

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MATHEUS RODRIGUES SIAN

Soldagem por radiação no infravermelho de laminados compósitos  
termoplásticos

São Carlos

2017



MATHEUS RODRIGUES SIAN

Soldagem por radiação no infravermelho de laminados compósitos  
termoplásticos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Tarpani

São Carlos

2017



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.

S562s Sian, Matheus Rodrigues  
Soldagem por radiação no infravermelho de laminados  
compósitos termoplásticos / Matheus Rodrigues Sian;  
orientador José Ricardo Tarpani. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e  
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, 2017.

1. Soldagem. 2. Infravermelho. 3. Laminado Compósito.  
4. Termoplástico. I. Título.



## FORMULÁRIO PARA RELATÓRIO DE DEFESA DE TCC

Relatório de defesa pública de Trabalho de Conclusão de Curso da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

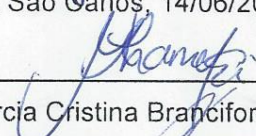

Nome: Matheus Rodrigues Sian		Nº USP: 7243007
Orientador: José Ricardo Tarpani		Nº USP: 981537
Título do TCC: Soldagem por radiação infravermelha de laminados compósitos termoplásticos		
Curso: Engenharia de Materiais e Manufatura		
Disciplina: SMM0325 - Trabalho de Conclusão		
Local da defesa:	Data de defesa: 14/06/2017	Hora da defesa: 14:00:00

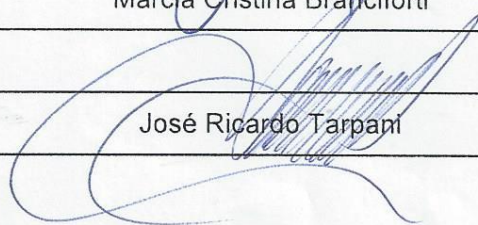
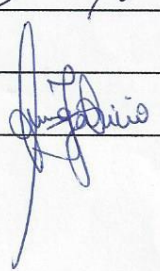
Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passou a palavra aos examinadores para as devidas arguições. Em seguida, a Comissão Julgadora proclamou o resultado:

Membros da Comissão Julgadora	Vínculo	Sigla Unidade	Nota
José Ricardo Tarpani	SMM	EESC	7,0
Márcia Cristina Branciforti	SMM	EESC	7,5
Antônio José Félix de Carvalho	SMM	EESC	8,0

<b>Média=</b>		
Resultado final	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado	<input type="checkbox"/> Reprovado

Eu, Ana M. G. Fabricio, lavrei o presente relatório que assino com os(as) senhores(as). São Carlos, 14/06/2017.

 Márcia Cristina Branciforti	 Antônio José Félix de Carvalho
--	--

 José Ricardo Tarpani	 Ana M. G. Fabricio
---	--





## RESUMO

**SIAN, M. R. Soldagem por radiação no infravermelho de laminados compósitos termoplásticos.** 2017. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Avaliou-se um sistema de soldagem por radiação no infravermelho de laminados compósitos termoplásticos com base no desempenho da junta obtida. Para obtenção da junta primeiramente foi feito uma deposição de um filme de Polissulfeto de Fenileno (PPS) sobre o laminado de fibra de carbono e fibra de vidro com matriz de PPS. Essa deposição ocorreu na própria máquina de soldagem e teve como intuito enriquecer a superfície do laminado com a matriz para que ocorresse uma melhor adesão entre os laminados durante o processo de soldagem. Após a deposição foi efetuada a solda, mudando parâmetros como tempo de aquecimento e distância da lâmpada de infravermelho até o laminado compósito. As juntas produzidas foram caracterizadas por inspeção visual, metalografia e avaliação das propriedades mecânicas em flexão. Os resultados das juntas produzidas foram comparados com a solda por resistência elétrica a qual já é empregada nas indústrias aeronáuticas mais avançadas do mundo. Verificou-se que a solda por radiação no infravermelho tem potencial dentre os processos de soldagens de materiais compósitos, pois é possível obter resultados que chegam a ser mais de 11% melhores do que a soldagem por resistência elétrica.

Palavras-chave: Soldagem. Infravermelho. Laminado compósito. Termoplástico.



## ABSTRACT

SIAN, M. R. **Infrared Welding of Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites.** 2017. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

An infrared radiation welding system of thermoplastic composite laminates was evaluated based on the performance of the joint obtained. To obtain the joint, a deposition of a Polyphenylene sulfide (PPS) film was made on the carbon fiber and glass fiber laminate with PPS matrix. This deposition occurred in the welding machine itself and was intended to enrich the surface of the laminate with the matrix, so that it had a better adhesion between the laminates during the welding process. After the deposition, the weld was performed, changing parameters such as heating time and distance from the infrared lamp to the composite laminate. The joints produced were characterized by visual inspection, materialography and evaluation of the mechanical properties in flexion. The results of the produced joints were compared with the resistance welding that is already used in the most advanced aeronautical industries in the world. It has been verified that the infrared radiation welding has potential among the processes of welding of composite materials, because it is possible to obtain results that are more than 11% better than the resistance welding.

Keywords: Welding. Infrared. Fibre-Reinforced Composites. Thermoplastic.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Elemento opcional, elaborada seguindo a mesma ordem apresentada no texto com cada item designado por seu nome e respectivo número de página.

Figura 1 – Classificação geral dos materiais compósitos.....	19
Figura 2 – Espectro de frequência de ondas eletromagnéticas, em que mostra que a frequência de onda da radiação infravermelha é mais baixa que a frequência da luz visível.....	21
Figura 3 – Esquema da solda por infravermelho.....	22
Figura 4 – Ciclo termodinâmico típico para o sistema de solda por infravermelho.....	22
Figura 5 – Mecanismo de interdifusão macromolecular que ocorre em entre duas partes em contato, durante o processo de soldagem IR retratadas nas Figuras 3 e 4.....	23
Figura 6 – Estrutura e Fórmula química do PPS.....	23
Figura 7 – Máquina de solda.....	24
Figura 8 – Painel de controle.....	25
Figura 9 – Esquema de funcionamento da máquina de soldagem.....	26
Figura 10 - Figura esquemática para achar a distância filamento-berço.....	27
Figura 11 - Soldador (a), laminado (b), laminado com o filme de PPS (c) e laminado com o filme de PPS já fixado (d).....	29
Figura 12 – Amostra com filme de PPS já depositado.....	29
Figura 13 - Região da solda a ser cortada (região demarcada em vermelho).....	31
Figura 14 - figura esquemática da amostra.....	31
Figura 15 - diagrama de carregamento da amostra no ensaio de flexão.....	32
Figura 16 – Tabela de parâmetros de soldagem.....	33
Figura 17 – Uma das amostras soldadas.....	33
Figura 18 – Microscopia da borda da solda.....	34
Figura 19 - Microscopia do centro da solda.....	34
Figura 20 – Gráfico Tensão-deformação das juntas (ASTM D 7264).....	35
Figura 21: Esquema de separação dos laminados por Modo I (aonde a junta é o filme de PPS depositado em cada laminado).....	36

Figura 22 - A imagem da esquerda é a junta 24ir e a da direita é a rw, em ambos os laminados foram separados por modulo 1. Imagem tirada por fotografia macro.....	36
Figura 23 - A imagem da esquerda é a junta 24ir e a da direita é a rw, imagens tiradas do estereoscópio.....	37
Figura 24: Imagens feitas no MEV, do lado esquerdo são as imagens da amostra 24IR (com ampliações de 50 e 600, respectivamente) do lado direito são as imagens da amostra RW (com ampliações de 50 e 600, respectivamente).....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

E	–	Módulo de elasticidade
IR	–	Infravermelho (infrared)
P	–	Pressão
PEEK	–	Poliéter-éter-cetona
PP	–	Polipropileno
PPS	–	Polisulteto de fenileno
RW	–	Solda por Resistencia elétrica (resistance welding)
SAP	–	Pó de alumínio sinterizado
t	–	Tempo
T	–	Temperatura
T <sub>g</sub>	–	Temperatura de transição vítea
T <sub>m</sub>	–	Temperatura de fusão
TP	–	Termoplástico
TR	–	Termorrígido
ε	–	Deformação
σ	–	Tensão





## SUMÁRIO

1 OBJETIVO.....	17
2 INTRODUÇÃO.....	18
2.1 Materiais compósitos.....	18
2.2 Juntas em materiais compósitos.....	19
2.3 Solda por infravermelho.....	20
2.4 Polissulfeto de fenileno (PPS).....	23
2.5 O Sistema de soldagem.....	24
3 MÉTODOS E PROCEDIMENTO.....	27
3.1 Regulagem da máquina.....	27
3.2 Preparação das amostras.....	28
3.3 Preparação das amostras para a deposição do PPS.....	28
3.4 Soldagem do laminado compósito.....	29
3.5 Metalografia.....	30
3.6 Ensaio de flexão 3 pontos.....	31
4 RESULTADOS.....	33
4.1 Soldagem do laminado compósito.....	33
4.2 Metalografia.....	34
4.3 Ensaio de flexão 3 pontos.....	35
4.4 Análise das juntas.....	36
5 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS.....	39



## 1 OBJETIVO

É proposta a avaliação de um sistema de soldagem por radiação infravermelha para a união, por fusão, de laminados compósitos termoplásticos fortalecidos com fibras contínuas de carbono utilizadas na indústria de construção aeronáutica.

As juntas termoplásticas serão inspecionadas visualmente após a sua fabricação, e serão submetidas a ensaios de flexão para verificação da sua resistência mecânica.

O grau de sucesso do projeto será mensurado em termos do desempenho mecânico das juntas soldadas, fruto da qualidade do processo de soldagem, tendo-se como referência resultados disponíveis na literatura científica sobre o tema.

## 2 INTRODUÇÃO

### 2.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos são a combinação proposital (ou não) de dois ou mais micro/macroconstituintes, sendo que eles diferem na forma e na composição química, são essencialmente insolúveis uns nos outros e apresentam interface bem definida. O objetivo de um projeto de compósito consiste em atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por qualquer material isolado e, também, reunir as melhores características de cada um dos componentes do material compósito. (CALLISTER, 2008)

O material compósito tem uma fase contínua (também chamada de matriz), que é relativamente dúctil e tenaz; e tem uma fase dispersa (também chamado de reforço), que é relativamente frágil e resistente. O reforço pode ter forma de fibras, de partículas ou laminas.

A fase dispersa pode estar presente num valor máximo de 80% do volume do compósito, pois ela precisa estar envolvida pela matriz. A fase dispersa é a que de fato suporta as cargas aplicadas ao material componente, e que são transferidas pela matriz através da interface matriz/fibra ou partícula. (CALLISTER, 2008)

Um esquema simples para classificação dos materiais compósitos está mostrado na Figura 1, que evidencia quatro divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras, os compósitos estruturais e compósitos naturais.

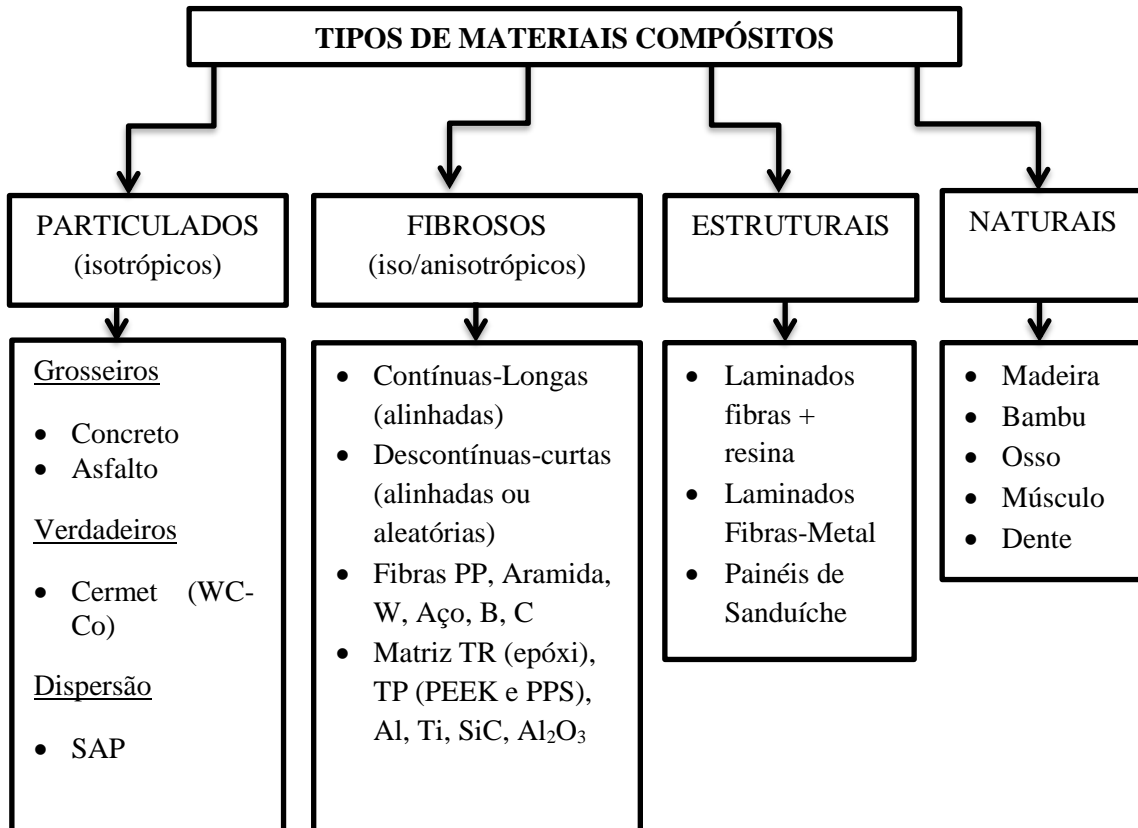
Os compósitos particulados são compostos de partículas de reforço com matriz, sendo essas partículas mais duras e mais rígidas que a matriz.

Os compósitos fibrosos possuem alta resistência e/ou rigidez. Esses materiais são classificados de acordo com o comprimento, orientação, concentração e distribuição das fibras. O comprimento da fibra influencia no modo como é feita a transmissão de carga entre as fases da fibra e a matriz. Já a orientação classifica os compósitos em: um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e um alinhamento totalmente aleatório. A distribuição que apresenta melhores propriedades gerais é quando as fibras estão uniformes.

Os compósitos estruturais podem ser formados a partir de materiais homogêneos ou outros compósitos. Os dois tipos de compósitos estruturais mais conhecidos são os laminados e os painéis-sanduíche.

Os compósitos naturais são os que encontramos na natureza como madeira, osso e músculo.

Figura 1 – Classificação geral dos materiais compósitos



Fonte - informação adaptada de CALLISTER, 2008

## 2.2 Juntas em materiais compósitos

No universo da indústria aeronáutica, a estrutura completa de uma aeronave é composta de várias partes como revestimentos, nervuras, quadros, 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 levados em conta no momento de decidir sobre o método de junção a ser utilizado.

Para se extrair todo o potencial do uso dos materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de alto desempenho mecânico na redução do peso estrutural da aeronave, os tipos de esforços a que a junção estará submetida em condições reais de serviço deverão também ser considerados no momento da escolha do método de fabricação. Junções mal projetadas estarão sujeitas à concentração de tensões, momentos secundários e

deflexões excessivas. Nos compósitos poliméricos de grau aeronáutico, esses problemas são críticos devido à alta resistência mecânica e ao comportamento de natureza frágil dos mesmos, ou seja, a incapacidade do material se deformar permanentemente em alguma extensão impede a redistribuição de tensão na área da junção quando esta é submetida a um determinado carregamento.

Na indústria aeronáutica, a complexidade das estruturas requer ótimo custo-benefício e métodos confiáveis de união. Os métodos clássicos de união são as juntas mecânicas (união por parafusos ou fixadores) e as juntas coladas. Juntas mecânicas apresentam desvantagens tais como a necessidade de introduzirem furos na junta, os quais induzem concentração de tensão, e a instalação de fixadores que adicionam custo e peso à estrutura (VALENTE, 2012). As juntas coladas proporcionam uma distribuição uniforme de tensão na área de união, comparadas às juntas mecânicas. No entanto, as primeiras requerem uma melhor preparação da superfície, uma tarefa que pode ser complexa e consumir muito tempo.

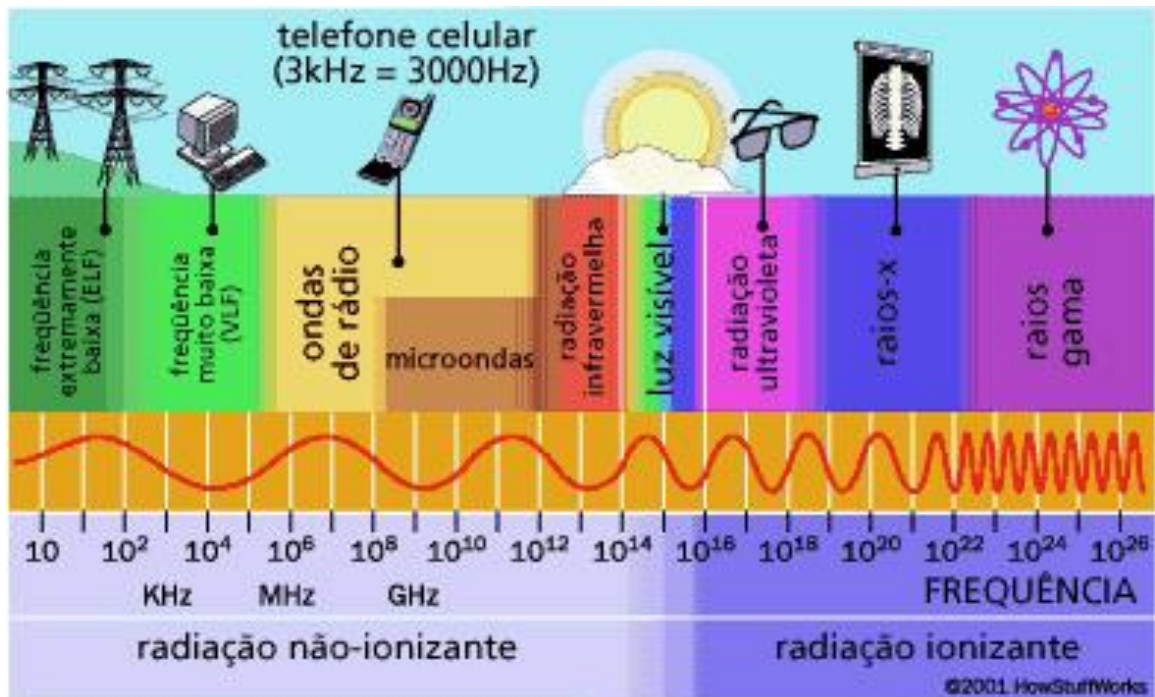
A indústria está começando a ver o potencial de crescimento de laminados compósitos de matriz termoplástica, esses laminados estão se tornando cada vez mais comuns como os laminados compósitos de matriz termorrígida. No entanto, os termorrígidos são facilmente colados com adesivos, mas o mesmo não se aplica aos termoplásticos, devidos a sua inércia química. (DE BAERE *et al.*, 2012)

A junção de laminados termoplásticos pode se dar por solda ultrassônica, por indução, micro-ondas, resistência elétrica, por chapa quente, laser e infravermelho. (DE BAERE *et al.*, 2012 ; BOTELHO *et al.*, 2012 ; DE BAERE *et al.*, 2010 ; ALLAER *et al.*, 2012 ; ALLAER *et al.*, 2012)

### 2.3 Solda por infravermelho

A solda por infravermelho consiste em aquecer uma junta até o seu ponto de fusão, por meio de uma energia radiante que atravessa o espaço na forma de ondas eletromagnéticas, e depois pressioná-las. A radiação térmica é uma forma de transmissão de calor, ou seja, um corpo vai absorver as ondas caloríficas que se propagam pelo espaço em forma de energia eletromagnética, aumentando-se assim a temperatura. (HIGHER, 2012)

Figura 2 – Espectro de frequência de ondas eletromagnéticas, em que mostra que a frequência de onda da radiação infravermelha é mais baixa que a frequência da luz visível.

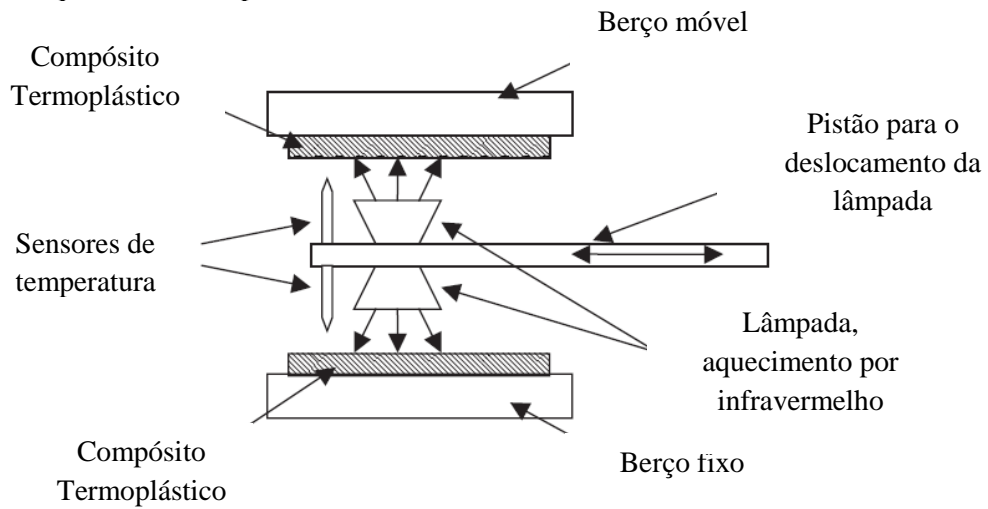


Fonte – HOWSTUFFWORKS (2013)

A energia infravermelha provê uma eficiente transferência de calor, sem a necessidade de contato entre a fonte de calor e o material de trabalho, já que as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo. (HIGHER, 2012)

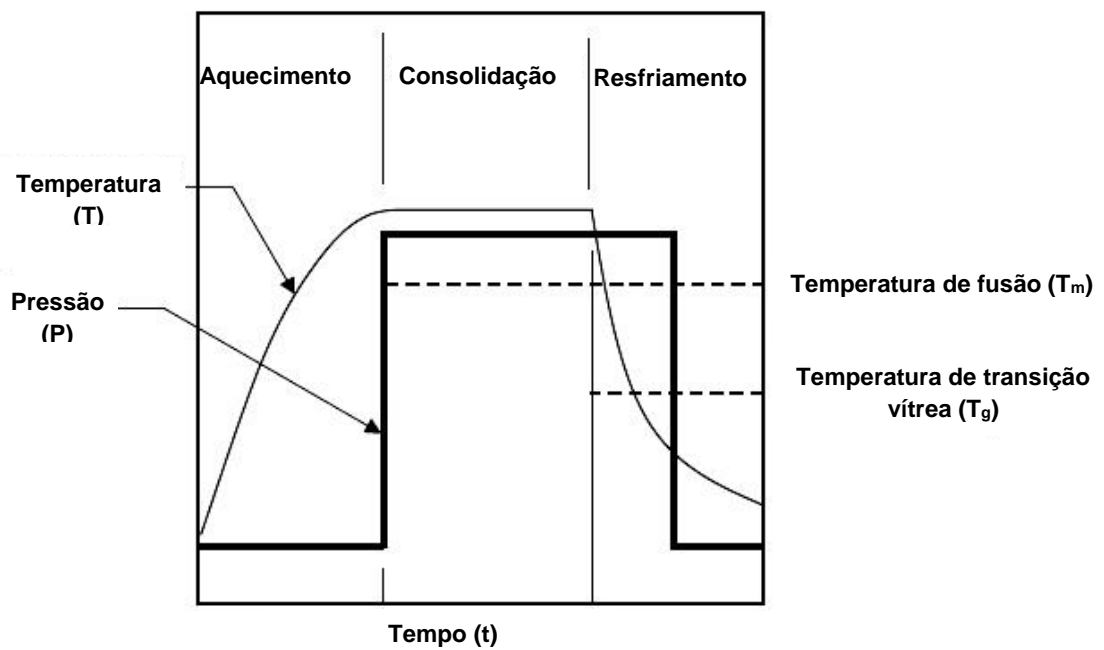
A Figura 3 é um desenho esquemático da máquina de soldagem por radiação no infravermelho no qual um pistão desloca a lâmpada de infravermelho que aquece os laminados compósitos que estão fixados nos berços até sua temperatura de processamento, depois de atingida essa temperatura a lâmpada é recuada e os laminados são pressionados através do deslocamento do berço móvel para que ocorra a junção deles. Na Figura 4 mostra o ciclo termodinâmico típico desse processo de soldagem no qual a pressão é aplicada durante todo processo de consolidação e parte da etapa de resfriamento da junta. Já a Figura 5 mostra o mecanismo de interdifusão macromolecular que ocorre durante o contato dos laminados no processo de soldagem por infravermelho no qual se busca a completa difusão das macromoléculas para que ocorra uma melhor junção entre os laminados termoplásticos.

Figura 3 – Esquema da solda por infravermelho



Fonte – YOUSEFPOUR *et al.* (2004) ; AGEORGES *et al.* (2001); POTENTE, H. *et al.* (1993)

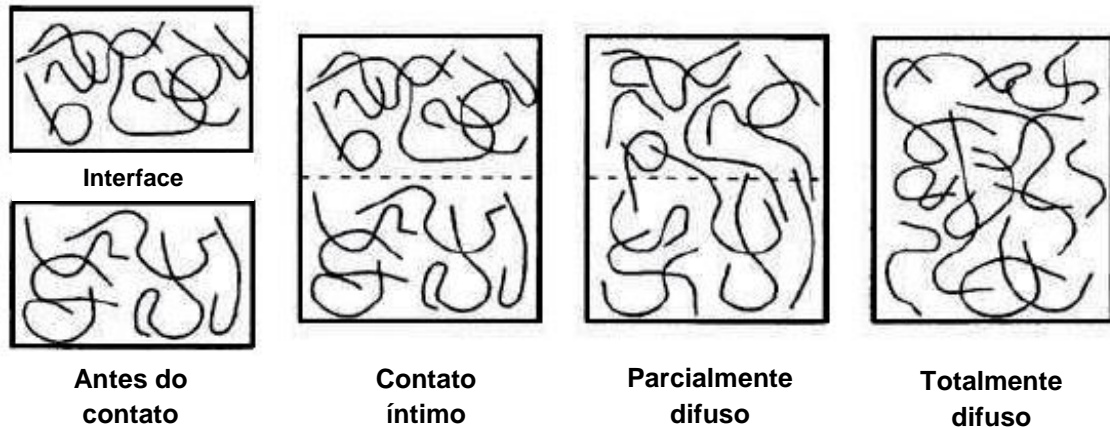
Figura 4 – Ciclo termodinâmico típico para o sistema de solda por infravermelho



Fonte – YOUSEFPOUR *et al.*(2004) ; AGEORGES *et al.* (2001); POTENTE *et al.* (1993)



Figura 5 – Mecanismo de interdifusão macromolecular que ocorre em entre duas partes em contato, durante o processo de soldagem IR retratadas nas Figuras 3 e 4

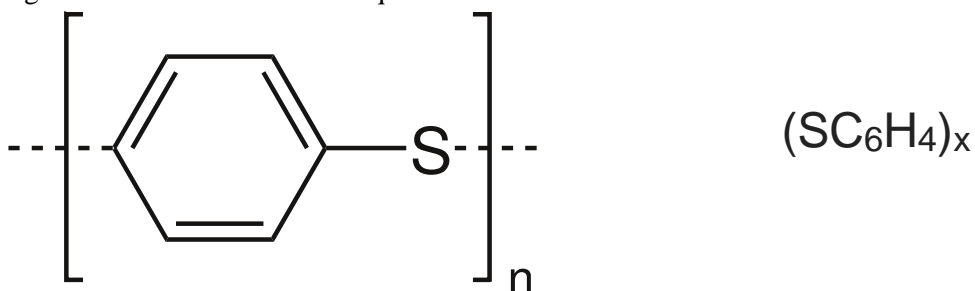


Fonte – YOUSEFPOUR *et al.* (2004) ; AGEORGES *et al.* (2001); POTENTE *et al.* (1993)

#### 2.4 Polissulfeto de fenileno (PPS)

Na escolha de um material estrutural de engenharia umas das considerações importantes é o quão fácil é manufaturar, juntar, inspecionar, reparar e trocar uma estrutura em serviço. Uma das vantagens dos termoplásticos é que eles podem ser fundidos para serem reprocessados. Nos polímeros semicristalinos a cristalinidade é muito importante, pois ela tem grande influência nas suas propriedades químicas e mecânicas. Enquanto as partes amorfas são mais efetivas em absorver a energia de impacto as regiões cristalinas tende a aumentar a dureza e a resistência à tração. (BOTELHO *et al.*, 2012)

Figura 6 – Estrutura e Fórmula química do PPS



O PPS (PoliSulfeto de fenileno) é perfeitamente adequado para as peças que têm de suportar as altas exigências mecânicas e térmicas típicas de aeronaves. O PPS possui um alto ponto de fusão (a  $T_m$  é de, aproximadamente, 280°C e a  $T_g$  é de 89°C) e é auto extingüível: fundamental para a aprovação para a construção de aeronaves. O PPS tem também excelente resistência aos produtos químicos, óleos e fluidos, oferecendo uma alternativa ideal para

materiais convencionais; ele tem excelente dureza, rigidez, propriedades de fluência e boa plasticidade. O PPS pode facilmente ser processado, a temperatura de processamento fica entorno de 290 a 325°C. (LEESER, 2010; RADDEN, 2003; RYTON, 1997)

Para a solda por infravermelho ser efetivada não basta só aquecer o material, as juntas precisam passar por um processo de compressão, afim de que não tenha vazios, porosidades e delaminação depois que o polímero tenha se consolidado (BOTELHO *et al.*, 2008).

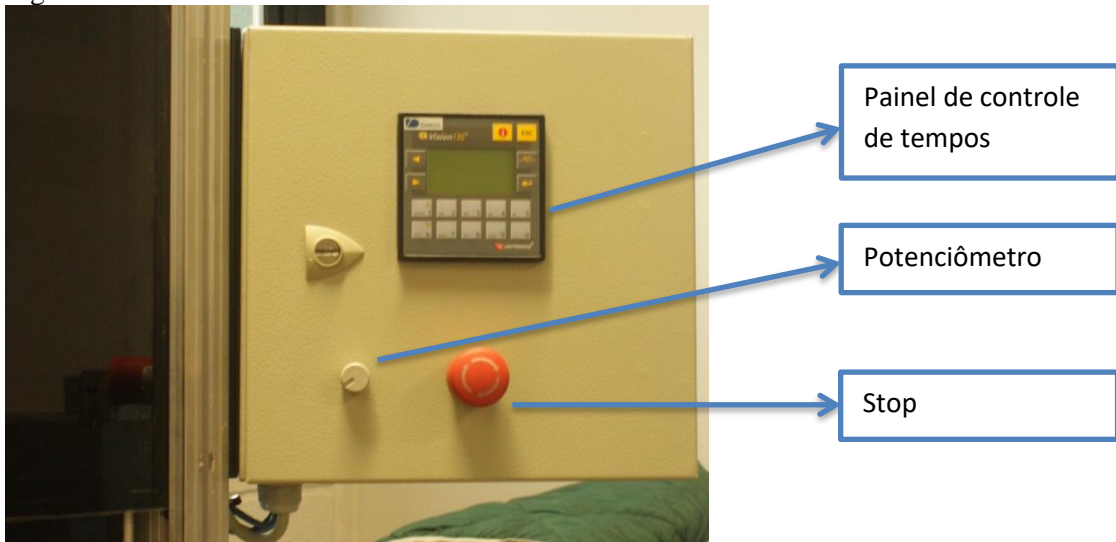
## 2.5 O Sistema de Soldagem

Na figura 7 tem-se a foto da máquina de soldagem construída. A máquina possui um sistema de refrigeração, um controlador de tempos de ciclo e controlador de pressão de prensagem.

Figura 7 - Máquina de solda



Figura 8 - Painel de controle



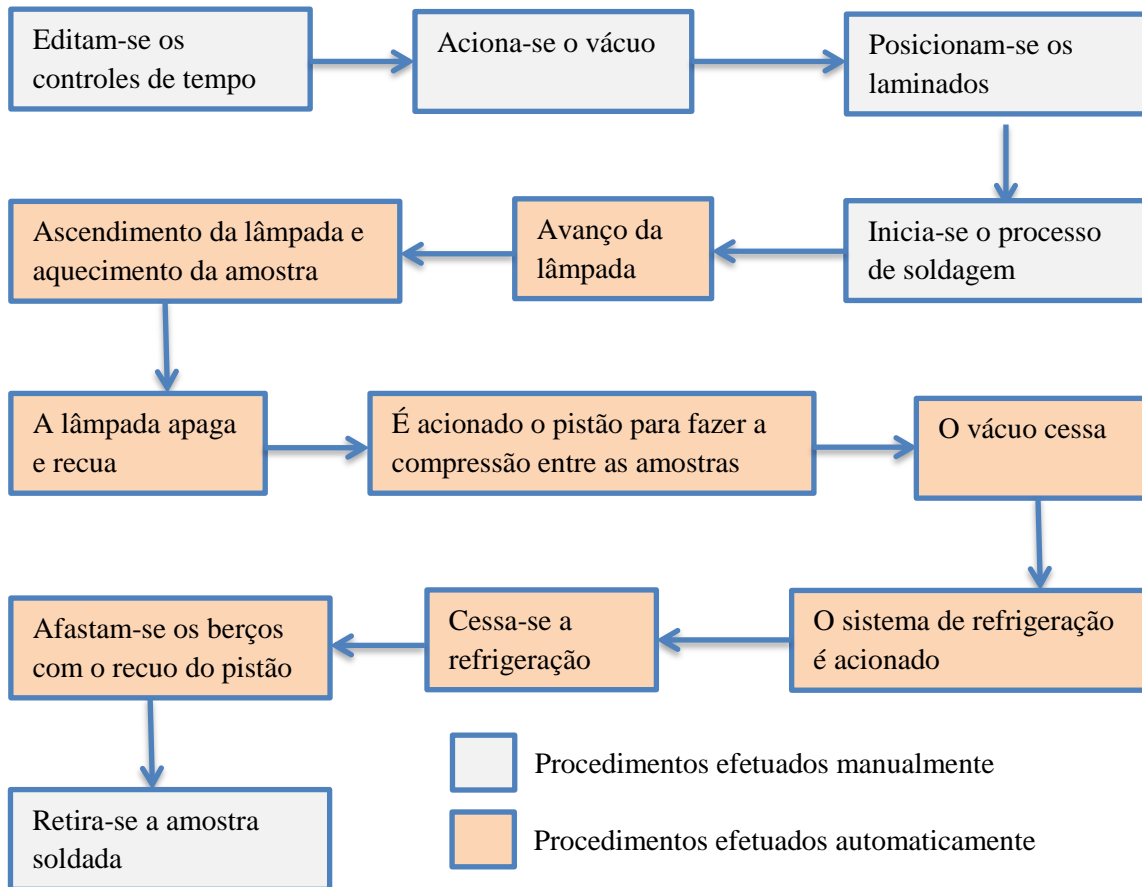
A Figura 8 mostra o painel de controle nele há um controle de tempo, no qual fornecemos os tempos desejados de aquecimento, pressão e resfriamento, este mesmo painel mostra a pressão feita pela máquina e as temperaturas dos termopares. No painel de controle há também um potenciômetro, para o controle da potência da lâmpada de infravermelho, e um stop que serve para parar o processo em qualquer estágio do processo de solda.

Durante o processo de soldagem a máquina fica com as portas fechadas para a segurança do operador.

Outros parâmetros que podem ser alterados são: altura da lâmpada, altura do berço superior e pressão aplicada pela máquina.

A Figura 9 mostra o esquema de funcionamento da máquina desde procedimentos efetuados manualmente pelo operador até procedimentos efetuados automaticamente pela máquina.

Figura 9 – Esquema de funcionamento da máquina de soldagem



### 3 MÉTODOS E PROCEDIMENTO

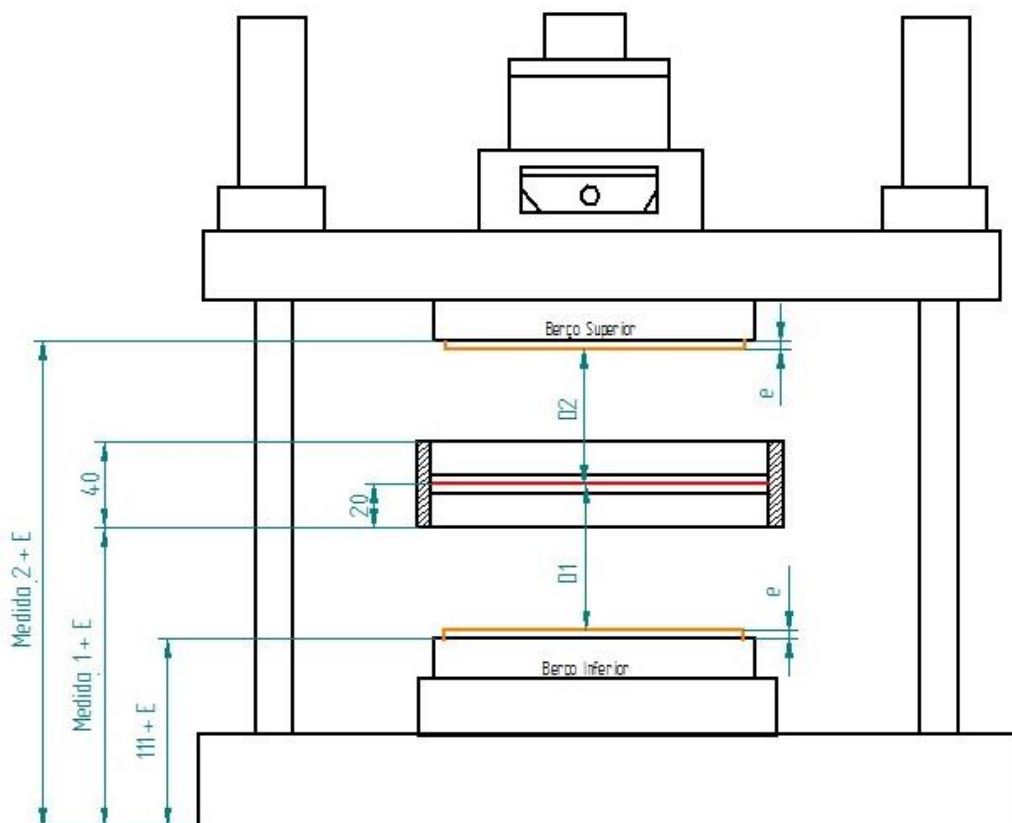
#### 3.1 Regulagem da máquina

A regulagem da máquina consiste em basicamente na regulagem da altura da lâmpada e a distância dela até os berços. Para fazer isso deve-se seguir os seguintes procedimentos:

- Verificar a altura da lâmpada
- Verificar a altura do berço superior

Com base nas equações de 1 a 5 acha-se a distância filamento-berço ( $D1$  e  $D2$ ).

Figura 10 - Figura esquemática para achar a distância filamento-berço



“e” é a espessura que fica para fora do berço

“E” é a distância da face de início da régua até a primeira marcação da régua

$$e = \text{espessura do laminado} - 1 \quad (1)$$

$$D1 = (\text{Medida1} + E) - (111 + E) + 20 - e \quad (2)$$

$$D1 = \text{Medida1} - 111 + 20 - e \quad (3)$$

$$D2 = (\text{Medida2} + E) - (\text{Medida1} + E) - 20 - e \quad (4)$$

$$D2 = \text{Medida2} - \text{Medida1} - 20 - e \quad (5)$$

### 3.2 Preparação das amostras

Preparam-se dois tipos de amostras:

Amostra 1: 80X100mm (Altura X Comprimento)

Amostra 2: 25X100mm (Altura X Comprimento)

A amostra 1 é maior pois será ela que irá ser fixada no berço superior pelo vácuo. A amostra 2 é colocada no berço inferior.

### 3.3 Preparação das amostras para deposição do PPS

Primeiro corta-se o filme de PPS de 0,02mm de espessura rente a amostra, ou seja, o filme tem que ter 25X100mm.

Em seguida fixa-se o filme de PPS no laminado com um soldador, passando o soldador por toda a borda do filme (Figura 11 (d)).

Na máquina de soldagem efetua-se a fusão do filme de PPS a amostra (Figura 12).

Figura 11 – Soldador (a), laminado (b), laminado com o filme de PPS (c) e laminado com o filme de PPS já fixado (d).

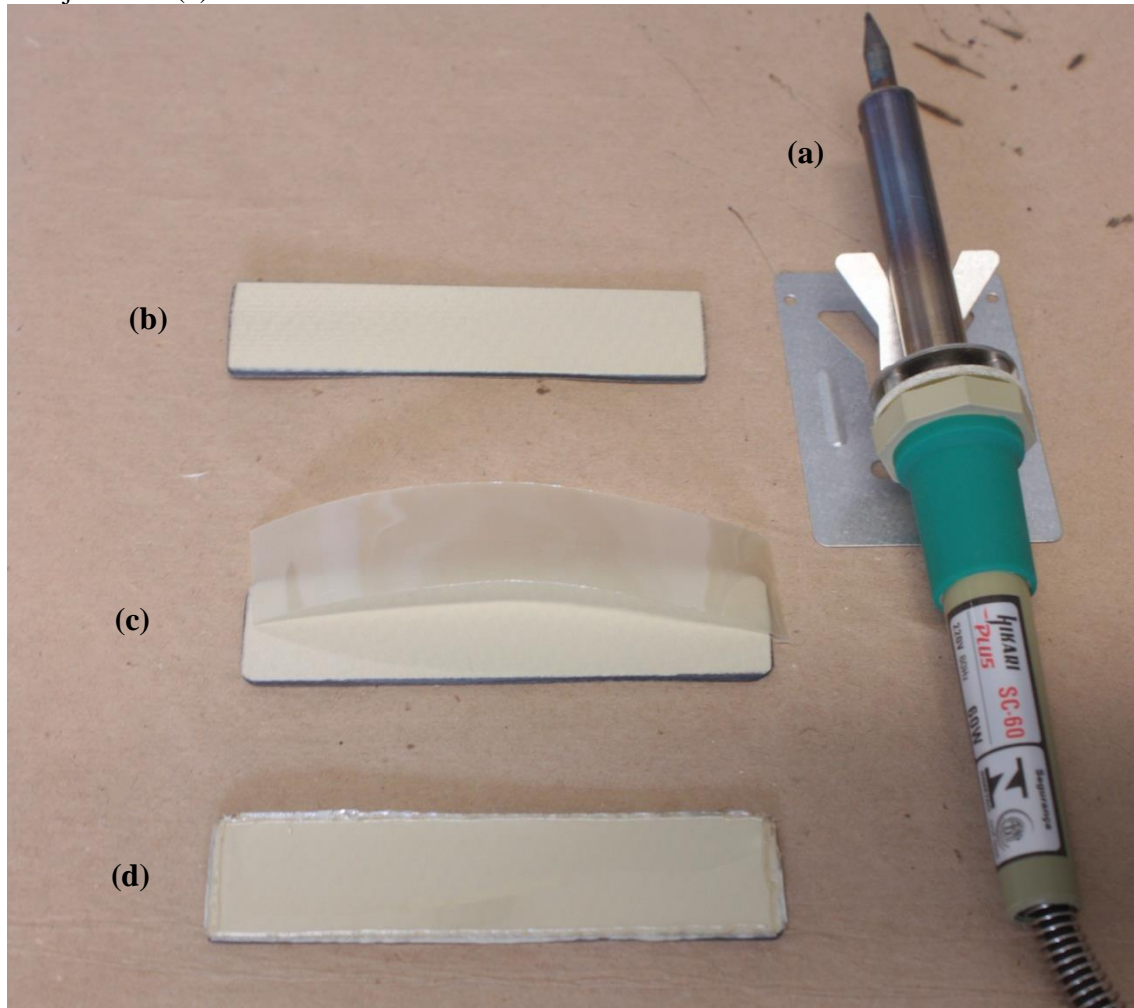
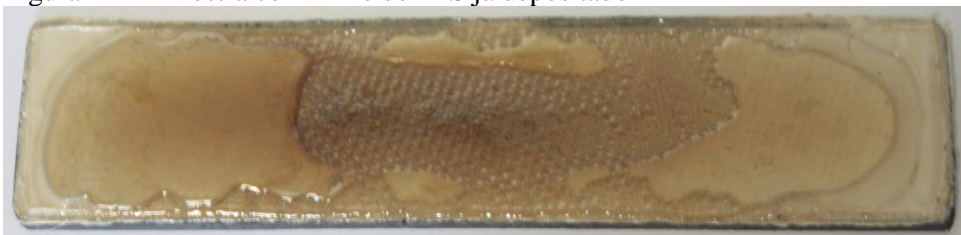


Figura 12 – Amostra com filme de PPS já depositado



### 3.4 Soldagem do laminado compósito

Primeiro deve-se regular os parâmetros abaixo, de acordo com a necessidade, para que ocorra a solda dos laminados:

- Tempo de aquecimento
- Tempo de prensagem
- Tempo de resfriamento

- Potência da lâmpada
- Pressão a ser aplicada pela máquina
- Distância dos laminados até o filamento da lâmpada

Depois ativa-se o vácuo, posiciona os laminados já com o filme depositado e por fim efetua-se a solda.

### 3.5 Metalografia

Primeiro corta-se uma amostra do material soldado, essa amostra deve conter somente a região soldada do laminado. Depois embute-se a amostra com a ajuda de anel metálico e resina epóxi, após a solidificação da resina epóxi aparam-se as arestas do cilindro, afim de não machucar a pessoa durante o processo de preparação da amostra metalográfica.

Depois desse processo inicial de preparação da amostra inicia-se o processo de lixamento, começa-se a lixar com a lixa 220 mesh depois vai pra 320 e assim sucessivamente até a lixa 2500 mesh. Em cada lixa a amostra deve ser lixada no sentido 0° e 90°, afim que se tenha maior planicidade na amostra embutida.

Em seguida faz-se o polimento da amostra com a ajuda de uma politriz, utilizando pano e pasta para polimento, utilizando primeiro o de 3 $\mu$  e depois o de 1 $\mu$ .

Durante os processos de lixamento e de polimento, deve-se fazer algumas observações no microscópio para ter certeza que não haja nenhuma marca de lixa anterior. Deve-se observar a superfície da amostra embutida para detectar possíveis abaulamentos que devem ser evitados.

Por fim capturam-se as imagens da região soldada com um microscópio óptico.



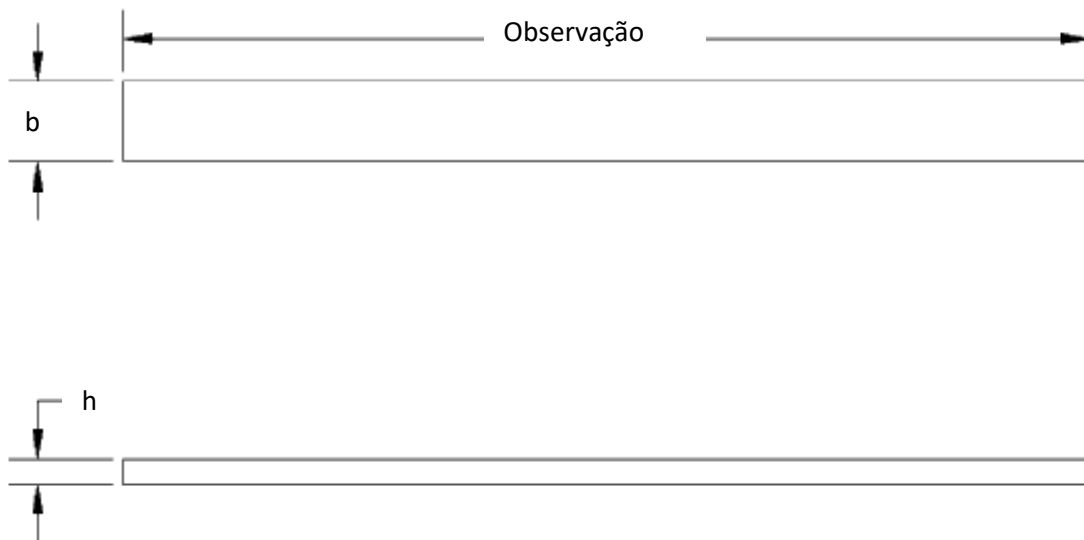
### 3.6 Ensaio de flexão 3 pontos

Prepara-se a amostra cortando a na região da solda (Figura 13)

Figura 13 - Região da solda a ser cortada (região demarcada em vermelho)



Figura 14 - figura esquemática da amostra

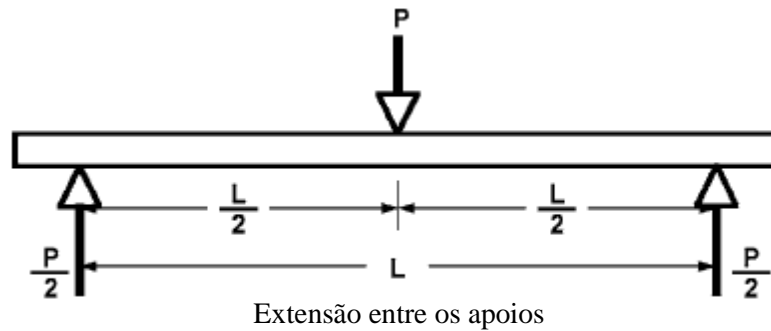


$b$  = largura da amostra

$h$  = espessura da amostra

Observação: a extensão da amostra deve ser 20% maior que a extensão entre os apoios ( $L$ )

Figura 15 - diagrama de carregamento da amostra no ensaio de flexão



$P$  = carga aplicada

$L$  = extensão entre os apoios

A partir da determinação dessas medidas efetua-se o ensaio com velocidade de  $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  com aumento contínuo de carga na máquina de ensaio de flexão. Depois plota-se os gráficos e analisam-se as tensões máximas e os módulos de elasticidades das amostras a fim de compara-los com a amostra soldada por resistência elétrica.

Para plota-se os gráficos deve-se efetuar os seguintes cálculos:

- Tensão ( $\sigma$ )

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (6)$$

- Deformação ( $\epsilon$ )

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (7)$$

- Módulo elástico ( $E^{chord}$ )

$$E^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (8)$$

Aonde  $\delta$  é a deflexão no meio do vão

Para o cálculo do módulo de flexão de chord, a faixa de tensão recomendada é de 0,002, com um ponto inicial de 0,001 e um ponto final 0,003. Se os dados não estão disponíveis nos pontos de gama exatas tensão finais (como ocorre muitas vezes com dados digitais), use o mais próximo ponto de dados disponível. Calcular o módulo de elasticidade à flexão a partir dos dados de tensão-deformação.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Soldagem do laminado compósito

Figura 16 – Tabela de parâmetros de soldagem

Distância 1 (mm)	Distancia 2 (mm)	Tempo de aquecimento (s)	Prensagem (Kgf)	Tempo de resfriamento (s)	Potência (%)	Solda
34	39	18	300	120	100	00ir
46	46	35	345	180	100	01ir
46	46	37	350	120	100	02ir
46	46	39	350	120	100	12ir
46	46	39	350	120	100	19ir
46	46	37	350	120	100	24ir
46	43	45	350	120	*	32ir
46	40	40	350	120	100	33ir
46	40	40	350	120	100	35ir

\* durante 40s usou-se potência de 100% e os 5s finais a potência de 75%

Os códigos de todas as soldas são:

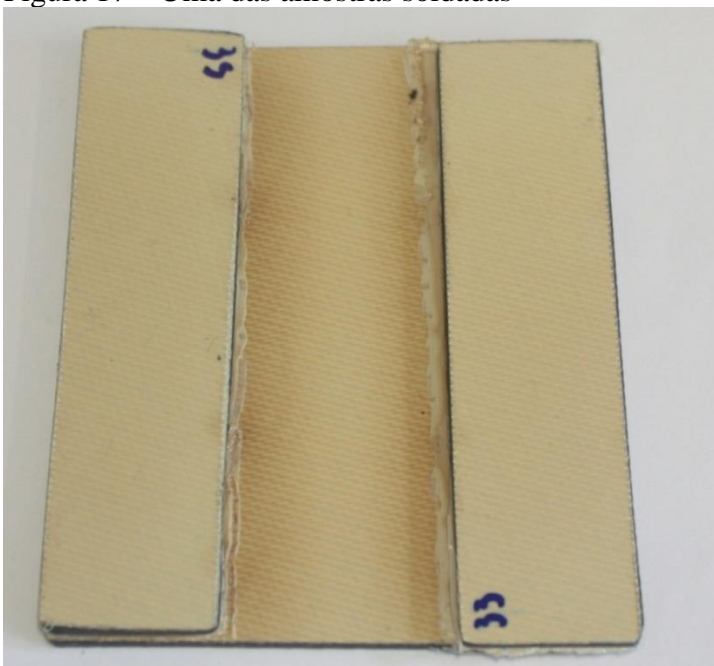
- RW

É a amostra soldada pelo método de resistência elétrica ela servirá de referência para comparar as soldas feitas por infravermelho.

- 00ir, 01ir, 02i, 12ir, 19ir, 24ir, 32ir, 33ir, 35ir

São as amostras soldadas por infravermelho, elas serão comparadas com a junta soldada por resistência elétrica (RW).

Figura 17 – Uma das amostras soldadas



## 4.2 Materialografia

Na microscopia da amostra 00IR mostra que houve a ocorrência de uma boa adesão entre os dois laminados, no qual foi depositado um filme de PPS em cada. Não é observada a presença de bolhas e vazios

Figura 18 – Microscopia da borda da solda

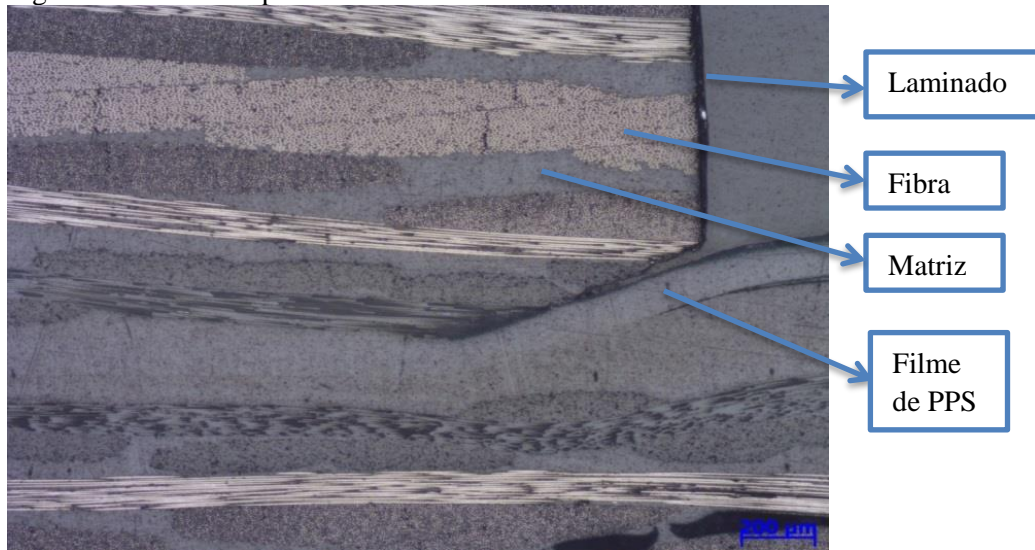
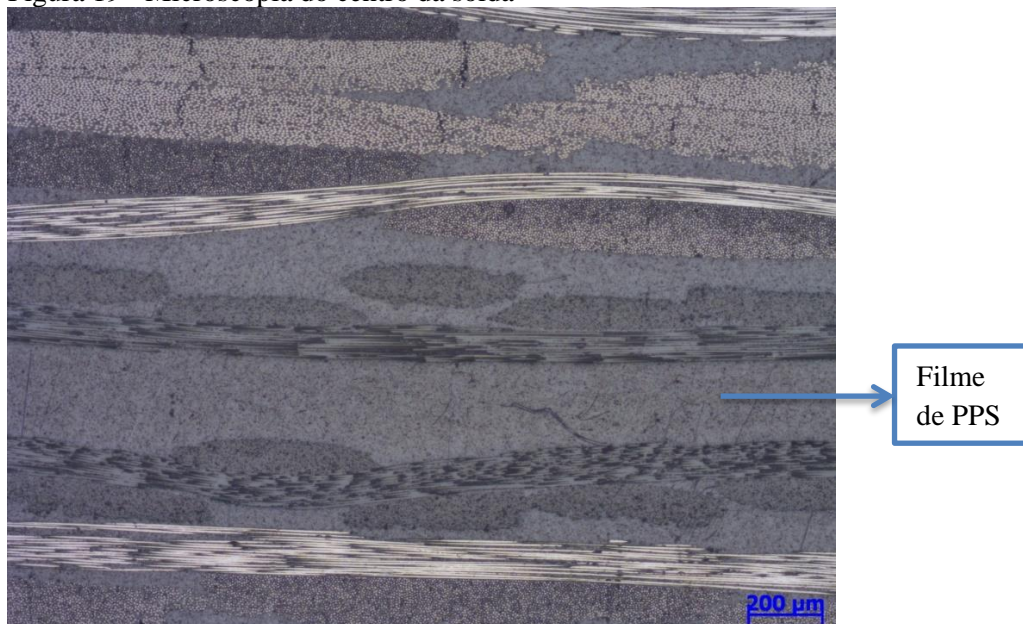


Figura 19 - Microscopia do centro da solda

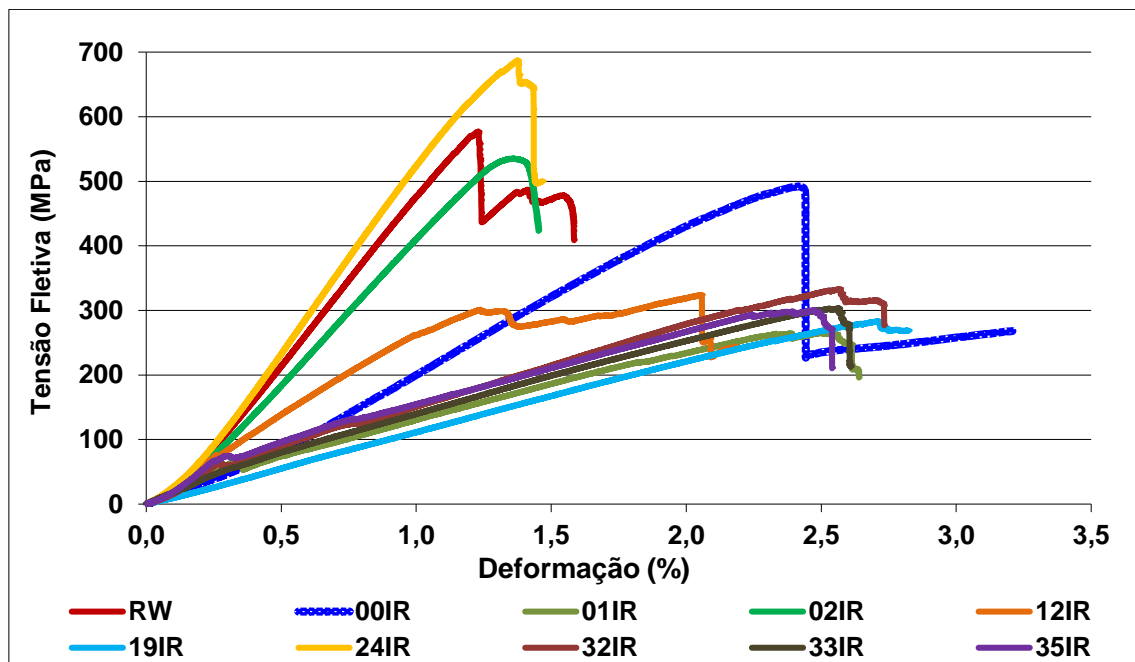


#### 4.3 Ensaio de flexão 3 pontos

Para o ensaio de flexão 3 pontos foram usados corpos de prova retangulares, com o tamanho da região soldada pela máquina (100X25mm).

O gráfico abaixo mostra os resultados de ensaios mecânicos em flexão três pontos, na forma de curvas tensão vs. Deformação, das juntas sobrepostas manufaturadas segundo a metodologia de soldagem infravermelha (IR). Nota-se a evolução progressiva da qualidade das juntas assim fabricadas, ao longo do desenvolvimento do processo de manufatura proposto. As juntas denominadas 02IR e, particularmente a 24IR mostram desempenhos particularmente elevados, denotando o sucesso do procedimento de soldagem ora proposto. Para fins de comparação, uma junta de geometria e laminados idênticos aos utilizados no presente estudo, porém fabricada segundo o processo concorrente de soldagem por resistência elétrica (RW), o qual já é empregado nas indústrias aeronáuticas mais avançadas do mundo (Boeing e Airbus), foi ensaiada mecanicamente nas mesmas condições que as unidas por fusão induzida por radiação infravermelha. Observa-se que o espécime 24IR supera com boa margem de vantagem o desempenho do corpo de prova ora identificado como RW.

Figura 20 – Gráfico Tensão-deformação das juntas (ASTM D 7264)

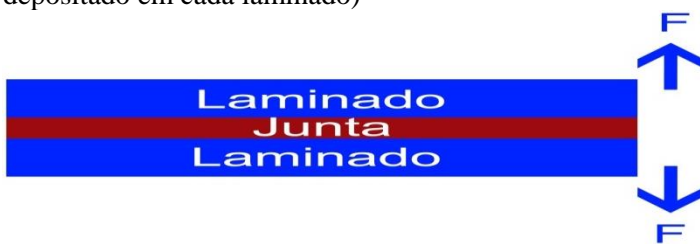


A amostra 24IR teve módulo elástico de 59,6 GPa, RW de 53,3GPa e 02IR 45,4GPa

#### 4.4 Análise das juntas

Nas amostras que obtiveram os melhores resultados não foi observada a presença de delaminação, após o ensaio de flexão. Em seguida os laminados foram separados por modo I a mão com ajuda de uma chave de fenda a partir de uma das extremidades, conforme a figura abaixo, e analisou-se o aspecto da superfície da junta. Ao abrir as juntas foi constatado uma maior dificuldade em separar a junta RW do que a junta 24ir.

Figura 21: Esquema de separação dos laminados por Modo I (aonde a junta é o filme de PPS depositado em cada laminado)



A seguir têm-se as imagens das superfícies de soldagem das amostras 24IR e RW. Na amostra 24IR a separação ocorreu no meio da junta, não expondo a fibra como ocorreu na amostra RW. Ao analisar as imagens tiradas no MEV da amostra 24IR observa-se que há partículas aderidas à amostra, são aqueles que não têm sombra, e buracos. Isso evidencia que houve uma interdifusão parcial na amostra, ou seja, a falha ocorreu na própria matriz. Já na amostra RW houve uma melhor interdifusão ocasionando a falha entre a matriz e a fibra.

Figura 22 - A imagem da esquerda é a junta 24ir e a da direita é a rw, em ambos os laminados foram separados por modulo 1. Imagem tirada por fotografia macro

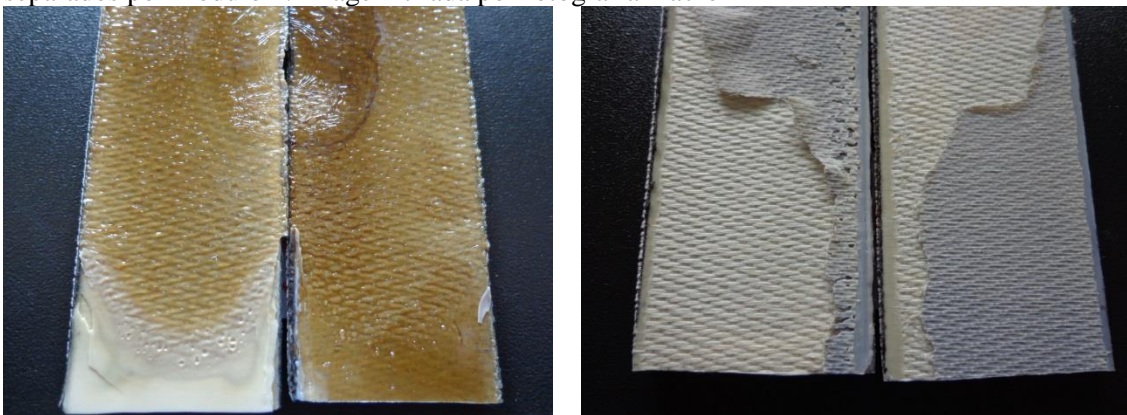


Figura 23 - A imagem da esquerda é a junta 24ir e a da direita é a rw, imagens tiradas do estereoscópio.

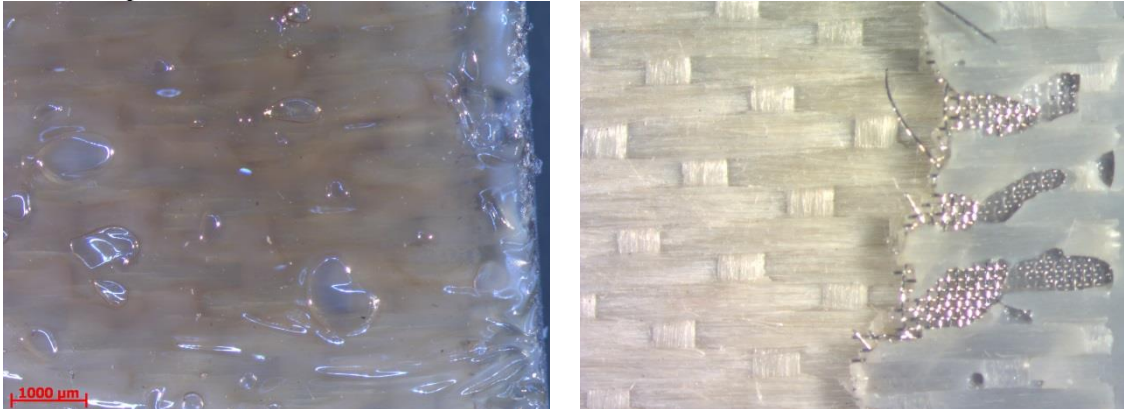
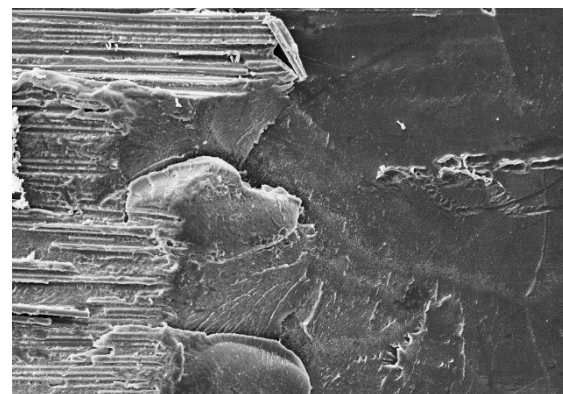
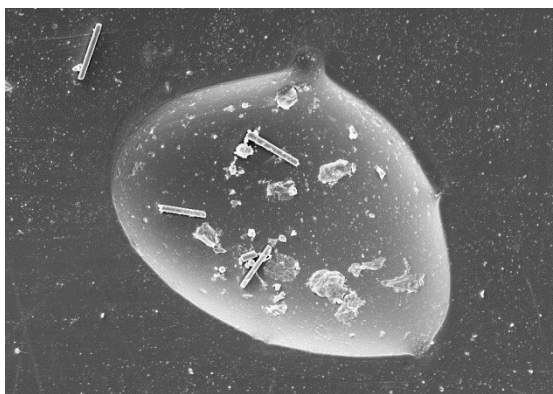
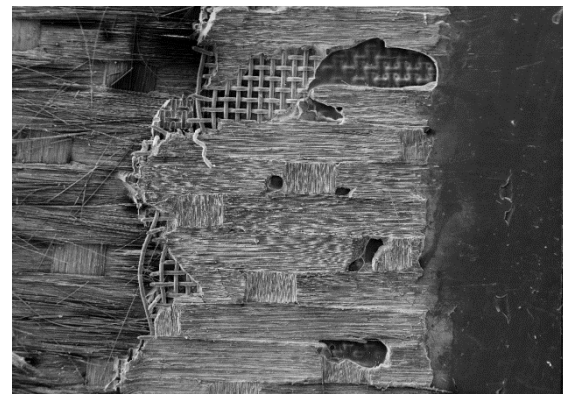
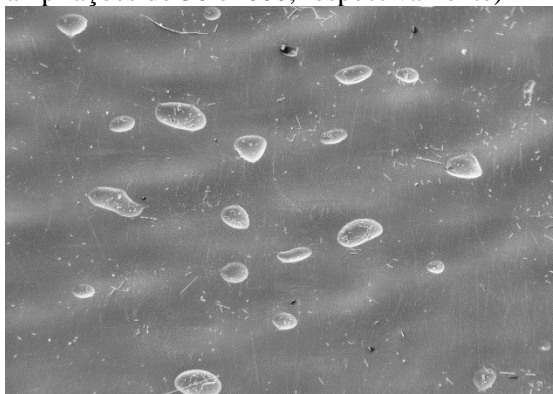


Figura 24: Imagens feitas no MEV, do lado esquerdo são as imagens da amostra 24IR (com ampliações de 50 e 600, respectivamente) do lado direito são as imagens da amostra RW (com ampliações de 50 e 600, respectivamente)



## 5 CONCLUSÃO

Com base nas juntas analisadas podemos considerar que o sistema de soldagem por radiação no infravermelho mostrou-se eficiente e adequado ao projeto posposto. A junta que obteve o melhor resultado em nossa análise foi a 24ir com um módulo elástico de 59,6 GPa, um resultado 11,82% superior que o método concorrente, a solda por resistência elétrica (RW), que teve um módulo elástico de 53,3 GPa.

A partir da análise visual das juntas conclui-se que ainda há possibilidade de resultados ainda melhores. Para isso, tem que haver uma melhor uniformidade na deposição do filme de PPS, fundido a superfície dos laminados uniformemente, pois as falhas de delaminação ocorreram na borda da junta justamente onde não houve uma boa fusão do material.

Apesar das juntas que obtiveram os melhores resultados, a 24ir e a 02ir, terem os mesmos parâmetros de distância, tempo de aquecimento, potência da lâmpada, tempo de resfriamento e prensagem não se pode concluir que esses são os melhores parâmetros de soldagem, pois as juntas que tiveram um maior tempo de aquecimento, mantendo os outros parâmetros iguais, tiveram zonas de material não fundido até maiores que as amostras que tiveram os melhores resultados. Provavelmente há outros parâmetros que não foram analisados neste trabalho que influenciam na reprodutibilidade dos resultados, como por exemplo o tempo entre uma soldagem e outra.

E por fim a preparação do laminado com a deposição do filme de PPS é necessária, já que o volume de matriz no laminado é extremamente baixo para que ocorra uma boa soldagem entre dois laminados.



## 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.
- 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.
- ALLAER, K.; DE BAERE, I.; JACQUES, S.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Experimental assessment of infrared welded bonds using lapshear, double cantilever beam and end notch flexure tests for a carbon fabric reinforced thermoplastic**. ICEM 15, 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22-27 July 2012.
- ALLAER, K.; DE BAERE, I.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Fatigue behavior of infrared welded joints in fibre reinforced thermoplastics**. 10<sup>th</sup> International Conference on Durability of Composite Systems, Brussels, Belgium, 17-19 September 2012.
- ASTM, **Norma D 7264/D 7264M - 07**, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Testing and Materials Handbook.
- BOTELHO, E. C.; DA 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.
- BOTELHO, E. C.; DA COSTA, G. G.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Avaliação do Ciclo Térmico de Conformação por Compressão de Peças em Poli(Sulfeto de Fenileno) Reforçado com Fibras Contínuas de Carbono. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 18, nº 1, p. 81-86, 2008.
- CALLISTER, J. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Cap.16, p.422-454
- DE BAERE, I.; ALLAER, K.; JACQUES, S.; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Interlaminar behavior of infrared welded joints of carbon fabric-reinforced polyphenylene sulphide**. Zwijnaarde, Belgium, 24 may 2012.

DE BAERE, I.A; VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. **Fusion bonding of carbon fabric reinforced polyphenylene sulphide**. ICEM 14 – 14th International Conference on Experimental Mechanics, EPJ Web of Conferences, Gent, Belgium: EDP Sciences, V.6, 10 June 2010.

HAYES, B.S.; GAMMON, L.M. **Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites: Introduction – Composite Materials and Optical Microscopy**. Chapter 1. ASM International®, 2010.

HIGHER **Teoria do infravermelho** < <http://www.higher.com.br/biblioteca-tecnica/>> Acesso em: 25 de Set. 2012.

HOWSTUFFWORKS, Reféns da física: **espectro eletromagnético**. < <http://refensdafisica.tumblr.com/post/19975814934/espectro-eletromagnetico>> Acesso em: 23 de Jan. 2013.

LEESER, D. **Thermoplastic composites, a proven composite material technology generates new interest**. Tencate Advanced Composites Usa, Inc., 2010 < [http://www.tencate.com/emea/Images/White-Paper---Thermoplastic-Advanced-Composites\\_1\\_tcm28-33293.pdf](http://www.tencate.com/emea/Images/White-Paper---Thermoplastic-Advanced-Composites_1_tcm28-33293.pdf)> Acesso em: 23 de Jan. 2013.

NIU, M. C. Y. **Composite airframe structures**. 1<sup>st</sup> ed. Hong Kong: Conmilit Press Ltd., 1992.

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

RADDEN, P. **Fortron® (PPS): A high performance polymer for composites in aircrafts blow molded pipes for lean vehicles**. Kelsterbach: Ticona, 2003 < <http://iom3archive.org.uk/divisions/automotive/lwv6/ses4pres5.pdf>> Acesso em: 23 de Jan. 2013.

**RYTON PPS Thermal properties**. Chevron Phillips Chemical Company, LP. 1997.

VALENTE, P. A. L. **Juntas mecânicas em material compósito**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, Lisboa, 2012 <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjXmuCixvjUAhUGxpAKHX4wBP8QFggmMAA&url=http%3A%2F%2Frepositorio.ipl.pt%2Fbitstream%2F10400.21%2F2412%2F1%2FDisserta%25C3%25A7%25C3%25A3o.pdf&usq=AFQjCNGsHd2flo-mwyXz\\_cTYtJPIIExpuw](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjXmuCixvjUAhUGxpAKHX4wBP8QFggmMAA&url=http%3A%2F%2Frepositorio.ipl.pt%2Fbitstream%2F10400.21%2F2412%2F1%2FDisserta%25C3%25A7%25C3%25A3o.pdf&usq=AFQjCNGsHd2flo-mwyXz_cTYtJPIIExpuw)> Acesso em: 07 de Maio 2017.

YOUSEFPOUR, A., HOJJATI, M., IMMARIGEON, J. P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, V.17, p.303-341, 2004.