

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TOLERÂNCIAS APLICADAS EM CDPS DE BEARING EM TRAÇÃO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL DA JUNTA COMPÓSITA CONFORME NORMA ASTM D5961.

L. P. D. Mariga<sup>1\*</sup>; R. C. M. Sales<sup>1</sup>; W. M. M. Menezes<sup>1</sup>.

1 Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Professor Jessen Vidal  
Av. Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 - Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP,  
CEP.12247-014, Brasil - Telefone: (12) 3905-2423

\*luana.mariga@gmail.com

**RESUMO:** O presente trabalho estuda a influência da aplicação da tolerância de paralelismo no desempenho estrutural de juntas compósitas sujeitas a cisalhamento simples, fixas com dois prendedores, para execução de ensaio de *bearing* em tração, conforme procedimento B da norma ASTM D5961, a partir de simulação em software de elementos finitos e breve revisão bibliográfica. Foi estudada também alternativa mais viável para manufatura, com tolerância de paralelismo de 1 mm. Por fim, foram citadas variáveis inerentes ao processo de obtenção de juntas compósitas mais críticas ao desempenho estrutural, como folga furo/pino, passo, acoplamento fibra/matriz, empilhamento e distância de borda, por exemplo, e, levantado como hipótese, que um erro na ordem de décimos de milímetro de paralelismo não afetaria de forma significativa o modo de falha primário por *bearing*, mas poderia influenciar a precisão dos dados de entrada como força aplicada, tensão e deformação, e, consequentemente acarretar em maiores fatores de segurança.

**PALAVRAS-CHAVE:** tolerâncias geométricas, tolerância de paralelismo, concentração de tensão, alinhamento de carga, *by-pass*, ensaio de *bearing* em tração.

**ABSTRACT:** This article has the purpose of verify the parallelism geometrical tolerance application on the response of single lap composite joints, riveted with two fasteners, for bearing test in tension, according to ASTM D5961 – procedure B, using for this finite element analysis software and short bibliographic review. It was also studied one alternative that is more affordable for manufacturing, with 1 mm of parallelism tolerance. Furthermore, it was mentioned variables on the composite joints obtainment which are more critical for its structural performance, as hole/fastener gap, pitch, fiber/matrix mating, lay-up and edge distance, for example, and, in conclusion, raised as a hypothesis that one error in millimeter decimals order would not affect the bearing primary failure in a significant manner, but could influence on test input parameters as applied force, stress and strain and, therefore, result in higher safety factor appliance.

**KEYWORDS:** geometrical tolerance, parallelism tolerance, stress concentration, load alignment, *by-pass*, bearing test in tension, materials resistance.

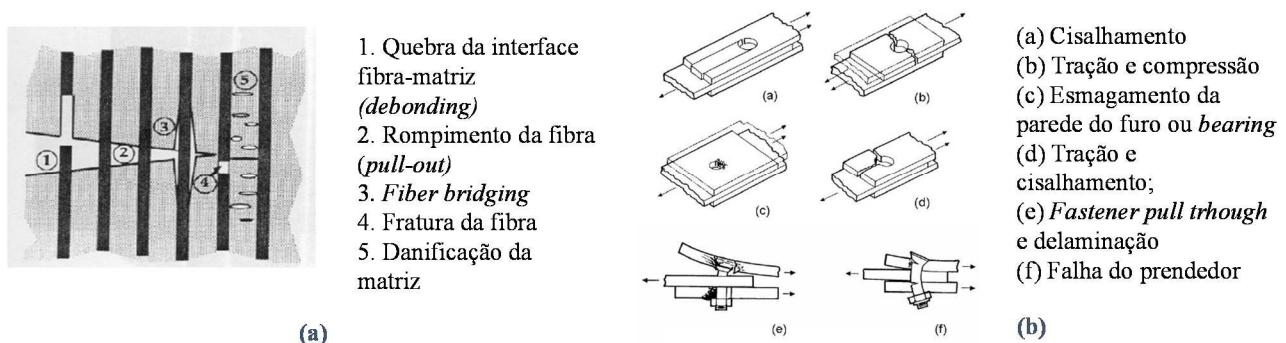
## 1. INTRODUÇÃO

Juntas são um dos maiores desafios no projeto de estruturas [1], e, portanto, relevante objeto de análise para ensaios e cálculos estruturais [2]. Nos seus pontos de transferência de força ocorrem concentrações de tensões e o elemento de união e/ou as regiões da junta envolvida estão sempre pré-deformados [3]. São ainda a fonte mais comum de falhas e reparos em aeronaves [1].

As juntas mais utilizadas na aeronáutica são as unidas mecanicamente [1]. Dentre elas, as sujeitas ao simples cisalhamento são mais significativas para análise do efeito de *bearing*, pois além

de induzirem carga de cisalhamento no prendedor, se comparadas com juntas de duplo cisalhamento, possuem maior concentração de tensão nas paredes dos furos devido a menor área de contato e ainda induzem cargas de flexão no prendedor, devido ao momento secundário gerado pela geometria da junta.

Os modos de falha em compósitos são processos geralmente complexos, ocorrendo de forma progressiva e afetando a confiabilidade dos componentes fabricados [2]. Os mais comuns em juntas e laminados estão ilustrados na Figura 1a [4] e 1b [5]. Dentre seus principais fatores de influência, o alinhamento do carregamento e a distribuição uniforme da tensão são as hipóteses relacionadas à tolerância apertada do paralelismo indicada no procedimento B [6] e por isso serão avaliadas no decorrer desse trabalho.

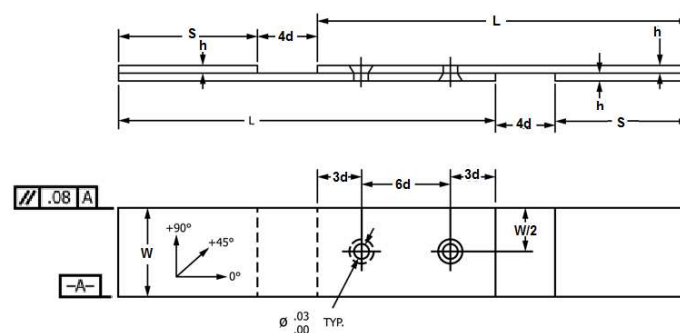


**Figura 1:** Modos de falha: a) Intralaminares, no laminado [4]; b) Em juntas Compósitas [5]

### 1.1. Procedimento B – ASTM D5961

A norma ASTM D5961 [6] cobre as diretrizes para ensaios de *bearing* de juntas compósitas cravadas ou pinadas, de laminados polímero-matriz multidirecionais reforçados, balanceados e simétricos em relação à direção do teste, composto por fibras de alto-módulo [2].

O presente trabalho estuda a influência e a necessidade da tolerância de paralelismo em relação ao *datum* A, no desempenho da junta compósita conforme procedimento B, indicado na Figura 2 [6], tendo em vista que a tolerância centesimal requerida aumenta os custos de produção.

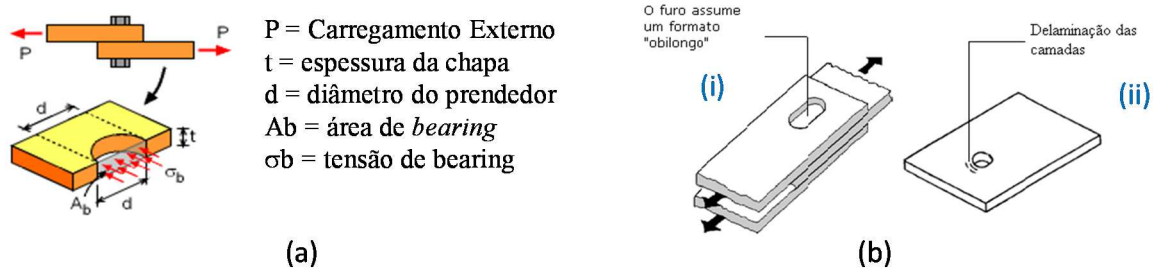


**Figura 2:** Junta Simples para ensaio de *bearing*, conforme ASTM D5961, procedimento B [6]

O CDP consiste em junta compósita sujeita ao simples cisalhamento, fixada com dois prendedores e dois *doblers* (indicados pela cota “s” na Figura 2), que tem a função de garantir que a linha de carga seja coincidente à interface da junta, de forma a evitar momento fletor secundário [2].

### 1.2. Bearing

*Bearing* é o esmagamento da parede do furo provocado pela pressão exercida pelo fixador devido ao carregamento externo [2], demonstrado na Figura 3a [7]. A Figura 3b ilustra falhas típicas por *bearing* em laminados compósitos [8].

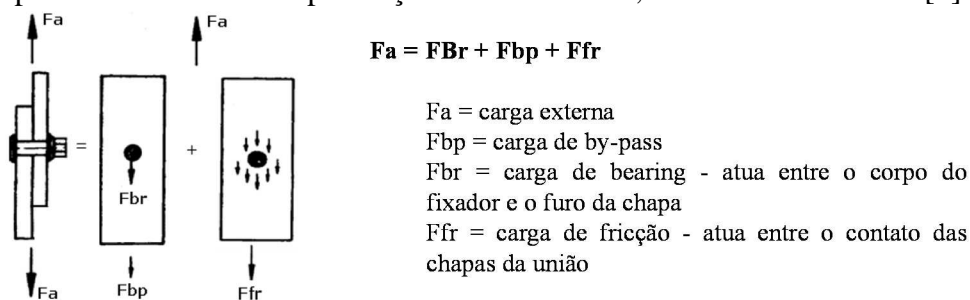


**Figura 3:** (a) Representação da tensão de *bearing* na parede do furo em junta simples rebitada; (b) Falhas por *Bearing*: i) defeito na forma circular; ii) Delaminação

### 1.3. Alinhamento de carga e *By-pass*

O sentido do carregamento é crítico em juntas compósitas, devido a sua heterogeneidade, ortotropia e baixa ductilidade [9]. Diferente dos materiais isotrópicos, suas propriedades variam conforme orientação das fibras, apresentando maior rigidez e resistência na direção paralela as mesmas, para reforços unidirecionais [10]. Além disso, o momento secundário gerado por uma excentricidade na aplicação da carga sobrecarrega os fixadores, podendo produzir conexões excessivamente tensionadas [2] e, em instalações com folga no prendedor, rotacioná-lo, resultando em distribuição de carga não uniforme ao longo da espessura do CDP [1]. Quanto maior o momento fletor no prendedor, maior a chance de deformação do pino e esmagamento da parede do furo, e quanto maior sua flexibilidade, mais carga suporta e maior a vida em fadiga da junta [2].

Um desalinhamento da carga ainda pode afetar em maior porção de *by-pass*, que seria uma carga de desvio na forma de tensão de tração nas duas placas, conforme Figura 4. Para o procedimento em específico [6], essa porção não deve ultrapassar 20% [2], com risco de gerar falha por tração e compressão ou combinada por tração e cisalhamento, invalidando o ensaio [6].



**Figura 4:** Definição das cargas que agem em uma junta [2]

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho foi selecionado como material lamina de compósito de módulo intermediário, pré-impregnada, similar à utilizada na aeronáutica, composta por fibras de carbono de alta resistência, unidirecionais, combinadas com resina epóxi de alta resistência e tenacidade [11], com as propriedades elásticas conforme Tabela 1 [12], que serviram de input para simulação em software de elementos finitos:

**Tabela 1:** Propriedades Elásticas do Material [12]

Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
-------------	-------	-------------	-------

Módulo de Elasticidade Longitudinal ( $E_1$ )	147 GPa	Resistência longitudinal à tração e à compressão ( $X_t$ e $X_c$ , Dir 1)	2,86 GPa
Módulo de Elasticidade Transversal ( $E_2$ )	7,58 GPa	Resistência transversal à tração e à compressão ( $Y_t$ e $Y_c$ , Dir 2)	1,55 GPa
Módulos de Cisalhamento no plano ( $G_{12}$ ) e Interlaminar ( $G_{13}$ )	3,96 GPa	Coefficiente Poisson ( $\nu_{12}$ )	0,33
Módulo de Cisalhamento Interlaminar ( $G_{23}$ )	3,0 GPa	Resistência ao cisalhamento ( $S$ )	0,104 GPa

A geometria dos corpos-de-prova (CDPs) seguiu o procedimento B [6], conforme Tabela 2, com somente dois corpos rígidos (RBEs – *rigid body elements*) de 1/4” simulando os fixadores.

**Tabela 2:** Parâmetros de configuração do CDP

Parâmetro	Valores	Parâmetro	Valores
Diâmetro Furo $\varnothing$	6,337 a 6,387 mm	Largura W (6d)	38,1 mm
Espessura h	3,07 mm (16 camadas)	Distância de Borda W/2	19,05 mm
Comprimento L	210 mm	Lay-up (quasi-isotrópico)	[45/0/-45/90]2S

Quanto ao método, realizadas análises de elementos finitos nos softwares Nastran e Femap, com critério de falha de Máxima deformação, elementos de 1 mm e aplicação de carga de 2000 daN no sentido longitudinal à junta, com RBE distribuindo a força por igual em uma extremidade do CDP, em duas condições de contorno e duas geometrias, uma com a junta conforme *baseline* (medidas nominais conforme norma) [6] e outra com erro de paralelismo de 1 mm (Figura 5).



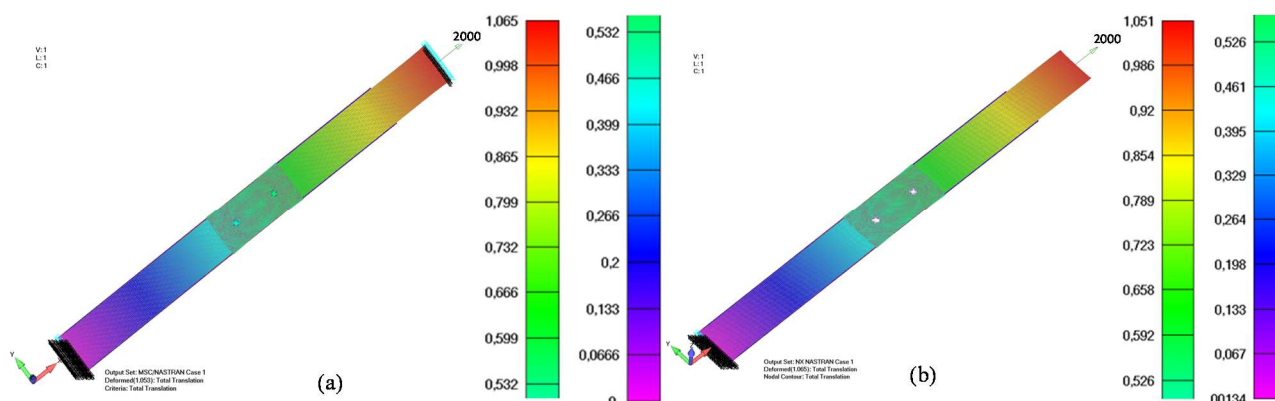
**Figura 5:** Croqui do erro de paralelismo e aumento de área em forma de “cunha”, sem escala

A condição de contorno 1 simulou a junta engastada na extremidade esquerda e livre somente para deslocamento longitudinal na direita, na qual foi aplicada a carga, de forma a aproximar-se da condição de fixação dos CDPs na máquina de tração durante o ensaio. A Condição 2 simulou a junta engastada em uma extremidade (à esquerda) e livre na outra.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A condição de contorno 1 resultou na diferença de -0,014 mm em translação entre as geometrias 1 e 2 (Figuras 6a e 6b), ou seja, a condição com o erro apresentou menor deformação, devido ao aumento de área, o que não deverá ocorrer se o mesmo erro de paralelismo for aplicado no sentido contrário (para dentro da peça), reduzindo a seção transversal da junta. A sombra em azul escuro ao redor dos CDPs faz referência a forma inicial do CDP, em escala para melhor visualização.

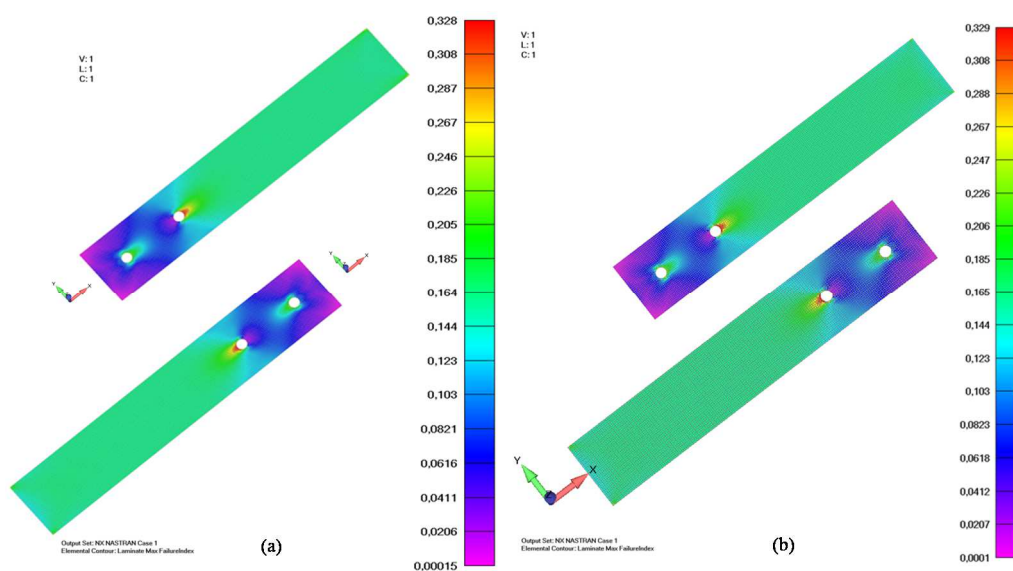




**Figura 6:** Resultado da Deformação nas Geometrias: a) 1 (*baseline*); b) 2 (aplicado erro de paralelismo)

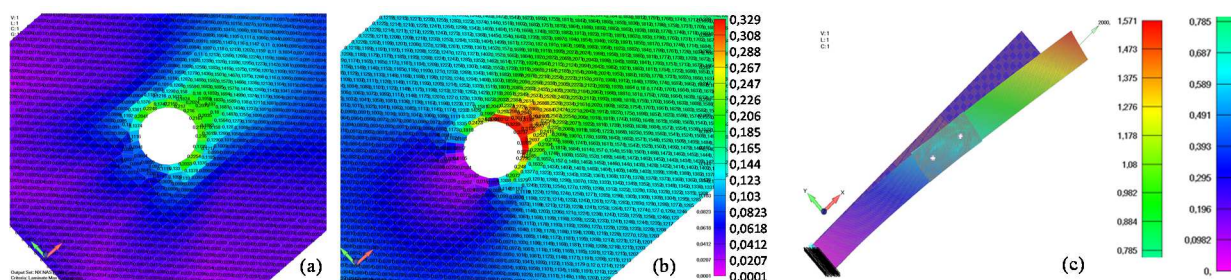
Teoricamente na geometria 2 deve ocorrer uma maior parcela de *by-pass*, devido ao aumento da área na forma de cunha, embora não tenha sido estimado o quanto. De qualquer forma, mesmo aplicando o erro de 1 mm de paralelismo e área, a diferença é muito pequena para alterar ou mascarar o modo de falha primário por *bearing*, embora possa alterar outros parâmetros, como força e tensão, uma vez que altera a área e a direção do carregamento.

Quanto ao índice de falha, que representa um cálculo do software entre os *allowables* de resistência do material *versus* o carregamento aplicado, observou-se que em nenhum dos casos a junta falhou (erro menor que 1) e que houve uma diferença de apenas 0,001 entre as geometrias *baseline* e com o erro, conforme Figuras 7a e 7b.



**Figura 7:** Índice de falha da junta, condição de contorno 1, geometrias: a) 1, *baseline* b) 2, erro

O resultado foi coerente com o esperado para o ensaio, pela pequena área de coloração azul clara nas extremidades fixas dos CDP, indicando leve aumento de tensão, e falha maior no furo mais próximo do ponto de aplicação e reação da carga, conforme indicado pelos pontos vermelhos na Figura 8b, caracterizando absorção da carga de *by-pass* somada a 50% da carga de *bearing* e no 2º furo somente os outros 50% da carga de *bearing* (Figura 8a), com o restante da parcela de *by-pass* sendo dissipada pela área da extremidade do CDP.



**Figura 8:** Close do índice de falha Geometria 2, condição 1, metade direita: (a) Furo 1; (b) Furo 2; (c) Resultado da Deformação da 2ª condição de contorno e geometria 2

Por último, foi simulada a geometria 2 na segunda condição de contorno (viga engastada em somente uma extremidade), conforme Figura 9c, resultando em maior diferença de translação em relação à condição de contorno 1 e geometria 1, no valor de 0,506 mm, devido ao momento fletor secundário gerado pelo desalinhamento da carga, demonstrando que um erro de paralelismo alteraria de forma mais significativa o deslocamento da junta se a extremidade estivesse solta, o que não representa a condição real do ensaio.

É importante ressaltar que devido a sua complexidade, existem inúmeros métodos de verificação de modos de falhas em CPR (Compósitos Poliméricos Reforçados Laminados) [2]. Venturini [2] cita a existência de mais de 70 referências quanto a critérios de danificação e falha. Portanto, as simulações realizadas reforçam a hipótese de que a tolerância de paralelismo pode ser mais aberta, mas não encerram o estudo em si.

Além disso, sabe-se que nenhum software de elementos finitos pode simular uma condição tão real quanto um lote representativo de juntas para ensaio, devido ao grande número de variáveis e possível somatória de erros desde a concepção da junta até a interpretação dos resultados do ensaio.

Por último, não foi encontrado na norma ASTM D5961 [6] justificativa quanto ao requisito de paralelismo apresentado, assim como nos materiais indicados na revisão bibliográfica são mais enfatizados outros fatores como determinantes para o desempenho do ensaio do que um erro de paralelismo na ordem de centésimos, como folga furo/pino, torque e material do prendedor, tamanho e tipo da cabeça do prendedor, passo, acoplamento fibra/matriz, espessura e rigidez do laminado [3], empilhamento e ortotropia do material, espessura dos calços, condições de temperatura e umidade e, principalmente, distância de borda e relação entre diâmetro do prendedor com a espessura do laminado [2].

## 5. CONCLUSÃO

A partir da revisão bibliográfica e das simulações realizadas, observou-se que há inúmeras variáveis que podem influenciar o comportamento de juntas compósitas em ensaio de *bearing* que são mais críticas para o desempenho de juntas compósitas do que um erro de até 1 mm de paralelismo.

No entanto, apesar da tolerância requerida no procedimento B da norma [6] aumentar os custos de manufatura, é uma variável controlável e possível de ser obtida, entre tantas outras de mais difícil controle, a partir de métodos como por exemplo furação por gabarito com referência de batente no *datum* A e um setup adicional de retífica do contorno.

Conclui-se, portanto, que o erro de paralelismo não afetaria de forma significativa o modo de falha primário por *bearing* da junta, mas poderia afetar a precisão dos dados de entrada como força aplicada, tensão e deformação, o que pode ser crítico dependendo da acurácia necessária ao ensaio e acarretar em utilização de maiores fatores de segurança e estruturas menos otimizadas.

É importante ressaltar que esse trabalho não esgota toda a análise que deve ser feita para se concluir o quanto o paralelismo pode influenciar no desempenho do ensaio. Existe uma complexidade inerente ao material compósito, inúmeras formas de prever o seu comportamento e diversas variáveis que devem ser eliminadas durante a obtenção do CDP de forma a avaliar isoladamente o efeito do paralelismo no desempenho da junta.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] MARCHEZIN, E.; PARDINI, L.C.; GUIMARÃES, V.A. *Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi*, 2012. Disponível em [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762012000100002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762012000100002). Acesso em: 22/08/2017
- [2] NETO, S. V. *Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [3] HART-SMITH, L. J. *Joints*, em: *ASM International Handbook Committee – Composites engineering materials handbook*, v.1, p. 479-489, 1987 *apud* [1]
- [4] NIU CHUN-YUNG, M. *Airframe structural design*. California: Commits Press, 1988 *apud* [2]
- [5] ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 2 ed. Nova York: CRC Press, 1995 *apud* [2]
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR THE TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates. ASTM D5961*. Disponível em <http://www.astm.org/Standards/D3039.htm>. Acesso em: 16/05/2016.
- [7] MECHANICS THEORY. *Bearing Stress*. Disponível em [http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/eBook.cgi?topic=me&chap\\_sec=01.2&page=theory](http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/eBook.cgi?topic=me&chap_sec=01.2&page=theory). Acesso em: 06/10/2016.
- [8] MILITARY HANDBOOK – 17 3F. *Polymer matrix composites materials usage, design and analysis*. Philadelphia: 2002 *apud* [2]
- [9] COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK - *Polymer Matrix Composites: Guidelines for Characterization of Structural Materials*, v.1. Wichita: SAE Internacional, 2012
- [10] NETO, F. L.; PARDINI, L. C.; *Compósitos Estruturais*. São Paulo: Editora Blucher, 2006
- [11] SWANSON, S. R.; QIAN, Y.; *Multiaxial characterization of T800/3900-2 carbon/epoxy composites* Utah: Composites Science and Technology, 1991
- [12] BHEEMREDDY, V.; JENSEN, A.; *Composite laminate modeling*. Disponível em <http://appliedcax.com/support-and-training/technical-online-seminars/seminars/composite-laminate-modeling/Composite%20Modeling%20White%20Paper%202014%20Rev-0.pdf>. Acesso em 20/08/2017

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus prezados professores e equipe da secretaria da FATEC, aos amigos e familiares e aos engenheiros Renata G. Guerra, Everton S. R. Silva, Viviane J. S. Prado e Felipe P. Pêcego.