pela alta amperagem (acima de 38A, com elevado tempo de soldagem, 300s, por exemplo) que passa pela máquina. Desse modo, máscara de gás, luvas anti-estática, óculos espelhados (no momento da solda o material fica incandescente), protetor auricular, jaleco de manga comprida, sapatos fechados e calça comprida devem ser usados. Estes itens previnem que ocorram acidentes pessoais, como por exemplo, uma intoxicação devido aos gases liberados na soldagem, em decorrência da degradação do polímero.



Figura 8 – Soldadora utilizada neste trabalho

Para o processo de soldagem, os corpos de prova e a malha foram devidamente posicionados na mesa da prensa. O posicionamento dos corpos de prova para ensaio, e a ligação das extremidades da malha metálica aos terminais positivo e negativo de uma fonte de alimentação elétrica, foi realizado manualmente pelo operador da prensa.

Depois de configurado o processo, seu início se deu a partir do comando do operador, realizado por meio do software de controle da prensa, e 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 para a configuração do processo a ser executado.

Iniciado um processo, o software de controle deverá fazer com que uma válvula reguladora libere a pressão necessária para que os cilindros da prensa apliquem a força solicitada nos 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 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.

O ciclo operacional da soldadora constou dos seguintes passos:

1. Os corpos de prova com a malha metálica foram posicionados na soldadora;
2. Os termopares foram conectados na malha metálica;
3. A porta de acesso da soldadora foi fechada na área de prensagem;
4. As variáveis de processamento foram ajustadas no software de controle da soldadora;
5. Operador dispara o início do processo de soldagem;
6. A prensa se posicionou sobre o corpo de prova e foi aplicada a força solicitada;
7. Após o tempo de ajuste da força, definido nas opções de ajuste no software de controle da prensa, o sistema liberou a corrente e tensão da fonte de alimentação;
8. Decorrido o tempo de soldagem, ajustado pelo operador, a corrente e tensão foram desligados;
9. A prensa continuou aplicando a força por tempo definido nas opções de ajuste no software de controle da prensa, transcorrido este tempo o martelo da prensa foi suspenso;
10. O operador confirmou o final do processamento no software de controle da prensa.
11. Os termopares foram desconectados da malha metálica;
12. Os corpos de prova foram retirados da soldadora;
13. A malha metálica entre os corpos de prova foi cortada, e as amostras separadas.

3.3 Planejamento experimental

Para a determinação dos parâmetros mais adequados para o processo de soldagem por resistência elétrica, foi utilizado o planejamento experimental fatorial completo 2^3 (três fatores: tempo, corrente e pressão), do tipo composto central rotacional com 5 replicatas no ponto central. Esta faixa de valores foi obtida por meio dos testes realizados com as amostras dos compósitos estudados em questão. Com os valores mínimo e máximo dos parâmetros foi possível utilizar o software Design-Expert 6.0.6 (Stat-Ease Corporation, USA).

Os níveis reais e codificados das variáveis em estudo para os materiais PPS/fibra de vidro, PPS/fibra de carbono e laminado híbrido estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

O planejamento experimental foi realizado considerando como variáveis: pressão, corrente e tempo no processo, e como resposta foi realizado o ensaio de *lap shear*.

Tabela 2 – Faixa com os valores dos parâmetros para a soldagem do PPS/fibra de vidro

Reais	Codificadas	-1	0	1
Tempo (s)	X_1	50,00	175,00	300,00
Corrente (A)	X_2	26,00	28,00	30,00
Pressão (MPa)	X_3	0,70	1,85	3,00

Tabela 3 – Faixa com os valores dos parâmetros para a soldagem do PPS/fibra de carbono

Reais	Codificadas	-1	0	1
Tempo (s)	X_1	50,00	175,00	300,00
Corrente (A)	X_2	30,00	33,50	37,00
Pressão (MPa)	X_3	0,70	1,85	3,00

Tabela 4 – Faixa com os valores dos parâmetros para a soldagem do laminado híbrido

Reais	Codificadas	-1	0	1
Tempo (s)	X_1	50,00	175,00	300,00
Corrente (A)	X_2	31,50	35,00	38,50
Pressão (MPa)	X_3	0,70	1,85	3,00

Para que fosse obtido o intervalo dos parâmetros, os corpos de prova primeiramente foram soldados utilizando a combinação mínima de valores, a qual era diferente para cada compósito estudado. As faixas de valores de pressão e tempo, com os valores mínimo e máximo, foram retiradas de trabalhos anteriores e as mesmas foram utilizadas para a configuração dos parâmetros da soldadora (HOU et al., 2006; AGEORGES; YE, 1999; AGEORGES; YE, 2000) , porém é possível expandir esta faixa na configuração dos parâmetros na programação da soldadora, caso haja necessidade para o uso. O valor da corrente foi gradativamente incrementado, de 1A em 1A, até ser estabelecido o valor mínimo para que a soldagem efetivamente ocorresse. Para verificar qual corrente mínima deveria ser usada foi realizado um teste manual, e caso já ocorresse a delaminação destes laminados soldados pelo contato manual o valor da corrente era aumentado. Dependendo do valor mínimo da corrente, o corpo de prova não chegava a ser soldado e a corrente era aumentada em 1A, em relação ao valor anterior. O valor máximo de corrente que foi estabelecido para cada material foi feito da mesma maneira que a utilizada para a obtenção do valor mínimo. Foi realizada, também, uma análise visual do corpo de prova, na procura de regiões carbonizadas ou degradadas. Após os corpos de prova serem soldados, foi realizado o ensaio de *lap shear* e, por meio do maior valor da variável resposta, foi encontrado o valor máximo de corrente. Com os valores mínimos e máximos dos parâmetros, estes foram inseridos no software Design-Expert 6.0.6 e as combinações para o arranjo experimental foram fornecidas.

3.4 Ensaio Mecânicos

Neste trabalho o ensaio de *lap shear* foi utilizado para verificar a melhor combinação dos parâmetros (fornecida pelo programa Design-Expert 6.0.6) a partir da avaliação da força de soldagem (tração).

Os ensaios de *lap shear* foram realizados de acordo com a norma ASTM D5868, em uma máquina universal de ensaios Shimadzu, modelo AG-X disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia. A velocidade de ensaio foi de 1,5 mm/min e a célula de carga utilizada foi de 50 kN.

Os corpos de prova utilizados possuíam as seguintes dimensões:

comprimento: 100 mm

largura: 25 mm

Para a preparação das amostras soldadas, a área soldada consta de uma região quadrada, de 25 mm X 25 mm. A Figura 9 mostra um corpo de prova (PPS/fibras de carbono) soldado após o ensaio de *lap shear*.



Figura 9 – Corpo de prova de PPS/fibras de carbono, após o ensaio de *lap shear*

3.5 Ensaios Morfológicos

3.5.1 Microscopia Óptica

Continuamente para a avaliação da eficiência do processo de soldagem por resistência elétrica, foram realizadas análises por microscopia óptica utilizando um estereomicroscópio Zeiss Stemi 2000 e um microscópio óptico Nikon Epiphot 200. Desta forma, foram realizadas imagens das amostras soldadas e não soldadas, nas vistas lateral e superficial. Esta técnica foi também utilizada para a avaliação da fratura resultante do ensaio de *lap shear*. Foram feitas também imagens da malha metálica.

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 N₂ por elétrons secundários, que emergem da amostra.

As amostras analisadas foram referentes à combinação adequada dos parâmetros de soldagem para cada material.

Todos os microscópios estão disponíveis no Laboratório de Imagens no Departamento de Materiais e Tecnologia – FEG-UNESP.

Todas as amostras para a microscopia óptica foram lixadas com lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1000. Após este procedimento foi realizado o polimento com pasta de diamante de 6µm, 3 µm, 1 µm e ¼ µm. A faixa de velocidade do polimento foi de 200 a 300 rpm.

3.5.2 Microanálise por Energia Dispersiva

O ensaio de microanálise por energia dispersiva foi realizado em corpos de prova não soldados, para 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.

3.6 Avaliação qualitativa da cristalinidade e de mudanças estruturais

Com o intuito de avaliar possíveis mudanças na cristalinidade e estruturais na região de interface matriz/elemento resistivo dos compósitos estudados, neste trabalho foram utilizadas as técnicas de microanálise, vibração via excitação por impulso e de ultrassom por coluna d'água.

3.6.1 Vibração via excitação por impulso

Para a obtenção das propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, foi empregado neste trabalho o método das frequências naturais de vibração de acordo com a norma ASTM E-1876 de 2007, na qual as frequências de vibração do corpo de prova são obtidas a partir de uma excitação por impulso. Os ensaios foram

realizados utilizando o equipamento nacional Sonelastic® (ATCP Engenharia Física), como apresentado na Figura 10. Os módulos elásticos foram calculados a partir das frequências naturais de vibração. As dimensões das amostras foram as mesmas dos corpos de prova utilizados na análise de DMA, ou seja, tendo 50 mm de comprimento e 10 mm de largura.



Figura 10 – Equipamento Sonelastic utilizado.

Antes de posicionar a amostra no equipamento, as medidas do corpo de prova foram avaliadas (comprimento, largura e espessura), assim como a sua massa.

A amostra foi fixada entre dois cabos de aço e acima do martelo (dispositivo responsável pela interferência na amostra). Sobre a amostra foi colocado um microfone que captava os ruídos provocados pela interferência do martelo na amostra.

O local em que o martelo e o microfone foram dispostos foi de acordo com a obtenção dos módulos (E ou G) ou seja, se o microfone e o martelo se encontrassem no centro do corpo de prova, apenas o valor do módulo E era obtido. Para a obtenção dos módulos E e G, o microfone e o martelo são posicionados em lados opostos e na direção da diagonal que passa pelo centro do corpo de prova. Uma vez que, existem desconfiças sobre a precisão do módulo G fornecido por este equipamento, neste trabalho de pesquisa foram considerados somente os valores provenientes do módulo E.

Durante o ensaio, foram realizadas 10 aferições de cada amostra e obtida a média dos valores, assim como, de seu desvio padrão. O coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,36, pois este é o coeficiente indicado para o PPS (ANEXO A).

Para os cálculos do módulo de elasticidade foi utilizado, no programa do equipamento, o modelo de vibração flexional de barras, pois as amostras eram delgadas e desse modo, é o método indicado para este tipo de geometria do corpo de prova.

3.6.2 Ultrassom

A análise por ultrassom dos compósitos soldados foi realizada em um equipamento do tipo *C-scan* (Equipamento de Inspeção Acústica), da empresa MATEC, Modelo PSS-600, disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP, Campus de Guaratinguetá, conforme ilustrado na Figura 11. Esta análise foi realizada em placas com dimensões de 45 mm X 22,5 mm, as quais foram posteriormente utilizadas para a obtenção dos corpos de prova para os demais ensaios.



Figura 11 – Equipamento de inspeção por ultrassom utilizado na análise dos compósitos em estudo

Neste método, a amostra é imersa em água juntamente com um par de transdutores de cada lado. O transdutor é um dispositivo que contém um cristal piezoelétrico, que converte a energia elétrica em vibrações mecânicas e que são transmitidas através da peça e recebidas por um transdutor na outra face da amostra, mostrando as variações da atenuação do ultrassom nas diferentes áreas do material.

3.7 Análise Térmica

3.7.1 DMA

Neste trabalho a temperatura de transição vítrea foi avaliada por DMA, utilizando-se o equipamento DMA 6100 da SII-Nanotechnology equipments (Figura 12). O modo usado foi do tipo *Dual Cantilever* (modo de flexão), com frequência de 1Hz; amplitude de 10 μm ; força aplicada de 2000 mN; aquecimento de 35 °C até 180 °C, com taxa de 3 °C/min; atmosfera inerte de N₂ com fluxo de 100 mL/min.



Figura 12 – Equipamento utilizado para a caracterização dos laminados em estudo

3.7.2 DSC

As análises de DSC foram realizadas com o objetivo de verificar a temperatura de fusão da matriz polimérica.

Com este propósito, foi utilizado um analisador SII Exstar 6000, série DSC 6220. Durante as análises realizadas, o aquecimento, para os três compósitos estudados, foi de 30°C a 350°C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera inerte de N₂ (com fluxo de 20 mL/min). A Figura 13 mostra o equipamento de DSC utilizado.



Figura 13 – Equipamento de DSC da SII Exstar, modelo 6220

3.7.3 TGA

Análises termogravimétricas foram realizadas utilizando o analisador termogravimétrico SII Exstar 6000, série TG/DTA 6200, como apresentado na Figura 14, com o intuito de avaliar a amostra como recebida para se conhecer a temperatura de degradação dos materiais a serem soldados. Para isso, esta análise foi realizada utilizando-se a taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob fluxo constante de nitrogênio de 100 mL/min e em uma faixa de temperaturas compreendida entre 35 e 1000°C para o PPS/fibras de vidro e para o laminado híbrido, e de 24 a 1000°C para o PPS/fibras de carbono, em cadinho de platina.



Figura 14 – Equipamento de TGA da SEIKO, modelo 6000

3.7.4 TMA

A análise termomecânica (TMA) é a técnica a partir da qual a deformação de um material, sob carga não oscilatória, é medida em função da temperatura ou tempo, enquanto o material é submetido a um programa controlado de temperatura.

A Figura 15 apresenta o equipamento utilizado no presente trabalho. Basicamente, este equipamento é composto de uma ponta de teste que fica em contato com a amostra sendo este acoplado a um sensor de descolamento vertical (LVDT) de forma que, qualquer variação na dimensão da amostra possa ser detectada. A amostra é colocada sobre um suporte de quartzo dentro de um forno com temperatura programável e controlada.

Os compósitos utilizados neste estudo foram ensaiados em um TMA/SS 6100 (*Thermo Mechanical Analysis*), marca SII- Nanotechnology Inc. – Seiko, modelo EXSTAR6000, SW Muse Standard Analysis Versão 6.2U, disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP, Campus de Guaratinguetá. Este equipamento foi calibrado em altura, temperatura e força, de acordo com as especificações do fornecedor, e checado periodicamente com padrões. O objetivo deste teste foi a obtenção das temperaturas de transição vítrea para a comparação com os resultados obtidos nas análises de DMA.



Figura 15 – Equipamento TMA utilizado para caracterização dos laminados em estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho, o aquecimento foi de 30°C a 230°C para o PPS/fibras de carbono, de 30°C a 200°C para o PPS/fibras de vidro e para o laminado híbrido, sendo a taxa de aquecimento de 3 °C/min com atmosfera inerte de N₂ (ar estático) para todos os três compósitos.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Avaliação do laminado como fornecido

4.1.1 Avaliação Morfológica

Uma análise microestrutural preliminar dos compósitos foi realizada pela técnica de microscopia óptica utilizando amostras polidas dos laminados de PPS/fibras de carbono, PPS/fibras de vidro e do laminado híbrido, antes da realização do processo de soldagem. Para esta finalidade, as amostras foram previamente embutidas a frio em resina acrílica e devidamente polidas.

As micrografias apresentadas nas Figuras 16, 17 e 18 são representativas do padrão de qualidade obtido após a compactação das camadas dos laminados de PPS/fibras de vidro, PPS/fibras de carbono e laminado híbrido, antes da realização das soldagens. A partir da Figura 16 é observado que sobre a superfície dos laminados de fibras de vidro aparecem regiões de coloração branca, provenientes, provavelmente, de poros superficiais nas camadas mais externas do laminado ou polímero (PPS) que ficou mal disperso durante o processamento. As imagens da Figura 16 foram realizadas na lupa Zeiss Stemi 2000, com ampliação de 10X.

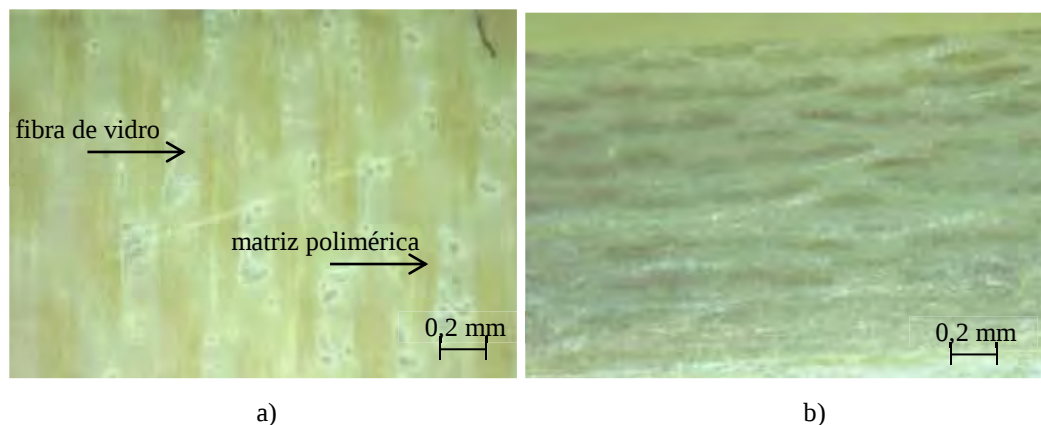


Figura 16 – Análise por microscopia óptica dos laminados de fibras de vidro:
a) região superficial; b) seção transversal

Entretanto, a partir da análise da Figura 17, observa-se que as camadas de compósitos termoplásticos de PPS/fibras de carbono apresentam-se bem compactadas, gerando materiais mais homogêneos e com uma menor quantidade de regiões ricas em matriz polimérica (embora estas existam) entre as camadas de tecido, com boa infiltração da matriz polimérica no reforço e uma adequada interface entre a matriz e o reforço. Estas características são

desejadas, pois estão diretamente relacionadas com melhores propriedades mecânicas e físicas dos materiais processados. As imagens da Figura 17 foram obtidas no microscópio óptico Nikon, sendo a Figura 17a com ampliação de 100X e a Figura 17b com ampliação de 50X, sendo utilizado o filtro de intensidade (50%) em ambas, sob iluminação em campo claro.

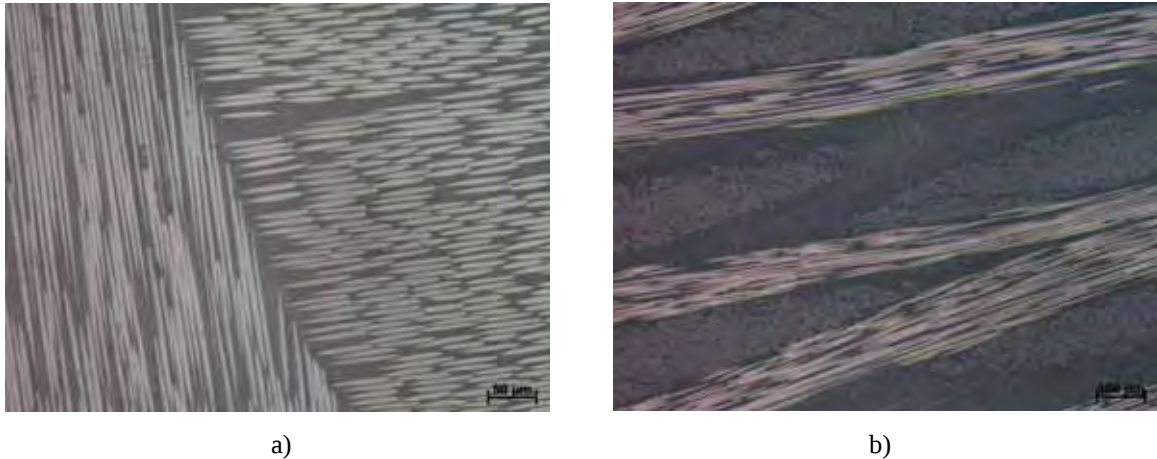


Figura 17 – Análise por microscopia óptica dos laminados de fibras de carbono:
a) região superficial; b) seção transversal

A Figura 18 ilustra a seção transversal do laminado híbrido. A Figura 18a foi obtida na lupa, com um aumento de 10X. Nela podem ser observadas as camadas superficiais de PPS/fibras de vidro, e as camadas internas, com PPS/fibras de carbono. A Figura 18b foi obtida no microscópio óptico, com ampliação de 50X e uso de iluminação de Xe em campo claro com filtro de absorção. Nota-se a boa compactação entre as fibras e a matriz polimérica e também a pouca presença de poros, que garantem boas características ao material utilizado.

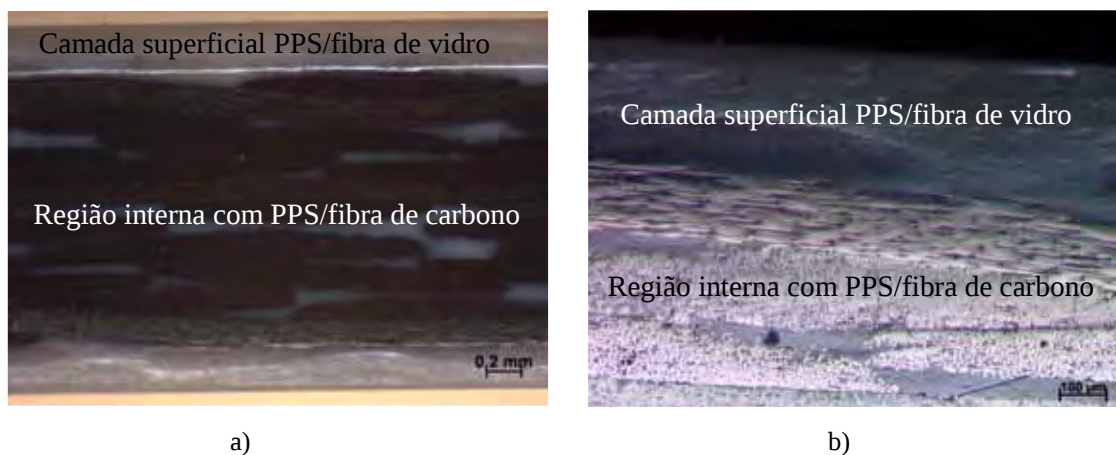


Figura 18 – Análise por microscopia óptica do laminado híbrido: a) seção transversal; b) seção transversal

As placas recebidas apresentavam um empenamento, que pode ser devido a dois mecanismos: resfriamento não balanceado e interação entre o laminado e o ferramental (PARLEVLIET, BERSEE, BEUKERS, 2007). Gradientes não simétricos de tensões residuais térmicas através da espessura do laminado podem resultar neste empenamento. Porém, a deformabilidade que ocorre na interação entre o laminado e o ferramental, no molde de borracha, tem um efeito mais agravante no empenamento dos laminados do que a tensão residual, devido ao gradiente térmico induzido pelo resfriamento relativamente rápido na superfície das camadas. Adicionalmente, a distribuição não uniforme de pressão nos laminados ou nos moldes pode também levar ao processo de empenamento (PARLEVLIET, BERSEE, BEUKERS, 2007).

O padrão de qualidade dos compósitos termoplásticos foi também avaliado utilizando-se a técnica de varredura por ultrassom de transmissão por coluna de água, com o objetivo de verificar a homogeneidade dos laminados como recebidos. A Figura 20a é representativa das amostras de PPS/fibras de vidro. Para a realização deste teste, primeiramente o equipamento de ultrassom foi calibrado, sendo escolhida a melhor região do laminado em análise como referência. Esta região foi considerada como 100% de atenuação e as demais regiões encontradas foram comparadas a esta sendo criado, desta forma, um mapa de atenuação. Os laminados foram posicionados no equipamento de varredura na mesma orientação (mantendo a trama do reforço a 0° e o urdume a 90°).

A partir destes resultados foi observado que o termoplástico em questão, apresentou na região central do laminado, uma melhor impregnação da matriz sobre o reforço, com baixa quantidade de poros (colorações esverdeadas) e uma região ruim nas bordas do laminado (colorações esverdeadas e pretas), com uma maior quantidade de poros. Porém, a maior parte do laminado apresentou uma coloração avermelhada, indicando que a laminação ocorreu de forma adequada, comprovando os resultados observados a partir da avaliação por microscopia óptica.

A Figura 19a refere-se ao PPS/fibras de vidro, a Figura 19b é representativa do laminado PPS/fibras de carbono e a Figura 19c das amostras recebidas do laminado híbrido.

A Figura 19d apresenta a escala de cores para padronização das análises de ultrassom realizadas.

As placas recebidas, tanto de PPS/fibras de carbono quanto de PPS/fibras de vidro, apresentavam aspecto semelhante a olho nu, assim, somente as placas de PPS/fibras de vidro foram analisadas neste ensaio.

O laminado híbrido foi analisado conforme recebido e, desse modo, pôde-se constatar que as amostras estavam adequadas para o processo, pois apresentavam homogeneidade com relação à distribuição da matriz polimérica.

A imagem mostrada para o compósito PPS/fibras de carbono revela o comportamento semelhante para a placa obtida do mesmo material para a realização dos ensaios.

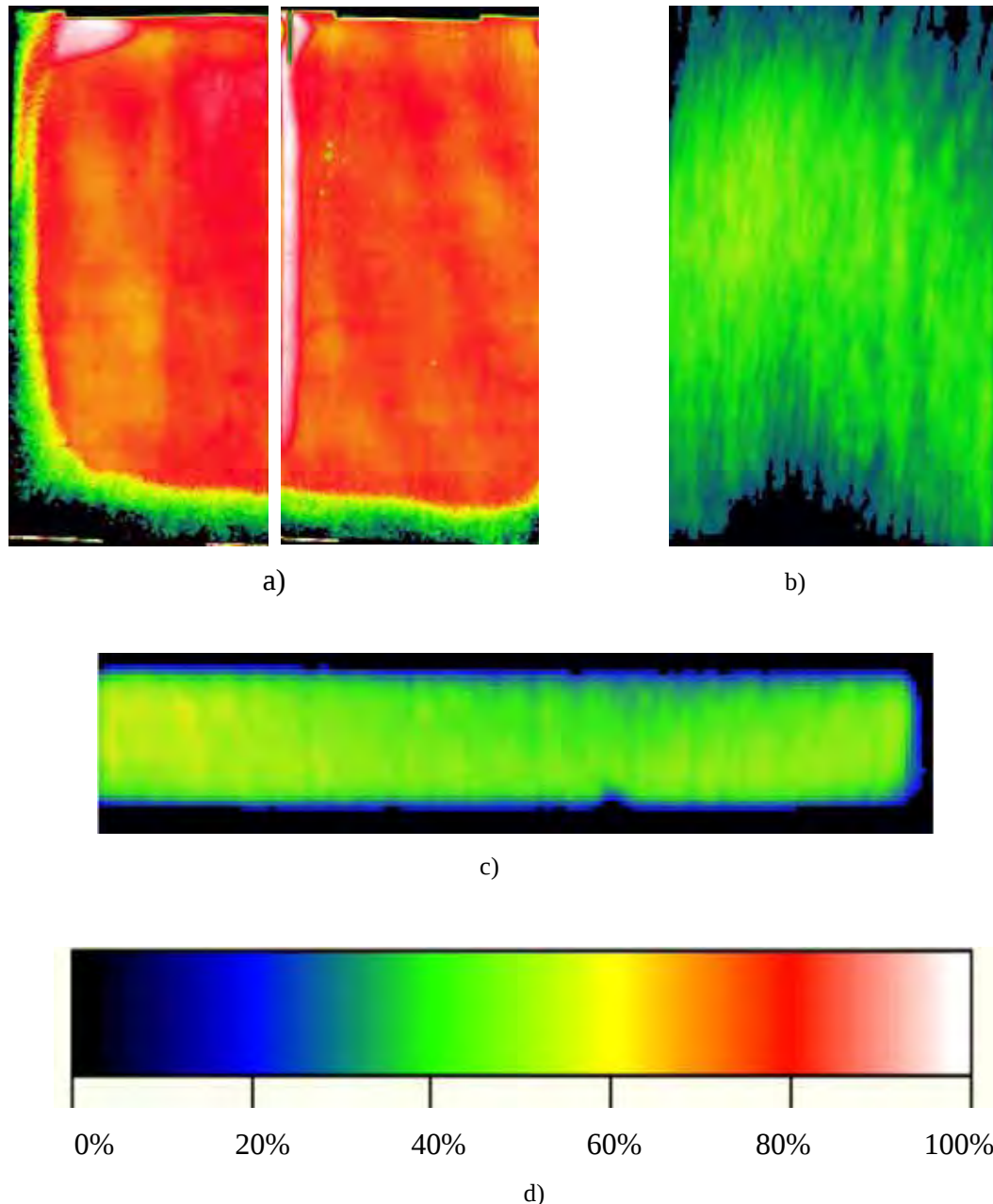


Figura 19 – Resultados de ultrassom dos laminados de PPS a serem soldados: a) fibras de vidro; b) fibras de carbono (FARIA, 2012); c) laminado híbrido (COSTA, 2011); d) escala de atenuação de cores

4.1.2 Análises Térmicas

Com o objetivo de se conhecer as temperaturas de fusão e de degradação e, assim, associar estes valores à janela de soldagem, foram realizadas análises de DSC e TGA nas amostras de PPS/fibras de carbono, PPS/fibras de vidro e laminado híbrido.

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os resultados de DSC para estas três famílias de laminados. Durante estas análises, todas as amostras passaram por uma primeira corrida com o propósito de destruir a história térmica destes materiais.

A Tabela 5 apresenta os principais dados retirados das curvas de DSC para as amostras de PPS/fibras de carbono, laminado híbrido e PPS/fibras de vidro, respectivamente.

Nota-se que, no segundo aquecimento, tanto na transição vítrea quanto na cristalização, houve uma diminuição nos resultados provenientes desta análise. Esta diminuição pode ser caracterizada pela presença da fibra de carbono, pois fica claro que quanto menor a quantidade de fibras de carbono no compósito, menor é a temperatura obtida, neste estudo.

Este mesmo comportamento é verificado pelo $\Delta H_{\text{fusão}}$, sendo o maior valor obtido para o PPS/fibras de carbono (17,5 mJ/mg), um valor médio para o laminado híbrido (12,7 mJ/mg), com o menor valor para o PPS/fibras de vidro (10,3 mJ/mg), e assim é possível afirmar também que, quanto maior o volume de fibras de carbono, maior será o valor de $\Delta H_{\text{fusão}}$, e desse modo, para este trabalho, a presença das fibras de carbono interferem na temperatura de transição vítrea.

Tabela 5 – Principais resultados provenientes das curvas do DSC para os compósitos estudados

Evento	PPS/fibras de carbono	Laminado híbrido	PPS/fibras de vidro
Fusão (°C)	228,2	233,7	210,0
Cristalização			
1º aquecimento (°C)	280,7	282,6	280,5
2º aquecimento (°C)	285,9	280,2	276,8
Transição vítrea (°C)			
1º aquecimento (°C)	269,7	272,0	267,8
2º aquecimento (°C)	275,4	268,1	261,2

De acordo com a literatura (REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011), as temperaturas de fusão e de transição vítrea para o PPS são 280°C e 130°C, respectivamente. Comparando-se os valores de temperaturas de fusão entre o compósito e sua matriz polimérica, observa-se uma pequena diminuição para o compósito. Já a temperatura de transição vítrea é maior no compósito que no polímero. Estas diferenças encontram-se, provavelmente, relacionadas com a presença das fibras de reforço.

A Figura 20 apresenta o gráfico de DSC para o material PPS/fibras de carbono, a Figura 21 mostra o gráfico para o laminado híbrido e a Figura 22 apresenta o gráfico para o PPS/fibras de vidro.

As curvas do 1º aquecimento, 2º aquecimento e resfriamento, de todos os gráficos, são apresentadas no mesmo gráfico para melhor entendimento dos dados obtidos.

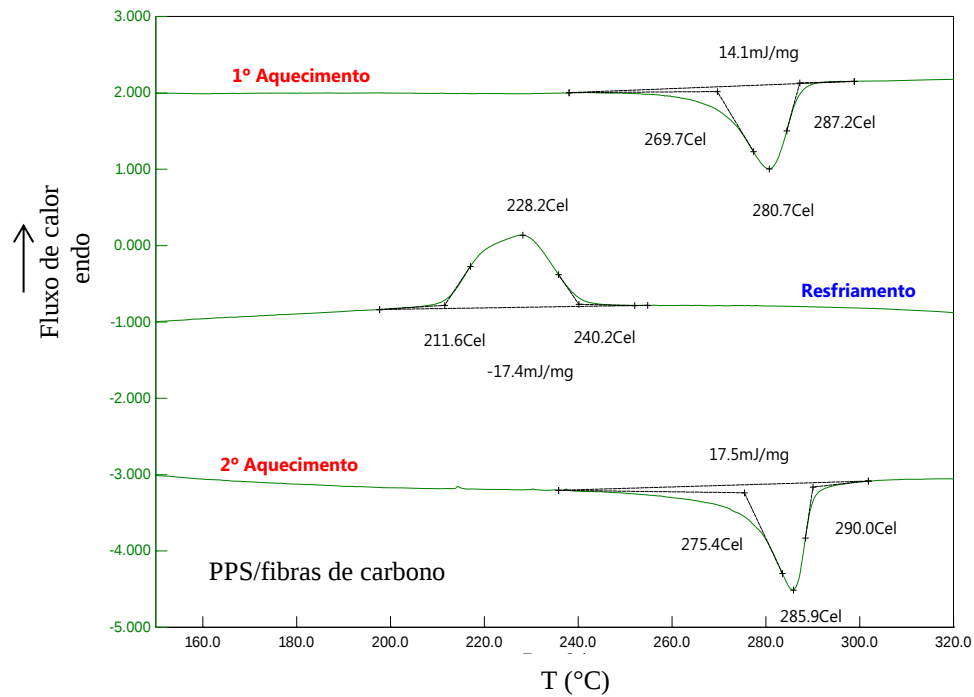


Figura 20 – Resultados de DSC das amostras de PPS/fibras de carbono

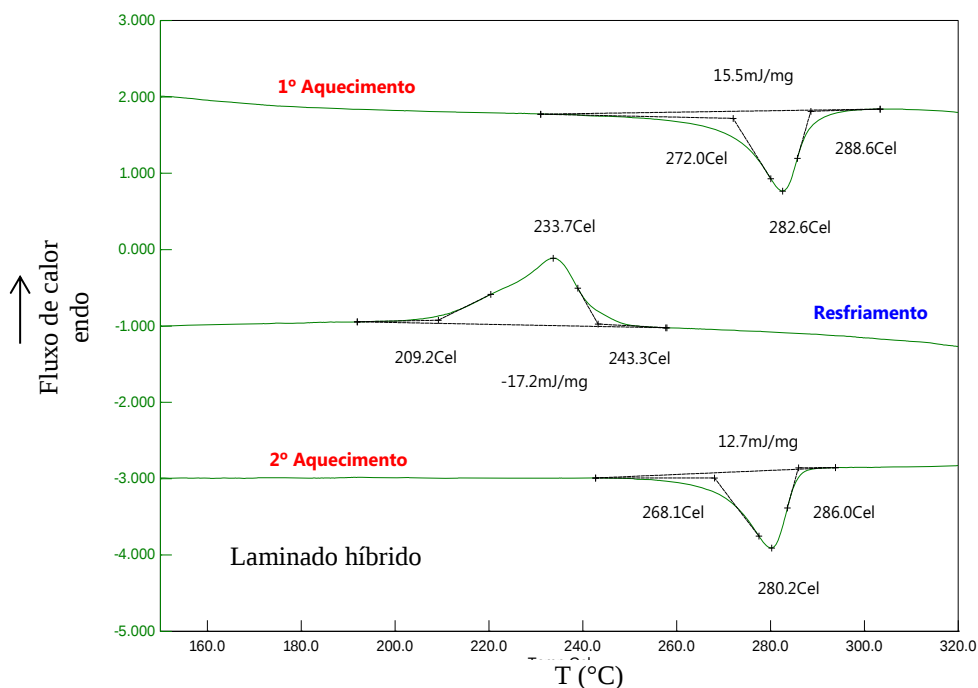


Figura 21 – Resultados de DSC das amostras de laminado híbrido

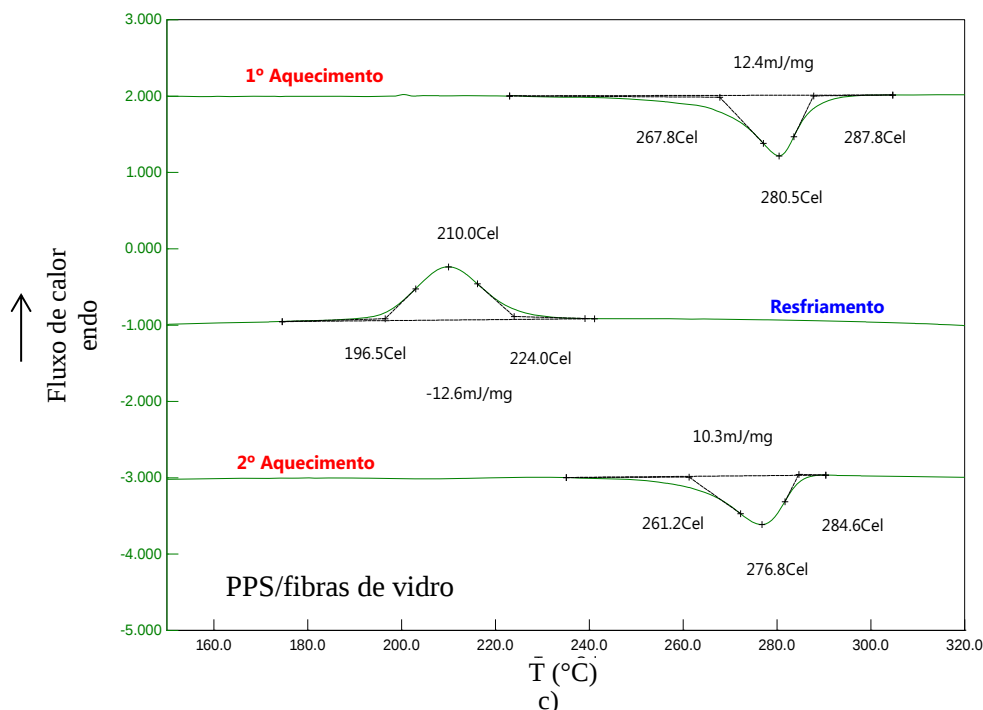


Figura 22 – Resultados de DSC das amostras de PPS/fibras de vidro

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam os resultados provenientes da análise de TGA para as amostras de PPS/fibras de vidro, laminado híbrido e PPS/fibras de carbono, respectivamente, sob atmosfera de N_2 .

A Figura 23, referente ao compósito PPS/fibras de carbono, mostra que o início da degradação ocorre em $493,0^\circ C$ e o término em $990,0^\circ C$, com 77,5% de teor residual.

O gráfico apresenta, também, duas temperaturas T_{onset} , uma em $493,0^\circ C$, referente ao início da degradação, e a outra em $711,0^\circ C$, a qual pode ser representativa de uma provável eliminação do polímero PPS.

A Figura 24 mostra o gráfico para o laminado híbrido. A temperatura inicial de degradação ocorre em $478,0^\circ C$ e a temperatura final em $995,0^\circ C$, com 40,0% de teor residual. No gráfico é possível notar, também, quatro temperaturas T_{onset} . Esse quantidade é maior que no PPS/fibras de carbono pois, além de conter 2 tipos de fibras neste material, a fibra de vidro apresenta muito componentes, e com isso, para a cada liberação destes componentes há uma temperatura diferente.

A Figura 25 apresenta o gráfico de TGA para o compósito PPS/fibras de vidro. A temperatura inicial de degradação é de $304,0^\circ C$ e a temperatura final de degradação é de $994,0^\circ C$. O teor residual apresentado é de 69,1%.

Para o PPS/fibras de vidro há também, quatro diferentes temperaturas T_{onset} , pois as fibras de vidro possuem uma composição com muitos elementos químicos. A mesma explicação dada para o laminado híbrido pode ser utilizada para o PPS/fibras de vidro.

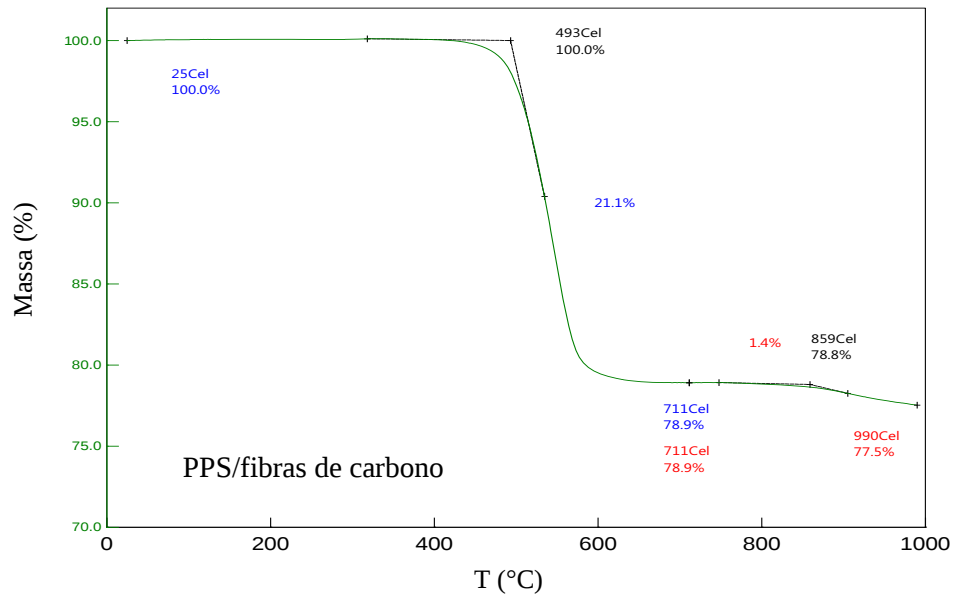


Figura 23 – Resultados provenientes das análises de TGA para o PPS/fibras de carbono

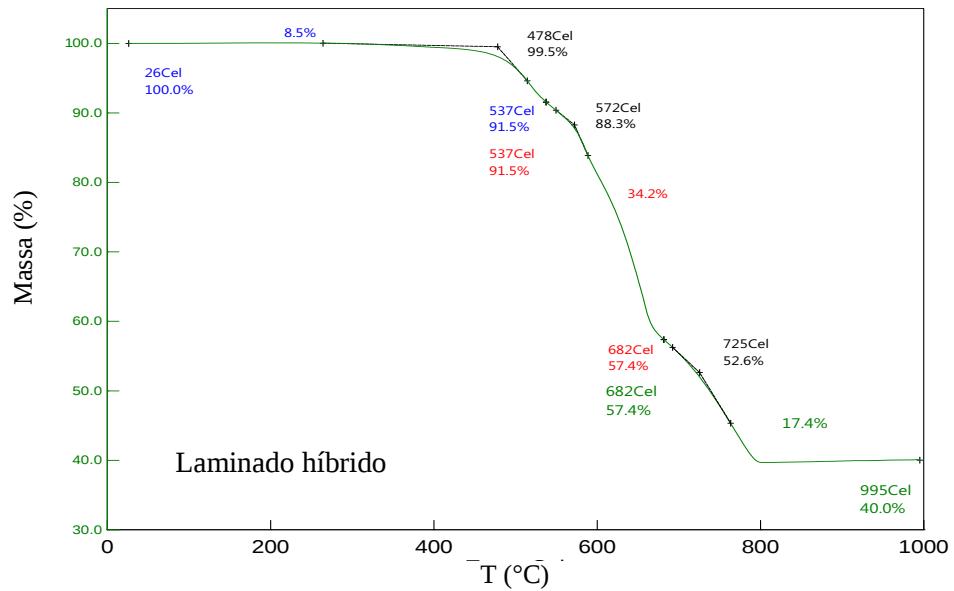


Figura 24 – Resultados provenientes das análises de TGA para o laminado híbrido

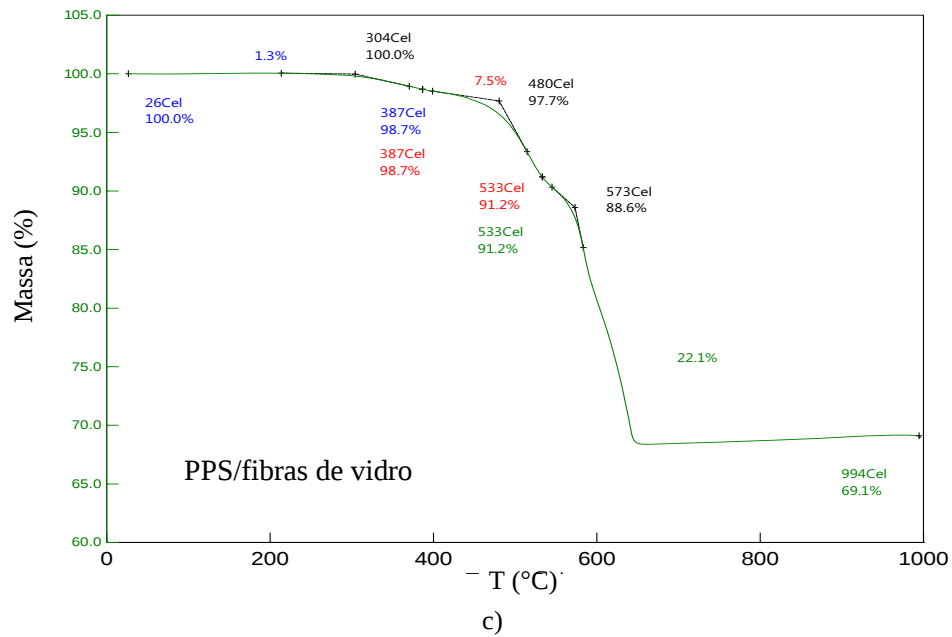


Figura 25 – Resultados provenientes das análises de TGA para o PPS/fibras de vidro

Utilizando os resultados encontrados a partir das análises de DSC e TGA, pode ser obtida a janela de soldagem para todas as amostras em estudo, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Janela de soldagem para as amostras em estudo

Compósito	Janela (°C)
PPS/fibras de carbono	225,0 – 493,0
Laminado híbrido	230,0 – 478,0
PPS/fibras de vidro	200,0 – 304,0

As temperaturas máximas presentes na Tabela 6 são mais elevadas quanto comparadas a temperatura de processamento do polímero (300°C -345°C), porém esse aumento é devido à presença das fibras de carbono e vidro nos laminados. É possível verificar também que para o PPS/fibras de carbono a temperatura máxima da janela de soldagem é maior em relação aos outros laminados, sendo assim possível afirmar que para o laminado com fibras de carbono a janela de soldagem é maior ($\Delta=268$) em relação aos demais laminados, sendo para o laminado híbrido uma diferença um pouco menor ($\Delta=248$), e uma menor janela de soldagem para o PPS/fibras de vidro ($\Delta=104$).

4.2 Definição do plano de ensaios

4.2.1 Avaliação preliminar dos parâmetros de soldagem

Para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foi necessário encontrar a quantidade de corpos de prova a serem soldados juntos para uma única combinação de parâmetros, verificar se a estabilização da pressão apresentava comportamento diferente conforme a quantidade de corpos de prova e se a passagem da corrente utilizada seria igualmente distribuída entre as amostras. Foram avaliadas diversas combinações das variáveis pressão, corrente elétrica e tempo de soldagem, sendo utilizadas três combinações (mínima, ponto médio e máxima), como apresentado nas Tabelas 7, 8 e 9. A eficiência de cada combinação foi avaliada a partir de ensaios de *lap shear* e, adicionalmente, foi verificado o número de corpos de prova necessário para esta avaliação. Este estudo preliminar foi realizado apenas com os laminados híbridos, sendo os resultados encontrados considerados para os laminados de PPS/fibras de carbono e PPS/fibras de vidro.

A Figura 26 evidencia o sucesso do processo de soldagem (soldagem de 1 a 5 corpos de prova juntos). A imagem que apresenta 6 corpos de prova é apresentada somente com o intuito de ilustrar que foi possível soldar também esta quantidade de amostras em uma mesma soldagem.

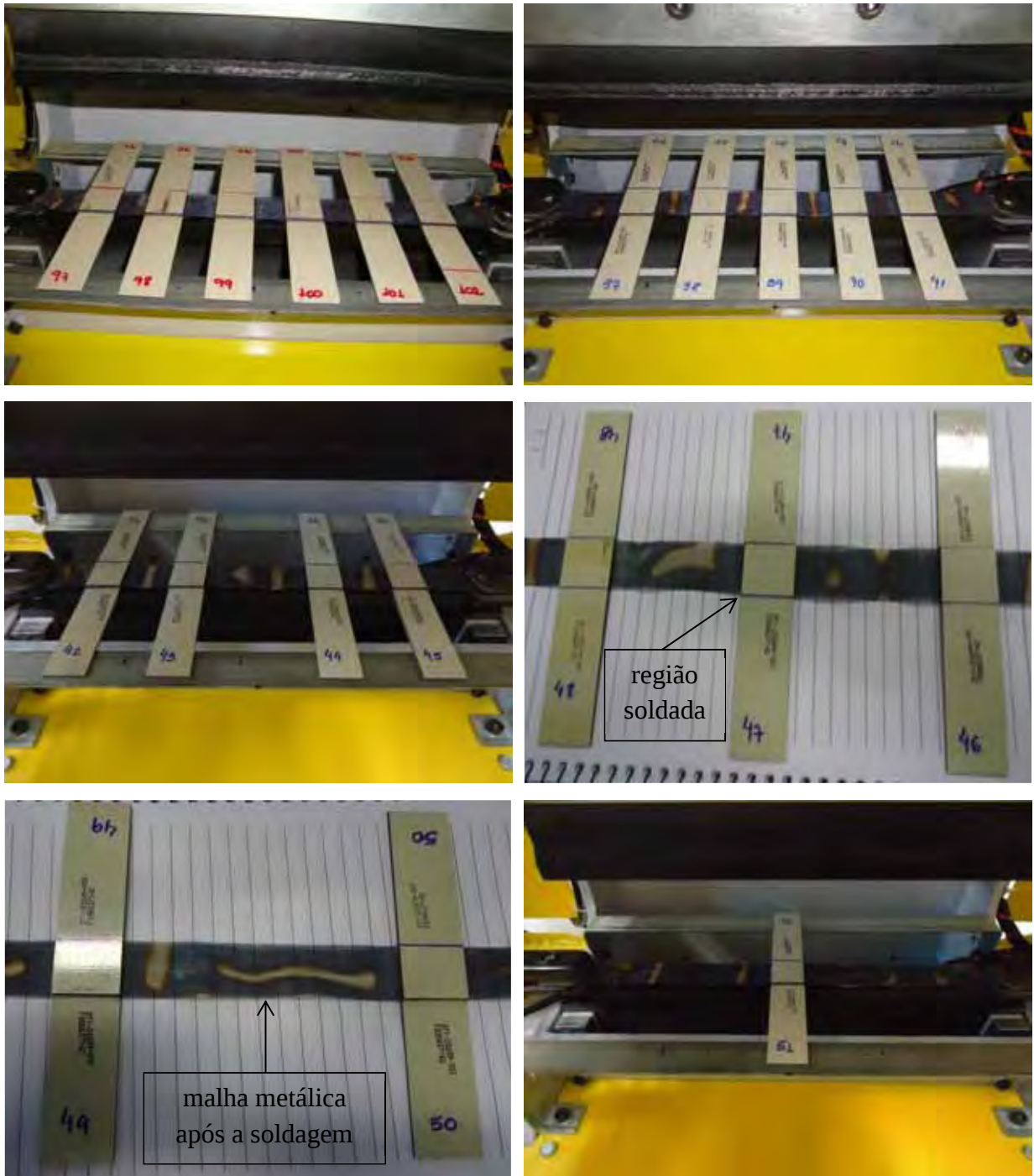


Figura 26 – Determinação da quantidade adequada dos corpos de prova na soldadora, com a combinação do ponto médio dos parâmetros

Tabela 7 – Valores para o *lap shear* com a combinação mínima dos parâmetros (0,7 MPa; 50,0 s; 29,5 A)

Quantidade de cdp	Valores de <i>lap shear</i> (MPa)
1	0,11
2	0,04
3	$7,12 \cdot 10^{-4}$
4	-----
5	0,02

Tabela 8 – Valores para o *lap shear* com a combinação do ponto médio para os parâmetros (1,85 MPa; 175,0 s; 32,25 A)

Quantidade de cdp	Valores de <i>lap shear</i> (MPa)
1	5,1
2	3,7
3	6,4
4	6,6
5	3,3

Tabela 9 – Valores para o *lap shear* com a combinação máxima dos parâmetros (3,0 MPa; 300,0 s; 35,0 A)

Quantidade de cdp	Valores de <i>lap shear</i> (MPa)
1	9,6
2	11,8
3	10,8
4	11,7
5	10,7

A Tabela 7 fornece os valores de tensão por *lap shear* com a combinação mínima dos valores mínimos dos parâmetros analisados. Neste estudo, os valores encontrados foram muito baixos e, em alguns casos (com 4 amostras), não foram obtidos resultados coerentes, uma vez que todos os corpos de prova ensaiados apresentaram delaminações já no momento em que foram posicionados no suporte da máquina de ensaios mecânicos. Na soldagem com cinco corpos de prova, dois destes também não apresentaram valores coerentes, resultando nos mesmos problemas apresentados quando da utilização do lote envolvendo 4 amostras.

Este fato mostra que os parâmetros de pressão, tempo e corrente utilizados não foram adequados, sendo necessária a utilização de valores mais elevados.

Na soldagem com a utilização de valores médios dos parâmetros (Tabela 8), os resultados de tensão por *lap shear* foram semelhantes com 3 e 4 corpos de prova, já na combinação dos parâmetros com valores máximos, os valores para 2 corpos de prova apresentaram boa estabilidade em relação aos demais, da mesma combinação (Tabela 9). Porém, para um melhor controle estatístico, optou-se por soldar sempre com 4 ou 5 corpos de prova. Como pode ser observado, os melhores resultados foram obtidos a partir da utilização dos parâmetros máximos (3,0 MPa; 300,0 s; 35,0 A). Embora a soldadora permita a utilização de maiores valores de corrente elétrica, experimentalmente foi observado que correntes acima de 35A podem resultar na degradação da interface localizada na região de soldagem. Nota-se, neste caso, que o material interno foi expulso, evidenciando uma elevada passagem de corrente, que acarreta na degradação do material.

4.2.2 Resultados sobre a direção da malha metálica

Para um controle mais adequado do processo de soldagem, outro importante estudo consiste na avaliação da direção a ser utilizada da malha metálica (elemento resistivo) para a efetivação da união entre as camadas. Desta forma, um teste envolvendo a direção (x ou y) de utilização da malha foi realizado.

Nos primeiros testes realizados foi confirmado, como esperado, que a malha metálica deve ter a área do corpo de prova a ser soldado, pois caso contrário, a corrente passa pelas laterais da malha e não na região a ser soldada.

Outro ponto que foi observado consiste na direção do corte das tiras para a soldagem. A malha metálica vem em metragem (1m x pela quantidade requisitada), e precisa ser cortada para ser utilizada na soldagem, porém, a direção da trama pode interferir. Neste trabalho também foi estudado se havia uma melhor direção a ser cortada as tiras da malha metálica. Nos primeiros testes foi observada uma diferença quando comparada a passagem de corrente na trama ou no urdume da malha, porém após uma nova calibragem da máquina, novos testes foram realizados e, com o auxílio da técnica de microscopia óptica foi comprovado não haver diferença na direção da malha metálica.

A Figura 27 apresenta uma imagem da malha metálica, obtida a partir de uma lupa, com uma ampliação de 10x. Como pode ser observado, a direção da trama e do urdume não

apresentam diferenças ao longo da malha, explicando o motivo de não existir diferenças na passagem de corrente elétrica.

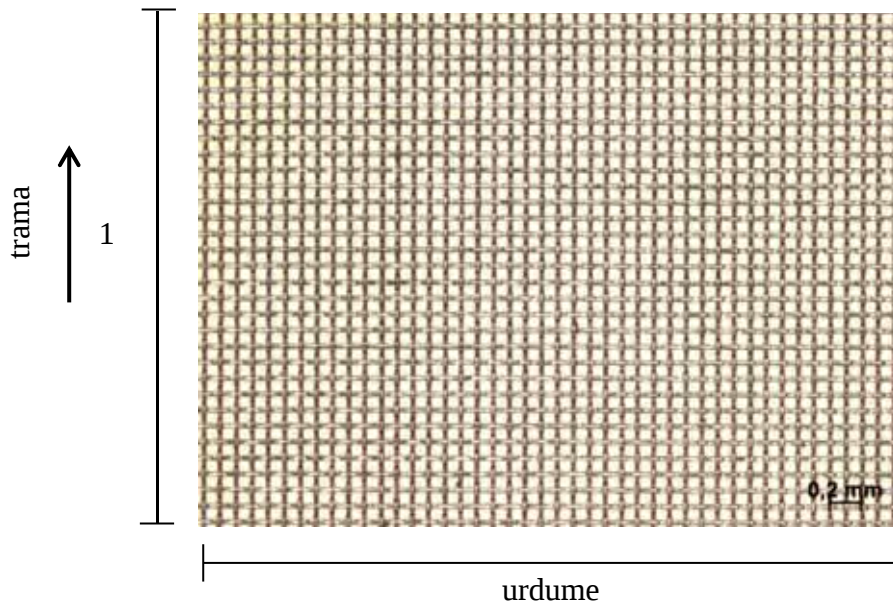


Figura 27 – Imagem da malha metálica feita com a Lupa Zeiss

Desta forma, as tiras foram cortadas na direção da trama como apresentado pela seta da Figura 27, ou seja, na direção da largura da malha metálica. As dimensões das tiras utilizadas como elemento resistivo foram 400 mm x 25 mm.

4.2.3 Resultados do planejamento experimental

Com o intuito de aprimorar a combinação entre os três parâmetros de soldagem (tempo, corrente e pressão) foi utilizado um planejamento de experimentos. 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. Além disso, não há como encontrar a melhor combinação entre os três parâmetros sem a ajuda de um método estatístico. Desta forma, o planejamento propõe as melhores condições dentro de uma região considerada como a mais adequada para o que se deseja.

A matriz experimental e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 10 a 14 respectivamente para os 3 materiais analisados : PPS/fibras de carbono, PPS/fibras de vidro e

laminado híbrido, respectivamente, sendo que os ensaios foram realizados de forma aleatória e com réplicas de 5 vezes conforme apresentado nos Apêndices A, B e C.

Os resultados obtidos foram avaliados utilizando-se o programa Design-Expert 6.0 (StatEase Corporation, USA). Este software foi também empregado para a determinação dos valores máximos de tensão a ruptura (MPa) das juntas soldadas, possíveis de serem obtidos dentro da faixa de valores estudados.

As amostras de PPS/fibra de carbono foram cortadas na direção 90°. A Tabela 10 apresenta os resultados para o laminado de PPS/fibras de carbono. Em relação à direção em que as amostras foram cortadas (0 ° ou 90 °), pode haver diferenças significativas nos valores de *lap shear*, porém foram feitos corpos de prova em ambas direções, tanto para o laminado PPS/fibras de carbono quanto para o PPS/fibras de vidro, e os valores obtidos não apresentaram diferença significativa nos resultados.

Tabela 10 – Combinações e valores da tensão por *lap shear* do planejamento – PPS/fibras de carbono

Variáveis Estudadas				Variável resposta
Experimento	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	50,00	30,00	0,70	2,08
2	300,00	30,00	0,70	13,09
3	50,00	37,00	0,70	6,25
4	300,00	37,00	0,70	8,76
5	50,00	30,00	3,00	2,29
6	300,00	30,00	3,00	5,80
7	50,00	37,00	3,00	13,85
8	300,00	37,00	3,00	11,02
9	175,00	33,50	1,85	14,82
10	175,00	38,00	1,85	12,19
11	50,00	33,50	1,85	6,54
12	300,00	33,50	1,85	17,06
13	175,00	33,50	0,70	17,13
14	175,00	33,50	3,00	14,97

Para os experimentos de 10 a 14 foi utilizado o planejamento estrela (o planejamento estrela é uma ampliação do planejamento que está sendo utilizado para a localização do ponto ótimo, quando há dúvidas em relação a duas ou mais combinações - NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001), pois existiam dúvidas em relação a algumas combinações de parâmetros, uma vez que o resultado de uma variável resposta ficava muito próximo em relação a outro.

A avaliação dos efeitos das variáveis empregadas sobre a variável resposta foi realizada por meio da análise de variância ANOVA. Adotou-se, como critério de 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%. Estes fatos são constatados pelo teste de significância para os efeitos das variáveis independentes (pressão, corrente e tempo) para a resistência a ruptura das peças soldadas, como resposta avaliada a tensão de ruptura em MPa (Tabela 11).

Para o material PPS/fibras de carbono as variáveis independentes significativas foram tempo, corrente e as interações das variáveis tempo/corrente, tempo/pressão e corrente/pressão, como evidenciado pela Tabela 11.

Tabela 11 – Estimativas dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente, valor de R^2 e valores de p para os valores dos ensaios de *Lap Shear* (MPa), segundo os resultados do planejamento fatorial completo para o material PPS/fibras de carbono

Variáveis	Soma dos quadrados	gl (grau de liberdade)	Erro	F	P
Tempo (X_1)	58,97	1	0,51	22,40	*0,0011
Corrente (X_2)	55,71	1	0,47	21,16	*0,0013
Pressão (X_3)	0,067	1	0,51	0,025	0,8770
X_1 com X_2	27,50	1	0,57	10,45	0,0103
X_1 com X_3	20,64	1	0,57	7,84	0,0207
X_2 com X_3	35,88	1	0,57	13,63	0,0050
R^2					0,9527
R^2 ajustado					0,9054

* p : Valores significativos para valores de $p < 0,05$

O valor de R^2 obtido indica que mais de 95% de confiança dos resultados obtidos para a soldagem do PPS/fibras de carbono.

A equação de regressão utilizada é fornecida, em termos dos fatores atuais, pelo próprio software como apresentado na equação (3):

$$\begin{aligned}
Lap\ Shear = & -348,27847 + (0,26902 * Tempo) + (20,55880 * Corrente) \\
& - (2,4830E^{-4} * Tempo^2) - (0,30106 * Corrente^2) \\
& - (4,23806E^{-3} * Tempo * Corrente) - (0,011173 * Tempo * Pressão) \\
& + (0,52618 * Corrente * Pressão)
\end{aligned}
\tag{3}$$

O planejamento de experimentos foi também aplicado para os laminados de PPS/fibras de vidro (Tabela 12). Para a soldagem do PPS/fibra de vidro os corpos de prova foram cortados a 90°.

Tabela 12 – Combinações e valores da tensão por *lap shear* do planejamento – PPS/fibras de vidro

Experimento	Variáveis Estudadas			Variável resposta
	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	50,00	26,00	0,70	0,01
2	300,00	26,00	0,70	0,73
3	50,00	30,00	0,70	1,99
4	300,00	30,00	0,70	9,57
5	50,00	26,00	3,00	0,46
6	300,00	26,00	3,00	1,87
7	50,00	30,00	3,00	1,17
8	300,00	30,00	3,00	4,93
9	50,00	28,00	1,85	3,24
10	175,00	28,00	1,85	3,24
11	175,00	32,00	1,85	8,14
12	300,00	31,00	0,70	6,75

Para os experimentos 11 e 12 foi também utilizado o planejamento estrela, pelo mesmo motivo anteriormente exposto.

Com a análise ANOVA, para o material PPS/fibras de vidro verificou-se que a tensão de ruptura (variável resposta) das amostras soldadas foi dependente da corrente aplicada e do tempo de soldagem (variáveis independentes), sendo que, a interação destas variáveis foi também significativa para a variável resposta considerada. A Tabela 13 apresenta os resultados para as variáveis e suas combinações.

Tabela 13 – Estimativas dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente, valor de R^2 e valores de p para os valores dos ensaios de *Lap Shear* (MPa), segundo os resultados do planejamento fatorial completo para o material PPS/fibras de vidro

Variáveis	Soma dos quadrados	gl (grau de liberdade)	Erro	F	P
Tempo (X_1)	14,64	1	0,40	8,97	0,0112
Corrente (X_2)	53,55	1	0,32	32,83	<0,0001
Pressão (X_3)	0,93	1	0,32	0,57	0,4640
X_1 com X_2	10,58	1	0,45	6,49	0,0256
X_1 com X_3	1,22	1	0,45	0,75	0,4035
X_2 com X_3	6,24	1	0,45	3,82	0,0742
R^2					0,8166
R^2 ajustado					0,7249

*p: Valores significativos para valores de $p < 0,05$

Em relação ao valor de R^2 obtido, mais de 81,66% da variabilidade experimental pode ser explicada pelo modelo linear relativo à variável resposta.

A equação de regressão utilizada, neste caso representada pela equação (4), assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Lap Shear} = & -22,19868 - (0,11410 * \text{Tempo}) + (0,81992 * \text{Corrente}) \\
 & + (4,60035E^{-3} * \text{Tempo} * \text{Corrente})
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

O planejamento de experimentos foi também aplicado para o laminado híbrido. Este foi soldado na direção 90°, uma vez que estes foram cedidos apenas nesta direção. A Tabela 14 apresenta os resultados provenientes do ensaio de *lap shear* para este laminado soldado.

Para os experimentos de 10 a 15 foi novamente utilizado o planejamento estrela, pois aqui também existiam dúvidas com relação a algumas combinações de parâmetros.

Tabela 14 – Combinações e valores da tensão por *lap shear* do planejamento – laminado híbrido

Variáveis Estudadas				Variável resposta
Experimento	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	50,00	31,50	0,70	-----
2	300,00	31,50	0,70	1,41
3	50,00	38,50	0,70	8,90
4	300,00	38,50	0,70	12,12
5	50,00	31,50	3,00	0,41
6	300,00	31,50	3,00	2,94
7	50,00	38,50	3,00	13,47
8	300,00	38,50	3,00	9,78
9	175,00	35,00	1,85	12,03
10	175,00	33,00	1,85	8,54
11	50,00	35,00	1,85	13,26
12	300,00	35,00	1,85	8,61
13	175,00	39,00	1,85	4,25
14	175,00	35,00	0,70	12,68
15	175,00	35,00	3,00	11,21

Analisando-se os resultados obtidos dos valores da ANOVA para o laminado híbrido de acordo com a Tabela 15, constatou-se que a única variável significativa para a soldagem foi a corrente elétrica aplicada, pois o valor de P para a corrente elétrica (0,0002) é menor que 0,05 (valor indicado abaixo da Tabela 15).

Tabela 15 – Estimativas dos efeitos das variáveis tempo, pressão e corrente, valor de R^2 e valores de p para os resultados dos ensaios de *Lap Shear* (MPa), segundo os resultados do planejamento fatorial completo para o material laminado híbrido

Variáveis	Soma dos quadrados	gl (grau de liberdade)	Erro	F	P
Tempo (X_1)	0,21	1	0,68	0,046	0,8349
Corrente (X_2)	177,31	1	0,72	38,54	*0,0002
Pressão (X_3)	0,65	1	0,68	0,14	0,7165
X_1 com X_2	2,30	1	0,76	0,50	0,4976
X_1 com X_3	3,81	1	0,76	0,83	0,3866
X_2 com X_3	0,037	1	0,76	8,038E ⁻³	0,9305
R^2					0,8914
R^2 ajustado					0,7827

* p : Valores significativos para valores de $p < 0,05$

Neste caso o valor de R^2 indica que mais que 89% de confiança pode considerar válido os valores de explicação deste modelo.

A equação de regressão utilizada neste caso é descrita pela equação (5):

$$Lap\ Shear = -810,13289 + (45,68721 * Corrente) - (0,63194 * Corrente^2) \quad (5)$$

Desta forma, considerou-se que todos os modelos estatísticos obtidos foram adequados para descrever a variável resposta em valores de ensaio de *lap shear* em função das variáveis estudadas: tempo, corrente e pressão do processo de soldagem para os materiais em estudo com matriz termoplástica de PPS.

Empregando-se o programa Design-Expert, procedeu-se na busca dos valores máximos de *lap shear* dentro dos valores considerados para as variáveis estudadas. A partir destes valores aprimorados, foram plotados, utilizando-se do programa Statistica versão 5 (StatSoft Inc., USA), gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis comparando com o maior valor predito pelo modelo dos ensaios de *lap shear*. Os resultados preditos do aprimoramento estão apresentados na Tabela 16 e os valores reais obtidos são mostrados na Tabela 17, dos respectivos materiais estudados.

Tabela 16 – Valores das variáveis estudadas aprimoradas propostas pelo modelo estatístico para valores máximos da variável resposta dos materiais soldados estudados

Laminado soldado	<i>Lap Shear</i> (MPa)	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)
PPS/fibras de vidro	8,66	299,99	30,00	0,70
PPS/fibras de carbono	16,90	170,54	35,57	3,00
Laminado híbrido	13,54	177,84	36,21	2,85

Tabela 17 – Valores obtidos das variáveis estudadas para a soldagem

Laminado soldado	<i>Lap Shear</i> (MPa)	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)
PPS/fibras de vidro	9,57	300,00	30,00	0,70
PPS/fibras de carbono	17,13	175,00	33,50	0,70
Laminado híbrido	13,47	50,00	38,50	3,00

As superfícies de resposta referentes aos modelos estatísticos da soldagem por resistência elétrica apresentam um máximo (topo) da curva do valor da variável resposta com o valor máximo dos parâmetros, indicando o melhor valor destes, considerando a significância dos efeitos.

Para o compósito PPS/fibras de carbono, o valor máximo da variável resposta foi de 17,13 MPa, que indicou o emprego das variáveis estudadas em valores aprimorados das faixas estipuladas, sendo de 175 s, 33,5 A e 0,7 MPa. Para este compósito soldado, foi encontrado na literatura o resultado de 30,0 MPa por meio do ensaio de *Short-Beam* (ILSS), com valores de pressões de 0,9 MPa e 1,0 MPa e o tempo de soldagem de 60 s, sendo que a primeira pressão de 0,9 MPa era aplicada na amostra até que a temperatura estivesse alta o suficiente e só então a pressão de 1,0 MPa era aplicada para enfim ocorrer a soldagem, e a técnica utilizada não foi a de soldagem por resistência elétrica, e sim uma ferramenta de aquecimento para a soldagem (*hot-tool Welding*) (BAERE, PAEPEGEM, DEGRIECK, 2010).

A Figura 28 apresenta o gráfico da superfície para o compósito PPS/fibras de carbono em relação a corrente, tempo e variável resposta (*lap shear*). A região acima da curva de resposta (área cinza) é mais estável em relação à região abaixo desta curva, pois nesta área os resultados podem ser mais afetados pelos parâmetros.

Como para o PPS/fibras de carbono houve duas variáveis independentes (tempo e corrente) e outras três combinações destas (tempo/corrente, tempo/pressão e corrente/pressão)

que influenciaram no processo, a curva da superfície de resposta possui um arranjo circular nas curvas de nível, devido a esta elevada quantidade de fatores que influenciam no processo.

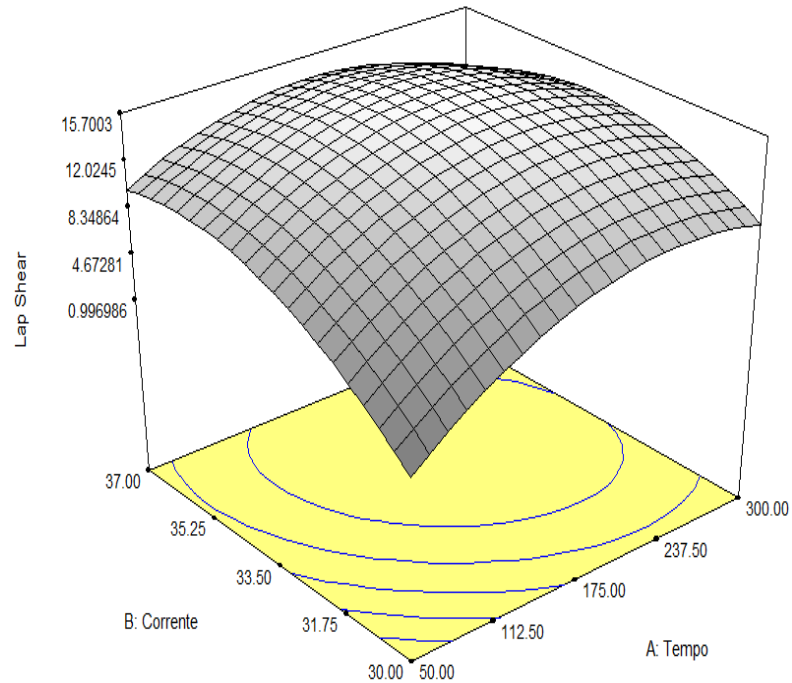


Figura 28 – Gráfico da superfície de resposta para o compósito PPS/fibras de carbono

A Figura 29 mostra a mesma superfície, porém são linhas de contorno referentes à variável resposta (*lap shear*).

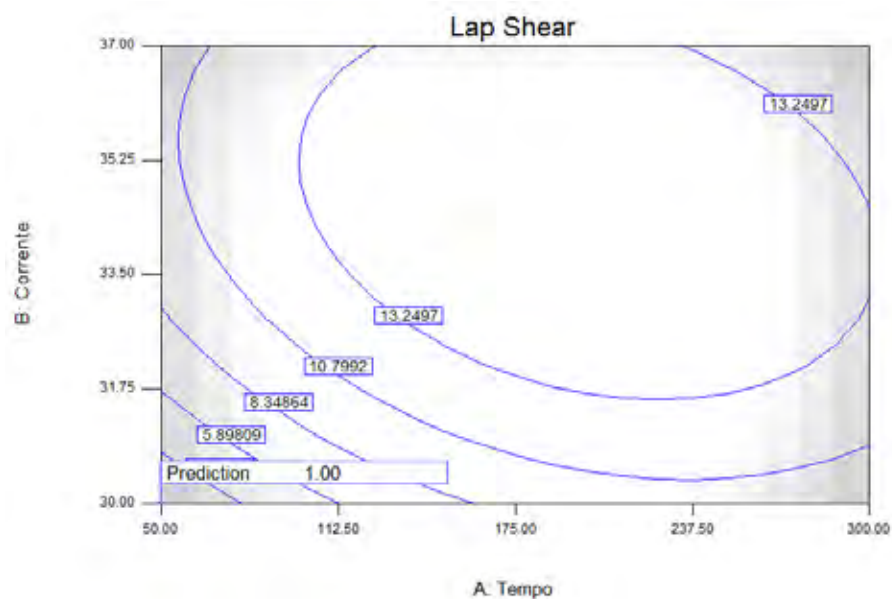


Figura 29 – Gráfico da superfície de contorno para o compósito PPS/fibras de carbono

Para a soldagem do compósito PPS/ fibras de vidro, o máximo do teste de *lap shear* obtido foi de 9,57 MPa, que indicou o emprego das variáveis estudadas em valores aprimorados das faixas estipuladas, sendo de 300 s, 30 A e 0,7 MPa.

O gráfico para a superfície de resposta do PPS/fibras de vidro é apresentado na Figura 30.

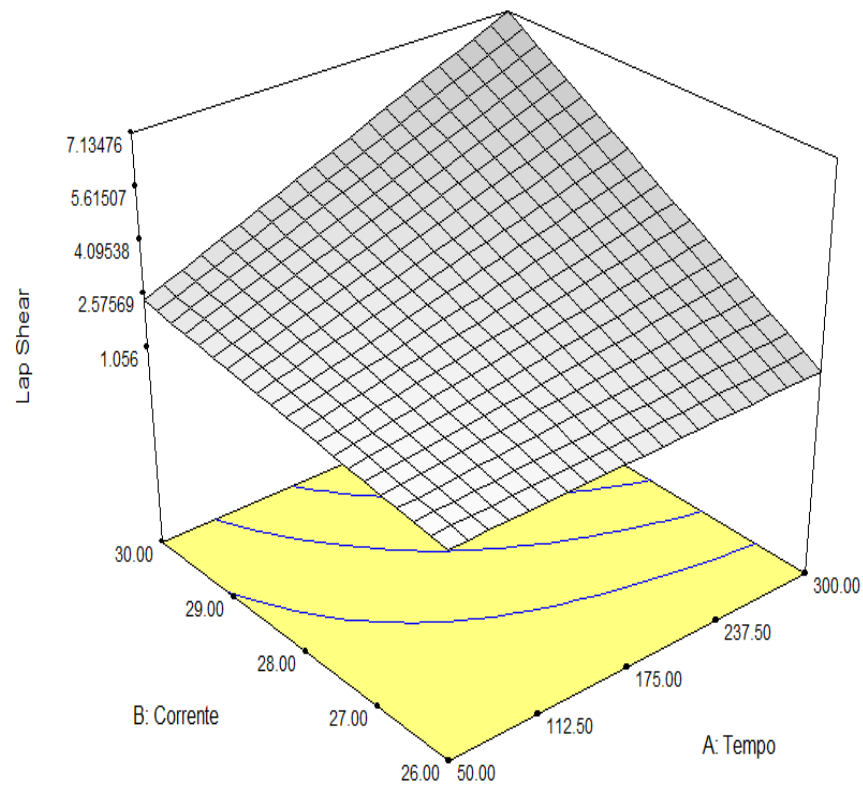


Figura 30 – Gráfico da superfície de resposta para o compósito PPS/fibras de vidro

A Figura 31 mostra a superfície de contorno para a variável resposta (*lap shear*) do PPS/fibras de vidro.

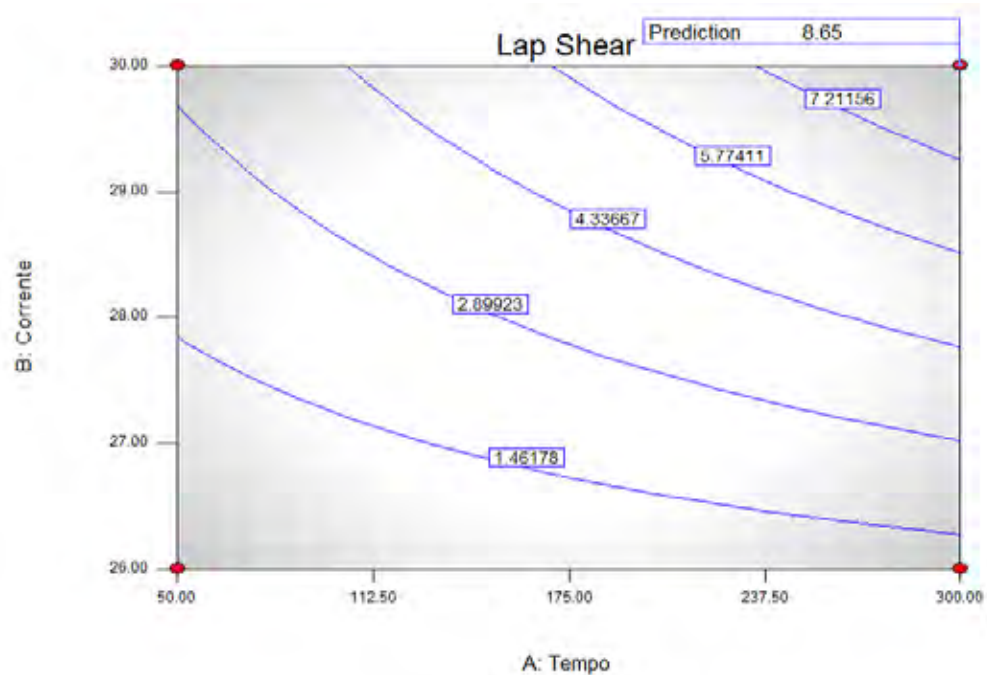


Figura 31 – Gráfico da superfície de contorno para o compósito PPS/fibras de carbono

Para o PPS/fibras de vidro houve também duas variáveis independentes (tempo e corrente) e apenas uma combinação (tempo/corrente) que influenciaram no processo, desse modo as curvas de nível não formam círculos completos, apenas semicírculos, caracterizando deste modo, apenas faixas para a variável resposta, e não regiões completas com os valores preditos para a tensão de *lap shear*.

Finalmente, o compósito híbrido foi o que apresentou maior valor de tensão do teste *lap shear* para a junta soldada, chegando ao valor de 13,47 MPa, que indicou o emprego das variáveis estudadas em valores aprimorados das faixas estipuladas, sendo de 50 s, 38,5 A e 3,0 MPa.

O gráfico para a superfície de resposta do laminado híbrido é apresentado na Figura 32.

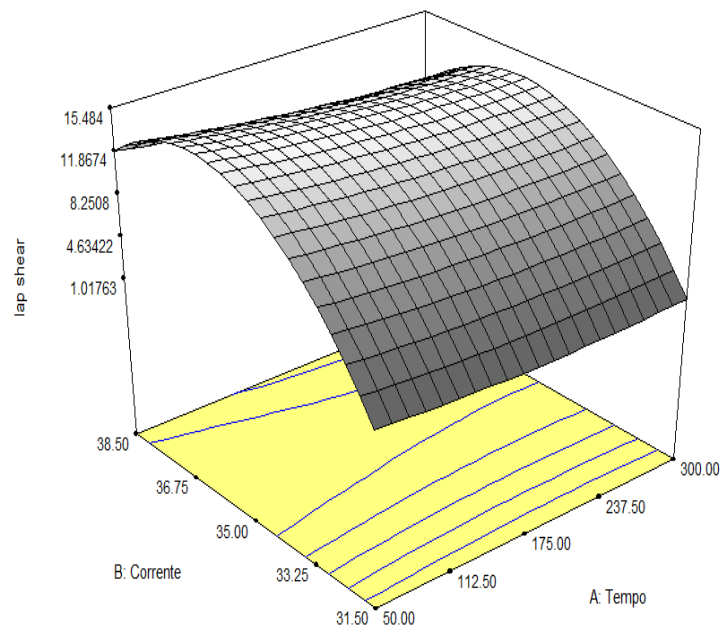


Figura 32 – Gráfico da superfície de resposta para o laminado híbrido

A Figura 33 mostra a superfície de contorno para a variável resposta (*lap shear*) do laminado híbrido.

As curvas provenientes do laminado híbrido apresentaram um comportamento diferente, quando comparadas às curvas obtidas para os laminados de fibras de vidro e carbono, devido a somente um fator ter influenciado significativamente no processo, sendo este a corrente elétrica, e desse modo as curvas apresentadas são relativamente constantes em relação aos demais gráficos e materiais aqui apresentados.

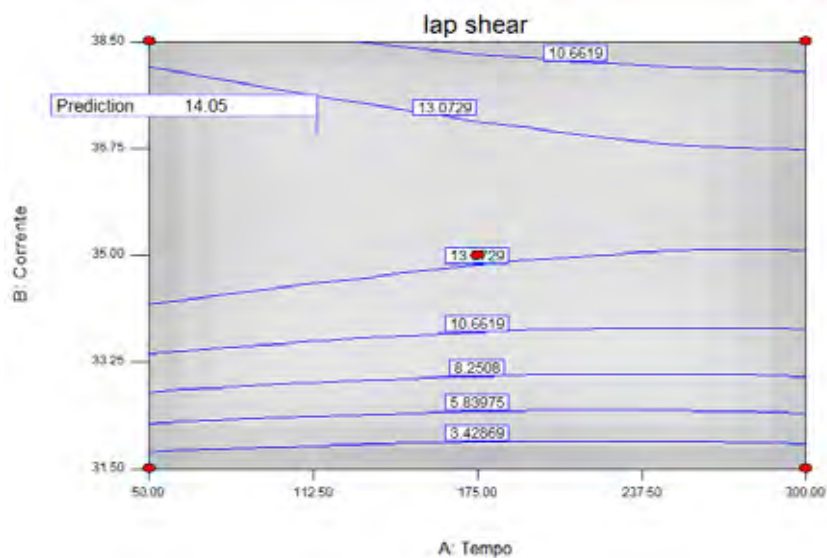


Figura 33 – Gráfico da superfície de contorno para o laminado híbrido

As curvas de nível evidenciam a faixa ótima de valores de corrente e tempo para valores máximos de *lap shear*, utilizando-se uma pressão de soldagem estipulada pelo programa com base nos resultados experimentais. Estes resultados foram analisados e os valores fornecidos pelo programa referiam-se aos valores máximos de *lap shear*, visando o aprimoramento, dentro das faixas de valores estipuladas para as variáveis do processo em estudo.

4.3 Avaliação pelas microscopias óptica e eletrônica de varredura

Durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, os laminados soldados foram avaliados por estereomicroscopia (lupa), por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura 34 apresenta uma imagem da região transversal de um corpo de prova soldado de PPS/fibras de carbono, utilizando a melhor combinação de parâmetros obtida a partir da avaliação estatística deste processo.

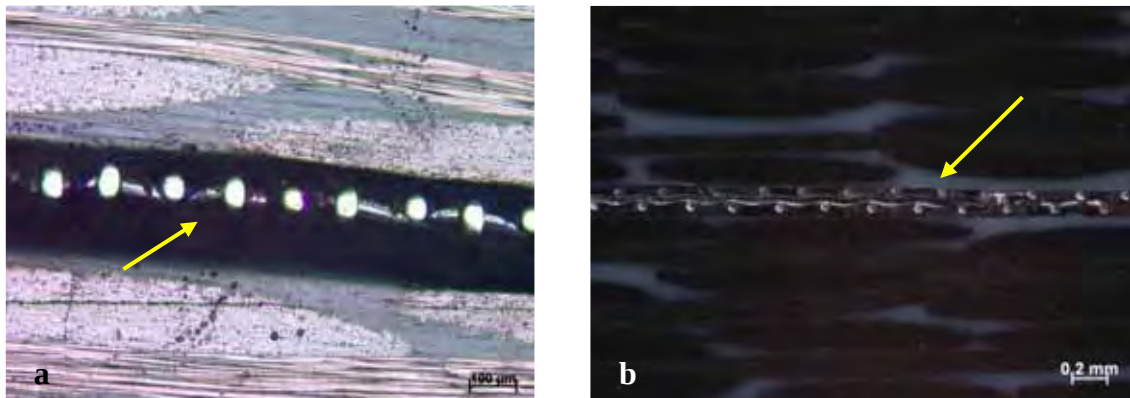


Figura 34 – Região transversal da amostra de PPS/fibras de carbono soldado: a) microscopia óptica com filtro de intensidade (50%) (5X); b) imagem obtida por estereoscopia (20X)

As setas amarelas indicam a interface soldada para o PPS/fibras de carbono, sendo que os pontos brilhantes na Figura 34a representam a malha metálica.

A partir destes resultados pode ser observado que o processo de soldagem apresentou uma interface homogênea entre as lâminas soldadas, não sendo, a princípio, evidenciados problemas decorrentes de delaminações ou vazios, que poderiam interferir nas análises de *lap shear*.

A Figura 35 (a e b) apresenta a região soldada do laminado PPS/fibras de carbono, após a realização do ensaio de *Lap Shear*. A partir desta imagem é possível verificar a boa penetração da matriz polimérica na malha metálica utilizada como elemento resistivo, tanto

pelo encobrimento da malha pela matriz, quanto pelas marcas deixadas no polímero pela malha, indicadas pelas setas em amarelo.

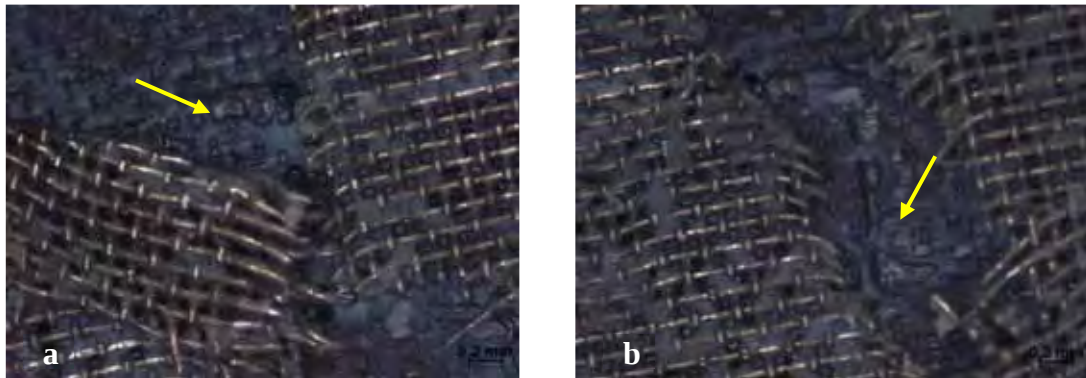


Figura 35 – Avaliação por estereoscopia da amostra de PPS/fibras de carbono soldado após ensaio de *Lap Shear*: a) 20X; b) 20X

A Figura 36a mostra a região transversal do laminado híbrido soldado avaliada a partir da microscopia óptica, utilizando uma ampliação de 5X, com filtro de intensidade. Os pontos brilhantes representam a malha metálica. A Figura 36b mostra o mesmo corpo de prova, porém utilizando a análise por estereoscopia, com ampliação de 10X. Nota-se, também neste caso, a ausência de poros e/ou delaminações que poderiam interferir no processo de soldagem deste laminado, confirmando que este processo foi realizado de forma adequada. A seta em amarelo indica a região da interface soldada do laminado híbrido.

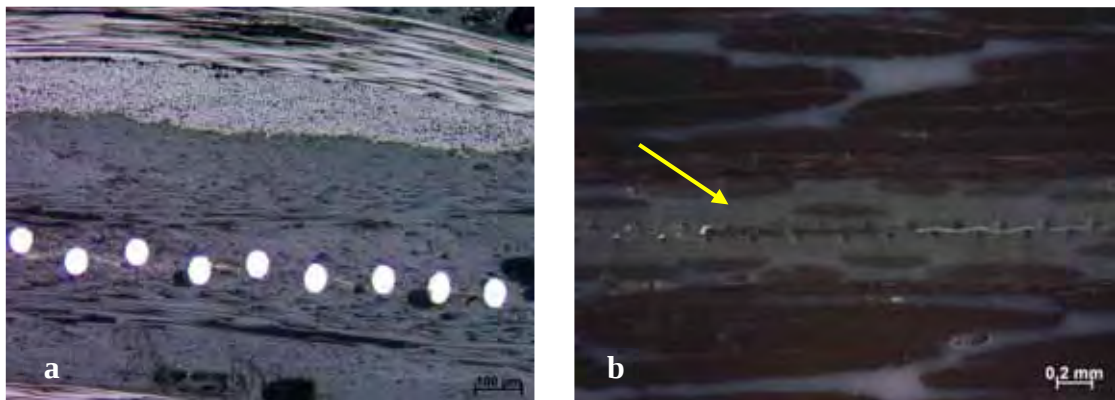


Figura 36 – Região transversal do laminado híbrido soldado: a) microscopia óptica em campo claro; b) imagem obtida por estereoscopia

A Figura 37 apresenta a região soldada, do laminado híbrido, após a realização do ensaio de *lap shear*, confirmando, também neste caso, a boa interação entre a matriz polimérica e a malha metálica. As imagens foram obtidas por estereoscopia.

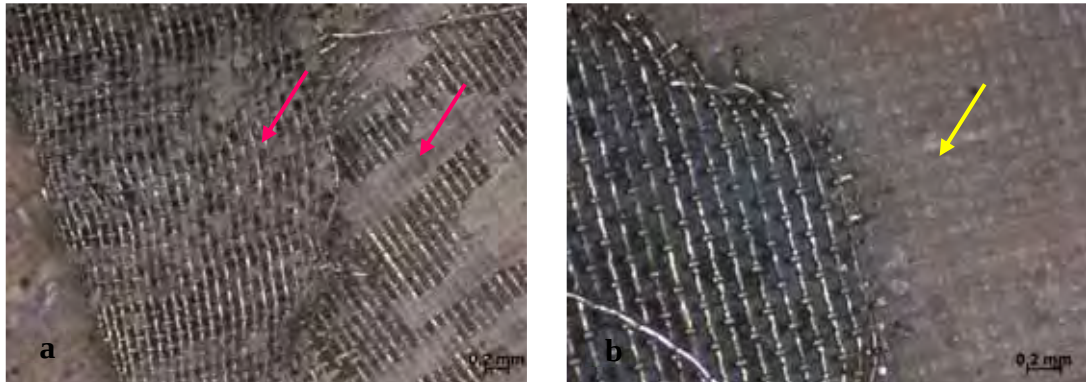


Figura 37 – Avaliação por estereoscopia do laminado híbrido após a realização do ensaio de *Lap Shear*: a) (10X); b) (20X)

A seta amarela indica as marcas deixadas pela malha no laminado. Já as setas em rosa indicam a boa penetração da malha na matriz, confirmando que o processo de soldagem foi adequado.

A Figura 38 apresenta a região transversal da amostra de PPS/fibras de vidro soldada. Assim como nas análises anteriores, os pontos brilhantes representam a inserção da malha metálica.

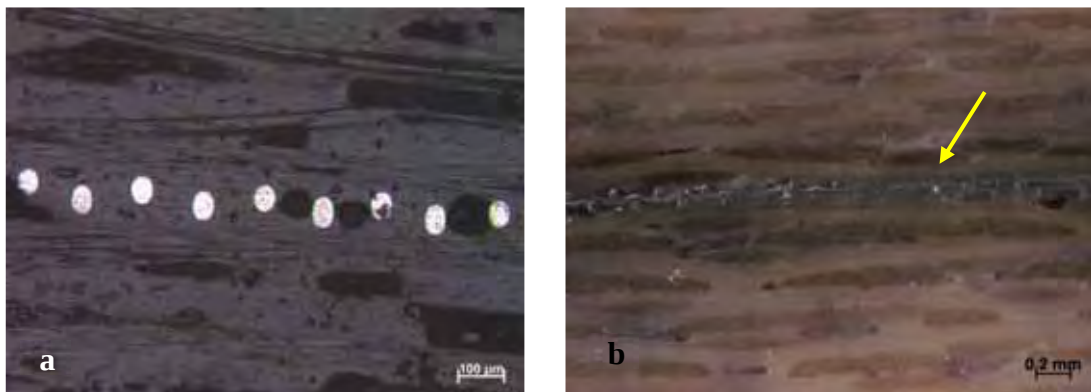


Figura 38 – Região transversal da amostra de PPS/fibras de vidro soldada:
a) microscopia óptica em campo claro (50X); b) imagem obtida por estereoscopia (10X)

A seta em amarelo indica a região da interface soldada no compósito de PPS/fibras de vidro.

A Figura 39 mostra a região superficial do PPS/fibras de vidro após a realização do ensaio de *lap shear*. Como nos casos anteriores, a partir destes resultados é possível verificar a boa impregnação da matriz sobre a malha metálica.



Figura 39 – Avaliação por estereoscopia da amostra de PPS/fibras de vidro soldada após o ensaio de *lap shear*: a) 20X; b) 10X

As setas em rosa indicam a boa ancoragem entre a malha metálica e o compósito, tanto na Figura 39a quanto na Figura 39b. A seta amarela indica as marcas deixadas pela malha metálica na superfície do corpo de prova.

Com o intuito de confirmar os resultados observados por microscopia óptica, foram também obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura. A região analisada de todas as amostras foi a superfície soldada e fraturada a partir do ensaio de *lap shear*. Para esta análise, foram utilizados os métodos BSE (elétrons retroespalhados) e VPSE (elétrons secundários sob pressão variável).

Na Figura 40 é comparada a mesma região do laminado PPS/fibras de carbono soldado, porém na Figura 40a foi utilizado o método BSE, que é sensível à distribuição de elementos químicos apresentando contraste em função de diferenças entre números atômicos, e a Figura 40b foi obtida pelo método VPSE, pois o sinal de elétrons secundários é sensível ao comportamento topográfico das superfícies.

A partir dos resultados encontrados é possível observar a boa impregnação da malha metálica pela matriz polimérica, assim como, os relevos resultantes desta interação. As regiões brancas, presentes na Figura 36a, representam a malha metálica.

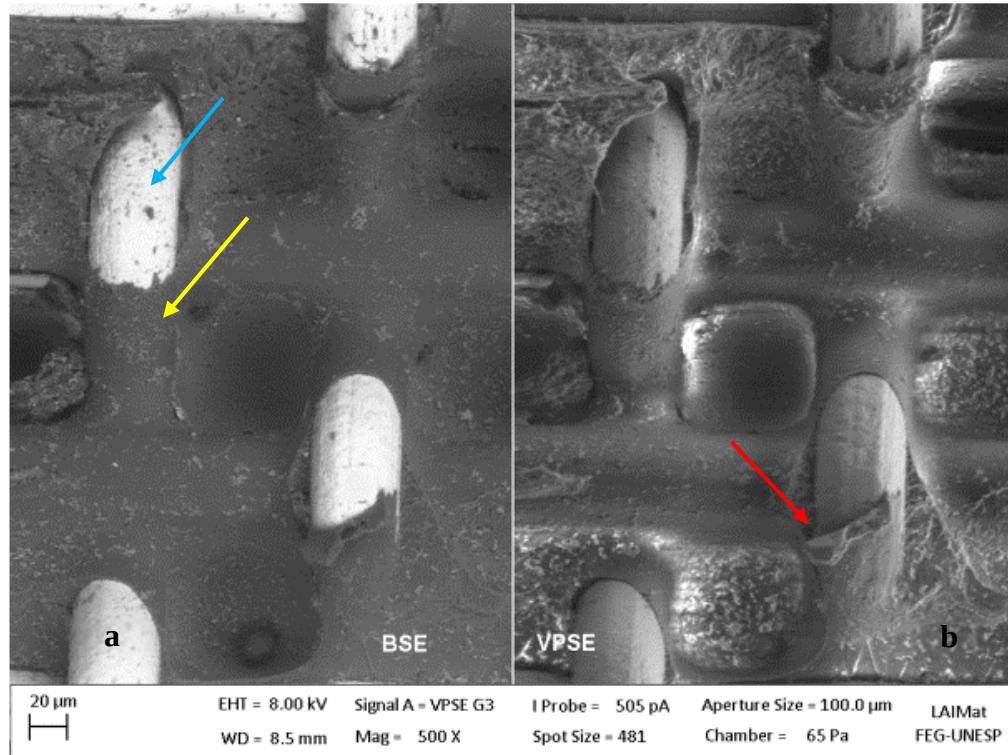


Figura 40 – Avaliação por MEV da amostra de PPS/fibras de carbono soldada após o ensaio de *lap shear*.

A seta amarela indica a boa impregnação da matriz polimérica na malha metálica, sendo que a pequena região da malha sem o polímero foi causada pela tensão do ensaio de *lap shear*. A seta vermelha indica que houve um bom molhamento entre a malha metálica e a matriz polimérica, pois o filme do polímero apresentou resistência ao ser retirado pelo ensaio. Já a seta em azul mostra a malha metálica sem a matriz polimérica.

A Figura 41 apresenta uma área da amostra do laminado híbrido soldado após este ter sido fraturado durante o ensaio de *lap shear*. Nesta análise também foram utilizados 2 métodos para obtenção das imagens, sendo estes com BSE e VPSE. Assim como foi observado para o compósito PPS/fibras de carbono, pode-se observar uma boa ancoragem da matriz polimérica na malha metálica, podendo-se concluir que os parâmetros utilizados foram adequados para o processo de soldagem.

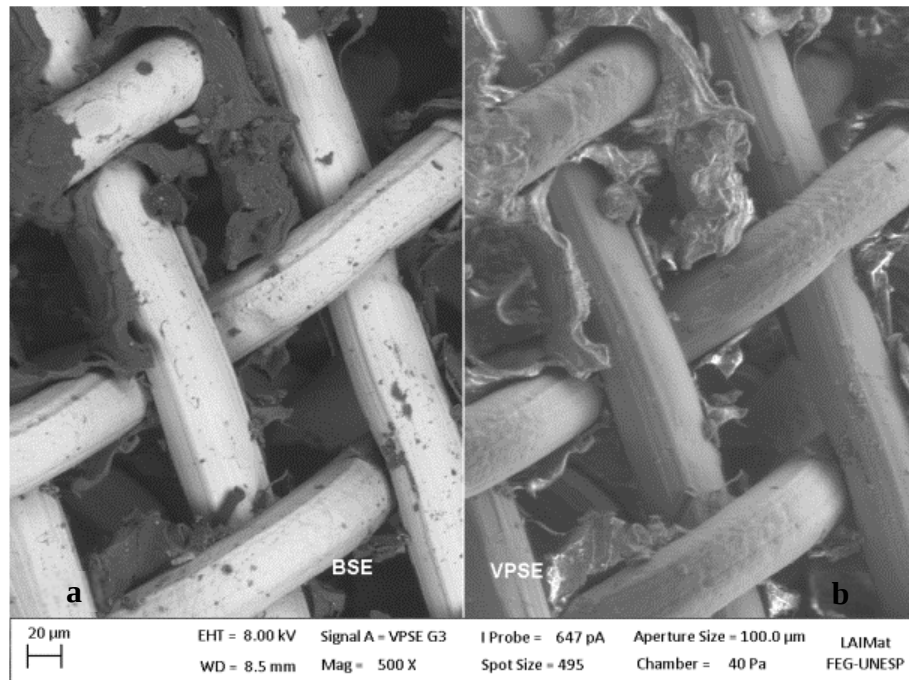


Figura 41 – Avaliação por MEV do laminado híbrido soldado após a realização do ensaio de *lap shear*.

A Figura 42 mostra outra região do laminado híbrido soldado, também após a realização do ensaio de *lap shear*. Neste caso, pode-se observar o desprendimento total da malha metálica, porém ainda com alguns resíduos da malha metálica e das fibras de vidro (estruturas alongadas). Foi utilizado o sinal de elétrons retroespalhados (BSE) para a obtenção da imagem.

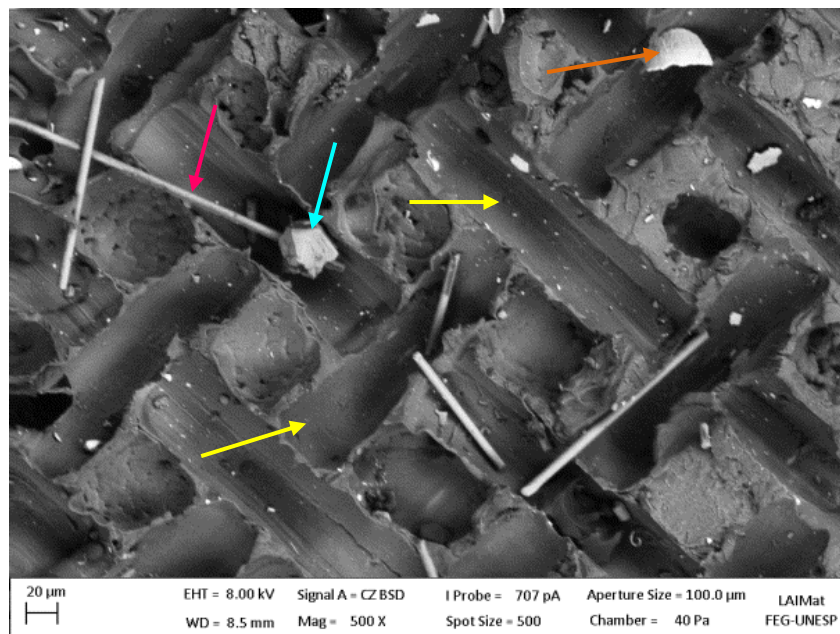


Figura 42 – Análise por MEV de outra região do laminado híbrido soldado após o ensaio de *lap shear*

A seta rosa, na Figura 42, indica os resíduos de fibras de vidro (estruturas alongadas), a seta azul refere-se a um resíduo, que pode ser proveniente da matriz polimérica ou das fibras de vidro, após o ensaio mecânico, as setas amarelas indicam a região com marcas deixadas pela malha metálica e a seta laranja aponta para um resíduo da malha metálica.

A Figura 43 apresenta as imagens referentes ao compósito PPS/fibras de vidro soldado. A Figura 43a foi obtida utilizando o método BSE, em que as áreas em branco referem-se à malha metálica, pois regiões claras apresentam maior número atômico médio. Na Figura 43b foi utilizado o método VPSE, evidenciando a topografia e, com isso, os sinais de deslocamento da matriz. Ambas as micrografias foram obtidas sobre a mesma região. Por meio destas imagens é possível verificar que houve uma boa impregnação entre a matriz polimérica e a malha metálica, com deformação da matriz.

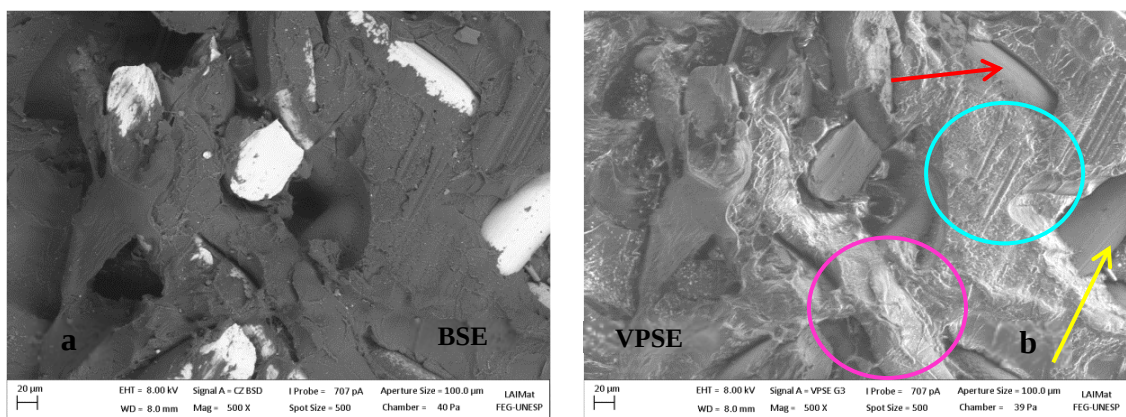


Figura 43 – Análise por MEV da amostra de PPS/fibras de vidro soldada após o ensaio de *Lap Shear*: a) BSE; b) VPSE.

A seta em amarelo, na Figura 43, indica a direção em que o ensaio de *lap shear* foi realizado, o círculo em rosa representa um bom recobrimento da malha metálica pela matriz polimérica, o círculo em azul mostra uma região cristalina e a seta vermelha indica um descolamento causado pelo efeito do ensaio, porém mostra um bom recobrimento da malha metálica pelo polímero.

4.4 Avaliação estrutural dos laminados soldados

Para a avaliação estrutural dos laminados soldados foi utilizada a técnica de microanálise por energia dispersiva realizadas no MEV. A partir destas imagens algumas

áreas são selecionadas para verificar a composição do material, e caso houvesse precipitados, qual seria a composição química destes.

Foram utilizados dois tipos de detectores: VPSE (*Variable Pressure Secondary Electron*) e BSE (*Backscattered electron*). Cada detector revela um tipo de informação da amostra, como foi descrito anteriormente, evidenciando-se a composição com o BSE e a topografia com o VPSE.

A Figura 44 apresenta o diagrama obtido a partir da análise de EDS revelando os componentes químicos da amostra de PPS/fibras de vidro. A região analisada está contida no retângulo rosa. Cada pico refere-se a um elemento químico, sendo os mais evidenciados o enxofre (S), o oxigênio (O) e o carbono (C).

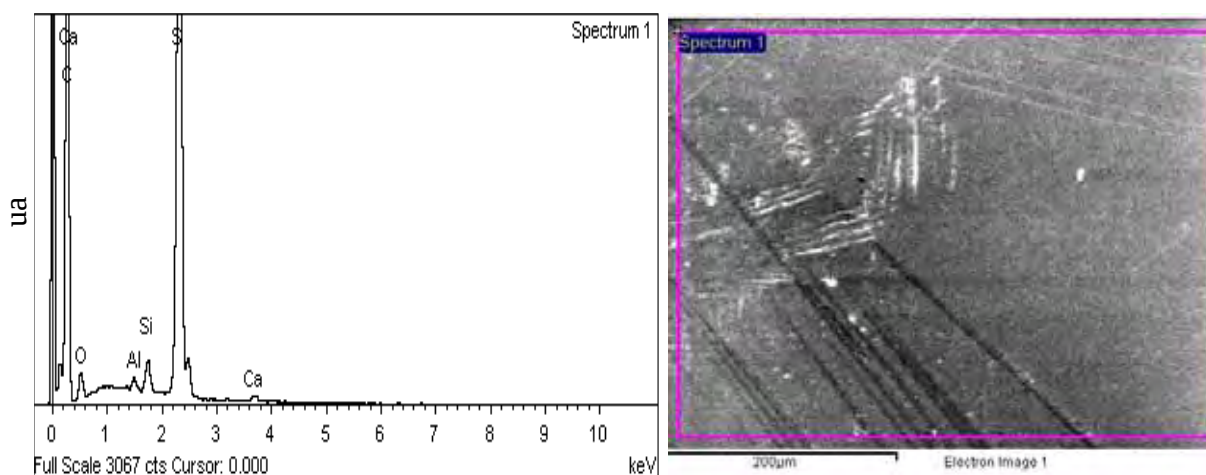


Figura 44 – Análise por EDS da superfície da amostra de PPS/fibra de vidro

Os resultados provenientes da Figura 40 encontram-se quantificados na Tabela 18, onde é possível observar os mesmos elementos encontrados para o laminado PPS/fibras de carbono. Além disso, as quantidades de cada elemento encontrado para o laminado de PPS/fibras de vidro foram próximas às encontradas para o laminado de PPS/fibras de carbono, inclusive o carbono, o que permite a conclusão de que esta análise vem sendo realizada na matriz polimérica, independentemente do reforço utilizado.

O total da porcentagem atômica não é 100%, pois foram retirados os elementos químicos que não eram significativos para a análise.

A Figura 45 mostra a região da amostra soldada de PPS/fibras de vidro. A Tabela 18 apresenta os componentes que estão no corpo de prova.

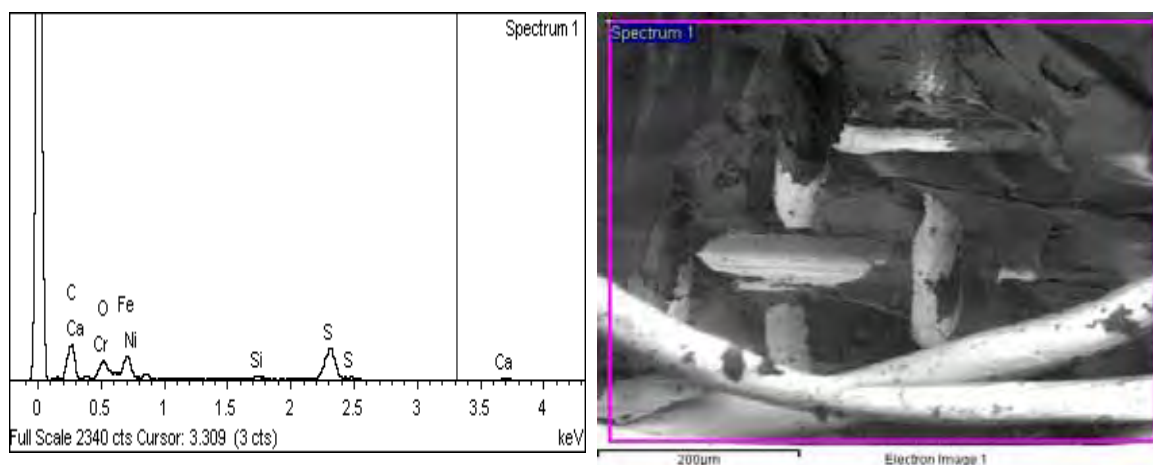


Figura 45 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de vidro

Tabela 18 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de vidro

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
Amostra sem solda		
C	7,7	86,1
O	0,4	3,0
S	2,4	10,2
Total	10,5	99,3
Amostra soldada		
C	21,5	48,2
O	6,4	10,7
S	14,8	12,4
Cr	15,3	7,9
Fe	35,6	17,2
Ni	4,2	1,9
Total	97,8	98,3

A Figura 46 mostra outra região da amostra sem solda (indicada pela seta amarela) em que foi realizada a análise dos elementos químicos de um precipitado localizado sobre a amostra de PPS/fibras de vidro. Essa região revela algumas impurezas, como o Fe e Mg, podendo estes serem considerados como contaminantes na amostra (Tabela 19).

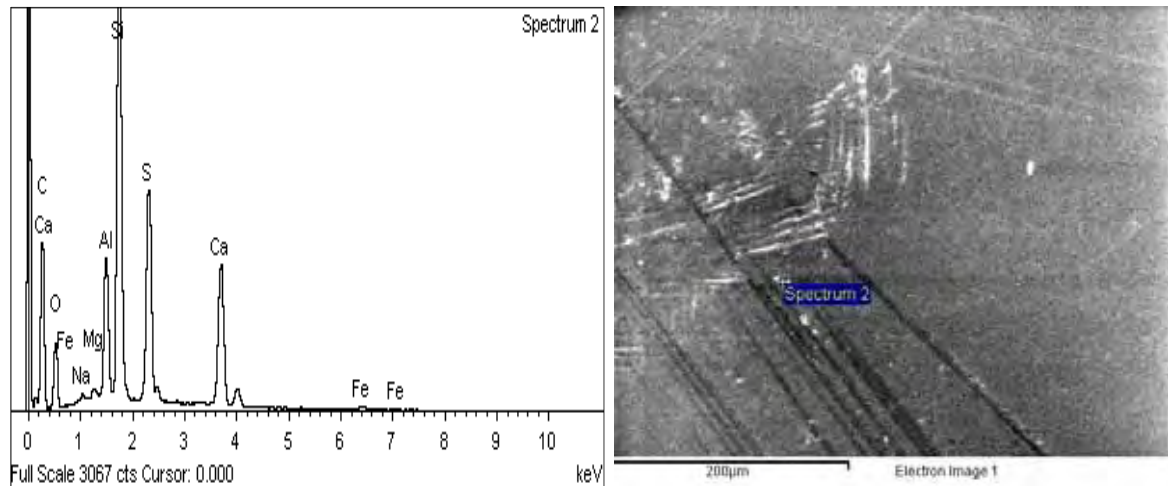


Figura 46 – Análise de EDS de um precipitado localizado na superfície da amostra não soldada de PPS/fibras de vidro

Tabela 19 - Análise do peso e porcentagem atômica de um precipitado localizado sobre a superfície sem solda do PPS/fibras de vidro

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	2,8	59,3
O	0,8	12,6
S	0,9	6,9
Total	4,5	78,8

A Figura 47 mostra a fibra de vidro, indicada pela seta amarela, na amostra de PPS/fibras de vidro após a soldagem.

Na Tabela 20 estão indicados os elementos químicos presentes.

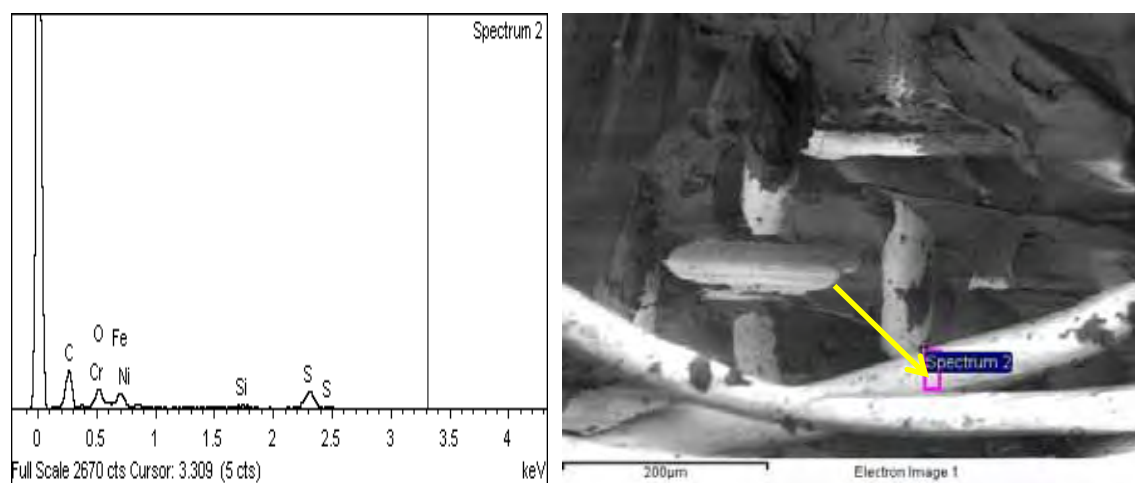


Figura 47 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de vidro

Tabela 20 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de vidro, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	29,8	56,9
O	9,6	13,8
S	11,7	8,4
Cr	9,7	4,3
Fe	32,8	13,5
Ni	5,3	2,1
Total	98,9	99,0

A Figura 48 mostra a região da matriz polimérica na amostra de PPS/fibras de vidro, porém também apresenta traços dos metais que estão presentes na malha metálica.

A Tabela 21 apresenta os elementos químicos presentes na amostra.



Figura 48 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de vidro

Tabela 21 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de vidro, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	41,6	65,3
O	8,8	10,4
S	27,7	16,3
Al	0,6	0,4
Fe	18,0	6,1
Ni	2,0	0,7
Total	98,7	99,2

A Figura 49 mostra a imagem da região analisada da amostra do compósito de PPS/fibras de carbono associada com seu diagrama EDS, com ampliação de 600X. A partir dos resultados encontrados, pode ser observado que a maior concentração deve-se à presença do enxofre (S) e do carbono (C), ambos elementos químicos presentes no PPS. A elevada porcentagem atômica do carbono é devido, também, à presença da fibra de carbono.

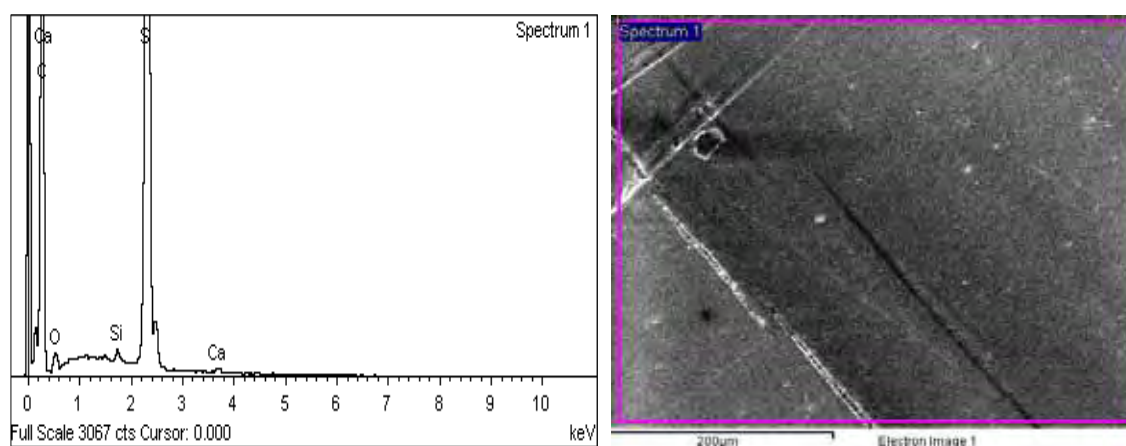


Figura 49 – Análise por EDS do compósito PPS/fibras de carbono

A Figura 50 fornece a imagem da superfície de uma amostra soldada, de PPS/fibras de carbono e o respectivo gráfico com as porcentagens dos elementos químicos contidos. A Tabela 22 fornece a porcentagem atômica e a porcentagem em peso dos elementos químicos. A porcentagem de carbono, oxigênio e enxofre são elevadas, pois são elementos constituintes da matriz polimérica. O aparecimento de metais deve-se à presença da malha metálica.

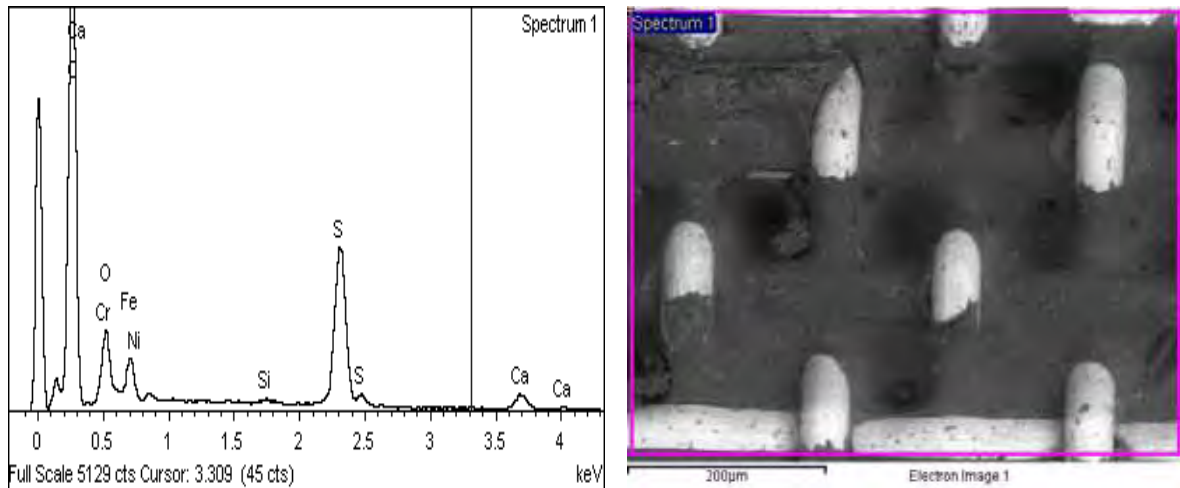


Figura 50 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono

A Tabela 22 mostra a composição química da região analisada (contida dentro do contorno rosa) da amostra de PPS/fibras de carbono, sendo considerado que toda a placa possui essa composição, com pequenas variações.

Tabela 22 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
Amostra sem solda		
C	9,2	87,3
O	0,2	1,6
S	3,1	10,9
Total	12,5	99,8
Amostra soldada		
C	48,4	73,1
O	6,9	0,2
S	16,0	9,0
Ca	3,8	1,7
Cr	8,9	3,1
Fe	14,6	4,7
Ni	1,3	0,40
Total	99,9	92,2

A presença de cálcio na amostra pode ser devido a algum produto, por exemplo, o talco, que é passado na malha metálica com o objetivo de retirar impurezas do material. O cálcio realmente está presente no material, pois o seu pico não apresenta interferência com outro elemento.

A Figura 51 mostra um precipitado (indicado pela seta amarela) na região da amostra, composto principalmente, por carbono e nitrogênio.

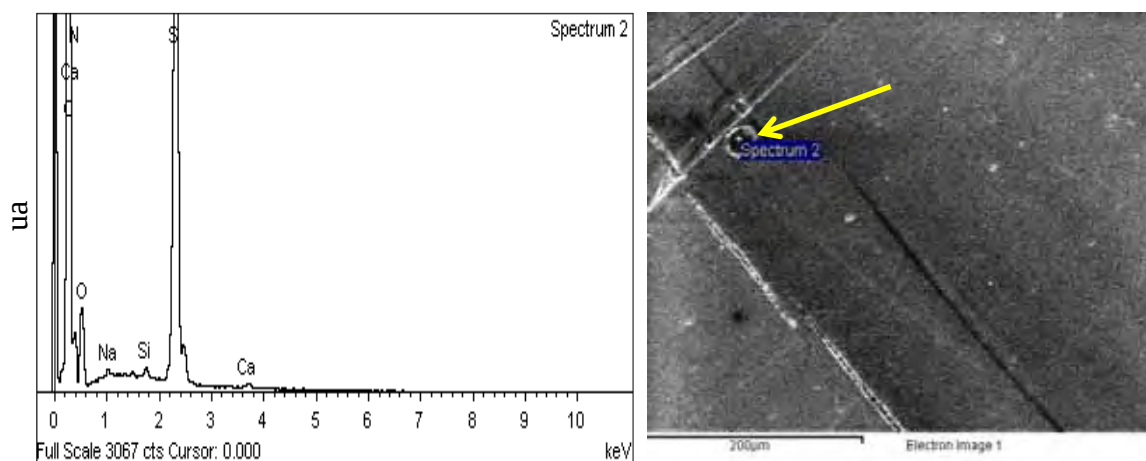


Figura 51 – Análise por EDS de um precipitado no compósito não soldado de PPS/fibras de carbono

A Tabela 23 mostra, em porcentagens, a composição química do precipitado da amostra de PPS/fibras de carbono. O total da porcentagem atômica não é 100%, pois foram retirados os elementos químicos que não eram significativos para a análise.

Tabela 23 – Análise do peso e porcentagem atômica do precipitado encontrado sobre o PPS/fibras de carbono

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	10,2	71,7
O	1,2	6,3
S	2,3	6,2
Total	13,7	84,2

A Figura 52 mostra a mesma região ilustrada na Figura 50, porém foi analisada a malha metálica, a qual está indicada por uma seta amarela.

A Tabela 24 apresenta os elementos químicos contidos nesta região.

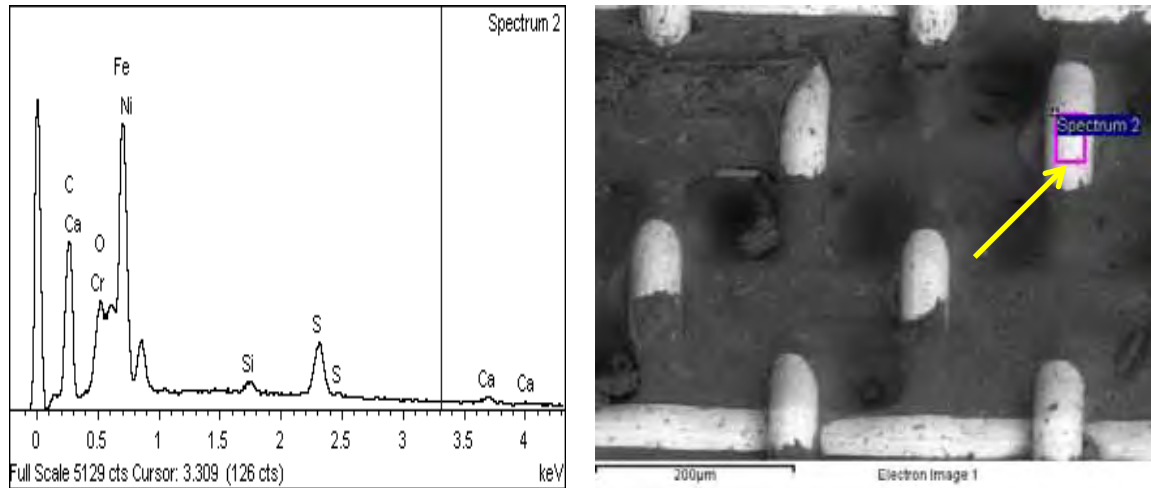


Figura 52 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono

Tabela 24 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	11,5	34,9
O	2,6	6,0
S	3,5	4,0
Si	0,4	0,5
Ca	1,0	0,9
Cr	18,0	12,7
Fe	55,3	36,2
Ni	7,6	4,7
Total	100,0	100,0

A Figura 53 apresenta outra região da superfície. Nela é mostrada que a malha metálica apresenta traços de alumínio em sua composição. A seta amarela mostra a região analisada.

A Tabela 25 apresenta as porcentagens atômica e em peso dos elementos químicos presentes.

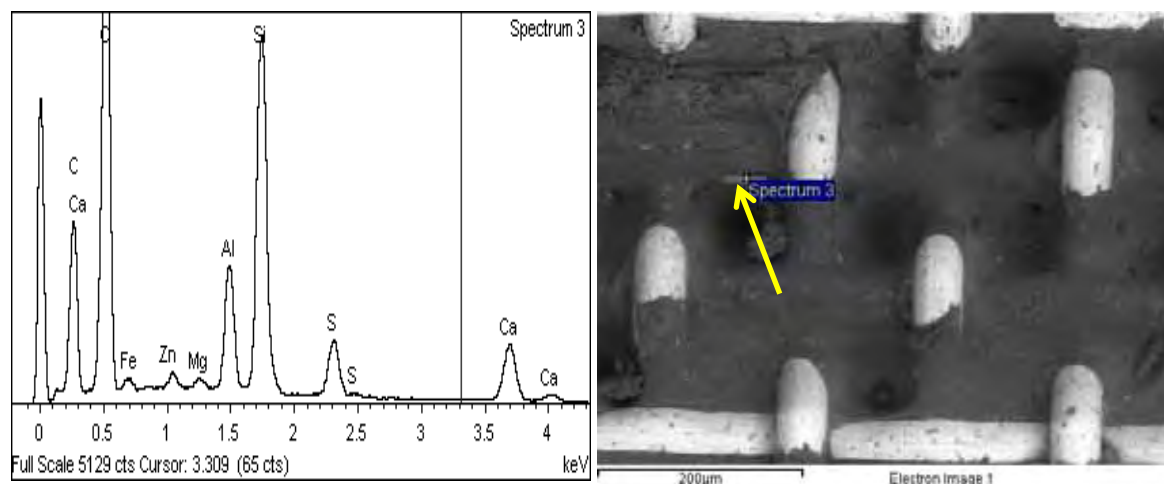


Figura 53 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono

Tabela 25 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	16,5	26,5
O	39,3	47,4
S	4,8	2,9
Si	17,4	12,0
Ca	12,6	6,1
Fe	3,8	1,3
Zn	0,5	0,1
Mg	0,4	0,3
Al	4,8	3,4
Total	100,0	100,0

A Figura 54 apresenta a região da matriz polimérica, indicada pela seta amarela.

A Tabela 26 indica os elementos químicos que estão presentes nesta região.

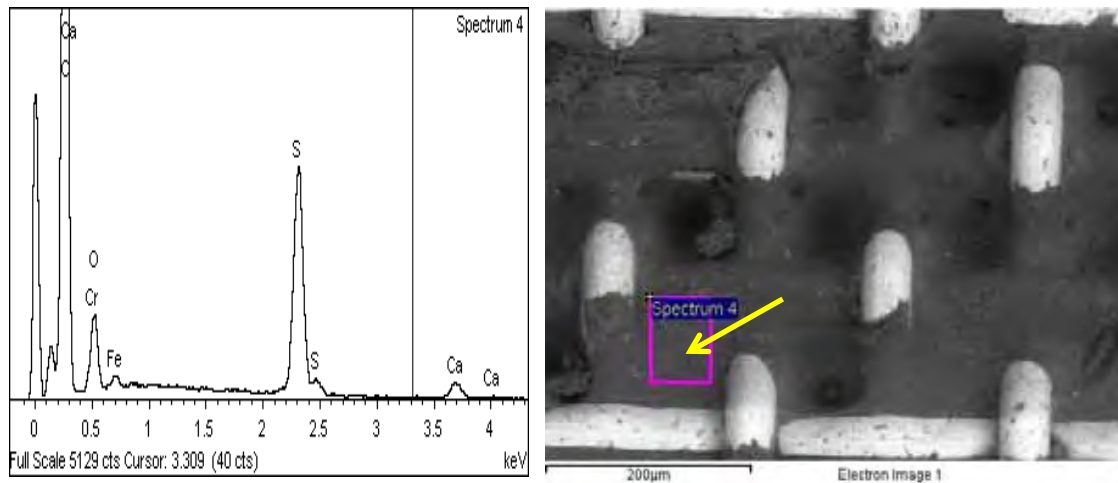


Figura 54 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada de PPS/fibras de carbono

Tabela 26 – Análise do peso e da porcentagem atômica do PPS/fibras de carbono, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	63,6	80,8
O	7,4	7,1
S	18,7	8,9
Ca	3,4	1,3
Cr	3,6	1,1
Fe	3,4	0,9
Total	100,0	100,0

A Figura 55 apresenta a região do laminado híbrido soldado. Nesta imagem é possível ver o tecido de carbono e fragmentos de fibras de vidro, presentes no material.

A Tabela 27 mostra os componentes que estão presentes.

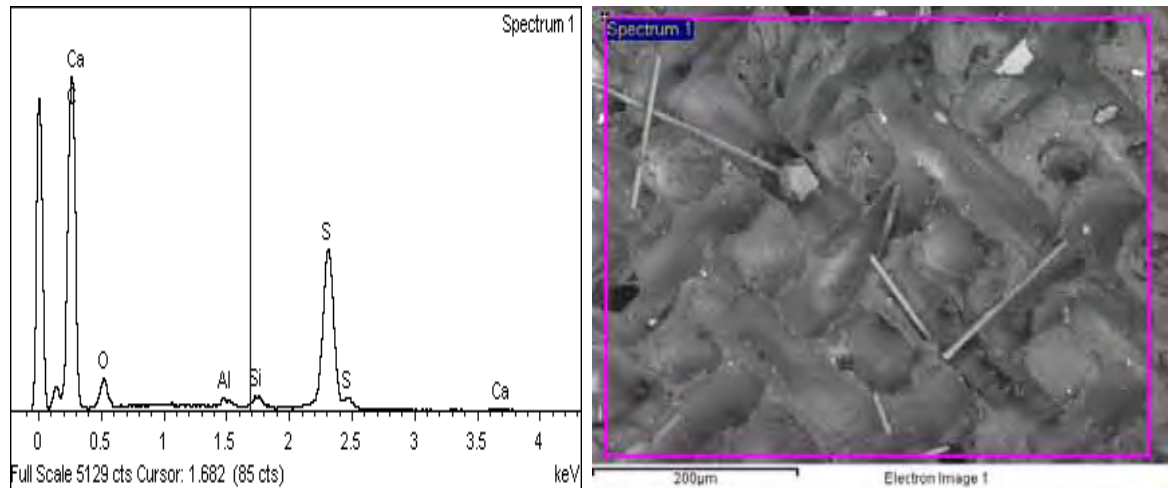


Figura 55 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido

Tabela 27 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	67,8	82,9
O	5,1	4,7
S	24,8	11,4
Si	0,9	0,5
Al	0,5	0,3
Ca	0,8	0,3
Total	100,0	100,0

A Figura 56 apresenta outra região, da mesma amostra soldada, e nela está representada a malha metálica.

A Tabela 28 confirma o material metálico presente na região.

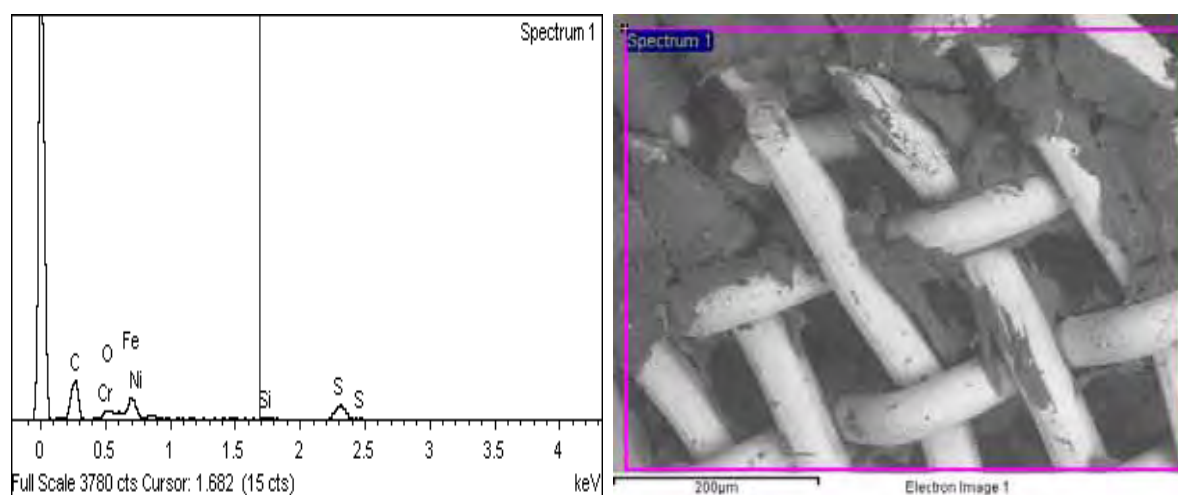


Figura 56 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido

Tabela 28 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	26,9	58,5
O	3,1	5,0
S	9,0	7,4
Si	0,4	0,4
Cr	15,2	7,6
Fe	40,7	19,0
Ni	4,8	2,1
Total	100,0	100,0

A Figura 57 mostra uma área da malha metálica impregnada com matriz polimérica. Na Tabela 29 é possível confirmar os elementos presentes do polímero nesta região.

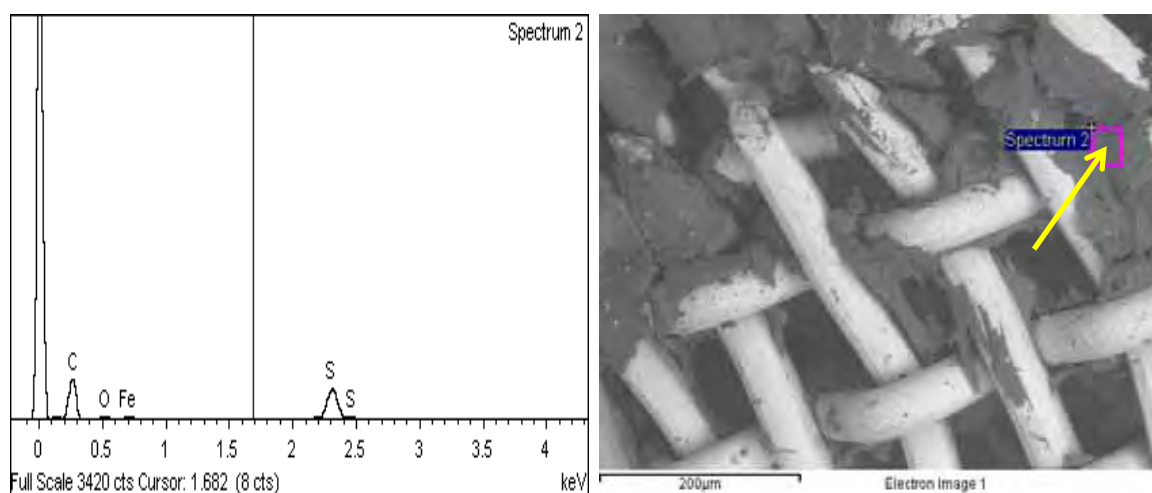


Figura 57 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido

Tabela 29 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	58,0	79,2
O	3,5	3,5
S	28,9	14,6
Fe	9,0	2,7
Ni	2,0	0,7
Total	100,0	100,0

A Figura 58 apresenta a mesma região, porém a área analisada é a malha metálica. A Tabela 30 mostra os elementos químicos presentes nesta região.

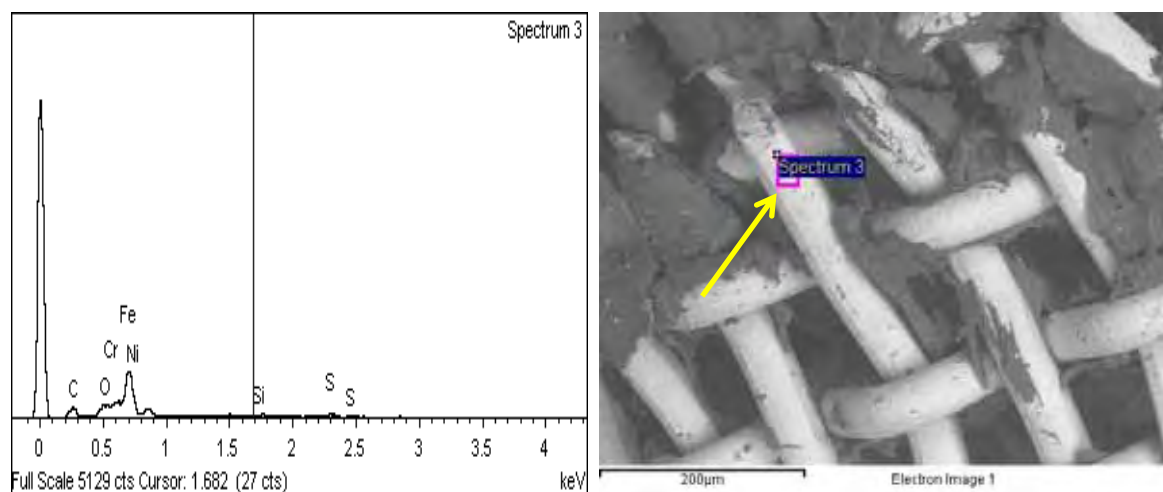


Figura 58 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido

Tabela 30 – Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	4,7	17,7
O	2,0	5,6
S	1,2	1,7
Si	0,5	0,8
Cr	18,1	15,6
Fe	63,5	51,0
Ni	9,9	7,6
Total	100,0	100,0

A Figura 59 mostra um fio da malha metálica recoberto pela matriz polimérica. Pela Tabela 31 é possível confirmar a presença de ambos no material.

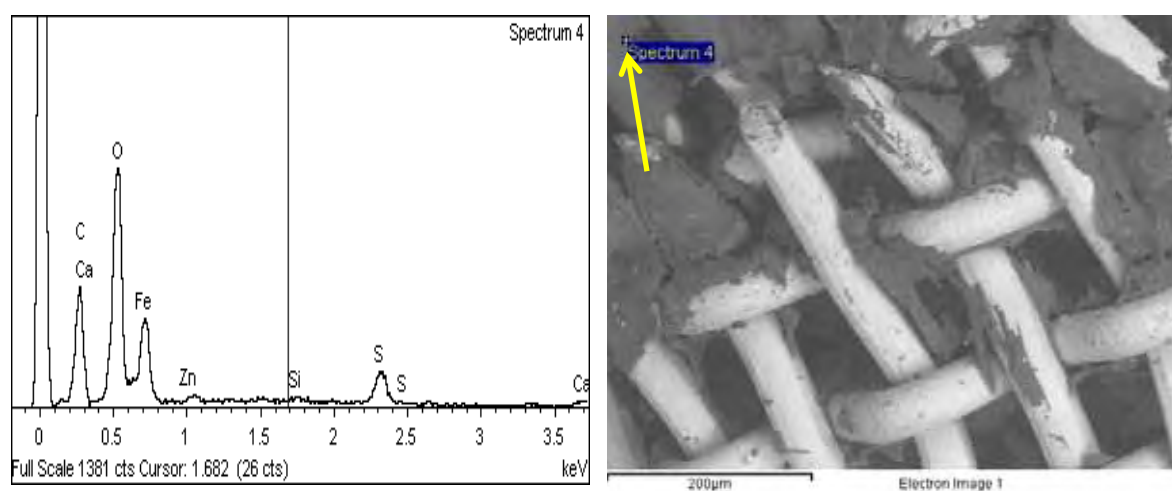


Figura 59 – Análise de EDS da superfície da amostra soldada do laminado híbrido

Tabela 31– Análise do peso e da porcentagem atômica do laminado híbrido, após a soldagem

Elemento	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C	18,3	35,1
O	28,3	40,8
S	5,4	3,9
Si	0,4	0,4
Ca	2,1	1,2
Fe	44,8	18,5
Zn	0,7	0,3
Total	100,0	100,0

Não é possível confirmar se houve a oxidação dos compósitos após a soldagem, pois a porcentagem de oxigênio presente, tanto em amostras soldadas quanto não soldadas, apresentam variações significativas, mesmo considerando igual área analisada.

4.5 Avaliação das propriedades mecânicas

4.5.1 Vibração por impulso

A Tabela 32 apresenta os resultados provenientes do módulo elástico obtido para as amostras de PPS/fibras de carbono, PPS/fibras de vidro e laminado/híbrido, soldados e não soldados. A pequena variação no desvio padrão comprova a homogeneidade do material analisado.

Conforme apresentado na Tabela 32, é possível verificar que a faixa de valores do módulo elástico para os três materiais, sem solda, está entre 40 e 70 GPa. Os valores para o módulo elástico somente para a fibra de vidro e para a fibra de carbono são 72,5 GPa e 230,0 GPa, respectivamente (CALLISTER, 2008), e levando-se em consideração que a matriz termoplástica possui um valor menor de módulo elástico (125 MPa) (ANEXO A) e os reforços estão impregnados no polímero, faz com que o valor do módulo de elasticidade diminua, e assim os resultados obtidos estão de acordo com a literatura.

Para os compósitos soldados, a faixa de valores para o módulo elástico fica entre, aproximadamente, 10 a 40 GPa, ou seja, os valores do módulo elástico diminuíram com a soldagem, podendo-se afirmar que o material apresentou uma boa ancoragem entre as placas

que foram soldadas, pois apresentou um baixo valor de módulo elástico, ou seja, tornou-se mais rígido e menos flexível em relação ao ensaio.

Tabela 32 - Resultados provenientes da análise de vibração

Amostra	Módulo Elástico (E) (GPa)	Desvio Padrão
PPS/fibras de carbono	67,76	2,86
PPS/fibras de carbono soldado	15,37	0,95
PPS/fibras de vidro	43,78	0,68
PPS/fibras de vidro soldado	29,11	1,52
Laminado híbrido	58,84	2,03
Laminado híbrido soldado	33,69	0,35

4.6 Avaliação das propriedades térmicas

Com o objetivo de se avaliar a influência do processo de soldagem na temperatura de transição vítrea das amostras estudadas foram realizadas as análises por DMA e TMA. Assim, a determinação da T_g é importante na especificação da temperatura de trabalho do material, ou seja, estabelecer em quais temperaturas o material pode atuar de forma segura, sem que suas características físico-químicas e mecânicas mudem significativamente, ao passar pela temperatura de transição vítrea. Nesse caso, algumas aplicações aeronáuticas exigem que o material trabalhe com uma margem de segurança a partir da transição vítrea do material (ORTIZ, 2008). Em se tratando da determinação da temperatura de transição vítrea por DMA, o material está sujeito a três formas de determinação, sendo estas: *onset* do módulo de armazenamento (E'), pico no módulo de perda (E'') e pico no módulo $\tan \delta$. Especificamente para compósitos termoplásticos, é importante o estabelecimento da T_g para ser definido a região de trabalho de um determinado componente. Neste caso, a temperatura de trabalho para compósitos termoplástico é definida com base em suas temperaturas de transição vítrea, degradação e fusão/amolecimento associadas (ORTIZ, 2008).

As Figuras 60 e 61 apresentam os resultados provenientes de DMA para as amostras de PPS/fibras de carbono sem solda e com solda, respectivamente. A soldagem não influenciou significativamente a T_g do compósito em questão, pois as temperaturas de transição vítrea ficaram muito próximas, antes e após a soldagem.

As Figuras 62 e 63 referem-se ao laminado híbrido não soldado e soldado. A temperatura de transição vítrea também não apresentou variação significativa após a soldagem em relação à amostra sem solda.

As Figuras 64 e 65 referem-se ao laminado PPS/fibras de vidro não soldado e soldado, respectivamente. Assim como observado para o laminado de PPS/fibras de carbono, as temperaturas de transição vítrea observadas para o laminado de PPS/fibras de vidro soldado e não soldado, também não apresentaram variações significativas, ou seja, a variação da temperatura durante o processo de soldagem, resultando na fusão e posterior recristalização da matriz polimérica não influenciou na estruturação de cadeias poliméricas, que se traduz em maior interação entre cadeias poliméricas, logo aumento e/ou diminuição do volume livre.

Nos resultados de DMA, obtidos tanto para os compósitos soldados quanto para os não soldados, pode ser observado que para o compósito PPS/fibras de carbono soldado quando comparado ao mesmo compósito não soldado, a temperatura de transição vítrea apresentou um grau de diferença, quando comparada pelo modo de armazenamento (E') e aproximadamente dois graus de diferença em relação ao módulo de perda (E''). Já o laminado híbrido soldado, em relação ao laminado híbrido sem solda, apresentou maior diferença no módulo de perda ($3,6^{\circ}\text{C}$) que pelo módulo de armazenamento (2°C). O compósito PPS/fibras de vidro soldado, ao ser comparado com o PPS/fibras de vidro sem solda, apresentou uma diferença de quase dois graus, em relação ao módulo de armazenamento e aproximadamente três graus em relação ao módulo de perda. Essa maior diferença apresentada pelo compósito soldado PPS/fibras de vidro e no laminado híbrido no módulo de perda pode ser devido à presença da fibra de vidro, pois ela contém mais elementos que a fibra de carbono, e desse modo mais interações podem ocorrer na amostra soldada.

As diferenças existentes entre os módulos de armazenamento e perda, para a temperatura de transição vítrea, podem ser atribuídas às mudanças estruturais durante o processo de soldagem, por exemplo, como o aumento da cristalinidade, ou a presença de poros, ou pela boa adesão entre as partes da amostra, devido à boa condição de soldagem. Porém, estas mudanças estruturais podem ter sido causadas devido à presença da malha metálica no interior da amostra soldada, atuando como elemento contaminante, a qual pode dificultar a relaxação das cadeias poliméricas na matriz que estão próximas à malha metálica ou pelo próprio aumento na espessura do material, depois de soldado.

A Tabela 33 apresenta os resultados de temperatura de transição vítrea para os compósitos estudados, soldados e não soldados, obtidos pelo DMA.

Tabela 33 – Resultados de DMA para as amostras analisadas

amostra	Tg por E' (°C)	Tg por E'' (°C)	Tg por tan δ (°C)
PPS/fibras de carbono	80,7	103,1	105,2
PPS/fibras de carbono soldado	79,7	100,9	105,0
Laminado híbrido	81,6	101,7	105,7
Laminado híbrido soldado	79,6	98,1	102,2
PPS/fibras de vidro	76,0	92,5	100,3
PPS/fibras de vidro soldado	77,8	95,3	105,4

Nota-se que os resultados obtidos para a temperatura de transição vítrea (Tg), por meio dos módulos E', E'' e tan δ não possuem variação significativa, quando compara-se o mesmo laminado, soldado e não soldado, desse modo a soldagem não afetou a Tg.

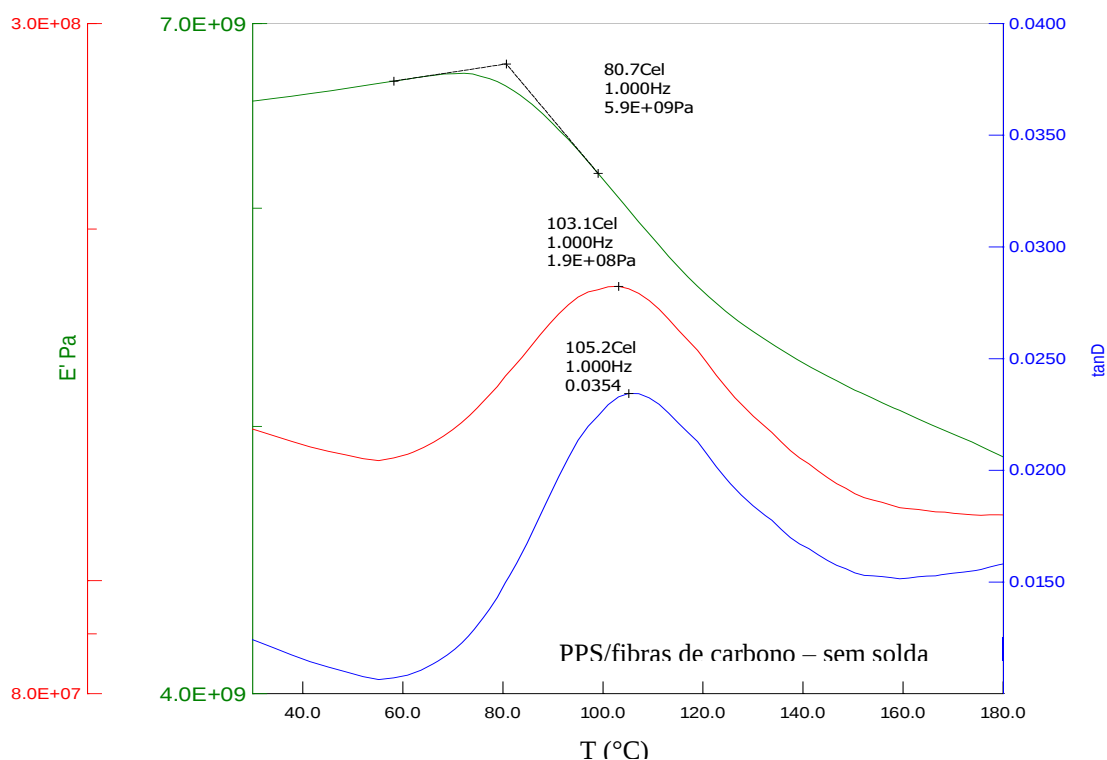


Figura 60 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de carbono sem solda

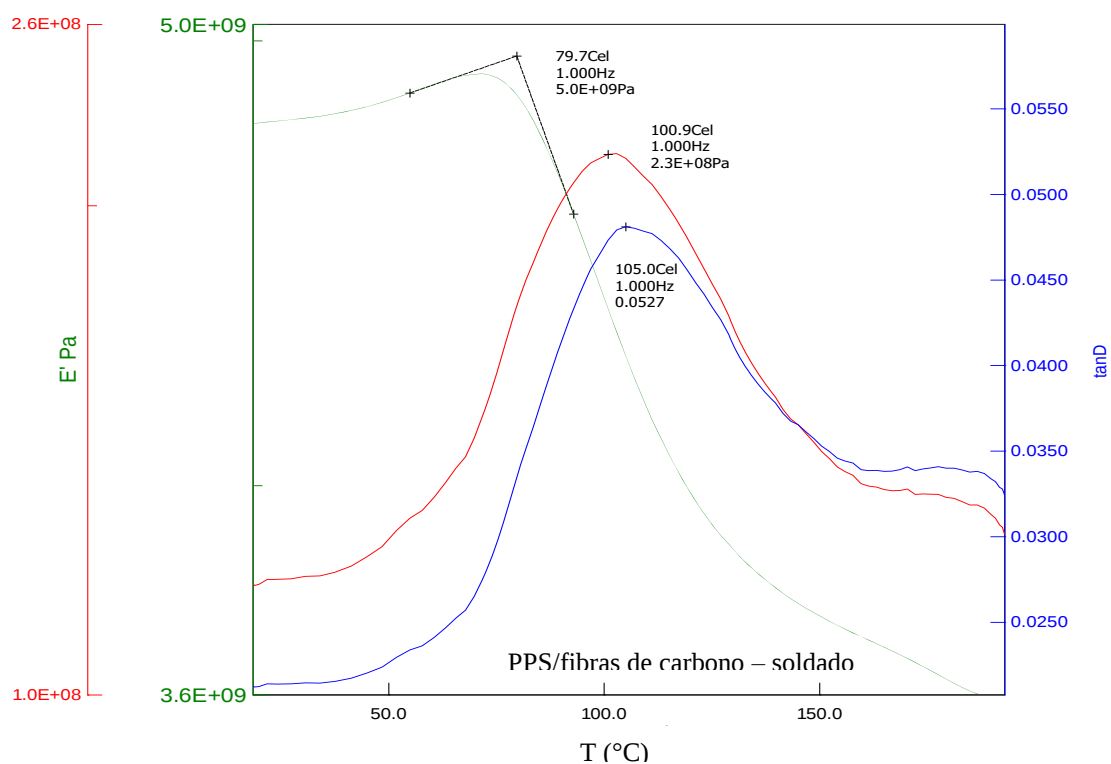


Figura 61 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de carbono soldado

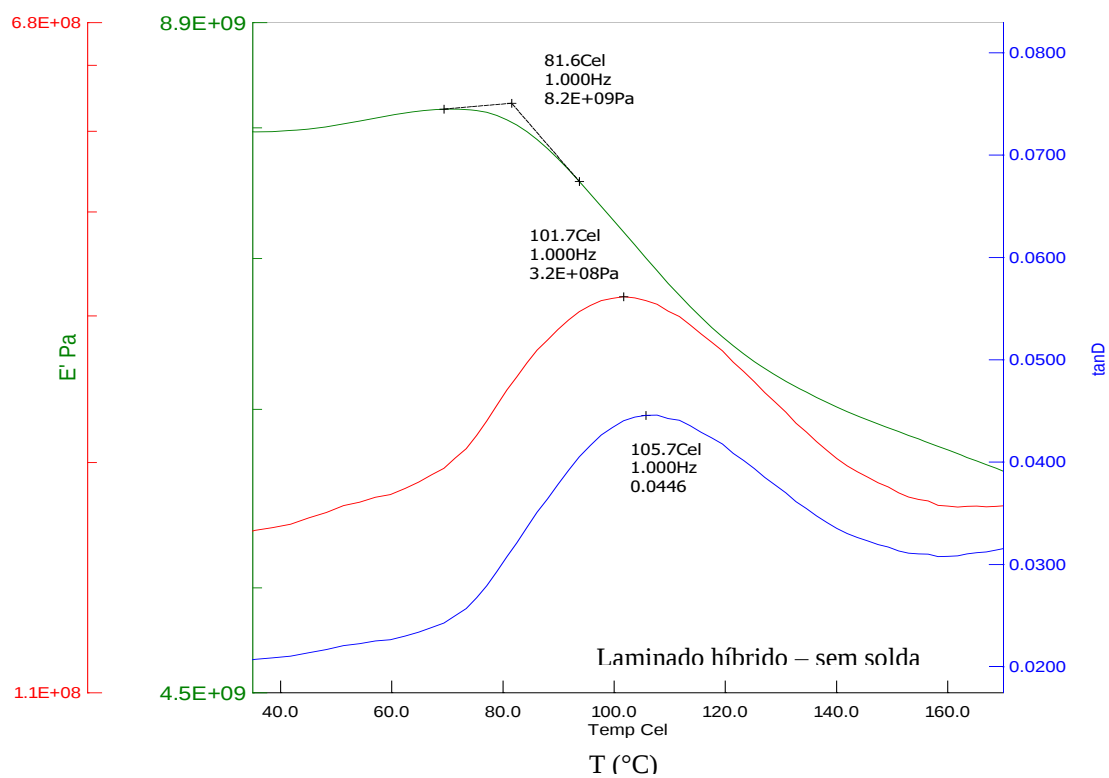


Figura 62 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito laminado híbrido sem solda

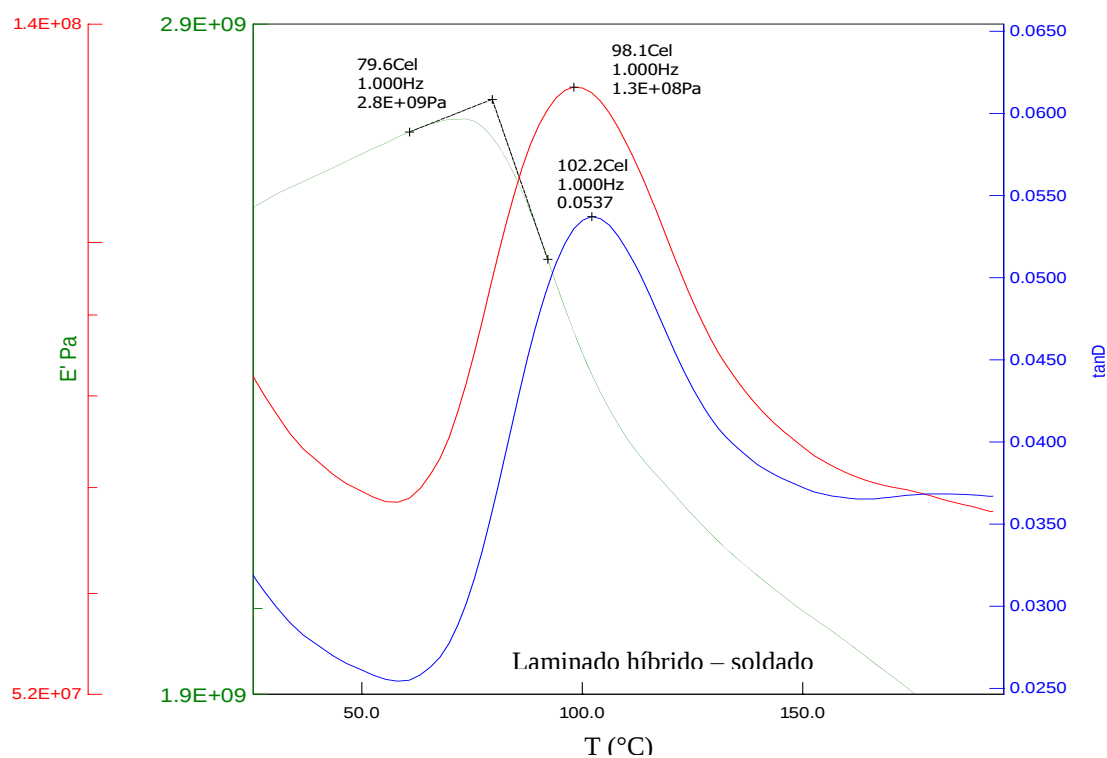


Figura 63 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito laminado híbrido soldado

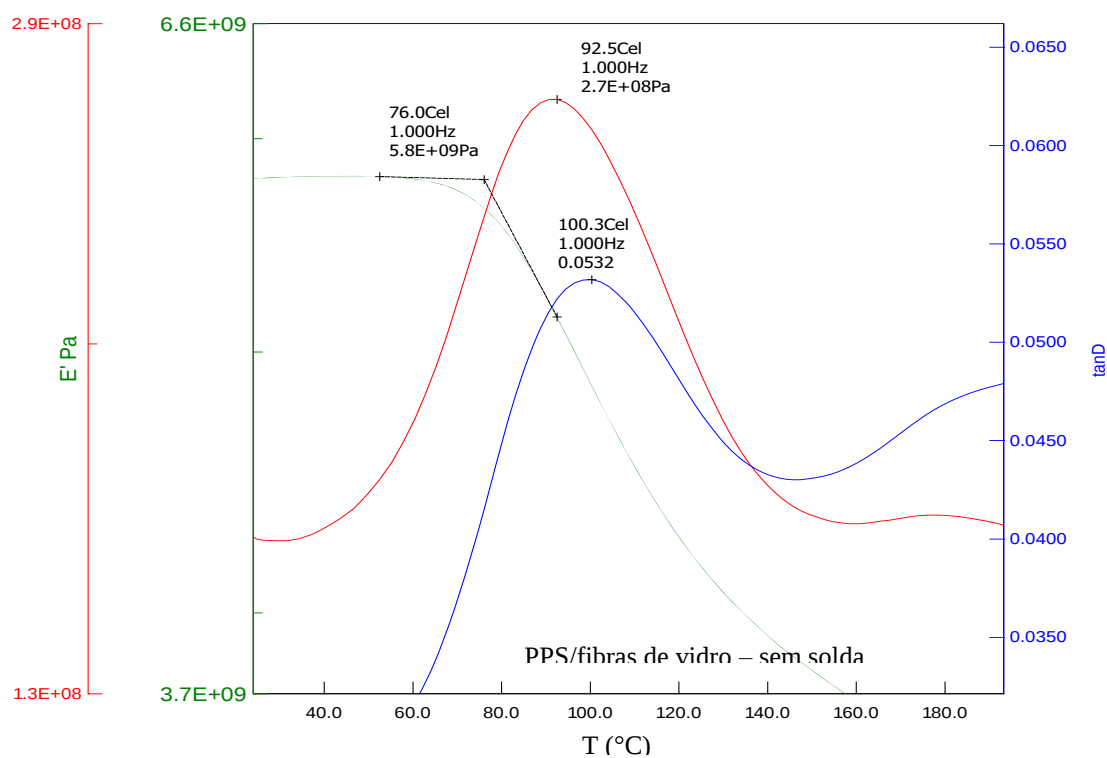


Figura 64 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de vidro sem solda

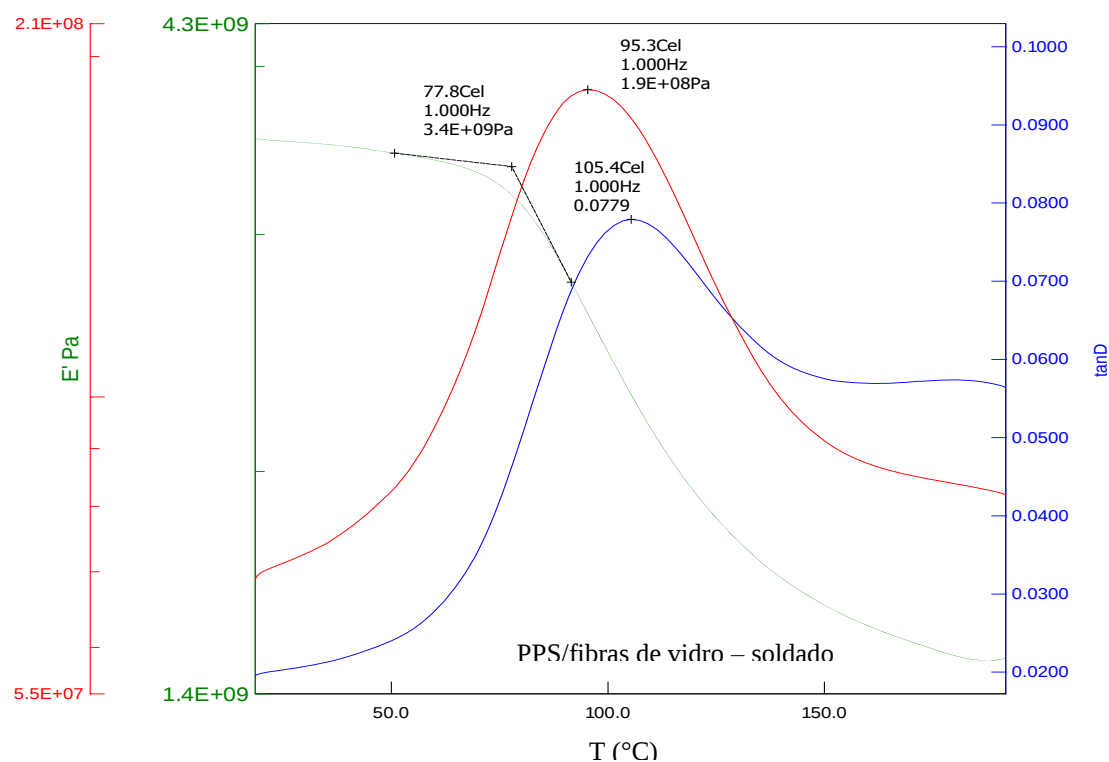


Figura 65 – Resultados provenientes das análises de DMA do compósito PPS/fibras de vidro soldado

As Figuras 66, 67 e 68 apresentam os resultados de TMA para as amostras não soldadas de PPS/fibras de carbono, laminado híbrido e PPS/fibras de vidro, respectivamente. Já as Figuras 69, 70 e 71 apresentam os gráficos de TMA para os laminados PPS/fibras de carbono, laminado híbrido e PPS/fibras de vidro soldados, respectivamente.

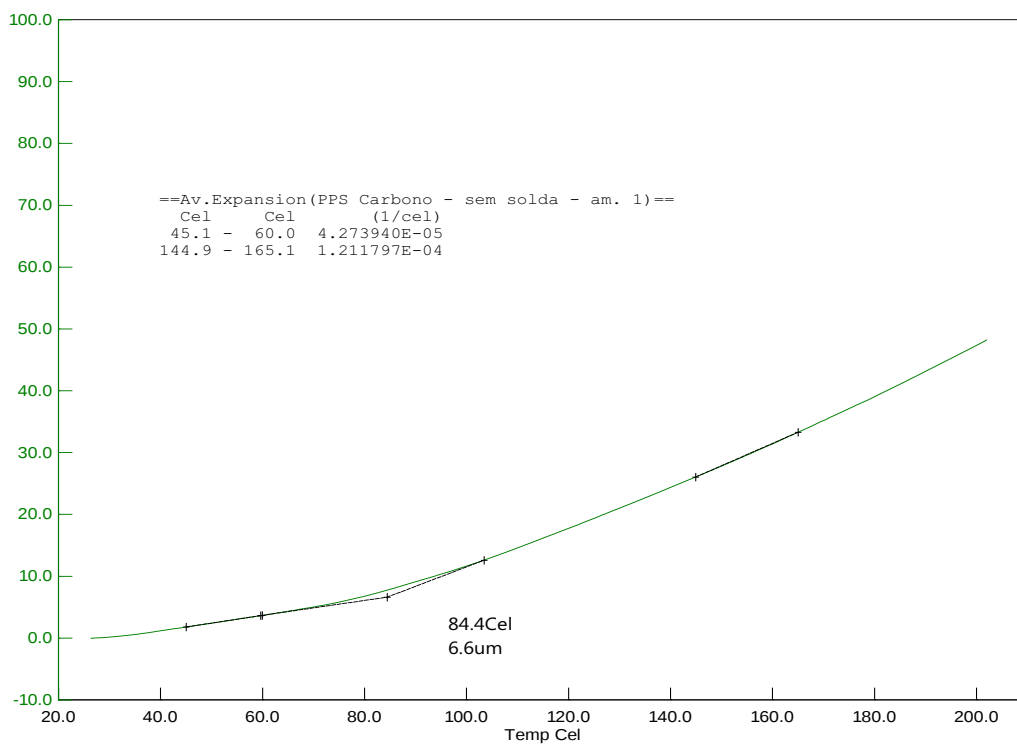


Figura 66 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de carbono – sem solda

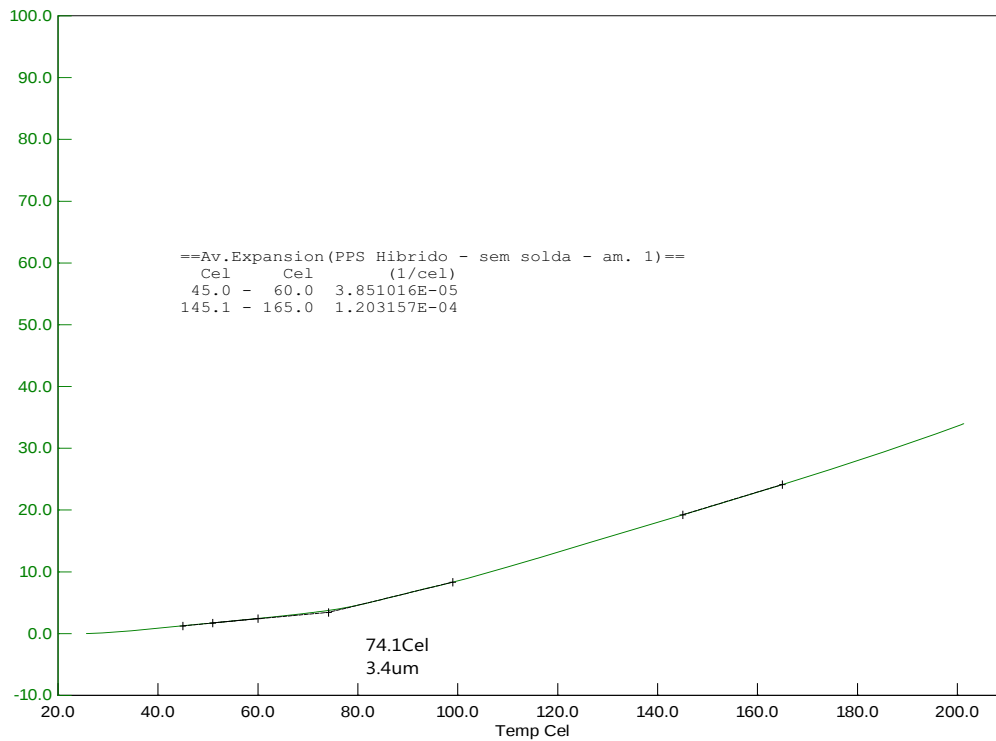


Figura 67 – Resultados de TMA para o laminado PPS/híbrido – sem solda

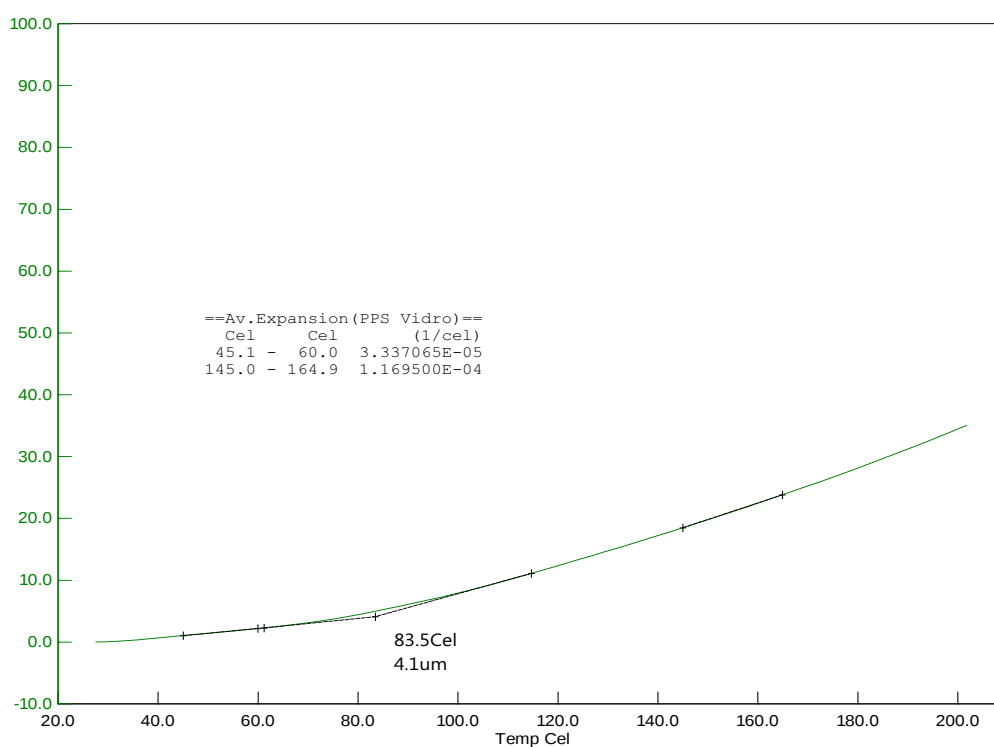


Figura 68 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de vidro – sem solda

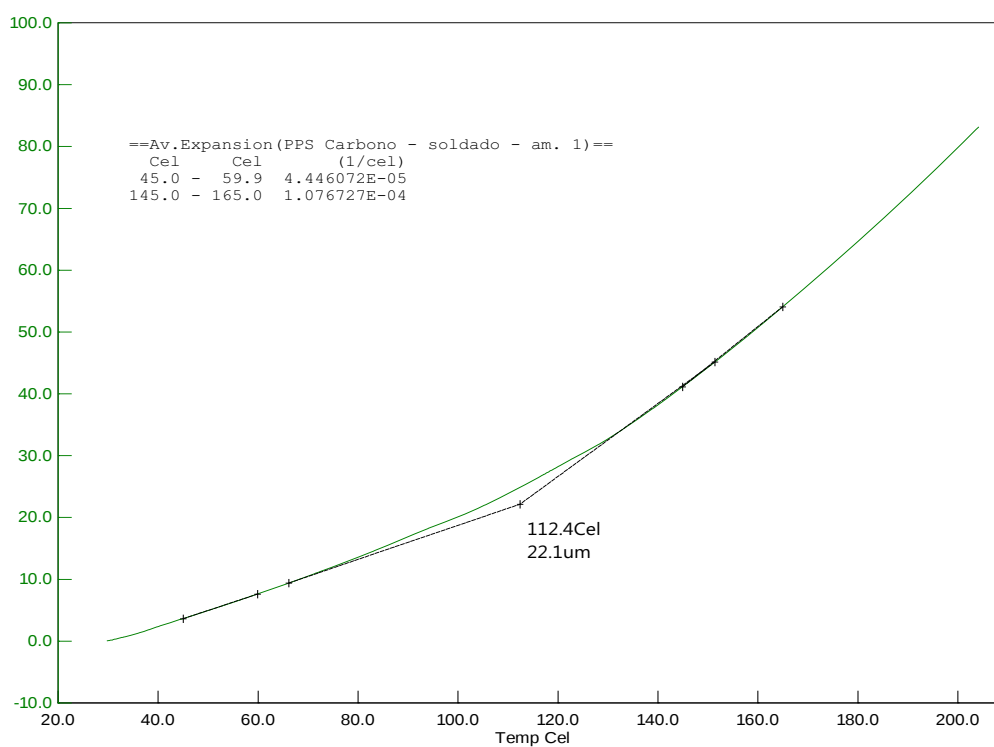


Figura 69 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de carbono – soldado

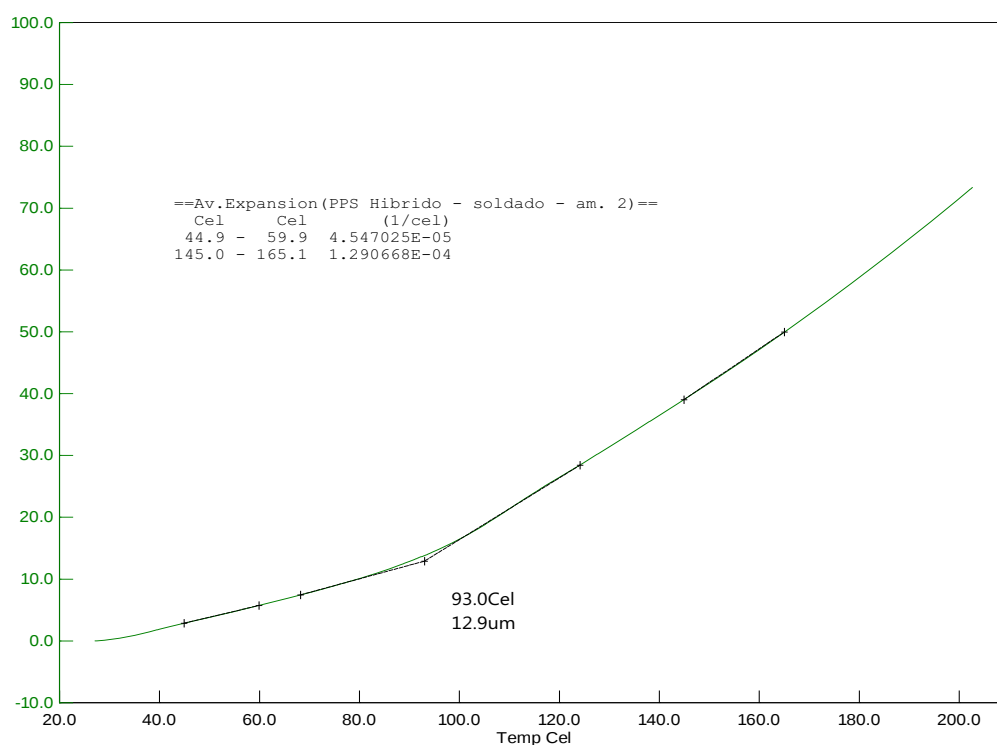


Figura 70 – Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de híbrido – soldado

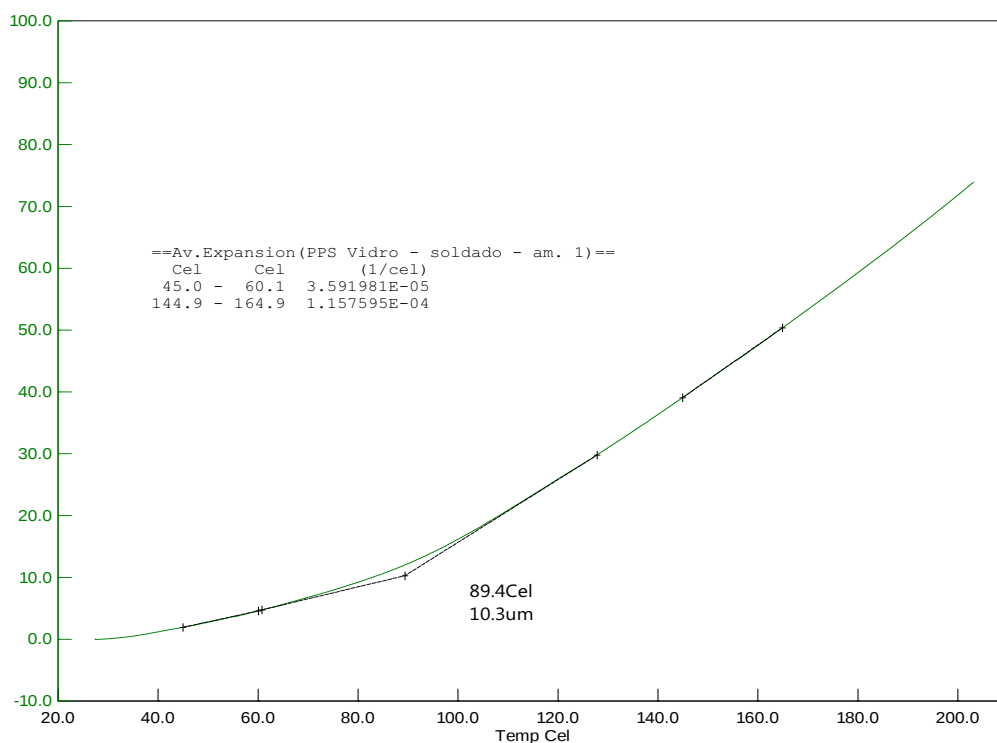


Figura 71 - Resultados de TMA para o laminado PPS/fibras de vidro – soldado

A partir dos resultados provenientes da análise de TMA, pode ser concluído que a temperatura de transição vítrea encontrada por esta metodologia encontra-se próxima ao resultado encontrado quando da avaliação desta propriedade por DMA, utilizando a faixa de valores observados para o E' . Apenas a T_g do laminado PPS/fibras de carbono soldado, obtida a partir da análise por TMA, apresentou seu valor mais próximo da T_g por $\tan \delta$ observado a partir do DMA.

A Tabela 34 apresenta os valores de T_g obtidos por TMA para as amostras soldadas e não soldadas, comparando com as temperaturas de transição vítrea obtidas por DMA.

Tabela 34 – Resultados de TMA para as amostras analisadas

amostra	T_g (°C) TMA	T_g por E' (°C) - DMA	T_g por E'' (°C) - DMA	T_g por $\tan \delta$ (°C) - DMA
PPS/fibras de carbono	84,4	80,7	103,1	105,2
PPS/fibras de carbono soldado	112,4	79,7	100,9	105,0
laminado híbrido	74,1	81,6	101,7	105,7
Laminado híbrido soldado	93,0	79,6	98,1	102,2
PPS/fibras de vidro	83,5	76,0	92,5	100,3
PPS/fibras de vidro soldado	89,4	77,8	95,3	105,4

As três últimas colunas da Tabela 34 apresentam as temperaturas de transição vítrea obtidas pelo DMA, para que os valores sejam comparados com os de TMA. A comparação dos dados não mostra variações significativas na temperatura de transição vítrea entre os materiais soldados e não soldados, quando avaliados por DMA, o que era de se esperar uma vez que o processo de soldagem foi realizado de forma satisfatória, não ocorrendo mudanças estruturais significativas na matriz polimérica, porém, ocorreram variações de até 30% quando avaliados os valores de TMA. Isto mostra que a análise de DMA é mais clássica para avaliar esta propriedade em relação à análise por TMA, porém a análise por TMA sugere uma mudança morfológica relacionada à cristalinidade, pois a temperatura de transição vítrea apresenta um aumento no seu valor no laminado soldado, ao ser comparado o mesmo laminado sem solda. A maior diferença de temperatura de transição vítrea, no TMA, ocorre no PPS/fibras de carbono (28°C), e diminui no laminado híbrido (18,9°C), sendo a menor diferença encontrada para o PPS/fibras de vidro (5,9°C), desse modo, é possível verificar que quanto maior a diferença na temperatura de transição vítrea, maior é a presença da fibra de

carbono, e assim este elemento interfere nesta característica, após a soldagem neste estudo, levando em consideração os parâmetros de soldagem estudados.

Este mesmo comportamento (diminuição do valor da temperatura de transição vítrea) foi confirmado pelo ensaio de DSC nas amostras não soldadas, pois no segundo aquecimento (o qual é utilizado para a retirada dos dados, pois o primeiro aquecimento é feito para apagar o histórico térmico da amostra) houve uma diminuição nos valores desta característica, tanto na cristalização quanto na transição vítrea (vide Tabela 5).

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

A análise global dos resultados obtidos por intermédio deste trabalho permite concluir que:

- O processo de soldagem por resistência elétrica pode ser utilizado com sucesso a partir das condições de processamento utilizadas nesta dissertação. Também, a partir dos resultados morfológicos encontrados, pode ser concluído que a adesão da malha metálica nas camadas soldadas é satisfatória dentro do espaço amostral em estudo, não havendo descontinuidades ou delaminações na interface.

- As melhores condições para a realização do processo de soldagem por resistência elétrica para os compósitos estudados, avaliadas a partir do ensaio de *Lap Shear* associado com um adequado planejamento de experimentos, considerando a corrente elétrica, pressão e tempo de soldagem, respectivamente foram: PPS/fibras de carbono: 37A; 3MPa; 50s; PPS/fibras de vidro: 32A; 1,85 MPa; 175s e laminado híbrido: 38,5A; 3 MPa; 50s. Nota-se que os laminados PPS/fibras de carbono e o híbrido possuem combinações semelhantes, uma vez que o laminado híbrido possui, internamente, a mesma composição que o PPS/fibras de carbono. Devido a isto, as combinações possuem valores aproximados de corrente, e iguais para a pressão e o tempo para os sistemas avaliados.

- A partir dos resultados provenientes das análises de EDS, pode ser concluído que durante o processo de soldagem não foi alterada a estrutura da matriz polimérica, proveniente da fusão e recristalização desta. Uma vez que praticamente a composição química da matriz não sofreu nenhuma alteração, este processo de integração não resultou em degradação polimérica do PPS.

- Os resultados provenientes do ensaio de vibração mostraram que embora o processo de soldagem tenha sido realizado em sua condição de melhor rendimento, menores valores quanto aos módulos de elasticidade foram encontrados, quando comparados os valores encontrados para amostras não soldadas e soldadas. Esta diminuição de valores era esperada, uma vez que as amostras foram soldadas com malha metálica e, portanto, sendo este o elemento contaminante em sua estrutura.

Quando comparada a temperatura de transição vítrea obtida dos materiais soldados com os não soldados (análises por DMA e TMA) foi observado que esta não foi alterada de forma significativa, uma vez que apenas uma pequena variação neste valor foi observado para o material soldado. Desta forma, pode ser concluído que o processo de soldagem não induziu mudanças significativas na estrutura da matriz polimérica.

5.2 Trabalhos Futuros

Sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliação a partir de ensaios de Iosipescu e por mecânica da fratura de amostras de PPS/fibras contínuas soldadas;
- Estudo dos mecanismos de corrosão existentes na interface das amostras soldadas de PPS/fibras de carbono;
- Avaliação do condicionamento ambiental nas amostras soldadas a partir dos condicionamentos de névoa salina, higrotérmico, radiação UV e choque térmico;
- Avaliação por CST (cisalhamento interlaminar por compressão) dos compósitos soldados, para comparação com os resultados provenientes do *lap shear*;
- Avaliar diferentes elementos resistivos a serem utilizados no processo de soldagem por resistência elétrica dos compósitos e possíveis diferentes tratamentos superficiais para avaliar a rugosidade e melhorar a interface entre elemento resistivo e compósito;
- Comparação entre diferentes métodos de soldagem de compósitos entre si;
- Desenvolver um padrão de inspeção por ultrassom de modo a relacionar atenuação com porosidade;
- Avaliar a condutividade térmica na trama e no urdume do elemento resistivo;

- Explorar as variações de temperatura de transição vítrea e $\Delta H_{\text{fusão}}$;
- Explorar os efeitos das fibras de vidro e de carbono na cristalinidade do laminado.

REFERÊNCIAS

ACOEM – Solução para o meio ambiente, indústria, defesa e caracterização dos materiais. Disponível em: < <http://www.acoemgroup.com.br/Analise-termomecanica-TMA-4-18-71-aplicacoes>>. Acesso em: 25 mar. 2013.

AGEORGES, C.; YE, L. Resistance welding of thermosetting composite/thermoplastic composite joints. **Composites: Part A**, v. 32, p. 1603-1612, Dec. 2000.

AGEORGES, C.; YE, L. Simulation of Impulsive Resistance Welding for Thermoplastic Matriz Composites. **Composite Materials**, Netherlands, v. 8, p. 133-147, Dec. 1999.

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). **E1876-01: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. Pennsylvania, 2002.

ATCP Engenharia Física. São Carlos. Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Disponível em: <www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais.html>. Acesso em: 09 fev. 2012.

ARIAS, M.; ZIEGMANN, G. The Impulse Resistance Welding: A new Technique for Joining Advanced Thermoplastic Composite Parts, **41st International SAMPE Symposium and Exhibition**, v. 41, n.2, p. 1361–1371. 1996.

BAERE, I.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. Fusion bonding of carbon fabric reinforced polyphenylene sulphide. In: EPJ Web of Conferences. 2010. Anais de EPJ Web of Conferences. 2010.

BATES, P. J.; TAN, S.; ZAK, G.; McLEOD, M. Shear strength and meltdown behavior of reinforced polypropylene assemblies. **Composites: Part A**, 40, 28–35, 2009.

BATISTA, N.L. **Influência do condicionamento ambiental no desempenho mecânico e térmico de compósitos avançados PEI/FC**. 2012. 130 f. Tese (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2012.

BOTELHO, E.C. **Compósitos aeronáuticos processados a partir de fibra de carbono impregnadas com poliamida 6/6 via processo de polimerização interfacial**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – 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.

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

COSTA, A.P. **Efeito do condicionamento ambiental em compósitos soldados de PPS/Fibras contínuas**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

DAVIES, P.; MOORE, D. R. Glass/nylon-6.6 composites: Delamination resistance testing. **Composites Science and Technology**. v. 38, 1990. 211 p.

DON, R.C.; BASTIEN, L.; JAKOBSEN, T.B.; GILLESPIE, JR, J.W. Fusion bonding of thermoplastic composites by resistance heating. **SAMPE Journal**, v.26, n.1, p. 59–66. 1990.

DUBÉ, M.; HUBERT, P.; GALLET, J.; STAVROV, D.; BERSEE, H.; YOUSEFPOUR, A. Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, Québec, v. 48, p. 911-919, March, 2012.

DUBÉ, M.; HUBERT, P.; YOUSEFPOUR, A.; DENAULT, J. Resistance welding of thermoplastic composites skin/stringer joints. **Composites: Part A**, Québec, v. 38, p. 2541-2552, July 2007.

DUBÉ, M.; HUBERT, P.; YOUSEFPOUR, A.; DENAULT, J. Fatigue failure characterisation of resistance-welded thermoplastic composites. **International Journal of Fatigue**, 31, 719–725, 2009.

FARIA, M.C.M **Estudo das intempéries nas propriedades mecânicas e viscoelásticas de compósitos pps/fibras de carbono e Epóxi/fibras de carbono de uso aeronáutico**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

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.

GARDINER, G. Thermoplastic composites gain leading edge on the A380. **High-Perform Composites**. p. 50-55, Mar. 2006.

HEIMERDINGER, M. W. Structures and Materials Panel on - Composite Repair of Military Aircraft Structures. In: 79th Meeting of the AGARD. 1994. Seville, Spain. **Anais de 79th Meeting of the AGARD**. Seville, Spain, 1994.

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

HOU, M.; YANG, M.; BEEHAG, A.; MAI, Y.-W.; YE, L. Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. **Composites Structures**, Bankstown, v. 47, p. 667-672, 1999.

HOU, M.; YE, L.; MAI, Y.-W.; An experimental study of resistance welding of carbon fibre fabric reinforced polyetherimide (CF fabric/PEI) composite material. **Composites Materials**, Bankstown, v. 6, p. 35-49, aug. 1998.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 14. 2003, San Diego. **The influence of the heating element...** San Diego: ICCM, 2003. 13 p.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 16, 2007, Kyoto. **Optimization tool for welding of thermoplastic composites**. Kyoto: ICCM, 2007. 6p.

KANEKO, T. Relation Between Flexional Resonant Frequency Equations for the Flexional Vibration of Cilindrical Rods. **J. Res. Natl. Bur. Stand.**, v. 64B, p. 237, 1960.

KHAW, J.F.C.; LIM, B.S.; LIM, L.E.N. Optimal design of neural networks using the Taguchi method. **Neurocomputing**, Singapore, v. 7, n. 3, p. 225–245, Apr. 1995.

LAGE, L. G.; KAWANO, Y.; Estudos Sobre a Cinética de Decomposição Térmica do Poli(Sulfeto de Fenileno). **Polímeros**, v.9, n.4, 1999.

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

MARQUES, L.S.; NARITA, N.E.; COSTA, G.G.; REZENDE, M.C. Avaliação dos comportamentos mecânico e térmico de laminados de PPS/fibra de carbono processados em autoclave sob diferentes ciclos de consolidação. **Polímeros**, São José dos Campos, v. 20, n. 4, p. 309-314, maio 2010.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 362 p.

MCKNIGHT, S.H.; HOLMES, S.T.; GILLESPIE, JR., J.W.; LAMBING, C.L.T.; MARINELLI, J.M. Scaling Issues in Resistance-Welded Thermoplastic Composite Joints, **Advances in Polymer Technology**, v. 6, n. 4, p. 279–295. 1997

MONTGOMERY, D.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2003. 463 p.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Comos fazer experimentos - Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Barão Geraldo: Editora da Unicamp, 2001. 412 p.

NINO, G.F.; AHMED, T.J.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Thermal NDI of resistance welded composite structures. **Composites: Part B**, Delft, v. 40, p. 237-248, Nov 2008.

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

PAIVA, A.E.M. **Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliar Propriedades Elásticas de Cerâmicas Refratárias a Altas Temperaturas pelo Método de Ressonância de Barras**. 2002. 161f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2002.

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

PARLEVLIET, P.P.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses. **Composites: Part A**, v. 38, p. 1581-1596, dec. 1996.

PICKETT, G. Equations for Computing Elastic Constants from Flexional and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. **Am. Soc. Test. Mater.**, v. 45, p. 846-865, 1945. Proceedings.

REZENDE, M.C.; COSTA, M.L.; BOTELHO, E.C. **Compósitos estruturais - tecnologia e prática**. 1. ed. São Paulo: ArtLiber, 2011. 396 p.

STAVROV, D.; BERSEE, H.E.N. Resistance welding of thermoplastic - an overview. **Composites: Part A**, Delft, v. 36, p. 39-54, June 2004.

SPEYER, R.F. **THERMAL ANALYSIS OF MATERIALS**. 1. ed. Atlanta: Taylor & Francis, 1993. 285 p.

SHIMADZU. Sistemas de Microanálises. Microscópio eletrônico de varredura. Disponível em: < http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/surface/sem/sist_microanalises.shtml>. Acesso em: 12 de fev. 2013.

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, J.F.M.G. **Pré-Impregnados De Matriz Termoplástica: Fabrico E Transformação Por Compressão A Quente E Enrolamento filamantar**. Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia do Porto, 2005.

SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., São João del Rey. **Aplicação da técnica de projeto...** São João del Rey: ABMEC, 2010. 10 p.

TALBOT, E.; YOUSEFPOUR, A.; HUBERT, P. Thermal Behaviour During Thermoplastic Composites Resistance Welding. In: ANTEC'05, 2005. Anais de ANTEC'05, 2005.vol.1, p 1-5.

XIAO, X. R.; HOA, S. V.; STREET, K. N. Processing and modelling of resistance welding of APC-2 composite. **Journal of Composite Materials**, V. 26. 1031–49, 1992.

YOUSEFPOUR, A.; HOJJATI, M.; IMMARIGEON, J.-P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. **Journal of thermoplastic composite materials**, v. 17, p. 302-341, jul. 2004.

WIKIPEDIA: Dureza Rockwell. Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre. Categoria: Ciência dos Materiais. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Dureza_Rockwell>. Acesso em: 23 mar. 2013.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGEORGES, C.; YE, L.; HOU, M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. **Composites: Part A**, Sydney, v.32, p. 839-857, oct. 2000.8

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**, Sydney, v. 60, p. 1027-1039, dec. 1999.

AGEORGES, C.; YE, L.; HOU, M. Experimental investigation of the resistance welding for thermoplastic-matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance. **Composites Science and Technology**, Sydney, v. 60, p. 1191-1202, jan. 2000.

AGEORGES, C.; YE, L.; MAI, Y.-W.; HOU, M. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part I: Heat transfer. **Composites: Part A**, Sydney, v. 29A, p. 899-909, jan. 1998.

AGEORGES, C.; YE, L.; MAI, Y.-W.; HOU, M. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part II: Consolidation. **Composites: Part A**, Sydney, v. 29A, p. 911-919, jan. 1998.

AGEORGES, C.; YE, L.; MAI, Y.-W.; HOU, M. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part III: Crystallinity. **Composites: Part A**, Sydney, v. 29A, p. 921-932, jan. 1998.

AHMED, T.J.; NINO, G.F.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Heat emitting layers for enhancing NDE of composites structures. **Composites: Part A**, Delft, v. 39, p. 1025-1036, feb. 2008.

COLAK, Z.S.; SONMEZ, F.O.; KALENDEROGLU, V. Process modeling and optimization of resistance welding for thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, Istanbul, v. 36, n. 06, p. 720-744, jan. 2001.

MEI, Z.; CHUNG, D.D.L. Thermal stress-induced thermoplastic composite debonding, studied by contact electrical resistance measurement. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 20, p. 135-139, jun. 1999.

PARLEVLIET, P.P.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites – A study of the literature – Part I: Formation of residual stresses. **Composites: Part A**, v. 37, p. 1847-1857, dec. 2005.

PARLEVLIET, P.P.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites – A study of the literature – Part II: Experimental techniques. **Composites: Part A**, v. 38, p. 651-665, jul. 2006.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA

ARTIGOS

- Artigo aceito pela Materials Research:

FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN APPLIED ON ELECTRICAL RESISTANCE WELDING OF COMPOSITE PPS/CARBON FIBER. Souza, S.D.B.; Abrahão, A.B.R.M.; Bravim Junior, J.C.; Hein, L.R.O.; Costa, M.L.; Botelho, E.C.

TRABALHOS ENVIADOS A CONGRESSOS

- **BCCM (Brazilian Conference on Composites Materiasl) - 2012**

THERMAL SHOCK INFLUENCE ON VISCOELASTIC behavior of welded continuous fiber/pps laminates. A. B. R. M. Abrahão¹; S. D. B. Souza; A. P. da Costa; C. F. Bandeira¹; M. L. Costa¹; L.C. Pardini and E.C. Botelho.

SALT WATER CORROSION BEHAVIOR ON MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF WELDED CONTINUOUS FIBER/PPS LAMINATES. S. D. B. Souza; A. B. R. M. Abrahão; A. P. da Costa; L.C. Pardini and E.C. Botelho.

- **CIC (Congresso de Iniciação Científica da UNESP) - 2012**

EFEITO DO CONDICIONAMENTO AMBIENTAL NO MÓDULO ELÁSTICO DE COMPÓSITOS PEI/ FIBRAS DE VIDRO. José Carlos Bravim Junior; Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão; Samia Danuta Bregão de Souza; Edson Cocchieri Botelho.

- **SBPMat (Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais) - 2012**

OPTIMIZATION PROCESS OF ELECTRICAL RESISTANCE WELDING IN POLYMERIC COMPOSITE PEI / GLASS FIBER. J.C.Bravim Junior; R.M. de Assis; A.B.R.M. Abrahão; S.D.B. Souza; E.C. Botelho.

- **CARBON (aceito, mas não será enviado) - 2013**

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF WELDING ELECTRICAL RESISTANCE IN PEI / CARBON FIBER COMPOSITE. Souza, S.D.B.; Abrahão, A.B.R.M.; Bravim Junior, J.C.; Costa, M.L.; Hein, L.R.O.; Botelho, E.C.

- ICCM 19 (19th International Conference on Composite Materials) – 2013 (aceito mas não sera enviado)

EVALUATION OF THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONING OF WELDED JOINTS PEI / CARBON FIBER BY THE PROCESS OF ELECTRICAL RESISTANCE. A.B.R.M. Abrahão; S.D.B. Souza; J.C. Bravim Junior; E.C. Botelho; M.L. Costa; L.R.O. Hein.

- SBMat (Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais) - 2013

MORPHOLOGICAL, MECHANICAL AND THERMAL CHARACTERIZATION IN WELDED PPS / CARBON FIBER COMPOSITES FOR AEROSPACE INDUSTRY APPLICATION. S.D.B. Souza; A.B.R.M. Abrahão; J.C. Bravim Junior; E.C. Botelho; M.L. Costa; L.R.O. Hein.

COMPARATIVE STUDY OF THE PERFORMANCE OF HEATING ELEMENTS IN ELECTRICAL RESISTANCE WELDING IN COMPOSITES PEI/CARBON FIBERS. N. G. Quan; A.B.R.M. Abrahão; S. D. B. Souza; M.L. Costa; L.R.O. Hein; E.C. Botelho.

FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN STUDY OF WELDING ELECTRICAL RESISTANCE IN PEI / CARBON FIBER COMPOSITE. Ana Beatriz R. M. Abrahão; Samia Danuta B. de Souza; José Carlos B. Junior; Vinicius G. Ribeiro; Jonas Frank Reis; Eliane O. R. Araújo; Michelle L. Costa; Edson C. Botelho.

EFFECT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONING ON WELDED JOINTS PEI/GLASS FIBER COMPOSITES. José Carlos B. Junior; Ana Beatriz R. M. Abrahão; Samia Danuta B. de Souza; Michelle L. Costa; Luis Rogerio O. Hein; Edson C. Botelho.

- CBPol (Congresso Brasileiro de Polímeros) - 2013

DESENVOLVIMENTO A PARTIR DE PLANEJAMENTO FATORIAL DO PROCESSO DE SOLDAGEM EM COMPÓSITO PPS/FIBRAS DE VIDRO. Samia Danuta B. de Souza; Ana Beatriz R. M. Abrahão; José Carlos B. Junior; Michelle L. Costa; Luis Rogerio O. Hein; Edson C. Botelho.

- XXXIX Consolda (Congresso Nacional de Soldagem) – 2013

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DOS ELEMENTOS CONDUTORES NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM COMPÓSITOS PPS/FIBRAS DE CARBONO. Samia Danuta Brejão Souza; Natália Di Giuseppe Quan; Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão; Michelle Leali Costa; Luis Rogerio de Oliveira Hein; Edson Cocchieri Botelho.

ANEXO A

AEROSPACE COMPOSITES

Datasheet TenCate Cetex® PPS



Product type: PPS Thermoplastic Resin System (Polyphenylene Sulfide)

Product Description

Cetex® PPS is a semicrystalline polyphenylene sulfide thermoplastic composite offering outstanding toughness and excellent chemical and solvent resistance. The material is inherently flame resistant with low smoke emission. It exceeds 35/35 QSU and is qualified at Airbus and Boeing for multiple structural applications. This material is typically supplied in 12ft by 4ft (3,660mm by 1,220mm) preconsolidated laminates using the customer's designated ply count and orientation. In addition, lightning strike material can be incorporated and the laminates can be textured. By utilizing preconsolidated sheets and avoiding hand lamination, the customer can significantly reduce the cycle time required to produce a finished part. In addition, thermoplastics have the unique capability of allowing parts to be welded, folded, etc. to facilitate lower part count structures.

Service Temperature

212°F (100°C) Continuous

Typical Applications

Primary Aircraft Structure
Secondary Aircraft Structure
Engine nacelles
Radomes



Protective Fabrics
Outdoor Fabrics
Aerospace Composites
Armour Composites

Geosynthetics
Industrial Fabrics
Grass

TENCATE
materials that make a difference

PPS PROPERTIES

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Specific Gravity	1.35
Tg	194°F (90°C)
Melt temp	538°F (290°C)
Dielectric constant	3.20 at 1MHz
Loss tangent	0.0013 at 1MHz
Moisture absorption	0.02%
Flammability	V-0
Tensile strength	13.1ksi (90.3MPa)
Tensile modulus	0.551Msi (3,800MPa)
Elongation at yield	3%
Poisson's ratio	0.36
Compression strength	21.5ksi (148MPa)

Compression modulus	0.43Msi (2,965MPa)
Flexural strength	18.1ksi (125MPa)
Flexural modulus	0.54Msi (3,725MPa)
Izod unnotched	94.8ft-lb/in2 (199kJ/m2)
Izod notched	7.4ft-lb/in2 (15.6 kJ/m2)
CTE	29ppm/°F (52.2ppm/°C)
Thermal conductivity	0.19W/m-°K
Outgassing TML	0.04%
Outgassing CVCM	0.00%
WVR	0.00%
Fluid resistance	Excellent

MECHANICAL PROPERTIES

Physical/Thermal (nominal values)	Carbon T300 3K SHS with double sided PPS film			
Mass of fabric	8.28	oz/yd ²	290	g/m ²
Mass of fabric + resin	14.33	oz/yd ²	486	g/m ²
Resin content by volume	50	%	50	%
Resin content by weight	43	%	43	%
Moisture pick up	0.1	%	0.1	%
Ply thickness	0.0122	in	0.31	mm
Specific gravity	96.7	lb/ft ³	1.55	g/cm ³
Tg (DSC) (amorphous)	194	°F	280	°C
Tg (DSC) (crystalline)	248	°F	120	°C
Tm	538	°F	280	°C
Mechanical properties -57°F (-56°C) Dry	Carbon T300 3K SHS with double sided PPS film			
Tensile strength warp	114.5	ksi	790	MPa
Tensile strength weft	108.7	ksi	750	MPa
Tensile modulus warp	7.7	Msi	53	GPa
Tensile modulus weft	7.6	Msi	53	GPa
Compression strength warp	98.0	ksi	676	MPa
Compression strength weft	101.3	ksi	699	MPa
Compression modulus warp	7.2	Msi	49	GPa
Compression modulus weft	7.2	Msi	50	GPa

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix			
8.85	oz/yd ²	300	g/m ²
14.01	oz/yd ²	475	g/m ²
47.5	%	47.5	%
37	%	37	%
0.1	%	0.1	%
0.0088	in	0.25	mm
119.8	lb/ft ³	1.92	g/cm ³
194	°F	90	°C
248	°F	120	°C
535	°F	280	°C
Glass fabric US style 7781 with PPS matrix			
65.6	ksi	453	MPa
64.8	ksi	447	MPa
3.2	Msi	22	GPa
3.0	Msi	20	GPa
82.1	ksi	566	MPa
55.7	ksi	384	MPa
3.8	Msi	27	GPa
3.6	Msi	25	GPa

MECHANICAL PROPERTIES (CONTINUATION)

Mechanical properties -67°F (-56°C) Dry	Carbon T300 3K SRS with double sided PPS film			
Flexural strength warp	151.3	ksi	1043	MPa
Flexural strength weft	120.9	ksi	834	MPa
Flexural modulus warp	8.6	Msi	59	GPa
Flexural modulus weft	6.3	Msi	43	GPa
In plane shear strength	19.0	ksi	131	MPa
In plane shear modulus	642.1	ksi	4428	MPa
Open hole tensile strength	41.4	ksi	286	MPa
Open hole compressive strength	39.5	ksi	273	MPa
Compression after Impact	32.3	ksi	223	MPa
Bearing strength yield	71.2	ksi	491	MPa
Bearing strength ultimate	121.5	ksi	838	Mpa

Mechanical properties 73°F (-23°C)/50%RH

Tensile strength warp	109.8	ksi	758	MPa
Tensile strength weft	109.4	ksi	755	MPa
Tensile modulus warp	8.1	Msi	56	GPa
Tensile modulus weft	7.8	Msi	54	GPa
Compression strength warp	95.3	ksi	644	MPa
Compression strength weft	92.4	ksi	637	MPa
Compression modulus warp	7.5	Msi	51	GPa
Compression modulus weft	7.5	Msi	51	GPa
Flexural strength warp	148.9	ksi	1027	MPa
Flexural strength weft	120.5	ksi	831	MPa
Flexural modulus warp	9.7	Msi	60	GPa
Flexural modulus weft	6.5	Msi	45	GPa
In plane shear strength	17.2	ksi	119	MPa
In plane shear modulus	595.8	ksi	4040	MPa
Open hole tensile strength	40.4	ksi	278	MPa
Open hole compressive strength	37.1	ksi	256	MPa
Compression after Impact	31.2	ksi	215	MPa
Bearing strength yield	65.8	ksi	454	MPa
Bearing strength ultimate	122.4	ksi	844	Mpa

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix

15.8	ksi	109	MPa
711.5	ksi	4907	MPa

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix

49.3	ksi	340	MPa
48.3	ksi	333	MPa
3.1	Msi	22	GPa
2.9	Msi	20	GPa
61.6	ksi	425	MPa
42.8	ksi	295	MPa
3.7	Msi	26	GPa
3.5	Msi	24	GPa
74.2	ksi	511	MPa
56.6	ksi	390	MPa
3.3	Msi	23	GPa
2.9	Msi	20	GPa
11.6	ksi	80	MPa
538.5	ksi	3714	MPa
23.0	ksi	158	MPa
25.5	ksi	183	MPa
24.8	ksi	171	MPa
46.1	ksi	319	MPa
74.8	ksi	516	Mpa

Mechanical properties 80°C Dry		Carbon T300 3K SHS with double sided PPS film		
Tensile strength warp	105.9	ksi	730	MPa
Tensile strength weft	93.6	ksi	646	MPa
Tensile modulus warp	8.2	Msi	57	GPa
Tensile modulus weft	7.6	Msi	53	GPa
Compression strength warp	80.9	ksi	558	MPa
Compression strength weft	76.3	ksi	526	MPa
Compression modulus warp	7.5	Msi	51	GPa
Compression modulus weft	7.4	Msi	51	GPa
Flexural strength warp	138.4	ksi	955	MPa
Flexural strength weft	115.1	ksi	794	MPa
Flexural modulus warp	8.4	Msi	58	GPa
Flexural modulus weft	6.5	Msi	45	GPa
In plane shear strength	15.7	ksi	108	MPa
In plane shear modulus	384.4	ksi	2651	MPa
Mechanical properties 170°F (80°C) conditioned at 150°F (70°C) and 95%RH		Carbon T300 3K SHS with double sided PPS film		
Tensile strength warp	109.6	ksi	756	MPa
Tensile strength weft	101.2	ksi	698	MPa
Tensile modulus warp	8.2	Msi	56	GPa
Tensile modulus weft	7.6	Msi	53	GPa
Compression strength warp	83.8	ksi	578	MPa
Compression strength weft	77.5	ksi	535	MPa
Compression modulus warp	7.5	Msi	52	GPa
Compression modulus weft	7.4	Msi	51	GPa
Flexural strength warp	141.7	ksi	977	MPa
Flexural strength weft	107.2	ksi	739	MPa
Flexural modulus warp	8.7	Msi	60	GPa
Flexural modulus weft	6.4	Msi	44	GPa
In plane shear strength	15.7	ksi	104	MPa
In plane shear modulus	434.7	ksi	2998	MPa
Open hole tensile strength	39.1	ksi	270	MPa
Open hole compressive strength	33.7	ksi	232	MPa
Compression after impact	31.6	ksi	218	MPa
Bearing strength yield	59.9	ksi	413	MPa
Bearing strength ultimate	121.6	ksi	839	Mpa

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix			
40.6	ksi	280	MPa
40.7	ksi	281	MPa
2.9	Msi	20	GPa
2.7	Msi	19	GPa
43.0	ksi	297	MPa
29.4	ksi	203	MPa
3.2	Msi	22	GPa
2.9	Msi	20	GPa

8.6	ksi	60	MPa
247.3	ksi	1705	MPa

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix			
41.9	ksi	289	MPa
41.8	ksi	289	MPa
3.0	Msi	21	GPa
2.8	Msi	19	GPa
33.4	ksi	230	MPa
22.6	ksi	156	MPa
3.1	Msi	22	GPa
2.9	Msi	20	GPa

9.9	ksi	68	MPa
208.4	ksi	1437	MPa
19.6	ksi	135	MPa
16.0	ksi	110	MPa
0.0	ksi		MPa
26.7	ksi	184	MPa
55.6	ksi	384	Mpa

Mechanical properties 212°F (100°C) conditioned at 158°F (70°C) and 85%RH

Tensile strength warp
Tensile strength weft
Tensile modulus warp
Tensile modulus weft
Compression strength warp
Compression strength weft
Compression modulus warp
Compression modulus weft
In plane shear strength
In plane shear modulus

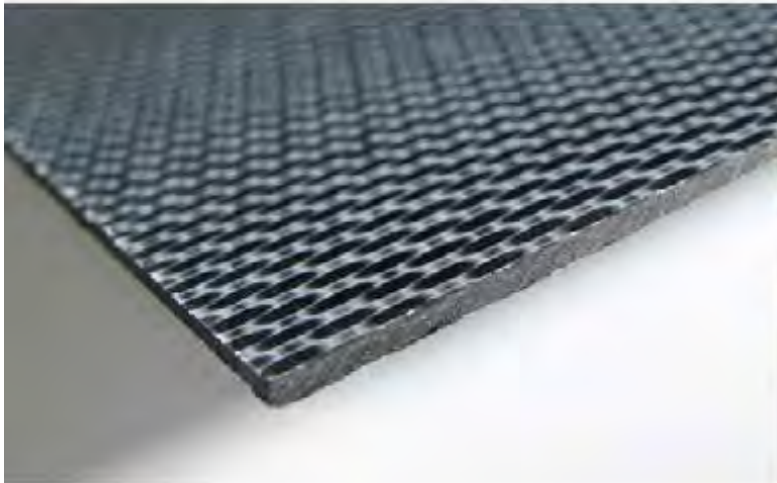
Glass fabric US style 7781 with PPS matrix

35.7	ksi	246	MPa
39.6	ksi	273	MPa
2.9	Msi	20	GPa
2.6	Msi	18	GPa
24.4	ksi	169	MPa
16.9	ksi	117	MPa
2.9	Msi	20	GPa
2.5	Msi	18	GPa
9.1	ksi	63	MPa
109.0	ksi	752	MPa

FLAMMABILITY PROPERTIES GLASS AND CARBON

	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/PPS	14	21	1.9mm	0sec	N/D									
4 plies of 3k PW/PPS							9.03	9		1	17	1	1	





North America
South America

Europe
Middle East
Africa

Asia
Australia

www.tencate.com

 **TENCATE**
materials that make a difference

APÊNDICE A – neste apêndice são apresentados os experimentos e os resultados do processo de soldagem por resistência elétrica para o compósito PPS/Fibras de Carbono

Experimento	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Lapshear (MPa)	
1	50	30	0,7	2,763	
2	50	30	0,7	0,984	média
3	50	30	0,7	1,327	2,0806
4	50	30	0,7	0,889	
5	50	30	0,7	4,44	
6	300	30	0,7	10,779	
7	300	30	0,7	12,099	média
8	300	30	0,7	17,408	13,0915
9	300	30	0,7	12,08	
10	300	30	0,7	***	
11	50	37	0,7	5,63	
12	50	37	0,7	1,36	média
13	50	37	0,7	6,1	6,2525
14	50	37	0,7	11,92	
15	50	37	0,7		
16	300	37	0,7	4,1	
17	300	37	0,7	11,88	média
18	300	37	0,7	15,22	8,7625
19	300	37	0,7	3,85	
20	300	37	0,7		
21	50	30	3	2,17	
22	50	30	3	3,806	média
23	50	30	3	1,287	2,2934
24	50	30	3	1,299	
25	50	30	3	2,905	
26	300	30	3	6,257	

27	300	30	3	4,78	média
28	300	30	3	6,35	5,795666667
29	300	30	3		
30	300	30	3		
31	50	37	3	13,21	
32	50	37	3	12,78	média
33	50	37	3	14,88	13,8525
34	50	37	3	14,54	
35	50	37	3		
36	300	37	3	7,16	
37	300	37	3	13,42	média
38	300	37	3	11,09	11,0225
39	300	37	3	12,42	
40	300	37	3		
41	175	33,5	1,85	15,39	
42	175	33,5	1,85	14,46	média
43	175	33,5	1,85	13,9	14,825
44	175	33,5	1,85	15,55	
45	175	33,5	1,85		
$\alpha+$	175	38	1,85	12,9	
$\alpha+$	175	38	1,85	11,67	média
$\alpha+$	175	38	1,85	13,12	12,19
$\alpha+$	175	38	1,85	11,07	
	50	33,5	1,85	6,54	
	300	33,5	1,85	16,63	
	300	33,5	1,85	16,99	média
	300	33,5	1,85	17,51	17,06
	300	33,5	1,85	17,10	
	175	33,5	0,7	16,93	
	175	33,5	0,7	16,75	média

175	33,5	0,7	19,09	17,13
175	33,5	0,7	15,76	
175	33,5	3	14,97	

APÊNDICE B – neste apêndice são apresentados experimentos e os resultados do processo de soldagem por resistência elétrica para o compósito PPS/Fibras de Vidro

Experimento	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Lapshear (MPa)	
1	50	26	0,7	***	
2	50	26	0,7	0,003	média
3	50	26	0,7	0,006	0,003666667
4	50	26	0,7	0,002	
5	50	26	0,7	***	
6	300	26	0,7	0,867	
7	300	26	0,7	0,664	média
8	300	26	0,7	0,583	0,7282
9	300	26	0,7	0,963	
10	300	26	0,7	0,564	
11	50	30	0,7	1,13	
12	50	30	0,7	2,674	média
13	50	30	0,7	1,53	1,9942
14	50	30	0,7	2,253	
15	50	30	0,7	2,384	
16	300	30	0,7	10	
17	300	30	0,7	10,273	média
18	300	30	0,7	10,247	9,5676
19	300	30	0,7	8,656	
20	300	30	0,7	8,662	
21	50	26	3	***	
22	50	26	3	0,588	média
23	50	26	3	0,209	0,46175
24	50	26	3	0,474	
25	50	26	3	0,576	
26	300	26	3	1,648	

27	300	26	3	0,523	média
28	300	26	3	6,446	1,8706
29	300	26	3	0,526	
30	300	26	3	0,21	
31	50	30	3	0,36	
32	50	30	3	1,241	média
33	50	30	3	1,374	1,1686
34	50	30	3	0,662	
35	50	30	3	2,206	
36	300	30	3	5,239	
37	300	30	3	4,343	média
38	300	30	3	5,668	4,929
39	300	30	3	4,252	
40	300	30	3	5,143	
41	50	28	1,85	3,16	
42	50	28	1,85	2,85	média
43	50	28	1,85	3,61	3,238
44	50	28	1,85	3,47	
45	50	28	1,85	3,1	
$\alpha+$ (46)	175	32	1,85	5,2	
$\alpha+$ (47)	175	32	1,85	6,37	média
$\alpha+$ (48)	175	32	1,85	9,42	8,138
$\alpha+$ (49)	175	32	1,85	8,89	
$\alpha+$ (50)	175	32	1,85	10,81	
51	300	31	0,7	2,13	
52	300	31	0,7	6,39	média
53	300	31	0,7	8	6,746
54	300	31	0,7	8,27	
55	300	31	0,7	8,94	
56	175	28	1,85	3,16	

57	175	28	1,85	2,85	média
58	175	28	1,85	3,61	3,238
59	175	28	1,85	3,47	
60	175	28	1,85	3,1	

APÊNDICE C – neste apêndice são apresentados os experimentos e resultados do processo de soldagem por resistência elétrica para o laminado híbrido

Experimento	Tempo (s)	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Lapshear (MPa)	
1	50	31,5	0,7	***	
2	50	31,5	0,7	***	média
3	50	31,5	0,7	***	#DIV/0!
4	50	31,5	0,7	***	
5	50	31,5	0,7	***	
6	300	31,5	0,7	1,3	
7	300	31,5	0,7	1	média
8	300	31,5	0,7	0,51	1,41
9	300	31,5	0,7	3,43	
10	300	31,5	0,7	0,81	
11	50	38,5	0,7	8,55	
12	50	38,5	0,7	10,41	média
13	50	38,5	0,7	8,69	8,912
14	50	38,5	0,7	8,42	
15	50	38,5	0,7	8,49	
16	300	38,5	0,7	12,02	
17	300	38,5	0,7	12,67	média
18	300	38,5	0,7	11,59	12,122
19	300	38,5	0,7	11,97	
20	300	38,5	0,7	12,36	
21	50	31,5	3	0,008	
22	50	31,5	3	0,6	média
23	50	31,5	3	0,52	0,4056
24	50	31,5	3	0,51	
25	50	31,5	3	0,39	
26	300	31,5	3	0,0006	

27	300	31,5	3	5,31	média
28	300	31,5	3	4,12	2,94012
29	300	31,5	3	4,08	
30	300	31,5	3	1,19	
31	50	38,5	3	13,36	
32	50	38,5	3	13,27	média
33	50	38,5	3	14,77	13,474
34	50	38,5	3	13,62	
35	50	38,5	3	12,35	
36	300	38,5	3	8,55	
37	300	38,5	3	10,5	média
38	300	38,5	3	10,41	9,78
39	300	38,5	3	9,03	
40	300	38,5	3	10,41	
41	175	35	1,85	11,98	
42	175	35	1,85	12,36	média
43	175	35	1,85	12,29	12,028
44	175	35	1,85	12,14	
45	175	35	1,85	11,37	
46	175	33	1,85	9,59	
47	175	33	1,85	8,39	média
48	175	33	1,85	10,32	8,543333333
49	175	33	1,85	8,83	
50	175	33	1,85	6,92	
51	175	33	1,85	7,21	
	50	35	1,85	13,2632	
	300	35	1,85	8,6075	
	175	39	1,85	4,25	
	175	35	0,7	12,68	
	175	35	3	11,2065	

