

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste trabalho será disponibilizado somente a partir de 23/09/2017.

**DIELLY CAVALCANTI DA SILVA MONTE VIDAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM LONGOS PERÍODOS DE  
TEMPO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS PROCESSADOS POR RTM**

Guaratinguetá - SP  
2017

**Dielly Cavalcanti da Silva Monte Vidal**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM LONGOS PERÍODOS DE  
TEMPO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS PROCESSADOS POR RTM**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Odila Hilário  
Cioffi  
Coorientador: Prof.<sup>o</sup> Dr. Sérgio Roberto  
Montoro

Guaratinguetá - SP  
2017

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V648e | <p>Vidal, Dielly Cavalcanti da Silva Monte</p> <p>Estudo do comportamento térmico em longos períodos de tempo de compósitos híbridos processados por RTM / Dielly Cavalcanti da Silva Monte Vidal – Guaratinguetá, 2017.</p> <p>96 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 77-83</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.</p> <p>Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria Odila Hilário Cioffi</p> <p>Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro</p> <p>1. Materiais compostos. 2. Indústria aeronáutica. 3. Materiais</p> <p>I. Título</p> <p>CDU 620.1(043)</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

***DIELLY CAVALCANTI DA SILVA MONTE VIDAL***

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

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS**

**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



**Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri**  
Coordenador

***BANCA EXAMINADORA:***



**Prof. Dr. MARIA ODILA HILÁRIO CIOFFI**  
Coordenadora UNESP/PEG



**Prof. Dr. KELLY CRISTINA COELHO DE  
CARVALHO BENINI**  
UNESP/PEG



**Prof. Dr. MIRABEL CERQUEIRA REZENDE**  
UNIFESP/SJC

*Março de 2017*

## **DADOS CURRICULARES**

### **DIELLY CAVALCANTI DA SILVA MONTE VIDAL**

|                   |                                                                                                     |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 02.08.1993 – Garça / SP                                                                             |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Severino Tomaz da Silva Sobrinho<br>Maria Dalva Cavalcanti da Silva                                 |
| <b>2012/2014</b>  | Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos,<br>na Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba |

Dedico este trabalho de  
modo especial, à minha família

## AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho,

à minha mãe Maria Dalva Cavalcanti da Silva, pela paciência e pelos ensinamentos passados durante a minha vida, tais como, valores morais e condutas,

à minha irmã Daurya Cavalcanti da Silva, que sempre acreditou em mim, e à minha irmã Cássia Cavalcanti da Silva, por me inspirar e me fazer a amar a Ciência. À Dalva Cavalcanti Tomaz da Silva de Arruda, por sempre estar nos momentos mais difíceis e me ajudar a não desistir do meu caminho,

ao meu marido José Guilherme Monte Vidal, por me apoiar e ser meu porto seguro,

à minha orientadora, professora Maria Odila Hilário Cioffi, por ter me acolhido neste grupo de pesquisa, por ter me conduzido e acreditado que eu era capaz de desenvolver este trabalho, pelos ensinamentos e por sempre estar presente em qualquer situação deste trabalho. Pois, sem a sua orientação, dedicação e auxílio, este trabalho aqui apresentado seria praticamente impossível,

ao meu coorientador Sérgio Roberto Montoro por ter ajudado nas etapas,

aos meus colegas do grupo de Fadiga de Materiais Aeronáuticos, por me ajudarem em tudo, em especial ao amigo Francisco Maciel Moticelli por ter ajudado nos processamentos, à Thatiane Brocks pelo conselhos e ensinamentos, à Kelly Benini por ter realizado as análises de DSC e a Natássia Lona Batista pelo auxílio nas análises de DMA,

ao Professor Heitor Ornaghi Júnior por ter me passado as diretrizes para realizar o ensaio de tTS, pela sua disponibilidade e dedicação,

ao Professor Luis Rogério de Oliveira Hein, pela disponibilidade em realizar as microscopias deste trabalho,

aos Funcionários da Unesp, campus Guaratinguetá, por ajudarem na realização deste trabalho. Gostaria de agradecer especialmente, ao técnico Odir Vieira da Silva, Domingos Hasmann Neto e Wilson Roberto Monteiro pelo suporte e cordialidade.



“<sup>1</sup> Filho meu, se aceitares as minhas palavras, e esconderes contigo os meus mandamentos, <sup>2</sup> Para fazeres atento à sabedoria o teu ouvido, e para inclinares o teu coração ao entendimento; <sup>3</sup> E se clamares por entendimento, e por inteligência alçares a tua voz; <sup>4</sup> Se como a prata a buscares e como a tesouros escondidos a procurares; <sup>5</sup> Então entenderás o temor do Senhor, e acharás o conhecimento de Deus. <sup>6</sup> Porque o Senhor dá a sabedoria; da sua boca vem o conhecimento e o entendimento”.

Provérbios 2:1-6

## **RESUMO**

Os compósitos são materiais atrativos para a indústria aeronáutica, devido a alta resistência mecânica em relação ao peso significativamente baixo. Isso possibilita a redução de custos ao mesmo tempo que mantém suas propriedades físicas. Quando se utiliza diferentes reforços os compósitos se caracterizam como híbridos, os quais têm o benefício de combinar as vantagens das diferentes fibras e reduzir, simultaneamente, os seus atributos menos desejáveis. Dentre os processos de manufatura de compósitos, o RTM tem sido de grande interesse, o que pode ser justificado pela maior facilidade de fabricação com um custo relativamente baixo quando comparado a outros métodos tradicionais como a autoclave. Porém, por se tratar de um processo no qual um molde rígido fechado é usado, muitas tensões residuais podem ser inseridas na matriz. Além disso, em se tratando de híbridos, durante a cura pode haver mudanças nas propriedades relacionadas ao fenômeno da relaxação das cadeias poliméricas. Sendo assim, ter conhecimento do comportamento do material, com base nas relaxações das cadeias, é fundamental e isso pode ser realizado pelas análises dinâmico-mecânicas. Assim, o objetivo deste trabalho foi compreender o efeito dos dois reforços no fenômeno de relaxação da matriz epóxi por meio de propriedades viscoelásticas. Essas propriedades foram obtidas pela análise dinâmico-mecânica de dois compósitos híbridos, reforçados com fibras de carbono e de vidro em matriz epóxi. Esses compósitos foram processados por RTM e tiveram suas propriedades comparadas a dos compósitos produzidos somente com a fibra de carbono e somente com a fibra de vidro. Na DMA foi possível observar o fenômeno de relaxação para todos os compósitos, sendo verificado o efeito híbrido positivo, além da maior adesão interfacial para esses compósitos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósitos aeronáuticos. Compósitos Híbridos. RTM. DMA.

## **ABSTRACT**

Composites are attractive materials for the aircraft industry due to have high mechanical strength to a significantly underweight, which make possible the cost reduction keeping, at the same time physical properties. The use of different reinforcements it is possible and, then, the composite is characterized as hybrid, which have benefit to combine advantages of different fibers, reducing, simultaneously, their less desirable characteristics. Among the RTM, it has been of great interest due to the ease of manufacture in a relatively low cost compared to other traditional methods such as autoclaving. However, because it is a process in which a closed rigid mold is used, many residual stresses could be occurred in the matrix. Furthermore, regarding hybrid composites, during the cure process changes in properties related to the relaxation phenomenon of the polymeric chains could occur, which has a great influence on the physical properties of the advanced composite. Therefore, it is essential to have information about the relaxation phenomena, which is provided by dynamic mechanical analysis. The objective of this work was to understand the effect of two different reinforcements in the relaxation phenomena of epoxy matrix through viscoelastic properties. These properties were obtained by dynamic mechanical analysis of the hybrid composite reinforced with carbon fiber glass epoxy matrix, which was processed by RTM and compared to those produced with carbon fiber and glass fiber. By DMA analysis was possible to observe the relaxation phenomena to all composites and the positive hybrid effect was determined, furthermore the higher fiber/reinforce interfacial adhesion for these composites.

**KEYWORDS:** Aeronautic Composites. Hybrid Composites.RTM. DMA.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Reforço híbrido em 3 D de fibra de carbono e aramida.....                                                                                                                         | 18 |
| Figura 2.1 – Evolução da porcentagem de uso de compósitos em relação ao peso de aeronaves .....                                                                                                | 20 |
| Figura 2.2 – Aeronave Airbus A380 .....                                                                                                                                                        | 21 |
| Figura 2.3 – Esquema da faixa de vibração em um avião .....                                                                                                                                    | 21 |
| Figura 2.4 – Faixa de temperatura de serviço de um avião .....                                                                                                                                 | 21 |
| Figura 2.5 – Configurações de compósitos híbridos: (a) entre camadas, (b) hibridização no tecido, (c) fibras curtas descontinuas, (d) fibras contínuas, (e) hibridização no monofilamento..... | 22 |
| Figura 2.6 – Efeito híbrido .....                                                                                                                                                              | 23 |
| Figura 2.7 – Etapas do processo RTM .....                                                                                                                                                      | 26 |
| Figura 2.8 – Representação das transições em função da temperatura .....                                                                                                                       | 30 |
| Figura 2.9 – Resposta de um material viscoelástico a uma deformação .....                                                                                                                      | 31 |
| Figura 2.10 – Relação $\ln f$ vs $1/T_g$ .....                                                                                                                                                 | 32 |
| Figura 2.11 – Esquema da $t_{TS}$ : (a) janela de ensaio, (b) deslocamento aplicado .....                                                                                                      | 33 |
| Figura 3.1 – Tecido plain weave de fibra de carbono .....                                                                                                                                      | 35 |
| Figura 3.2 – Fluxograma do trabalho .....                                                                                                                                                      | 36 |
| Figura 3.3 – Esquema do processo RTM .....                                                                                                                                                     | 37 |
| Figura 3.4 – Pré-formas colocadas no molde .....                                                                                                                                               | 38 |
| Figura 3.5 – Configurações dos laminados: (a) FC/epóxi, (b) híbrido 1, (c) híbrido 2 e (d) FV/epóxi .....                                                                                      | 38 |
| Figura 3.6 – Esquema do estudo de permeabilidade .....                                                                                                                                         | 39 |
| Figura 3.7 – Esquema do ensaio de ILSS: (a) corpo de prova do ensaio de ILSS com as dimensões, (b) esquema do ensaio de cisalhamento .....                                                     | 42 |
| Figura 4.1 – DSC dinâmico .....                                                                                                                                                                | 44 |
| Figura 4.2 – DSC isotérmico .....                                                                                                                                                              | 45 |
| Figura 4.3 – Isotermas da análise de viscosimetria .....                                                                                                                                       | 45 |
| Figura 4.4 – Gráfico de distância versus tempo para todas as pré-formas: (a) fibra de carbono, (b) híbrido 1, (c) híbrido 2 e (d) vidro .....                                                  | 46 |
| Figura 4.5 – Imagens do comportamento do fluido durante a injeção para a pré-forma de FC .....                                                                                                 | 48 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.6 – Imagens do comportamento do fluido durante a injeção para a pré-forma do híbrido 1.....                                                                                                          | 48 |
| Figura 4.7 – Imagens do comportamento do fluido durante a injeção para a pré-forma do híbrido 2.....                                                                                                          | 49 |
| Figura 4.8 – Imagens do comportamento do fluido durante a injeção para a pré-forma de FV .....                                                                                                                | 49 |
| Figura 4.9- Mapa de atenuação dos compósitos: (a) escala, (b) FC/epóxi, (c) híbrido 1, (d) híbrido 2, (e) FV/epóxi .....                                                                                      | 50 |
| Figura 4.10- Análise termogravimétrica: (a) % massa (b) DTG .....                                                                                                                                             | 52 |
| Figura 4.11 – Comportamento dinâmico-mecânica da Resina Epóxi EP2400: (a) módulo de armazenamento, (b) módulo de perda, (c) $\tan \delta$ , (d) ampliação da região $\beta$ .....                             | 54 |
| Figura 4.12 – Comportamento dinâmico-mecânico do compósito FC/epóxi: (a) módulo de armazenamento e $\tan \delta$ (b) módulo de perda .....                                                                    | 56 |
| Figura 4.13 – Comportamento dinâmico-mecânico do híbrido 1: (a) Módulo de armazenamento e $\tan \delta$ (b) Módulo de perda.....                                                                              | 58 |
| Figura 4.14– Comportamento dinâmico-mecânico do híbrido 2:(a) módulo de armazenamento e $\tan \delta$ (b) módulo de perda .....                                                                               | 59 |
| Figura 4.15 – Comportamento dinâmico-mecânico do laminado FV/epóxi: (a) módulo de armazenamento e $\tan \delta$ (b) módulo de perda.....                                                                      | 60 |
| Figura 4.16 – Relação entre $\ln f$ vs $1/T_g$ para epóxi sem reforço: (a) $T_g$ , (b) $T_\beta$ .....                                                                                                        | 62 |
| Figura 4.17 – Relação entre $\ln f$ vs $1/t_g$ : (a) FC/epóxi, (b) híbrido 1, (c) híbrido 2, (d) FV/epóxi .....                                                                                               | 63 |
| Figura 4.18 – Curva do módulo de armazenamento em função da temperatura dos compósitos, em 1 Hz.....                                                                                                          | 64 |
| Figura 4.19 – Curvas do módulo de perda para os compósitos na frequência de 1 Hz .....                                                                                                                        | 65 |
| Figura 4.20 – Curvas do fator de perda dos compósitos na frequência de 1 Hz .....                                                                                                                             | 66 |
| Figura 4.21 – Plotagem Cole-Cole .....                                                                                                                                                                        | 67 |
| Figura 4.22 - Superposição de Tempo-Temperatura ( $tTS$ ) de todos os materiais: (a) epóxi sem reforço; (b) FC/Epóxi; (c) HC1; (d) HC 2; (e) FV/Epóxi .....                                                   | 68 |
| Figura 4.23 - Tensão de cisalhamento dos materiais produzidos.....                                                                                                                                            | 71 |
| Figura 4.24 – Microscopia ótica dos compósitos analisados por Ensaio de Cisalhamento Interlaminar: (a) FC/epóxi, (b) híbrido 1, (c) híbrido 2, (d) FV/epóxi parte superior, (e) FV/epóxi parte inferior ..... | 72 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 – Comparação dos processos mais utilizados na fabricação dos compósitos.....                                                                                                         | 25 |
| Tabela 4.1 – Medidas das regiões do DSC.....                                                                                                                                                    | 44 |
| Tabela 4.2 – Resultados do teste de permeabilidade.....                                                                                                                                         | 47 |
| Tabela 4.3 – Resultados de vazios dos compósitos.....                                                                                                                                           | 51 |
| Tabela 4.4 – Materiais e os estágio de degradação com a porcentagem de massa.....                                                                                                               | 53 |
| Tabela 4.5 – Temperaturas de transição vítrea obtidas a partir das curvas do módulo de armazenamento, módulo de perda e $\tan \delta$ em relação a frequência da epóxi sem reforço .....        | 55 |
| Tabela 4.6 – Temperaturas de transição $\beta$ obtidas a partir das curvas do armazenamento, módulo de perda e $\tan \delta$ em relação a frequência da epóxi sem reforço .....                 | 55 |
| Tabela 4.7 – Temperaturas de transição vítrea obtidas nas curvas do módulo de armazenamento, módulo de perda e $\tan \delta$ para a frequência a que o laminado de FC/epóxi foi submetido ..... | 57 |
| Tabela 4.8 – Temperaturas de transição vítrea obtidas a partir do módulo de armazenamento, módulo de perda e $\tan \delta$ em relação à frequência do híbrido 1 .....                           | 59 |
| Tabela 4.9 – Temperaturas de transição vítrea obtidas das curvas do módulo de armazenamento, módulo de perda e $\tan \delta$ em função da frequência para o híbrido 2.....                      | 60 |
| Tabela 4.10 – Temperaturas de transição vítrea obtidas a partir das curvas do módulo de armazenamento, módulo de perda e $\tan \delta$ em relação a frequência para o laminado FV/epóxi .....   | 61 |
| Tabela 4.11 – Energia de Ativação da epóxi sem reforço .....                                                                                                                                    | 62 |
| Tabela 4.12 – Energia de Ativação dos compósitos para os módulos de $E'$ , $E''$ e $\tan \delta$ .....                                                                                          | 63 |
| Tabela 4.13 – Valores do pico de $\tan \delta$ .....                                                                                                                                            | 66 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |                                                       |
|------------------|-------------------------------------------------------|
| FC               | Fibra de carbono                                      |
| FV               | Fibra de vidro                                        |
| RTM              | Moldagem por transferência de resina                  |
| VaRTM            | Moldagem de transferência de resina assistida a vácuo |
| ILSS             | Resistência ao cisalhamento interlaminar              |
| DSC              | Calorimetria diferencial de varredura                 |
| TGA              | Análise termogravimétrica                             |
| DMA              | Análise dinâmico-mecânica                             |
| T <sub>g</sub>   | Temperatura de transição vítrea                       |
| tTS              | Superposição de tempo-temperatura                     |
| WLF              | Willian-Landel-Ferry                                  |
| T <sub>ref</sub> | Temperatura de referência                             |
| PW               | Tecido <i>plain weave</i>                             |
| T <sub>β</sub>   | Transição beta                                        |
| TD               | Temperatura de degradação                             |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                     |                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| $K$                 | Tensor de permeabilidade                            |
| $P$                 | Pressão de resina                                   |
| $\mu$               | Viscosidade do fluido                               |
| $L$                 | Distância que o fluido percorreu                    |
| $t$                 | tempo                                               |
| $\phi$              | porosidade                                          |
| $\alpha$            | Conversão de cura                                   |
| $t$                 | Tempo de reação                                     |
| $f(\alpha)$         | Função que dependente do modelo cinético            |
| $K(T)$              | Expressa pela equação de Arrhenius                  |
| $R$                 | Constante dos gases                                 |
| $A$                 | Fator pré-exponencial                               |
| $E_a$ ou $\Delta E$ | Energia de ativação                                 |
| $m$                 | Ordem da reação                                     |
| $n$                 | Ordem da reação                                     |
| $K_1$               | Velocidade da reação catalítica                     |
| $K_2$               | Velocidade da reação não-autocatalítica             |
| $\sigma$            | Tensão                                              |
| $\varepsilon$       | Deformação                                          |
| $E^*$               | Módulo complexo                                     |
| $E''$               | Módulo de perda                                     |
| $E'$                | Módulo de armazenamento                             |
| $\tan \delta$       | Fator de perda                                      |
| $F$                 | Frequência                                          |
| $\ln f$             | logaritmo Neperiano da frequência                   |
| $a_t$               | Fator de deslocamento horizontal                    |
| $T_0$               | Temperatura de referência                           |
| $C_1$               | Constantes de WLF                                   |
| $C_2$               | Constantes de WLF                                   |
| $V_t$               | Volume total do compósito                           |
| $V_f$               | Volume da fibra                                     |
| $V_m$               | Volume da matriz                                    |
| $V_v$               | Volume do vazio                                     |
| $m_c$               | Massa total do compósito                            |
| $m_f$               | Massa da fibra                                      |
| $m_m$               | Massa da matriz                                     |
| $P_c$               | Densidade do compósito                              |
| $\rho_f$            | Densidade da fibra                                  |
| $\rho_m$            | Densidade da matriz                                 |
| $\sigma$            | Tensão de Cisalhamento                              |
| $F$                 | Força máxima que o material resiste ao cisalhamento |
| $B$                 | Largura do compósito                                |
| $h$                 | Espessura do compósito                              |

## SUMÁRIO

|           |                                                                 |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                         | <b>17</b> |
| <b>2</b>  | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                              | <b>20</b> |
| 2.1       | Compósitos Aeronáuticos.....                                    | 20        |
| 2.1.1     | Compósitos Híbridos .....                                       | 22        |
| 2.2       | Processamento RTM .....                                         | 24        |
| 2.2.1     | Estudo de permeabilidade.....                                   | 26        |
| 2.3       | Inspeção Acústica por Ultrassom .....                           | 28        |
| 2.4       | Análise Dinâmico Mecânica.....                                  | 28        |
| 2.4.1     | Princípio do Comportamento Dinâmico Mecânico .....              | 30        |
| 2.4.2     | Superposição de Tempo-Temperatura (tTS) .....                   | 32        |
| <b>3</b>  | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                | <b>35</b> |
| 3.1       | Materiais .....                                                 | 35        |
| 3.1.1     | Sistema Epóxi Monocomponente.....                               | 35        |
| 3.1.2     | Reforços.....                                                   | 35        |
| 3.1.2.1   | Fibra de Carbono .....                                          | 35        |
| 3.1.2.2   | Fibra de Vidro.....                                             | 35        |
| 3.2       | Métodos .....                                                   | 36        |
| 3.2.1     | Caracterização da Resina.....                                   | 36        |
| 3.2.1.1   | Análise de Calorimetria Diferencial (DSC).....                  | 36        |
| 3.2.1.2   | Viscosimetria .....                                             | 37        |
| 3.2.2     | Processamento dos compósitos .....                              | 37        |
| 3.2.3     | Permeabilidade dos reforços.....                                | 39        |
| 3.2.4     | Caracterização dos compósitos processados .....                 | 40        |
| 3.2.4.1   | Microscopia por inspeção acústica C-Scan .....                  | 40        |
| 3.2.4.2   | Análise termogravimétrica .....                                 | 40        |
| 3.2.4.3   | Digestão ácida.....                                             | 40        |
| 3.2.4.4   | Ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) ..... | 41        |
| 3.2.4.4.1 | Análise de microscopia ótica.....                               | 42        |
| 3.2.4.5   | Análise dinâmico mecânica (DMA) .....                           | 42        |
| 3.2.4.5.1 | DMA dinâmico .....                                              | 42        |
| 3.2.4.5.2 | DMA Isotérmico.....                                             | 43        |

|          |                                              |           |
|----------|----------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>         | <b>44</b> |
| 4.1      | Calorimetria exploratória diferencial .....  | 44        |
| 4.2      | Viscosimetria .....                          | 45        |
| 4.3      | Estudo de permeabilidade.....                | 46        |
| 4.4      | Microscopia por Ultrassom C-Scan.....        | 50        |
| 4.5      | Digestão ácida.....                          | 51        |
| 4.6      | Análise de termogravimetria .....            | 51        |
| 4.7      | Análise dinâmico-mecânica.....               | 54        |
| 4.7.1    | Análise de DMA dinâmico .....                | 54        |
| 4.7.1    | Superposição de tempo-temperatura (tTS)..... | 67        |
| 4.8      | Ensaio de Cisalhamento Interlaminar.....     | 71        |
| 4.8.1    | Análise Microscópica .....                   | 72        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                        | <b>76</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                     | <b>77</b> |
|          | <b>Apêndice A .....</b>                      | <b>84</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos estão sendo muito utilizados na indústria aeronáutica, devido às suas propriedades como: resistência à fadiga, resistência à corrosão e resistência mecânica em relação ao seu peso (DONG; DAVIES, 2015; KORICHO *et al.*, 2015; GUERMAZI *et al.*, 2014).

Apesar dos compósitos terem sido introduzidos na indústria aeronáutica desde 1960, muitos de seus comportamentos ainda não foram totalmente desvendados e ainda devem ser estudados e compreendidos, como o comportamento *long-term*, **que é o como o material comporta-se sob um longo período de tempo e isto** está relacionado diretamente com as propriedades mecânicas (OSELI; *et al.*, 2016; KATNAM; DA SILVA; YOUNG, 2013).

O estudo do comportamento *long-term* dos compósitos poliméricos na indústria aeronáutica é muito importante, pois este fenômeno depende da frequência, do tempo e da temperatura, devido ao seu comportamento viscoelástico. Assim, a superposição de tempo e temperatura (tTS), que têm sido amplamente utilizada para obter a curva mestra, permite este estudo (LOU *et al.*, 2012).

No mundo dos compósitos poliméricos, os reforços mais utilizados para aplicação aeronáutica são as fibras de vidro e de carbono (DONG; DAVIES, 2015).

O uso da fibra de carbono (FC) na indústria aeronáutica se justifica, pois, esta possui excelentes propriedades mecânicas, tais como, elevadas resistências mecânica e rigidez em relação ao seu peso, resistência à corrosão, estabilidade térmica e elevadas condutividades elétrica e térmica (HAN *et al.*, 2015; SHARMA *et al.*, 2014). Porém, a FC possui uma baixa resistência à falha, quando solicitada em compressão, o que limita a aplicação dos compósitos de FC em estruturas submetidas à compressão ou flexão (SWOLFS; GORBATIKH; VERPOEST, 2014; DONG; DAVIES, 2015).

A fibra de vidro (FV) em relação à FC apresenta maior resistência à falha em compressão e baixa resistência à tração, tem uma maior ductilidade (DONG; DAVIES, 2015), além de possuir uma excelente resistência química (SORENTINO *et al.*, 2015). Assim, fabricar compósitos híbridos, de forma a combinar as vantagens e diminuir as desvantagens, é de relevante importância na indústria aeronáutica.

Como conceito, os híbridos são compósitos fabricados com dois ou mais tipos diferentes de fibras, de forma a obter propriedades equilibradas (DONG; DAVIES, 2015; SWOLFS, GORBATIKH; VERPOEST, 2014). Desta maneira, este material combina as vantagens de diferentes fibras, enquanto reduz simultaneamente as suas características menos desejáveis. A

baixa resistência à compressão de polímeros reforçados por FC é um exemplo, que pode ser aperfeiçoado quando se adiciona a FV, o que melhora esta característica além de aumentar a resistência à tração (DONG; DAVIES, 2014; DONG; DAVIES, 2015).

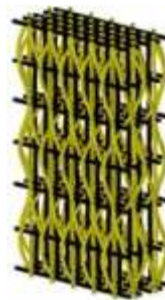
Dentre os processos de fabricação de compósitos, o processo de moldagem por transferência de resina (RTM) tem se mostrado excelente, pois quando comparado a outros processos, apresenta uma produção mais rápida e tem conceitos de fácil assimilação (HAN *et al.*, 2015).

A literatura sobre compósitos híbridos processados por RTM não é muito vasta e nos trabalhos encontrados, grande parte estuda compósitos híbridos em uma mistura de fibras naturais com sintéticas (ZHENG *et al.*, 2017; SONG, 2015; SCHMIDT *et al.*, 2009; KHALIL *et al.*, 2007; WAN *et al.*, 2005).

Nos trabalhos de Zheng *et al.* (2017) o efeito de hibridização nos tecidos com arranjos tridimensionais (3D) de FC e fibra de aramida processadas via RTM foi avaliado. A Figura 1.1 apresenta um exemplo de tecido híbrido 3D. Os autores estudaram também a resistência à tração e mostram como a mudança do entrelaçamento 3D e a porcentagem de fibras alteraram a resistência à tração entre 13% a 45% dos laminados.

Wan *et al.* (2005) também estudaram o efeito híbrido nos tecidos 3D de fibra de Kevlar e de carbono processados via moldagem de transferência de resina assistida a vácuo (VaRTM), no qual os autores estudaram a resistência a flexão e cisalhamento e ao impacto, neste trabalho foi possível verificar o efeito de hibridização positivo.

**Figura 1.1** – Reforço híbrido em 3 D de fibras de carbono e aramida



**Fonte:** Zheng *et al.*, 2017

Sing (2015) estudou as propriedades mecânicas de compósitos híbridos tanto de FC e FV, quanto de FC e da fibra de aramida, pelo processo moldagem por transferência de resina assistido à vácuo (VaRTM). Schmidt *et al.* (2009) e Khalil *et al.* (2007) estudaram híbridos de FV com fibras de sisal e juta, respectivamente, ambos processados via RTM.

Foi possível encontrar na literatura vários trabalhos de compósitos híbridos processados via RTM. No entanto, não foram encontrados trabalhos específicos que processam híbrido com reforços de fibras de carbono e vidro e que estudam o comportamento *long-term*. O que justifica o estudo dos comportamentos térmico e mecânico desses materiais, sendo esses destinados às aplicações aeronáuticas.

O objetivo deste trabalho é, então, compreender o efeito dos diferentes tipos de reforços nos fenômenos viscoelásticos dos compósitos e da sua matriz, para isso foi utilizada a técnica de análise dinâmico-mecânica dos compósitos híbridos reforçados com FC/FV em matriz epóxi, ambos processados por RTM e comparados a dois outros, um produzido com a FC e um com a FV.

As análises de termogravimetria e de calorimetria exploratória diferencial foram também realizadas para apoiar a compreensão do comportamento térmico dos materiais e a análise de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) foi realizado para avaliar o efeito híbrido dos diferentes tipos de reforços no comportamento mecânico dos laminados estudados.

## 5 CONCLUSÃO

Diante de todos os resultados pode-se concluir que os diferentes tipos de reforços influenciam as propriedades viscoelásticas e, com a variação de frequência nota-se que tanto para a epóxi sem reforço quanto os compósitos apresentam uma variação no valor da Tg. Além disso, com a adição da fibra, a mobilidade da cadeia é reduzida que pode ser confirmado pelo cálculo de Ea.

Cada híbrido teve comportamento diferente, o que pode ser associado a diferença na arquitetura. O híbrido 1 apresentou maior restrição na mobilidade das cadeias. O híbrido 2 teve um comportamento mais próximo que a do laminado de FV, isto pode ser explicado por meio da microscopia ótica dos laminados.

Para o híbrido 1 foi observado que a propagação da trinca além de encontrar um obstáculo na região fibra/matriz, tem também este obstáculo na região de transição de fibras diferentes e por sua vez, no híbrido 2 só existe duas regiões nas quais as duas fibras diferentes se encontram que são as regiões da FV com FC, o que proporcionou a modificação no seu comportamento em todas as análises.

Os compósitos apresentados nesse trabalho para utilização em aplicações estruturais verticais, tem uma vida útil muito atraente, pois a adição de reforço a matriz faz como que o material tenha sua vida útil prolongada em milhares de anos, isto é uma característica muito importante para garantir que o material que esteja em serviço não tenha ocorrido mudanças em suas propriedades mecânicas.

Além de que os híbridos combinaram as vantagens e diminuído as desvantagens, fazendo com que este material tenha viabilidade na utilização na indústria aeronáutica, e a diminuição do custo devido a FV ser mais barata que a FC.

## REFERÊNCIAS

- ASHORI, A.; MENBARI, S.; BAHRAMI, R. Mechanical and thermo-mechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites using exfoliated graphene nanoplatelets coating. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 38, p. 37–42, 2016.
- BODAGHI, M.; CRISTÓVÃO, C.; GOMES, R.; CORREIA, N.C. Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 82, p. 88–99, 2016.
- BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. **Polímeros**, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2002.
- BROCKS, T.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C. Effect of fiber surface on flexural strength in carbon fabric reinforced epoxy composites. **Applied Surface Science**, v. 274, p. 210-216, 2013.
- CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Química nova**, v. 28, n. 2, p. 255-263, 2005.
- CHEN, L.; CHIU, T-C.; CHEN, T-C.; CHUNG, M-H.; YANG, □-F.; LAI, Y-S. Using DMA to simultaneously acquire Young's relaxation modulus and time-dependent Poisson's ratio of a viscoelastic material. **Procedia Engineering**, v. 79, p. 153 – 159, 2014.
- CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C.; CAMARGO, J. A. M.; REZENDE, M. C.; ORTIZ, E. C.; AMBROSIO, L. Fractography analysis and fatigue strength of carbon fiber/RTM6 laminates. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 15, p. 3609-3614, 2010.
- COSTA, A. □; BOTELHO, E. C.; □ARDINI, L. C. Efeito da degradação ambiental nas propriedades de cisalhamento de compósitos PPS/fibra de carbono. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 161-167, 2011.
- DENG, S.; HOU, M.; YE, L. Temperature-dependent elastic moduli of epoxies measured by DMA and their correlations to mechanical testing data. **Polymer testing**, v. 26, p. 803-813, mai. 2007.
- DEVILLARD, M.; HSIAO, K-T.; GOKCE, A.; ADVANI, S. G. On-line Characterization of Bulk Permeability and Race-tracking During the Filling Stage in Resin Transfer Molding Process. **Journal of Composite Materials**, Vol. 37, No. 17/2003
- DONG, C.; DAVIES, I. J. Flexural and tensile moduli of unidirectional hybrid epoxy composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres. **Materials & Design**, v. 54, p. 893-899, 2014.
- DONG, Ch.; DAVIES, I. J. Flexural strength of bidirectional hybrid epoxy composites reinforced by E glass and T700S carbon fibres. **Composites Part B: Engineering**, v. 72, p. 65-71, 2015.

DONG, L.; KIM, B.; LOCQUET, A.; MCKEON, P.; DECLERCQ, N.; CITRIN, D.S. Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves. **Composites Part B: Engineering**, v. 79, pp. 667-675, 2015.

ENDRUWEIT, A.; ZENG, X.; LONG, A. C. Effect of specimen history on structure and in-plane permeability of woven fabrics. **Journal of Composite Materials**, v. 49, n. 13, p. 1563-1578, 2015.

FAN, Z.; SANTARE, M. H.; ADVANI, S. Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. **Composites Part A**, v. 39, p.540-554, 2008.

FARIA, R.; DUNCAN, J. C.; BRERETON, R. G. Dynamic Mechanical analysis and chemometrics for polymer identification. **Polymer Testing**, v. 26, p. 402-412, 2007.

FENG, J.; GUO, Z. Temperature-frequency-dependent mechanical properties model of epoxy resin and its composites. **Composite Part B**, v. 85, p. 161-169, 2016.

GOERTZEN, W. K.; KESSLER, M. R. Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair. **Composites Part B: Engineering**, v. 38, n. 1, p. 1-9, 2007.

GRACIA-FERNÁNDEZ, C.A.; GÓMEZ-BARREIRO, S.; LÓPEZ-BECEIRO, J.; SAAVEDRA, J. T.; NAYA, S.; ARTIAGA, R. Comparative study of the dynamic glass transition temperature by DMA and TMDSC. **Polymer Testing**, v. 29, p. 1002-1006, set. 2010.

GRANDE, A. M.; DI LANDRO, L.; BETTINI, F.; BALDI, A.; SALA, G. RTM process monitoring and strain acquisition by fibre optics. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 3497-3502, 2011.

GUERMAZI, N.; HADDAR, N.; ELLEUCH, K.; AYEDI, H.F. Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures. **Materials & Design**, v. 56, p.714-724, abr. 2014.

HAMEED, N.; SREEKUMAR, P. A.; FRANCIS, B.; YANG, W.; THOMAS, S. Morphology, dynamic mechanical and thermal studies on poly (styrene-co-acrylonitrile) modified epoxy resin/glass fibre composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 12, p. 2422-2432, 2007.

HAN, S. H.; CHO, E. J.; LEE, H. C.; JEONG, K.; KIM, S. S. Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, v. 119, p. 50-58, 2015.

IDICULA, M.; MALHOTRA, S. K.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, n 7, p. 1077-1087, 2005.

JANG, J.; YANG, H. The effect of surface treatment on the performance improvement of carbon fiber/polybenzoxazine composites. **Journal of materials science**, v. 35, n. 9, p. 2297-2303, 2000.

KATNAM, K. B.; DA SILVA, L. F. M.; YOUNG, T. M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 61, p. 26-42, 2013.

KAYNAK, C.; AKGUL, □; ISITMAN, N. A. Effects of RTM Mold Temperature and Vacuum on the Mechanical Properties of Epoxy/Glass Fiber Composite Plates. **JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS**, v. 42, p. 1505-1521, 2008.

KEUSCH, S.; HAESSLER, R. Influence of surface treatment of glass fibres on the dynamic mechanical properties of epoxy resin composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 30, n. 8, p. 997-1002, 1999.

KHALIL, H. A., HANIDA, S., KANG, C. W., FUAAD, N. N.. Agro-hybrid composite: the effects on mechanical and physical properties of oil palm fiber (EFB)/glass hybrid reinforced polyester composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 26, n. 2, p. 203-218, 2007.

KORICHO, E. G.; KHOMENKO, A.; HAQ, M.; DRZAL, L. T.; BELINGARDI, G.; MARTORANA, B. Effect of hybrid (micro- and nano-) fillers on impact response of GFRP composite. **Composite Structures**, v. 134, p.789-798, dec. 2015.

LAURENZI, S.; GRILLI, A.; PINNA, M.; DE NICOLA, F.; CATTANEO, G.; MARCHETTI, M. Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding. **Composites Part B: Engineering**, v. 57, p. 47-55, 2014.

LE, M. Q.; CA□SAL, J-F.; LALLART, M.; HEBRARD, Y.; HAM, A. V. D.; REFFE, N.; GEYNET, L.; COTTINET, □-J. Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 79, p. 147-157, 2015.

LEVY NETO, F.; □ARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1 ed., 2006.

LI, R. Time-temperature superposition method for glass transition temperature of plastic materials. **Materials Science and Engineering: A**, v. 278, n. 1, p. 36-45, 2000.

LI, Y.; XIE, L.; MA, H. Permeability and mechanical properties of plant fiber reinforced hybrid composites. **Materials & Design**, v. 86, p. 313-320, 2015.

LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; ORNAGHI JR, H. Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of Polymeric Composite Materials. **Scientia cum Industria**, v. 4, n. 1, p. 48-60, 2016.

LUO, W.; WANG, C.; HU, X.; YANG, T. Long-term creep assessment of viscoelastic polymer by time-temperature-stress superposition. **Acta Mechanica Solida Sinica**, v. 25, n. 6, p. 571-578, 2012.

MENARD, K. P. **Dynamic mechanical analysis: a practical introduction**. CRC press, 2008.

MIYANO, Y.; NAKADA, M.; CAI, H. Formulation of long-term creep and fatigue strengths of polymer composites based on accelerated testing methodology. **Journal of composite materials**, v. 42, p. 1897 – 1919, 2008.

MOUTON, S.; TEISSANDIER, D.; SEBASTIAN, □; NADEAU, J. □ Manufacturing requirements in design: The RTM process in aeronautics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 1, p. 125-130, 2010.

MURUGAN, R.; RAMESH, R.; □ADMANABHAN, K. Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 459-468, 2014.

NAIK, N.K.; SIRISHA, M.; INANI, A. □ermeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 65, p. 22-40, 2014.

NAYA, S.; MENESES, A.; TARRÍO-SAAVEDRA, J.; ARTIAGA, R.; LÓPEZ-BECCEIRO, J.; GRACIA-FERNÁNDEZ, C. New method for estimating shift factors in time–temperature superposition models. **Journal of Thermal Analysis & Calorimetry**, v. 113, p. 453-460, 2013.

ORNAGHI JR., H.; SILVA, L. H. S. P. D.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Hybridization effect on the mechanical and dynamic mechanical properties of curaua composites, *Materials Science and Engineering: A*, 528, pp. 7285–7289, 2011

OSELI, A.; AULOVA, A.; GERGESOVA, M.; EMRI, I. Time-Temperature superposition in linear and non-linear domain. **Materials Today: Proceedings**, v. 3, p. 1118 – 1123, 2016.

PARK, S-J.; KIM, M-H. Effect of acidic anode treatment on carbon fibers for increasing fiber-matrix adhesion and its relationship to interlaminar shear strength of composites. **Journal of materials science**, v. 35, n. 8, p. 1901-1905, 2000.

PAZOS-OSPINA, J.F.; EALO, J.L.; AMACHO, J. C. New dual-focalization ferroelectret-based array for air-coupled ultrasonic inspection of textiles. **NDT & E International**, v.74, pp. 50-57, 2015

POGANY, G.A. Gamma relaxation in epoxy resins and related polymers. *Polymer*, v.11, p. 66-78, 1970

POTHAN, L. A.; OOMMEN, Z.; THOMAS, S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 283-293, 2003.

REZAEI, F.; YUNUS, R.; IBRAHIM, N. A. Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. **Materials & Design**, v. 30, n. 2, p. 260-263, 2009.

ROULEAU, L.; DEÜ, J. F.; LEGAY, A.; LE LAY, F. Application of Kramers–Kronig relations to time–temperature superposition for viscoelastic materials. **Mechanics of Materials**, v. 65, p. 66-75, 2013.

SABA, N. ; PARIDAH, M.T.; ABDAN, K.; IBRAHIM, N.A. Dynamic mechanical properties of oil palm nano filler/kenaf/epoxy hybrid nanocomposites. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 133–138, Oct. 2016.

SANCHIS, M.J.; DÍAZ-CALLEJA, R.; ELISSOU, O.; GARGALLO, L.; RADİÇ, D. Dynamic mechanical and dielectric relaxations in poly(di-n-chloroalkylitaconates). **Polymer**, v. 45, p. 1845-1855, 2004.

SCHMIDT, T. M., GOSS, T. M., AMICO, S. C., LEKAKOU, C. Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 28, n. 23, p. 2839-2850, 2009.

SETHI, S.; RAY, B. C.. Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. **Advances in colloid and interface science**, v. 217, p. 43-67, 2015.

SHARMA, M.; GAO, S.; MÄDER, E.; SHARMA, H.; WEI, L. Y.; BIJWE, J. Carbon fiber surfaces and composite interphases. **Composites Science and Technology**, v. 102, p. 35-50, 2014.

SHIINO, M. Y.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C. Evaluation of stitched fabric composite processed by RTM in quasi-static test. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 2603-2608, 2011..

SHOJAEI, A.; GHAFARIAN, S. R.; KARIMIAN, S. M-H. Modeling and simulation approaches in the resin transfer molding process: a review. **Polymer Composites**, v. 24, n. 4, p. 525-544, 2003.

SIMAR, A.; GIGLIOTTI, M.; GRANDIDIER, J. C.; AMMAR-KHODJA, I. Evidence of thermo-oxidation phenomena occurring during hygrothermal aging of thermosetting resins for RTM composite applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 66, p. 175-182, 2014.

SONG, J. H. Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 79, p. 61-66, 2015.

SORRENTINO, L.; SIMEOLI, G.; IANNACE, S.; RUSSO, □ Mechanical performance optimization through interface strength gradation in PP/glass fibre reinforced composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 76, p. 201-208, 2015.

SOUTIS, C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. **Materials Science and Engineering: A**, v. 412, n. 1, p. 171-176, 2005a.

SOUTIS, C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 41, n. 2, p. 143-151, 2005b.

STARK, W. Investigation of the curing behavior of carbon fibre epoxy prepreg by Dynamic Mechanical Analysis DMA. **Polymer Testing**, v. 32, p. 231-239, nov. 2013.

STARK, W.; JAUNICH, M.; MCHUGH, J. Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of epoxy carbon-fibre prepregs partially cured in a discontinued autoclave analogue process. *Polymer Testing*, v. 41, p. 140148, 2015.

SWOLFS, Y.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I. Fibre hybridisation in polymer composites: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 67, pp. 181-200, 2014.

SWOLFS, Y.; MEERTEN, Y.; HINE, J.; WARD, I.; VERPOEST, I.; GORBATIKH, L. Introducing ductility in hybrid carbon fibre/self-reinforced composites through control of the damage mechanisms. **Composite Structures**, 131, 259-265, 2015.

TEREKHINA, S.; FOUVRY, S.; SALVIA, M.; BULANOV, I. An indirect method based on fretting tests to characterize the elastic properties of materials: Application to an epoxy resin RTM6 under variable temperature conditions. **Wear**, v. 269, n.7, p. 632-637, 2010.

VAIDYANATHAN, T. K.; VAIDYANATHAN, J.; CHERIAN, Z. Extended creep behavior of dental composites using time-temperature superposition principle. **Dental Materials**, v. 19, n. 1, p. 46-53, 2003.

VAN GURP, M.; PALMEN, J.. Time-temperature superposition for polymeric blends. **Rheol. Bull**, v. 67, n. 1, p. 5-8, 1998.

VERNET, N.; TROCHU, F. Analysis and modeling of 3D Interlock fabric compaction behavior. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 80, p. 182-193, 2016.

WAN, Y. Z.; CHEN, G. C.; HUANG, Y.; LI, Q. Y.; ZHOU, F. G.; XIN, J. Y.; WANG, Y. L. Characterization of three-dimensional braided carbon/Kevlar hybrid composites for orthopedic usage. **Materials Science and Engineering: A**, v. 398, n.1, p. 227-232, 2005.

WISNOM, M. R.; CZÉL, G.; SWOLFS, Y.; JALALVAND, M.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I. Hybrid effects in thin ply carbon/glass unidirectional laminates: accurate experimental determination and prediction. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 88, p. 131-139, 2016.

XIE M.; ZHANG, Z.; GU, Y.; SU, M. L. Y. A new method to characterize the cure state of epoxy prepreg by dynamic mechanical analysis. **Thermochimica Acta**, v. 487, p. 8-17, jan. 2009.

YANG, B.; *et al.* Influence of fabric shear and flow direction on void formation during resin transfer molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 68, p. 10-18, 2015.

YU, H., LONGANA, M. L.; JALALVAND, M.; WISNOM, M. R.; POTTER, K. D. Pseudoductility in intermingled carbon/glass hybrid composites with highly aligned discontinuous fibres. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 73, p. 35-44, jun. 2015.

ZAMAN, I.; NOR, F. M.; MANSHOOR, B.; KHALID, A.; ARABY, S. Influence of interface on epoxy/clay nanocomposites: 2. mechanical and thermal dynamic properties. **Procedia Manufacturing**, v. 2, p. 23 – 27, Fev. 2015.

ZHENG, Y., SUN, Y., LI, J., LIMIN, L., CHEN, L., LIU, J., TIAN, S. Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites. **Materials & Design**, v. 116, p. 246-252, 2017.