

## INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNÇÕES DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS

Ricardo Afonso Angélico, [ricardoangelico@gmail.com](mailto:ricardoangelico@gmail.com)<sup>1</sup>

Marcelo Leite Ribeiro, [strova@hotmail.com](mailto:strova@hotmail.com)<sup>1</sup>

Rafael Horn Silvestrini, [rafaelhorns@gmail.com](mailto:rafaelhorns@gmail.com)<sup>1</sup>

Fabrcio Elias Junqueira Di Salvo, [fdsalvo@gmail.com](mailto:fdsalvo@gmail.com)<sup>1</sup>

Volnei Tita, [voltita@sc.usp.br](mailto:voltita@sc.usp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador são-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos - SP/Brasil

**Resumo.** *O objetivo do presente artigo é investigar o comportamento mecânico de juntas simples de compósitos termoplásticos sob ação de carregamentos no plano da região soldada. As juntas são fabricadas a partir do processo de soldagem por resistência elétrica. Nesse processo, os laminados termoplásticos são unidos através da aplicação de pressão e do calor gerado por efeito Joule de uma malha metálica entre as partes. Os laminados analisados são híbridos de fibra de vidro com PPS e fibra de carbono com PPS. As juntas são ensaiadas, onde obtêm-se as curvas de força versus deslocamento, bem como, o campo de deslocamento através da técnica de correlação de imagens. Além disso, faz-se uma investigação sobre os campos de tensões e deformações na região da junta. A junta é modelada numa ferramenta desenvolvida em Matlab (SAJ - Sistema de Análise de Juntas) a qual resolve o sistema de equações diferenciais e permite a inclusão de um comportamento não-linear da região soldada. Os resultados obtidos experimentalmente são comparados aos resultados computacionais, verificando assim, as potencialidades e limitações do SAJ.*

**Palavras-chave:** *modelagem computacional, ensaios experimentais, compósitos termoplásticos, soldagem por resistência.*

### 1. Introdução

Compósitos de matriz termoplástica possuem praticamente a mesma rigidez e resistência que os compósitos de matriz termofixa, e em particular, algumas vantagens quando comparados aos compósitos termofixos, ampliando sua aplicabilidade industrial, principalmente no segmento aeronáutico (Ageorges e Ye, 2001; Stavrov e Bersee, 2005). Uma das principais vantagens encontra-se nas possibilidades de união de componentes. Compósitos termoplásticos permitem a utilização de processos de soldagem para união de partes. Dentre os diferentes tipos de soldagem, tem-se o processo de soldagem por resistência elétrica, adotado nesse trabalho e posteriormente detalhado.

No contexto de junções de compósitos termoplásticos, os estudos estão voltados para o processo e aplicabilidade ou comportamento em serviço. No estudo do processo procura-se determinar o conjunto ótimo de variáveis (temperatura, pressão, tempo, malha metálica, entre outras) que conferem a estrutura um melhor comportamento mediante uma característica (Ageorges, Ye e Hou, 2000). No estudo do comportamento em serviço, preocupa-se com a determinação do comportamento da junção considerando as condições de contorno (solitações mecânicas, solitações térmicas, entre outras) as quais esta está submetida (Dubé et al, 2008).

O presente artigo visa investigar o comportamento mecânico de juntas simples de compósitos termoplásticos híbridos sob ação de carregamentos trativos. Para isso, são utilizadas duas abordagens: numérica / computacional e experimental. Na abordagem numérica / computacional, apresentam-se: as hipóteses de partida, o modelo matemático e os dados de entrada necessários para a realização da análise. Na abordagem experimental, tem-se: a curva de força vs. deslocamento para corpos de prova de juntas simples e o campo de deslocamentos por correlação de imagens. Por fim, os resultados obtidos pelas duas abordagens são comparados, discutindo-se vantagens e desvantagens de cada.

### 2. Problema

O problema consiste na análise de uma junta simples de compósitos termoplásticos sob ação de carregamentos no plano. A junta é fabricada pela soldagem de dois laminados termoplásticos híbridos, os quais possuem 7 camadas. As

camadas externas são de PPS reforçadas com fibras longas de vidro e as camadas internas de PPS reforçadas com fibra de carbono. Na região de soldagem, tem-se a inserção de uma malha metálica e dois filmes poliméricos de PPS amorfos. A Figura 1(a) apresenta a sequência de empilhamento determinada pelos dois laminados e os elementos da região de soldagem (malha metálica e filmes poliméricos). A geometria da junta a ser analisada é apresentada na Fig. 1(b). Os laminados são placas de 150 mm (comprimento  $L_1$ ), 25 mm (largura  $W$ ) e 2,05 mm (espessura) e são unidas com uma região de sobreposição de 25 mm (comprimento  $L_2$ ).

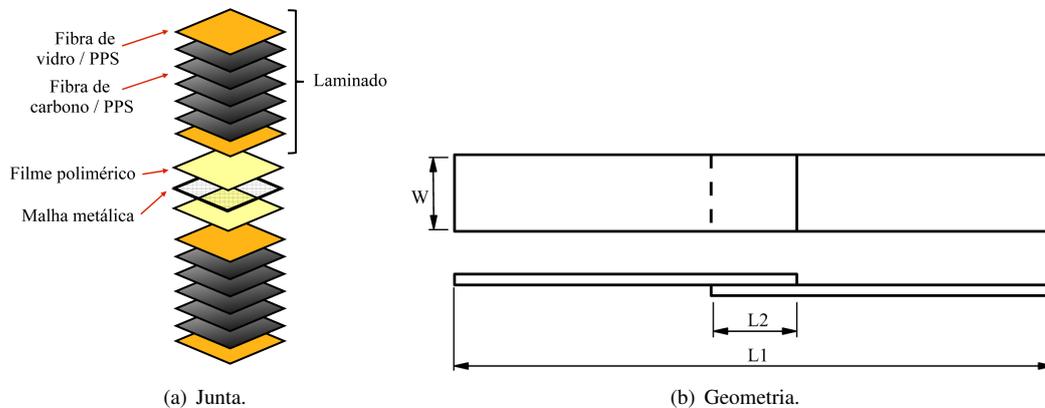


Figura 1. Junta soldada por resistência elétrica.

A junta é fabricada a partir do processo de soldagem por resistência elétrica. Nesse processo, sob o conjunto formado pelos dois laminados (aderentes), filmes poliméricos e malha metálica são aplicadas pressão, pela ação de um atuador, e temperatura, através da aplicação de uma diferença de potencial na malha metálica e geração de calor por efeito Joule. A Figura 1 representa o processo utilizado.

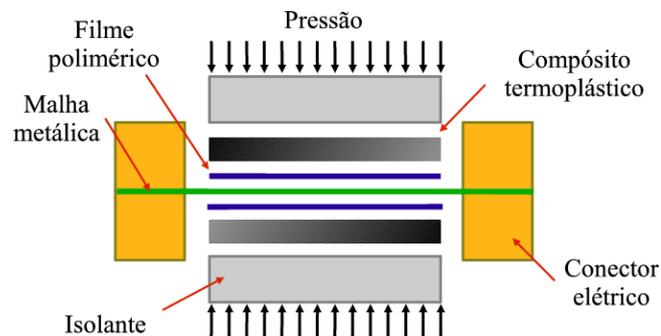


Figura 2. Processo de soldagem por resistência elétrica

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas para as camadas de fibra de vidro / PPS e fibra de carbono / PPS de acordo com as especificações do fabricante (Tencate Cetex PPS Datasheet), as quais são utilizadas como dados de entrada pela ferramenta computacional SAJ na simulação do comportamento mecânico da junta.

Tabela 1. **Propriedades mecânicas e físicas do laminado.**

Propriedades	Carbono / PPS	Vidro / PPS
Módulo de Young (GPa) ( $E_{11}$ , $E_{22}$ )	53	22
Módulo de cisalhamento (GPa) ( $G_{12}$ )	4.4	4.9
Espessura da camada (mm)	0.31	0.25

### 3. Análise experimental

Foram fabricados corpos de prova de acordo com a geometria da Fig. 1(b) e ensaiados numa máquina universal de ensaios EMIC (100kN). Realizaram-se ensaios cíclicos conduzidos a uma velocidade de 0,5 mm/min. A Figura 2 apre-

senta os resultados de força vs. deslocamento para a junta simples sob ação de carregamento no plano. O deslocamento apresentado na Fig. 2 é referente ao deslocamento da extremidade superior da junta.

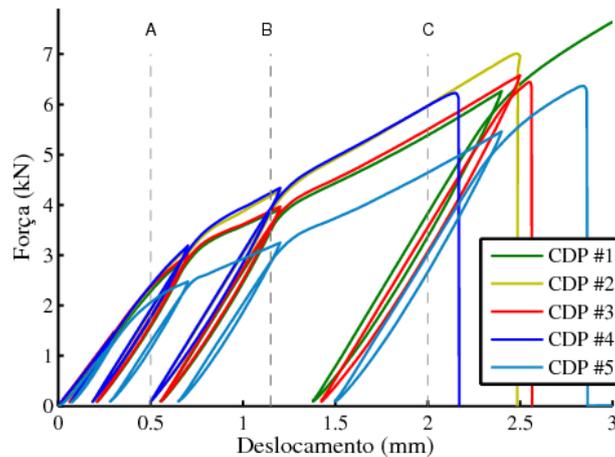


Figura 3. Força vs. deslocamento para juntas simples sob ação de carregamentos no plano.

Uma análise mais detalhada da região da junta é possível através da técnica de correlação de imagens com o programa Correli (Hild e Roux, 2008). Essa técnica permite a determinação do campo de deslocamentos a partir da análise de imagens sequenciais da região de interesse. A região de junção foi fotografada a cada 6s utilizando uma câmera Canon 50D e uma lente Sigma APO Macro DG de 180 mm com distância focal 3.5. A Figura 3 apresenta o campo de deslocamentos na direção perpendicular a direção de carregamento para diferentes níveis de deslocamento do ensaios, os quais são indicados pelas letras A, B e C na Fig. 2. Principalmente, entre os níveis de deslocamento B e C, nota-se a descontinuidade do campo de deslocamento entre os aderentes, caracterizando a existência de uma trinca. Durante o ensaio, verifica-se a rotação da região de interesse, o que dificulta a convergência no processo de correlação de imagens.

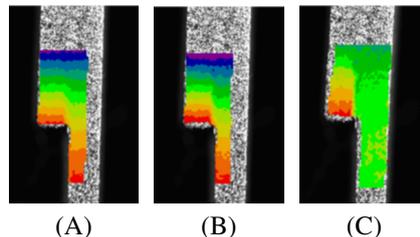


Figura 4. Campo de deslocamentos por correlação de imagens.

#### 4. Análise computacional: ferramenta SAJ

A ferramenta computacional SAJ, foi desenvolvida de modo a auxiliar no processo de projeto de juntas coladas, podendo calcular os carregamentos atuantes, os deslocamentos na junta e também as tensões na camada de adesivo e nos aderentes tanto para juntas simples como para juntas duplas. Os aderentes podem ser de compósito/compósito ou metal/compósito. Os dados de entrada são fornecidos através de um arquivo texto e os resultados são apresentados de forma gráfica ou texto.

##### 4.1 Formulação matemática

O cálculo de uma junta colada, trata-se de um problema de valor de contorno cujo domínio é subdividido em três partes, duas partes contendo somente aderentes e uma parte contendo a união desses aderentes. Para se obter o sistema de equações diferenciais de cada subdivisão da junta, procede-se fazendo o diagrama de corpo livre, conforme apresentado na Fig.4. Nesta figura, o subscrito  $_{,x}$  ou  $_{,y}$  significam derivadas parciais em relação a direção x e y respectivamente. Assumindo a teoria clássica dos laminados, que não ocorre variações em relação a direção y, ou seja, todas as derivadas em relação ao eixo y são nulas, estado plano de tensões, relações cinemáticas de Kirchoff e as equações de equilíbrio, chega-se ao sistema de equações diferenciais do problema.

Para a região 1, a qual compreende somente um dos aderentes, o sistema de equações é escrito de acordo com Eq. 1.

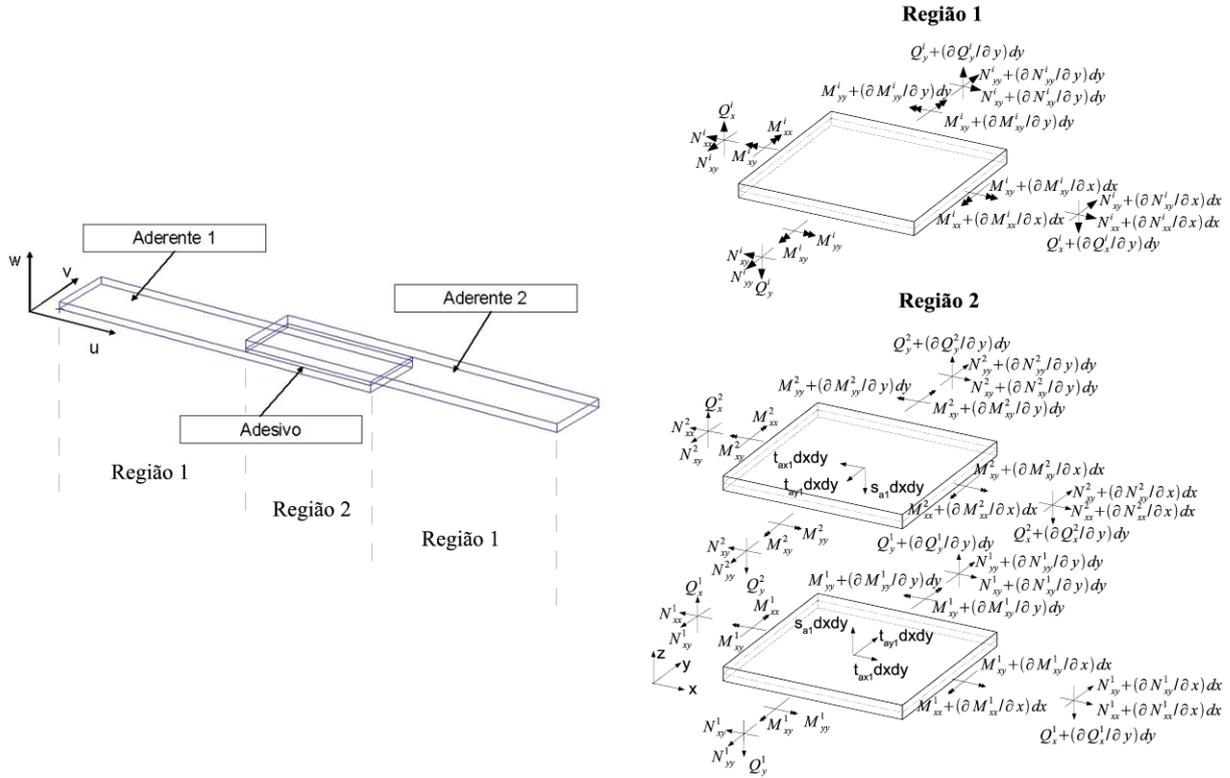


Figura 5. Diagrama de corpo livre para cada subdivisão.

Para região 2, que compreende a região de junção, de união dos aderentes, tem-se o sistema de equações escrito de acordo com Eq. 2. Para ambas equações, tem-se  $i, j = 1, 2$ .

$$\begin{aligned}
 u_{0,x}^i - a_{11}^i N_{xx}^i - a_{13}^i N_{xy}^i - b_{11}^i M_{xx}^i &= 0 \\
 w_{,x}^i + \kappa_x^i &= 0 \\
 \kappa_{x,x}^i - b_{11}^i N_{xx}^i - b_{13}^i N_{xy}^i - d_{11}^i M_{xx}^i &= 0 \\
 v_{0,x}^i - a_{21}^i N_{xx}^i - a_{23}^i N_{xy}^i - b_{21}^i M_{xx}^i &= 0 \\
 N_{xx,x}^i &= 0 \\
 N_{xy,x}^i &= 0 \\
 M_{xx,x}^i - Q_x^i &= 0 \\
 Q_{x,x}^i &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 u_{0,x}^i - a_{11}^i N_{xx}^i - a_{13}^i N_{xy}^i - b_{11}^i M_{xx}^i &= 0 \\
 w_{,x}^i + \kappa_x^i &= 0 \\
 \kappa_{x,x}^i - b_{11}^i N_{xx}^i - b_{13}^i N_{xy}^i - d_{11}^i M_{xx}^i &= 0 \\
 v_{0,x}^i - a_{21}^i N_{xx}^i - a_{23}^i N_{xy}^i - b_{21}^i M_{xx}^i &= 0 \\
 N_{xx,x}^i &= 0 \\
 N_{xy,x}^i &= 0 \\
 M_{xx,x}^i - Q_x^i + \tau_{ax}^i \frac{(t_1 + t_a)}{2} &= 0 \\
 Q_{x,x}^i - \sigma_a^i &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Sendo:

$u, v, w$ : deslocamentos nas direções x, y e z, respectivamente;

$a_{ij}, b_{ij}, d_{ij}$ : componentes da matriz de flexibilidade da Teoria Clássica dos Laminados;

$N_{ij}$ : esforços normais ( $i = j$ ) ou esforços cisalhantes ( $i \neq j$ );

$M_{xx}$ : momento fletor;

$Q_x$ : esforço cortante;

$\kappa$ : rotação;

$\sigma_a$ : tensão normal na direção z na camada adesiva;

$\tau_{ax}, \tau_{ay}$ : tensão cisalhante na camada adesiva nas direções x e y, respectivamente.

A região soldada é simulada como sendo molas sob tensão/compressão e cisalhamento, Eq. (3) até Eq. (5) apresentam o equacionamento desse modelo.

$$\tau_{ax} = \frac{G_a}{t_a} \left( u_0^i - \frac{t_i(x)}{2} \kappa_x^i - u_0^j - \frac{t_j(x)}{2} \kappa_x^j \right) \quad (3)$$

$$\tau_{ay} = \frac{G_a}{t_a} (\nu_0^i - \nu_0^j) \quad (4)$$

$$\sigma_{ax} = \frac{E_a}{t_a} (w^i - w^j) \quad (5)$$

Sendo:

$E_a$ : módulo de Young do PPS;

$G_a$ : módulo de cisalhamento do PPS;

$t_a, t_{i,j}$ : espessura da camada adesiva, espessura do aderente.

Esses sistemas de equações diferenciais são resolvidos utilizando a ferramenta computacional Matlab<sup>TM</sup>.

## 4.2 Parâmetros do modelo

São entradas para a ferramenta computacional: geometria da junção, tipo de junção, propriedades mecânicas dos aderentes e propriedades mecânicas do adesivo. A geometria, bem como, as propriedades mecânica dos aderentes foram apresentadas no tópico 2 nas Fig. 1(b) e Tab. 1. O parâmetro de entrada que define o comportamento mecânico do adesivo é a curva tensão vs. deformação (Fig. 5).

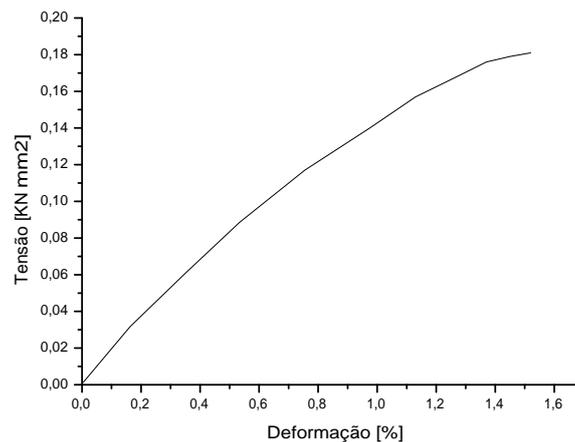


Figura 6. Curva de tensão x deformação do PPS.

Essa curva é então interpolada por um polinômio de terceiro grau. Utilizando um modelo apresentado por Thomsem (1992), onde o estado tridimensional de tensões no qual o adesivo está submetido é aproximado em um estado unidimensional conforme apresentado nas Eq.(6) até Eq.(9).

$$s = C_s (J_2)^{\frac{1}{2}} + C_v I_1 \quad (6)$$

$$e = C_s \frac{1}{1-\nu} J_{e2}^{\frac{1}{2}} + C_v \frac{1}{1-2\nu} I_{e1} \quad (7)$$

$$C_s = \frac{\sqrt{3}(1+\lambda)}{2\lambda} \quad (8)$$

$$C_v = \frac{\lambda-1}{2\lambda} \quad (9)$$

Sendo:

$s$ : Tensão unidimensional equivalente;

$e$ : Deformação unidimensional equivalente;

$J_2$ : Segundo invariante do tensor desviador de tensão;

$J_{e2}$ : Segundo invariante do tensor desviador de deformação;

$I_1$ : Primeiro invariante do tensor de tensões;

$I_{e1}$ : Primeiro invariante do tensor de deformação;

$\lambda$ : Relação entre a tensão de escoamento de compressão e tração ( $\lambda = \sigma_c/\sigma_t$ );

$\nu$ : Coeficiente de Poisson do PPS;

Tendo então aproximado o estado de tensão tridimensional do adesivo em um estado unidimensional equivalente, e tendo a curva de tensão x deformação do PPS (Fig.5) é então realizada uma análise não linear pelo método secante.

## 5. Resultados computacionais vs. experimentais

Comparam-se os resultados experimentais com os resultados computacionais quanto a resposta de força normal por unidade de comprimento vs. deslocamento da estrutura (Fig. 6). A resposta da junta nas simulações computacionais mostraram-se mais rígidas que a curva obtida experimentalmente. Isso é devido a Ferramenta SAJ considerar que todos os deslocamentos ocorrem no plano de soldagem. Experimentalmente, essa condição ideal não é verificada. Além de possíveis desalinhamentos do sistema de fixação do corpo de prova, tem-se que a partir da nucleação de uma trinca, o sistema perde simetria como um todo e verifica-se o aparecimento de rotação, conforme pode-se observar na Fig 3.

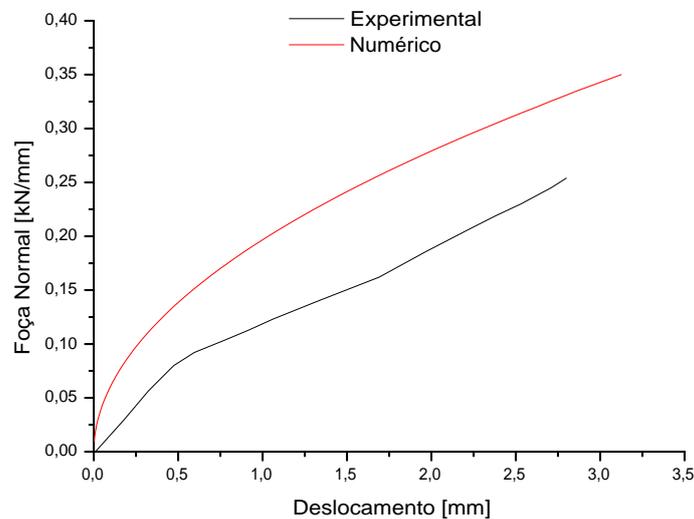


Figura 7. Curva de força x deslocamento da junta.

A restrição por outras condições de contorno estão em estudo pelo Grupo de Estruturas Aeronáuticas (GEA), bem como, ensaios que minimizem a presença de rotação, que dificulta a determinação dos campos de deslocamento utilizando a técnica de correlação de imagens.

## 6. Conclusões

A ferramenta computacional SAJ considera que não há desalinhamento entre a região de solda e a aplicação de carga, simulando assim uma condição ideal na qual a estrutura está exclusivamente na condição de cisalhamento puro. Essa

consideração confere a junta uma rigidez superior àquela observada experimentalmente, uma vez que restringe qualquer deslocamento fora do plano. Os ensaios foram realizados utilizando-se tabs de alinhamento, no entanto, após a iniciação de um processo de falha em qualquer um dos lados da junta, perde-se a simetria do sistema e verifica-se o surgimento de rotação na região da junta.

A técnica de correlação de imagens permitiu, através da visualização do campo de deslocamentos, visualizar o surgimento de trinca na região de interesse. No entanto, como colocado anteriormente, a rotação dificulta o processo de convergência. O Grupo de Estruturas Aeronáuticas (GEA) estuda a possibilidade de adotar outros tipos de ensaios para caracterização do modo de falha de cisalhamento em juntas.

## 7. Agradecimentos

Os autores do trabalho gostariam de agradecer ao CNPq e a FAPESP.

## 8. Referências

Ageorges, C., Ye, L., 2001, "Resistance welding of thermosetting composite/thermoplastic composite joints", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32, pp. 1603 - 1612.

Ageorges, C., Ye, L., Hou, M., 2000, "Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 1191 - 1202.

Dubé, M., Hubert, P., Gallet, J.N.A.H., Stavrov, D., Bersee, H.E.N. Yousefpour, A. , 2008, Fatigue performance characterization of resistance-welded thermoplastic composites. *Composite Science and Technology*. Vol. 68, pp. 1759-1765.

Hild, F., Roux, S., 2008, "Correli Q4: a software for 'finite-element' displacement field measurements by digital image correlation", Technical Report, LMT-Cachan.

Stavrov, D., Bersee, H., 2005, "Resistance welding of thermoplastic composites-an overview", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, pp. 39 - 54.

TenCate Cetex PPS Datasheet, Version 2.4, TenCate.

Thomsen, O. T., 1992, "Elasto-Static and Elasto-Plastic Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints", *Composite Structures*, Vol. 21, pp. 249-259.

## 9. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## 10. Abstract

The objective of the present article is to investigate the mechanical behaviour of thermoplastic composite joints under in-plane loading. The joints are manufactured by electrical resistance process. In this process, the thermoplastic laminates are joined through a pression applied and the heat generated by Joule effect by a metallic mesh inserted between the parts. The laminates analysed are hybrids of glass fiber / PPS and carbon fiber / PPS. The joints are tested, obtaining the force vs displacement response, and also, the displacement field through the image correlation technique. The joint is simulated using a tool developed in Matlab (SAJ - Joint Analysis System) that solves a differential equation system and enables the inclusion of a non-linear behaviour on the welded region. The results obtained experimentally are compared with the computational results, verifying the potentialities and limitations of SAJ.

## 11. Responsibility notice

The authors are responsible by the printed material included in their work.