

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JEFERSON DE OLIVEIRA

Otimização do processo de soldagem em laminados compósitos de
matriz termoplástica por radiação infravermelha



Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR DE DEFESA
DATA DE ENTRADA NO SERVIÇO: 20/03/18
Assinatura: *Jeferson*

São Carlos

2018

JEFERSON DE OLIVEIRA

Otimização do processo de soldagem em laminados compósitos de matriz termoplástica por radiação infravermelha

Versão Original

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.



Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. José Ricardo Tarpani

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Class.	TESE
Cutt.	10.389
Tombo	T213/19
Sysno	2955103

✓ 21100212613

07.08.19

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

0480 Oliveira, Jeferson
Otimização do processo de soldagem em laminados compostos de matriz termoplástica por radiação infravermelha / Jeferson Oliveira; orientador José Ricardo Tarpani. São Carlos, 2018.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Laminado composto termoplástico. 2. Propriedade mecânica. 3. Soldagem por radiação infravermelha. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro JEFERSON DE OLIVEIRA.

Título da tese: "Otimização do processo de soldagem em laminados compósitos de matriz termoplástica por radiação infravermelha".

Data da defesa: 10/05/2018

Comissão Julgadora:

Prof. Associado José Ricardo Tarpani
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. Marcelo Aparecido Chinelatto
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. Rodrigo Bresciani Canto
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP -
Guaratinguetá)

Prof. Dr. Ricardo Afonso Angélico
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia
de Materiais:

Prof. Titular Antonio José Felix de Carvalho

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado Luís Fernando Costa Alberto

Resultado:

REPROVADO

Aprovado

REPROVADO

REPROVADO

APROVADO

À minha esposa, Juliana Roberta Torini de Souza Oliveira com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

***Aos meus pais,
Dorival de Oliveira (*in memoriam*) e
minha mãe Aparecida Fatima Fratucci de Oliveira
por todo amor e carinho***

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Professor José Ricardo Tarpani pela orientação, confiança, paciência e ensinamentos durante todos esses anos.

Ao Professor Ricardo Afonso Angélico pela orientação durante os trabalhos realizados na parte final do projeto, pela colaboração, preocupação, amizade e pela sempre disposição em ajudar.

Ao grupo de Materiais Compósitos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo – São Carlos

A todo corpo docente, em especial àqueles responsáveis pelas disciplinas cursadas: Haroldo Cavalcanti Pinto, Marcelo Falcão, Antônio José Felix de Carvalho, Marcelo Chinelatto, Vera Lucia Arantes, Waldek W.B. Filho, Valtencir Zucolotto e Osvaldo Novais de Oliveira Junior (Chu).

Àos alunos de iniciação científica, Christopher Bordini, Leandro Stefanelli e Felipe do Nascimento e a mestranda Tamiris Anjoletto, pela colaboração ajuda e companheirismo.

A todos os alunos e professores, que estão ou que passaram pelo Departamento de Engenharia de Materiais obrigado pela companhia, risadas, papos, ideias, dicas, etc.

A todos os funcionários da EESC-USP- São Carlos, em especial, aos do grupo de Polímeros, Cerâmicas e Metais, biblioteca, informática e pós-graduação, obrigada a todos pela incrível competência e respeito.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais de São Carlos (SMM) pela infraestrutura e formação acadêmica.

A Capes, CNPq e FAPESP pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os amigos externos e familiares que compreenderam diversas ausências em eventos e aniversários, devido aos compromissos decorrentes desse trabalho.

A minha irmã Jessica de Oliveira, pelo companheirismo e lealdade.

À minha esposa Juliana Roberta Torini de Souza Oliveira, que sempre esteve ao meu lado desde o começo me incentivando, me apoiando, ouvindo, tudo o que eu tinha para contar, falar e desabafar. Obrigado por estar ao meu lado durante todos os momentos, em especial naqueles em que eu pensei em desistir, obrigado pelo carinho, amor e dedicação.

Aos meus pais Dorival e Fátima, por acreditar em mim, pela exemplar educação dada e simplesmente por tudo que sou.

A todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!!!

“Inventar é imaginar o que ninguém pensou;
é acreditar no que ninguém jurou;
é arriscar o que ninguém ousou;
é realizar o que ninguém tentou;
inventar é transcender”

Santos Dumont

RESUMO

OLIVEIRA, J. **Otimização do processo de soldagem de laminados compósitos de matriz termoplástica por radiação infravermelha.** 141 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Materiais compósitos têm sido utilizados especialmente pela indústria aeronáutica, em estruturas sujeitas a carregamentos mecânicos severos. Devido às limitações dos processos de manufatura e da complexidade das estruturas, tem-se a necessidade de unir diversos componentes. Dentre as tecnologias de união utilizadas, é crescente o uso do processo de soldagem para laminados compósitos fibrosos de matriz termoplástica. Neste contexto, o presente trabalho investigou a influência dos parâmetros do processo de soldagem por radiação infravermelha na qualidade de juntas de laminados compósitos fibrosos termoplásticas a partir de ensaios mecânicos e microscopia óptica. A junta de estudo é formada pela união de dois laminados compósitos de matriz de polissulfeto de fenileno (PPS) reforçada com fibras contínuas de carbono e vidro. Os principais parâmetros de processamento (tempo de aquecimento, potência da lâmpada, pressão aplicada, entre outros) foram ajustados visando reduzir defeitos induzidos pelo processo de soldagem. Tendo como referência os trabalhos realizados pela Universidade de Gent, situada na Bélgica, o presente trabalho procurou avançar, ou seja, agregar valores no que já foi publicado pelos respectivos autores. O trabalho iniciou-se com a manufatura dos corpos de prova, obtendo-se as juntas soldadas por radiação infravermelha, em seguida as mesmas foram extraídas da área de sobreposição e caracterizadas mecanicamente através do ensaio mecânico SBS (*Short-Beam Strength*). Análises micrográficas foram realizadas com a finalidade de identificar os defeitos do processo de soldagem e suas possíveis falhas obtidas através do ensaio mecânico. Estes ensaios, juntamente com a análise de falhas, confirmaram os resultados positivos verificados na microscopia óptica, mostrando que as alterações dos parâmetros de soldagem nos proporcionaram uma redução significativa de falhas e defeitos. Utilizando o ensaio mecânico (SBS) com correlação de imagens, uma ferramenta inovadora, foi possível observar que as juntas soldadas podem falhar antes da carga máxima obtida pelo ensaio mecânico. Com a visão geral desses experimentos, pode-se afirmar que este trabalho superou a resistência máxima mecânica obtida pela Universidade de Gant em cerca de 10%, e comparado à outros processos de soldagem como por exemplo, resistência elétrica, a mesma foi superior em 5%. As imagens micrográficas demonstram a redução de falhas e defeitos justificando a superioridade comparada à outras técnicas.

Palavras-chave: Laminado compósito termoplástico, propriedade mecânica, soldagem por radiação infravermelha.

ABSTRACT

OLIVEIRA, J. **Optimization of the process of welding of thermoplastic matrix composite laminates by infrared radiation.** 141 p. Thesis (Doctorate) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

Composite materials have been used in structures subjected to severe mechanical loads, especially by the aeronautical industry. Due to limitations of manufacturing processes and complexity of structures, joining these components is a common solution. Among bonding technologies, the use of welding process for thermoplastic matrix fibrous laminates has increased. In this context, the present work investigated the influence of process parameters of the infrared radiation welding on the quality of composite laminate joints, mostly relying on mechanical tests and optical microscopy. The joint is created when uniting two composite laminates of Polyphenylene sulfide (PPS) reinforced with continuous carbon and glass fibers. The main process parameters (heating time, lamp power, consolidation pressure and time) were stepwise adjusted in order to reduce the defects induced, such as degradation, voids and microcracks. Using as reference the study performed by the University of Ghent, located in Belgium, the present research tried to advance the investigation in what has already been published. This research started with the manufacture of samples, the welding was performed through infrared radiation, then specimens were extracted from joints and characterized by the Short-Beam Strength test (SBS). Optical microscopy was performed aiming to identify defects promoted by the welding process and its failure modes inflicted after mechanical tests. The combination of these evaluation methods pointed whether changing welding parameters provided significant reduction of damage or defects. Using the image correlation test, an innovative tool, it was possible to observe that the welded joints may fail before the maximum load obtained through the SBS test itself. With the general view of these experiments, this study outperformed the mechanical resistance, presented by the University of Gant papers in about 10% and compared to other welding processes such as electric resistance, it was higher by 5%. Through optical microscopy, the comparison between other techniques and the infrared welding emphasized the reduction of defects and damage on the microstructure of the latter.

Keywords: Thermoplastic composite laminate, mechanical property, infrared radiation welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Porcentagem em peso dos materiais de construção empregados nas aeronaves comerciais.....	28
Figura 2: Classificação dos tipos de compósitos.....	32
Figura 3: Uso progressivo de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas de aeronaves comerciais.....	33
Figura 4: Cadeias poliméricas termoplásticos	35
Figura 5: Ciclo típico do processo de união por soldagem de termoplásticos	37
Figura 6: Interdifusão macromolecular na interface de solda de peças termoplásticas	38
Figura 7: Espectro eletromagnético.....	39
Figura 8: Esquemático de lâmpadas de quartzo com altas intensidades.....	41
Figura 9: Esquema do processo de soldagem por infravermelho	43
Figura 10: Esquemático de um dispositivo para soldagem de juntas sobrepostas termoplásticas por resistência elétrica.....	45
Figura 11: Equipamento para soldagem por indução de juntas sobrepostas termoplásticas.....	47
Figura 12: Anel de fenileno com um átomo de enxofre.....	48
Figura 13: Esquemático do laminado compósito termoplástico quase- isotrópico....	53
Figura 14: Aspectos e dimensões finais do CDP termoplástico soldado.....	54
Figura 15: Dispositivo de soldagem por radiação infravermelha.....	55
Figura 16: Painel de Elétrico do dispositivo de soldagem.....	56
Figura 17: Parte interna do dispositivo de soldagem.....	56
Figura 18: Parte interna do dispositivo de soldagem onde ocorrem a união da junta.....	57
Figura 19: Sistema de refrigeração.....	58
Figura 20: Curvas de espectro de diferentes lâmpadas.....	59
Figura 21: Preparação dos corpos de provas preliminares para realização da soldagem por radiação infravermelha.....	60
Figura 22: Máquina de soldagem por radiação infravermelha do grupo de materiais compósitos Estruturais da EESC-USP de soldagem.....	60
Figura 23: Estágios do processo de soldagem por infravermelho.....	61
Figura 24: Evolução da temperatura e pressão durante o processo de soldagem...62	

Figura 25: Sentido de preparação dos corpos de provas para realização do ensaio SBS.	64
Figura 26: Vista frontal da máquina EMIC; e Dispositivo para os ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar.	65
Figura 27: Disposição dos corpos de provas retirados da junta soldada.	66
Figura 28: Câmera Thermacam t360- Flir câmera player software.	67
Figura 29: Termômetro digital de quatro canais – MT1044.	68
Figura 30: Ensaio célula de carga: 30-A Região central, onde foi colocado a célula de carga e; 30-B- Aquisitor de pressão utilizado.	68
Figura 31: Ensaio correlação de imagens.	70
Figura 32: Curvas de espectro do filme de PPS com espessura de 0,2 mm.	71
Figura 33: Curva de DSC de aquecimento e resfriamento do filme de PPS virgem.	72
Figura 34: Curva de DSC de aquecimento e resfriamento do filme de PPS irradiado.	73
Figura 35: Pressões estabelecidas na amostra com variação de 290, 180 e 100 KPa.	76
Figura 36: Laminado PPS-C-V, soldado pelo processo de radiação infravermelha.	77
Figura 37: Valores médios e respectivos desvios-padrão da tensão máxima de cisalhamento para CDPs soldados na configuração I.	78
Figura 38: Valores médios e respectivos desvios-padrão (CDPs) configuração II e soldagem por resistência elétrica) da tensão máxima de cisalhamento.	79
Figura 39: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de defeitos, referente a configuração I na condição de não ensaiada mecanicamente.	80
Figura 40: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes à configuração I na condição de ensaiada para SBS.	81
Figura 41: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de defeitos, referentes a configuração II na condição de não ensaiada mecanicamente.	81
Figura 42: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes a configuração II na condição de ensaiada SBS.	82

Figura 43: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação defeitos, referentes a configuração III na condição de não ensaiada mecanicamente.....	83
Figura 44: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes a configuração III na condição de ensaiada para SBS.	83
Figura 45: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação e defeitos, referentes a configuração IV na condição de não ensaiada mecanicamente.....	84
Figura 46: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes a configuração IV na condição de ensaiada para SBS.	84
Figura 47: Comparação da tensão máxima de cisalhamento de juntas soldadas em diferentes configurações.	86
Figura 48: Valor médio de SBS para cada condição (tempo de aquecimento - pressão de consolidação - tempo de consolidação).	88
Figura 49: Gráfico das médias SBS para cada um dos parâmetros do ensaio.	90
Figura 50: Gráfico das médias SBS para cada os parâmetros de pressão e tempo de consolidação para populações com 38 s de radiação.	91
Figura 51: Gráfico das médias SBS para de diferentes valores de pressão de consolidação para populações com 38 s de radiação e 30 s de consolidação.....	91
Figura 52: Gráfico de barras comparando os melhores resultados de resistência ao cisalhamento (SBS) e seus respectivos desvios padrão.	92
Figura 53: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=38s$ segundos, $p_c=13,5MPa$ e $t_c=30 s$	94
Figura 54: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=38s$, $p_c=6,0 MPa$ e $t_c=30 s$	95

Figura 55: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=38$ s, $p_c=9,2$ MPa e $t_c=180$ s.	96
Figura 56: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=30$ s, $p_c=6,0$ MPa e $t_c=30$ s.	98
Figura 57: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=30$ s, $p_c=9,2$ MPa e $t_c=30$ s.	99
Figura 58: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=30$ s, $p_c=13,5$ MPa e $t_c=30$ s.	100
Figura 59: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=46$ s, $p_c=6,0$ MPa e $t_c=30$ s.	102
Figura 60: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=46$ s, $p_c=9,2$ MPa e $t_c=180$ s.	103
Figura 61: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=46$ s, $p_c=13,5$ MPa e $t_c=180$ s.	104
Figura 62: Gráfico Força x Deslocamento, referente ao laminado compósito PPS/C-V soldado pelo processo de soldagem por radiação infravermelha.	106
Figura 63: Imagens referentes ao ensaio de correlação de imagens, analisadas nos pontos A, B, C e D, para o processo de soldagem por radiação infravermelha no compósito PPS/C-V.	107

Figura 64: Gráfico Força x Deslocamento, referente ao laminado compósito PPS/C-V soldado pelo processo de resistência elétrica.....	109
Figura 65: Imagens referentes ao ensaio de correlação de imagens, analisadas nos pontos A, B, C e D, para o processo de soldagem por resistência elétrica no compósito PPS/C-V.	110
Figura 66: Gráfico de barras comparando os melhores resultados de resistência ao cisalhamento com outros processos de soldagem e seus respectivos desvios padrão.	112
Figura 67: Junta sobreposta simples de cisalhamento no qual foi realizada por intermédio do processo de soldagem por resistência, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada.	113
Figura 68: Junta sobreposta simples de cisalhamento no qual foi realizada por intermédio do processo de soldagem por radiação infravermelha, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada.	114
Figura 69: Junta sobreposta simples de cisalhamento no qual foi realizada por intermédio do processo de colagem, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada respectivamente.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos emissores infravermelhos e seu comprimento de onda.....	42
Tabela 2: Principais propriedades do Poli-Sulfeto de Fenileno - PPS	48
Tabela 3: Parâmetros de soldagem adotados na fabricação dos corpos de prova. .	62
Tabela 4: Configurações da evolução dos parâmetros dos processos.....	63
Tabela 5: Graus de cristalinidade obtidos pela análise das curvas de DSC, no momento do aquecimento e resfriamento.	73
Tabela 6: Avaliação das temperaturas máxima e de consolidação no compósito laminado para um tempo de exposição de 30, 38 e 46 segundos.....	75
Tabela 7: Configurações utilizadas no processo de soldagem por radiação infravermelho de forma estatística.....	87
Tabela 8: Três dos melhores resultados do teste SBS para as condições estudadas. Tempo de aquecimento [s] Pressão de consolidação [MPa] Tempo de consolidação [s] SBS [MPa] SD.....	88
Tabela 9: Valores de P obtidos pelo teste ANOVA one-way.	89
Tabela 10: Valores de P obtidos pelo teste ANOVA one-way para tempos de radiação de 38 s.	90
Tabela 11: Resultados do teste SBS para as condições estudadas com o tempo de aquecimento de 30 segundos. Tempo de aquecimento [s] Pressão de consolidação [MPa] Tempo de consolidação [s] SBS [Mpa] SD.....	97
Tabela 12: Resultados do teste SBS para as condições estudadas com o tempo de aquecimento de 46 segundos. Tempo de aquecimento [s] Pressão de consolidação [MPa] Tempo de consolidação [s] SBS [Mpa] SD.....	101



LISTA DE SIGLAS, ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
ANOVA	Análise de variância
CDPs	Corpo de Provas
DIC	Digital Image Correlation
DSC	Differential Scanning Calorimeter
EPX-C	Epóxi Carbono
GPa	Giga pascal
MPa	Mega pascal
N	Newton
P _c	Pressão de consolidação
PEEK	Poli (éter-éter-cetona)
PEI	Poli (éterimida)
PPS	Poli-Sulfeto de Fenileno
PPS-C	Poli-Sulfeto de Fenileno - Carbono
PPS-C-V	Poli-Sulfeto de Fenileno -Carbono-Vidro
PSU	Polisulfona
RI	Radiação Infravermelha
RW	Resistência Elétrica
SBS	Short-Beam Strength
T _a	Tempo de aquecimento
T _c	Tempo de consolidação
T _g	Temperatura vítrea
T _m	Temperatura de fusão

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Considerações iniciais.....	27
1.2	Objetivos.....	28
1.3	Motivação e justificativa.....	29
1.4	Organização do texto.....	30
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1	Materiais Compósitos.....	31
2.1.1	Aplicação de materiais compósitos.....	33
2.1.2	Compósitos de matriz termoplástica.....	34
2.1.3	Juntas de compósitos de matriz termoplástica.....	35
2.1.4	Processo de soldagem em compósito de matriz termoplástica.....	36
2.2	Radiação infravermelha.....	38
2.3	Processos de soldagem por fusão.....	40
2.3.1	Soldagem por radiação infravermelha.....	41
2.3.2	Soldagem por resistência elétrica.....	43
2.3.3	Soldagem por indução eletromagnética.....	45
2.4	Poli-sulfeto de fenileno (PPS).....	47
2.5	Análises térmica – Influências da cristalinidade analisadas por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	49
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	Laminado compósito fibroso de matriz termoplástica.....	53
3.2	Dispositivo de soldagem por radiação infravermelha.....	54
3.2.1	Máquina de soldagem.....	54
3.2.2	Processo de união das juntas.....	59
3.3	Ensaio de espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho.....	63
3.4	Análise da Cristalinidade do PPS na região de solda por DSC (<i>Differential Scanning Calorimeter</i>).....	63
3.5	Resistência mecânica ao cisalhamento (<i>Short-Beam Strength - SBS</i>).....	64
3.6	Microscopia óptica de reflexão de luz.....	66
3.7	Avaliação da temperatura obtida na superfície do laminado por Termografia e Termopar.....	67
3.8	Ensaio utilizando a Célula de Carga.....	68

3.9	Análise de variância ANOVA (análise de variância).....	68
3.10	Ensaio mecânico SBS com correlação de imagens (DIC - <i>Digital Image Correlation</i>)	69
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	Ensaio de espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho próximo (FT-NIR)	71
4.2	Análise da cristalinidade do PPS na região de solda por DSC (<i>Differential Scanning Calorimeter</i>)	72
4.3	Verificação da temperatura na superfície do laminado através dos ensaios de termografia e termopar para efeito de comparação.	75
4.4	Resultados do ensaio da Célula de Carga	76
4.5	Soldagem em laminados compósitos de matriz termoplástica por radiação infravermelha.....	76
4.6	Resultados das configurações I e II do processo de soldagem	77
4.7	Resultado das configurações III para o IV do processo de soldagem.....	82
4.8	Comparação dos resultados de SBS (<i>Short Beam Strength</i>) referentes as configurações de I a IV e soldagem por resistência elétrica.....	85
4.9	Novos parâmetros utilizados no processo de soldagem por radiação infravermelha.....	86
4.10	Resultados do ensaio mecânico SBS (<i>Short Beam Strength</i>) para os novos parâmetros de soldagem.....	87
4.11	Análise de variância - ANOVA	88
4.12	Comparação dos melhores resultados do ensaio SBS (<i>Short Beam Strength</i>) dos novos parâmetros para os outros processos de soldagem ...	92
4.13	Micrografia das juntas realizadas pelos novos parâmetros.....	93
4.14	Resultado dos ensaios com correlação de imagens (DIC - <i>Digital Image Correlation</i>)	105
4.14.1	Soldagem por radiação Infravermelho (PPS-C-V)	105
4.14.2	Soldagem por resistência elétrica PPS-C-V.....	108
4.15	Comparação dos resultados do ensaio mecânico SBS referentes aos processos de soldagem por resistência elétrica, radiação infravermelha C-V, radiação infravermelha -C e adesivada e suas respectivas micrografias	111
5.	CONCLUSÕES	117

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
REFERÊNCIAS.....	123
APÊNDICE A - Produções Científicas.....	129
APÊNDICE B - Resultados finais e suas respectivas configurações referente ao ensaio de resistência ao cisalhamento do processo de soldagem por radiação infravermelha.....	131
ANEXO A - Fichas referentes aos laminados de PPS (Poli-Sulfeto de Fenileno) fornecidas pelo fabricante TENCATE.....	135
ANEXO B – Catálogo geral da empresa Heraeus, pagina 6, contendo os Espectros da lâmpada infravermelha de ondas curtas utilizadas neste projeto.	141

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A utilização de compósitos no segmento aeronáutico teve um aumento nos últimos anos, principalmente pela introdução de novas aeronaves comerciais com uso significativo de materiais compósitos com mais de 50%. No entanto, a união destes materiais não é uma tarefa simples. O método mais usado atualmente é a união adesiva, porém existe algumas desvantagens como baixa resistência à tração, ao calor, à corrosão, etc. Para compósito de matriz termoplástica há outra possibilidade de união, pela fusão seguida de reconsolidação, onde aplica-se a técnica de soldagem, pois a junta é realizada através do aquecimento superficial do material, em seguida elas são pressionadas até que a mesma se solidifique (CRESPY *et al.*, 2008).

Atualmente, várias destas técnicas já estão sendo utilizadas para aplicações comerciais. Os dois maiores fabricantes de aeronaves comerciais da atualidade, Boeing e Airbus, através dos modelos de longo percurso B787 e A350, respectivamente, apresentaram aeronaves de grande porte para uso civil com aproximadamente 50% do seu peso em materiais compósitos (Fig. 1).

Neste estudo, o material utilizado foi um laminado compósito de matriz termoplástica de PPS (Polisulfeto de fenileno), reforçado com fibra de carbono e fibras de vidro, a espessura total do laminado foi de 2 mm. As placas foram manufaturadas pela empresa *TenCate Advanced Composites USA, Inc (2008)*. A técnica de união utilizada foi a soldagem por radiação infravermelha, o equipamento foi projetado e manufaturado pelo grupo de materiais compósitos da USP-EESC-SMM de São Carlos. O princípio da técnica consiste em unir os laminados sob prensagem, após os mesmos terem sido fundidos em ambas as superfícies de contato, pela lâmpada que emite radiação infravermelha.

Durante as soldagens diversas configurações foram variadas visando alcançar condições satisfatórias. A soldagem foi analisada a partir do ensaio mecânico de SBS (*Short-Beam Strength*) e microscopia óptica. Os resultados foram comparados com outras técnicas de soldagem, sendo possível mostrar uma evolução do processo de soldagem por radiação infravermelha.

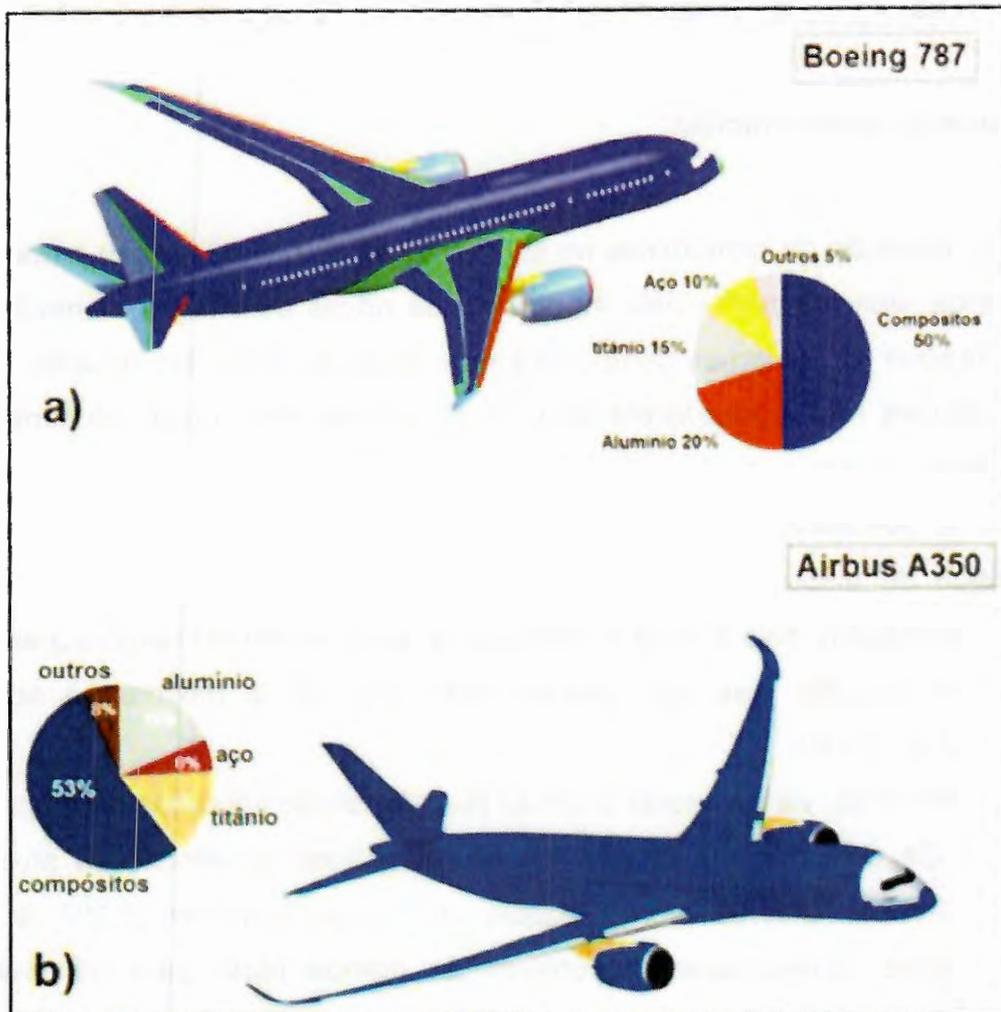


Figura 1: Porcentagem em peso dos materiais de construção empregados nas aeronaves comerciais: (a) 787, e (b) A350 (Adaptados de Boeing, 2015 e Airbus, 2015).

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi otimizar o processo de soldagem minimizando os defeitos e aumentando a resistência mecânica, a partir do estrito controle dos parâmetros do processo e ocorrência de defeitos de manufatura de juntas sobrepostas simples de cisalhamento por soldagem via radiação de ondas eletromagnéticas na frequência do infravermelho, no qual foram caracterizados por micrografias. Em seguida foram avaliadas as juntas fabricadas, a partir dos ensaios mecânicos e de microscopia óptica usando corpos de provas de pequeno porte.

Podem ser citados os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecimento de uma janela de processamento que permita a manufatura de juntas soldadas que sejam concorrentes daquelas que são citadas nas literaturas (vazios, microtrincas, entre outros);

- Avaliação visual utilizando microscopia óptica de reflexão das juntas soldadas.
- Avaliação da resistência ao cisalhamento das juntas através do ensaio mecânico SBS, e comparação com outros métodos de soldagem, como a soldagem por resistência elétrica e Indução eletromagnética.
- Aplicação de correlação de imagens (*DIC - Digital Image Correlation*), uma técnica avançada, para acompanhamento em tempo real do desenvolvimento de danos e mecanismo de fratura no corpo de prova.

1.3 Motivação e justificativa

A presente pesquisa teve como uma de suas principais motivações a avaliação da viabilidade para a utilização do processo de soldagem por radiação infravermelho, visando a união de laminados compósitos de matriz termoplástica em aplicações aeronáuticas. Empresas como a Embraer, vem-se deslocando para a aplicação de laminados compósitos fibrosos termoplástico, automaticamente, pela soldagem ao invés de rebiteagem no qual tornam-se mais relevantes. Teve-se como meta, contribuir de modo efetivo para o desenvolvimento e implementação de uma tecnologia metodológica de manufatura por soldagem de forma limpa, rápida, eficiente, que leve a geração de componentes e estruturas de compósitos em elevada eficiência estrutural, aplicável em sistemas mecânicos de alta responsabilidade, solicitado com carregamento mecânico estático, dinâmico em ambiente químico, fotônico e termoagressivos.

Até o momento há apenas um pesquisador na Universidade de Gant, localizada no país da Bélgica, trabalhando no referente assunto, portanto, este é um trabalho inédito no Brasil e pioneiro mundialmente. Associado a este fato, a literatura apresenta uma reduzida quantidade de trabalhos envolvendo processos de soldagem por radiação infravermelha para compósitos de PPS reforçados por fibras contínuas.

1.4 Organização do texto

No Capítulo 1 “Introdução”, realizou-se uma breve apresentação sobre este trabalho expondo brevemente o tema proposto, as considerações iniciais, objetivos gerais e específicos, as motivações e justificativa.

No Capítulo 2 “Revisão bibliográfica”, é apresentada uma revisão dos tipos de materiais laminados compósitos fibrosos de matriz termoplástica e suas respectivas aplicações nas indústrias aeronáuticas e aeroespaciais, as juntas soldadas e os processos de soldagem por radiação infravermelha, resistência elétrica e indução eletromagnética.

No Capítulo 3 “Materiais e métodos”, foram descritos os materiais, a junta investigada, o dispositivo de soldagem, bem como os ensaios mecânicos utilizados para avaliar a soldagem e as análises microscópica do mecanismo de danos efetuadas nas mesmas.

No Capítulo 4 “Resultados e discussão”, apresentam-se e discutem-se os resultados referente aos melhores parâmetros de fabricação com relação às juntas soldadas, assim como relativamente à caracterização mecânica em *Short-Beam Strength - SBS* e análise de defeitos e falhas nas condições de ensaiadas mecanicamente e não ensaiadas para todas as configurações utilizadas.

No Capítulo 5 “Conclusões”, apresentam-se, de modo objetivo e conciso, os resultados mais expressivos do trabalho, correlacionando-os com os objetivos traçados originalmente, encerrando-se assim o ciclo do trabalho proposto.

No Capítulo 7 “Sugestões para trabalhos futuros”, apresentam-se possibilidades de continuação do presente estudo a partir da realização de ensaios complementares e suplementares.

Nas “Referências bibliográficas”, listam-se todas as referências bibliográficas consultadas para a elaboração e o desenvolvimento desta tese.

Em “Apêndices” e “Anexos” são fornecidos dados na forma de gráficos e tabelas referente aos experimentos citados neste texto para eventual consulta do leitor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Materiais compósitos apresentam no mínimo dois componentes ou duas fases com propriedades físico-químicas distintas. Segundo Callister (2006), materiais compósitos são materiais multifásicos que exibem de maneira significativa e proporcional às respectivas frações volumétricas, as propriedades de ambas as fases da matriz e do reforço que os constituem, obtendo-se desta forma uma melhor combinação das propriedades mecânicas para o produto final. Diferentemente de quando isolados, os constituintes misturados formam um composto com propriedades que não podem ser obtidas com apenas um deles. Exemplos dessas combinações são metais com cerâmicas, metais com polímeros e cerâmicas com polímeros. Em essência, o material compósito possui uma fase contínua (chamada de matriz) que é relativamente dúctil e tenaz; e tem uma fase dispersa (chamada de reforço) que é relativamente frágil e resistente (TWE & LIAO, 2003). O papel da matriz é manter as fibras na sua posição original, protegê-las da abrasão e intempéries, assim como de contribuir na transferência da carga para as fibras. Já o reforço determina essencialmente a resistência mecânica e a rigidez do laminado (CAMPBELL, 2006).

Callister (2006) classifica os materiais compósitos em três grandes grupos: os reforçados por partículas, os reforçados por fibras e os de emprego estrutural de alta responsabilidade (Fig. 2). No presente texto, será dada ênfase ao uso dos compósitos do tipo estrutural, mais precisamente aos laminados constituídos de matriz polimérica termoplástica, reforçada com fibras contínuas paralelas ao plano do laminado e orientadas nas seguintes direções: (0/90), (± 45), (0/90), (± 45), (0/90).

A mistura e a consolidação físico-química desses dois materiais (matriz e fibra) resultam em um único material exibindo elevadas rigidez e resistência mecânicas específicas (propriedades por unidade de massa), ou seja, excepcional eficiência estrutural.



Figura 2: Classificação dos tipos de compósitos (adaptado de CALLISTER, 2006).

Os polímeros termoplásticos de interesse para aplicações na indústria aeroespacial, apresentam em geral, elevadas temperaturas de serviço, elevado tempo de retardamento de chama, boa resistência mecânica a temperaturas elevadas, excelente estabilidade dimensional e térmica, excelente resistência química, rigidez e fácil processamento. Dentre os materiais termoplásticos que vêm sendo aplicadas no setor aeroespacial destacam-se: PEEK – Poli (éter-éter-cetona), PEI – Poli (éterimida), PSU – Poli (sulfona) e PPS – Poli (Sulfeto de Fenileno). Quanto ao material de reforço, por excelência utilizado em aplicações estruturais de interesse aeroespacial, têm as fibras de carbono geralmente na forma de filamentos contínuos e com módulo de elasticidade na faixa de 150 a 600 GPa (NOGUEIRA *et al.*, 1999). Embora os polímeros termorrígidos sejam mais utilizados como matrizes para compósitos avançados, a utilização de matrizes termoplásticas tem continuamente evoluído devido a suas características de tenacidade à fratura, boa resistência ao impacto, boa temperatura de serviço, menor absorção de umidade, boa tolerância a danos, menor custo de processamento em grande escala, menor custo de transporte e estocagem, maior facilidade na execução de reparos e maiores possibilidades de integração e de reciclagem de rejeitos em relação aos termorrígidos tradicionalmente utilizados (COSTA, 2006).

2.1.1 Aplicação de materiais compósitos

Com o principal objetivo de redução de peso estrutural, o uso de compósitos em estruturas, especialmente aqueles reforçados com fibra de carbono, vêm sendo satisfatório pois o mesmo contribui no incremento da resistência mecânica, na resistência à corrosão, no desempenho em fadiga de componentes estruturais primários e secundários de aeronaves, satélites, foguetes, submarinos, plataformas marítimas entre outras aplicações (NETO & PARDINI, 2006).

Na aviação civil ou comercial, o uso de materiais compósitos começou efetivamente a partir do início da década de 80. Desde então, o uso crescente de compósitos em estruturas primárias das aeronaves, em substituição àquelas fabricadas particularmente em ligas de alumínio, proporcionou aos fabricantes o projeto e a manufatura de estruturas mais leves, contribuindo para a redução do consumo de combustível, aumento da autonomia e no significativo incremento da carga paga (NIU, 1992). Esta evolução na aplicação dos materiais compósitos em aeronaves comerciais, desde áreas não críticas até o emprego em estruturas primárias, é ilustrada na figura 3.



Figura 3: Uso progressivo de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas de aeronaves comerciais (adaptado de NIU, 1992).

Segundo a fabricante Boeing, a aplicação de compósitos na fuselagem de sua nova aeronave B787 permitiu o uso de janelas de passageiros 30% maiores, e a utilização de pressão interna equivalente à uma altitude de 6.000 pés, o que representa 2.000 pés a menos do que outros modelos, além da possibilidade de manutenção de um nível superior de umidade no interior da cabine, proporcionando assim mais conforto aos passageiros. Embora aberturas na fuselagem (janelas de passageiros) atuem como concentradores de tensão, e uma pressão interna maior na cabine aumenta os esforços exercidos na estrutura, as melhorias acima mencionadas foram possíveis devido às maiores resistências mecânica e rigidez

específicas, resistências à fadiga e à corrosão dos compósitos com relação às ligas de alumínio comumente utilizadas em projetos aeronáuticos.

Embora as aeronaves civis da Boeing e Airbus, recentemente desenvolvidas, tenham porcentagem em peso similar, no que diz respeito ao uso de materiais compósitos (essencialmente de matriz polimérica e fibras contínuas de carbono), ambas apresentam importantes diferenças em termos de projeto e de concepção.

2.1.2 Compósitos de matriz termoplástica

Os compósitos de matriz termoplásticas possuem ligações fracas (ligações de Van der Waals) entres as cadeias, dificultando o processo de união entre eles. Mesmo sabendo das dificuldades em unir esses compósitos, o interesse em processos de soldagem desses materiais vem crescendo nos últimos anos, principalmente pelo seu baixo custo de fabricação (YOUSEFPOUR *et al.*, 2004).

Devido às propriedades inerentes à matriz, o compósito de matriz termoplástica pode ser unido a partir do processo de soldagem. Dentre os processos de soldagem aplicados à esses materiais, pode-se citar: a soldagem por ultrassom, por indução, por micro-ondas, por resistência elétrica, por chapa quente, por laser e infravermelho (BOTELHO *et al.*, 2012; DE BAERE *et al.*, 2010; ALLAER *et al.*, 2012).

Na década de 1980 as resinas termoplásticas passaram a ser introduzidas em estruturas de alto desempenho, tendo suas propriedades comparadas com as das resinas termorrígidas, que foram precursoras dos materiais compósitos com matriz polimérica na indústria aeronáutica. As matrizes termoplásticas apresentam maior tolerância à danos, ciclos de processamento mais curtos, maior resistência à agressividade do ambiente, maior tempo de estocagem, além da possibilidade de reciclagem (JANG & KIM, 1996; KAWAGOE *et al.*, 2006).

Apesar das matrizes termoplásticas possuírem grandes massas molares, elas não formam ligações cruzadas como as resinas termorrígidas (Fig. 4), o que permite seu processamento inúmeras vezes por intermédio da aplicação simultânea de calor e pressão (AGEORGES *et al.*, 2001). De fato, está reconhecida a capacidade dos termoplásticos em serem aquecidos até o ponto de fusão (no caso dos polímeros semicristalino) ou de amolecimento (no caso dos polímeros amorfos) e remodelados, o que permite que eles sejam soldados. No entanto, existe um limite de vezes que as matrizes termoplásticas podem ser processadas, pois a temperatura utilizada

normalmente envolve um tipo a fusão do polímero, o que provoca a queda gradativa das propriedades, levando até a formação de ligações cruzadas (CAMPBELL, 2006).

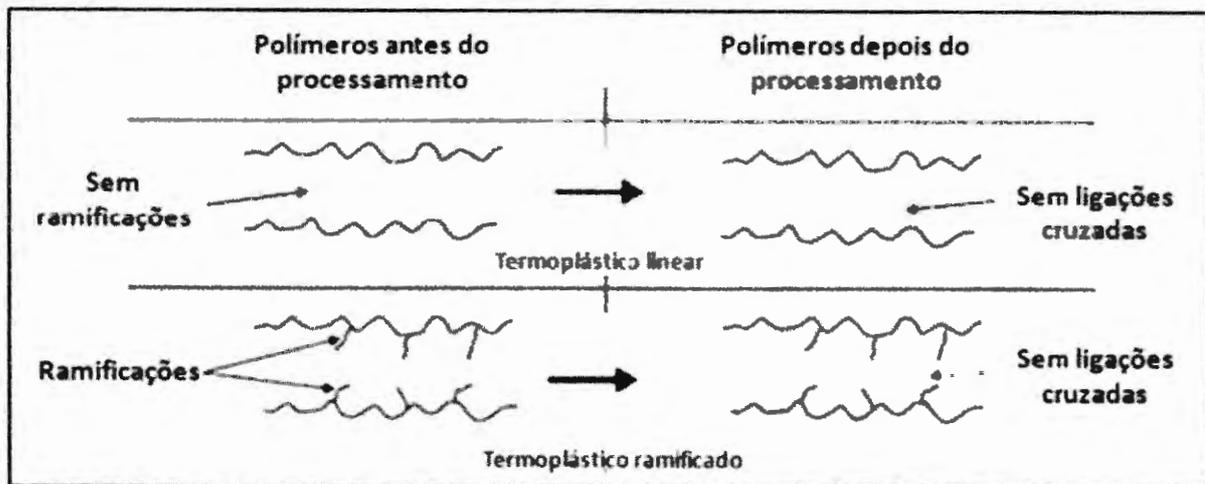


Figura 4: Cadeias poliméricas termoplásticas (Adaptado CAMPBELL,2006).

2.1.3 Juntas de compósitos de matriz termoplástica

Na indústria aeronáutica a estrutura completa de uma aeronave é formada a partir de diversas partes como revestimentos, nervuras, longarinas, etc., as quais podem ser unidas por fixadores, coladas ou soldadas (NIU, 1992). Fatores tais como a facilidade de desmontar, inspecionar, reparar ou substituir partes da estrutura devem ser considerados no momento de decidir sobre o método de junção a ser utilizado. Para a fabricação de um produto, na maioria das vezes, é necessário que várias peças se liguem umas às outras através de um determinado processo de união. Assim, essas partes interligadas são chamadas de juntas, cuja principal função é a transferência de cargas de um elemento para outro. Idealmente, uma estrutura seria concebida sem juntas, pois as uniões são fontes potenciais de danos e peso adicional, porém, não é possível que isso ocorra, pois as dimensões máximas de um componente são geralmente limitadas pelos processos de fabricação (CAMPBELL, 2006).

Os tipos de esforços em que a junta estará submetida em condições reais de serviço, deverão ser considerados no momento da escolha do método de fabricação. Juntas mal projetadas estarão sujeitas à concentração de tensões, momentos secundários e deflexões excessivas.

Os métodos clássicos de união consistem das juntas mecânicas (união por parafusos, arrebites, prisioneiros, etc.) e das juntas coladas. As juntas mecânicas apresentam desvantagens tais como: necessidade de introduzir furos nas juntas, que atuarão como concentradores de tensão; e instalação de fixadores, que adicionam custo e peso à estrutura. As juntas coladas proporcionam uma distribuição mais uniforme de tensão na área de união quando comparadas às juntas mecânicas, no entanto, juntas coladas requerem uma melhor preparação da superfície, uma tarefa que em geral é complexa e pode consumir muito tempo de processamento. No caso particular dos compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras contínuas, a soldagem por fusão aparece como uma alternativa natural para o caso de juntas em estruturas aeronáuticas (CHAZERAIN, 2009).

2.1.4 Processo de soldagem em compósito de matriz termoplástica

Os processos de soldagem em matrizes termoplásticas baseiam-se em uniões, amolecendo-as acima de uma certa temperatura, porém mantendo suas propriedades, mesmo após o resfriamento. Pode ser amplamente definido como a união de duas ou mais partes por meio da fusão e consolidação (contato íntimo e auto - adesão) sob pressão em uma interface comum (VILLEGAS *et al.*, 2012). Portanto a soldagem consiste no aquecimento da matriz termoplástica acima da temperatura de transição vítrea (polímeros amorfos) ou acima da temperatura de fusão (polímeros semicristalinos, como no caso do PPS) e permitindo resfriar com a aplicação da pressão (O'SHAUGHNESSEZ *et al.*, 2015).

O processo apresenta três fases distintas: o aquecimento, a consolidação e o resfriamento; todas elas são controladas por ao menos duas das seguintes variáveis de processo: tempo, temperatura e pressão (Fig. 5).

A primeira fase é o aquecimento das superfícies a serem unidas, sendo o tempo uma das variáveis do método. Para termoplásticos semicristalinos, a temperatura deve ser algo superior à temperatura de fusão (T_m), nesta fase não se utiliza pressão.

A segunda fase é a consolidação das superfícies poliméricas termoplásticas, que ocorre pelo processo de interdifusão macromolecular (Fig. 6). Através do íntimo contato entre as partes aquecidas forçadas pela aplicação de pressão, as cadeias

poliméricas se difundem através da interface comum e se entrelaçam, proporcionando a integração entre as duas partes inicialmente separadas, numa massa considerável de material localizado nas proximidades das respectivas superfícies em contato inicial.

Na terceira fase ocorre o resfriamento, neste caso a pressão deve ser mantida até que a temperatura se estabeleça bem abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g) do polímero, isso restringe a nucleação de vazios, suprime a recuperação elástica da macromolécula e ajuda a manter as tolerâncias, dimensões e o formato desejados do produto final. Para polímeros semicristalinos, a taxa de resfriamento não pode ser muito rápida, visto ser necessário um determinado tempo para que se garanta o reordenamento de sua estrutura semicristalina, assim como a devida relaxação molecular, evitando desta forma, as indesejáveis tensões residuais (CASTRO, 2014).

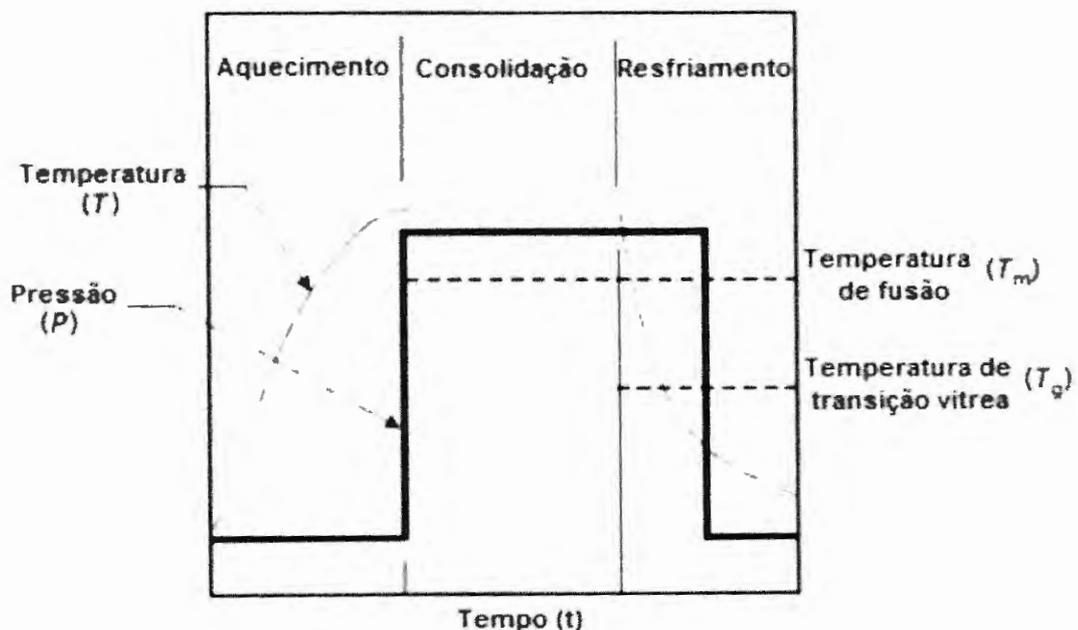


Figura 5: Ciclo típico do processo de união por soldagem de termoplásticos (Adaptado de AGEORGES *et al.*, 1998).

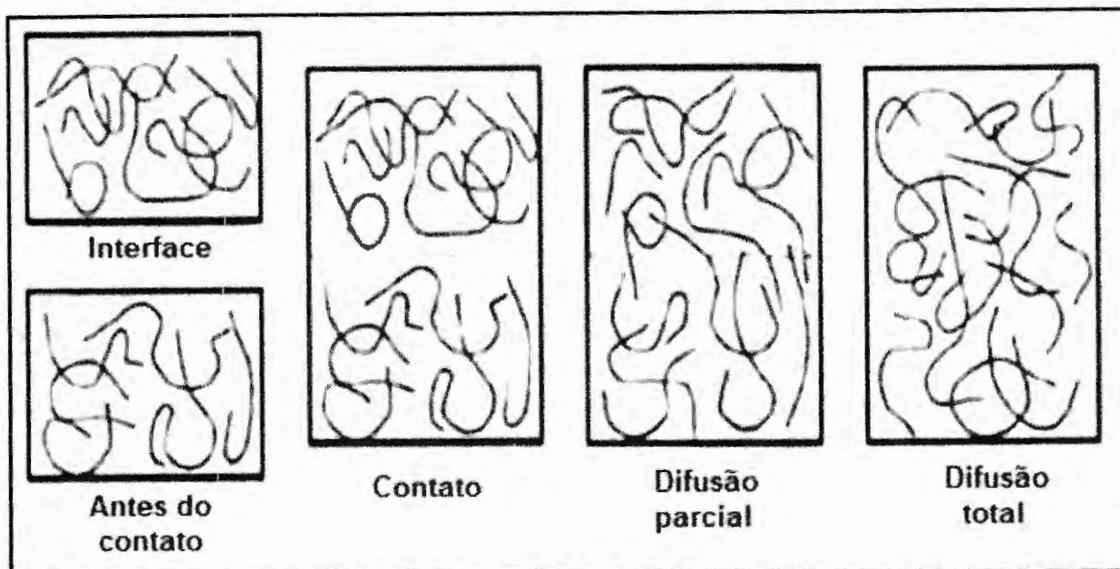


Figura 6: Interdifusão macromolecular na interface de solda de peças termoplásticas (Adaptado de AGEORGES *et al.*, 1998).

2.2 Radiação infravermelha

O olho humano é capaz de perceber as ondas de luz visíveis. A luz visível é uma pequena parte de todas as espécies de radiação que pode ser vista, e é uma das poucas formas de radiação que conseguem penetrar a atmosfera e ser detectada na superfície da Terra. Existem ainda outras formas de radiação que não podem ser vistas. Todas essas formas de radiação fazem parte do espectro eletromagnético. A radiação infravermelha faz parte dessa radiação que é invisível ao olho humano e foi descoberta em 1880 pelo inglês William Herschel, quando estava realizando estudos relacionados a temperatura das cores. Na época ele se baseou no experimento de Newton do “espectro das cores”.

As ondas eletromagnéticas são geradas pela movimentação de cargas. A carga elétrica em movimento vibracional gera uma perturbação periódica no espaço, em forma de campos elétricos e magnéticos, perpendiculares entre si e ambas oscilam transversalmente com a mesma frequência de vibração da carga. As ondas eletromagnéticas são caracterizadas pelos comprimentos de onda (λ) e a frequência (f) e se propagam a 300.000 km/s (velocidade da luz (c) no vácuo). A relação entre a velocidade de luz, comprimento de onda e a frequência da onda é dada por $c = \lambda f$.

A radiação infravermelha são ondas cujo comprimento vão de 700 nanômetros a 1 milímetro, e portanto, não são visíveis para o olho humano. É uma

radiação não ionizante, por isso, sem efeitos danosos (sem riscos de causar males como, por exemplo, câncer). No espectro de luz, está localizado depois da luz vermelha, daí surgiu seu nome. Apesar de não poder ser vista, a radiação infravermelha pode ser notada no corpo em forma de calor (FOGAÇA *et al.*, 2017).

A radiação infravermelha consiste no fenômeno de transferência de energia por ondas eletromagnéticas. A onda eletromagnética é composta de um campo elétrico e um campo magnético, e a transmissão de energia acontece através de movimentos ondulatórios ocasionados por uma variação de força entre os campos elétrico e magnético. Sua emissão ocorre basicamente através do calor (intensidade de vibração das moléculas que compõem um corpo). Esse calor leva a uma variação no estado energético dos elétrons das moléculas constituintes, liberando energia ao efetuarem a transição de um estado mais energético para um menos energético (LOW & REED, 1994).

A propagação da radiação infravermelha ocorre em linhas retas a partir de sua fonte, e espalha-se igualmente em todas as direções. A intensidade da radiação em um ponto, a partir de uma fonte, é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte (LOW & REED, 1994).

As radiações infravermelhas são aquelas cujos comprimentos de onda são maiores que os da luz vermelha visível, e se estendem até a região das micro-ondas, ou seja, 760nm a 1mm. O infravermelho corresponde, no espectro eletromagnético, à faixa entre o visível e as micro-ondas, região em que a maior parte dos compostos orgânicos e inorgânicos apresenta absorção em comprimentos de ondas bem característicos que são ilustrados na figura 7.

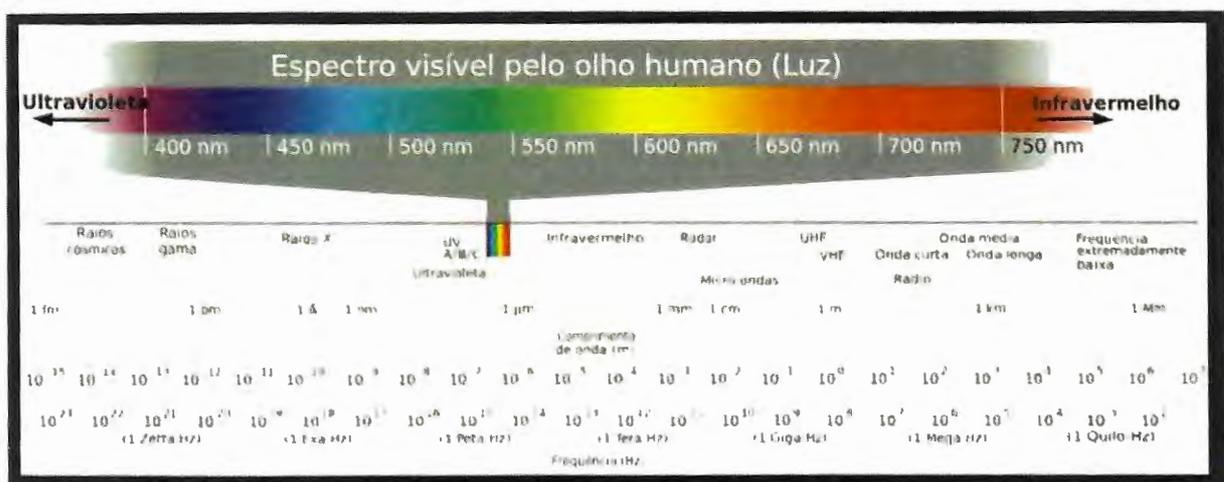


Figura 7: Faixa do espectro eletromagnético (ESPECTRO VISÍVEL, 2017).

Pelas leis da física, a matéria só pode absorver radiação quando a energia de radiação possui o mesmo nível de energia de transição num átomo ou molécula. Dessa forma, diferentes níveis de energia estão relacionados com diferentes comportamentos da matéria. Por exemplo, níveis mais altos de energia estão associados com os elétrons internos dos átomos, assim os raios gama e raios-X interagem com as transições dos elétrons das camadas internas. Já a radiação ultravioleta e a luz visível interagem com as transições da camada de valência dos elétrons, enquanto a radiação de infravermelho próximo, pode interagir com as transições de energia da camada eletrônica similar ou com as transições de energia rotacional vibracional (SKOOG, *et al.*, 1992).

O infravermelho médio está envolvido essencialmente com transições de energia rotacional e vibracional e o infravermelho distante está principalmente ligado às transições de energia rotacional. Resumidamente, a energia relacionada à vibração dos átomos no interior de uma molécula corresponde à faixa de 100 a 10000 cm^{-1} , no espectro eletromagnético, onde se encontra o infravermelho (SKOOG, *et al.*, 1992).

2.3 Processos de soldagem por fusão

Um dos métodos estabelecidos mais comum em unir as partes dos polímero, é através do processo de soldagem. As diferentes tecnologias de soldagem podem ser classificadas de acordo com o método de aquecimento (EHRENSTEIN *et al.*, 2004).

Atualmente as técnicas de soldagem por processo de fusão na área aeronáutica vêm se destacando no mercado, com isso surgiu o crescimento de linhas de pesquisas para a sua utilização, dentre elas, algumas vêm se mostrando mais promissoras, como as técnicas: de soldagem por indução, ultrassom e resistência elétrica (YOUSEFPOUR *et al.*, 2004; STAVROV & BERSEE, 2005) e a por radiação infravermelha.

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 *et al.*, 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 *et al.*, 2004; AGEORGES *et al.*, 2001; COSTA, 2012).

2.3.1 Soldagem por radiação infravermelha

A soldagem por radiação infravermelha é uma tecnologia de soldagem que utiliza um emissor infravermelho para aquecer as amostras. A temperatura na zona de junção é uma das funções mais importantes utilizadas nos parâmetros da máquina e do material (FUHRICH *et al.*, 2013).

No processo de soldagem por radiação infravermelha, o calor é liberado sob a forma de radiação, saindo da lâmpada infravermelha em direção ao material. Estas lâmpadas são, na maioria dos casos, lâmpadas de quartzo com altas intensidade (Fig. 8).



Figura 8: Esquemático de lâmpadas de quartzo com altas intensidades (HERAEUS, 2015).

Existem geralmente 3 classes de lâmpadas por radiação infravermelha: IV-A, IV-B e IV-C. Elas se distinguem pelo comprimento de onda da luz irradiada. Esses emissores infravermelhos podem ser separados em curtos comprimento de onda (infravermelho próximo), comprimento de onda médio (infravermelho próximo) e emissores de longo comprimento de onda (meio comprimento de onda e infravermelho distante), tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos emissores infravermelhos e seu comprimento de onda.

IV-Radiação	Tipo	Comprimento de onda (μm)	Número de ondas (cm^{-1})	Exemplos de Emissores
N-A	Comprimento de onda curto (Infravermelho próximo)	0,78 - 1,4	12821 - 7143	Emissores Halógenas
N-B	Comprimento de onda médio (Infravermelho próximo)	1,4 - 3,00	7143 - 3333	Emissores de folhas metálicas
N-C	Comprimento de onda longo (comprimento de onda médio e infravermelho distante)	3,00 - 1000	3333 - 10	Emissores cerâmicos

Fonte: Normas: (DIN 5030-2,1982; DIN EM 60519-12, 2014).

O comprimento de onda é altamente determinante do curso deste processo. As ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma velocidade e por isso as ondas de maior frequência são aquelas de menor comprimento de onda, e as ondas de menor frequência apresentam o maior comprimento de onda (HERAEUS, 2017).

A luz infravermelha é emitida com base nas propriedades ópticas do material irradiado a partir da superfície do polímero parcialmente refletido. Esta intensidade de radiação penetra no material e a mesma é absorvida ou transmitida (HEI, 1994).

O grau de absorção da luz infravermelha no polímero termoplástico depende do comprimento de onda, bem como de sua estrutura química e morfológica (HEI, 1994). A absorção característica para polímeros acontece no comprimento de onda de 3,4 μm (número de onda 2941 cm^{-1}), (FUHRICH *et al.*, 2013; HEI, 1994). Esse comprimento é característico para os grupos $[\text{C-H}]_n$, no entanto aditivos podem interferir nas propriedades de absorção. (FUHRICH *et al.*, 2013; HEI, 1994; LIN-VIEN, 1991).

A estrutura cristalina dos polímeros semi-cristalinos afeta a transmissão da luz infravermelha, uma vez que a luz é refratada e/ou refletida na camada limite entre as áreas amorfas e cristalinas. A profundidade da penetração óptica diminui com o aumento do comprimento de onda e isso ocorre devido o aumento da dispersão (HEI, 1994). Portanto, a temperatura resultante depende da emissão do espectro pela fonte e das propriedades de absorção do material (FUHRICH *et al.*, 2013).

Geralmente, o processo é realizado em três etapas. Em uma primeira etapa, aquece-se a superfície através de radiação infravermelha, até que as mesmas atinjam o ponto de fusão. Na segunda etapa colocam essas superfícies em contato sob pressão até que resfriem à uma temperatura adequada, unindo-as, finalizando a terceira etapa (Fig. 9).

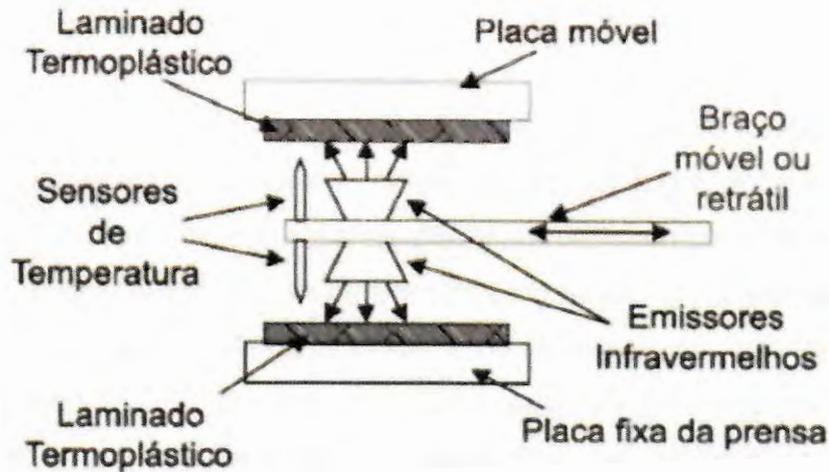


Figura 9: Esquema do processo de soldagem por infravermelho (YOUSEFPOUR *et al.*, 2004; AGEORGES *et al.*, 2001; POTENTE *et al.*, 1993).

O método de soldagem por radiação infravermelha, oferece muitas vantagens. Além da alta velocidade, o processo não tem contato com o elemento de aquecimento. Além disso, este processo é excelente para a automação, o que permite que ele seja controlado com precisão.

Como todo processo, ele também apresenta algumas desvantagens, como custo alto das lâmpadas; ocorrência de efeitos colaterais na estrutura interna do material e, dependendo de quanto for profunda a radiação, durante o aquecimento, pode haver desconsoidações de diferentes camadas constituintes do material compósito.

2.3.2 Soldagem por resistência elétrica

A soldagem por resistência, também conhecida por eletrofusão ou fusão por resistência elétrica, também vem se destacando nos últimos anos nas linhas aeronáuticas, principalmente em soldagem de materiais compósitos (BATES *et al.*, 2009). Essa técnica de soldagem, tem como uma de suas principais características, fundir e resfriar a matriz polimérica, mantendo as propriedades do compósito, para assim formar a solda.

Basicamente, esse processo de soldagem, consiste em se gerar calor através do implante de um material condutivo (elemento gerador de calor), no caso pode ser uma malha metálica entre as duas partes que serão soldadas ao mesmo tempo sob a aplicação de pressão. Quando este material é submetido à uma corrente elétrica, o

calor é gerado devido ao efeito Joule (STAVROV & BERSEE, 2005; BATES *et al.*, 2009; DUBÉ *et al.*, 2009).

O processo de soldagem por resistência elétrica, pode ser descrito em 4 passos: 1-) Início do processo de soldagem: conforme a temperatura aumenta, a matriz termoplástica ao redor do elemento gerador de calor aquece, até o polímero atingir uma temperatura superior à temperatura de fusão (para os polímeros semicristalinos), ou uma temperatura adequada de amolecimento (polímeros amorfos); 2-) Desligamento da corrente Elétrica: quando todo o material ao redor do implante estiver fundido ou amolecido, a corrente elétrica é desligada; 3-) Resfriamento da área de soldagem, ainda com forte pressão aplicada entre as partes, uma contra a outra; 4-) E por fim , aguardar que a solidificação esteja por completa em toda área de solda , obtendo-se assim o produto final consolidado (Castro, 2014).

Para a realização da soldagem elétrica é utilizado um dispositivo formado pelos seguintes componentes: elemento gerador de calor, uma fonte de energia elétrica (com voltímetro e amperímetro), conectores elétricos e fios, blocos de isolamento e os aderentes (laminados compósitos fibrosos sólidos) que serão soldados (Fig. 10). Termopares podem ser usados para o controle da temperatura em que se desenvolve o processo.

Como já citado acima, este processo possuem um elemento gerador de calor que fica permanentemente instalado na interface da junta, a presença deste elemento de calor é um fator crítico do processo, pois o mesmo afeta o desempenho mecânico da junta em serviço, levando que, em consideração há uma compatibilidade da matriz polimérica com o material que constitui o elemento gerador (Castro, 2014).

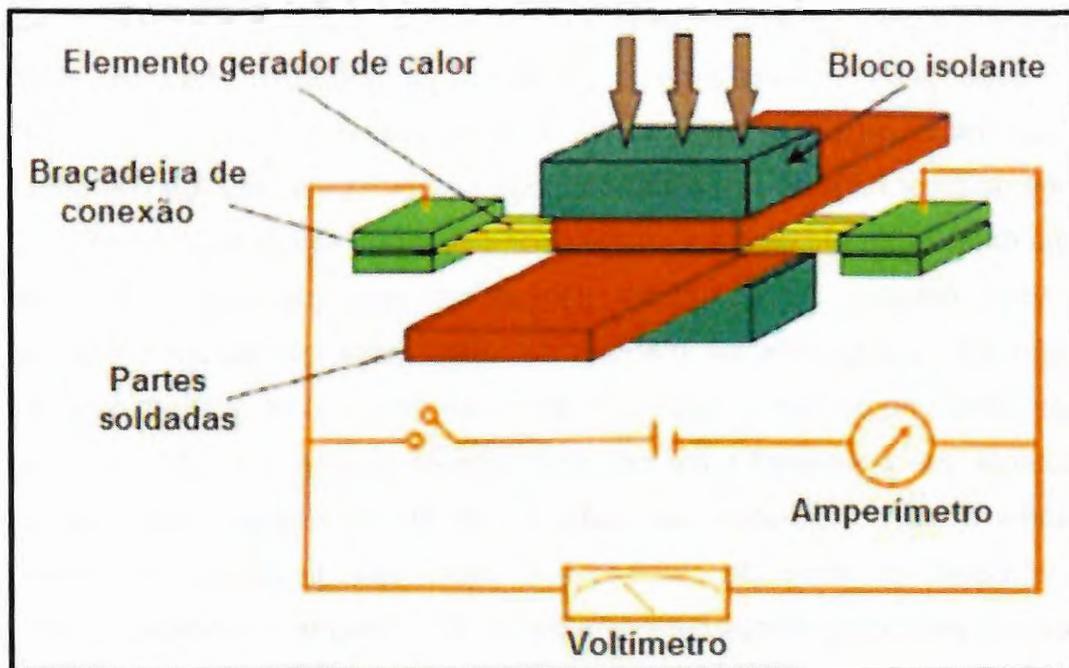


Figura 10: Esquemático de um dispositivo para soldagem de juntas sobrepostas termoplásticas por resistência elétrica (Adaptado de STAVROV & BERSEE, 2005).

Apesar de ser um ponto negativo do processo por resistência elétrica, o elemento gerador de calor é um constituinte importante na soldagem de termoplásticos reforçados por fibras, pois é ele que afeta diretamente a geração de calor, tanto na interface como nas propriedades mecânicas da junta final. O elemento gerador de calor pode ser feito de qualquer material que conduza energia elétrica, tal como malhas de aço, fibras uni ou bidirecionais de carbono, esteja estas na forma pura ou semi-impregnadas com polímero termoplástico (CHAZERAIN, 2009).

2.3.3 Soldagem por indução eletromagnética

A soldagem por indução eletromagnética é o processo de soldagem no qual utiliza corrente elétrica parasita (correntes de *Foucault*, ou ainda “*eddy currents*”). A corrente é gerada pelo campo eletromagnético produzido por uma bobina de indução para produzir calor em materiais condutores, no qual são denominados como susceptores, que são os elementos implantados permanentemente na junta e geradores de calor.

A bobina de indução é um fator importante neste processo, pois o campo eletromagnético gerado pela mesma não é uniforme ao longo da área de soldagem,

de forma que o calor gerado nesta área também não será uniformemente distribuído, o que pode criar regiões onde o processo de soldagem não se estabelece adequadamente, ou mesmo nem ocorra. Porém para se obter uma distribuição mais uniforme de calor na área de soldagem, pode-se optar pela utilização de uma malha metálica (susceptores) como agente gerador de calor (YARLAGADDA *et al.*, 1998).

Na soldagem de estruturas compósitas termoplásticas é necessária a utilização dos susceptores na interface de união, para que as correntes parasitas geradas pelo campo eletromagnético aqueçam através de efeito Joule. São os susceptores que transferirá calor por condução ao polímero ao seu redor, até que este atinja a sua temperatura de fusão, ou de amolecimento. Elementos como o ferro, o níquel, as fibras de carbono e o cobre são utilizados na confecção de susceptores eletromagnéticos para esta classe de soldagem (CAMPBELL, 2006).

Um outro fator muito comum e parecido com o processo de soldagem por radiação infravermelha, é o uso de filmes poliméricos (em geral de mesma natureza daquele que compõe a estrutura compósita a ser unida por soldagem via fusão) são adicionados em ambos os lados do elemento gerador de calor instalado na interface de soldagem, de modo a enriquecer a junta com o polímero e assim evitar a formação de pontos deficientes de resina (elemento que, efetivamente une as partes soldadas) durante o processo de soldagem. Alguns parâmetros importantes podem ser destacados nesse processo, como: 1- tempo de aquecimento (entre 5 a 30 minutos); e 2- pressão aplicada entre as partes (0,34 a 1,38 MPa) (McCARVILLE & SCHAEFER, 2001).

O processo por indução eletromagnética se destaca por apresentar algumas vantagens como por exemplo fazer soldas contínuas movendo-se apenas a bobina de indução ao longo da junta (Fig. 11). Normalmente ele é aplicado para soldagem de partes longas e finas devido ao fato de que a bobina de indução propicia apenas uma razoável penetração do campo eletromagnético induzido (BENATAR & GUTOWSKI, 1986).

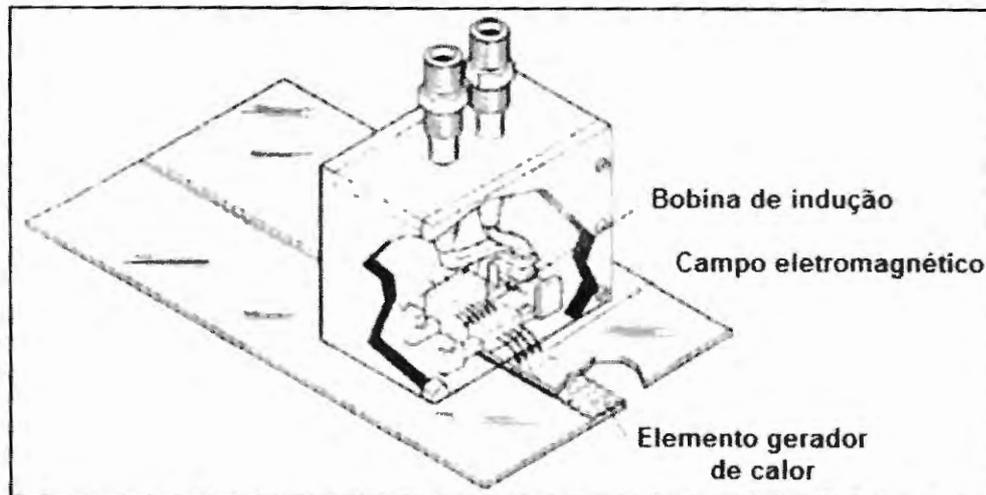


Figura 11: Equipamento para soldagem por indução de juntas sobrepostas termoplásticas (Adaptado de McCARVILLE & SCHAEFER, 2001).

Uma desvantagem neste processo, assim como na soldagem por resistência elétrica, é o elemento gerador de calor, o qual fica permanentemente instalado na interface da junta. A compatibilidade da matriz polimérica com o material que constitui o elemento gerador de calor, acaba sendo um fator crítico do processo, já que a presença deste elemento afetará negativamente, em maior ou menor extensão o desempenho mecânico da junta em serviço.

2.4 Poli-sulfeto de fenileno (PPS)

O PPS é um polímero semicristalino de cadeia linear com temperaturas de transição vítrea por volta de 88°C e de fusão de 280 °C, e como seu próprio nome indica, apresenta um anel de fenileno com um átomo de enxofre (Fig.12). Além de possuir excelente desempenho mecânico a altas temperaturas, este material ainda conta com elevada estabilidade térmica, resistência química, elevada resistência à chama e boa estabilidade dimensional.

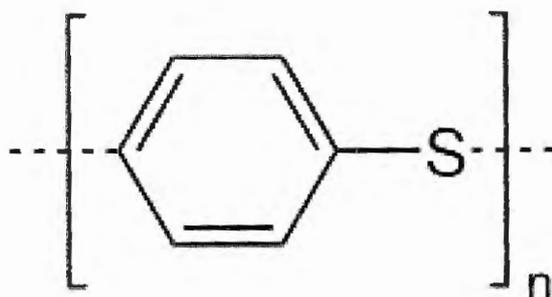


Figura 12: Anel de fenileno com um átomo de enxofre.

Nos polímeros semicristalinos a cristalinidade é muito importante, pois ela tem grande influência nas propriedades químicas e mecânicas. As partes amorfas são mais efetivas em absorver a energia de impacto e a cristalinidade tende a aumentar a dureza e a resistência à tração. A boa conformabilidade do conjunto é garantida, pois a matriz aglomerante de PPS permite a transmissão de carga para as fibras de carbono (SIQUEIRA, 2009). A tabela 2 apresenta algumas informações relacionadas às propriedades mecânicas e térmicas do PPS.

Tabela 2: Principais propriedades do Poli-Sulfeto de Fenileno - PPS (BURAKOWSKI, 2001).

Propriedades Físicas	PPS
Massa específica	1430 kg/m ³
Absorção de umidade	0,03%
Dureza Rockwell M	93
Dureza Rockwell R	130
Dureza Shore	86
Propriedades Mecânicas	
Resistência à tração	69 MPa
Módulo de elasticidade	3,7 GPa
Elongação	4,10%
Módulo de flexão	5,1 GPa
Resistência ao impacto Izod	31 J/m
Propriedades Térmicas	
Temperatura de deflexão a 1,8 MPa	130 °C
Temperatura de fusão	280 °C
Temperatura máxima de serviço ar	140 °C
Temperatura processamento	350 °C
Temperatura transição vítrea	88 °C

Quando combinado com fibras de vidro e de carbono ou outros tipos de reforços fibrosos, torna-se um polímero de alto desempenho, apresentando: boa estabilidade térmica quando submetido por períodos prolongados de tempo a temperatura de até 200 °C; boa estabilidade dimensional; boas características dielétricas e isolantes – que permanecem constantes em uma grande faixa de condições (WIEBECK & HARADA, 2005; ARICI, 2005; PERNG, 2000).

2.5 Análises térmica – Influências da cristalinidade analisadas por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O comportamento mecânico da matriz termoplástica sofre alterações significativas com a variação de sua cristalinidade. E isso se reflete no compósito deste estudo, principalmente nas propriedades mecânicas que são dependentes da matriz, tais como flambagem, compressão e deformação. Por este motivo, se torna importante caracterizar a cristalinidade do PPS na região de soldagem.

O método mais comum de se medir a cristalinidade dos polímeros é através da determinação da entalpia de fusão (calor de fusão) de uma amostra parcialmente cristalina e da comparação deste valor com a entalpia de fusão que seria medida para uma amostra do mesmo material com 100% de cristalinidade. Desse modo, a fração de massa cristalina, X_c , pode ser deduzida a partir da equação (1), onde ΔH_f é a variação da entalpia de fusão e ΔH_f^0 é a variação da entalpia de fusão de uma amostra 100% cristalina.

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \quad (1)$$

Contudo, no caso de alguns polímeros, em decorrência do histórico térmico, eles podem apresentar cristalização a frio, que acontece quando o material tem energia suficiente para organizar parcialmente suas moléculas. Portanto, a aplicação direta da equação acima fornece o grau de cristalinidade depois de se aquecer a amostra a uma temperatura logo abaixo da endoterma de fusão, ou seja, têm seu histórico térmico 'apagado' e não considera a cristalinidade da amostra em seu histórico térmico original. Por conseguinte, para se determinar a cristalinidade inicial da amostra deve-se subtrair o calor associado com a exoterma de cristalização do

calor associado com a endoterma de fusão conforme deduzido na equação (2), onde: X_c é a fração de massa cristalina, ΔH_f a variação da entalpia de fusão, ΔH_c a variação da entalpia de cristalização e ΔH_f^0 a Variação da entalpia de fusão de uma amostra 100% cristalina.

$$X_c = \frac{\Delta H_f + \Delta H_c}{\Delta H_f^0} \quad (2)$$

As influências da cristalinidade na resistência à tração do PPS foram estudadas por Brady (2012), os resultados demonstraram que aumentando a cristalinidade a resistência à tração diminui. Um resultado inesperado uma vez que, na maioria dos polímeros, o aumento da cristalinidade acarreta maior resistência à tração.

A influência da cristalinidade do PPS na resistência ao impacto Izod, mostram claramente uma tendência para o aumento da resistência ao impacto com a diminuição da cristalinidade (LU *et al.*, 2001).

Deporter e Baird (1993) estudou o módulo de flexão e a resistência à tração transversal do PPS reforçado com fibras de carbono submetido a diferentes históricos térmicos, seus resultados mostraram que as propriedades que são mais dependentes da fibra no compósito não dependem do grau de cristalinidade e morfologia da matriz, porém o aumento da cristalinidade do PPS aumentou o módulo e a resistência à flexão a 0° de compósitos com reforço unidirecional (DEPORTER & BAIRD, 1993).

Vários estudos conduzidos por Lee (1995) em compósitos de PPS com fibras de vidro mostraram que o aumento da cristalinidade resulta em um aumento no módulo de compressão axial e no módulo de cisalhamento no plano e, subsequentemente, a carga crítica de flambagem (LEE, *et al.*, 1995).

Pesquisadores (YE, *et al.*, 1995) estudaram a adesão de fibras de carbono em compósitos com matriz de PPS tratados termicamente e, para isso, realizaram ensaios de arrancamento (pull-out). Os testes para amostras T700S/PPS exibiram dois tipos de falha: coesiva e interfacial. Seus resultados mostraram que a média das forças de adesão, para amostras que tiveram falha coesiva, foram independentes da taxa de resfriamento. Porém, para as amostras que tiveram falha interfacial, a média das forças de adesão foram maiores para taxas de resfriamento

menores. Isso pode sugerir que um maior grau de cristalinidade do PPS signifique maior adesão fibra/matriz.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho, apresenta a avaliação das propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento - SBS dos laminados compósitos de matriz termoplástica, soldados pelo processo de radiação infravermelha. O laminado é composto por fibras de carbono e vidro, possuindo um núcleo robusto de fibras de carbono revestido com uma única camada externa de fibras de vidro, reforçado por uma matriz de polímero termoplástico (PPS - *Poli-Sulfeto de Fenileno*), conforme a orientação apresentada no esquemático na figura 13.

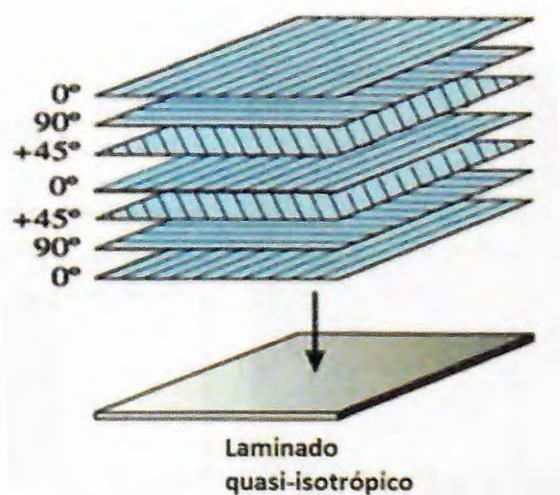


Figura 13: Esquemático do laminado compósito termoplástico quase- isotrópico.

3.1 Laminado compósito fibroso de matriz termoplástica

O compósito utilizado neste estudo é um laminado ou aderente compósito rígido, formado por cinco camadas de tecido bidirecional 0/90 de fibra de carbono com trama ("5HS weave"), dispostas na configuração quase-isotrópica [(0/90), (± 45), (0/90), (± 45), (0/90)], sendo a espessura da lâmina individual de 0,310 mm e sua densidade areal de 280 g/m², originalmente na forma semi-impregnada com polímero PPS. A cada face do laminado foi adicionada uma camada de tecido bidirecional 0/90° de fibra de vidro com trama ("8HS weave") disposta na configuração 0/90°, sendo que a espessura da lâmina individual é de 0,240 mm, também semi-impregnada com polímero PPS. O laminado completo, é constituído de sete camadas, na seguinte sequência de empilhamento: [(0/90)_v; (0/90)_c; (± 45)_c; (0/90)_c; (± 45)_c; (0/90)_c; (0/90)_v]. As letras "C" e "V" correspondem as camadas de

fibras de carbono com PPS e fibras de vidro com PPS, respectivamente. A espessura total do laminado é de 2 mm. As placas foram manufaturadas pela empresa *TenCate Advanced Composites USA, Inc* (2008).

Na região de solda, são introduzidos filmes de PPS de modo a enriquecer a quantidade de polímero. A união dos laminados PPS-C-V para a formação da junta, foi realizada por intermédio do processo de soldagem por radiação infravermelha (a descrição do processo de soldagem será detalhada no item 3.3.2 do Capítulo 3 deste texto). A figura 14 mostra as dimensões finais de um corpo de prova do tipo junta sobreposta simples soldada por fusão.

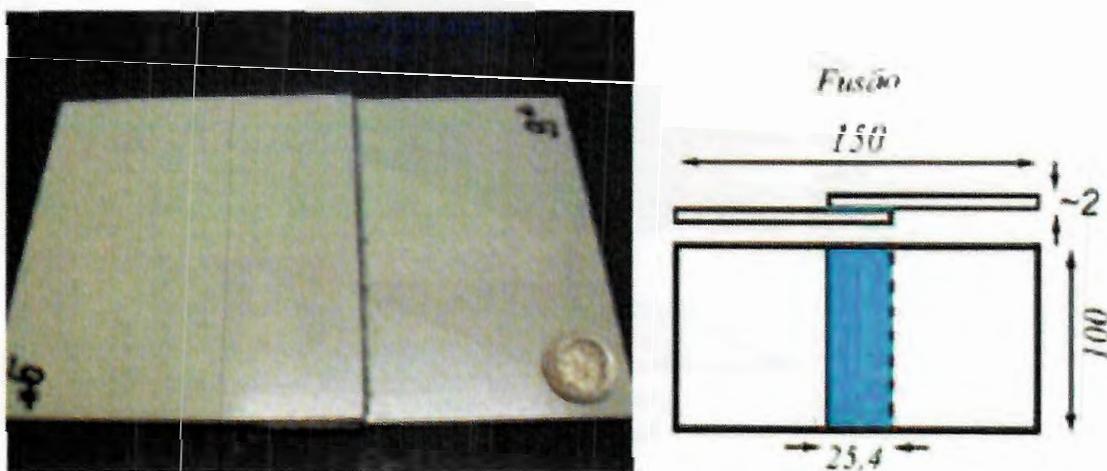


Figura 14: Aspectos e dimensões finais do CDP termoplástico soldado.

3.2 Dispositivo de soldagem por radiação infravermelha

3.2.1 Máquina de soldagem

Na soldagem de laminados PPS-C-V, foi utilizada uma máquina em que o grupo de materiais compósitos estruturais da EESC-USP criou, projetou, fabricou e implementou um sistema automatizado de soldagem (Fig. 15) dos laminados compósitos por radiação infravermelha (Proc. CNPq Universal N° 014/2010).



Figura 15: Dispositivo de soldagem por radiação infravermelha.

O dispositivo de soldagem tem como foco, realizar a soldagem em laminados compósito de matriz termoplástica através da radiação infravermelha. As soldagens podem ser controladas alterando algumas variáveis no processo diretamente no painel elétrico da máquina (Fig. 16), como por exemplo, intensidade da lâmpada, através de um potenciômetro, tempo de aquecimento, tempo de pressão de consolidação dos laminados e tempo de resfriamento. Neste mesmo painel, conseguimos visualizar a pressão no qual a célula de carga está executando no momento da consolidação das juntas e as temperaturas dos termopares existente em algumas regiões na área de soldagem. No painel de controle há uma chave de segurança (*stop*) que serve para parar a máquina em qualquer estágio do processo de solda. Também por motivo de segurança a máquina possui vários sensores que fazem com que ela só inicie o processo de soldagem, quando ambas as portas estejam totalmente fechadas.



Figura 16: Painel de Elétrico do dispositivo de soldagem.

O dispositivo foi projetado pensando em obter possíveis variáveis, com isso na parte interna, através do sistema mecânico (Fig. 17) é possível regular a pressão em que a célula de carga exerce sobre a junta soldada, ajustar a altura dos berços inferior e superior no qual os laminados são fixados, e também a altura da lâmpada em relação aos berços.

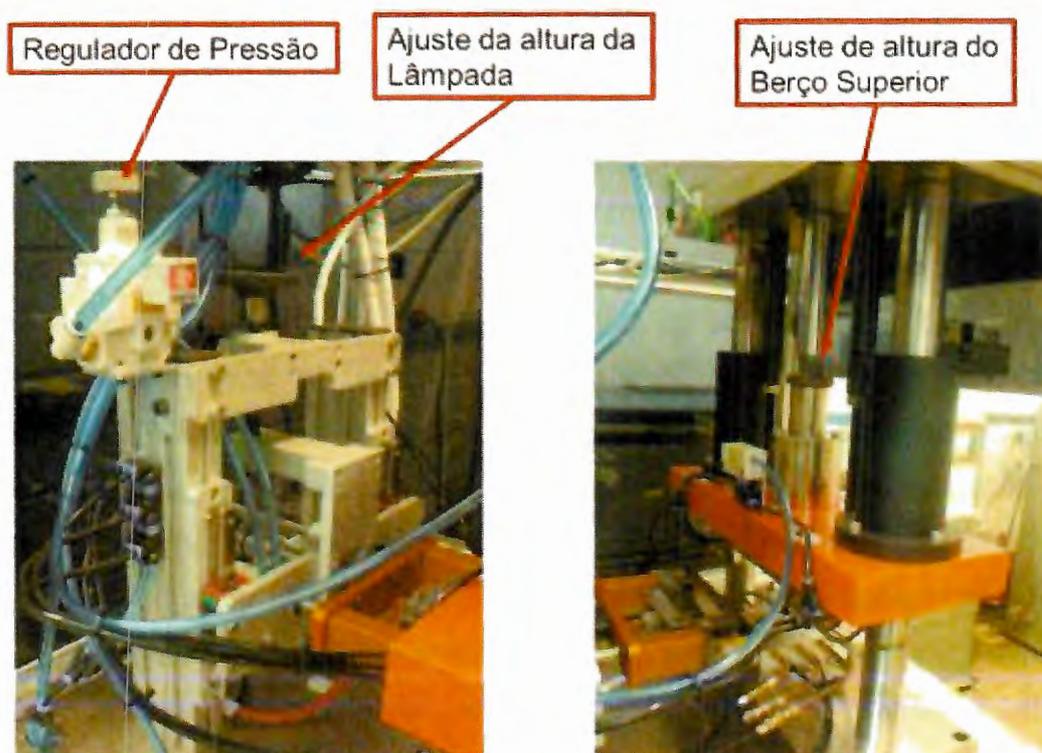


Figura 17: Parte interna do dispositivo de soldagem.

Na parte interna do dispositivo, onde é realizado a soldagem em específico, tem-se os berços superior e inferior, onde são fixados os laminados através de vácuo. Os berços possuem canais internos para passagem de água com a finalidade de obter resfriamento após a união das juntas (Fig. 18). O sistema de refrigeração é fixado na parte inferior da máquina, junto com uma bomba de água que realiza a circulação do refrigerante, e por fim, um reservatório de água para retorno do refrigerante (Fig. 19).

A lâmpada utilizada atualmente consiste em dois tubos de quartzo unidos, contendo um filamento de aquecimento no interior de cada um, com potência total de 2380 W. Ela é fixada em um braço mecânico que tem movimento em um só sentido, protegida por um dispositivo de aço inoxidável, que também auxilia a direção da área de radiação da lâmpada.

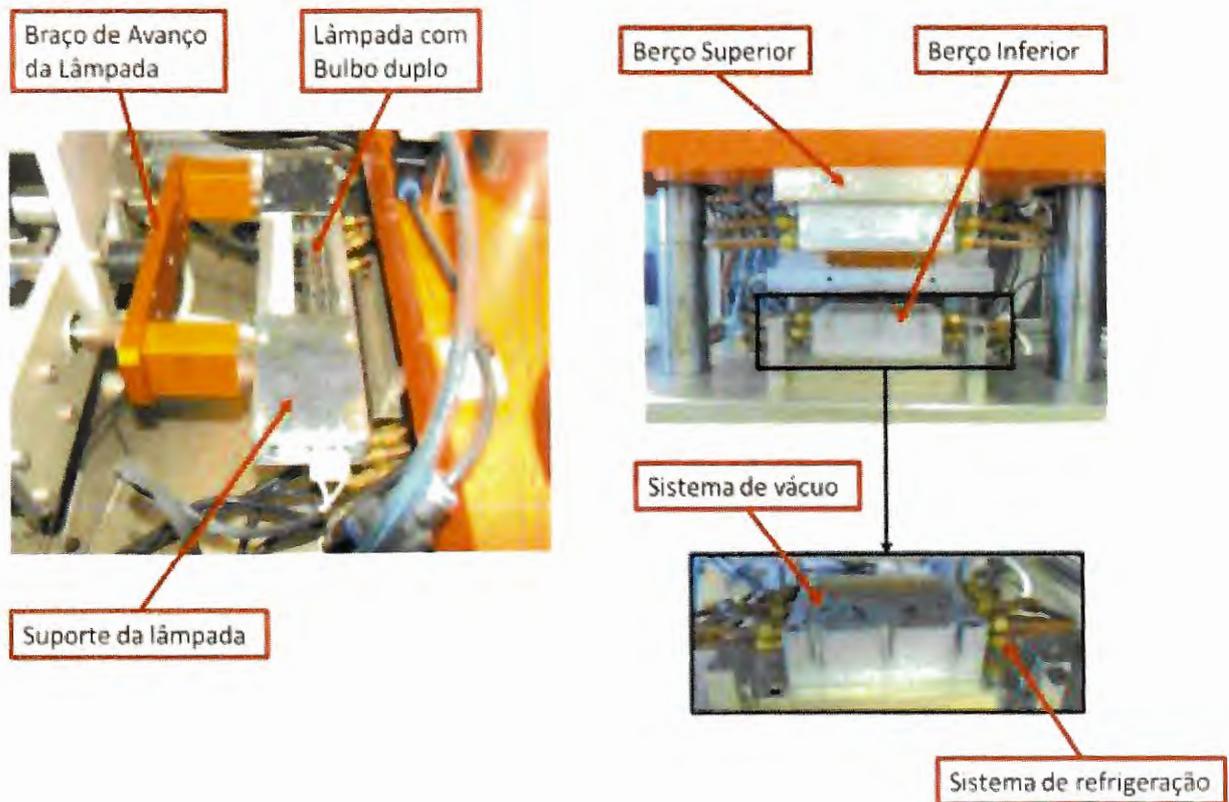


Figura 18: Parte interna do dispositivo de soldagem onde ocorrem a união da junta.

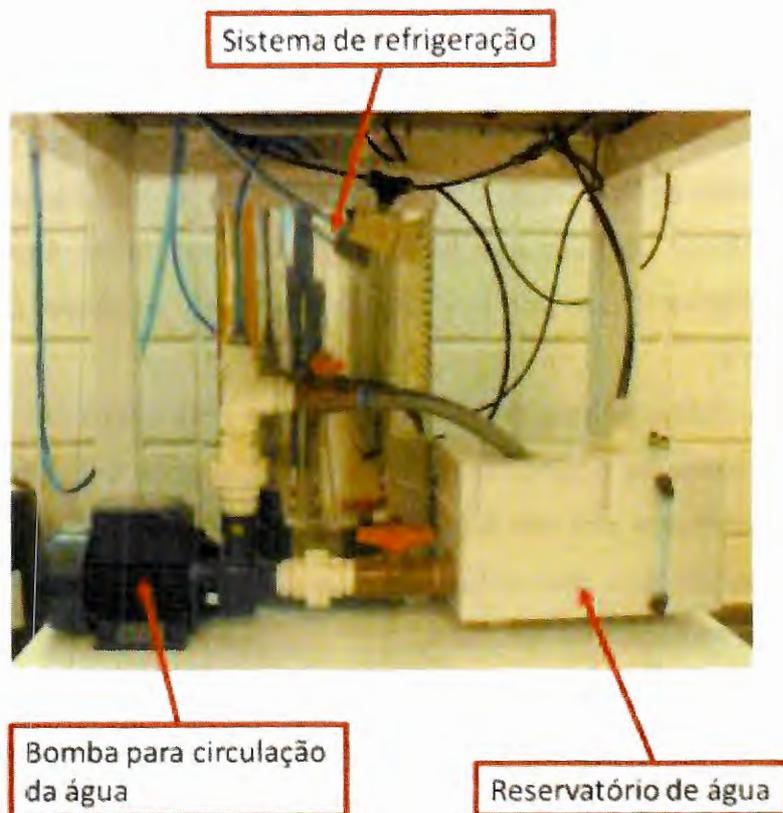


Figura 19: Sistema de refrigeração.

As primeiras soldagens foram realizadas, utilizando uma lâmpada de bulbo simples, porém a mesma não conseguiu produzir soldagens com repetibilidade e homogeneidade satisfatórias, uma vez que esta não emitia radiação de forma homogênea e no comprimento de onda adequado. Em virtude disso, adquiriu-se uma nova lâmpada que atendesse as especificações citada acima.

Abaixo, na figura 20, são mostradas as curvas de espectro da radiação de diversos modelos de lâmpadas (emissores de infravermelho), onde observa-se uma distribuição de potência relativa em função do comprimento de onda, e as temperaturas indicadas se referem ao filamento da lâmpada. A curva roxa (*short wave*) representa o espectro de radiação da lâmpada utilizada atualmente.

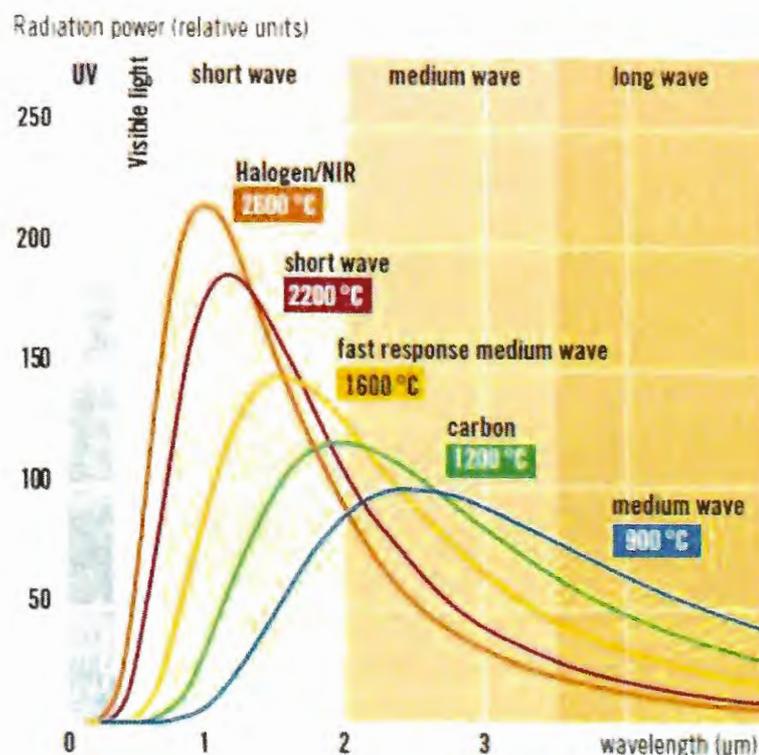


Figura 20: Curvas de espectro de diferentes lâmpadas (HERAEUS GROUP, 2015). Em roxo, curva da lâmpada utilizada atualmente.

3.2.2 Processo de união das juntas

O processo de união das juntas se inicia com a preparação dos corpos de provas (CDPs) dividindo-os em 6 estágios. (1) As placas foram cortadas com dimensões de 25x100 mm (Fig. 21b) e 30x30 mm respectivamente, em uma serra de bancada de 255 mm (10 Pol) 1650 watts – 2704 da marca MAKITA® utilizando um disco de diamante e refrigeração contínua, evitando-se assim uma possível delaminação e aquecimento dos CDPs. (2) Os ajustes das dimensões efetiva, são feitos utilizando uma lixa de granulometria 80 e 120 posteriormente. (3) Os CDPs, são colocados em uma estufa a 80 °C por um período de 1 hora, para retirada da umidade dos mesmos. (4) Os filmes PPS (Fig. 21c), são cortados nas dimensões do laminado, em seguida (5) são aderidos nas superfícies de contato, tanto os filmes, quanto os laminados, são higienizados utilizando uma flanela umedecida com álcool isopropílico, e por fim no estágio 6, através de soldador elétrico (Fig. 21a) são realizadas as aderências do filme no laminado (Fig. 21d).

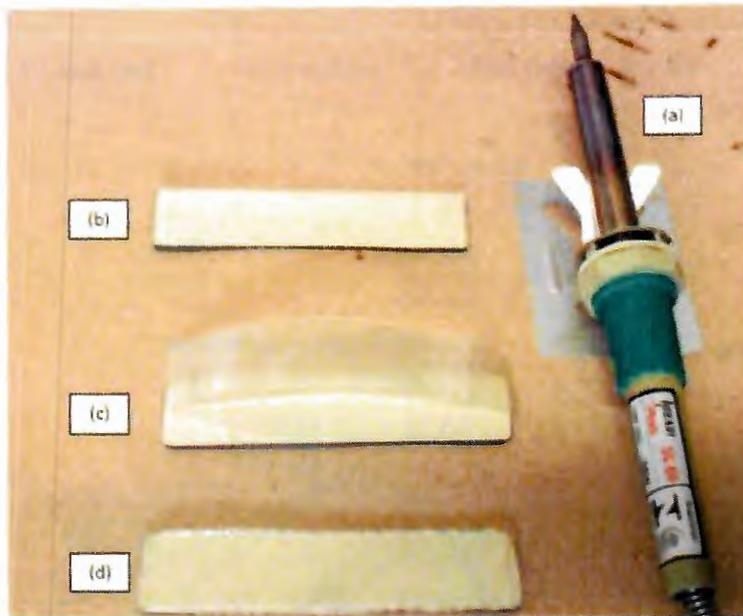
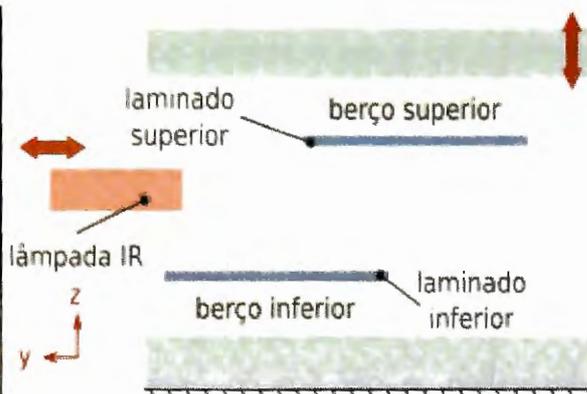


Figura 21: Preparação dos corpos de provas preliminares para realização da soldagem por radiação infravermelha.

A figura 22a apresenta uma foto frontal da máquina de soldagem e a figura 22b apresenta um esquemático da máquina com as principais partes que serão utilizadas para descrever o processo. O sistema de eixos indicado na figura 22 será utilizado ao longo do texto de modo a melhor identificar a orientação dos corpos de prova fabricados. Como mencionado anteriormente, a máquina de soldagem permite controlar diversas variáveis de processo, dentre as quais, podem-se citar: intensidade da lâmpada, tempo de incidência de radiação, distância dos berços ao filamento da lâmpada, tempo de prensagem, carga de prensagem e tempo de resfriamento.



(22a)



(22b)

Figura 22: Máquina de soldagem por radiação infravermelha do grupo de materiais compósitos Estruturais da EESC-USP: (a) foto frontal da máquina de soldagem; (b) esquema simplificado da máquina de soldagem.

O processo de soldagem consiste basicamente em fundir o polímero próximo à superfície dos laminados compósitos de matriz termoplástica, a partir da radiação infravermelha emitida pela lâmpada, no qual pode ser descrito a partir de sete estágios, ilustrado na figura 23.

Na máquina de soldagem, os laminados são posicionados nos berços, superior e inferior, e fixados a partir de um sistema de vácuo (1), em seguida, a lâmpada avança entre os berços e inicia a emissão de radiação, que incide nas superfícies, durante um determinado tempo (2). Após o retorno da lâmpada (3), são acionados os pistões do berço superior (4), colocando as duas superfícies previamente aquecidas em contato (5). A pressão de contato é controlada por uma célula de carga, de acordo com os parâmetros previamente estabelecidos. Após a aplicação da pressão, o berço superior retorna a sua posição inicial (6). O corpo de prova pode ser resfriado sob a ação de convecção natural ou pela ação do sistema refrigerante interno dos berços. No último estágio, estágio 7 as portas da máquina são abertas e a junta pode ser retirada com segurança da máquina.

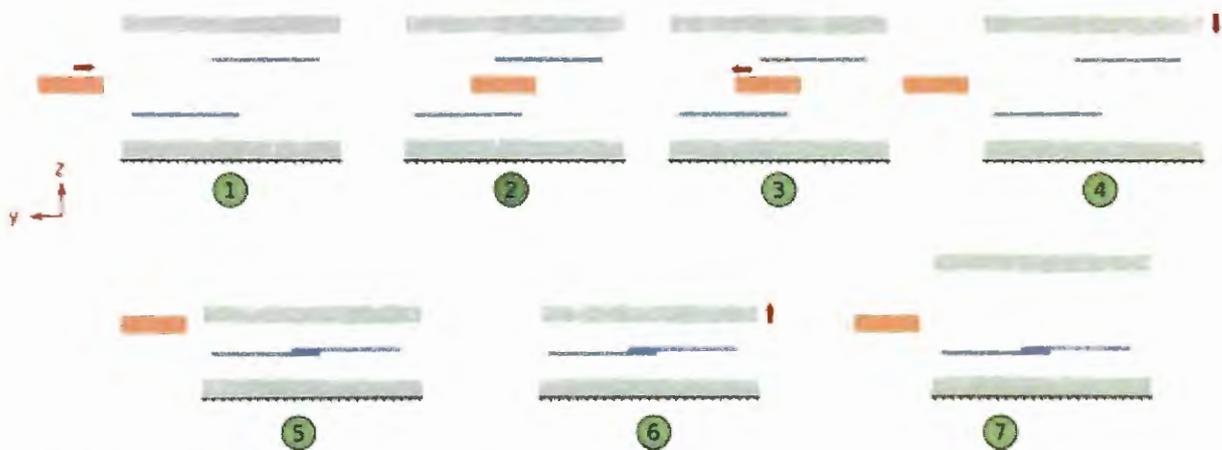


Figura 23: Estágios do processo de soldagem por infravermelho.

A figura 24 apresenta esquematicamente a evolução das variáveis durante o processo de soldagem. No estágio 1, a pressão e temperatura na região de soldagem estão iguais ao ambiente, quando o posicionamento da lâmpada entre os berços inicia o processo de aquecimento das superfícies. Enquanto a lâmpada permanece entre os berços, estágio (2), a temperatura das superfícies aumenta. A taxa de aquecimento é reduzida quando se inicia o processo de mudança de fase do polímero da superfície. Em (3), a lâmpada retorna à posição de origem. De imediato, o berço superior é movido (4) de modo a manter a pressão especificada enquanto a junta soldada resfria (5). Em (6), o berço superior inicia seu retorno a posição de

origem, reduzindo a pressão sobre a amostra e permitindo que essa seja retirada (7). A evolução de temperatura e pressão apresentadas trata-se de um esquema e não representam medidas experimentais do processo de soldagem.

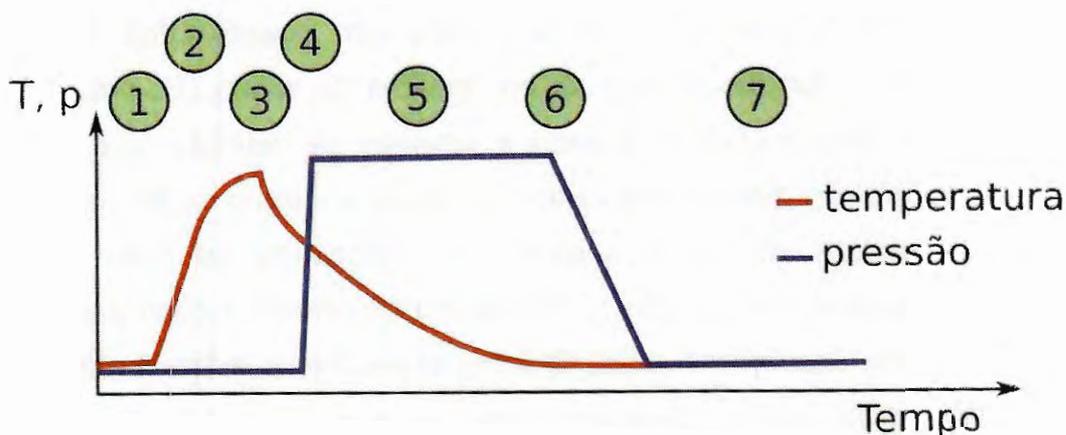


Figura 24: Evolução da temperatura e pressão durante o processo de soldagem.

É importante observar que a aplicação da pressão logo após a saída da lâmpada deve ser imediata de modo a minimizar o resfriamento da amostra.

Inicialmente foram realizadas centenas de soldagens, alterando os parâmetros da máquina como por exemplo: tempo de aquecimento emitido pela lâmpada, tempo de prensagem, entre a superfície dos laminados, pressão utilizada na prensagem dos laminados, intensidade da radiação infravermelha emitida pela lâmpada na superfície do laminado, distância entre os berços onde são fixados o laminado e tempo de resfriamento (Tab. 3).

Tabela 3: Parâmetros de soldagem adotados na fabricação dos corpos de prova.

Varição dos parâmetros de soldagem	
Tempo de aquecimento (s)	25 a 55
Potência da lâmpada (%)	85 a 100
Distância do berço superior em relação ao centro da lâmpada (mm)	25 a 40
Distância do berço inferior em relação ao centro da lâmpada (mm)	25 a 40
Espessura do filme de PPS (mm)	0,2

Em seguida, através de acertos e erros, foram adotadas quatro configurações, para que se pudesse trabalhar dentro de uma determinada janela, conforme descrito na tabela 4.

Tabela 4: Configurações da evolução dos parâmetros dos processos.

Variáveis do Processo						
Configurações do processo	Tempo de aquecimento (s)	Tempo de prensagem (s)	Pressão utilizada (MPa)	Potência da lâmpada (%)	Distância entre os berços (mm)	Tempo de resfriamento (s)
I	40	60	0.40	100	80	30
II	50	60	0.40	90	70	30
III	32	180	0.20	90	65	30
IV	38	180	0.18	90	65	0

3.3 Ensaio de espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho

Com o objetivo de determinar a faixa de frequência, na qual ocorre a maior absorção da onda eletromagnética no filme de PPS, e então utilizá-lo na superfície correta, foram realizados o ensaio de espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho. Para as análises de espectroscopia vibracional, os filmes de PPS foram cortados nas dimensões 10 x 10 mm² e em seguida ensaiados pela técnica de absorção no infravermelho. As análises foram feitas no espectrômetro Perkin Elmer Spectrum 100. Todos os valores foram obtidos em temperatura ambiente (~25 °C) e com 16 varreduras por amostra.

3.4 Análise da Cristalinidade do PPS na região de solda por DSC (*Differential Scanning Calorimeter*)

Para medir a cristalinidade do material foi utilizada a técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial ou *differential scanning calorimeter* (DSC) realizada em um equipamento de DSC da marca *Perkin Elmer Instrument* modelo 8500. Já para o cálculo da cristalinidade (Eq. 1 e 2), foi considerado o valor teórico da entalpia de fusão do PPS 100% cristalino, $\Delta H_0^f = 150.4$ J/g, determinado pela empresa *Ten Cate Advanced Composites* em colaboração com a Universidade de *Twente* (Enschede, Países Baixos) pela combinação de medidas de difração de raios-X e de densidade.

As análises foram realizadas para o filme de PPS virgem e para os filmes que foram fundidos no laminado compósito, submetido à radiação infravermelha nas superfícies das amostras de 25,4 mm².

Para simular as condições de soldagem das amostras, os parâmetros utilizados foram: tempo de aquecimento, 38 segundos; potência da lâmpada, 90%; distância entre os berços, 65 mm; pressão utilizada, 0,18 MPa e tempo de prensagem, 180 segundos. Para simular a prensagem, foi utilizada uma chapa lisa de alumínio no berço superior que impedia a interação química com o polímero superficial fundido. Por fim, pedaços do filme aderido foram raspados cuidadosamente com um estilete e utilizados para análise no DSC.

Foram registradas duas curvas para cada amostra: a primeira de aquecimento da amostra de 60°C até 300°C à taxa de 10°C/min e a segunda resfriando-se a mesma amostra de 300°C para 60°C à taxa de 10°C/min.

Por fim, foram comparados os graus de cristalinidade do polímero virgem e do polímero após a irradiação. Deste modo, permitindo avaliar as modificações possivelmente promovidas pelo processo de soldagem por radiação infravermelha.

3.5 Resistência mecânica ao cisalhamento (*Short-Beam Strength - SBS*)

A fim de avaliar a resistência mecânica das juntas fabricadas, utilizou-se o ensaio mecânico de resistência ao cisalhamento (*Short-Beam Strength - SBS*). Os corpos de prova foram preparados inicialmente, para o ensaio mecânico de acordo com a norma ASTM-D2344, em seguida foram cortados com um disco diamantado, no sentido transversal, conforme ilustrado na figura 25, utilizando sempre um refrigerante para evitar delaminação e aquecimento dos CDPs.



Figura 25: Sentido de preparação dos corpos de provas para realização do ensaio SBS.

Para a realização dos ensaios SBS nos CDPs, foi utilizada uma máquina universal EMIC- DL10000, com uma célula de carga de 10 kN (Fig. 26) e a distância entre os apoios é igual à quatro vezes a espessura do CDP (~16,8 mm). A

velocidade de ensaio foi de 1 mm/min. Para a realização do cálculo de resistência ao cisalhamento interlaminar, foi utilizado a equação (3), onde:

- F^{sbs} : resistência ao cisalhamento interlaminar dado em MPa;
- P_m : máxima carga observada durante o ensaio dados em N;
- b : largura do Cdp (mm) e h : comprimento do Cdp (mm).

$$F^{sbs} = 0,75 \frac{P_m}{bh} \quad (3)$$

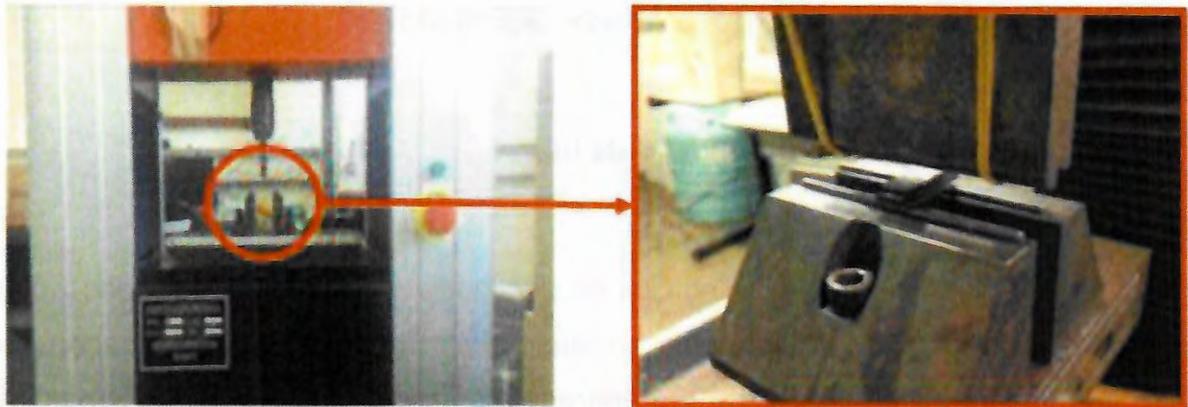


Figura 26: Vista frontal da máquina EMIC; e Dispositivo para os ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Foram preparados corpos de prova, aqui identificados pelas letras T, cortados no sentido transversal em relação a direção x, respectivamente (Fig. 27). Ao total, foram 27 amostras, as quais serão posteriormente comparadas com o resultado da soldagem por resistência elétrica de Castro e colaboradores (2014).

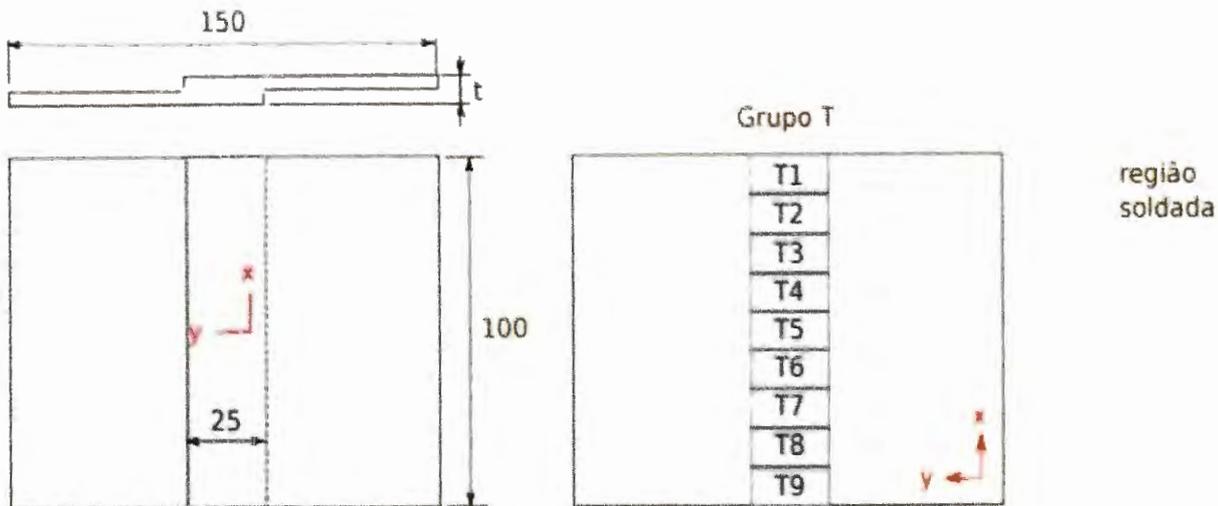


Figura 27: Disposição dos corpos de provas retirados da junta soldada.

3.6 Microscopia óptica de reflexão de luz

Com o objetivo de avaliar indícios de qualidade e de defeitos do processo de soldagem por radiação infravermelha no laminado compósito PPS-C-V, seções de corte materialograficamente foram preparadas e inspecionadas em microscópio óptico de reflexão de luz. As amostras foram cortadas no centro e dividida em duas partes, a primeira parte do corpo de prova foi ensaiada mecanicamente (SBS) e em seguida embutida para a realização da análise. A segunda, que se encontrava na condição de não ensaiado mecanicamente, foi preparada direta para análise materialográfica.

No preparo das seções de observação materialográfica, foram empregadas as melhores práticas além de materiais de consumo especificamente dedicados ao corte, ao embutimento, ao lixamento e ao polimento de laminados compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de alto desempenho, de forma a revelar as nuances nos detalhes das amostras.

Para a obtenção das imagens foi utilizado o microscópio óptico ZEISS® modelo AXIO. Como este modelo é equipado com câmera digital, foi possível fotografar e arquivar as imagens em formato digital com altíssima resolução espacial.

3.7 Avaliação da temperatura obtida na superfície do laminado por Termografia e Termopar

Para avaliar e comparar a temperatura máxima obtida e a temperatura de consolidação nas regiões centrais e laterais dos laminados onde é inserida a radiação infravermelha, foram realizados os ensaios de termografia e termopar. As medidas foram realizadas em quatro pontos no material, sendo um central e outros 3 nas extremidades (Fig. 28), resultando em uma média da temperatura máxima e de consolidação em que o material foi submetido. No caso da termografia, foi utilizado uma câmera Thermacam t360- Flir câmera player software. A câmera foi colocada de frente com o dispositivo de soldagem, afim de captar as imagens, em seguida utilizou se o software Matlab para a análise dos dados (Fig. 28).



Figura 28: Câmera Thermacam t360- Flir câmera player software.

No caso do termopar utilizou-se um termômetro digital de quatro canais – MT1044. Os CDPs foram furados em 4 posições, próximo a superfície para que se pudesse fixar os termopares, e com isso captar os respectivos dados (Fig. 29).



Figura 29: Termômetro digital de quatro canais – MT1044.

3.8 Ensaio utilizando a Célula de Carga

Com o objetivo de se estabelecer um valor real de pressão sobre a área total da amostra, utilizou-se uma célula de carga com capacidade de 10 toneladas, cuja saída inicial é dada em Força (N), que posteriormente foi convertida para pressão considerando-se amostras com área prensada de 900 mm². A célula de carga foi colocada entre os berços inferior e superior, na região central de onde é realizado a fusão dos laminados (Fig. 30 A), com intuito de simular a pressão real que ocorre nas juntas soldadas. Para a aquisição de dados, a célula de carga ficou acoplada à um aquisitor de pressão e os no qual foram gerados utilizada o software catman® AP 2.2 (Fig. 30 B).

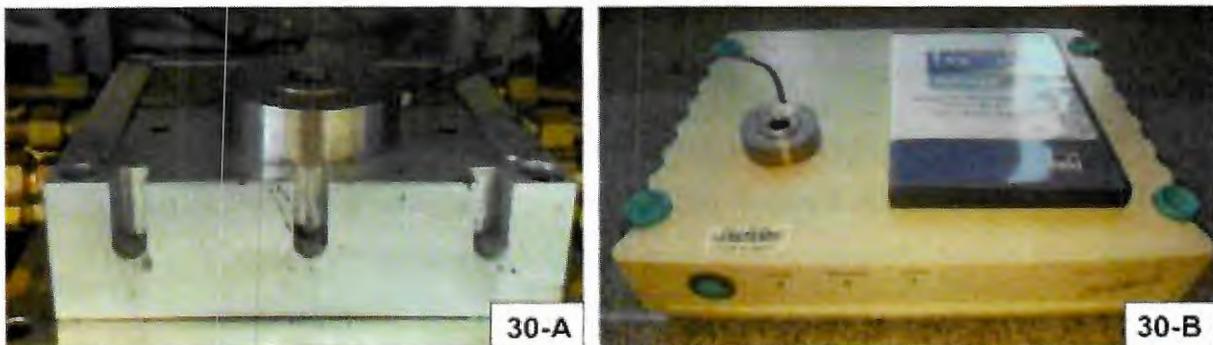


Figura 30: Ensaio célula de carga: 30-A Região central, onde foi colocado a célula de carga e; 30-B- Aquisitor de pressão utilizado.

3.9 Análise de variância ANOVA (análise de variância)

Analises de variâncias ANOVA foram realizadas afim de verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em

alguma variável dependente, permitindo que vários grupos sejam comparados a um só tempo. Utilizando os parâmetros de soldagem por radiação infravermelha no qual a máquina de soldagem nos possibilita alterar como: tempo de radiação (30, 38 e 46 segundos), pressão de consolidação (0,1, 0,18, 0,29 MPa) e tempo de prensagem (30, 180 e 300 segundos), as análises foram feitas em 5 amostras para todas as 27 configurações, resultando em 135 espécimes.

3.10 Ensaio mecânico SBS com correlação de imagens (DIC - *Digital Image Correlation*)

Os ensaios experimentais foram realizados através de uma máquina EMIC-DL10000, com uma célula de carga de 10 kN (Fig. 26), com uma velocidade de 0,5 mm/min. Para o registro das imagens foi utilizada uma câmera fotográfica digital Canon EOS REBEL T5 e um tripé para sua fixação e mobilização. A Canon EOS REBEL T5, de 18 Mpixels. As imagens foram capturadas na resolução máxima da câmera (5202 x 3465 pixels), com um tempo de exposição de aproximadamente 0.0167 utilizando uma objetiva Canon Macro 100 com alcance focal de 100 mm e abertura máxima f/2.8. A câmera foi colocada o mais próximo possível dos CDPs, cerca de 5 centímetros (Fig. 31-A), usando a máxima resolução da câmera.

Devido a limitação da câmera fotográfica, foram realizados disparos de 6 em 6 segundos para se obter as imagens, reduzindo assim a amostragem possível e desejada. Os CDPs, foram previamente pulverizados com tinta branca e preta fosco para apresentarem uma textura aleatória e típica de um padrão "*speckle*" permitindo assim o adequado funcionamento do método (Fig. 31-B).

A técnica do ensaio de correlação de imagens, além de ter sido aplicada nesse projeto (soldagem por radiação infravermelha PPS-C-V), também foi realizada em outro processo de soldagem, como: soldagem por resistência elétrica (PPS-C-V), afim de obter uma comparação dos resultados entre os processos de soldagem.

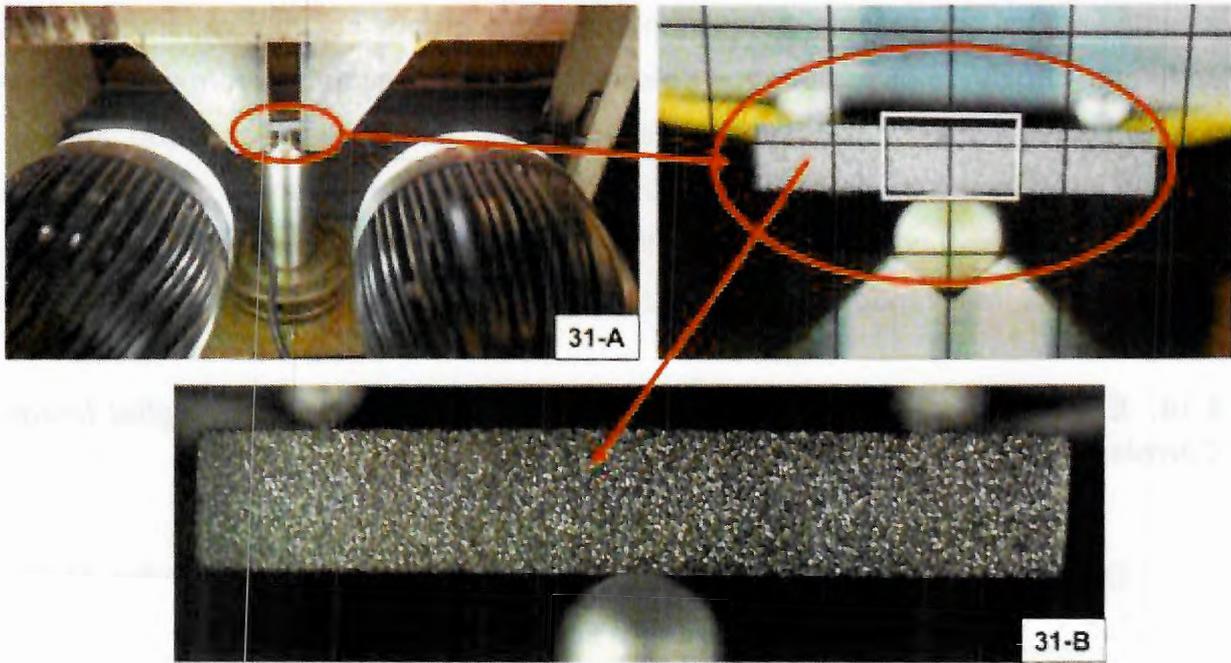


Figura 31: Ensaio correlação de imagens. Distância entre a câmera e máquina de ensaio de tração 31-A; Amostra pulverizados com tinta branca e preta fosco 31-B.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho próximo (FT-NIR)

Na figura 32, são mostradas duas curvas do espectro do filme de PPS com espessura de 0,2 mm: a curva em vermelho corresponde a radiação incidindo na superfície brilhante e a curva em azul, a radiação sobre a superfície opaca do filme. No eixo horizontal, está indicado o número de onda [cm^{-1}] e, no vertical, a potência relativa, ou seja, a razão entre a potência de retorno e a potência incidente.

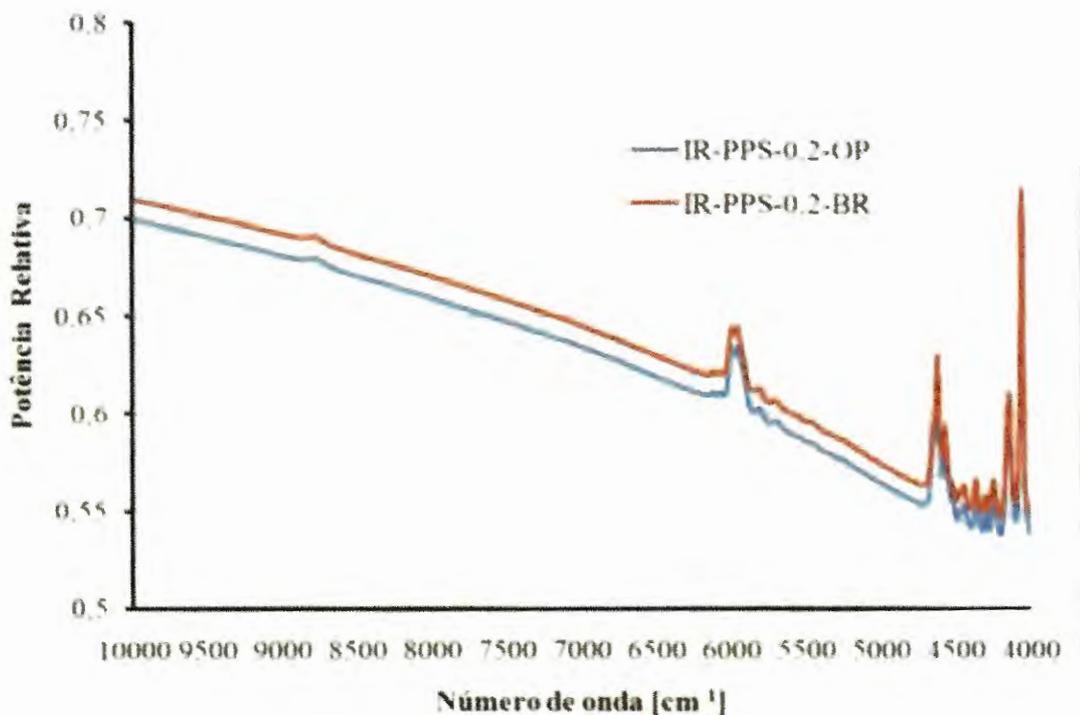


Figura 32: Curvas de espectro do filme de PPS com espessura de 0,2 mm: a-) em vermelho com a radiação incidindo na superfície brilhante e b-) em azul na superfície opaca do filme.

Pode-se verificar que no gráfico acima, a faixa de maior absorbância (menor transmitância), da radiação infravermelha para ambos os lados do filme, está localizada entre os números de onda de 4500 cm^{-1} e 4300 cm^{-1} . Com isso, o lado opaco (curva azul) absorve um pouco a mais e, portanto, será o lado exposto à incidência da radiação infravermelha no processo de soldagem.

4.2 Análise da cristalinidade do PPS na região de solda por DSC (Differential Scanning Calorimeter)

Abaixo são mostradas as curvas de DSC de aquecimento e resfriamento para o filme de PPS virgem (Fig. 33) e para os filmes que foram irradiados (Fig. 34) pelo processo de radiação infravermelha nas superfícies das amostras de 25 mm². Os picos dos eventos endotérmicos estão representados de forma ascendente e os picos exotérmicos são os descendentes. As análises foram realizadas a partir da primeira varredura e primeiro aquecimento, portanto representam a cristalinidade presente nos laminados processados.

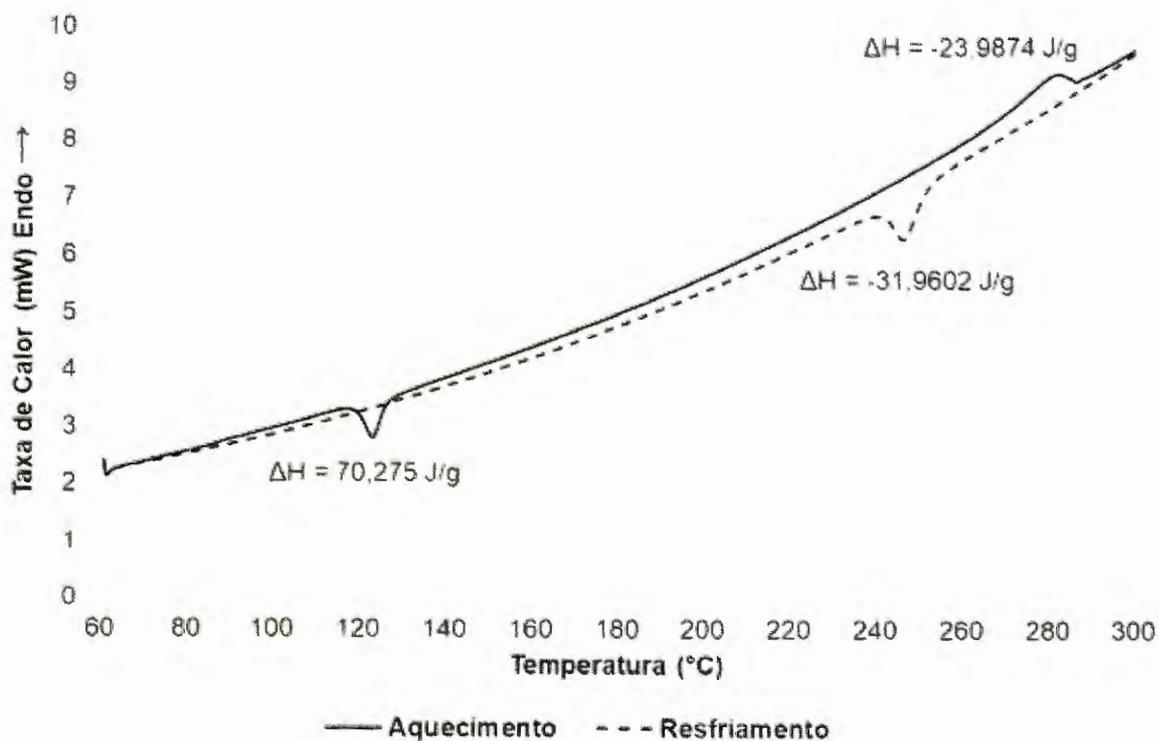


Figura 33: Curva de DSC de aquecimento e resfriamento do filme de PPS virgem.

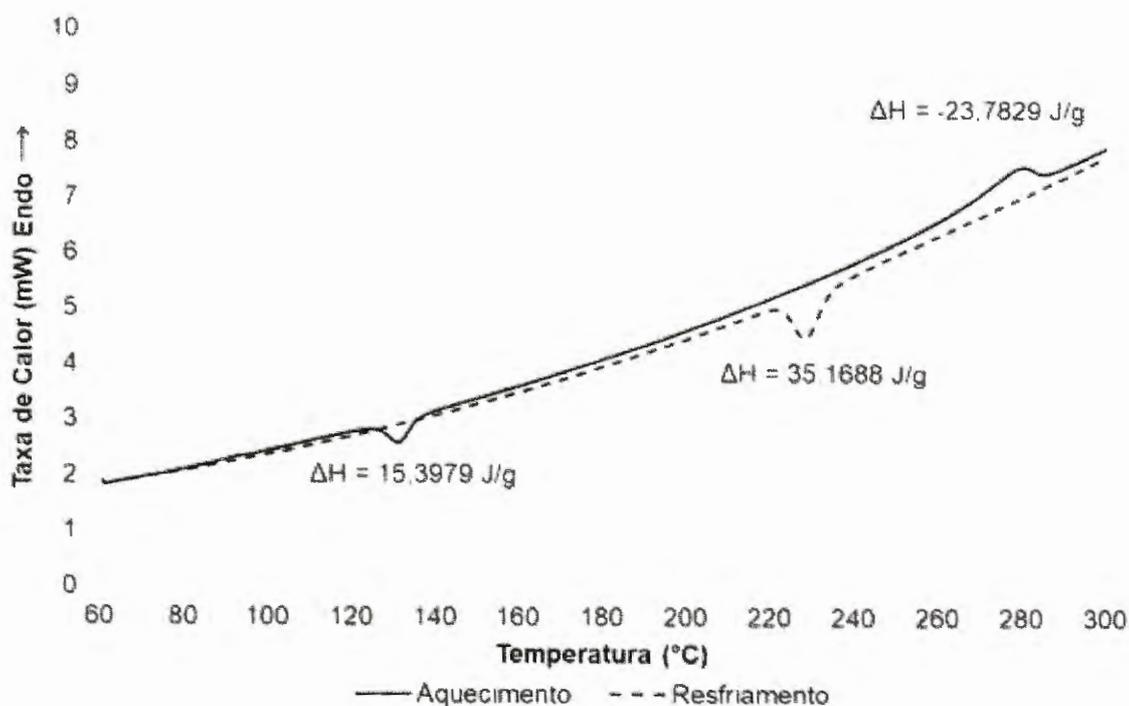


Figura 34: Curva de DSC de aquecimento e resfriamento do filme de PPS irradiado.

O grau de cristalinidade dos materiais (Tab. 5) foi medido de acordo com a equação (1 e 2), apresentada em revisão bibliográfica (Item 2.5) e utilizando os cálculos das entalpias de cristalização e fusão geradas pelo software de análise gráfica do equipamento.

Tabela 5: Graus de cristalinidade obtidos pela análise das curvas de DSC, no momento do aquecimento e resfriamento.

CONDIÇÃO	CRISTALINIDADE (%) (AQUECIMENTO)	CRISTALINIDADE (%) (RESFRIAMENTO)
Filme Virgem	4,27	21,25
Filme irradiado	5,58	23,38

Esses resultados mostram que os filmes de PPS virgem e os submetidos a irradiação infravermelha possuem baixa cristalinidade. Dessa forma, fica caracterizado que na região de soldagem, o polímero apresenta uma configuração amorfa. Assim, apoiando-se na literatura, já citada, é possível prever algumas propriedades mecânicas na região de solda do compósito deste estudo.

Comparado ao PPS com menor cristalinidade, é de se esperar que a região da solda apresente melhor tenacidade ao impacto, maior deformação plástica, menor módulo de compressão axial, menor módulo de cisalhamento no plano e possivelmente menor adesão à fibra.

Ao analisarmos os gráficos nas figuras 33 e 34, é possível perceber que a entalpia de fusão das amostras foi praticamente a mesma: aproximadamente 24 J/g. Esse é um resultado importante, uma vez que Sergeyev e colaboradores (1977) estudaram a influência do tempo de permanência do PPS a uma temperatura pouco acima de seu ponto de fusão. Os resultados de suas investigações mostraram que a entalpia de fusão diminuía de 21,42 J/g para 0 conforme o PPS era mantido sob aquecimento a 320 °C em ar por 0 a 98 horas (SERGEYEV *et al.*, 1977). Assim, pode-se perceber, que o valor da entalpia encontrada por Sergeyev e colaboradores (1997) para o PPS antes da degradação térmica é muito próximo ao encontrado para o PPS deste estudo: 21,42 J/g e 24 J/g, respectivamente. Portanto, conclui-se que o tempo que as amostras permaneceram sob a irradiação infravermelha não acarretou em degradação térmica significativa do PPS.

Através da tabela 5, verifica-se que praticamente não houve diferença no grau de cristalinidade das amostras irradiadas em relação ao filme virgem, todas obtiveram um grau de cristalinidade de aproximadamente 20%. Também não houve alterações significativas no formato de todos os picos característicos, tanto nas curvas de aquecimento como de resfriamento. Esses fatos servem, novamente, para apoiar a ideia de que não houve degradação térmica significativa durante o aquecimento por radiação infravermelha.

Ao comparar todos os gráficos de DSC é possível notar que houve um retardamento na cinética de cristalização em relação ao filme virgem, tanto no aquecimento como no resfriamento. Tomando como referência a temperatura de pico na exoterma de cristalização durante o aquecimento, a cinética de cristalização das amostras irradiadas iniciou-se em aproximadamente 7 °C depois do início da amostra do filme virgem. Esse fenômeno foi ainda mais visível durante o resfriamento: a cinética de cristalização das amostras irradiadas iniciou-se em aproximadamente 16 °C depois.

Quando o PPS é aquecido no ar a temperaturas acima do ponto de fusão, a estrutura química do polímero muda devido à alongação e/ou ramificação e reticulação (cross-linking). Quando a reticulação ocorre, a estrutura molecular do

PPS muda, levando a uma diminuição na linearidade de sua estrutura. A diminuição da linearidade na estrutura inibe o empacotamento das cadeias no estado cristalino e, isso, pode ter sido a razão pela qual a cinética de cristalização das amostras irradiadas iniciou-se mais tarde.

4.3 Verificação da temperatura na superfície do laminado através dos ensaios de termografia e termopar para efeito de comparação.

Na tabela 6, é mostrada uma avaliação das temperaturas máxima e de consolidação no compósito laminado para um tempo de exposição de 30, 38 e 46 segundos.

Considerando a T_m (Temperatura de fusão) do PPS que é de 280°C , podemos concluir que a temperatura de consolidação para um aquecimento de 38 segundos é o ideal, pois não existe aquecimento excessivo de exposição como no caso de 46 segundos, e nem insuficiência como no caso de 30 segundos.

Também observou-se um maior desvio padrão para aquecimentos superiores, levando ao aquecimento excessivo e maior heterogeneidade de aquecimento que poderia aumentar as chances de empenamento do material. Contudo, o contrário foi observado para a resistência aos ensaios SBS, em que tempos de aquecimento superiores ocasionaram menores desvios na resistência.

Os desvios das temperaturas observados na tabela 6 podem ser explicados pela superfície que uma amostra de 30×30 mm oferece, acarretando em um efeito de borda considerável. Além disto, a distribuição de radiação oferecida pela lâmpada não é homogênea. Vale ressaltar, que os quatro pontos analisados nas amostras foram escolhidos de modo a avaliar a distribuição de energia.

Tabela 6: Avaliação das temperaturas máxima e de consolidação no compósito laminado para um tempo de exposição de 30, 38 e 46 segundos.

Material	Média da temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Média da temperatura de consolidação ($^{\circ}\text{C}$)
PPS/C-V 30s de exposição	289 \pm 21	231 \pm 16
PPS/C-V 38s de exposição	345 \pm 37	280 \pm 30
PPS/C-V 46s de exposição	416 \pm 43	305 \pm 46

4.4 Resultados do ensaio da Célula de Carga

Nos ensaios realizados utilizando a célula de carga, foi possível observar que as pressões obtidas a partir da célula de carga, de 100 e 180 kPa levaram cerca de 9 e 5 segundos respectivamente, para se estabilizar (95% do valor final), porém a pressão mais alta, como de 290 kPa, levou aproximadamente 14 segundos, o que é consideravelmente grande para um tempo de consolidação de 30 s (Fig. 35). Quando liberado o ar, a pressão rapidamente cai para zero, pois não existe acomodação dos mecanismos da máquina como no caso de pressurização.

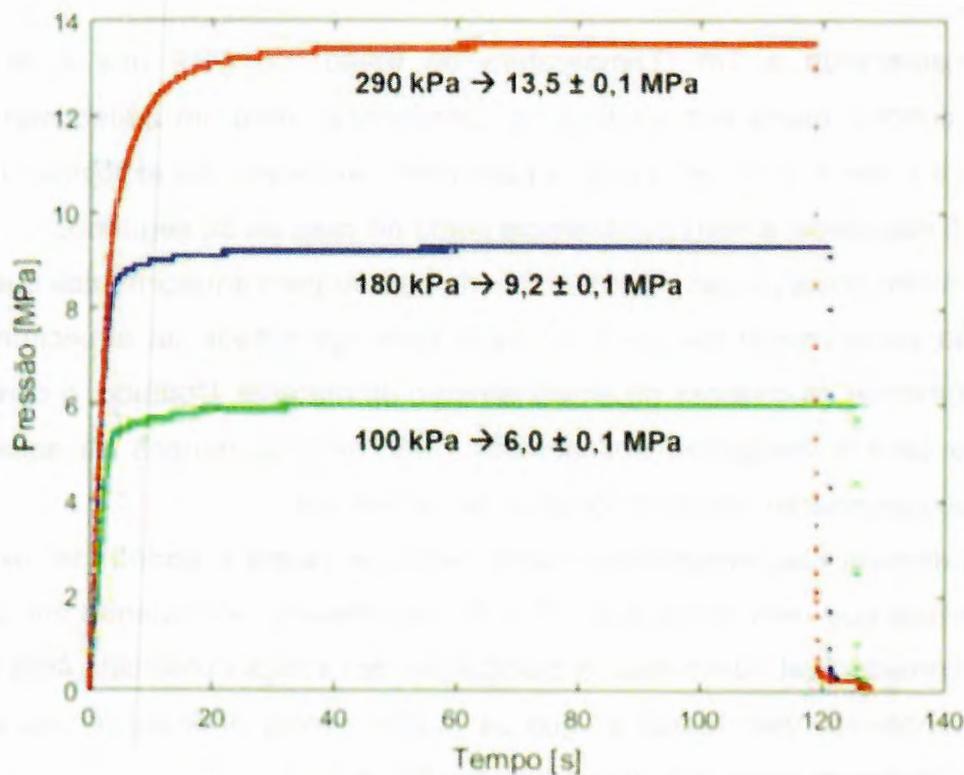


Figura 35: Pressões estabelecidas na amostra com variação de 290, 180 e 100 KPa (valores dados pela célula de carga acoplada a máquina).

4.5 Soldagem em laminados compósitos de matriz termoplástica por radiação infravermelha

Após algumas soldagens preliminares foi possível identificar visualmente os parâmetros que obtiveram as melhores uniões, ainda que com as flutuações da radiação emitida pela primeira lâmpada.

Ao analisar-se no laminado isoladamente a deposição do filme de PPS pós-aquecido, foi possível constatar uma falta de homogeneidade na região de aderência (Fig. 36). Isso, provavelmente se deve à falta de uniformidade na distribuição da radiação infravermelha emitida pela lâmpada na área de solda da junta, a qual se concentra na região central.



Figura 36: Laminado PPS-C-V, soldado pelo processo de radiação infravermelha.

4.6 Resultados das configurações I e II do processo de soldagem

O ensaio mecânico de *Short-Beam Strength* - SBS, teve como objetivo analisar e comparar a qualidade da soldagem nas juntas do compósito soldado por radiação infravermelha e pelo método de resistência elétrica realizada por Castro e colaboradores em 2014.

Foram realizados 3 ensaios para cada uma das posições marcadas nas juntas (Fig. 25 - Capítulo 3), utilizando os parâmetros da configuração I, conforme citado na tabela 4 – capítulo 3. A figura 37 mostra os valores médios e os respectivos desvios-padrão da tensão de cisalhamento na fratura dos corpos de prova extraídos das juntas.

No gráfico, da figura 37, observa-se que na média, a soldagem por resistência elétrica mostrou-se aproximadamente 26% mais resistente a tensão máxima de cisalhamento do que a soldagem por radiação infravermelho. Essa diferença se deve, como explicado anteriormente, a não aderência do filme de PPS nas regiões

onde a radiação infravermelha incidente foi fraca. Esses resultados podem ser comparados com as citações dos autores Jeong (1997); Almeida (1994); Stone, (1975), em que quanto maior a quantidade de vazios ou áreas sem aderência em uma junta soldada, menor a sua resistência ao cisalhamento interlaminar. Defeitos em compósitos agrava suas propriedades mecânicas.

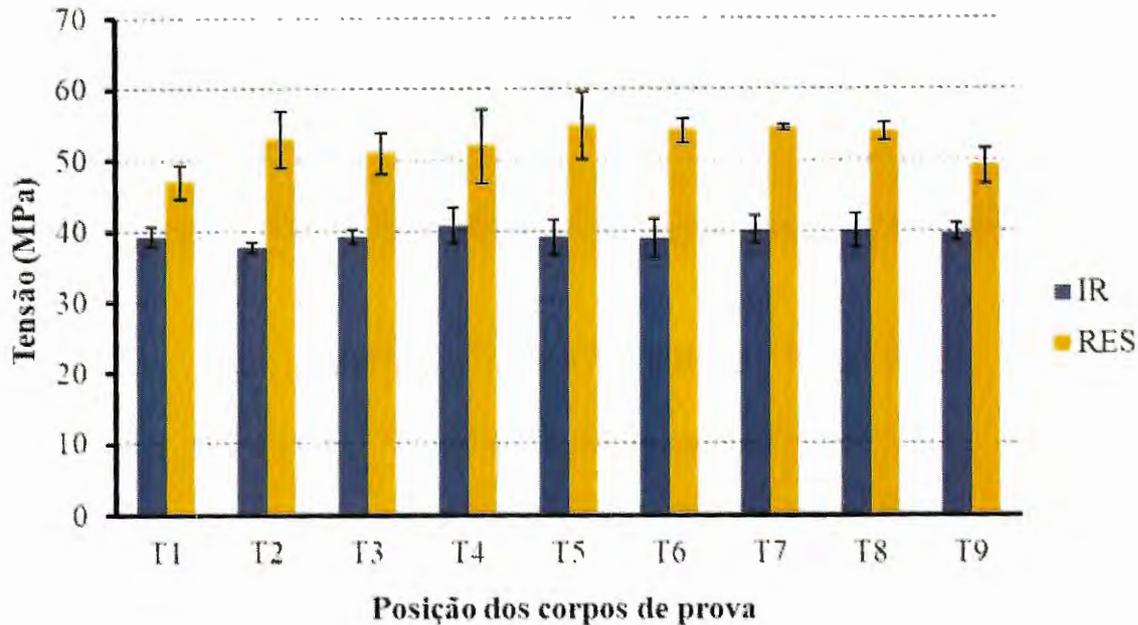


Figura 37: Valores médios e respectivos desvios-padrão da tensão máxima de cisalhamento para CDPs soldados na configuração I.

Posteriormente foi realizado mais um conjunto de soldagem dos laminados por irradiação de luz infravermelha, utilizando os parâmetros da configuração II, conforme descritos na tabela 4. Na figura 38 é possível notar que houve uma melhora na resistência mecânica, quando comparada à configuração I, após a modificação de parâmetros como: tempo de aquecimento (de 40 para 50 s) visando obter um maior tempo de radiação na amostra e distância entre os berços (de 80 para 70 mm) visando evitar a ocorrência de degradação na amostra, mesmo assim, o processo de soldagem por resistência elétrica ainda se mostrou mais eficiente, em torno de 20% mais resistente, do que o processo de soldagem por radiação infravermelha.

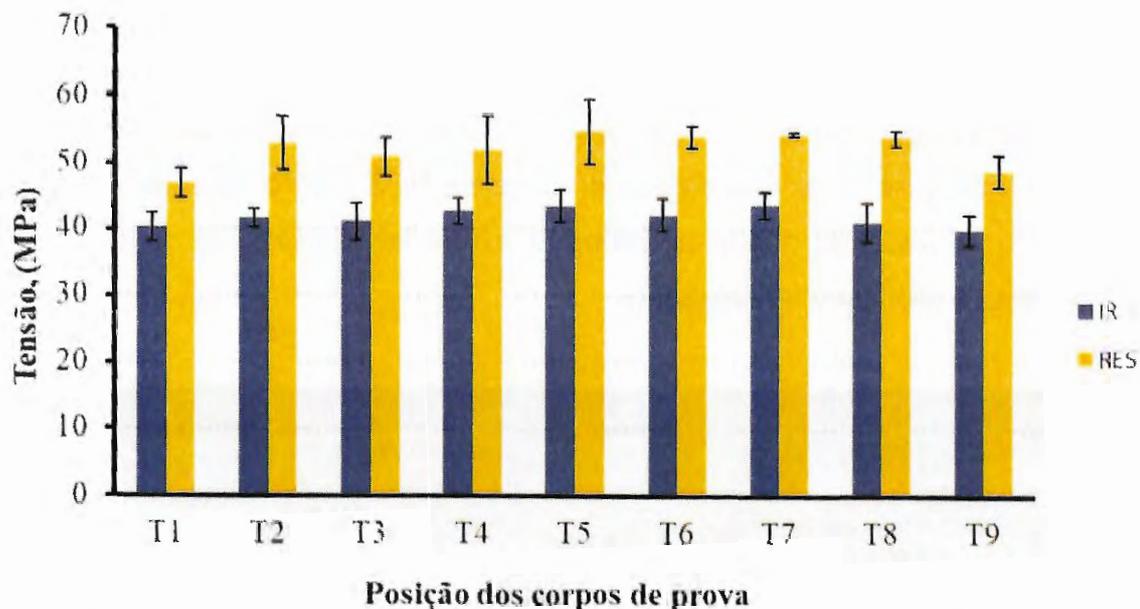


Figura 38: Valores médios e respectivos desvios-padrão (CDPs) configuração II e soldagem por resistência elétrica) da tensão máxima de cisalhamento.

Análises metalográficas foram realizadas nos corpos de prova nas condições de ensaiado mecanicamente e não ensaiados. Na figura 39, vê-se a micrografia do corpo de prova da configuração I, na condição de não ensaiada. Abaixo seguem os defeitos comumente encontrados no processo de união dos laminados:

- Microtrincas: pequenas trincas entre os feixes de fibras (circulada em azul); este defeito teve origem possivelmente pelo excesso de pressão aplicada (0,4 MPa).
- Ausência de coesão: defeito em algumas regiões onde não houve aderência entre os filmes (circulado em vermelho). As possíveis causas para isso são a falta de aquecimento homogêneo na superfície do laminado ou devido a um resfriamento precipitado, ou seja, o filme pode ter se solidificado no tempo que precede o contato entre as camadas.
- Ausência de coesão interfacial: defeito em algumas regiões onde o filme não aderiu ao laminado (circulado em verde). Uma das possíveis causas é a ausência de fusão completa, em que o filme fundido pode não ter conseguido atingir uma temperatura suficiente para adquirir a viscosidade necessária para penetrar entre as fibras de vidro superficiais. Outras possibilidades são as já citadas para a falha coesiva.

- Vazios: defeito caracterizado pela ausência de material sólido (circulado em amarelo). Os possíveis motivos de seu surgimento são o aquecimento excessivo, que induziu a degradação ou expulsão de voláteis, e a falta de aderência preliminar das bordas do filme de PPS com o ferro de solda, com isso o ar pode ter ficado aprisionado e não ter conseguido se desprender durante o processo de soldagem.

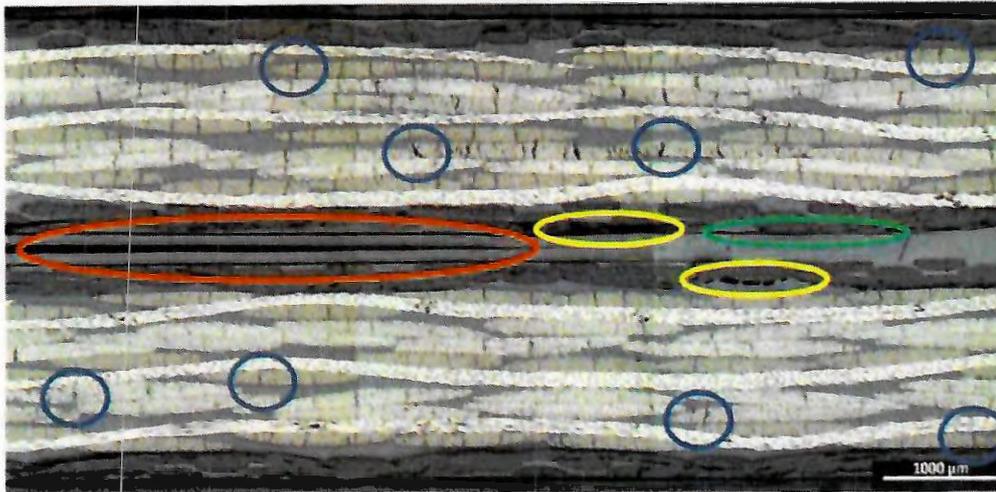


Figura 39: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de defeitos, referente a configuração I na condição de não ensaiada mecanicamente.

Na figura 40, vê-se se a micrografia do corpo de prova soldado de acordo com a configuração I, agora na condição ensaiada mecanicamente para SBS. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos. Através destas micrografias, pode-se ter uma visão geral dos defeitos e falhas de coesão em relação às micrografias das juntas não ensaiadas. Assim, nota-se um aumento das trincas na interface entre laminados, coalescimento dos vazios, agravamento das microtrincas entre os feixes de fibras, propagação de trincas translaminares (circulado em roxo) e interlaminares (circulado em laranja) em regiões previamente enfraquecidas.

As codificações de cores serão utilizadas para as figuras de materialográfica que seguem nesta seção.

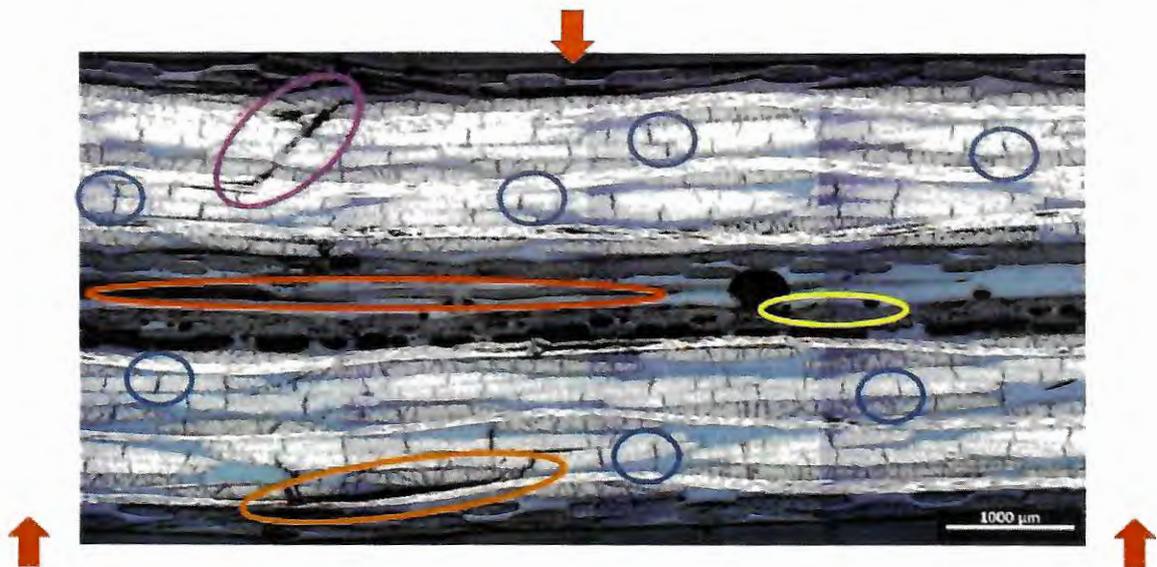


Figura 40: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes à configuração I na condição de ensaiada para SBS.

Nas figuras 41 e 42 observa-se as micrografias das amostras ensaiadas mecanicamente e não ensaiadas referentes à configuração II. Da configuração I para a II foram alterados parâmetros como: tempo de aquecimento (passando de 40 para 50 segundos) e distância entre os berços (alterando de 80 para 70 mm) (Tabela 4).

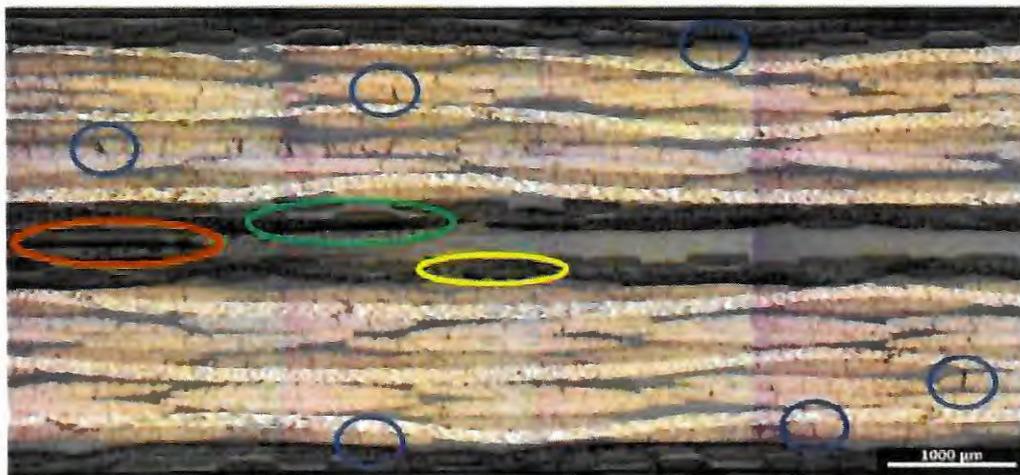


Figura 41: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de defeitos, referentes a configuração II na condição de não ensaiada mecanicamente.

A análise das figuras 41 e 42 na condição de ensaiada mecanicamente, permiti concluir sob a redução dos defeitos e falhas de soldagem no ensaio,

respectivamente. A principal melhora observada se dá na região de soldagem, com menor parcela de defeitos coesivos e interfaciais.

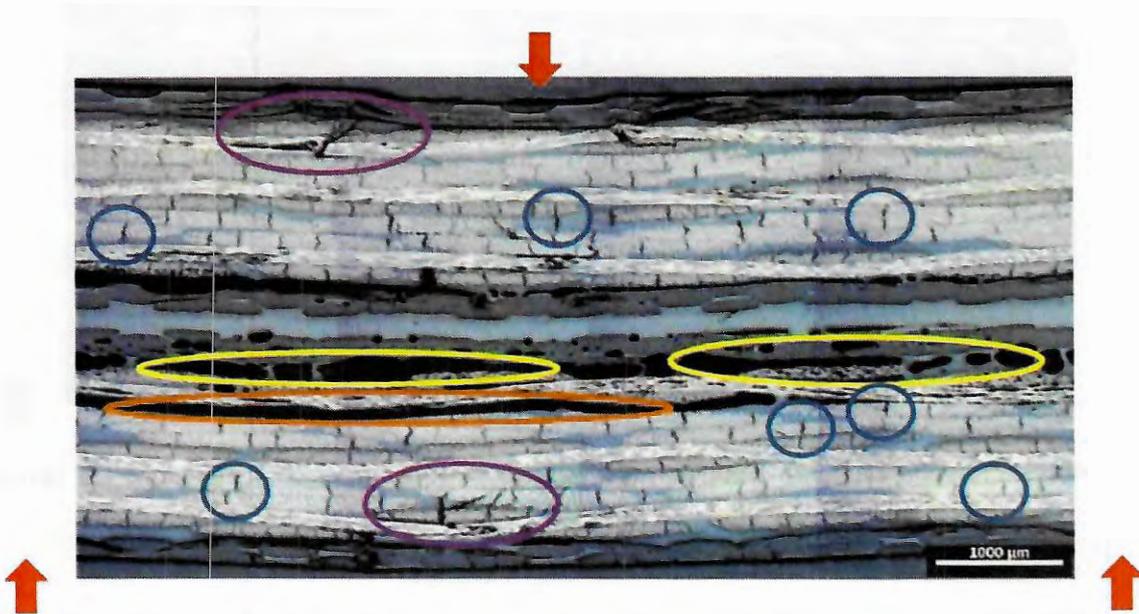


Figura 42: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes a configuração II na condição de ensaiada SBS.

4.7 Resultado das configurações III para o IV do processo de soldagem

As micrografias a seguir, figuras 43 e 44, são relacionadas aos corpos de provas extraídos das juntas soldadas nas configurações III, e as figuras 45 e 46, extraídos das juntas soldadas nas configurações IV (Tab. 4) nas condições de não ensaiadas e ensaiadas mecanicamente, respectivamente. Nesta etapa realizou-se a troca da lâmpada de bulbo simples para uma de bulbo duplo. No caso do corpo de prova onde inicialmente era utilizado uma geometria retangular nas dimensões de 1" x 4" ou seja 25,4 mm x 101,6 mm, passou-se a utilizar uma geometria quadrada de 30 mm x 30 mm. Com isso foi possível obter uma maior área de radiação na seção transversal e maior homogeneidade da radiação na região de soldagem. No caso da configuração III para a configuração IV, foram alterados o tempo de aquecimento, passando de 32 para 38 segundos, a pressão utilizada, passando de 0,20 MPa para 0,18 MPa e por fim, o tempo de resfriamento por refrigerante, que era de 30 segundos passou a não existir mais. No caso das juntas ensaiadas mecanicamente, ambas as configurações obtiveram valores superiores às soldadas com as

configurações I e II (I - 41,01 MPa, II - 43,72 MPa, III - 49,92 MPa e IV - 57,47 MPa), essa comparação pode ser visualizada no gráfico da figura 47.

Comparando a micrografia da soldagem da configuração III, figura 43 e 44, com os estágios anteriores, é possível notar uma melhora na adesão entres os filmes de PPS e os laminados PPS-C-V, persistindo, porém, alguns vazios nas proximidades da região de soldagem e algumas microtrincas.

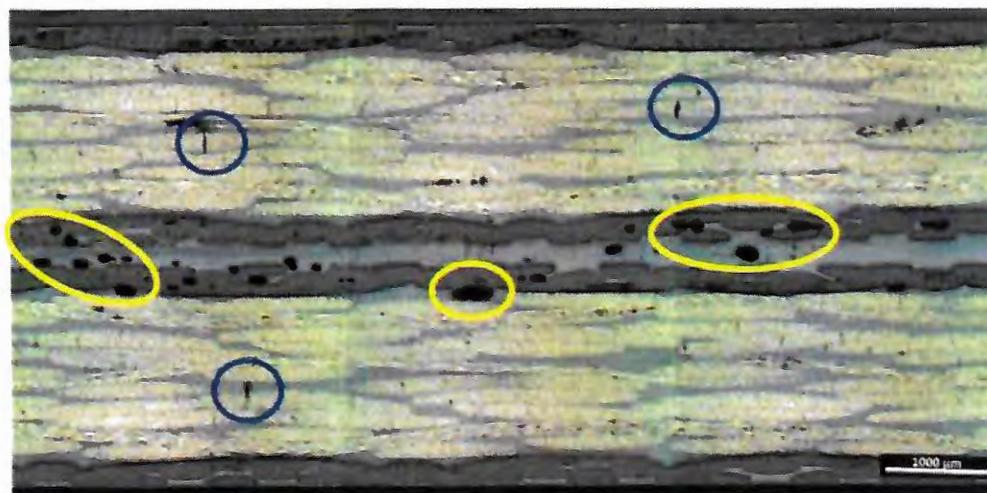


Figura 43: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de defeitos, referentes a configuração III na condição de não ensaiada mecanicamente.

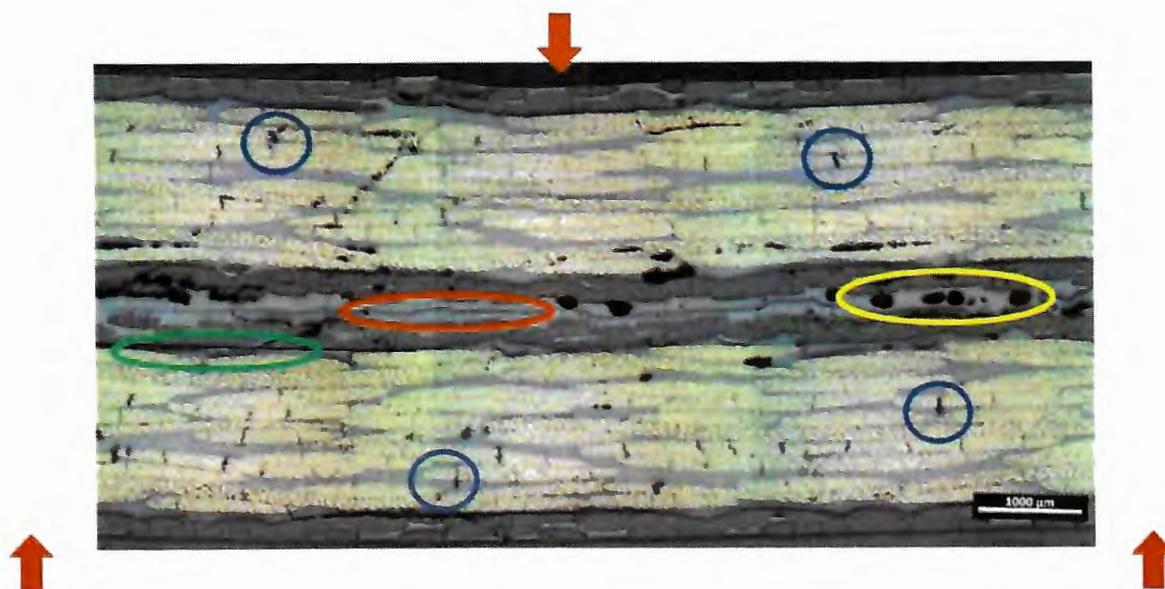


Figura 44: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes a configuração III na condição de ensaiada para SBS.

Na figura 45, referente a configuração IV, na condição de não ensaiada, observa-se uma área de soldagem (região medial), sem nenhum defeito, observável

pela técnica de microscopia óptica utilizada, observaram-se apenas algumas microtrincas (circulada em azul). Na condição de ensaiada mecânicamente (Fig 46), nota-se também a presença de microtrincas (circulada em azul) e uma falha coesiva (circulado em vermelho), após solicitação mecânica.

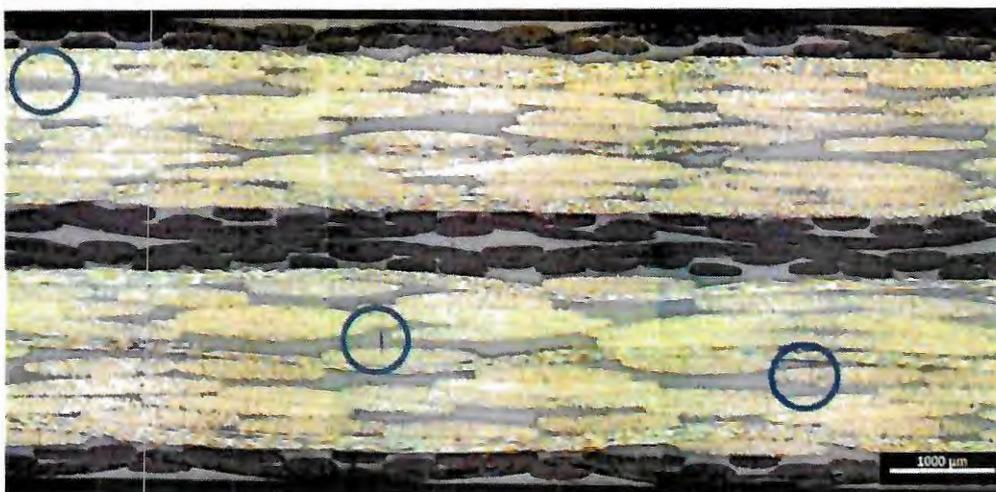


Figura 45: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação e defeitos, referentes a configuração IV na condição de não ensaiada mecânicamente.

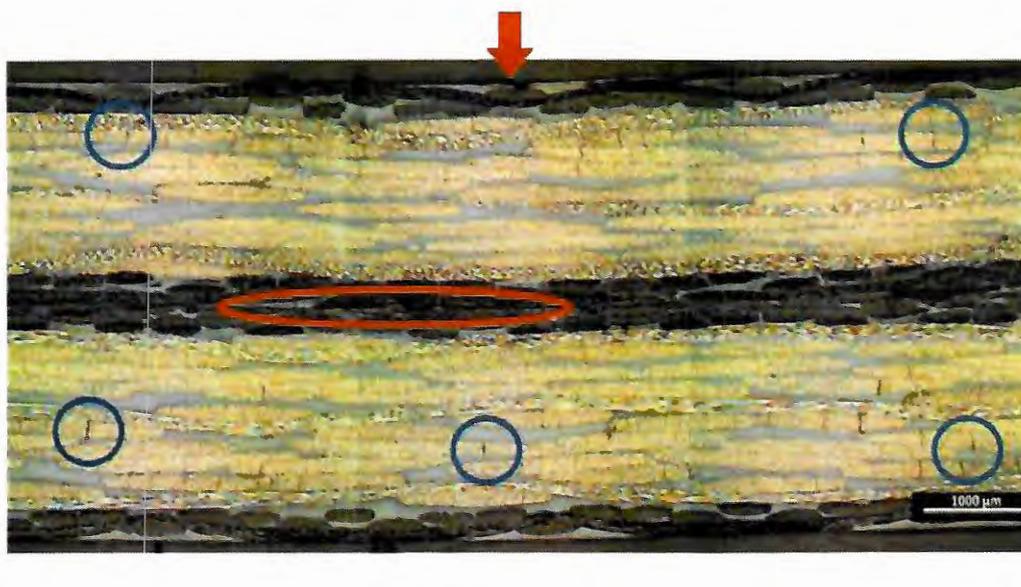


Figura 46: Micrografia de junta soldada por radiação infravermelha com marcação de falhas e defeitos, referentes a configuração IV na condição de ensaiada para SBS.

Os valores superiores de SBS (Fig. 47) encontrados nos novos ensaios são justificados por essas micrografias. Ficou evidente uma melhora na adesão coesiva e interfacial e na diminuição da influência prejudicial do calor na região próxima a soldagem. Tudo isso pode ser creditado às novas configurações, e pelo fato da radiação infravermelha emitida pela lâmpada atual, aquecer e fundir de forma mais

uniforme no filme nessa área de 30 mm². Portanto, pode-se pensar que esses resultados podem ser ampliados para CDPs maiores, desde que se consiga irradiar calor de forma uniforme por toda superfície da amostra.

4.8 Comparação dos resultados de SBS (*Short Beam Strength*) referentes as configurações de I a IV e soldagem por resistência elétrica

Foi possível comparar os valores médios e respectivos desvios-padrão da tensão máxima de cisalhamento para cada uma das configurações de soldagem realizadas (Fig. 47).

A primeira e a segunda barra do gráfico são referentes às configurações I e II, corresponde ao ensaio realizado para 3 conjuntos de corpos de provas, das quais foram extraídas as maiores resistências, e em seguida a média foi calculada para análise. As amostras foram soldadas por radiação infravermelha na dimensão de 25 x 100 mm², nos laminados compósitos (PPS/C-V). A terceira e quarta barra, são referentes às configurações III e IV, as quais seguiram o mesmo procedimento das anteriores, porém com dimensões menores, passando de 25,4 mm x 101,6 mm para 30 mm x 30 mm. E por fim, a quinta barra, soldada por resistência elétrica, os valores foram retirados da literatura (CASTRO *et al.*, 2014), para fins de comparação com o processo de soldagem por radiação infravermelha.

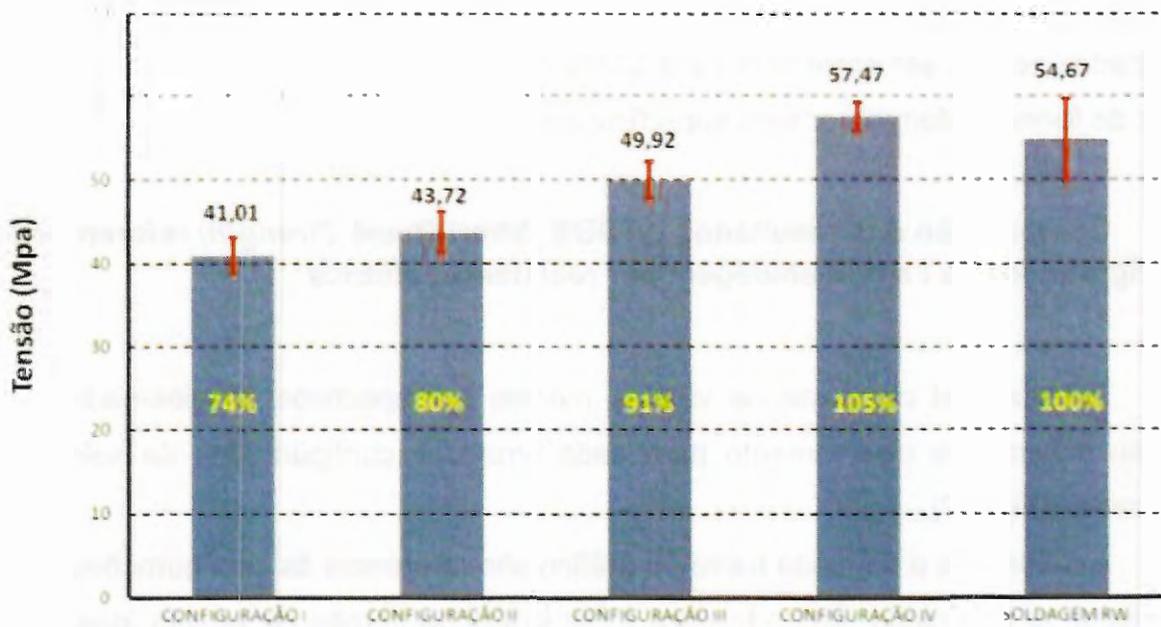


Figura 47: Comparação da tensão máxima de cisalhamento de juntas soldadas em diferentes configurações.

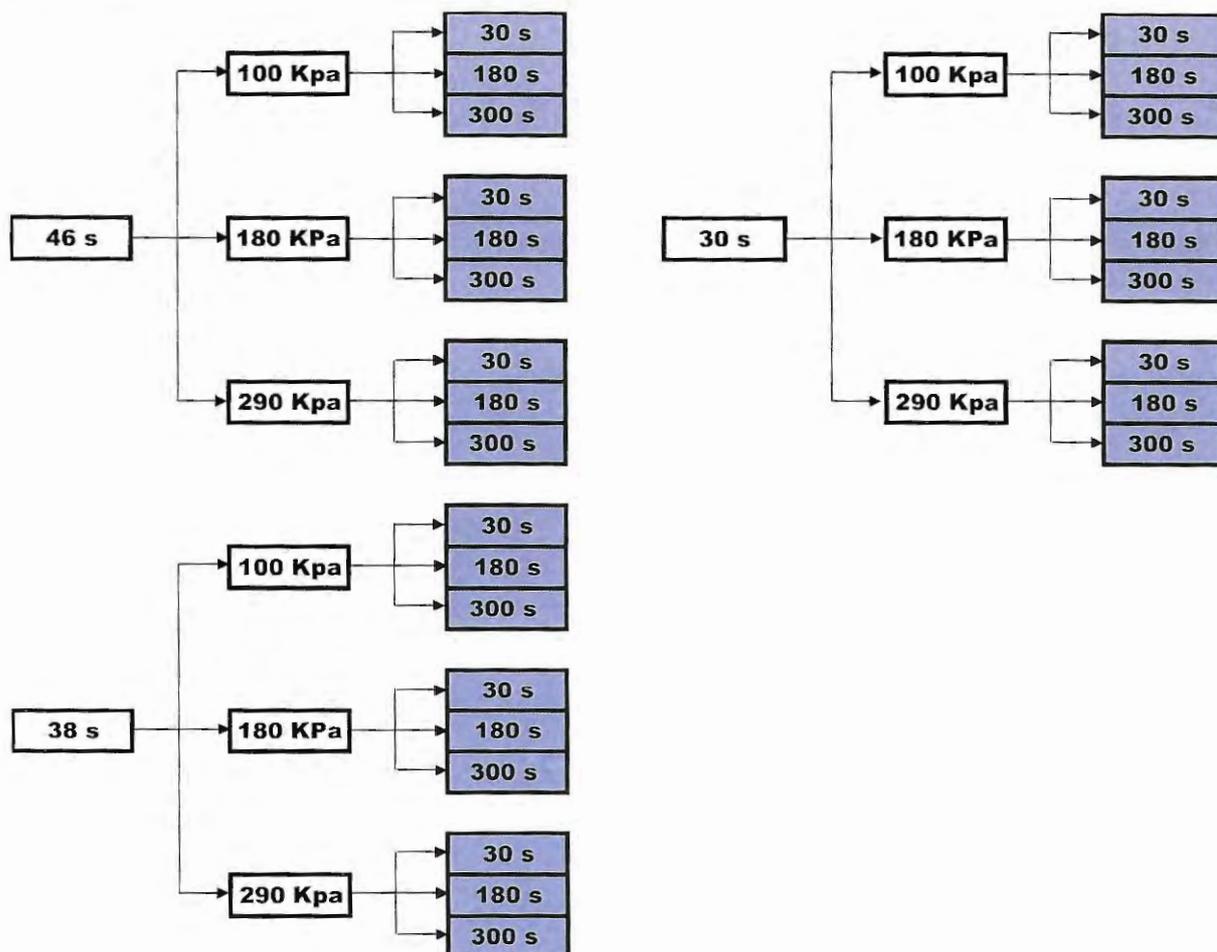
Comparando o gráfico acima, relativo às amostras que foram soldadas em várias configurações, é possível verificar um aumento na resistência da configuração I para a IV, a qual aumentou 29%. Comparando-se a configuração IV, em relação com a soldagem por resistência elétrica (RW), a soldagem por radiação infravermelha obteve valores de resistência, 5% maiores.

4.9 Novos parâmetros utilizados no processo de soldagem por radiação infravermelha

Com a finalidade em melhorar os resultados de SBS e suas respectivas micrografias, novos parâmetros da máquina foram alterados. A melhor configuração (configuração IV), foi o ponto de partida para a segunda demanda de soldagem. Foram realizadas novas soldagens de forma estatística alterando: o tempo de aquecimento (de 38 segundos para 30 e 46 segundos); pressão de consolidação na amostra de 30x30 mm (de 9,2 MPa para 6 e 13,5 MPa) e tempo de prensagem (de 180 segundos para 30 e 300 segundos) (Tab. 7). Manteve-se fixo os demais parâmetros (potência da lâmpada com 90% de intensidade; distância entre os berços, com 65 milímetros; e o tempo de resfriamento, deixando a amostra resfriar na temperatura ambiente).

Para melhor avaliação dos resultados, as soldagens foram feitas em 5 amostras para todas as 27 configurações, resultando em 135 espécimes como mostrado na tabela 7.

Tabela 7: Configurações utilizadas no processo de soldagem por radiação infravermelho de forma estatística.



4.10 Resultados do ensaio mecânico SBS (*Short Beam Strength*) para os novos parâmetros de soldagem

A figura 48, mostra o gráfico de barras para o SBS de cada condição, o valor médio de 50,18 MPa é representado pela linha pontilhada. Os três valores mais altos foram encontrados com 58,88, 57,13 e 58,10 MPa, todos com o mesmo tempo de aquecimento, 38 segundos, conforme mostrado na tabela 8. Além disso, amostras com 30 segundos de aquecimento apresentaram desvio padrão mais alto comparada às outras com 38 e 46 segundos.

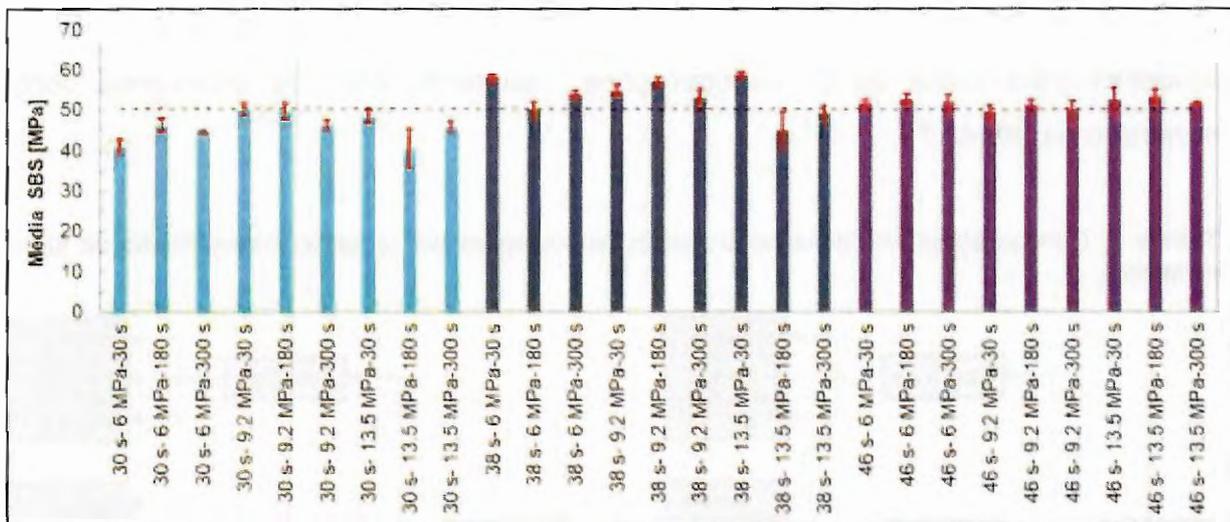


Figura 48: Valor médio de SBS para cada condição (tempo de aquecimento - pressão de consolidação - tempo de consolidação).

Tabela 8: Três dos melhores resultados do teste SBS para as condições estudadas. Tempo de aquecimento [s] Pressão de consolidação [MPa] Tempo de consolidação [s] SBS [MPa] SD.

Parâmetros	Tempo de aquecimento [s]	Pressão de consolidação [MPa]	Tempo de Consolidação [s]	SBS [MPa]	Desvio Padrão
A	38	13.5	30	58.88	±0.92
B	38	6.0	30	58.10	±1.25
C	38	9.2	180	57.13	±1.78

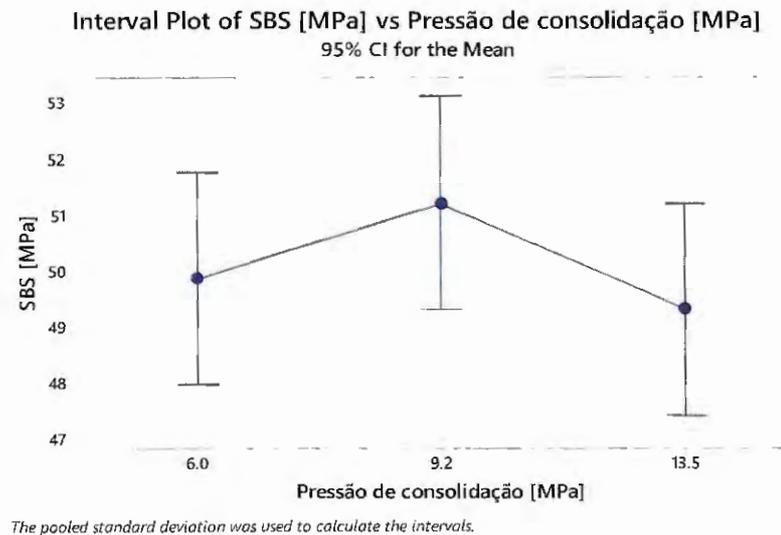
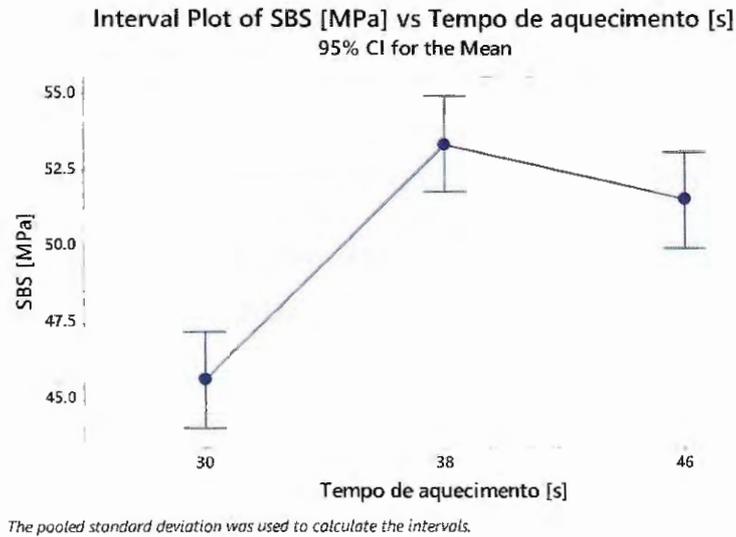
4.11 Análise de variância - ANOVA

A análise de variância foi realizada com a finalidade de determinar os melhores parâmetros de soldagem por radiação infravermelha. Pelo teste ANOVA é possível inferir que os parâmetros escolhidos de pressão de consolidação e de tempo de consolidação, considerando uma significância de 5% (i.e. confiança de 95%), fornecem populações iguais (Tab 9). Contudo, as populações de diferentes tempos de radiação se mostraram muito distintas. A figura 49 ilustra o que o teste ANOVA *one-way* indica, os desvios dos valores estudados para o tempo de aquecimento que pouco se sobrepõem.

Tabela 9: Valores de P obtidos pelo teste ANOVA one-way.

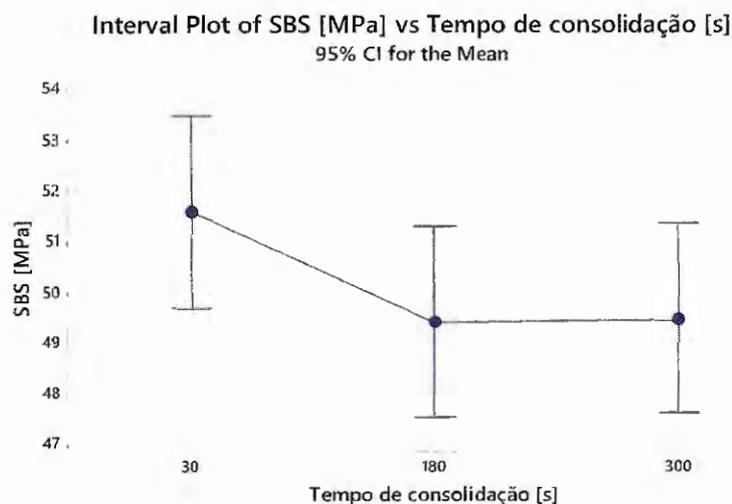
Fatores	Valores obtidos de P ($\alpha=0,05$)
	ANOVA (one-way)
Tempo de radiação	0,000
Pressão de consolidação	0,361
Tempo de consolidação	0,188

Pelo teste ANOVA considerando-se apenas a população com 38 segundos de radiação (Tab 10), é possível inferir que os parâmetros escolhidos de pressão de consolidação fornecem populações iguais com uma confiança de 95% (Fig. 50).



continua

continuação

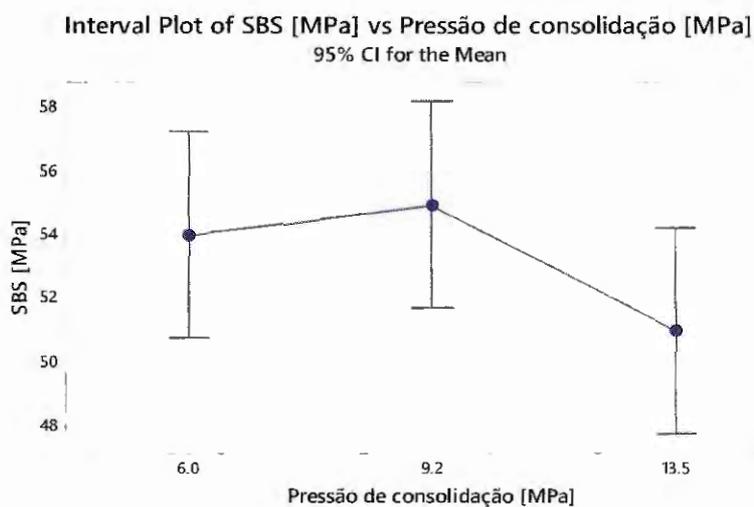


The pooled standard deviation was used to calculate the intervals.

Figura 49: Gráfico das médias SBS para cada um dos parâmetros do ensaio.

Tabela 10: Valores de P obtidos pelo teste ANOVA one-way para tempos de radiação de 38 s.

Fatores	Valores obtidos de P ($\alpha=0,05$) ANOVA (one-way)
Pressão de consolidação	0,206
Tempo de consolidação	0,007



The pooled standard deviation was used to calculate the intervals.

continua

continuação

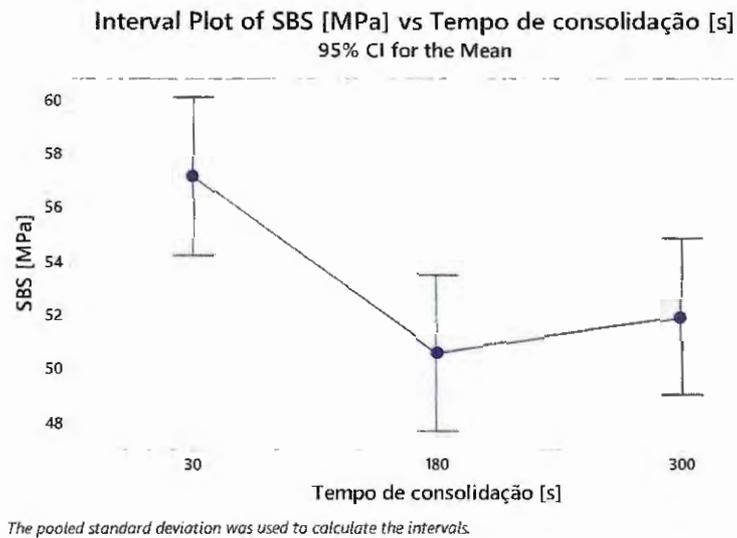


Figura 50: Gráfico das médias SBS para cada os parâmetros de pressão e tempo de consolidação para populações com 38 s de radiação.

E por fim, considerando-se as populações com 38 s de radiação e 30 s de pressão, temos um valor de $P = 0,025$, ou seja as populações comparadas possuem uma diferença significativa (Fig. 51).

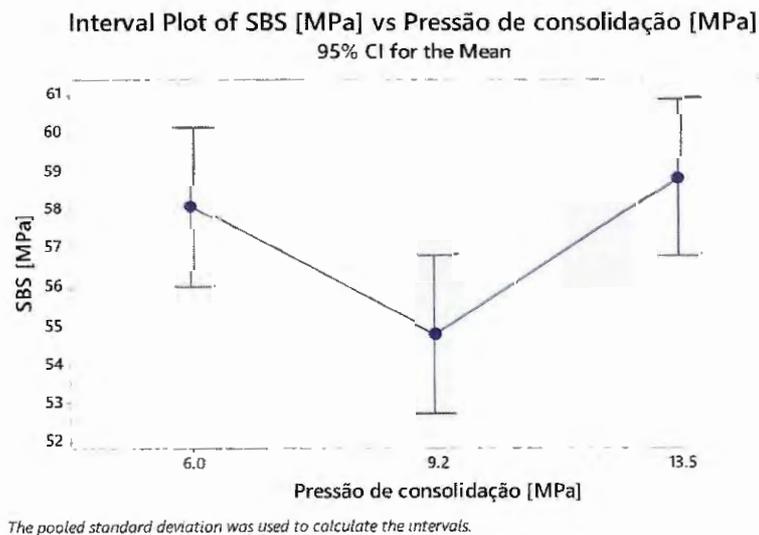


Figura 51: Gráfico das médias SBS para de diferentes valores de pressão de consolidação para populações com 38 s de radiação e 30 s de consolidação.

4.12 Comparação dos melhores resultados do ensaio SBS (*Short Beam Strength*) dos novos parâmetros para os outros processos de soldagem

Comparando os novos resultados (três melhores parâmetros), obtidos pelo processo de soldagem por radiação infravermelha com outros processos de soldagem como: soldagem por resistência (RW), soldagem por radiação infravermelha - *Ghent University* (IR) e soldagem por indução (IW) (CARETTO, 2011; DE BAERE, *et al.*, 2012; CASTRO *et al.*, 2014), foi plotado o gráfico (Fig. 52) onde é possível notar uma pequena vantagem na resistência mecânica (SBS) da soldagem por radiação infravermelha realizada neste trabalho, quando comparada aos demais processos citados.

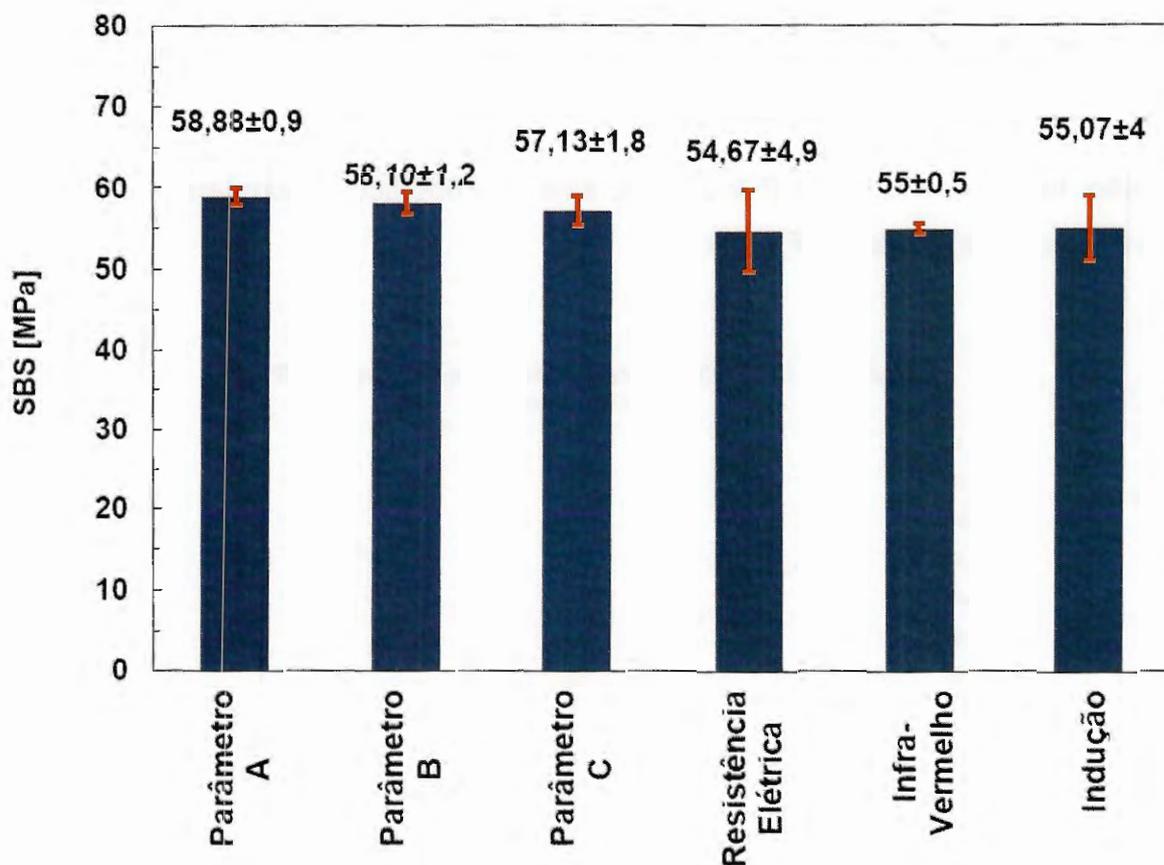


Figura 52: Gráfico de barras comparando os melhores resultados de resistência ao cisalhamento (SBS) e seus respectivos desvios padrão.

A partir da figura 52 pode-se concluir pela otimização bem-sucedida do processo de soldagem por infravermelho adotando as combinações dos parâmetros

listados na tabela 8. Os três melhores parâmetros (A,B e C) superaram os resultados da literatura para técnicas de soldagem por resistência elétrica, soldagem por indução e soldagem por Radiação Infravermelha da *Ghent University* (CARETTO, 2011; DE BAERE, *et al.*, 2014). Além disso, as barras de desvio padrão dos espécimes soldados por infravermelho são substancialmente mais curtas do que as comparadas por resistência elétrica e indução, o que significa menor coeficiente de variação de Pearson e, portanto, maior repetibilidade do processo, reprodutibilidade e confiabilidade.

4.13 Micrografia das juntas realizadas pelos novos parâmetros

Nas figuras abaixo são mostradas as micrografias das juntas soldadas por radiação infravermelha utilizando os novos parâmetros com os três melhores resultados obtidos até o presente momento (Tab. 8).

A figura 53 apresenta uma micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C-V nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente no qual obteve uma resistência de 58,88 MPa (melhor resultado até o momento), utilizando as seguintes configurações: tempo de aquecimento (t_a) de 38 segundos, pressão de consolidação (p_c) de 13,5 MPa e tempo de consolidação (t_c) de 30 segundos. A figura 54 na qual obteve uma resistência de 58,10 MPa, os parâmetros utilizados foram: tempo de aquecimento, de 38 segundos, pressão de consolidação 6,0 MPa e tempo de consolidação de 30 segundos e na Figura 55, com resistência de 57,13 MPa, tempo de aquecimento, 38 segundos, pressão de consolidação 9,2 MPa e tempo de consolidação de 180 segundos. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos.

Como esperado, as microscopias ópticas utilizando especificamente o tempo de radiação de 38 segundos, mostraram boa adesão entre os laminados, na região de soldagem, justificando os melhores resultados de SBS (Fig. 52). Porém ainda é possível observar pequenas microtrincas (circuladas em azul) no processo, tanto na condição de ensaiada mecanicamente quanto na não ensaiada. Mesmo apresentando maiores valores de SBS, as amostras com pressões de consolidação mais elevadas apresentaram maior quantidade de microfissuras, e na condição de ensaiada, como já era esperado, houve o agravamento das microtrincas entre os feixes de fibras, ou seja, propagação de trincas translaminares (circulado em roxo).

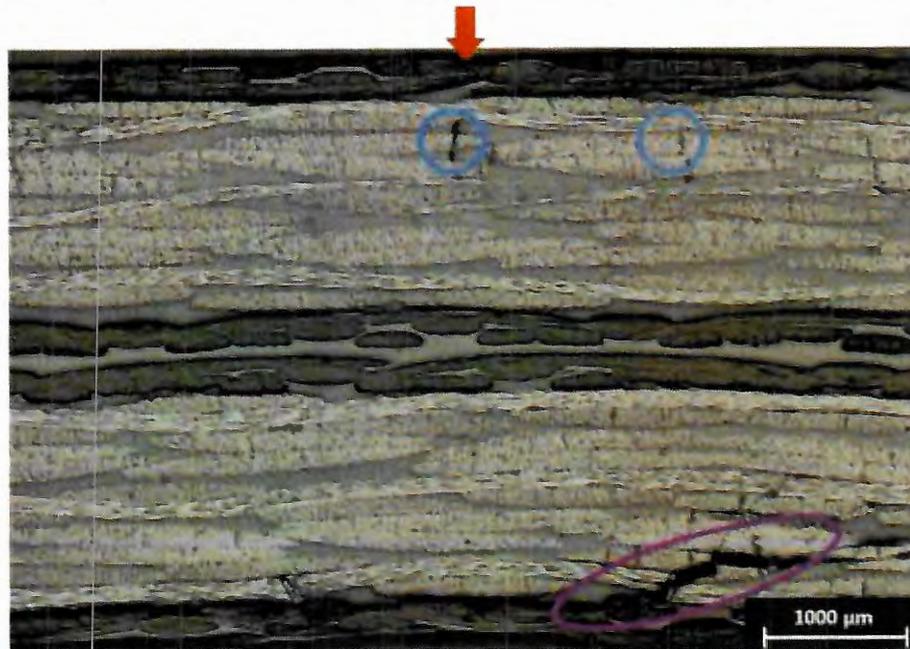
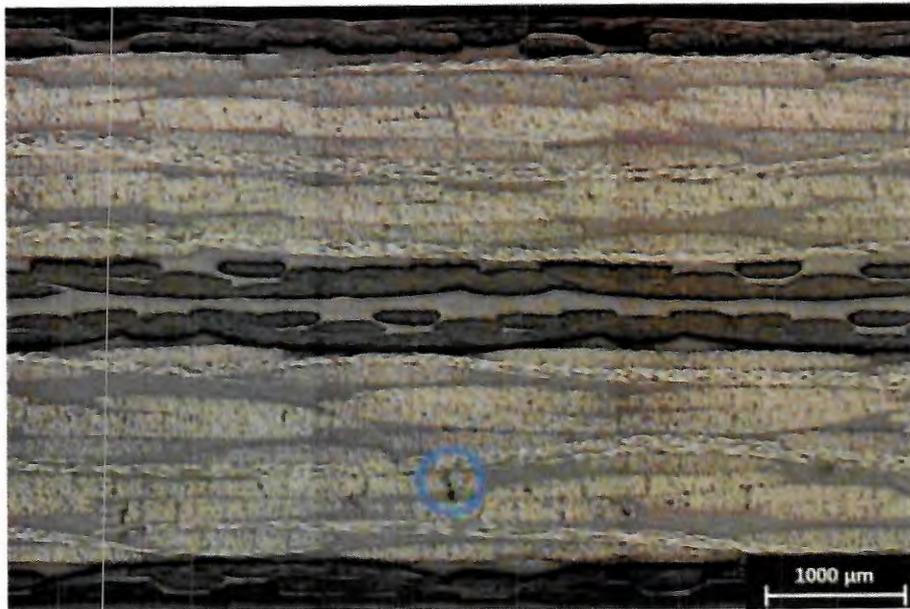


Figura 53: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=38s$ segundos, $p_c=13,5MPa$ e $t_c=30 s$.

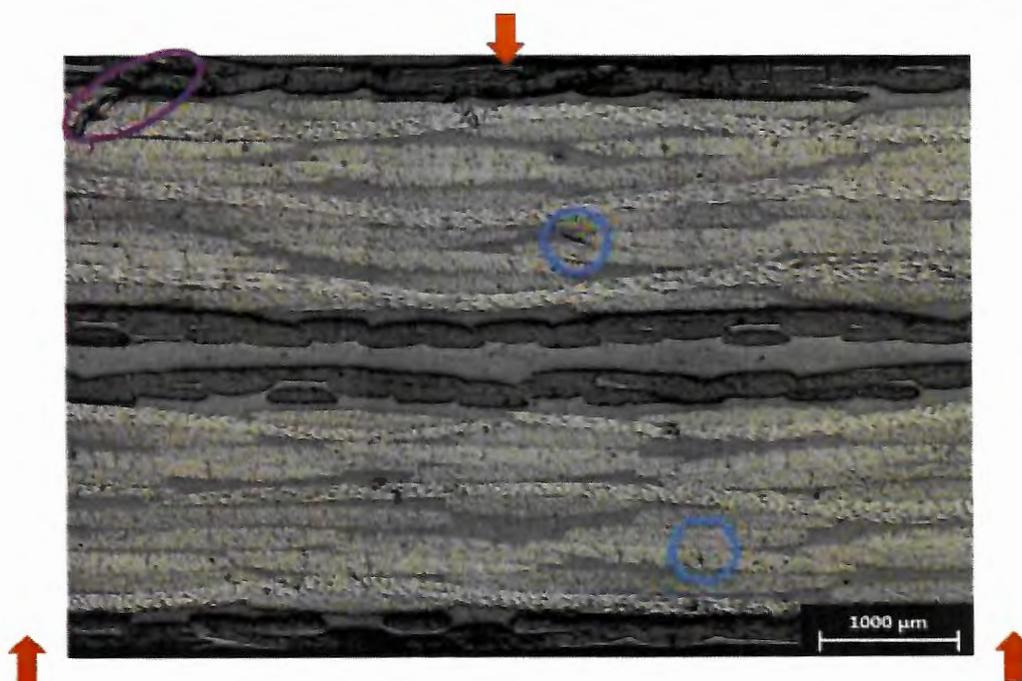
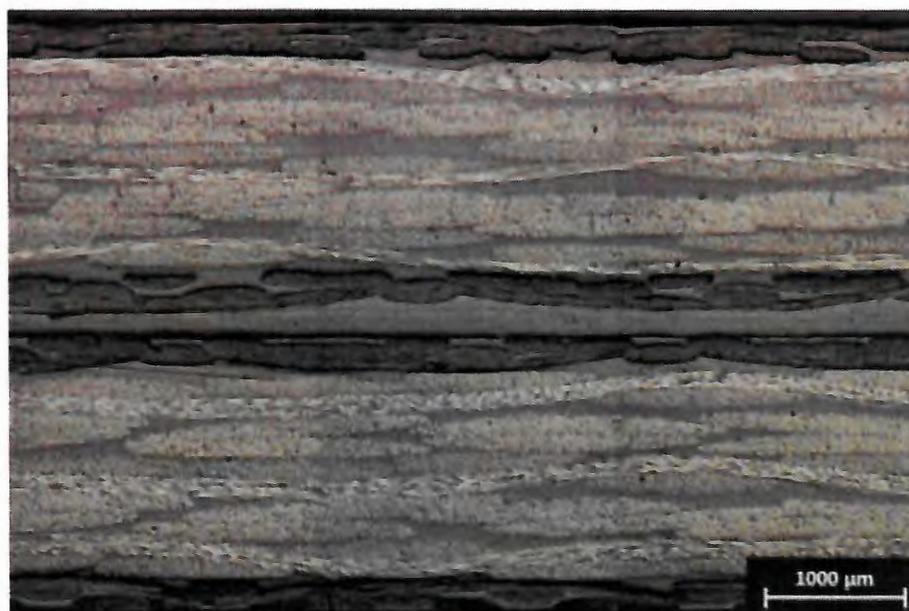


Figura 54: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=38s$, $p_c=6,0MPa$ e $t_{co}=30s$.

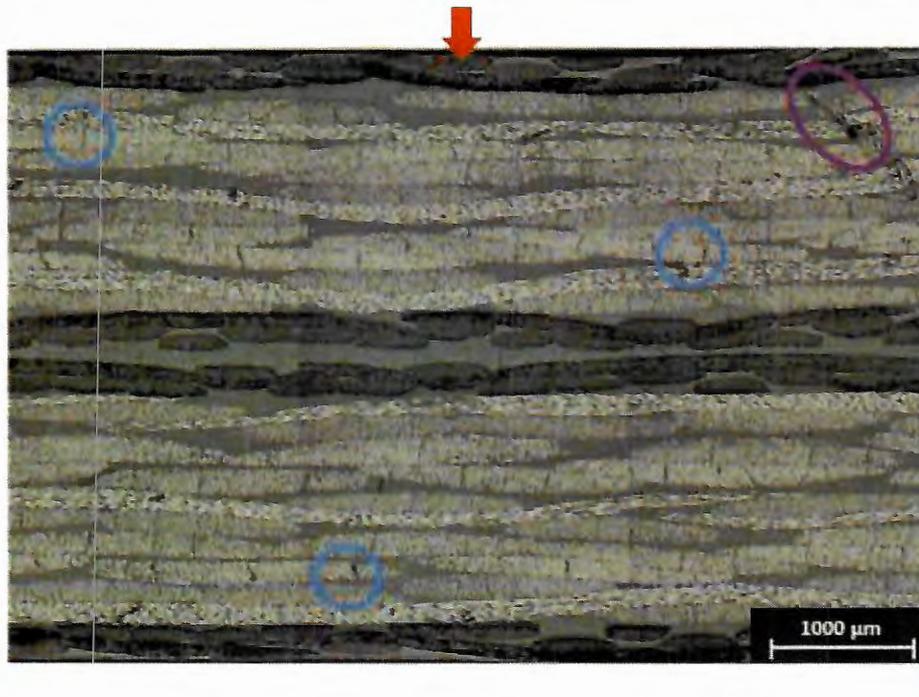
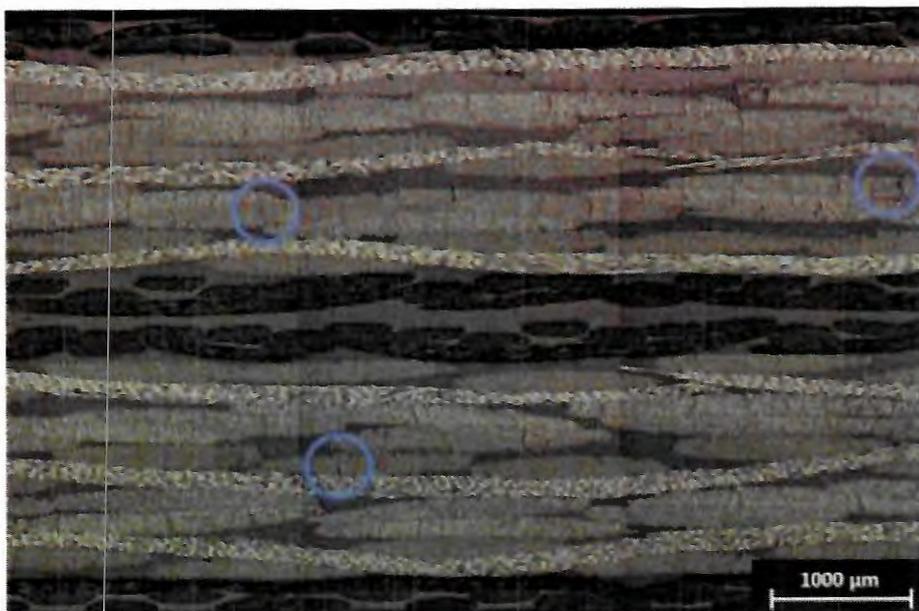


Figura 55: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=38s$, $p_c=9,2$ MPa e $t_c=180s$.

A figura 56 apresenta uma micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C-V nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente, utilizando as seguintes configurações (Tab. 11): tempo de aquecimento de 30 segundos; pressão de consolidação de 6,0 MPa e tempo de consolidação de 30 segundos. Na figura 57 os parâmetros utilizados foram: tempo de aquecimento de 30 segundos, pressão de consolidação de 9,2 MPa e tempo de consolidação de 30

segundos e na figura 58, tempo de aquecimento de 30 segundos, pressão de consolidação de 13,5 MPa e tempo de consolidação de 30 segundos. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos. Como esperado, as microscopias ópticas realizadas utilizando especificamente as configurações com tempo de radiação de 30 segundos, mostraram que em toda região de soldagem há ausência de coesão, isto é, defeito nas regiões onde não houve aderência entre os filmes (circulado em vermelho). É possível que a causa para este fato é a falta de aquecimento homogêneo na superfície do laminado, mostrando que o tempo de radiação de 30 segundos não é o suficiente para realizar a fusão do filme aderido na superfície do laminado, justificando assim os resultados mais baixos de SBS (Fig 48). Outros defeitos também são observados, como no caso das amostras com pressões de consolidação mais elevadas, que apresentaram maior quantidade de microfissuras, e na condição de ensaiada como já mencionado, o agravamento das microtrincas entre os feixes de fibras, propagação de trincas translaminares (circulado em roxo) e interlaminares (circulado em laranja).

Tabela 11: Resultados do teste SBS para as condições estudadas com o tempo de aquecimento de 30 segundos. Tempo de aquecimento [s] Pressão de consolidação [MPa] Tempo de consolidação [s] SBS [Mpa] SD.

Parâmetros	Tempo de aquecimento [s]	Pressão de consolidação [MPa]	Tempo de Consolidação [s]	SBS [MPa]	Desvio Padrão
D	30	6.0	30	40.74	±3.64
E	30	9.2	30	50.02	±3.26
F	30	13.5	30	48.27	±3.27

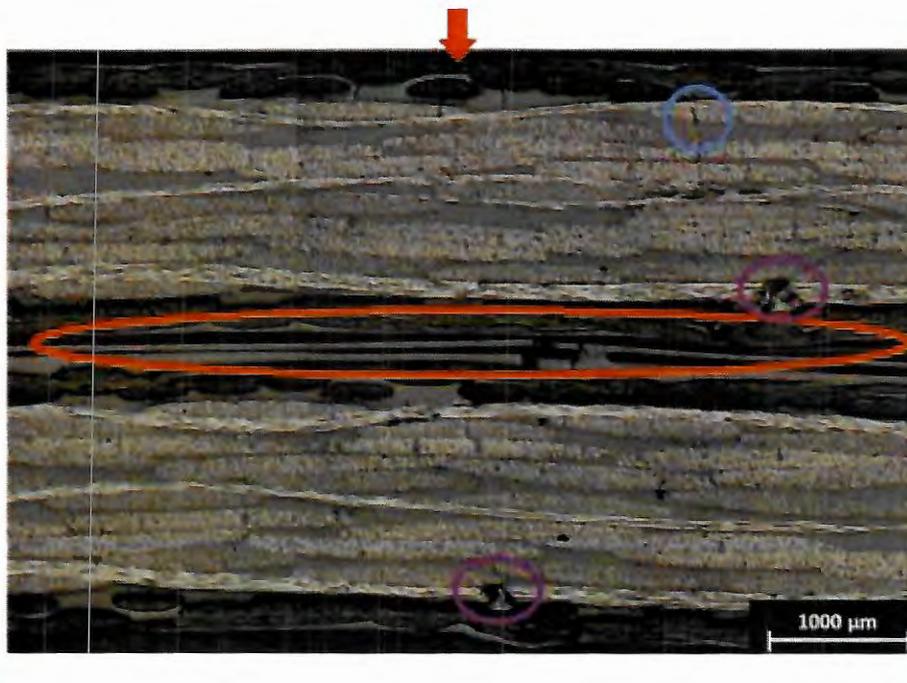
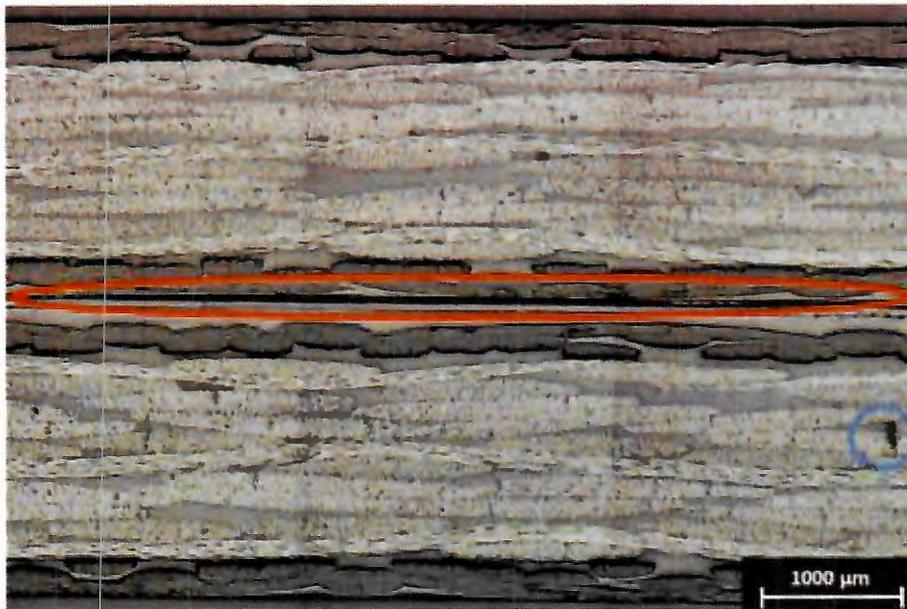


Figura 56: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=30s$, $p_c=6,0$ MPa e $t_c=30s$.

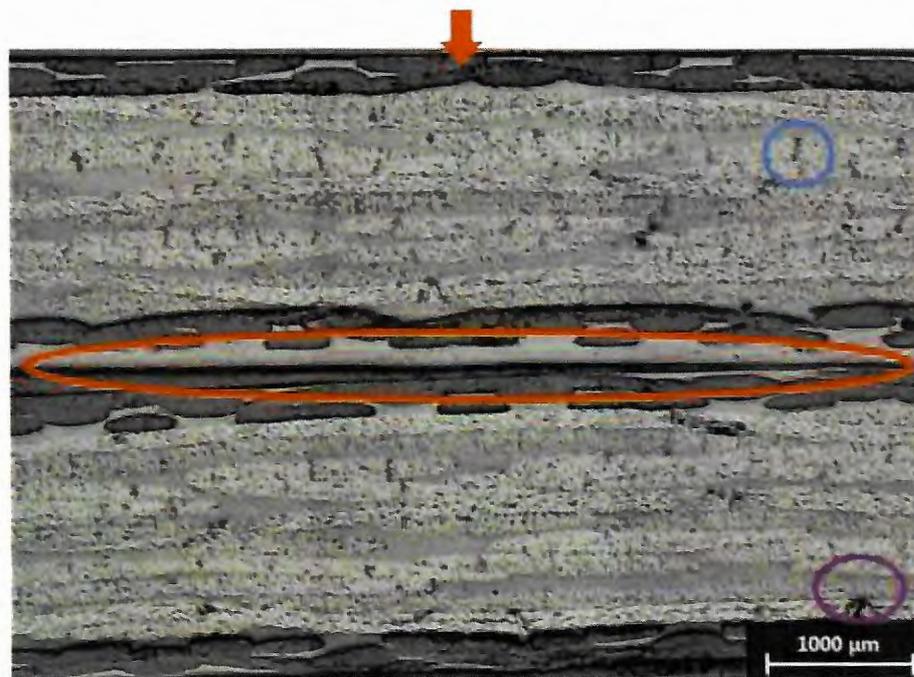


Figura 57: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=30s$, $p_c=9,2$ MPa e $t_c=30s$.

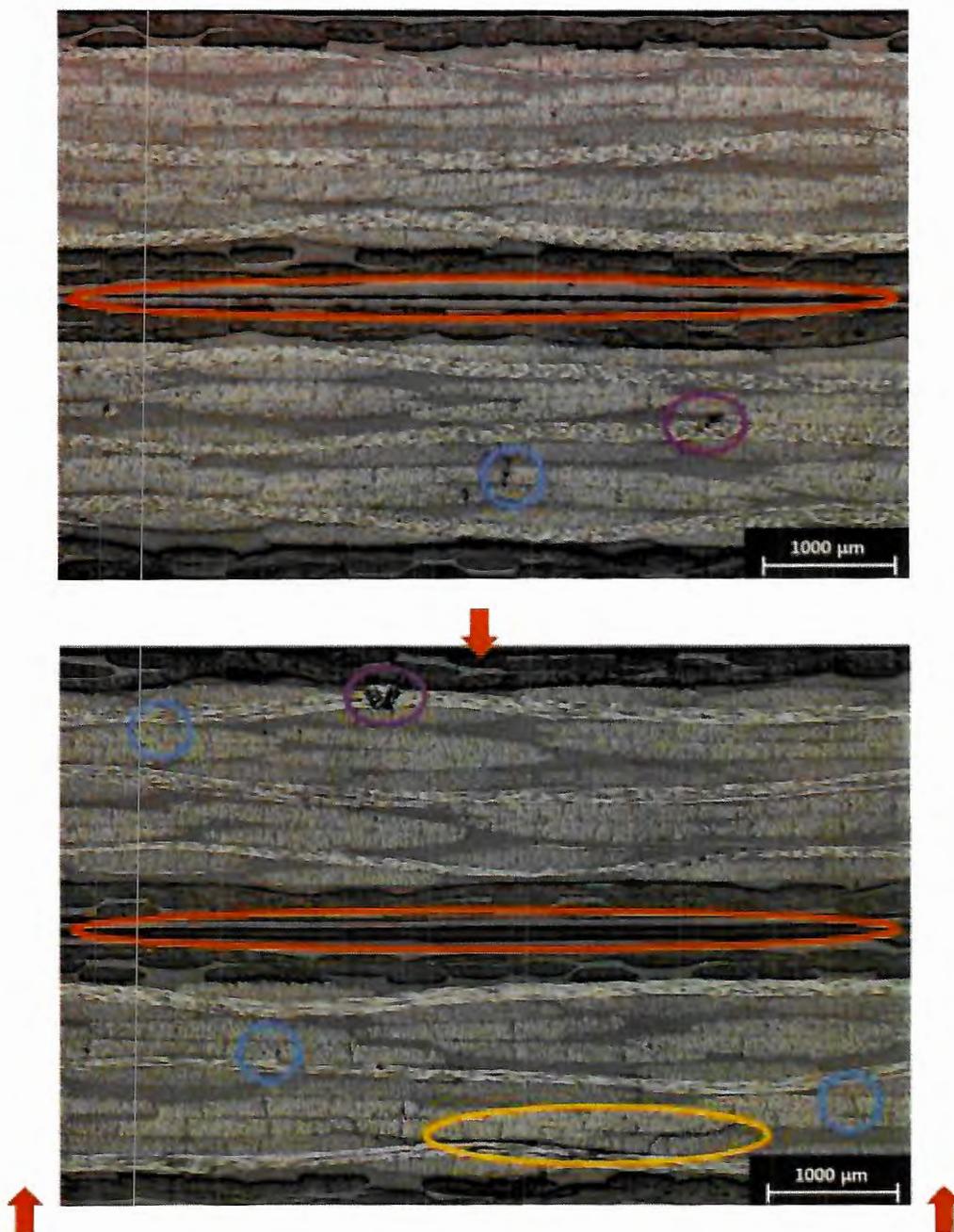


Figura 58: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=30s$, $p_c=13,5$ MPa e $t_c=30s$.

A figura 59 apresenta uma micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C-V, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações (Tab. 12): tempo de aquecimento, de 46 segundos, pressão de consolidação de 6,0 MPa e tempo de consolidação de 30 segundos. Na figura 60 os parâmetros utilizados foram: tempo de aquecimento, 46 segundos, pressão de consolidação 9,2 MPa e tempo de consolidação de 180 segundos e na figura 61, tempo de aquecimento, 46 segundos,

pressão de consolidação de 13,5 MPa e tempo de consolidação de 180 segundos. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos.

Como esperado, as microscopias ópticas realizadas utilizando as configurações em específico o tempo de radiação de 46 segundos, mostraram uma adesão aceitável de defeitos entre os laminados, o que justifica os valores de resistência ao cisalhamento SBS, próximo dos obtidos pelo tempo de radiação de 38 segundos. Como nas micrografias anteriores, defeitos também podem ser observados como, microtrincas entre os feixes de fibras (circulado em azul), propagação de trincas translaminares (circulado em roxo) e interlaminares (circulado em laranja). Na região de soldagem é possível observar que houve uma degradação nos filmes de adição, o mesmo pode ser justificado pela proximidade entre as fibras de vidro (setas amarelas).

Tabela 12: Resultados do teste SBS para as condições estudadas com o tempo de aquecimento de 46 segundos. Tempo de aquecimento [s] Pressão de consolidação [MPa] Tempo de consolidação [s] SBS [Mpa] SD.

Parâmetros	Tempo de aquecimento [s]	Pressão de consolidação [MPa]	Tempo de Consolidação [s]	SBS [MPa]	Desvio Padrão
G	46	6.0	30	51.65	±1.73
H	46	9.2	180	51.26	±2.36
I	46	13.5	180	53.13	±3.99

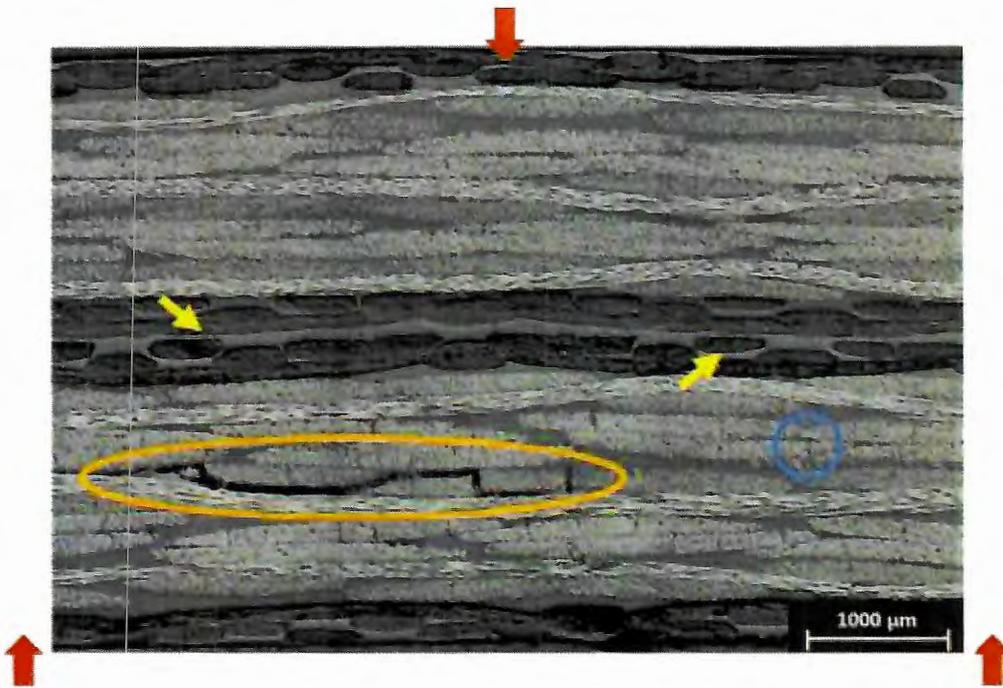
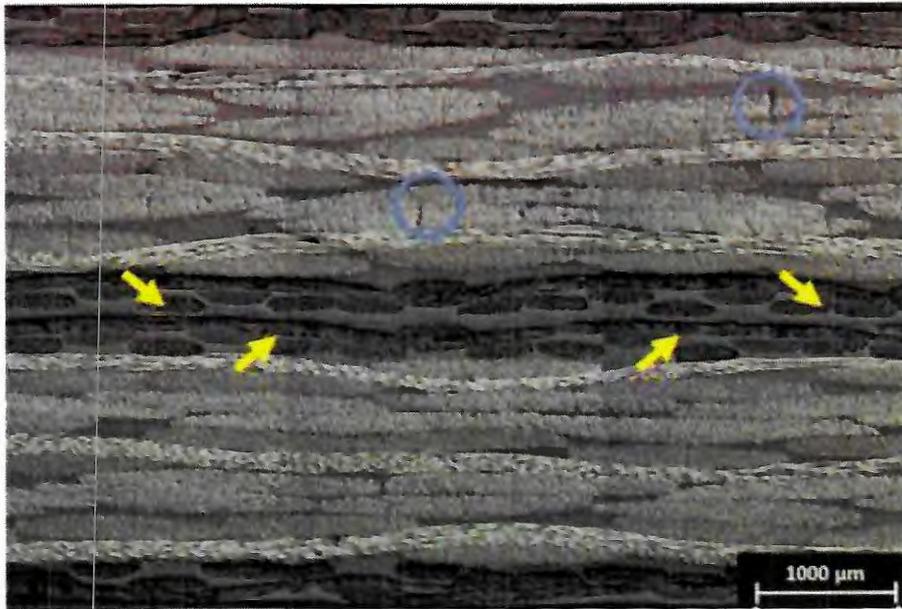


Figura 59: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiado mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=46s$, $p_c=6,0$ MPa e $t_c=30s$.

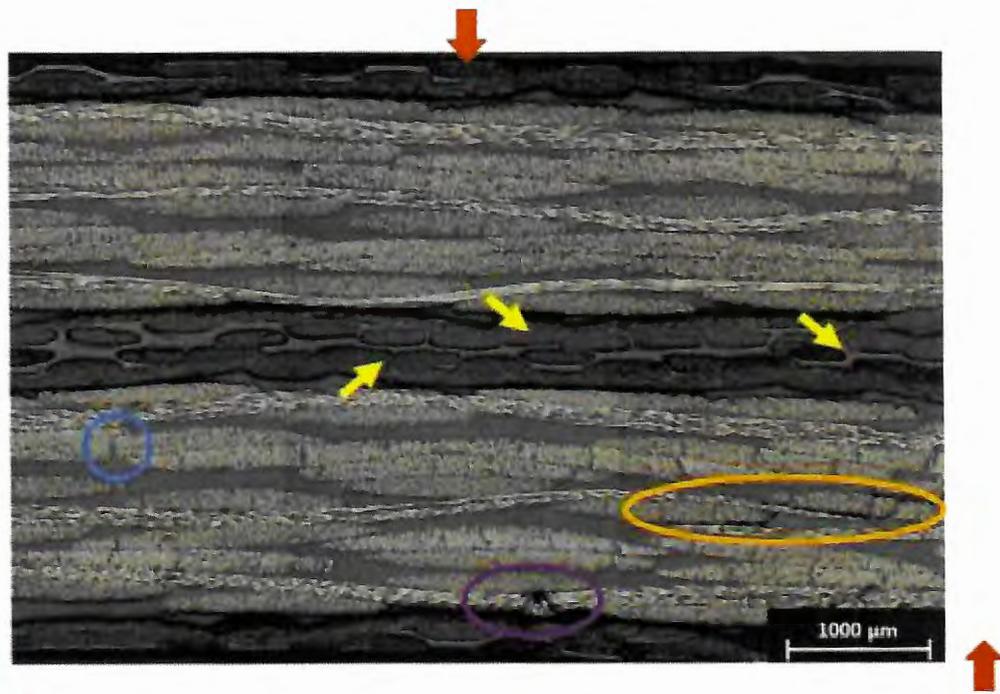
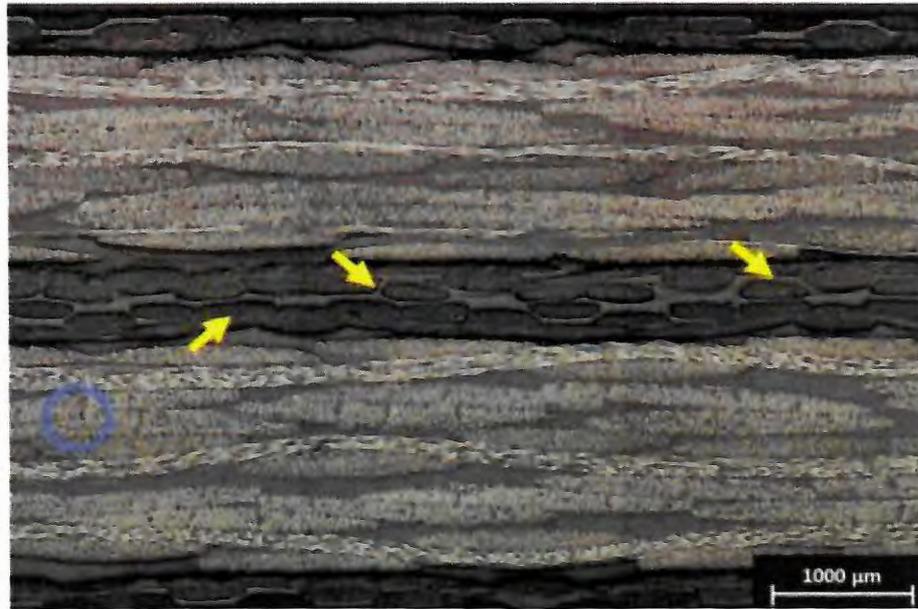


Figura 60: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=46$ s, $p_c=9,2$ MPa e $t_c=180$ s.

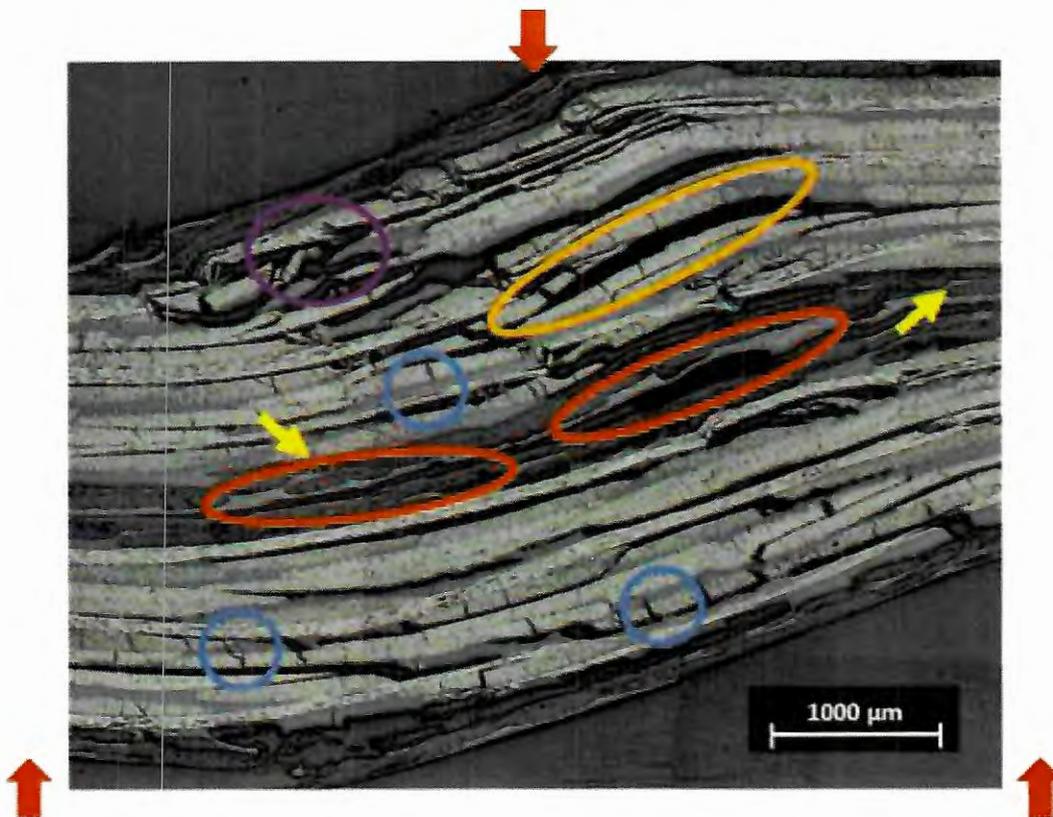
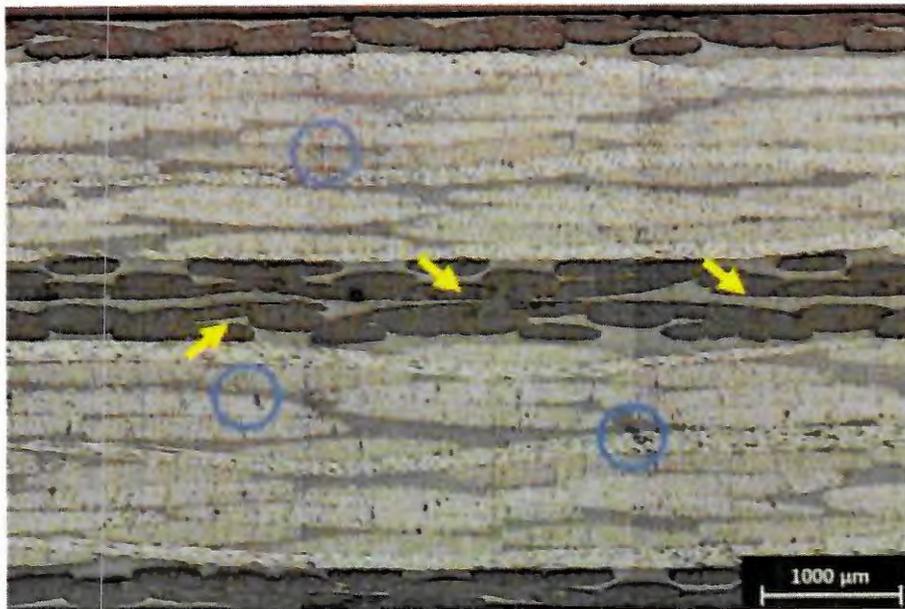


Figura 61: Micrografia da região central do corpo de prova soldado de PPS/C, nas condições de não ensaiado e ensaiada mecanicamente respectivamente, utilizando as seguintes configurações: $t_a=46$ s, $p_c=13,5$ MPa e $t_c=180$ s.

4.14 Resultado dos ensaios com correlação de imagens (DIC - *Digital Image Correlation*)

Os ensaios com correlação de imagens tiveram como uma de suas principais finalidades, identificar através das imagens as possíveis falhas que ocorreram durante o ensaio SBS. As imagens foram registradas em um intervalo de 6 segundos.

4.14.1 Soldagem por radiação infravermelho (PPS-C-V)

A soldagem por radiação infravermelho, foi realizada no laminado compósito termoplástico (PPS/C-V). No gráfico abaixo (Fig. 62) é mostrado a curva Força x Deslocamento, os pontos em vermelho foram destacados para identificar as imagens da figura 63. Esses pontos estão identificados pelas letras A, B, C e D. O gráfico, mostra algumas medições efetuadas antes da ruptura do corpo de prova (A e B). A pequena queda do nível de força em mais ou menos 6mm é um indicativo de falha no material.

Na figura 63, são mostradas as imagens referentes ao ensaio de correlação de imagens, analisadas nos pontos A, B, C e D, para o processo de soldagem por radiação infravermelha no compósito PPS/C-V. As imagens mostram o campo de deslocamento dos corpos de provas e permitem identificar as falhas ocorridas no laminado durante o ensaio SBS. As setas representam o deslocamento no plano e a tonalidade de fundo é uma medida da amplitude do deslocamento total. Zonas mais escuras permitem maiores deslocamentos.

Ao analisarmos os pontos A e B (Fig. 62) e compararmos com as imagens (Fig. 63-A e 63-B), podemos verificar que o laminado ainda não falhou, porém na imagem 63-B, começa a aparecer indícios de falhas no laminado.

Na figura 63-C, ocorre a primeira falha (seta em azul). De acordo com o gráfico (Fig. 62), essa falha ocorreu com 1800 N, ou seja, 40,15 MPa, diferentemente do que mostrado na figura 66 no qual o laminado se mostra com uma resistência de 57,13 MPa.

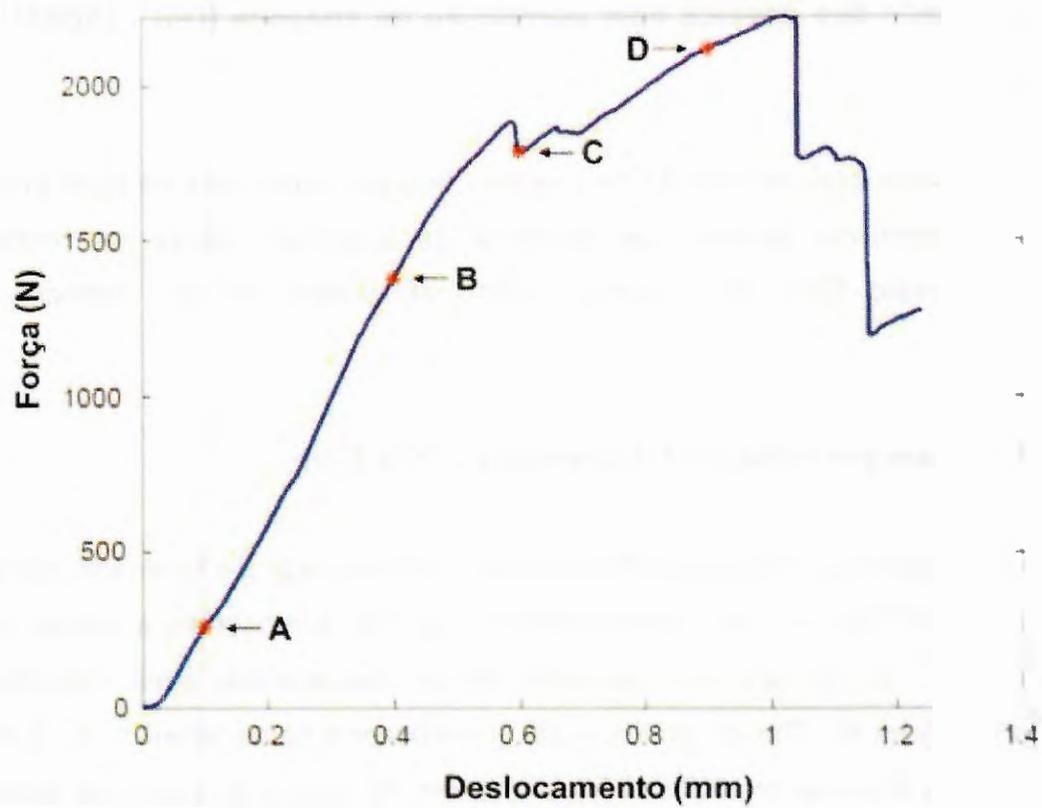


Figura 62: Gráfico Força x Deslocamento, referente ao laminado compósito PPS/C-V soldado pelo processo de soldagem por radiação infravermelha.

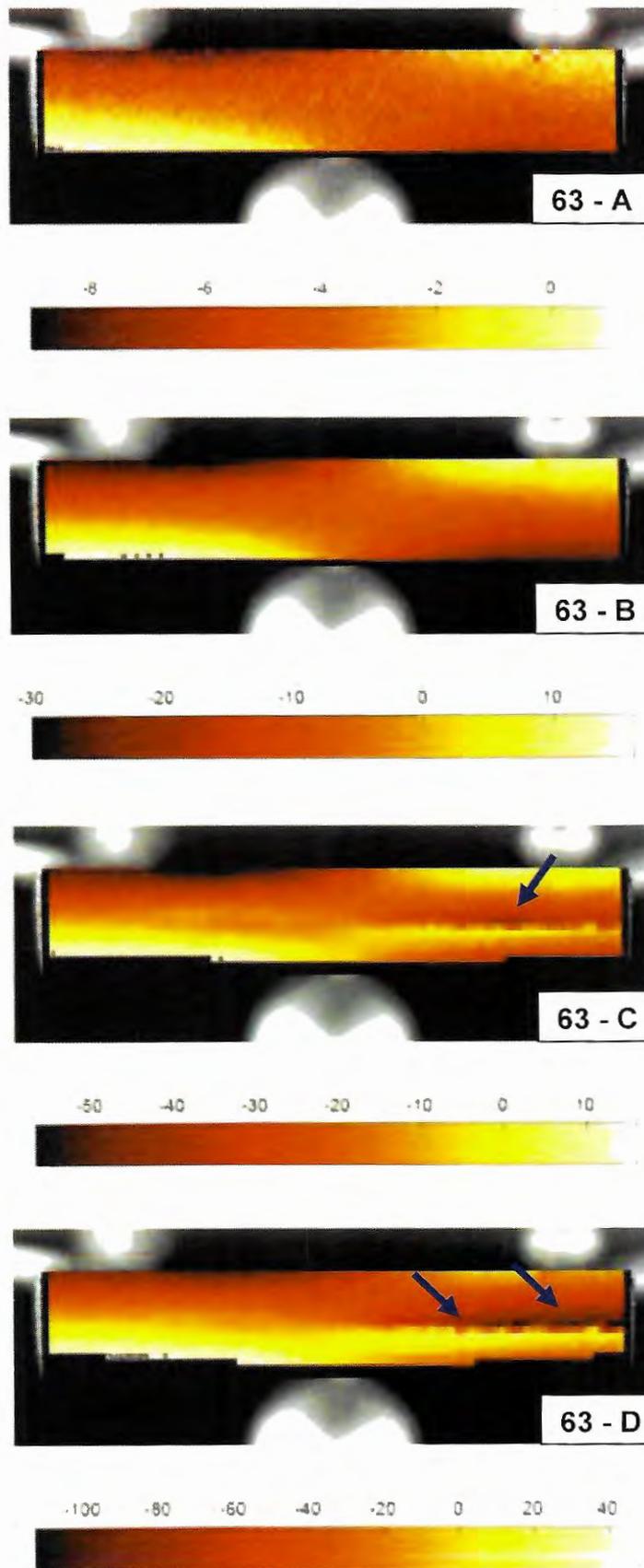


Figura 63: Imagens referentes ao ensaio de correlação de imagens, analisadas nos pontos A, B, C e D, para o processo de soldagem por radiação infravermelha no compósito PPS/C-V.

4.14.2 Soldagem por resistência elétrica PPS-C-V

A soldagem por resistência elétrica, foi realizada no laminado compósito termoplástico (PPS-C/V). No gráfico abaixo (Fig. 64) é mostrada a curva Força x Deslocamento, os pontos em vermelho foram destacados para identificar as imagens da figura 65. Esses pontos estão identificados pelas letras A, B, C e D.

Na figura 65, são mostradas as imagens referentes ao ensaio de correlação de imagens, analisadas nos pontos A, B, C e D, para o processo de soldagem por resistência elétrica no compósito PPS/C-V. As imagens foram adicionadas em ordem alfabéticas, de acordo com o gráfico da figura 64. As imagens mostram o campo de deslocamento da área visível dos corpos de provas que identificam as falhas ocorridas no laminado durante o ensaio (SBS). As setas representam o deslocamento no plano e a tonalidade de fundo é uma medida da amplitude do deslocamento total. Zonas mais escuras permitem maiores deslocamentos.

Ao analisarmos os pontos A e B (Fig. 64) e compararmos com a imagens (Fig. 65-A e 65-B), podemos verificar que o laminado ainda não falhou.

Na figura 65-C, ocorre a primeira falha, a mesma está indicada pela seta preta. De acordo com o gráfico (Fig. 66), essa falha ocorreu com 2000 N, ou seja, 44,07 MPa, diferentemente do que mostrado na figura 65 no qual o laminado se mostra com uma resistência de 54,67 MPa.

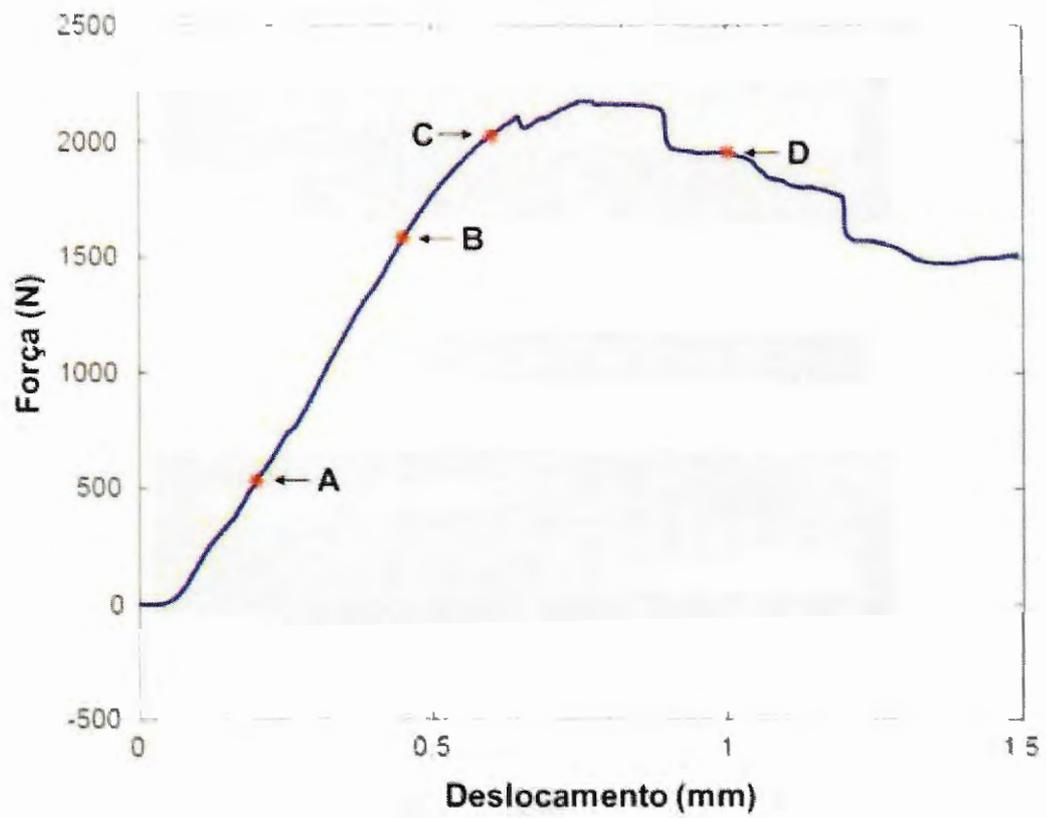


Figura 64: Gráfico Força x Deslocamento, referente ao laminado compósito PPS/C-V soldado pelo processo de resistência elétrica.

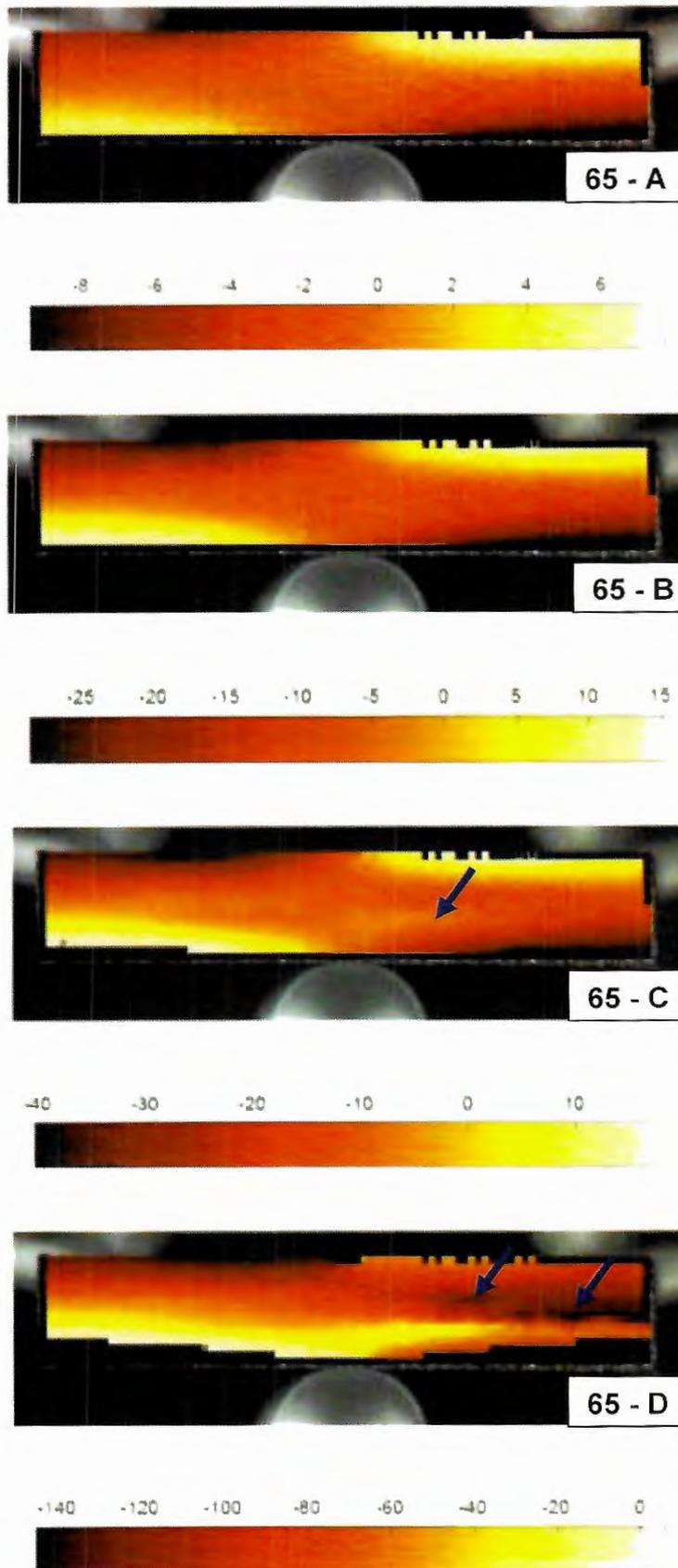


Figura 65: Imagens referentes ao ensaio de correlação de imagens, analisadas nos pontos A, B, C e D, para o processo de soldagem por resistência elétrica no composto PPS/C-V.

4.15 Comparação dos resultados do ensaio mecânico SBS referentes aos processos de soldagem por resistência elétrica, radiação infravermelha C-V, radiação infravermelha -C e adesivada e suas respectivas micrografias

Com intuito de estudar e posteriormente comparar melhor o processo de soldagem por radiação infravermelha, foram realizados novos ensaios de SBS e suas respectivas micrografias para diferentes tipos de juntas e processos. No gráfico de barras (Fig. 66), são mostrados os resultados comparando os melhores resultados finais de SBS com outros processos de soldagem e seus respectivos desvios padrão.

Ao compararmos os resultados através do gráfico de barras, podemos destacar a segunda barra (adesivada), na qual corresponde à um espécime EPX-C, onde a união dos laminados para a geração da junta sobreposta simples de cisalhamento foi executada através do processo de colagem, utilizando adesivo epoxídico suportado por trama de filamento polimérico de modo a restringir seu vazamento pelas bordas da junta e o consequente empobrecimento da linha de união quanto ao agente de adesão. E a quarta barra (soldagem por radiação infravermelha, utilizando laminado compósito PPS-C, sem o vidro) a qual ambos os processos apresentaram um resultado melhor, porém com um desvio padrão alto comparado com o processo de soldagem por radiação infravermelha PPS/C-V.

É importante destacarmos que no caso da última barra (PPS-C), foi utilizado o mesmo processo/parâmetro de soldagem e o laminado compósito, porém sem as fibras de vidros existente na superfície do laminado. Os resultados expressivos, demonstraram que trabalhos futuros podem ser realizados utilizando esse mesmo laminado e processo.

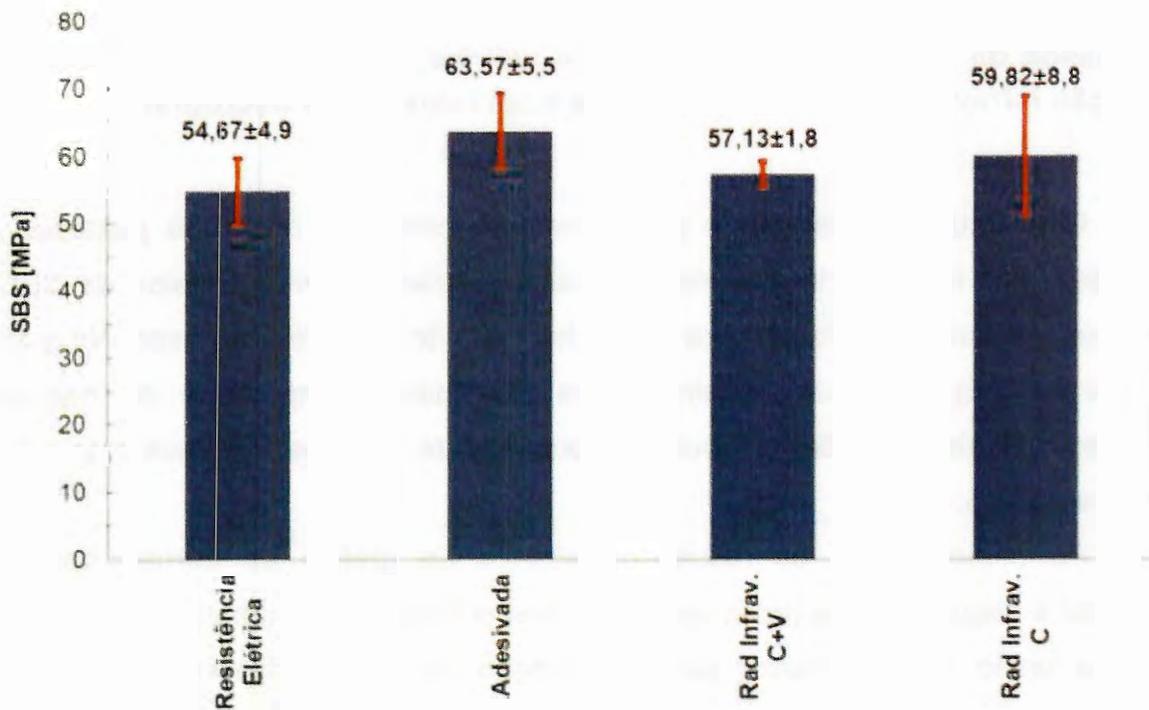


Figura 66: Gráfico de barras comparando os melhores resultados de resistência ao cisalhamento com outros processos de soldagem e seus respectivos desvios padrão.

A micrografia abaixo (Fig. 67) é uma união dos laminados PPS-C-V para a formação da junta sobreposta simples de cisalhamento que foi realizada por intermédio do processo de soldagem por resistência elétrica, tendo como elemento gerador de calor uma malha metálica de aço inoxidável recoberta por filme de PPS em ambos os lados. Esses corpos de provas foram manufaturados e fornecidos prontos para ensaios. A empresa fabricante não autorizou a divulgação de seu nome.

A figura 67 mostra a micrografia nas condições de ensaiada e não ensaiada mecanicamente respectivamente, uma ampla presença de vazios/bolhas/poros distribuídos na região de enriquecimento proposital de PPS pela adição de filme puro do polímero, na camada de revestimento de PPS-V e em regiões do núcleo dos aderentes (PPS-C) junto à lâmina de revestimento dos laminados aderentes, ou seja, no entorno da linha de solda assim como trincas intralaminares transversais. Há alguma evidência de delaminações na interface entre os laminados aderentes e a área rica em PPS que envolve a malha metálica, assim com entre o laminado núcleo de PPS-C e a camada de revestimento de PPS-V externa à junta, porém tal hipotetização não é passível de confirmação por intermédio da técnica de inspeção ora empregada (Castro, 2014). O inserto metálico imerso em zona rica no polímero

puro PPS-V é apontado por uma seta azul. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos.

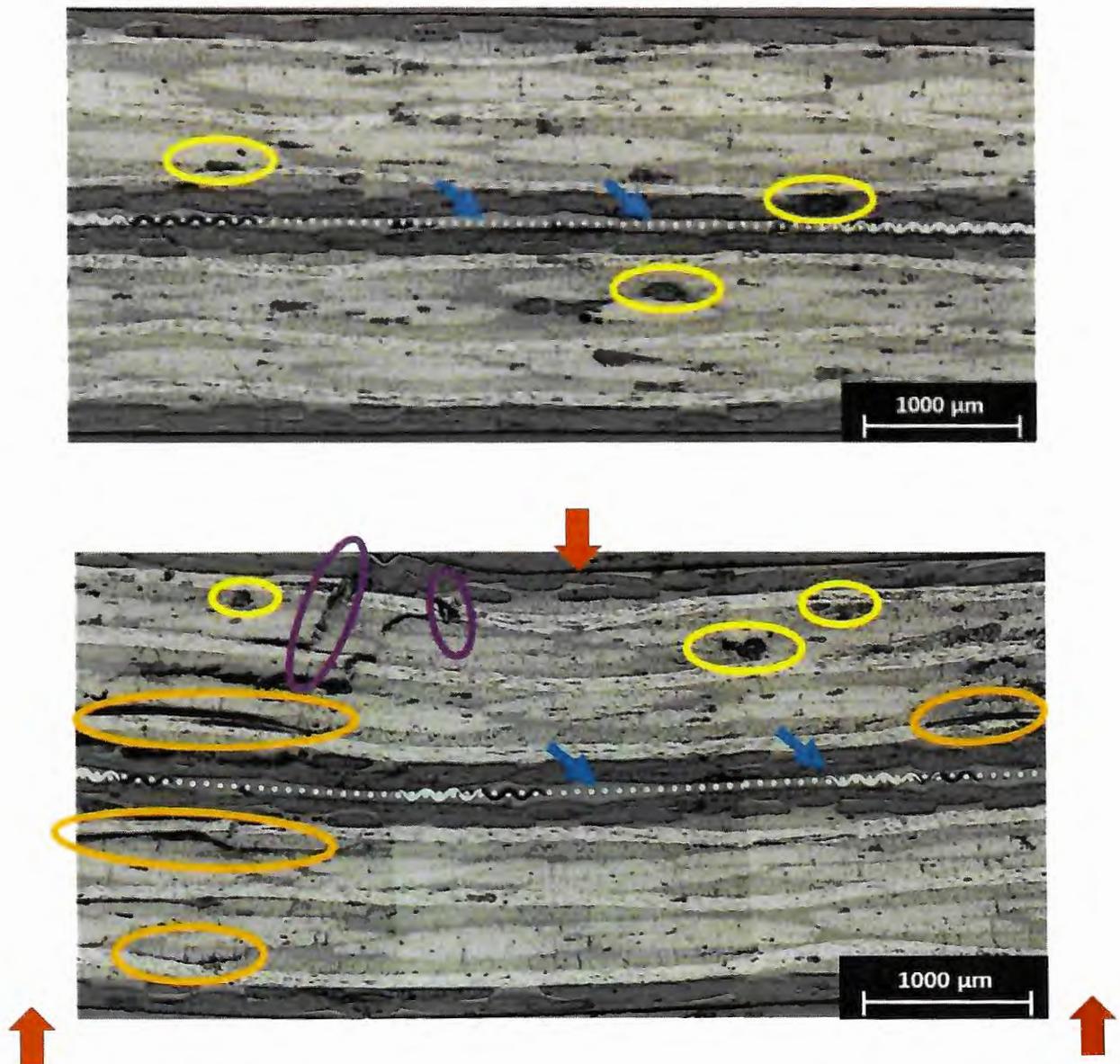


Figura 67: Junta sobreposta simples de cisalhamento no qual foi realizada por intermédio do processo de soldagem por resistência, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada.

A figura 68, mostra a micrografia da união dos laminados PPS-C para a formação da junta sobreposta simples de cisalhamento formada por intermédio do processo de soldagem por radiação infravermelha nas condições de ensaiada mecanicamente e não ensaiada. Como já era esperado, as micrografias apresentaram uma boa qualidade na soldagem, apresenta poros/vazios apenas nas regiões de soldagem isentando as de falhas coesivas. A soldagem foi realizada utilizando as configurações chamadas de “ideais” para o processo de soldagem por

radiação infravermelha utilizando os laminados PPS/C-V. Apesar dos resultados serem satisfatórios, novos estudos e configurações na máquina de soldagem deverão ser estudadas utilizando os laminados PPS-C. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos.

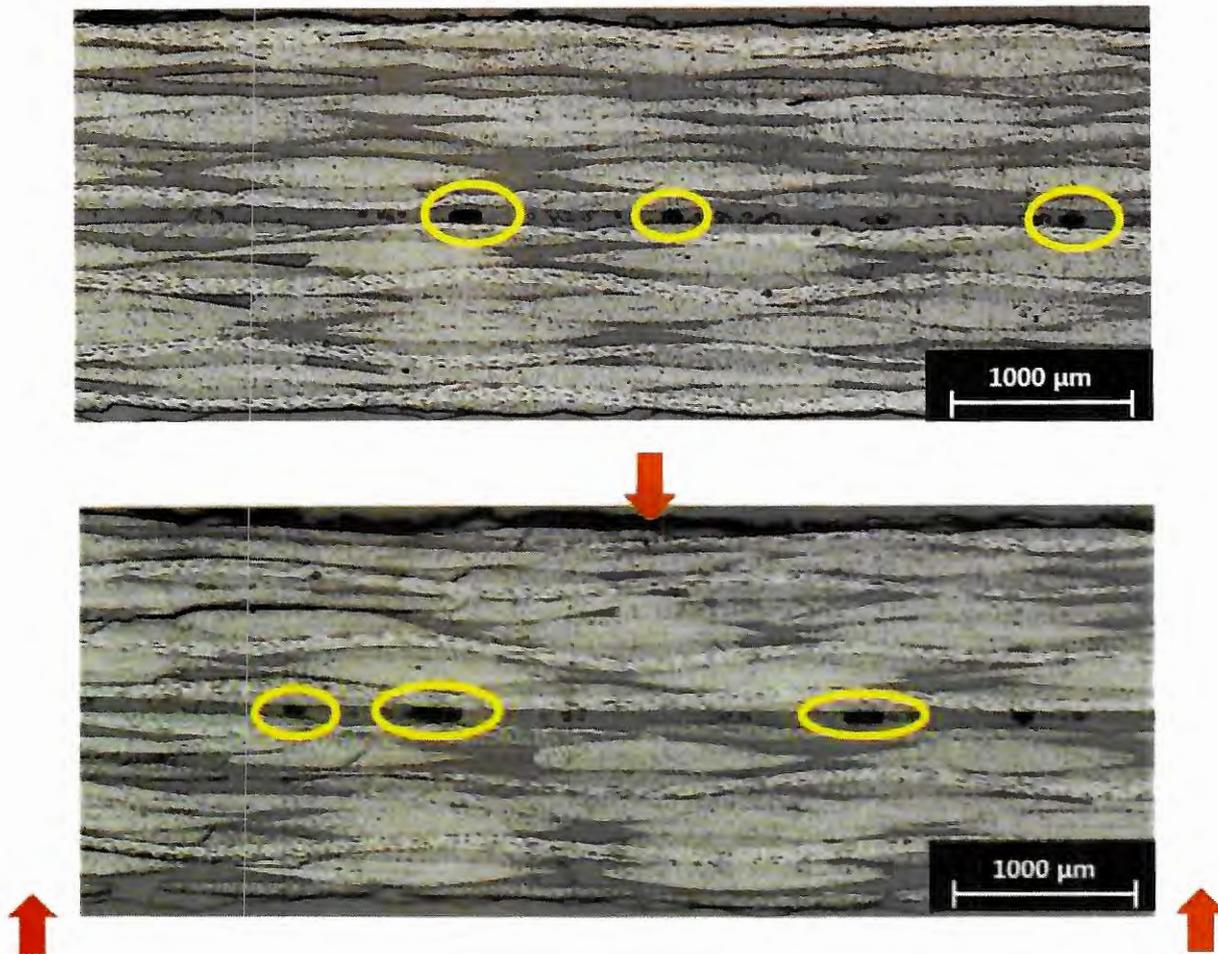


Figura 68: Junta sobreposta simples de cisalhamento no qual foi realizada por intermédio do processo de soldagem por radiação infravermelha, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada.

A micrografia abaixo corresponde a um espécime EPX-C, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada respectivamente. A figura 69 mostra o tipo junta sobreposta simples colada, onde se pode observar a presença de cúspides na matriz termorrígida nos espaços existentes entre as fibras de carbono, ou entre as posições ocupadas pelas mesmas anteriormente à fratura, durante o ensaio mecânico. Este tipo de morfologia de fratura predomina sob condições de carregamento por cisalhamento de sistemas compósitos fibrosos de matriz polimérica frágil, tal como o caso das termorrígidas (LANCIOTTI *et al.*, 1995) e (TARPANI *et al.*, 2006).

As micrografias (Fig. 69) abaixo não permitem concluir cabalmente a respeito do nível de interação entre a matriz resinosa e as fibras de reforço, que, no caso do sistema EPX-C, deve ser de alta energia (i.e., interação forte), visto que são identificados descolamento de fibras (falha adesiva de relativamente baixa energia – microtrincas (circulada em azul), trincas translaminares (circulado em roxo) e interlaminares (circuladas em amarelo), também são observados. As setas verticais vermelhas indicam a aplicação de esforço em flexão sob três pontos.

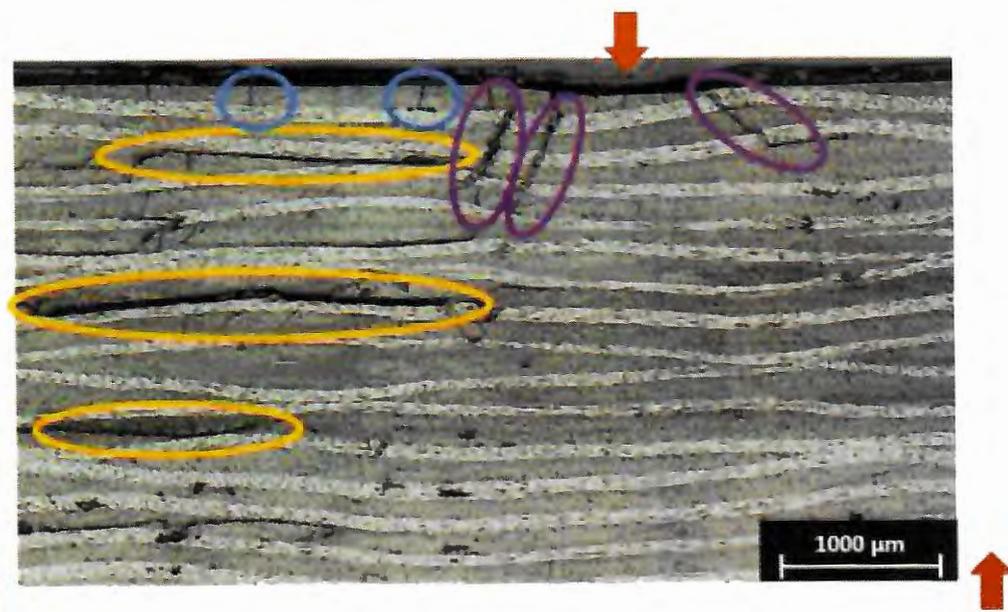
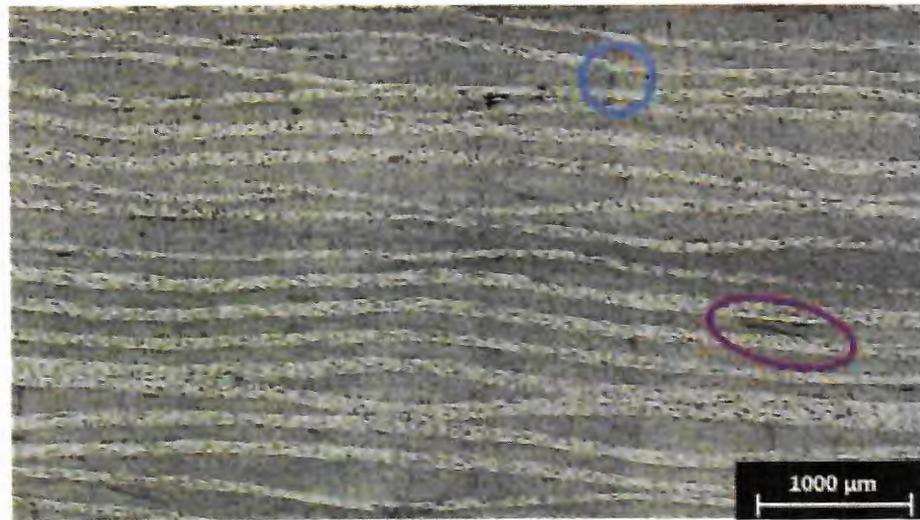


Figura 69: Junta sobreposta simples de cisalhamento no qual foi realizada por intermédio do processo de colagem, na condição de ensaiada mecanicamente e não ensaiada respectivamente.

5. CONCLUSÕES

Após a realização de várias soldagens em laminados compósitos de matriz termoplástica soldadas por radiação infravermelha, testado mecanicamente (SBS) e analisado através de microscopia óptica, o presente estudo propiciou as seguintes conclusões:

- ✓ O ensaio de espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho próximo (FT-NIR), mostrou que o lado opaco do filme de PPS absorve um pouco a mais e, portanto, foi o lado exposto à incidência da radiação infravermelha no processo de soldagem.
- ✓ A análise da cristalinidade do PPS na região de solda por DSC, mostrou que tanto os filmes de PPS virgem quanto os submetidos à irradiação infravermelha, possuem baixa cristalinidade. Dessa forma, fica caracterizado que na região de soldagem, o polímero apresenta uma configuração amorfa.
- ✓ Com a verificação da temperatura na superfície do laminado através dos ensaios de termografia e termopar, podemos concluir que a temperatura de consolidação para aquecimento de 38 segundos é o ideal, pois não existe excessivo aquecimento como o caso de 46 segundos de exposição, e nem insuficiência no caso de 30 segundos.
- ✓ Em relação ao processo de soldagem foi possível observar através de microscopia óptica, que a seleção adequada dos parâmetros do processo, permitiu uma redução significativa da presença de defeitos das soldagens iniciais (configuração I) para a configuração atual, no qual foram obtidos os melhores resultados até o presente momento. A determinação dos parâmetros de processamento é particular de cada equipamento de soldagem, uma vez que, não se tem um controle adequado sobre os mecanismos de transferência de calor entre o componente a ser soldado e a máquina de soldagem.

- ✓ A partir dos ensaios ensaio SBS, ficou claro que a união entre o filme PPS e os laminados são alguns pontos fundamentais para uma boa resistência mecânica, uma vez que o esforço de cisalhamento é aplicado nesta região. No entanto, as propriedades superiores obtidas, não só são explicadas pela melhor aderência entre filme e laminado, mas também pelo menor número de microfissuras e vazios, onde ambos foram proporcionados a partir de um processo de fusão mais uniforme, evitando assim o aquecimento em regiões desnecessárias.
- ✓ Os ensaios SBS com correlação de imagens, foi possível identificar através das imagens as possíveis falhas no laminado, que ocorreram durante o ensaio, mostrando que a tensão máxima indicada pelo SBS, pode não ser a tensão real.
- ✓ Comparando os resultados desta Tese com outros processos de soldagem, como resistência elétrica e indução eletromagnética e soldagem por radiação infravermelha realizada pela *Ghent University*, o processo por radiação infravermelho realizado por nós, mostrou-se mais eficiente quando comparados com os ensaios de SBS e análises por microscopia óptica.

Por fim, a seleção adequada dos parâmetros operacionais de soldagem por radiação infravermelho permitiu uma redução significativa de defeitos no produto final e conseqüentemente a melhora de suas propriedades mecânicas, como evidenciado por inspeção de microscopia óptica.

Além disso, os métodos de ligação por fusão são quase sempre preferíveis aos de fixação mecânica e adesiva, evitando grandes concentrações de tensões induzidas por furos, procedimentos intensivos em trabalho e demorados.

O processo de soldagem ainda pode ser aprimorado a partir de algumas modificações, tais como:

1- Aumento na velocidade de recuo da lâmpada de modo permitir a prensagem da junta enquanto a mesma apresenta condições ótimas de adesão por fusão;

2- Aumento na velocidade na descida do pistão de prensagem visando garantir o mesmo efeito acima mencionado;

Essas modificações certamente contribuirão para a obtenção de juntas com desempenho mecânico superior as presentemente exibidas neste estudo.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectiva para trabalhos futuros, vislumbra-se as seguintes possibilidades:

- 1) **Caracterização do polímero puro e dos laminados compósitos sob o efeito da radiação infravermelha:** condução de análises térmicas tais como TGA, DSC, FTIR e DMA para verificação dos efeitos da radiação infravermelha nas propriedades termo-físicas dos materiais (laminados aderentes e filme adesivo termoplástico);
- 2) **Planejamento e análise de experimento:** com a finalidade de determinar e confirmar os parâmetros mais adequados para o processo de soldagem por radiação infravermelha.

REFERÊNCIAS

- AGEORGES C.; YE L.; HOU M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review, **Composites: Part A**, v.32, p.839-857, 2001.
- AGEORGES, C.; YE, L.; MAI, Y. W.; HOU, M. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part I: Heat transfer. **Composites Part A**, v. 29A, p. 899-909, 1998.
- ALLAER, K.; DE BAERE, I.; JACQUES, S.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Assessment of the infrared welding process for a carbon fabric reinforced PPS**. ECCM15 - 15th European conference on composite materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012.
- ALMEIDA, S.F.M.; NOGUEIRA N. Z. S. Effect of void content on the strength of composite laminates. **Composite Structures**, v.28, p.139-148, 1994.
- AIRBUS. Disponível em: <http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family.html>. Acesso em 10 Abr. 2015.
- ARICI, A.; SINMAZÇELIK, T.; CAPAN L. Influence of annealing on the performance of short glass fiber-reinforced polyphenylene sulfide (PPS). **Composites. Journal of Composites Materials**, v.39, n.1, p. 21-33, 2005.
- BAERE, I.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Fusion bonding of carbon fabric reinforced polyphenylene sulfide**. 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.
- BENATAR, A.; GUTOWSKI, T.G. Methods for fusion bonding thermoplastic composites. **SAMPE Quarterly**, 18 (1), p. 35-42, 1986.
- BOEING. 1995. Disponível em: <<http://www.boeing.com/commercial/787>>. Acesso em: 10 Abr. 2015.

BOTELHO, E. C.; COSTA, A. P.; COSTA, M. L.; NARITA, N. E.; TARPANI, J. R. A, **Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications** *J. Aerosp. Technol. Manag.*, São José dos Campos, Vol.4, No 3, pp. 255-265, Jul.-Sep. 2012

BRADY, D. G. The crystallinity of poly(phenylene sulfide) and its effect on polymer properties. *Journal of Applied Polymer Science* 1976, 20, 2541-2551, 2012.

BURAKOWSKI, L. **Estudo da Interface de Compósitos Termoplásticos Estruturais Processados a Partir de Fibras de Carbono com Superfícies Modificadas**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 189 f, 2001.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2ª Ed. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2006.

CAMPBELL, F. C. **Manufacturing technology for aerospace structural materials**. 1a Ed. Elsevier Ltda, 2006.

CARETTO, F. Studying the “induction welding” process applied to thermoplastic-matrix composites. *Energia, Ambiente e Innovazione*, 2011.

CASTRO C.E.; OLIVEIRA J.; TARPANI J.R. **Interlaminar shear stress testing for interface quality assurance of composite single lap joints**. 2nd BRAZILIAN Conference on composite materials – BCCM2, São José dos Campos-SP, Brasil, 2014.

CASTRO, C.E.G. **Caracterização mecânica e análise de falha de juntas termoplásticas soldadas e termorrígidas coladas de laminados compósitos de grau aeronáutico** (2014). Pag. 80. USP-EESC, São Carlos – SP, 2014.

COSTA, G. G. **Avaliação da Influência dos Ciclos Térmicos nas Propriedades dos Compósitos Termoplásticos de PPS e PEI com Fibras de Carbono e Vidro 149 Conformados por Prensagem a Quente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, 2006.

CHAZERAIN, A. **Characterization of resistance-welded thermoplastic composite double-lap joints**. Thesis - Mechanical Engineering Department, McGill University, Montreal, 2009.

CRESPY, D.; BOZONNET, M.; MEIER, M. 100 years of Bakelite, the material of 1000 use', **History of Science**, DOI: 10.1002/anie.200704281. 2008.

DE BAERE, I.; PAEPEGEM, W. VAN; DEGRIECK, J. Feasibility Study of Fusion Bonding for Carbon Fabric Reinforced Polyphenylene Sulphide by Hot-Tool Welding. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 25, n. March 2012, p. 135–151, 2012.

DE BAERE, I.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Fusion bonding of carbon fabric reinforced polyphenylene sulfide**. EPJ Web of Conferences, v. 6, 2010.

DUBÉ M.; HUBERT P.; YOUSEFPOUR A.; DENAULT J. Fatigue failure characterization of resistance-welded thermoplastic composites skin/stringer joints. **International Journal of Fatigue**, v. 31, p. 719-725, 2009.

EHRENSTEIN G. W. **Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik**. Hanser, München, 2004.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "Raios infravermelhos"; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/raios-infravermelhos.htm>>. Acesso em 06 de setembro de 2017.

FUHRICH, R. **Infrarotschweißen von Kunststoffen mit thermischen Strahlungsemittern**. Verlag Dr. Hut, München, 2013.

DEPORTER, J; BAIRD, D. G. The effects of thermal history on the structure/property relationship in polyphenylene sulfide/carbon fiber composites. **Polymer Composites** v14 p 201-213, 1993.

DIN EN 60519-12: Safety in electroheating installations – Part 12: Particular requirements for infrared electroheating installations, 2014.

DIN 5030-2: Spectral measurement of radiation; radiation sources; Selection criteria, 1982.

ESPECTRO VISÍVEL. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro_vis%C3%ADvel&oldid=50807475>. Acesso em: 20 dez. 2017.

HEIL M. **Heizstrahlerschweißen thermoplastischer Kunststoffe**, 1994. Tese de doutorado - Universität Gesamthochschule Paderborn, Paderborn, 1994.

HERAEUS GROUP. Disponível em: <https://www.heraeus.com/en/group/home/home.aspx>. Acesso em: 15 Mai. 2015.

JANG, J. & KIM, H. S. Influence of annealing on the performance of short glass fiber-reinforced polyphenylene sulfide (PPS) composites - **Journal of Applied Polymer Science**, 60, p.2297, 1996.

KAWAGOE, M.; NABATA, M.; ISHISAKA, A. - Dynamics of absorbed water in model composites of polyamide 6 and carbon fibre evaluated by differential scanning calorimetry. **Journal of Material Science**, 41, p.6322, 2006.

JEONG H. J. Effects of Voids on the Mechanical Strength and Ultrasonic Attenuation of Laminated Composites. **Journal of Composite Material**, v.31, n.3, p.276-292. 1997.

LANCIOTTI A., LAZZERI L., RAGGI M. Fatigue behaviour of mechanically fastened joints in composite materials. **Composite Structures**, v.33, n.2, p.87-94, 1995.

LIN-VIEN, D.; COLTHUP, N. B.; FATELEY W. G.; GRASSELLI J. G. **The Handbook of infrared and Raman characteristic frequencies of organic molecules**. Academic Press, London, 1991.

LOW, J.; REED, A. **Physical Principles Explained**, London: Butterworth-Heinemann, 1994.

LU, D.; Yang, Y.; Zhuang, G.; Li, B. *Macromol. Chem. Phys.* 2001, 202, 734-738.
McCARVILLE, D. A., SCHAEFER H. A., Processing and Joining of Thermoplastic Composites, **ASM Handbook Vol. 21 Composites, ASM International**, pp. 633-645, 2001.

McCARVILLE, D. A., SCHAEFER H. A., Processing and Joining of Thermoplastic Composites, **ASM Handbook Vol. 21 Composites, ASM International**, pp. 633-645, 2001.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1ª Ed. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

NIU, M. C. Y. **Composite airframe structures**. 1a Ed. Conmilit Press Ltd., Hong Kong, 1992.

NOGUEIRA, C. L.; MARLET, J. M. F.; REZENDE, M. C. **Processo de Obtenção de Pré-Impregados Poliméricos Termoplásticos via Moldagem por Compressão a Quente**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. Associação Brasileira de Polímeros vol. 9 no. 3 São Carlos/SP, 1999.

O'SHAUGHNESSEZ, P.G.; DUBÉ, M.; VILLEGAS, I.F. Modeling and experimental investigation of induction welding of thermoplastic composites and comparison with other welding processes. **Journal of composite materials**, v.0, p.1-16, Jun. 2015.

PERNG, L. H. Thermal Decomposition Characteristics of Poly (Phenylene Sulfide) By Stepwise Py-GC/MS and TG/MS Techniques. **Polymer Degradation and Stability**, v.69, 323-332. 2000.

POTENTE, H.; NATROP, J.; PEDERSEN, T. K.; UEBBING, M. Comparative investigation into the welding of glass-fiber-reinforced PES. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, V.6, p.147-159, 1993.

SERGEYEV, V. A.; SHITIKOV, V. K.; NEDEL'KIN, V. I.; ASKADSKII, A. A.; BYCHKO, K. A.; SLONIMSKII, G. L.; AND KORSHAK, V. V. **Polym. SCI. USSR** 19:1494, 1977.

SIQUEIRA, E. J.; **Estudo dos Critérios de falha em compósitos PPS/Fibras de carbono utilizando Elementos Finitos**. Tese Mestrado – Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil, 2009.

SKOOG, D. A.; LEARY, J. J. **Principles of Instrumental Analysis** 4. ed. New York: Saunders College Publishing, 1992.

Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. ASTM- D2344, 2006.

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

STONE D. E.; CLARK, B. **Ultrasonic Attenuation as a Measure of Void Content in Carbon-Fibre Reinforced Plastics**. *Non Destructive Testing*, July, p.137-145, 1975.

LEE, T. H.; BOEY, Y. C.; KHOR, K. A. X-ray diffraction analysis technique for determining the polymer crystallinity in a polyphenylene sulfide composite. **Polymer Composites** v16 p 481-488, 1995.

TARPANI J. R.; MILAN M. T., SPINELLI D.; BOSE W. W. Mechanical performance of carbon-epoxy laminates - part II: quasi-static and fatigue tensile properties, **Materials Research**, v.9, p.121-130, 2006.

TENCATE ADVANCED COMPOSITES USA, 2008 INC. CETEX Thermo-Lite® Thermoplastic Composite Materials. Disponível em: <<http://direct.tencate.com/default.aspx>>. Acesso em: 12 Jun. 2017.

TWE, M. M.; LIAO, K. Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites, **Composites Science and technology**, Vol. 63, p. 375-387, 2003.

VILLEGAS, I. F.; MOSER, L.; YOUSEFPOUR, A.; MITSCHANG, P.; BERSEE, H. E. N. **Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites**. The thermoplastic composite material, v.26, p. 1007-1024, 2012.

WIEBECK, H; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia – Tecnologia e Aplicação**. Artiliber, 1ª ed., p.350, 2005.

YARLAGADDA S.; FINK B. K; GILLESPIE Jr. J. W. Resistive susceptor design for uniform heating during induction bonding of composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, p.321-337, 1998.

YE, L.; SCHEURING, T.; FRIEDRICH, K. Matrix morphology and fibre pull-out strength of T700/PPS and T700/PET thermoplastic composites. **Journal of Materials Science** 30, 4761-4769, 1995.

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.

APÊNDICE A - Produções Científicas

BCCM3 - 2016 – 3ND Brazilian Conference on Composite Materials, Gramado, RS
OPTIMIZING INFRARED WELDING OF CONTINUOUS FIBER-REINFORCED THERMOPLASTIC LAMINATES. Oliveira, J.; Bordini, C. C.; Angelico, R. A.; Anjoletto, T. P.; Tarpani, J. R.

MACMS 2015 - Meeting on Aeronautical Composite Materials and Structures, São Carlos-SP
INFLUENCE OF INFRARED WELDING PARAMETERS ON THERMOPLASTIC COMPOSITE JOINT QUALITY. Oliveira, J.; Angelico, R. A.; Bordini, C. C.; Tarpani, J. R.

BCCM2 – 2014 - 2ND Brazilian Conference On Composite Materials, São José dos Campos, SP
INTERLAMINAR SHEAR STRESS TESTING FOR INTERFACE QUALITY ASSURANCE OF COMPOSITE SINGLE LAP JOINTS. C.E. Castro; Oliveira, J.; Tarpani, J. R.

XII Encontro da SBPMat – 2013, Campos do Jordão, SP
INFRARED WELDING OF FIBRE-REINFORCED THERMOPLASTICS - Oliveira, J.; Gratao, R.; Sian, M.; Tarpani, J. R.

23° Simpósio Intenacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP - Mostra de Destaque IC/IT, 2015, São Paulo.
LAMINADOS COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS SOLDADOS POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA - Bordini, C. C.; Oliveira, J.; Tarpani, J. R.

SICEM 2011 - XIV Simposio em Ciencia e Engenharia de Materiais - São Carlos, SP
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SOLDAGEM POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA PARA LAMINADOS COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS DE GRAU AERONÁUTICO. Cruz, T.; Oliveira, J.; Tarpani, J. R.

SICEM 2010 - XIII Simposio em Ciencia e Engenharia de Materiais - São Carlos, SP
SOLDAGEM DE LAMINADOS COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA. Oliveira, J.; Portela, A. M. A.; Tarpani, J. R.

APÊNDICE B - Resultados finais e suas respectivas configurações referente ao ensaio de resistência ao cisalhamento do processo de soldagem por radiação infravermelha.

Num	Tempo de Radiação	Pressão Utilizada	Tempo de Prensagem	Temperatura (°C)	Umidade do ar (%)	CDP 1					CDP 2				
						esp	larg	comp	Força (N)	Fsbs (MPa)	esp	larg	comp	Força (N)	Fsbs (MPa)
1			30 s	22,4	52	4	8,4	24,76	2411	53,816964	4	8,37	24,77	2315	51,859319
2		0,1 Mpa	180 s	21,7	56	4	8,22	24,76	2352	53,649635	4,05	8,14	24,84	2122	48,275548
3			300 s	20,6	59	4	8,08	24,76	2353	54,602413	4	8,16	24,68	2404	55,238971
4			30 s	18,5	50	4,1	8,18	24,56	2309	51,635458	4	7,9	24,67	1968	46,708861
5	46 s	0,18 Mpa	180 s	19,4	43	4,1	8,45	24,83	2396	51,868957	4	8,22	24,75	2287	52,166971
6			300 s	18,9	48	4	8,17	24,86	2249	51,614137	3,9	8,21	24,85	2232	52,281458
7			30 s	15,2	57	4,1	8,22	24,76	2369	52,719423	4,1	8,34	24,79	2005	43,977014
8		0,29 Mpa	180 s	17,5	52	4	8,05	24,86	2346	54,642857	4,15	8,23	24,71	2312	50,769298
9			300 s	17,7	51	4,1	8,05	24,75	2293	52,105742	4,08	7,92	24,84	2197	50,992461
10			30 s	24,3	39	4,2	8,1	24,84	2560	56,43739	4	7,9	24,85	2499	59,311709
11		0,1 Mpa	180 s	23,5	48	4	8,25	24,57	2160	49,090909	4,2	8,25	24,79	2200	47,619048
12			300 s	22,8	44	4,15	8,23	24,62	2504	54,985434	4,1	8,2	24,78	2280	50,862582
13			30 s	20,2	39	4,1	8,27	24,84	2510	55,519509	4,15	8,21	24,83	2463	54,216867
14	38 s	0,18 Mpa	180 s	20,4	36	4,15	7,9	24,7	2595	59,364038	4	8,27	24,63	2473	56,068622
15			300 s	20,4	37	4,1	8,29	24,79	2195	48,434788	4,13	8,14	24,77	2260	50,419118
16			30 s	19,5	47	4	8	24,84	2538	59,484375	4,07	8,3	24,83	2684	59,58971
17		0,29 Mpa	180 s	19,7	44	4,18	8,15	24,8	2245	49,424663	4,15	8,32	24,68	1471	31,952329
18			300 s	20	42	4,1	8,15	24,85	2404	53,957803	4,1	8,24	24,76	2164	48,040493
19			30 s	24,8	35	4,25	7,96	24,79	1603	35,537984	4,15	8,28	24,5	1875	40,924568
20		0,1 Mpa	180 s	24,8	35	4,29	8,08	24,53	2210	47,817282	4,1	8,3	26,2	1860	40,993241
21			300 s	24,8	34	4,2	8,4	24,55	2075	44,111395	4,3	7,9	26,3	2003	44,222844
22			30 s	21,4	38	4,12	8,25	24,36	2072	45,719329	4,25	8,04	24,5	2415	53,007024
23	30 s	0,18 Mpa	180 s	21	39	4,2	8,17	24,79	2184	47,735618	4,2	8,05	24,85	2514	55,767524
24			300 s	19,4	42	4,3	8,15	24,81	2114	45,241832	4,1	8,12	24,75	2185	49,223537
25			30 s	18,9	43	4,2	8,15	24,47	2102	46,056091	4,2	8,2	24,55	2414	52,569686
26		0,29 Mpa	180 s	18,2	46	4,15	8,13	24,84	1917	42,613257	4,1	8,6	24	2022	43,009075
27			300 s	15,7	51	4,2	8,26	24,5	2262	48,901764	4,2	8,16	24,75	2092	45,780812

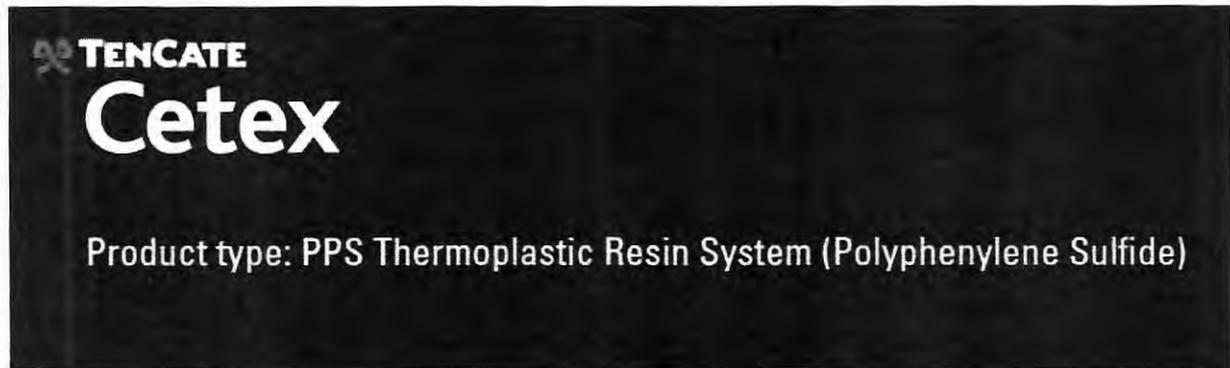
APÊNDICE B - Resultados finais e suas respectivas configurações referente ao ensaio de resistência ao cisalhamento do processo de soldagem por radiação infravermelha.

Num	Tempo de Radiação	Pressão Utilizada	Tempo de Prensagem	Temperatura (°C)	Umidade do ar (%)	CDP3					CDP4				
						esp	larg	comp	Força (N)	Fsbs (MPa)	esp	larg	comp	Força (N)	Fsbs (MPa)
1			30 s	22,4	52	4,1	8,34	24,87	2340	51,324794	4,1	8,17	24,82	2216	49,616384
2		0,1 Mpa	180 s	21,7	56	4	8,25	24,73	2389	54,295455	4	8,17	24,65	2347	53,863219
3			300 s	20,6	59	4	8,31	24,58	2187	49,345668	4,15	8,28	24,71	2202	48,061812
4			30 s	18,5	50	4	7,98	24,7	2259	53,078008	4	7,9	24,68	1981	47,017405
5	46 s	0,18 Mpa	180 s	19,4	43	4	7,9	24,84	2015	47,824367	3,9	8,46	24,85	2340	53,191489
6			300 s	18,9	48	4	8,47	24,77	1969	43,587662	3,95	8,38	24,56	2325	52,679677
7			30 s	15,2	57	4,1	8,08	24,41	2569	58,16077	4,2	8,41	24,82	2590	54,994055
8		0,29 Mpa	180 s	17,5	52	4	8,01	24,79	2478	58,005618	4	8,5	24,73	2226	49,102941
9			300 s	17,7	51	4,05	7,91	24,71	2198	51,458538	4,1	8,18	24,78	2296	51,344743
10			30 s	24,3	39	4,13	8,25	24,69	2630	57,891261	4	8,19	24,78	2567	58,768315
11		0,1 Mpa	180 s	23,5	48	4,1	8,27	24,86	2505	55,408913	4,15	8,1	24,86	2175	48,527443
12			300 s	22,8	44	4,15	8,27	24,71	2486	54,326132	4,1	8,25	24,76	2490	55,210643
13			30 s	20,2	39	4,1	7,93	24,86	2515	58,015255	4	8	24,65	2195	51,445313
14	38 s	0,18 Mpa	180 s	20,4	36	4	8,25	24,78	2540	57,727273	4,05	8,29	24,81	2479	55,376849
15			300 s	20,4	37	4,15	8,26	24,7	2580	56,448555	4	8	24,73	2406	56,390625
16			30 s	19,5	47	4,1	7,9	24,58	2541	58,837604	4	8,1	24,76	2488	57,592593
17		0,29 Mpa	180 s	19,7	44	4,05	7,91	24,83	2246	52,582292	4,2	8,19	24,72	2089	45,547706
18			300 s	20	42	4	8,14	24,62	2180	50,214988	4,2	8,1	24,82	2055	45,304233
19			30 s	24,8	35	4,15	8,2	25	1962	43,241258	4,2	8,13	24,7	1970	43,270076
20		0,1 Mpa	180 s	24,8	35	4,2	8,3	24,8	2212	47,590361	4,2	8,2	24,66	2179	47,452091
21			300 s	24,8	34	4,25	8,4	24,75	2083	43,760504	4,15	8,38	24,42	2127	45,870834
22			30 s	21,4	38	4	8,11	24,82	2134	49,337238	4,2	8,29	24,81	2415	52,020507
23	30 s	0,18 Mpa	180 s	21	39	4,2	8,14	24,79	2150	47,165672	4,1	8,17	24,73	2129	47,668448
24			300 s	19,4	42	4,2	8,13	24,68	2086	45,817958	4,15	8,4	24,89	2025	43,567126
25			30 s	18,9	43	4,12	8,22	24,79	2051	45,421125	4,2	8,17	24,78	2244	49,047036
26		0,29 Mpa	180 s	18,2	46	4,2	8,32	24,88	2272	48,763736	4,2	8,33	24,74	1240	26,582061
27			300 s	15,7	51	4,15	8,09	24,68	2052	45,839725	4,2	8,32	24,39	1959	42,045845

APÊNDICE B - Resultados finais e suas respectivas configurações referente ao ensaio de resistência ao cisalhamento do processo de soldagem por radiação infravermelha.

Num	Tempo de Radiação	Pressão Utilizada	Tempo de Prensagem	Temperatura (°C)	Umidade do ar (%)	MÉDIAS DOS CDPS				
						Dimensões				
						MED ESP	MED LARG	MED COMP	MED FORÇA	Fsbs (MPa)
1			30 s	22,4	52	4,05	8,32	24,81	2320,50	51,65
2		0,1 Mpa	180 s	21,7	56	4,01	8,20	24,75	2302,50	52,52
3			300 s	20,6	59	4,04	8,21	24,68	2286,50	51,81
4			30 s	18,5	50	4,03	7,99	24,65	2129,25	49,61
5	46 s	0,18 Mpa	180 s	19,4	43	4,00	8,26	24,82	2259,50	51,26
6			300 s	18,9	48	3,96	8,31	24,76	2193,75	50,04
7			30 s	15,2	57	4,13	8,26	24,70	2383,25	52,46
8		0,29 Mpa	180 s	17,5	52	4,04	8,20	24,77	2340,50	53,13
9			300 s	17,7	51	4,08	8,02	24,77	2246,00	51,48
10			30 s	24,3	39	4,08	8,11	24,79	2564,00	58,10
11		0,1 Mpa	180 s	23,5	48	4,11	8,22	24,77	2260,00	50,16
12			300 s	22,8	44	4,13	8,24	24,72	2440,00	53,85
13			30 s	20,2	39	4,09	8,10	24,80	2420,75	54,80
14	38 s	0,18 Mpa	180 s	20,4	36	4,05	8,18	24,73	2521,75	57,13
15			300 s	20,4	37	4,10	8,17	24,75	2360,25	52,92
16			30 s	19,5	47	4,04	8,08	24,75	2562,75	58,88
17		0,29 Mpa	180 s	19,7	44	4,15	8,14	24,76	2012,75	44,88
18			300 s	20	42	4,10	8,16	24,76	2200,75	49,38
19			30 s	24,8	35	4,19	8,14	24,75	1852,50	40,74
20		0,1 Mpa	180 s	24,8	35	4,20	8,22	25,05	2115,25	45,96
21			300 s	24,8	34	4,23	8,27	25,01	2072,00	44,49
22			30 s	21,4	38	4,14	8,17	24,62	2259,00	50,02
23	30 s	0,18 Mpa	180 s	21	39	4,18	8,13	24,79	2244,25	49,58
24			300 s	19,4	42	4,19	8,20	24,78	2102,50	45,96
25			30 s	18,9	43	4,18	8,19	24,65	2202,75	48,27
26		0,29 Mpa	180 s	18,2	46	4,16	8,35	24,62	1862,75	40,24
27			300 s	15,7	51	4,19	8,21	24,58	2091,25	45,64

ANEXO A - Fichas referentes aos laminados de PPS (Poli-Sulfeto de Fenileno) fornecidas pelo fabricante TENCATE.



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 OSU 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

ANEXO A - Fichas referentes aos laminados de PPS (Poli-Sulfeto de Fenileno) fornecidas pelo fabricante TENCATE.

PPS PROPERTIES

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Specific Gravity	1.35
Tg	194°F (90°C)
Melt temp	536°F (280°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	94.6ft-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	8.26	oz/yd ²	280	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

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix				
Mass of fabric	8.85	oz/yd ²	300	g/m ²
Mass of fabric + resin	14.01	oz/yd ²	475	g/m ²
Resin content by volume	47.5	%	47.5	%
Resin content by weight	37	%	37	%
Moisture pick up	0.1	%	0.1	%
Ply thickness	0.0098	in	0.25	mm
Specific gravity	119.8	lb/ft ³	1.92	g/cm ³
Tg (DSC) (amorphous)	194	°F	90	°C
Tg (DSC) (crystalline)	248	°F	120	°C
Tm	536	°F	280	°C

Mechanical properties -67°F (-55°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				
Tensile strength warp	65.6	ksi	453	MPa
Tensile strength weft	64.8	ksi	447	MPa
Tensile modulus warp	3.2	Msi	22	GPa
Tensile modulus weft	3.0	Msi	20	GPa
Compression strength warp	82.1	ksi	566	MPa
Compression strength weft	55.7	ksi	384	MPa
Compression modulus warp	3.8	Msi	27	GPa
Compression modulus weft	3.6	Msi	25	GPa

ANEXO A - Fichas referentes aos laminados de PPS (Poli-Sulfeto de Fenileno) fornecidas pelo fabricante TENCATE.

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
Flexual strength warp	148.9	ksi	1027	MPa
Flexual strength weft	120.5	ksi	831	MPa
Flexual modulus warp	8.7	Msi	60	GPa
Flexual modulus weft	6.5	Msi	45	GPa
In plane shear strength	17.2	ksi	119	MPa
In plane shear modulus	585.8	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

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
26.5	ksi	183	MPa
24.8	ksi	171	MPa
46.1	ksi	318	MPa
74.8	ksi	516	Mpa

MECHANICAL PROPERTIES (CONTINUATION)

Mechanical properties -67°F (-55°C) Dry

Carbon T300 3K 5HS with double sided PPS film

Flexual strength warp	151.3	ksi	1043	MPa
Flexual strength weft	120.9	ksi	834	MPa
Flexual modulus warp	8.6	Msi	59	GPa
Flexual 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

Glass fabric US style 7781 with PPS matrix

15.8	ksi	109	MPa
711.5	ksi	4907	MPa

ANEXO A - Fichas referentes aos laminados de PPS (Poli-Sulfeto de Fenileno) fornecidas pelo fabricante TENCATE.

Mechanical properties 80°C (dry)	Carbon T300 3K 5HS with double sided PPS film				Glass fabric US style 7761 with PPS matrix			
Tensile strength warp	105.9	ksi	730	MPa	40.5	ksi	280	MPa
Tensile strength weft	93.6	ksi	646	MPa	40.7	ksi	281	MPa
Tensile modulus warp	8.2	Msi	57	GPa	2.9	Msi	20	GPa
Tensile modulus weft	7.6	Msi	53	GPa	2.7	Msi	19	GPa
Compression strength warp	80.9	ksi	558	MPa	43.0	ksi	297	MPa
Compression strength weft	76.3	ksi	526	MPa	29.4	ksi	203	MPa
Compression modulus warp	7.5	Msi	51	GPa	3.2	Msi	22	GPa
Compression modulus weft	7.4	Msi	51	GPa	2.9	Msi	20	GPa
Flexual strength warp	138.4	ksi	955	MPa				
Flexual strength weft	115.1	ksi	794	MPa				
Flexual modulus warp	8.4	Msi	58	GPa				
Flexual modulus weft	6.5	Msi	45	GPa				
In plane shear strength	15.7	ksi	108	MPa	8.6	ksi	60	MPa
In plane shear modulus	384.4	ksi	2651	MPa	247.3	ksi	1705	MPa

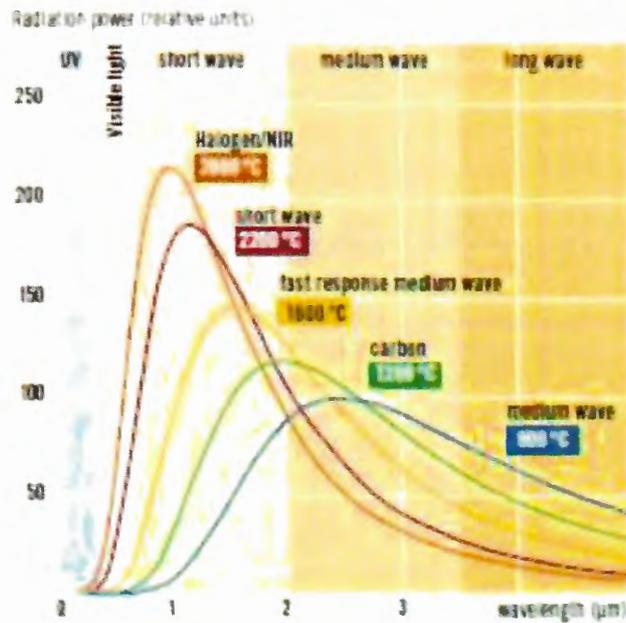
Mechanical properties 176°F (80°C) conditioned at 158°F (70°C) and 85%RH	Carbon T300 3K 5HS with double sided PPS film				Glass fabric US style 7761 with PPS matrix			
Tensile strength warp	109.6	ksi	756	MPa	41.9	ksi	289	MPa
Tensile strength weft	101.2	ksi	696	MPa	41.8	ksi	289	MPa
Tensile modulus warp	8.2	Msi	56	GPa	3.0	Msi	21	GPa
Tensile modulus weft	7.6	Msi	53	GPa	2.8	Msi	19	GPa
Compression strength warp	83.8	ksi	578	MPa	33.4	ksi	230	MPa
Compression strength weft	77.5	ksi	535	MPa	22.6	ksi	156	MPa
Compression modulus warp	7.5	Msi	52	GPa	3.1	Msi	22	GPa
Compression modulus weft	7.4	Msi	51	GPa	2.9	Msi	20	GPa
Flexual strength warp	141.7	ksi	977	MPa				
Flexual strength weft	107.2	ksi	739	MPa				
Flexual modulus warp	8.7	Msi	60	GPa				
Flexual modulus weft	6.4	Msi	44	GPa				
In plane shear strength	15.7	ksi	104	MPa	9.8	ksi	68	MPa
In plane shear modulus	434.7	ksi	2998	MPa	208.4	ksi	1437	MPa
Open hole tensile strength	39.1	ksi	270	MPa	19.6	ksi	135	MPa
Open hole compressive strength	33.7	ksi	232	MPa	16.0	ksi	110	MPa
Compression after impact	31.6	ksi	218	MPa	0.0	ksi		MPa
Bearing strength yield	59.9	ksi	413	MPa	26.7	ksi	184	MPa
Bearing strength ultimate	121.6	ksi	839	Mpa	55.6	ksi	384	Mpa

ANEXO A - Fichas referentes aos laminados de PPS (Poli-Sulfeto de Fenileno) fornecidas pelo fabricante TENCATE.

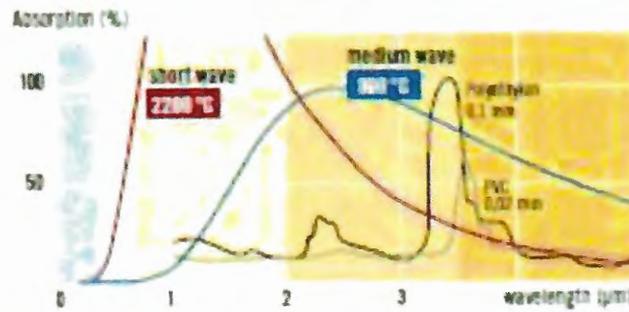
Mechanical properties 212°F (100°C) conditioned at 150°F (70°C) and 85%RH)	Glass fabric US style 7781 with PPS matrix			
Tensile strength warp	35.7	ksi	246	MPa
Tensile strength weft	39.6	ksi	273	MPa
Tensile modulus warp	2.8	Msi	20	GPa
Tensile modulus weft	2.6	Msi	18	GPa
Compression strength warp	24.4	ksi	169	MPa
Compression strength weft	16.9	ksi	117	MPa
Compression modulus warp	2.9	Msi	20	GPa
Compression modulus weft	2.5	Msi	18	GPa
In plane shear strength	9.1	ksi	63	MPa
In plane shear modulus	109.0	ksi	752	MPa

FLAMMABILITY PROPERTIES GLASS AND CARBON														
	OSU		Flammability			SMOKE (# 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	

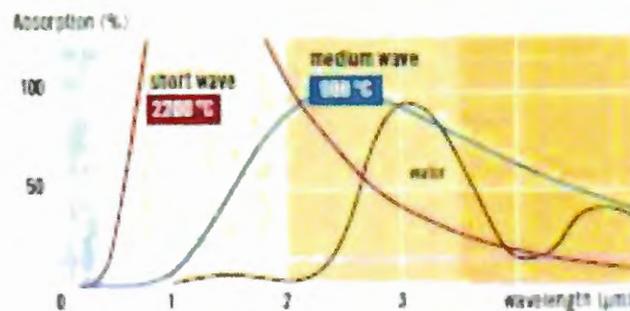
ANEXO B – Catálogo geral da empresa Heraeus, pagina 6, contendo os Espectros da lâmpada infravermelha de ondas curtas utilizadas neste projeto.



Spectral radiation curves for different infrared emitters, normalised to the same power.



Plastics such as polyethylene and polyvinylchloride are particularly good absorbers of infrared radiation in the medium wave region.



Water evaporates more quickly with medium wave infrared emitters as water absorbs radiation particularly well in this region

