UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

EMANUEL NUNES BORGES

Fabricação, Análise Experimental e Computacional de Juntas Híbridas Coladas Monitoradas por Compósitos Inteligentes

São Carlos
2012

EMANUEL NUNES BORGES

Fabricação, Análise Computacional e Experimental de Juntas Híbridas Coladas Monitoradas por Compósitos Inteligentes

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Aeronaves.

Orientador: Prof. Assoc. Volnei Tita

São Carlos

2012

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA. A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONÍVEL JUNTO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP/SP.

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimentos ao Usuário do Serviço de Biblioteca – EESC/USP.

Borges, Emanuel Nunes
B732f Fabricação, análise computacional e experimental de juntas híbridas coladas monitoradas por compósitos inteligentes. / Emanuel Nunes Borges; orientador Volnei Tita. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Aeronaves -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Juntas híbridas coladas. 2. Compósitos inteligentes. 3. Análise dinâmica experimental. 4. Modelagem via método dos elementos finitos. 5. Monitoramento da integridade estrutural (SHM). I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **EMANUEL NUNES BORGES.**

Título da dissertação: "Fabricação, análise experimental e computacional de juntas híbridas coladas monitoradas por compósitos inteligentes"

Data da defesa: 05/07/2012

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Associado **Volnei Tita (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Dr. **Carlos De Marqui Junior** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Titular **Reinaldo Rodriguez Ramos** (Universidad La Habana/Cuba)	Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenheira Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Suplente do Presidente da Comissão de Pós-Graduação em Exercício:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

"Dedico este trabalho ao Brasil, que seja fonte de inspiração para o desenvolvimento técnico da nação."

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Assoc. Volnei Tita, grande orientador, pelas orientações técnicas e motivadoras durante todo o desenvolvimento do trabalho, bem como o compartilhamento da visão que a academia tem do ambiente de manutenção aeronáutica.

Ao Engenheiro Paulo Lima Ferreira Brandão (TAM MRO – Gerente de Oficinas) por incentivar e apoiar o desenvolvimento pessoal e técnico de sua equipe.

Aos Integrantes do GEA, em especial a Ricardo de Medeiros Msc, pelo apoio, dedicação e suporte no desenvolvimento das atividades doravante apresentadas, principalmente experimentais.

Aos integrantes da Engenharia da TAM MRO, em especial à extinta Engenharia de Oficinas, pelo apoio, conselhos e por compartilhar suas visões técnicas sobre o meio aeronáutico.

Aos funcionários da Oficina de Material Composto (Fabio Cordeiro, Seu Júlio), Estruturas (principalmente ao Marcão) e à equipe de inspetores (em destaque ao Ratão) pelo compartilhamento de anos de experiência em práticas de processo em reparação aeronáutica.

A UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, bem como os respectivos departamentos e docentes, por me proporcionar a chance de desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço aos meus pais Odeval e Carmem, pelos exemplos de altíssima tenacidade ao estresse, aos meus irmãos Vitor e Marcos pelo estímulo constante na busca por novos desafios de vida.

Agradeço à minha esposa Patrícia Maria de Santa Eulália Borges pelo companheirismo em todos os momentos, mas principalmente por ser tão resiliente nos momentos em que mais precisei, sem guardar quaisquer deformações permanentes!

À Deus, principalmente, por ter me dado saúde, paz e tranquilidade para superar esta etapa de minha vida.

RESUMO

BORGES, E. N. *Fabricação, Análise Computacional e Experimental de Juntas Híbridas Coladas Monitoradas por Compósitos Inteligentes*. 2012. 247p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

O presente trabalho correlacionou diversas funções de respostas em frequência (FRF) de juntas do tipo simples, coladas e fabricadas em titânio-compósito (resina epóxi reforçada por fibra de carbono). As FRFs produzidas foram investigadas (experimental e numericamente) tanto para juntas intactas como para juntas com falha, estas provenientes, por exemplo, do uso em serviço ou então, com resultado do processamento inadequado de um reparo. Com base nessas análises buscou-se, portanto, subsidiar o desenvolvimento de um sistema de monitoramento estrutural a partir da avaliação de seu comportamento dinâmico, medido pelo uso de pastilhas piezelétricas integradas à estrutura. Para que o respectivo objetivo fosse alcançado. Num primeiro momento, a fim de compreender os fenômenos envolvidos, conduziu-se a atividade de revisão bibliográfica, que baseada na consulta dos trabalhos mais recentes publicados sobre a análise de juntas coladas empregando abordagem numérica, analítica e/ou experimental. Em seguida, foram desenvolvidos modelos computacionais preliminares com solução via Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de se obter as diretrizes mínimas para uma proposta de fabricação das juntas híbridas (metal-compósito). Tal estratégia permitiu reduzir efeitos indesejados, que pudessem comprometer os resultados experimentais. Em posse dos resultados computacionais fabricou-se amostras de juntas metal-compósito com e sem dano. Num primeiro momento, foram realizadas análises numéricas através do desenvolvimento de modelos computacionais (com solução via MEF) das juntas, metal-compósito, monitoradas por transdutores piezelétricos. Em seguida, as juntas híbridas foram submetidas a ensaios experimentais dinâmicos, empregando técnicas de monitoramento com auxílio de transdutores piezelétricos e acelerômetros. Por fim, avaliaram-se potencialidades e limitações dos modelos computacionais desenvolvidos, através de estudos de caso, comparando os resultados experimentais com os resultados numéricos.

Palavras-chave: juntas híbridas coladas; compósitos inteligentes; análise dinâmica experimental; Método dos Elementos Finitos; monitoramento da integridade estrutural (SHM).

ABSTRACT

BORGES, E.N. *Manufacturing, Computational Modeling and Experimenting Evaluation of Hybrid Bonded Joints Monitored through Smart Composites*. 2012. 247p. Dissertation (Master of Science) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, SP, Brazil, 2012.

The herein proposed research has correlated the Frequency Response Functions (FRF) of several hybrid titanium-composite (epoxy resin reinforced with carbon fiber) single lap bonded joints. The FRFs were investigated (numerically and experimentally) for joints with and without failures which may arise as the result of in service events or bad maintenance practices. The result of the dynamic analyses provided by the FRFs has substantiated the proposal of a damage detection method using piezoelectric elements capable which are capable to detect minor alterations on the dynamic behavior of the joint. In order to reach the proposed objective, the first action towards the given objective was study the problem through a bibliographic revision of the research subject, for this purpose the most recent published works related to numerical, analytical and experimental analyses of bonded joints were thoroughly evaluated and segregated. Afterwards, models of the joints were proposed using Finite Element Models (FEM) to obtain a preliminary result of the joints behavior to eventually substantiate the manufacturing processes, reducing the amount of material, time and cost of the experiments. Based upon the results of the FEM the coupons were manufactured with and without damages, using the methods and techniques available on the maintenance field for restoration of composite elements. Before proceed to the comparison between the modeled and experimental results, additional models were proposed using previous work's results to get results from the piezoelectric monitored joints. Afterwards, all experimental tests were conducted using accelerometers and piezoelectric elements to provide the means through it the advantages and drawbacks of the proposed monitoring method could be checked, by comparison between the experimental and modeled results.

Keywords: bonded hybrid joints; smart composites; experimental dynamics analyses; Finite Element Method; Structural Health Monitoring (SHM).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Evolução dos Custos de Manutenção com Estruturas e Horas voadas (DIXON, 2006). 2
Figura 1-2 - Compósito Polimérico Reforçado (CPR): (a) fuselagem em CPR; (b) mecanismos de falha. 3
Figura 1-3 - Regiões críticas e sistemas SHM (GIURGIUTIU, 2010). 4
Figura 1-4 - Conceitos de Projetos: (a) Projeto em Painéis; (b) Projeto em Barril. 6
Figura 1-5 - Parâmetros considerados no projeto de uma aeronave – ponto de vista do operador e fabricante. . 7
Figura 1-6 - Tipos de juntas coladas. 8
Figura 1-7 - Ilustração esquemática de mecanismos de falhas: (a) falha coesiva na camada do adesivo; (b) falha coesiva na superfície do aderente; (c) falha do adesivo na superfície entre o aderente e o adesivo; (d) falha mista de juntas coladas. (MESSLER, 2004). 10
Figura 2-1 - Classificação de materiais compósitos (CALLISTER, 2002). 15
Figura 2-2 – (a) Laminado; (b) Lâmina ortotrópica: sistema global e local de coordenadas. 16
Figura 2-3 - Elemento Representativo de um sólido em Estado Triplo de Tensões. 16
Figura 2-4 – Eixos do Carregamento e Eixos da Lamina. 22
Figura 2-5 – Esforços solicitantes atuantes em uma placa laminada. 26
Figura 2-6 - Hipóteses Cinemáticas de Kirchhoff. 27
Figura 2-7 - Mecanismos de danificação / falha em CPR: (a) danificações intralaminares (ANDERSON, 1995); (b) falhas interlaminares (TITA, 2003). 31
Figura 2-8 - Reologia da resina Hexcel 913. 35
Figura 2-9 - Ilustração de diferentes condições de fluência de resina sobre uma superfície (PETRIE, 2000). ... 35
Figura 2-10 - Exemplo de duas superfícies que apresentam diferentes configurações de rugosidade; (a) superfície rugosa e complexidade no processo de separação; (b) superfície lisa e facilidade do processo de separação. 36
Figura 2-11 - Diferentes tipos de Interação numa Junta (MESSLER, 2004): (a) Travamento Mecânico; (b) Adesão (c) Forças Eletrostáticas; (d) Difusão; (e) Teoria das Camadas Fracas. 38
Figura 2-12 - Típica Solução de reparo para uma estrutura fabricada em CPR (WHITE, 2009). 39
Figura 2-13 - Descrição da Zona de Transferência de Carga (MAXWELL e BOND, 1999). 41
Figura 2-14 – Sugestão de boas práticas para fabricação de Juntas. 42
Figura 2-15 - Distribuição de Tensão na Junta em Função da Geometria de Construção (BAKER, DUTTON e KELLY, 2004). 43
Figura 2-16 - Modelo do Processo de Colagem (MIL-HDBK-17-3F, 2002). 46
Figura 2-17 - Exemplo de abrasão em material compósito: (a) correta e (b) incorreta. 48
Figura 2-18 -- Ciclo de Cura típico para um filme adesivo: FM73 (MAXWELL e BOND, 1999). 52
Figura 2-19 - Mecanismos de Falha Tipicamente Encontrados em Juntas Coladas Sobrepostas (Metal-Metal ou Compósito-Compósito). 54
Figura 2-20 - Variação da Tensão no adesivo, (a) tensão de "descolamento" e (b) tensão de cisalhamento transversal (RIBEIRO, 2009). 54

Figura 2-21 - Deformação de uma união híbrida colada em razão da diferença de coeficientes de expansão térmica (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). 55
Figura 2-22 - Distribuição da Tensão de Cisalhamento em diferentes configurações de Juntas Sobrepostas Coladas: (1) Sem Chanfro; (2) Chanfrada com espessura finita; (3) Chanfrada com espessura tendendo a zero. (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005) 56
Figura 2-23 - Proposta de construção de uma união colada com uso de adesivos dúcteis e frágeis; (DA SILVA e LOPES, 2009). 57
Figura 2-24 – Efeitos piezelétricos diretos e inversos (SILVA, 2007). 61
Figura 2-25 - Definição das direções do sistema de coordenadas ortogonal e local de um transdutor piezelétrico, adaptado de (BERGANDER, 2003). 63
Figura 2-26 - Ilustração esquemática da simetria do cristal de compósitos criada pela combinação de constituintes da matriz e fibras com diferentes graus de anisotropia ((KAR-GUPTA e VENKATESH, 2007)) ... 65
Figura 3-1 - Metodologia Científica Empregada. 73
Figura 3-2 - Esquemático do Modelo de Junta e Condições de Contorno. 77
Figura 3-3 - Modelo esquemático da junta – regiões de interação entre aderentes e engaste. 77
Figura 3-4 - Posicionamento do Nó de excitação (Shaker) e do Nó de resposta (Acelerômetro). 78
Figura 3-5 - FRF da Subparte CPR: Modelo Casca vs. Modelo Sólido. 80
Figura 3-6 – FRF da subparte em Titânio: Modelo Casca vs. Modelo Sólido. 80
Figura 3-7 - FRFs preliminares das juntas híbridas: Modelo Casca (S8R) vs. Modelo Sólido (C3D8). 81
Figura 3-8 - Parâmetros da Junta para programação em Python. 82
Figura 3-9 - Curvas de Resposta em Frequência para o Modelo 200: Modelo Shell vs Modelo Solid. 84
Figura 3-10 - Curvas de Resposta em Frequência para o Modelo 50: Modelo Shell vs Modelo Solid. 85
Figura 3-11 - Curvas de Resposta em Frequência para o Modelo 300: Modelo Shell vs Modelo Solid. 86
Figura 3-12 - Diferenças de Rotação entre modos Semelhantes - Modelo 50 e Modelo 300. 88
Figura 3-13 - Rotações observadas próximas aos engastes: (a)Modelo 300, (b)Modelo50. 89
Figura 3-14 - Modos de Vibrar do Modelo 300: (a) primeiro modo; (b) segundo modo. 90
Figura 3-15 - Modos de Vibrar do Modelo 300: (a) terceiro modo; (d) quarto modo.- 90
Figura 3-16 - Modos de Vibrar do Modelo 300: (a) quinto modo; (b) sexto modo. 91
Figura 3-17 - Geometria de Corpos de Prova Propostos para Análise das Juntas Coladas Intactas. 91
Figura 3-18 - Processo de discretização de um sinal analógico (MCCONNEL e VAROTO, 2008). 93
Figura 3-19 - FRF segundo diferentes formas de excitação estrutural – junta intacta. 95
Figura 3-20 - FRFs para diferentes amostragens – junta intacta. 96
Figura 3-21 - Modelo 300 danificado em momentos distintos observados durante a vibração: (a) superfícies descoladas em contato; (b) superfícies separadas. 97
Figura 3-22 - Estrutura Intacta vs. Estrutura Danificada – Modelo 300. 98
Figura 3-23 - Posicionamento da região de sobreposição: (a) sexto modo de flexão;(b) Oitavo modo de flexão. 99
Figura 3-24 - Técnica de compactação por bolsa de vácuo (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005) 103
Figura 3-25 - Típica Bolsa de Vácuo e materiais consumíveis (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005) 103

Figura 3-26 - Etapas de Preparação dos Aderentes em CPR - Passo 1: Corte das Camadas; - Passo 2: Corte da Placa Curada. 104
Figura 3-27 - Proposta de Corte para Fabricação do aderente de Titânio..... 107
Figura 3-28 - Dispositivo para garantir o correto posicionamento dos aderentes durante o processo de colagem. 110
Figura 3-29 - Dispositivo para garantir o correto posicionamento dos aderentes durante a montagem..... 110
Figura 3-30 - Dispositivo de Colagem DCB seguindo requisitos da norma ASTM 5528..... 112
Figura 3-31 - Corpo de Prova para ensaio segundo ASTMD5528 (2007) com as dobradiças instaladas...... 113
Figura 3-32 – Resultado de um ensaio experimental de um corpo de prova tipo DCB da junta híbrida metal-compósito. 114
Figura 3-33 - Resultado tipicamente encontrado para ensaios de tenacidade a fratura em juntas compósito-compósito (CARLSSON e PIPES, 1987). 114
Figura 3-34 - Típico comportamento anticlástico de viga biapoiada...... 115
Figura 3-35 - Pastilha Piezelétrica Midé: (a) Transdutor piezelétrico utilizado nos experimentos; (b) Esquema da seção transversal do transdutor. 115
Figura 4-1 - Posicionamento da Pastilha Piezelétrica. 119
Figura 4-2 - Matriz de Ensaios Experimentais. 120
Figura 4-3 – Esquema Geral da Bancada de Ensaios. 121
Figura 4-4 – Detalhe da Montagem dos CDPs na bancada de ensaios e Principais Posições. 122
Figura 4-5 - Estudo de Caso 1 - junta híbrida intacta monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental... 124
Figura 4-6 - Estudo de Caso 1: Análise Experimental vs. Modelo Computacional...... 126
Figura 4-7 – Estudo de Caso 2: Modo de Vibrar em Flexo-torsão...... 128
Figura 4-8 Modelos Computacionais: Caso 1 vs Caso 2...... 130
Figura 4-9 – Modelos Computacionais do Caso 2: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica. 130
Figura 4-10 - Estudo de Caso 2 - junta híbrida intacta (com PZT) monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental. 131
Figura 4-11 – Estudo de Caso 2: Análise Experimental vs. Modelo Computacional. 131
Figura 4-12 – Análises Experimentais: Caso 1 vs Caso 2. 132
Figura 4-13 Análises Experimentais do Caso 2: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica...... 133
Figura 4-14 - Estudo de Caso 3 - junta híbrida danificada monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental. 134
Figura 4-15 - Estudo de Caso 3: Análise Experimental vs. Modelo Computacional...... 135
Figura 4-16 - Análises Experimentais: Caso 1 vs Caso 3...... 135
Figura 4-17 - Modelos Computacionais do Caso 4: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica...... 136
Figura 4-18 - Estudo de Caso 4 - junta híbrida danificada (com PZT) monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental. 137
Figura 4-19 - Estudo de Caso 4: Análise Experimental vs. Modelo Computacional...... 138
Figura 4-20 - Análises Experimentais: Caso 3 vs. Caso 4...... 138
Figura 4-21 Modelos Computacionais do Caso 4: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica. 139
Figura 4-22 - Análises Experimentais: comparação entre os 4 estudos de caso...... 140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Valores típicos de Tensão Superficial - Adaptado de (PETRIE, 2000). *34*
Tabela 2-2 - Vantagens e Desvantagens no uso de Juntas Coladas; *44*
Tabela 2-3 - Trabalhos científicos aplicados a algumas classes de materiais compósitos – (MEDEIROS, 2012). *67*
Tabela 2-4 - Lista de materiais piezelétricos e suas simetrias de cristais – (KAR-GUPTA e VENKATESH, 2007). *68*
Tabela 3-1- Propriedades Mecânicas da liga metálica Ti6Al4V (MIL-HDBK-5, 2003)..... *71*
Tabela 3-2 - Descrição do tecido em fibra de carbono (HEXCEL, 2012). *71*
Tabela 3-3 - Propriedades Mecânicas do Prepreg M20/G0904 (HEXCEL, 2010) *71*
Tabela 3-4 - Propriedades Mecânicas do Prepreg M20/G0904 (VENTURINI, 2010) - adaptado. *72*
Tabela 3-5 - Materiais empregados nas juntas coladas (Figura 3- 2)..... *78*
Tabela 3-6 - Modelo Solid vs. Modelo Shell - comprimento útil 200 mm. *84*
Tabela 3-7 - Modelos Computacionais Propostos para Análise da Junta Intacta. *84*
Tabela 3-8 - Modelo Solid vs. Modelo Shell - comprimento útil 50 mm. *86*
Tabela 3-9- Modelo Solid vs. Modelo Shell - comprimento útil 300 mm. *87*
Tabela 3-10 - Diferença em Hertz entre as frequências naturais dos modelos Shell e Solid, 200 e 300. ..... *87*
Tabela 3-11 - Saída de Dados das Análises realizadas em Abaqus. *94*
Tabela 3-12 - Diferença de Frequências Naturais encontradas entre o modelo intacto e o modelo danificado. . *98*
Tabela 3-13 - Parâmetros de cura para CDPs de tração - ASTM D3039/D3039M (VENTURINI, 2010). *105*
Tabela 3-14 - Geometria das amostras de CPR. *105*
Tabela 3-15 - Geometria das Amostras de Titânio..... *107*
Tabela 3-16 - Propriedades Mecânicas do Adesivo EA934N/A (HENKEL, 2001);..... *108*
Tabela 3-17 - Propriedades da pastilha piezelétrica (MIDÉ, 2010)...... *116*
Tabela 3-18 - Propriedades Efetivas do Transdutor (MEDEIROS, 2012)...... *117*
Tabela 3-19 - Dimensões do transdutor Midé Modelo QP10n (MIDÉ, 2010)..... *117*
Tabela 4-1 - Caracterização Dimensional dos CDPs montados..... *120*
Tabela 4-2 - Comparativo de frequências naturais entre o modelo computacional sem pastilha piezelétrica e com pastilha piezelétrica..... *129*

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão
$\sigma_{\max}$	Tensão de Ruptura
σ_{adm}	Tensão de Escoamento Admissível
σ_{ij}	Componentes Normais do Tensor de Tensões
τ	Tensão de Cisalhamento
τ_{ij}	Componentes de Cisalhamento do Tensor de Tensões
ε	Deformação
ε_{ij}	Componentes do Tensor de Deformações
γ	Distorção Angular
G_a	Módulo de Elasticidade ao Cisalhamento do Aderente
A	Matriz de Rigidez de Membrana
B	Matriz de Acoplamento
β	Deslocamento angular
C	Matriz Constitutiva
c	Coeficiente de Amortecimento
D	Deslocamento Elétrico ou Rigidez de Flexo-Torção
E	Módulo de Elasticidade
e	Constante dielétrica
e_u	Máxima Deformação
F	Força
f	Frequência de Excitação
G	Módulo de Elasticidade ao Cisalhamento
h	Metade da Espessura da Camada
L	Comprimento ou Largura da Junta Colada

M	Vetor de Esforços de Momento
m	Massa
N	Vetor de Esforços de Membrana
O	Comprimento da Sobreposição da Junta
Q	Vetor de Esforços Cortantes
ρ	Densidade
RT	Acrônimo para "*Room Temperature*"
S	Resistência ao Cisalhamento no Plano da Camada do Laminado
T	Tempo Selecionado para a Janela de Amostragem
T	Carregamento Axial
t	Espessura do Adesivo ou Tempo
t_{TI}	Espessura do Aderente de Titânio
t_{CPR}	Espessura do Aderente de Compósito Reforçado
θ	Ângulo de Orientação das Fibras nas Camadas
Útil	Área entre a Região de Engaste e de Sobreposição da Junta
u,v,w	Deslocamento nos Eixos Coordenados (X, Y, Z)
υ	Coeficiente de Poisson
X, Y, Z	Eixos Coordenados

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS IX

RESUMO XI

ABSTRACT XIII

LISTA DE FIGURAS XV

LISTA DE TABELAS XIX

LISTA DE SÍMBOLOS XXI

SUMÁRIO XXIV

1. INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS 1

1.1. INTRODUÇÃO 1
1.2. JUSTIFICATIVAS 4
1.3. OBJETIVOS 11
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO 12

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

2.1. JUNTAS HÍBRIDAS COLADAS 14
2.1.1. LAMINADOS SÓLIDOS E MECANISMOS DE FALHA EM COMPÓSITOS 14
2.1.2. UNIÕES COLADAS: TEORIAS DE ADESÃO, PROJETO E FABRICAÇÃO. 32
2.1.3. MECANISMOS DE FALHA EM JUNTAS COLADAS 52
2.2. MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL 58
2.2.1. SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL 58
2.2.2. PIEZELETRICIDADE 61
2.2.3. MONITORAMENTO DE JUNTAS HÍBRIDAS 68

3. MATERIAIS E MÉTODOS 70

3.1. MATERIAIS 70
3.2. METODOLOGIA CIENTÍFICA 72
3.3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PRELIMINARES 75
3.4. FABRICAÇÃO DA PLACA DE COMPÓSITO 100
3.5. FABRICAÇÃO DAS PLACAS DE TITÂNIO 106
3.6. FABRICAÇÃO DAS JUNTAS HÍBRIDAS COLADAS 108
3.7. MONTAGEM DAS JUNTAS HÍBRIDAS MONITORADAS 115

4. ANÁLISES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS 118

4.1. ENSAIO EXPERIMENTAL 121
4.2. JUNTAS INTACTAS (RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS) 123
4.2.1. ESTUDO DE CASO 1 (A ASSINATURA DINÂMICA) 123
4.2.2. ESTUDO DE CASO 2 (A INFLUÊNCIA DA PASTILHA PIEZELÉTRICA) 126
4.3. JUNTAS DANIFICADAS (RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS) 133
4.3.1. ESTUDO DE CASO 3 (O EFEITO DO CONTATO E A PERDA DE RIGIDEZ) 133
4.3.2. ESTUDO DE CASO 4 (A TÉCNICA DE MONITORAMENTO PROPOSTA) 136

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 141

6. BIBLIOGRAFIA 144

7. OBRAS CITADAS 159

8. ANEXOS 164

8.1. ANEXO 1 - ALGORITMO PARA MODELAGEM MODAL 164
8.2. ANEXO 2 - ALGORITMO PARA MODELAGEM DINÂMICA 176
8.3. ANEXO 3 - ALGORITMO PARA MODELAGEM DINÂMICA COM FALHA 189
8.4. ANEXO 4 - ALGORITMO PARA MODELAGEM DINÂMICA COM FALHA E PASTILHA PIEZELÉTRICA 202

1. INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, impulsionados principalmente pela indústria aeronáutica, naval e de geração de energia, inúmeros estudos foram conduzidos com o propósito de estabelecer o uso de materiais compósitos como uma alternativa segura, eficaz e economicamente viável na construção e melhoria de produtos já existentes ou novos. Dentre as principais vantagens que podem ser obtidas do emprego de materiais compósitos (por exemplo: polímeros reforçados por fibras de carbono, vidro ou aramida), citam-se: melhoria das propriedades mecânicas, aumento da razão entre capacidade estrutural e peso, invulnerabilidade à corrosão e elevada vida em fadiga. Portanto, a melhora da matéria prima empregada na fabricação de elementos estruturais passou a oferecer vantagens estratégicas, que por sua vez puderam melhorar a aceitação de seus respectivos produtos no mercado. Todavia, trouxe outros desafios, tais como, o projeto com materiais anisotrópicos e heterogêneos e, principalmente, o estabelecimento de critérios de falha precisos e consistentes fisicamente.

Por outro lado, tomando como exemplo o mercado de transporte aéreo comercial, ainda que pareça evidente, é importante mencionar que as margens de lucro alcançadas são diretamente proporcionais ao tempo em que a aeronave estiver disponível para uso. Assim, na busca por reduções de custo e melhoramento das margens advindas da atividade núcleo, os operadores têm buscado cada vez mais por soluções de produto, que requeiram o menor número de intervenções possíveis, ao mesmo tempo em que as mesmas sejam cada vez mais discretas e simples de serem cumpridas. O custo de manutenção estrutural por hora voada, de uma aeronave em que há uso extensivo de ligas metálicas, é diretamente proporcional ao seu tempo de vida como mostra Dixon (2006) (Figura 1-1).

A deterioração da aeronave, como resultado de danos acidentais, exposição a ciclos de carga e ao ambiente, promovem em algum momento no decorrer de sua vida, a elevação dos custos de manutenção até o ponto de inflexão, em que a redução das margens de lucro inviabiliza economicamente a operação da mesma de forma sustentável. Atualmente esse tempo

é estimado em aproximadamente 25 anos para aeronaves comerciais, não podendo se afirmar o mesmo para aeronaves militares.

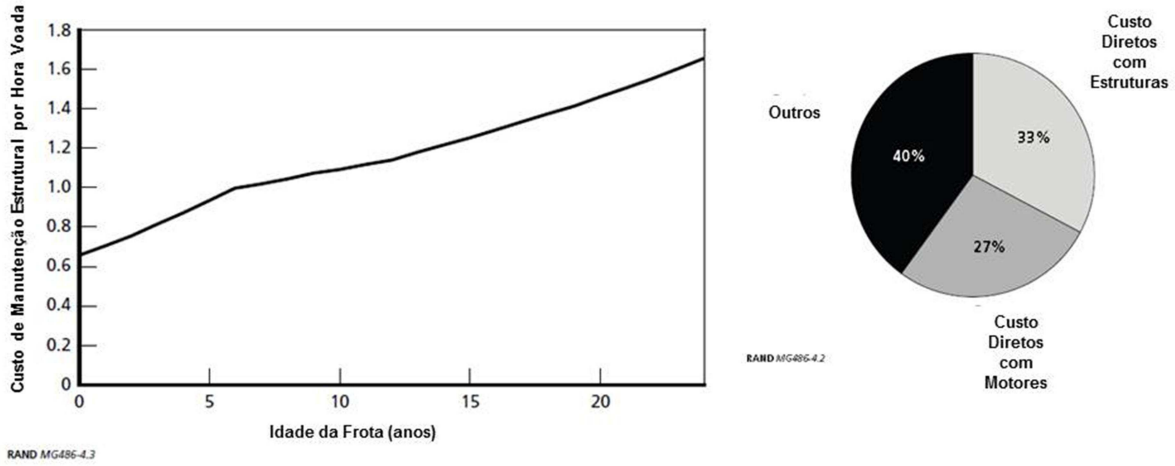


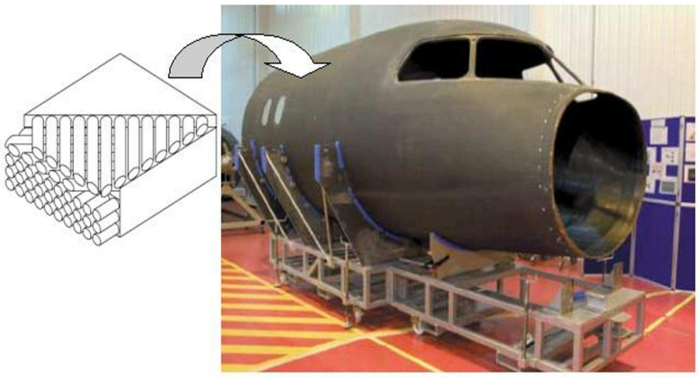
Figura 1-1 - Evolução dos Custos de Manutenção com Estruturas e Horas voadas (DIXON, 2006).

Além das necessidades anteriormente mencionadas, com o propósito de potencializar os ganhos provenientes da comercialização do produto aeronáutico, é importante que métodos e processos mais eficientes e menos custosos de produzir tanto aeronaves como componentes, em escala, sejam encontrados e aplicados.

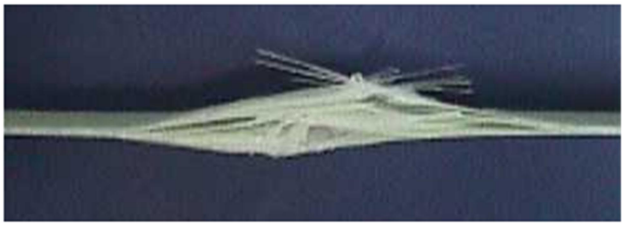
Com vantagens técnicas tão atraentes quanto às supracitadas, tem-se também, a necessidade de se reduzir os custos de operação, bem como estender o tempo de vida útil da aeronave sem acarretar em custos adicionais. Dessa forma, a indústria aeronáutica tem buscado o emprego de materiais alternativos, tais como, os materiais compósitos poliméricos reforçados.

Adicionalmente, com a crescente facilidade de acesso e variabilidade de matérias primas, bem como processos que podem ser empregados na fabricação de estruturas aeronáuticas em compósitos, diversos elementos estruturais, principalmente aqueles que apresentam alto índice de deterioração, passam a ser considerados como potenciais candidatos ao emprego de materiais compósitos poliméricos reforçados (Figura 1-2(a)). Todavia, como comentado anteriormente, há aspectos desafiadores ao utilizar tais materiais, principalmente, a previsão precisa dos seus mecanismos de falha (Figura 1-2(b)), como por exemplo: fratura de fibra; fratura da matriz polimérica; delaminações e etc. Além disso, deve-se ressaltar que estruturas de grande porte, em geral, são fabricadas em partes, e sendo assim, requerem

processo de montagem. No caso dos materiais compósitos poliméricos reforçados é possível realizar a montagem através de um processo de colagem tanto entre compósito-compósito como entre metal-compósito (junções híbridas). A estratégia de se empregar a colagem ao invés de parafusos e/ou rebites traz inúmeras vantagens, tais como: redução de entalhes, superfícies aerodinamicamente mais eficientes, melhor transferência de carga, entre outras. Todavia, muitas preocupações, também, estão no entorno de como garantir que uma estrutura colada, passível de apresentar danos internos – não visíveis às inspeções visuais – esteja apta para uso de forma rápida e segura.



(a)



(b)

Figura 1-2 - Compósito Polimérico Reforçado (CPR): (a) fuselagem em CPR; (b) mecanismos de falha.

Diante do cenário supracitado, busca-se então desenvolver metodologias científicas, que sejam capazes de prover informações rápidas e seguras sobre a integridade estrutural das peças como um todo e das partes coladas, que compõem uma aeronave. Esta informação passa a ser estratégica e, necessária para permitir que sistemas de processamento possam não somente observar possíveis alterações da estrutura, mas também, contribuir de forma ativa tanto na contenção do dano quanto na indicação para que ações venham a ser tomadas em função da resistência residual da estrutura.

Muitos pesquisadores, tais como: Medeiros (2012), He (2012), White (2009), Ingole e Chatterjee (2011) têm, então, concentrado esforços no sentido de propor, desenvolver, homologar e produzir (em escala) um sistema de monitoramento, em tempo real, que

disponibilize dados referentes à estrutura. Atualmente, os sistemas conhecidos por SHM (*Structural Health Monitoring*) vêm cumprindo com este papel. Técnicas de monitoramento podem ser empregadas em diferentes regiões consideradas críticas de uma aeronave, ou seja, em regiões sujeitas a possíveis danos estruturais, como sugere Giurgiutiu (2010) (Figura 1-3).

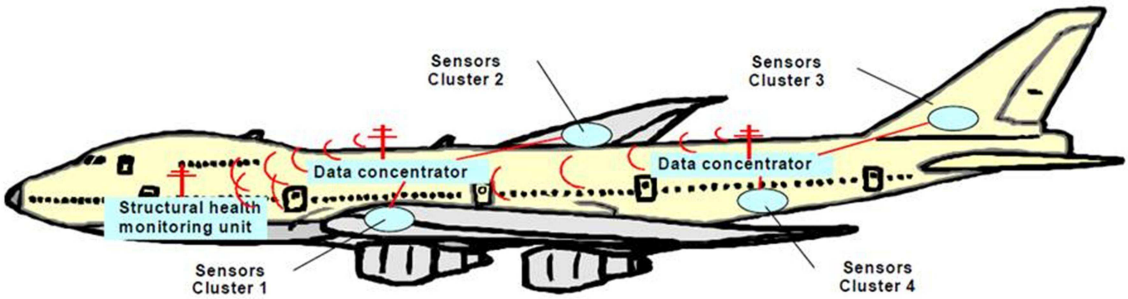


Figura 1-3 - Regiões críticas e sistemas SHM (GIURGIUTIU, 2010).

No entanto, há ainda uma série de lacunas, que devem ser preenchidas para o desenvolvimento de sistemas SHM, principalmente, para o monitoramento de juntas coladas. A escassez de trabalhos se torna ainda mais relevante quando se trata de juntas híbridas coladas. Sendo que este tópico é evidentemente pouco explorado pelas pesquisas científicas desenvolvidas até então. Essa conclusão é fruto do trabalho de pesquisa bibliográfica realizada pelo presente autor e sendo assim, o trabalho de pesquisa, doravante apresentado, visa contribuir para o desenvolvimento de sistemas SHM mais precisos, através do estudo de juntas híbridas (metal-compósito) coladas e monitoradas através de compósitos inteligentes.

1.2. JUSTIFICATIVAS

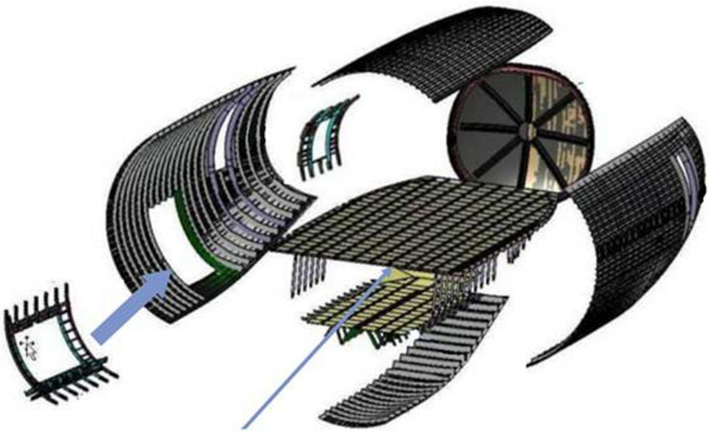
Com o uso de materiais compósitos poliméricos reforçados, além do projeto da geometria do elemento estrutural, o engenheiro também passou a projetar o próprio material, orientando e adicionando reforços estrategicamente onde são detectadas zonas de maior intensidade de carregamento. A atividade de dimensionamento das sub-partes passou, portanto, a ser realizada de forma bastante específica para cada tipo de aplicação, as quais podem envolver diferentes tipos de solicitação, como segue: de alta ou baixa frequência de excitação, em diferentes direções, sentidos e intensidades. Esse tipo de abordagem garante não somente a

aderência aos requisitos aeronáuticos, mas também a redução da quantidade de massa empregada em cada elemento e, consequentemente, o aprimoramento das características de projeto.

Por outro lado, mesmo que o uso de material compósito surja como uma alternativa promissora na substituição das estruturas metálicas, este material ainda não é capaz de cumprir com algumas das funções previamente designadas aos elementos estruturais metálicos. Há razões específicas pelas quais os materiais metálicos ainda são empregados, como por exemplo: promover aterramento elétrico; proteger superfícies expostas às correntes de ar que promovem elevada taxa de remoção de materiais por erosão; garantir maior confiabilidade em estruturas primárias submetidas a carregamentos de alta intensidade em curtos intervalos de tempo, como por exemplo, os danos por impacto, entre outras. Portanto, de uma forma ou de outra, ainda é estratégico utilizar ligas metálicas na fabricação de aeronaves. Em sendo assim, torna-se inevitável o emprego de materiais dissimilares, requisitando necessariamente soluções através do desenvolvimento de uniões.

Atualmente, dois tipos de união são apresentados como as mais comuns no segmento aeronáutico: 1) Uniões através de fixadores (parafusos e rebites) (geralmente chamadas de união cravada) e 2) Uniões coladas. Como exemplo, para uniões cravadas, pode-se mencionar as *butt-joints*, ou juntas de conexão das seções de fuselagem. Quanto às uniões coladas, pode-se citar o exemplo das uniões entre revestimento e reforçadores em estruturas de painéis.

É importante mencionar que as fuselagens, geralmente, apresentam o maior número de junções presentes numa dada aeronave. Sendo que, nos dias de hoje, dois conceitos principais de fabricação de fuselagem em compósito são empregados na produção em escala: a fabricação em barris e a fabricação em painéis, posteriormente, unidos por fixadores (Figura 1-4). A estratégia de segmentar a fuselagem em painéis é feita com a justificativa de que cada um dos segmentos da fuselagem está submetido a um caso particular de carregamento, que é característico de cada seção. Assim, para os segmentos superiores (extradorso), geralmente, submetidos a carregamentos preponderantemente de tração, propõe-se painéis fabricados a partir de laminados capazes de suportar carregamentos de tração. Por outro lado, os segmentos inferiores (intradorso), cujas cargas são predominantemente de compressão, o mesmo tipo de filosofia também é aplicado. Deve-se ressaltar que o mesmo conceito também é sugerido para asas e empenagens.



(a)

(b)

Figura 1-4 - Conceitos de Projetos: (a) Projeto em Painéis; (b) Projeto em Barril.

Por outro lado, ainda que a construção em barris seja mais vantajosa do ponto de vista de fabricação, com a redução do número de subpartes, redução do número de uniões e redução de entalhes, o fabricante deixa de empregar uma das principais vantagens oferecidas pelo uso de compósitos poliméricos reforçados, ou seja, a possibilidade de projetar localmente o material para suportar carregamentos especiais. Uma das técnicas de fabricação usadas na construção de fuselagens do tipo barril é conhecida como *filament widing,* e têm-se como resultado fuselagens simétricas, sem diferenciação entre as metades inferiores, superiores, esquerda ou direita. Com esta técnica de fabricação, o laminado é construído de maneira contínua e, como não há diferenciação de reforços aplicados ao longo do segmento do anel da fuselagem, pode acarretar em aspectos negativos para o projeto, como por exemplo: peso.

Além de determinar a escolha dos materiais pelo grau de confiabilidade e qualidade de suas propriedades mecânicas, com o propósito de manter os custos de operação e fabricação tão reduzidos quanto possíveis, conforme previamente exemplificado, é importante dedicar atenção

aos processos de manufatura e às atividades de manutenção que advirão das escolhas tomadas (Figura 1-5).

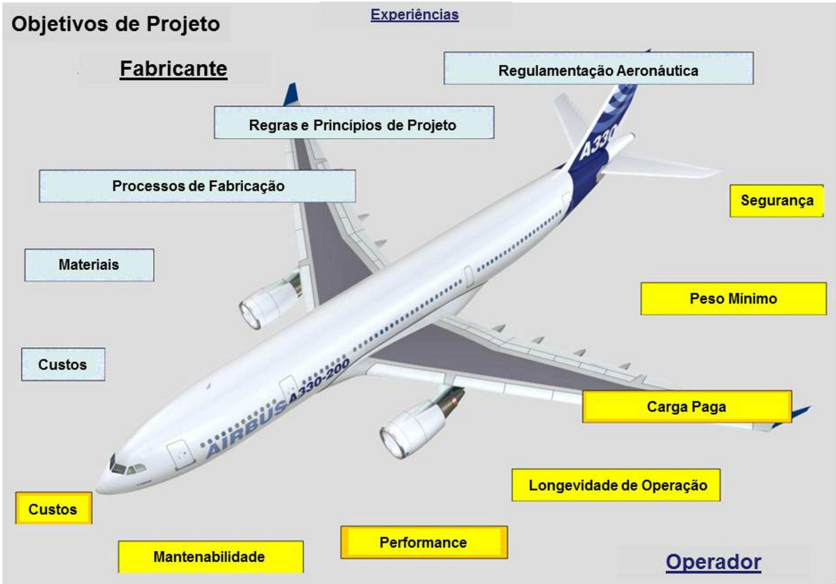


Figura 1-5 - Parâmetros considerados no projeto de uma aeronave – ponto de vista do operador e fabricante.

Em se tratando dos processos de manufatura, tem-se de forma geral que os custos de fabricação são diretamente proporcionais às dimensões do produto, principalmente quando processos de alta tecnologia e tolerâncias justas são requeridos. Desta forma, ainda que se possa obter ganho considerável tanto com a redução das etapas de fabricação, quanto com o número de sub-partes, construir macro estruturas aeronáuticas, pode exigir controles de processo bastante complexos e consequentemente custosos. Assim, por restrições tecno-econômicas, a segmentação de partes num projeto, para posterior montagem dos conjuntos maiores, empregando juntas, pode ser a opção mais viável financeiramente ou, mesmo a única possível de ser empregada.

Em se tratando dos processos de manutenção, tem-se que alguns fabricantes afirmam que a construção em múltiplos segmentos, pela união dos painéis, ao contrário de barris (Figura 1-4), permite considerável redução dos custos associados à troca de sub-partes, se estas forem necessárias. Tomando como exemplo as fuselagens construídas em segmentos, na necessidade de substituição de segmentos (por exemplo), tem-se que ferramentas mais simples e menor quantidade de equipamentos serão necessários para realizar as atividades de substituição e/ou reparo. Por outro lado, a segmentação requer necessariamente a junção de duas ou mais partes,

rotineiramente feita pelo uso de fixadores, o que acarreta em pontos de fragilidade, que consequentemente se tornam alvos de inspeção a serem apropriadamente tratadas nos programas de manutenção. A título de exemplo, os fixadores utilizados para união de sub-partes em compósitos reforçados por fibra de carbono são normalmente 50% maiores no diâmetro do que os fixadores que unem as estruturas metálicas. Além disso, os fixadores rotineiramente usados para manter estruturas de alumínio unidas não podem ser empregados permanentemente em estruturas de compósitos reforçados por fibra de carbono. Isto se deve a incompatibilidade eletroquímica entre os materiais, gerando assim diferença de potencial entre as partes e, consequentemente problemas sérios de corrosão (HART, BROWN e WONG, 1998). Para contornar esta problemática, fixadores especiais devem ser aplicados, acarretando em elevação dos custos iniciais de fabricação, bem como de manutenção.

Com base nas informações supracitadas, tem-se buscado aperfeiçoar cada vez mais as uniões coladas, principalmente, aprimorando as já existentes, tais como as juntas simples sobreposta, dupla sobrepostas, *double straps*, as quais podem ser cravadas e/ou coladas e as, que são exclusivamente coladas, tais como: escalonadas, duplamente escalonadas, chanfradas, duplamente chanfradas (Figura 1-6).

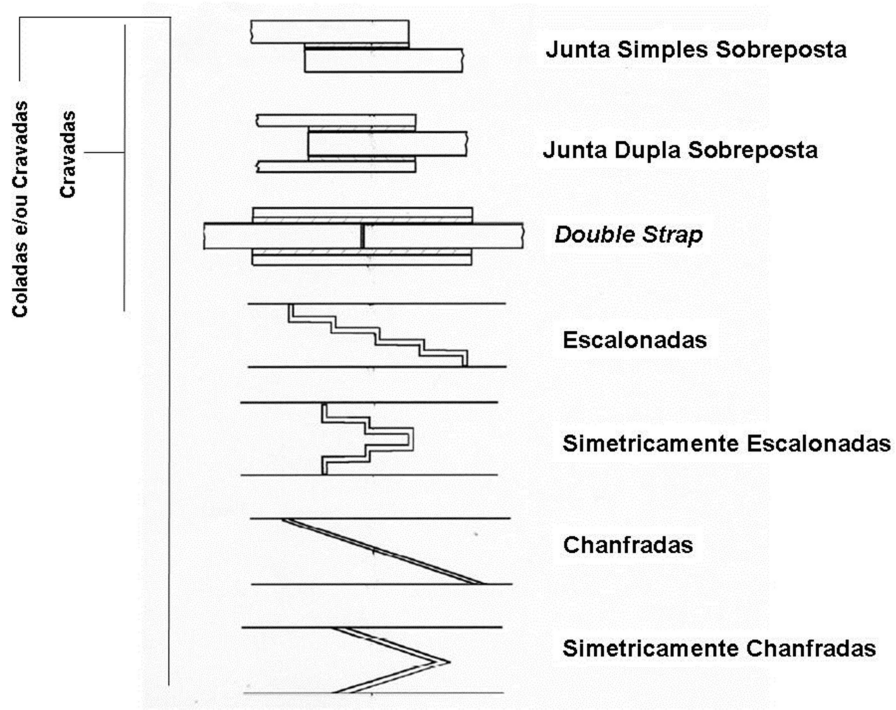


Figura 1-6 - Tipos de juntas coladas.

Como já discutido anteriormente, sabe-se com base na literatura investigada, que as uniões cravadas são as mais comumente encontradas nos projetos aeronáuticos, no entanto, são as coladas que apresentam maior número de vantagens, tanto do ponto de vista estrutural, quanto do ponto de vista de fabricação. As juntas coladas são mais leves, possuem entalhes menos abruptos e beneficiam-se de uma melhor distribuição do carregamento (SEONG, KIM, *et al.*, 2008). Ademais, as juntas coladas exigem menor quantidade de sub-partes, e permitem melhor acabamento superficial, garantindo um projeto aerodinamicamente mais eficiente.

Uma união cravada, construída em materiais compósitos, é limitada pela concentração de esforços nas redondezas dos furos usados para a união entre as partes, e devido à elevada rigidez dos materiais compósitos reforçados por fibra de carbono, tem-se que apenas de 20% a 50% da capacidade de carga que o laminado é capaz de suportar, pode ser efetivamente transferida pela união (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). Além da baixa capacidade de transferir cargas, em razão da incapacidade de se deformar e redistribuir as cargas entre os fixadores, a união por uma junta cravada entre materiais compósitos requer maior precisão dimensional no posicionamento dos fixadores, bem como calços, para melhor posicionamento das partes.

Ainda assim, com inúmeras vantagens, anos de desenvolvimento e estudos dedicados a este tipo de junção, tem-se que as uniões coladas são insuficientemente confiáveis para serem utilizadas em larga escala na construção de estruturas primárias, como fuselagens. Isto se explica devido à falta de subsídios técnicos que permitam ao projetista, principalmente nas uniões híbridas (metal-compósito), prever seus modos de falha quando submetidas a diferentes tipos de carregamento em ambientes de operação. Além disso, cabe ressaltar que este tipo de junta também é muito sensível aos parâmetros de processo usados em sua fabricação. Dessa forma, o projeto destas uniões, bem como seus respectivos processos de fabricação e reparação têm sido o tema de interesse de diversos grupos de pesquisas, na busca de melhor entendimento dos processos de falha e como estes podem ser influenciados.

Segundo Messler (2004), o processo de falha de uma junta pode ocorrer tanto no aderente quanto no adesivo, seja na superfície do laminado, ou na camada de adesivo, como ilustrado na Figura 1-7. Uma das premissas de projeto geralmente empregada prevê que o cálculo da junta garanta a falha numa zona intermediária à junta e nunca na união, ou seja, nos aderentes, e fora da zona de transferência de carga. Desta forma, tem-se como parte principal da análise da junta a camada de adesivo, que promove a união entre os aderentes (partes a serem unidas).

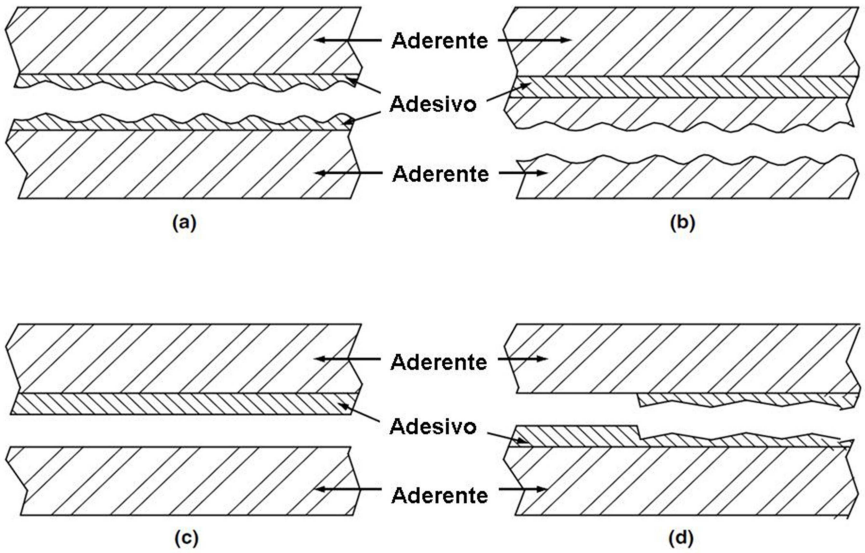


Figura 1-7 - Ilustração esquemática de mecanismos de falhas: (a) falha coesiva na camada do adesivo; (b) falha coesiva na superfície do aderente; (c) falha do adesivo na superfície entre o aderente e o adesivo; (d) falha mista de juntas coladas. (MESSLER, 2004).

Diferentes parâmetros de projeto podem resultar em diferentes distribuições e valores de tensão na camada de adesivo, dentre os principais parâmetros, tem-se: o comprimento da região colada (*overlap*) (KIM, KWEON e CHOI, 2008); a rigidez do adesivo (THOMSEN e MORTSEN, 2002) e a espessura da camada de adesivo (SEONG, KIM, *et al.*, 2008). Quanto ao comportamento dinâmico de juntas, pode-se mencionar que as variações mais significativas do mesmo dever-se-ão aos seguintes parâmetros: rigidez e espessura do adesivo; comprimento da união; composição dos aderentes; presença de vazios, e possíveis falhas na união (GHONEAM, HAMADA e EL-ELAMY, 2009). Por outro lado, quanto à fabricação, podem-se citar diferentes parâmetros de influência na qualidade da união, tais como: rugosidade e energia livre superficial dos aderentes; limpeza da superfície de adesão; propriedades térmicas do adesivo (resultado dos parâmetros para aquecimento - temperatura e tempo de exposição); pressão aplicada durante o processo de cura e tensão residual na junta, principalmente, para estruturas híbridas. É importante destacar que a tensão residual é resultado, também, da aplicação de cargas térmicas inerentes ao processo de polimerização do adesivo (MESSLER, 2004).

Tendo em vista a importância das uniões híbridas (metal-compósito) no cenário atual da indústria aeronáutica, bem como a importância em se detectar possíveis falhas prematuramente, com o propósito de evitar falhas catastróficas em operação, justifica-se assim o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa nesta área. Principalmente, quando os referidos

estudos visam contribuir para o desenvolvimento de sistemas *SHM (Structural Health Monitoring)*.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho correlacionou diversas funções de respostas em frequência (FRF) de juntas do tipo simples e coladas fabricadas em titânio-compósito (resina epóxi reforçada por fibra de carbono). Uma importante justificativa para a escolha do titânio como material aderente se faz com base na premissa, que tal material deve ser empregado amplamente na construção de reparos em estruturas monolíticas fabricadas em CPR (Compósito Polimérico Reforçado). Enquanto, que a opção por resinas poliméricas como meio de transferência de cargas é feita com o propósito de oferecer uma junta com menos entalhes, mais leve e com maior grau de amortecimento. Vale ressaltar que atualmente na indústria aeronáutica, os aderentes supracitados (titânico e CPR) são usados, no entanto, em juntas cravadas.

As FRFs foram, então, investigadas (experimentalmente e numericamente) tanto para juntas híbridas intactas como para juntas híbridas com falha, que podem ser provenientes, por exemplo, do uso em serviço ou então, de um processamento de reparo conduzido de forma inadequada. Com base nessas análises buscou-se, portanto, subsidiar o desenvolvimento de um sistema de monitoramento estrutural a partir da avaliação de seu comportamento dinâmico, medido pelo uso de pastilhas piezelétricas integradas à estrutura.

Portanto, para que este objetivo mais amplo fosse atingido, este trabalho foi subdividido em objetivos específicos, como propostos a seguir:

- ☑ Realizar uma revisão bibliográfica visando compreender os trabalhos científicos mais relevantes, bem como, os mais recentes que foram desenvolvidos na área de análise de juntas coladas, empregando abordagem numérica, analítica e/ou experimental;
- ☑ Desenvolver modelos computacionais preliminares com solução via Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de se obter as diretrizes mínimas para a fabricação das juntas metal-compósito e, consequentemente, reduzir efeitos indesejados, que possam comprometer os resultados experimentais;
- ☑ Fabricar amostras de juntas metal-compósito com base nos resultados computacionais obtidos;

- ☑ Realizar ensaios experimentais dinâmicos de juntas metal-compósito com e sem dano, empregando técnicas de monitoramento com auxílio de transdutores piezelétricos;
- ☑ Realizar análises numéricas através do desenvolvimento de modelos computacionais (com solução via MEF) das juntas metal-compósito, simulando, também, o comportamento dos transdutores piezelétricos;
- ☑ Avaliar as potencialidades e limitações dos modelos computacionais desenvolvidos, através de estudos de caso, onde serão comparados os resultados experimentais com os resultados numéricos.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando facilitar a leitura e o entendimento do texto, segue assim, uma breve apresentação do conteúdo abordado em cada capítulo da presente dissertação.

- ☑ **Capítulo 1 -** Visa contextualizar o leitor a respeito dos principais objetivos e propósitos do trabalho, apresentando as motivações e justificativas que promovem o desenvolvimento do presente estudo, com foco principal nos desafios da aplicação de junções híbridas coladas em ambientes operacionais reais.
- ☑ **Capítulo 2 -** Como parte do trabalho de pesquisa, o capítulo de revisão bibliográfica contempla a exposição e substanciação técnica das qualidades e princípios básicos, que regem o comportamento mecânico dos materiais a serem utilizados no presente estudo. Portanto, o referido capítulo aborda assuntos relacionados ao projeto e/ou à fabricação de materiais compósitos, materiais metálicos, pastilhas piezelétricas e adesivos poliméricos. Além disso, versa sobre uma série de trabalhos desenvolvidos por vários pesquisadores, incluindo contribuições científicas sobre métodos de monitoramento de estruturas.
- ☑ **Capítulo 3 -** A substanciação técnica apresentada no Capítulo 2 é de fundamental importância para a realização das atividades descritas neste capítulo. Dessa forma, tem-se que o referido capítulo aborda, detalhadamente, os materiais e métodos empregados, dando ênfase à metodologia científica, que foi adotada. Ademais, são apresentados resultados referentes às simulações computacionais preliminares, que são utilizadas para prever problemas indesejados em ensaios experimentais. Portanto, com base nestes

resultados, pode-se definir, por exemplo, a geometria dos corpos-de-prova a serem fabricados. O presente capítulo contempla também não somente o processo de fabricação das placas de material compósito, mas as juntas híbridas coladas e o processo de montagem destas e do sistema de monitoramento empregado.

- ☑ **Capítulo 4 -** Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos tanto através dos modelos computacionais como através dos ensaios experimentais. Dessa forma, num primeiro momento, são destacadas as análises teóricas e experimentais para juntas intactas. Relata-se o Estudo de Caso 1, que versa sobre a Assinatura Dinâmica da Estrutura, bem como o Estudo de Caso 2, que aborda a influência da pastilha piezelétrica na resposta da estrutura. Em seguida, o capítulo apresenta resultados experimentais e computacionais para juntas danificadas. Destaca-se o Estudo de Caso 3, que descreve o efeito do contato e da perda de rigidez, bem como o Estudo de Caso 4, que ressalta a técnica de monitoramento proposta. Vale destacar que os resultados numéricos são comparados aos resultados experimentais, avaliando-se as potencialidades e limitações dos modelos computacionais propostos.
- ☑ **Capítulo 5 -** Na etapa final do trabalho são apresentadas as considerações finais, bem como as principais conclusões a cerca de todo o estudo realizado, sendo que por fim, tem-se a proposição de trabalhos futuros com base nas perspectivas despertadas.
- ☑ **Capítulos 6 e 7** - Ambos os capítulos contemplam toda a literatura utilizada e consultada na elaboração deste trabalho. Desde as citadas em partes do texto, como as consultadas para obtenção de dados adicionais.
- ☑ **Anexos -** No campo de anexos estão disponíveis os algoritmos utilizados na modelagem computacional das juntas, incluindo a modelagem de análise modal, a análise dinâmica intacta, a análise dinâmica com o transdutor piezelétrico e a análise dinâmica não somente com o transdutor, mas também, com o dano.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos sobre juntas híbridas coladas, piezeletricidade, monitoramento de integridade estrutural e, principalmente, destacar-se-á trabalhos científicos relevantes que contribuíram para o desenvolvimento dos referidos temas.

2.1. JUNTAS HÍBRIDAS COLADAS

Pode-se definir uma união híbrida colada como sendo aquela em que os aderentes, constituídos de materiais de diferentes naturezas, como por exemplo, uma liga metálica e um laminado de material compósito são mantidos como uma única peça por meio de uma junção cravada ou colada. Na montagem de uma união cravada, busca-se inserir fixadores, através de furos estrategicamente dispostos em cada uma das partes que compõem a junta, de forma que o caminho de carga seja criado de uma parte à outra (VENTURINI, 2010). No caso de uniões coladas, estas consistem da adição de uma substância - um agente químico – capaz de promover a união das partes por meio de forças de superfícies. Nestes casos, os materiais a serem unidos são chamados de aderentes, enquanto que o agente de colagem é conhecido como adesivo, ou resina (MESSLER, 2004). Na junção híbrida, por sua vez, do presente trabalho, um dos constituintes da junta deve necessariamente ser um laminado de material compósito. Vale ressaltar que este tipo de estrutura apresenta certas particularidades, que serão melhor abordadas antes de se aprofundar nos detalhes e conceitos associados às forças de colagem e aos métodos de fabricação das junções coladas.

2.1.1. LAMINADOS SÓLIDOS E MECANISMOS DE FALHA EM COMPÓSITOS

Um compósito polimérico reforçado (CPR) pode ser descrito como a combinação de dois ou mais materiais, formando uma estrutura multifásica, que possui as melhores propriedades mecânicas de cada fase, combinando-as de tal forma que o material resultante se caracterize por ser superior a cada um seus constituintes (CALLISTER, 2002). Ou ainda, pode-se afirmar que a combinação dos materiais suprime os respectivos pontos fracos de cada fase

pelas potencialidades das outras fases. Outra característica importante do material compósito é que cada constituinte mantém sua identidade, e ambos não se dissolvem formando uma fase homogênea.

Dos materiais empregados para constituir o compósito polimérico reforçado, dois tipos principais podem ser mencionados: o material aglomerante (matriz) e o material de reforço (fase dispersa, geralmente fibras). A matriz, ou aglomerante, tem como função manter os reforços unidos, proteger as fibras e transmitir o carregamento para os reforços, que por sua vez, são responsáveis por conferir rigidez ao laminado e suportar os carregamentos aplicados na matriz (DANIEL e ISHAI, 2006). Há ainda um terceiro elemento, que é a interface fibra-matriz, tão importante quanto os dois anteriores, pois garante efetivamente que exista um material compósito.

Segundo Callister (2002), os materiais compósitos podem ser classificados em três categorias: 1) Estrutural; 2) Reforçados por partículas e 3) Reforçados por fibras (Figura 2-1).

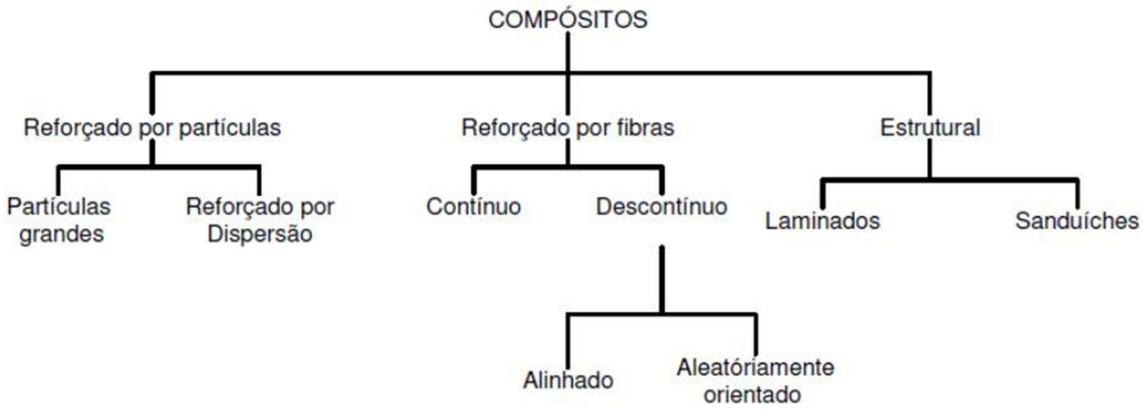


Figura 2-1 - Classificação de materiais compósitos (CALLISTER, 2002).

No caso específico das estruturas aeronáuticas, tem-se que as mesmas geralmente são fabricadas em forma de laminados ou estruturas sanduíche. Portanto, uma estrutura aeronáutica fabricada em Compósito Polimérico Reforçado – CPR – é geralmente constituída de uma matriz polimérica (por exemplo: epóxi), reforçada com fibras de: (a) vidro; (b) carbono; (c) aramida, ou; (d) quartzo. Um dado conjunto de reforços embebidos por uma matriz polimérica e alinhados numa certa direção é designado de lâmina (ou camada), esse conjunto de lâminas empilhadas forma, assim, o laminado (Figura 2-2 (a)).

Com o propósito de garantir a correta organização do laminado, bem como a direção de cada carga, cada lâmina é indexada quanto à posição no laminado e, orientadas segundo um sistema local de coordenadas. O referido sistema local é baseado nos eixos de ortotropia do material, onde a direção 1 é paralela às fibras, a direção 2 é perpendicular às fibras e pertence ao plano da lâmina 1-2, e a direção 3 é perpendicular às fibras, sendo normal ao plano da lâmina 1-2 (Figura 2-2 (b)).

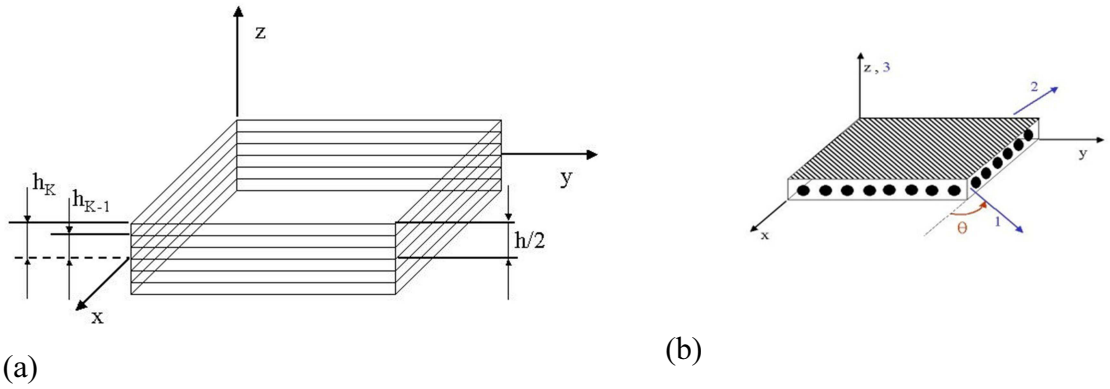


Figura 2-2 – (a) Laminado; (b) Lâmina ortotrópica: sistema global e local de coordenadas.

A combinação da rigidez de cada lâmina irá constituir, portanto a rigidez do laminado final, ou seja, a rigidez é função direta da orientação, tanto quanto da sequência de empilhamento das lâminas, segundo a Teoria Clássica de Laminados (TITA, 2006).

Considerando um elemento sólido como o apresentado na Figura 2-3, submetido ao tensor de tensões dado pela equação (1).

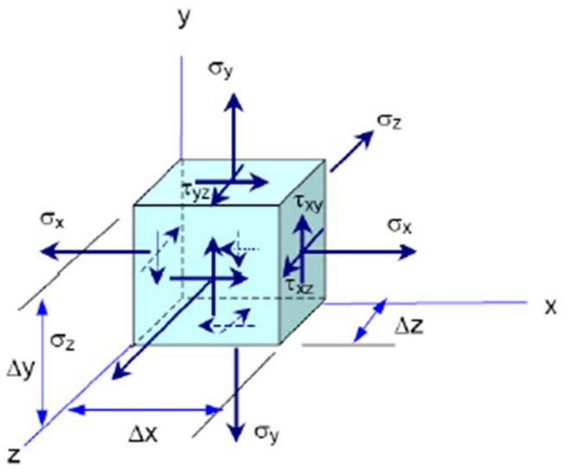


Figura 2-3 - Elemento Representativo de um sólido em Estado Triplo de Tensões.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{1}$$

Uma vez que a estrutura encontra-se em equilíbrio, as seguintes hipóteses são verdadeiras:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \end{aligned} \tag{2}$$

Desta forma, conclui-se que o tensor é simétrico, conforme sugere a equação (1) modificada, escrita na forma vetorial na equação (3):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \tag{3}$$

De forma análoga, as componentes do tensor de deformação podem ser escritas como:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_{yy} & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Assim, em posse das deformações e tensões, aplica-se a equação constitutiva, relacionando tanto tensão quanto deformação a partir da Lei de Hooke Generalizada, dada por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{32} & C_{42} & C_{52} & C_{62} \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & C_{43} & C_{53} & C_{63} \\ C_{41} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{54} & C_{64} \\ C_{51} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{65} \\ C_{61} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Considerando que a lâmina é um material ortotrópico sob o sistema de coordenadas local (1-2-3), tem-se que no caso de materiais ortotrópicos, a equação constitutiva acima pode ter suas componentes reduzidas na matriz “C”, de forma que apenas parte delas seja considerada, ou seja, nove das trinta e seis constantes elásticas. Isto pode ser realizado, uma vez que em materiais ortotrópicos não há acoplamento entre as tensões normais e deformações angulares, e vice – versa, desta forma a matriz constitutiva [C] pode ser reescrita como segue:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{32} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Com o propósito de escrever as deformações em função das tensões, a equação constitutiva (6) é reescrita em termos da matriz de flexibilidade [D]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & D_{32} & 0 & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{23} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Aplicando relações e conceitos fundamentais da Teoria de Elasticidade, tem-se que:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E_{11}}\left(\sigma_1 - \upsilon_{12}\left(\sigma_2 + \sigma_3\right)\right); \\ \gamma_{ij} &= \frac{1}{G_{ij}}\tau_{ij}; \\ \frac{\upsilon_{ij}}{E_i} &= \frac{\upsilon_{ji}}{E_j} \end{aligned} \tag{8}$$

Dessa forma, os termos da matriz de flexibilidade serão dados por:

$$
\begin{aligned}
&D_{11} = \frac{1}{E_{11}}; D_{21} = -\frac{\upsilon_{12}}{E_{11}}; D_{31} = -\frac{\upsilon_{13}}{E_{11}};\\
&D_{12} = -\frac{\upsilon_{21}}{E_{22}}; D_{22} = \frac{1}{E_{22}}\, D_{32} = -\frac{\upsilon_{23}}{E_{22}};\\
&D_{13} = -\frac{\upsilon_{13}}{E_{33}}; D_{23} = -\frac{\upsilon_{32}}{E_{33}}; D_{33} = -\frac{1}{E_{33}};\\
&D_{44} = \frac{1}{G_{23}}\, D_{55} = \frac{1}{G_{31}}; D_{66} = \frac{1}{G_{12}}
\end{aligned}
\tag{9}
$$

Calculando a inversa da matriz flexibilidade, tem-se que a equação constitutiva pode ser escrita em função das propriedades elásticas dos materiais:

$$
\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{32} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}
\tag{10}
$$

Conforme segue representado no conjunto de equações (11):

$$
\begin{aligned}
&C_{11} = \frac{E_{11}(1-\upsilon_{23}\upsilon_{32})}{\Delta}; C_{12} = \frac{E_{11}\left(\upsilon_{21}+\upsilon_{31}\upsilon_{23}\right)}{\Delta} = \frac{E_{22}\left(\upsilon_{12}+\upsilon_{32}\upsilon_{13}\right)}{\Delta};\\
&C_{13} = \frac{E_{11}\left(\upsilon_{31}+\upsilon_{21}\upsilon_{32}\right)}{\Delta} = \frac{E_{22}\left(\upsilon_{13}+\upsilon_{12}\upsilon_{23}\right)}{\Delta}; C_{22} = \frac{E_{22}(1-\upsilon_{31}\upsilon_{13})}{\Delta};\\
&C_{23} = \frac{E_{22}\left(\upsilon_{32}+\upsilon_{12}\upsilon_{31}\right)}{\Delta} = \frac{E_{33}\left(\upsilon_{23}+\upsilon_{21}\upsilon_{13}\right)}{\Delta}; C_{33} = \frac{E_{33}(1-\upsilon_{12}\upsilon_{21})}{\Delta};\\
&C_{44} = G_{23}; C_{55} = G_{13}; C_{66} = G_{12};\\
&\Delta = 1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}-\upsilon_{23}\upsilon_{32}-2\upsilon_{21}\upsilon_{32}\upsilon_{31}
\end{aligned}
\tag{11}
$$

Uma vez que as lâminas são delgadas, faz-se a hipótese de estado plano de tensões, de tal forma que as tensões “fora do plano” (normais ao plano 1-2) são muito menores do que as tensões atuantes no plano 1-2 (Figura 2-2(b)). Sendo assim, tem-se que:

$$\sigma_3 = 0; \sigma_{23} = \sigma_4 = 0; \sigma_{13} = \sigma_5 = 0 \tag{12}$$

A equação constitutiva (10) pode, portanto, ser reescrita na forma de um sistema de equações, conforme sugere o conjunto de equações (13):

$$\begin{aligned}
&\sigma_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 + C_{13}\varepsilon_3; \\
&\sigma_2 = C_{21}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2 + C_{23}\varepsilon_3; \\
&0 = C_{31}\varepsilon_1 + C_{32}\varepsilon_2 + C_{33}\varepsilon_3; \\
&\gamma_4 = \gamma_5 = 0; \\
&\sigma_6 = C_{66}\gamma_6;
\end{aligned} \tag{13}$$

Isolando a componente de deformação na direção 3, tem-se:

$$\begin{aligned}
&\sigma_1 = \left(C_{11} - \frac{C_{13}C_{31}}{C_{33}}\right)\varepsilon_1 + \left(C_{12} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}}\right)\varepsilon_2 = Q_{11}\varepsilon_1 + Q_{12}\varepsilon_2; \\
&\sigma_2 = \left(C_{12} - \frac{C_{23}C_{13}}{C_{33}}\right)\varepsilon_1 + \left(C_{22} - \frac{C_{23}C_{32}}{C_{33}}\right)\varepsilon_2 = Q_{12}\varepsilon_1 + Q_{22}\varepsilon_2; \\
&\sigma_6 = C_{66}\gamma_6 = Q_{66}\gamma_6;
\end{aligned} \tag{14}$$

Permitindo reescrever a equação constitutiva como segue:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \tag{15}$$

Onde os componentes da “matriz de rigidez” [Q] da lâmina são dados por:

$$
\begin{aligned}
Q_{11} &= \frac{E_{11}}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}} = \frac{E_{11}{}^{2}}{E_{11}-\upsilon_{12}{}^{2}E_{22}}; \\
Q_{22} &= \frac{E_{22}}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}} = \frac{E_{11}E_{22}}{E_{11}-\upsilon_{12}{}^{2}E_{22}}; \\
Q_{12} &= Q_{21} = \frac{\upsilon_{12}E_{22}}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}} = \frac{\upsilon_{12}E_{11}E_{22}}{E_{11}-\upsilon_{12}{}^{2}E_{22}}; \\
Q_{66} &= G_{12}
\end{aligned}
\tag{16}
$$

Ainda, na ampla maioria dos casos, o laminado é submetido a carregamentos que não estão orientados com os eixos de ortotropia de cada camada. Portanto, para a determinação das deformações das camadas, faz-se necessário transformar os eixos coordenados de cada lâmina, projetando dos de carregamento (sistema global de coordenadas) para os eixos de ortotropia (sistema local de coordenadas).

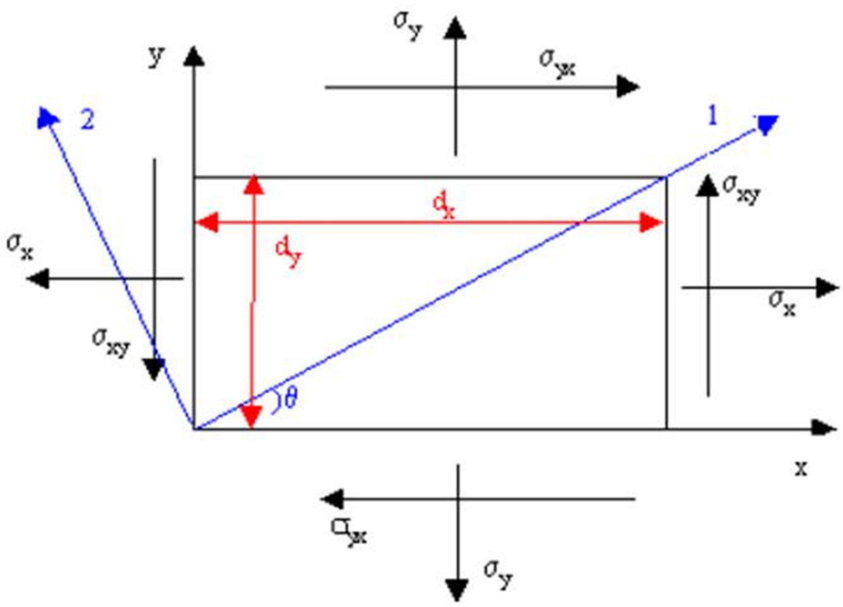


Figura 2-4 – Eixos do Carregamento e Eixos da Lamina.

Levando em consideração esta diferença de orientação, as seguintes transformações se fazem necessárias, por meio de uma matriz de transformação [T]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{Local} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{Global} \tag{17}$$

Nota-se que a matriz de transformação é função da orientação de cada camada:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & sen^2(\theta) & 2\cos(\theta)sen(\theta) \\ sen^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2\cos(\theta)sen(\theta) \\ -\cos(\theta)sen(\theta) & \cos(\theta)sen(\theta) & (\cos^2(\theta) - sen^2(\theta)) \end{bmatrix} \tag{18}$$

Com o propósito de simplificar o desenvolvimento da formulação, a matriz pode ser reescrita como segue:

$$[T] == \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \tag{19}$$

Onde:

$$\begin{aligned} m &= \cos(\theta) \\ n &= sen(\theta) \end{aligned} \tag{20}$$

De forma análoga, as deformações também podem ser reescritas em função da matriz de transformações, como segue:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dfrac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix}_{Local} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \dfrac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}_{Global} \tag{21}$$

Em termos do sistema global de coordenadas, a equação (15) pode ser reescrita como segue, sobrepondo, convenientemente por uma barra, os termos da matriz [Q] transformada:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{Global} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{21}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{61}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_{Global} \tag{22}$$

Ainda, de acordo com a equação (17), a equação (22) pode ser reescrita como sendo:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{Global} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{Local} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_{Local} \tag{23}$$

Multiplicando o nono termo da matriz constitutiva por 2 e dividindo a componente de deformação cisalhamento pelo mesmo valor, a equação (22) pode ser reescrita como segue:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{Global} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & 2Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dfrac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix}_{Local} \tag{24}$$

Portanto, para o sistema de coordenadas global tem-se:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{Global} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dfrac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix}_{Global} \tag{25}$$

Nota-se ainda que a partir da equação (24) e (21), a seguinte semelhança pode ser feita:

$$\begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{21}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{61}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \tag{26}$$

De onde se obtém as seguintes correlações, entre o sistema global e o sistema local de coordenadas:

$$\begin{aligned}
\overline{Q_{11}} &= m^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + n^4 Q_{22} \\
\overline{Q_{22}} &= n^4 + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + m^4 Q_{22} \\
\overline{Q_{12}} &= n^2 m^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + m^4 Q_{12} \\
\overline{Q_{16}} &= nm^3 (Q_{11} - Q_{12}) + n^3 m (Q_{12} - Q_{22}) - 2mn(m^2 - n^2) Q_{66} \\
\overline{Q_{26}} &= n^3 m (Q_{11} - Q_{12}) + nm^3 (Q_{12} - Q_{22}) - 2mn(m^2 - n^2) Q_{66} \\
\overline{Q_{66}} &= n^2 m^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) + (n^4 + m^4) Q_{66}
\end{aligned} \tag{27}$$

Além de proporcionar alterações nas propriedades elásticas do laminado, a orientação e a sequência de empilhamento das camadas deve influenciar diretamente na rigidez do laminado como um todo.

Considerando os esforços solicitantes atuantes numa placa laminada (Figura 2-5), pode-se obter os esforços de membrana [N] e os momentos aplicados [M] através das relações dadas pelas equações (29) e (30), respectivamente.

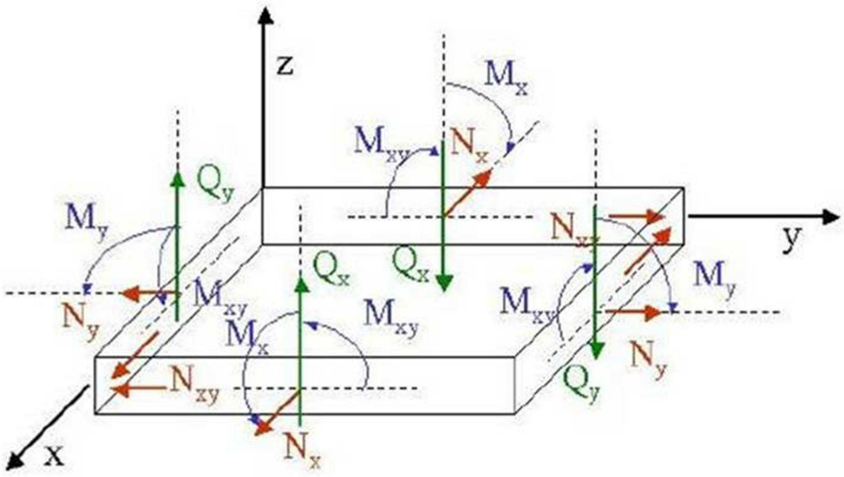


Figura 2-5 – Esforços solicitantes atuantes em uma placa laminada.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} dz \tag{29}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz \tag{30}$$

Considerando as seguintes hipóteses:

- ☑ O laminado é plano, e o plano médio que o divide ao meio está contido no plano xy;
- ☑ As lâminas estão perfeitamente aderidas entre si, não existindo deslocamento relativo entre as mesmas, permitindo-se uma continuidade dos deslocamentos;
- ☑ A interface entre a lâmina é muito fina e não deformável por cisalhamento;
- ☑ Para os laminados finos é empregada a teoria das aproximações cinemáticas de Kirchhoff.

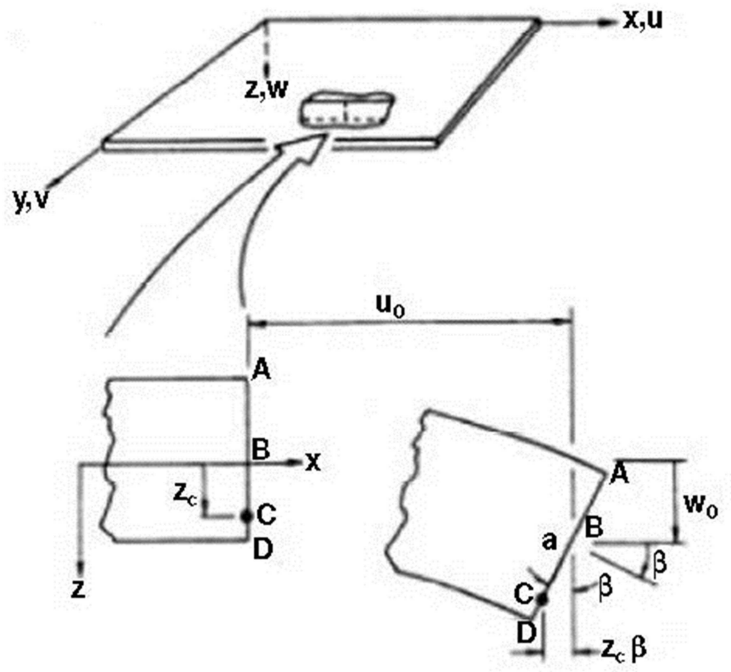


Figura 2-6 - Hipóteses Cinemáticas de Kirchhoff.

Com base nas hipóteses supracitadas e na Figura 2-6, tem-se que o deslocamento de um dado ponto C, pertencente ao laminado será dado por:

$$u_c = u_0 - z_c \beta$$
$$\beta = \frac{\partial W_0}{\partial x} \tag{31}$$

Portanto, os campos de deslocamentos u, v e w nas direções dos eixos coordenados, x, y, e z, respectivamente, são dados por:

$$u(x,y,z) = u_0(x,y) - z\frac{\partial W_0(x,y)}{\partial x}$$
$$v(x,y,z) = v_0(x,y) - z\frac{\partial W_0(x,y)}{\partial y} \tag{32}$$
$$w(x,y,z) = w_0(x,y)$$

E as respectivas deformações podem ser calculadas como segue:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x(x,y,z) &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = \varepsilon_{x0} + zK_x \\
\varepsilon_y(x,y,z) &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = \varepsilon_{y0} + zK_y \\
2\varepsilon_{xy}(x,y,z) &= \frac{\partial u_0}{\partial y} - \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = 2\varepsilon_{xy0} + zK_{xy}
\end{aligned} \tag{33}$$

De forma que o vetor de deformações possa ser escrito como segue na equação (34):

$$[\varepsilon]_{global} = [\varepsilon_0]_{global} + z[K]_{global} \tag{34}$$

Em posse das deformações e empregando, assim, a equação constitutiva discutida anteriormente, calcula-se o estado de tensões na lâmina, que pode ser escrito no sistema global de coordenadas conforme a equação (35):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k_{Global} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{21}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{61}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}^k \tag{35}$$

Substituindo (34) na equação (35), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k_{Global} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{21}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{61}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{bmatrix}_{Global} + z \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{21}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{61}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}_{Global} \tag{36}$$

A qual pode ser reescrita, para assumir a seguinte forma:

$$[\sigma]^k_{Global} = \left[\overline{Q}\right]^k_{Global} \left[[\varepsilon_0]_{Global} + z[K]_{Global}\right] \tag{37}$$

Substituindo (37) em (29) e (30), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^{n} \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left[\overline{Q}\right]_K \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{s0} \end{bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left[\overline{Q}\right]_K \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_s \end{bmatrix} z dz \right\} \\
\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^{n} \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left[\overline{Q}\right]_K \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{s0} \end{bmatrix} z dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left[\overline{Q}\right]_K \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_s \end{bmatrix} z^2 dz \right\}
\end{aligned} \tag{38}$$

Verifica-se que a matriz [Q] continua sendo constante para cada lâmina, uma vez que é função dos parâmetros elásticos dos materiais constituintes e da orientação das fibras. Da mesma forma, as deformações extensionais no plano médio [ε_0] e a curvatura [K] também permanecem constantes, permitindo que as seguintes equações possam ser escritas:

$$\begin{aligned}
[N] &= [A][\varepsilon_0] + [B][K] \\
[M] &= [B][\varepsilon_0] + [D][K]
\end{aligned} \tag{39}$$

Onde as matrizes [A], [B] e [D] representam, respectivamente, a rigidez de membrana, o acoplamento entre a rigidez de membrana e a flexo-torção, e a rigidez de flexo-torção, podendo ser escritas como evidencia o conjunto de equações (40):

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_{ij}}^{k} (z_k - z_{k-1})$$
$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_{ij}}^{k} (z_k^{\,2} - z_{k-1}^{\,2}) \qquad (40)$$
$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_{ij}}^{k} (z_k^{\,3} - z_{k-1}^{\,3})$$

Para concluir, a equação (39) pode ser reescrita na forma matricial, assumindo a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} [N] \\ [M] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\varepsilon_0] \\ [K] \end{bmatrix} \qquad (41)$$

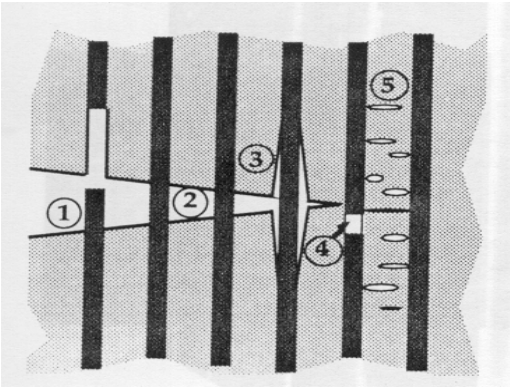
Torna-se claro, portanto, a influência não somente da orientação das lâminas, mas também de seu posicionamento dentro do laminado, ou seja, da sequência de empilhamento.

Como visto anteriormente, constata-se que os conceitos apresentados pela Teoria Clássica de Laminados permitem ao engenheiro maior autonomia no projeto de uma estrutura, de forma que estruturas fabricadas por um mesmo compósito podem apresentar diferentes tipos de rigidez e capacidade estrutural (VINSON e SIERAKOWSKI, 1986). No entanto, se por um lado é possível projetar a rigidez de uma estrutura em função do tipo de carregamento aplicado, por outro, é muito difícil prever o complexo processo de falha de uma estrutura laminada.

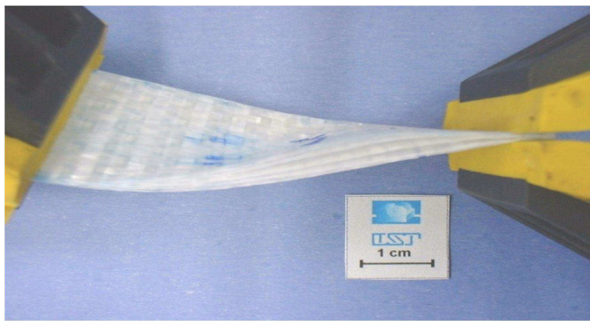
Tomando como exemplo as estruturas fabricadas em CPR, além dos fenômenos de instabilidade (flambagem local, flambagem global, *crippling*, etc.), dois tipos de fenômenos de falha são característicos:

- **Fenômenos Intralaminares:** ocorrem dentro das lâminas e corresponde a danos da matriz, da fibra ou da interface fibra-matriz (Figura 2-7).
- **Fenômenos Interlaminares:** ocorrem entre as lâminas e correspondem especificamente ao fenômeno conhecido por delaminação, caracterizado pela separação de duas lâminas adjacentes (Figura 2-7).

Segundo Anderson (1995), cinco mecanismos principais intralaminares de falha podem ser mencionados: (1) o *Pull Out*, (2) o *Fiber Bridging*, (3) a Decoesão, (4) a Fratura da Fibra e finalmente (5) a Danificação da Matriz (Figura 2-7a). Estes mecanismos podem ser detectados separadamente, ou como consequência de um único evento, por exemplo, em situações de impacto.



(a)



(b)

Figura 2-7 - Mecanismos de danificação / falha em CPR: (a) danificações intralaminares (ANDERSON, 1995); (b) falhas interlaminares (TITA, 2003).

De forma geral, estudos demonstram que o mecanismo de falha dos compósitos laminados se assemelha ao dos materiais metálicos no que diz respeito à sua evolução. Ou seja, assim como nos metais, as falhas em materiais compósitos se iniciam a partir de pequenos danos intralaminares, que ao progredirem se tornam visíveis e passam a ser caracterizados como falhas interlaminares, dentre as quais podem ser mencionadas as delaminações (Figura 2-7b).

Segundo Matthews e Rawlings (1994), a falha de uma estrutura em CPR ocorre no momento em que a mesma não satisfaz a função para o qual foi projetada, sendo assim, conclui-se que uma vez não sendo capaz de suportar as tensões de projeto, ou até mesmo antes disso, muito possivelmente haverá alguma mudança significativa nos parâmetros de rigidez, conforme previamente detalhado nas equações de (1) a (41). Estas mudanças podem ser, portanto, detectáveis, e baseados na severidade da alteração, as mesmas poder ser adotadas como sinal de que a estrutura aeronáutica fabricada em material compósito requer inspeções. No entanto, prever essas inspeções com precisão é algo extremamente complicado, devido à complexidade do processo de falha comentado anteriormente. Em sendo assim, a estratégia do monitoramento da estrutura passa a ser uma alternativa muito atrativa para o segmento aeronáutico.

2.1.2. UNIÕES COLADAS: TEORIAS DE ADESÃO, PROJETO E FABRICAÇÃO.

Segundo Messler (2004), as forças de superfícies são responsáveis por manter os aderentes unidos. Numa união híbrida colada, estas forças são provenientes de uma ou mais fontes promotoras de união, as quais em grande parte são químicas, mas ainda assim diretamente proporcionais à qualidade do inter-travamento mecânico e da quantidade de carga eletrostática presente entre as partes. Em outras palavras, a qualidade da colagem depende da quantidade de energia livre na superfície, resultado de uma superfície limpa, quimicamente ativa e com rugosidade dentro de parâmetros ótimos, de forma a permitir a formação de interações físicas e químicas entre o aderente e o adesivo. Desta forma, evitam-se possíveis danos a serem causados pela deterioração da união quando exposta em operação. À combinação destas forças designa-se como adesão.

Sobre Teorias de Adesão

É importante observar na literatura consultada a ressalva quanto à necessidade de se preparar adequadamente uma superfície para se obter bons resultados do processo de colagem. Diversos autores afirmam que não bastam apenas bons materiais, mas sim a limpeza do substrato com solventes e aderência ao processo de cura da resina para se obter sucesso na fabricação de uma união colada (MAXWELL e BOND, 1999), principalmente, quando uma junta é exposta a ambientes quentes e úmidos de operação.

As forças que regem o comportamento de uma união colada podem ser de forma geral divididas em dois tipos: (a) Forças de Coesão, responsáveis por manter tanto adesivo quanto aderentes coesos, suportando principalmente as cargas internas; (b) Forças de Adesão, que regem o tipo de interação na interface entre o adesivo e o aderente (PETRIE, 2000).

As forças de coesão, por serem responsáveis pela resistência mecânica dos adesivos e aderentes, em muitos casos podem ser pouco alteradas, ou seja, é uma característica típica dos materiais escolhidos para compor a junção e, muitas vezes são utilizadas como referência para o cálculo da junta, ou seja, o valor limite de resistência mecânica. Por outro lado, as forças de adesão podem ser manipuladas e melhoradas com a aplicação de técnicas, principalmente, através do emprego das técnicas de preparação de superfícies. Deve-se destacar que as forças de adesão são controladas basicamente por forças moleculares de *van der Waals*, bem como ligações metálicas, ligações covalentes entre outras. Em se tratando de polímeros, as mais

importantes são as forças *van der Waals* e as forças secundárias, ou seja, as forças devido às pontes de hidrogênio, ligações polares e dispersões (PETRIE, 2000).

Diante do que foi exposto, conclui-se que a capacidade de uma junta em suportar cargas é resultado da composição de diferentes forças, que coexistem na interface entre o aderente e o adesivo. Portanto, não se pode afirmar que existe apenas uma teoria para descrever a capacidade de carga da junta, mas sim um conjunto de teorias, tais como: (a) Teoria de Adsorção; (b) Teoria de Travamento Mecânico; (c) Teoria de Difusão; (d) Teoria de Interação Eletrostática; (e) Teoria das Camadas Fracas. Ainda, dentre as teorias citadas, pode-se mencionar que nem todas poderão explicar o comportamento de todas as uniões existentes. Sendo que a presença ou não destas forças está diretamente relacionada ao tipo de material, que compõem a junta (BALDAN, 2004). De maneira geral, com o propósito de atender às necessidades deste trabalho, haverá uma descrição mais detalhada das quatro primeiras teorias supracitadas.

Em se tratando da Teoria de Adsorção, tem-se que as forças de adsorção resultam da interação entre as forças moleculares de duas superfícies, por isso é importante que a distância entre estas partes seja mantida tão mínima quanto possível. Esta necessidade evidencia, assim, que para se obter maior e melhor contato entre as superfícies, faz-se necessário que as energias de superfície do adesivo e aderente sejam compatíveis, ou seja, apresentem relativa diferenciação. A forma mais comumente empregada para se garantir o melhor contato entre o adesivo e o aderente está em proporcionar um tipo de compatibilidade, na qual a superfície do aderente tenha energia superficial maior do que aquele presente na superfície livre do adesivo. Este tipo de configuração deve permitir ao adesivo melhor escoamento e, consequentemente, melhor contato com as superfícies dos aderentes (PETRIE, 2000). Esta é a razão pela qual a recomendação de limpeza, condição fundamental para o processo de colagem, deve ser fortemente considerada durante as etapas de preparação.

A presença de "gorduras" na superfície do aderente reduz sua energia superficial e, consequentemente, compromete o contato ideal entre aderente e adesivo. Durante o processo de colagem, com o acréscimo da temperatura, é muito comum se observar uma queda drástica no coeficiente de viscosidade do adesivo. Esta queda proposital, aliada à presença de uma superfície com elevada energia superficial permite que o processo de molhagem do aderente ocorra de forma bastante eficiente e, consequentemente, proporcione o contato mais íntimo possível entre suas superfícies. Cada superfície apresenta diferentes valores de tensão superficial desde aquela com reduzido contato, àquela com elevado contato superficial,

dependendo, fundamentalmente, da relação de diferença entre a energia livre do aderente e do adesivo (Tabela 2-1).

Embora comumente disponíveis na condição sólida ou semissólida ("pastosa"), filmes adesivos têm suas propriedades físicas rapidamente alteradas quando expostos ao calor, principalmente, a viscosidade e a energia superficial. Ao ficarem expostas ao calor, as resinas poliméricas geralmente apresentam queda acentuada e temporária de viscosidade e energia superficial. Durante este intervalo, em virtude desta mudança de propriedades, a resina flui tanto para dentro de cavidades como se sobrepõem de forma mais eficiente sobre os picos existentes na superfície microscópica do aderente.

Tabela 2-1 - Valores típicos de Tensão Superficial - Adaptado de (PETRIE, 2000).

Tensão Superficial Crítica comum para Sólidos e Líquidos			
Material	**Tensão Superficial (mN/m)**	**Material**	**Tensão Superficial (mN/m)**
Acetal	47	Silicone	24
Celulose	45	Cobre	1000
Epóxi	47	Resina Epóxi	47
Fluoretileno	16	Alumínio	500
Poliamida	46	Óleo de Silicone	21
Policarbonato	46	Óleo Mineral	29
Polietileno	31	Água	73

É interessante comentar, neste ponto, uma das razões pela qual o processo de colagem requer a presença de rampas de aquecimento controladas, ou patamares intermediários de cura. Como previamente mencionado, a resina tem o seu coeficiente de viscosidade fortemente modificado à medida que a temperatura é elevada, ou seja, esses artifícios de processo são usados para que a resina tenha uma quantidade mínima de tempo para fluir e, se acomodar de forma mais homogênea e delgada possível sobre as superfícies dos aderentes. A redução abrupta da viscosidade e, consequentemente, da energia superficial do adesivo, associada à elevada energia livre das superfícies do aderente estão diretamente vinculadas à forma como a resina polimérica recobrirá a superfície (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005) (Figura 2-8).

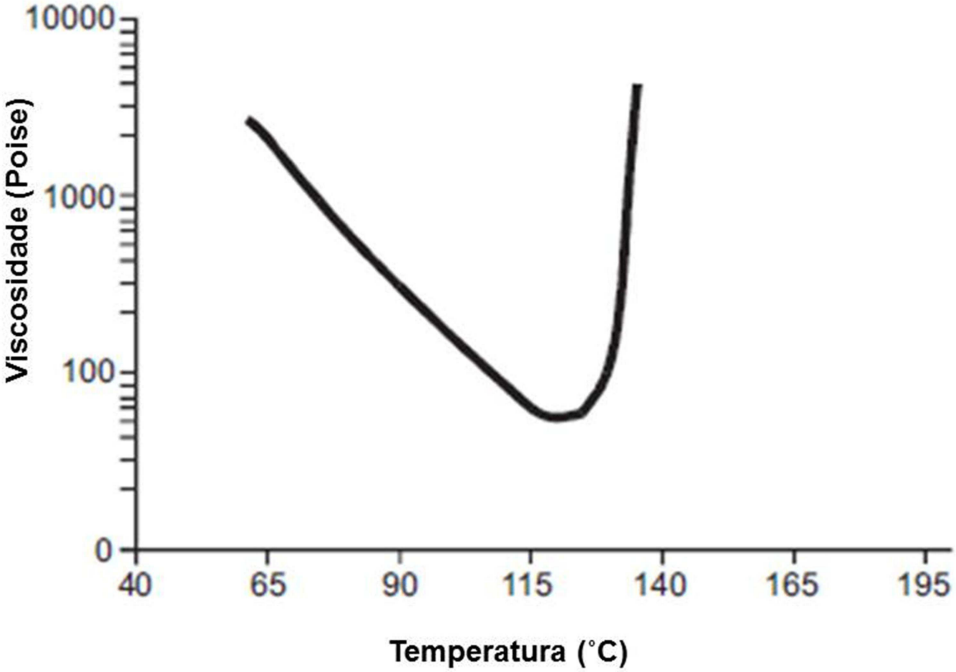


Figura 2-8 - Reologia da resina Hexcel 913.

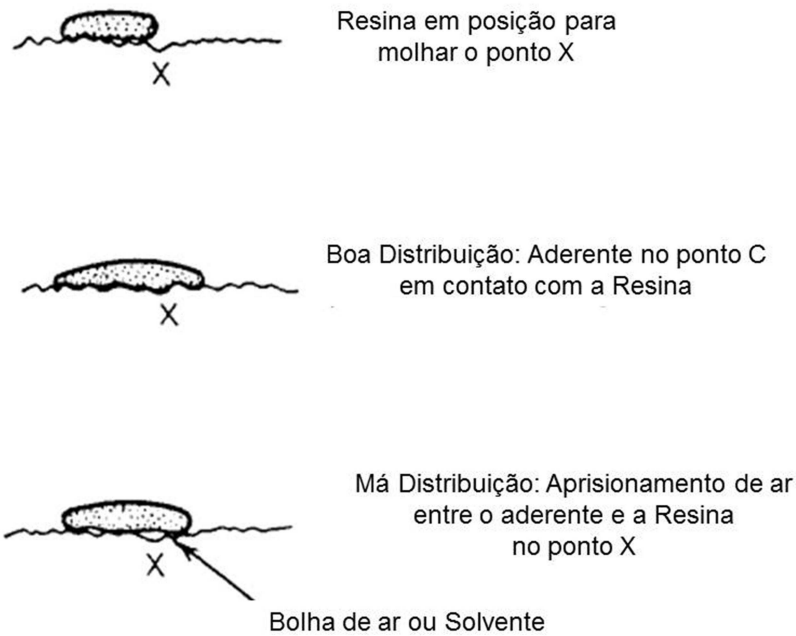


Figura 2-9 - Ilustração de diferentes condições de fluência de resina sobre uma superfície (PETRIE, 2000).

Ressalta-se que para o caso da colagem proposta neste trabalho, tem-se como substratos um material metálico, um material compósito e a resina epóxi.

Em se tratando da Teoria de Travamento Mecânico, as forças, que coexistem numa junta colada, estão vinculadas de alguma forma ao travamento mecânico das superfícies. Ainda

que visualmente as superfícies tenham boa qualidade superficial e, não apresentem rugosidade suficiente para se travarem umas as outras, microscopicamente estas apresentam picos e vales, que devem ser preenchidos pelo adesivo no momento em que sua viscosidade decai durante o processo de cura. O preenchimento destas irregularidades garante maior contato entre as superfícies do aderente e adesivo, removendo assim, bolsas de ar e proporcionando, maior interação de energia entre as superfícies em contato (PETRIE, 2000). Além disso, aliado ao fato de que a resina se polimeriza e endurece ao longo do processo de cura, dentro das cavidades e sobre os picos da superfície, observa-se que o adesivo passa a cumprir com o papel de transferir cargas de cisalhamento, ou seja, cargas aplicadas paralelamente à superfície. Portanto, o travamento mecânico existente na junta faz com que as cargas de cisalhamento sejam suportadas pelo adesivo, quando a junta é submetida às condições de operação. Essas cargas podem deformar plasticamente o adesivo, aumentando consideravelmente a sua capacidade de suportar cargas.

Como foi relatado, numa junta colada, o adesivo está intrinsecamente ligado às interfaces por meio dos picos e vales, ou seja, a força de separação das interfaces, geralmente paralela à linha de colagem, é contida pela interação entre o adesivo e as irregularidades da superfície do aderente. Outra característica importante a ser mencionada, refere-se à capacidade das juntas coladas em suportar a propagação de trincas. Tal capacidade está baseada no fato de que uma superfície sem rugosidades apresenta pouca resistência à separação, enquanto que por outro lado, as superfícies rugosas requerem maior quantidade de energia para serem separadas (Figura 2-10).

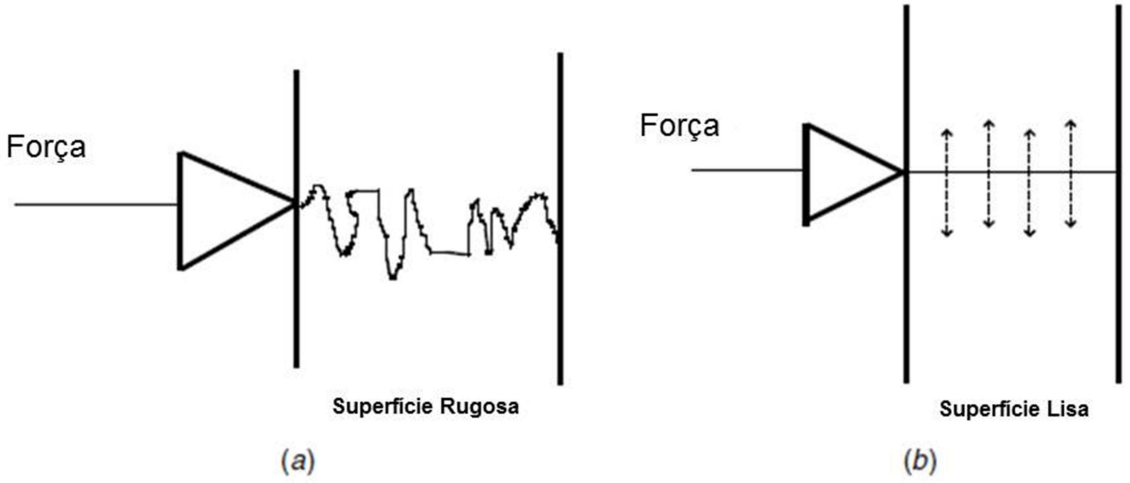


Figura 2-10 - Exemplo de duas superfícies que apresentam diferentes configurações de rugosidade; (a) superfície rugosa e complexidade no processo de separação; (b) superfície lisa e facilidade do processo de separação.

Com base nas informações mencionadas, pode-se, portanto, interpretar que existe uma relação direta entre a qualidade da colagem e alguns parâmetros geométricos dos aderentes. Dentre os quais, destacam-se: aumento da eficiência na colagem e maior rugosidade das superfícies do aderente (superfícies mais rugosas apresentam maior quantidade de irregularidades e, por conseguinte maior densidade de contato); aumento da área de contato através da extensão da sobreposição da junta – o *overlap* – tendo em vista que quanto maior o *overlap* maior será a quantidade de travamentos mecânicos entre as superfícies.

Ainda que à primeira vista pareça haver uma relação direta infinita entre os referidos parâmetros e a qualidade da junta, é importante notar que valores ótimos podem ser obtidos pela ponderação destes parâmetros na busca por juntas melhores (PETRIE, 2000). Vale lembrar que as juntas coladas são basicamente formadas por forças de *van der Waals*, ou seja, sua influencia é restrita a uma camada consideravelmente próxima à superfície, o que permite concluir que superfícies com rugosidade excessiva são comprometidas, assim como as ligações químicas também serão. Outro fator importante a ser mencionado é que a contribuição do travamento mecânico para o comportamento da junta é em geral menor do que as contribuições oriundas de forças químicas e elétricas (BALDAN, 2004), quando existentes.

Em se tratando da Teoria de Interação Eletrostática, ainda que as forças de interação eletrostática tenham pouca influência na colagem de estruturas metálicas, uma vez que um potencial elétrico dificilmente é mantido em substratos metálicos com a mesma eficiência que em materiais isolantes, tem-se que as mesmas merecem ser comentadas (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). Esta teoria baseia-se no fato de que durante o processo de colagem os materiais da junta podem induzir cargas elétricas em suas interfaces, graças a diferenças de eletronegatividade existente entre as mesmas (Figura 2-11).

Grande parte das forças de atração é classificada como interações do tipo dipolo, e por esta razão tem maior relevância em junções de materiais isolantes como polímeros. Nota-se que a escolha adequada de materiais tem considerável papel na obtenção de forças elétricas, que venham contribuir com a capacidade de suportar carregamentos da junta (Figura 2-11). A prova de que diferentes cargas elétricas existem entre estas superfícies é mencionada por diferentes autores, que notaram a presença de faíscas durante o processo de separação entre aderente e adesivo, realizadas em ambientes com pouca luminosidade (BALDAN, 2004) (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). A observação de que cargas diferentes coexistem, permite concluir que há interação eletrostática entre as superfícies, e a intensidade de sua força deve depender da densidade de carga eletrostática existente nas interfaces (MESSLER, 2004).

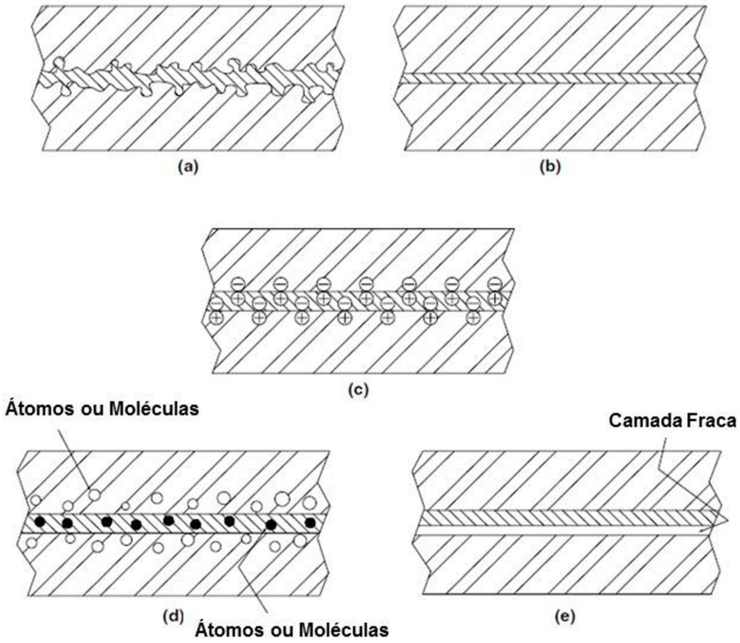


Figura 2-11 - Diferentes tipos de Interação numa Junta (MESSLER, 2004): (a) Travamento Mecânico; (b) Adesão (c) Forças Eletrostáticas; (d) Difusão; (e) Teoria das Camadas Fracas.

Finalmente, em se tratando da Teoria de Difusão, tem-se que a difusão é capaz de proporcionar aumento da capacidade da junta entre elementos, que tenham ligações químicas compatíveis, como por exemplo: polímeros. Esta teoria se baseia no fato de que as cadeias poliméricas dos aderentes e adesivos, quando colocadas em contato, formam uma camada de difusão, ou miscigenação entre as moléculas dos materiais constituintes. A adesão entre as moléculas é conhecida como *autoadhesion*, e depende fundamentalmente, da compatibilidade química de seus constituintes, mas também de outros fatores, tais como: temperatura, peso molecular e grau de polimerização (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). Sendo assim, pode-se classificar a difusão em três categorias de velocidade: 1) difusão lenta; 2) difusão de estado sólido (na qual se faz o uso de um adesivo sólido) e 3) difusão rápida (na qual geralmente há a presença de um solvente para o aderente) (MESSLER, 2004). Como mencionado, este tipo de teoria não tem ampla aplicabilidade para substratos metálicos, mas pode ter contribuição significativa na colagem de substratos poliméricos, em que o adesivo geralmente contém algum tipo de solvente para as superfícies aderentes. Um tipo comum de colagem por difusão é aquela usada em emendas nos sistemas de proteção contra formação de

gelo presentes nos bordos de ataque das asas e empenagens da aeronave, por exemplo: EMBRAER ERJ120 – Brasília.

Sobre Projetos de Juntas Coladas

Conforme fora previamente comentado, não existem formas viáveis técnica ou economicamente disponíveis para serem empregadas na construção de uma aeronave como sendo uma única parte. Além disso, tão pouco, não há materiais capazes de atender todas as particularidades de um projeto aeronáutico. Consequentemente, montagens serão necessárias, não somente nas linhas de produção, como também, durante a incorporação de um reparo (Figura 2-12).

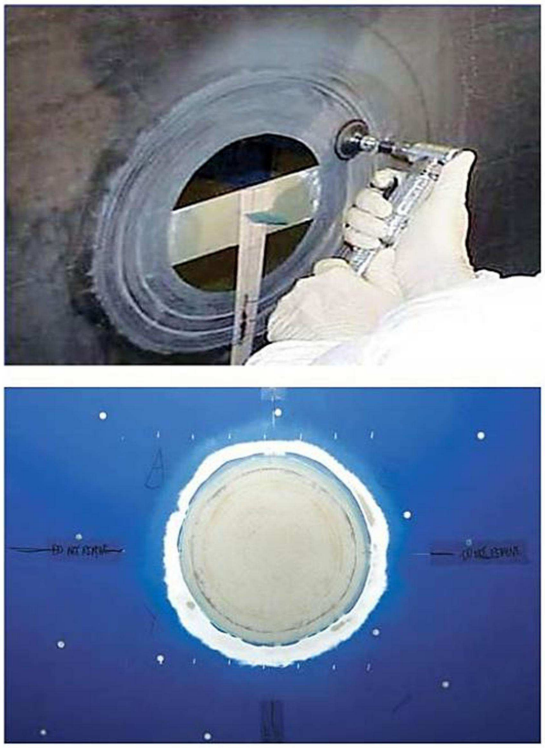


Figura 2-12 - Típica Solução de reparo para uma estrutura fabricada em CPR (WHITE, 2009).

Montagens requerem necessariamente o projeto e a fabricação de uniões, para permitir a transferência de cargas entre partes diferentes. Com o propósito de atender tal necessidade, da forma mais eficiente possível, atualmente, pode-se contar com diferentes tipos de uniões coladas, dentre as quais podem ser mencionadas: 1)Colagens não estruturais, onde o papel

principal do adesivo é qualquer outro, que não seja a transferência de carga dos ciclos de voo; 2)Colagens estruturais, em que a transferência de carga é tratada como a função primordial do adesivo. Neste segundo tipo, o dimensionamento torna-se extremamente estratégico. Diante disso, Ribeiro (2009), empregando equacionamentos de uniões duplas e simples, desenvolveu um *software* de análise de juntas (*SAJ*®), que é capaz de calcular juntas híbridas ou não. Deve-se destacar que os resultados obtidos pelo *SAJ*® ficaram muito próximos aos obtidos via MEF (Método dos Elementos Finitos), bem como a resultados calculados pelo programa ESACOM™ (MORTENSEN, 1998). De forma geral, tanto os equacionamentos utilizados por Mortesen (1998) como por Ribeiro (2009) levam em consideração parâmetros geométricos, condições de contorno e características do carregamento para o cálculo das tensões atuantes na área de transferência de carga (região de sobreposição ou *overlap*), a qual pode consistir de uma zona plástica e uma zona elástica, conforme mostrado pela Figura 2-13. Todavia, empregando um equacionamento mais simplificado do que o proposto por Ribeiro (2009) e, baseando-se num modelo elasto-plástico, estima-se a máxima carga (P) suportada por uma junta simples através da seguinte equação:

$$P = 2\sqrt{t_a E t \tau_p \frac{\gamma_e}{2} + \gamma_p} \tag{42}$$

onde $t_a, E, t, \tau_p, \gamma_e$ e γ_p são respectivamente: a espessura do adesivo, o módulo de elasticidade do adesivo, a espessura do aderente, a tensão de escoamento do adesivo, a deformação elástica e a deformação plástica do adesivo.

Ainda, para garantir que a união não atue no regime plástico, sugere-se estimar o comprimento de *overlap* de acordo com a equação (43). Neste caso, então, contabiliza-se efeitos visco elásticos como o de fluência, que podem danificar a junta mesmo quando esta é submetida a cargas inferiores à tensão de escoamento do adesivo (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005).

$$L = \frac{Ee_u t}{\tau_p} + \frac{4}{\beta}$$
$$\beta = \left(\frac{2G_A}{t_A E t} \right) \tag{43}$$

onde $E, e_u, \tau_p, G_A, t, t_a$ são respectivamente: o módulo de elasticidade do adesivo, a máxima deformação requerida; a tensão de escoamento do adesivo; o módulo de elasticidade ao cisalhamento do adesivo; a espessura dos aderentes e do adesivo.

Rotineiramente o comprimento do *overlap* estimado ainda é corrigido por um fator de segurança igual a 2 (dois), com o propósito de compensar defeitos existentes na linha de colagem, como por exemplo, porosidades (TRABOCCO, DONELLAN e WILLIAMS, 1988).

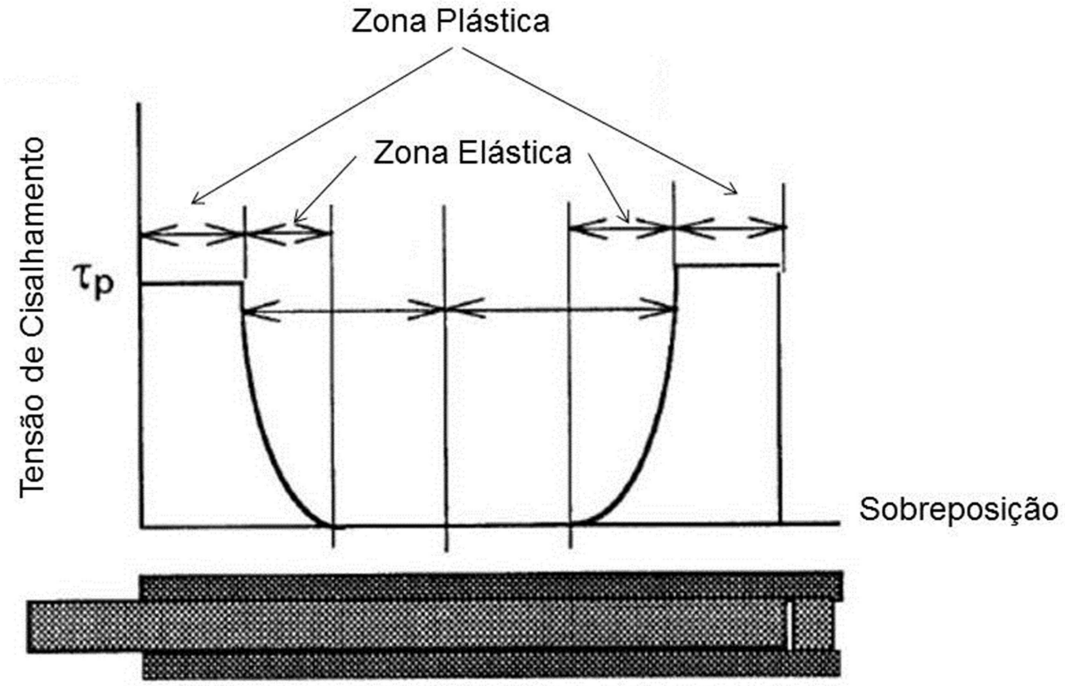


Figura 2-13 - Descrição da Zona de Transferência de Carga (MAXWELL e BOND, 1999).

Além do conhecimento a respeito da extensão mínima necessária para a transferência de carga (comprimento de *overlap*), é importante notar que as uniões construídas com adesivos devem ter suas características geométricas projetadas de forma que a junta adesiva seja primordialmente solicitada em cisalhamento. Assim, as tensões de tração devem ser reduzidas

ao mínimo possível. Algumas técnicas de projeto podem ser usadas para promover o melhor tipo de solicitação da junta, evitando que a mesma seja solicitada por tensão trativa, e sim por tensão de cisalhamento (Figura 2-14).

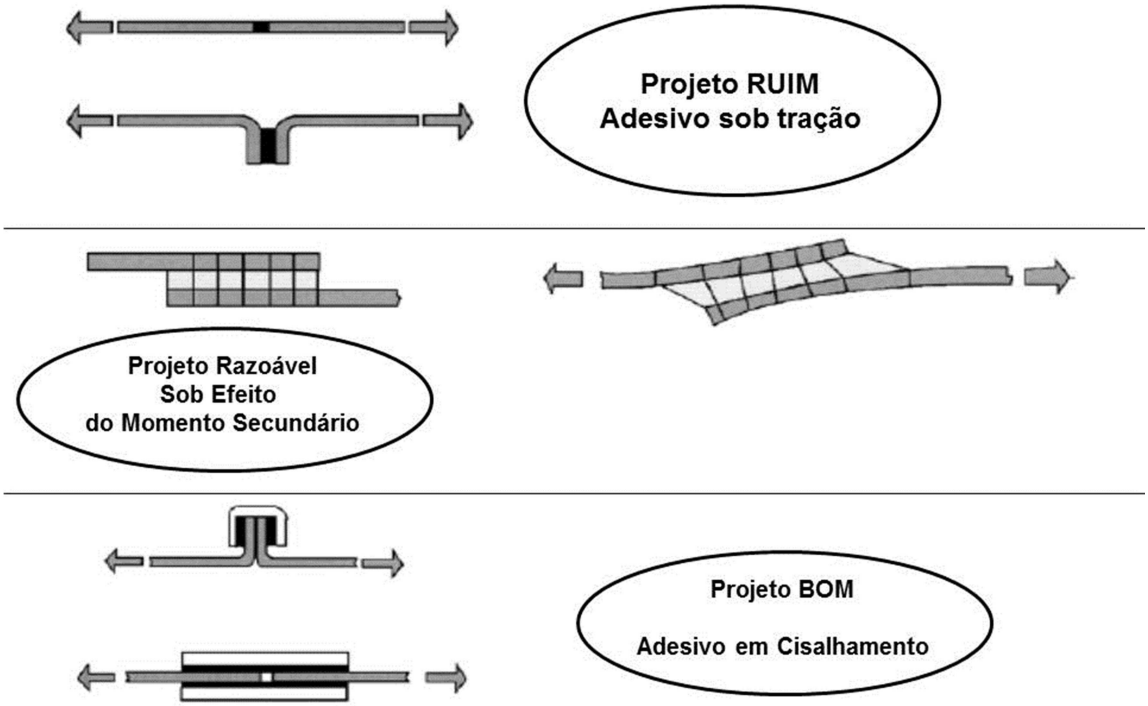


Figura 2-14 – Sugestão de boas práticas para fabricação de Juntas.

De acordo com Maxwell e Bond (1999), uma união estrutural colada deve ser dimensionada de tal forma que a falha ocorra numa região suficientemente longe da área de transferência de carga, ou seja, fora da região de sobreposição dos aderentes. O uso desta filosofia facilita o dimensionamento, mas por outro lado subestima a capacidade estrutural da junta, uma vez que o adesivo, que promove a união, deve ser solicitado sob tensões consideravelmente menores do que as suas tensões de escoamento. Além disso, a tensão no adesivo pode variar consideravelmente, dependendo do tipo de configuração da junta, das quais podem ser citadas: sobreposta simples; sobreposta dupla; escalonada; chanfrada (Figura 2-15).

Por ser solicitado por tensões consideravelmente reduzidas, o filme adesivo usado nas juntas coladas apresenta excelente comportamento quando submetido a carregamentos cíclicos. Portanto, segundo HART (1998), se as recomendações anteriores forem seguidas, não se notará crescimento de trincas ou danos na região de transferência de carga. Dessa forma, caso isto se verifique, a falha ocorrerá nos aderentes, tornando a união mais resistente do que a própria

estrutura. Assim, uma vez que os efeitos de fadiga são minimizados com a remoção de entalhes, verifica-se que as uniões coladas apresentam resultados superiores às uniões cravadas.

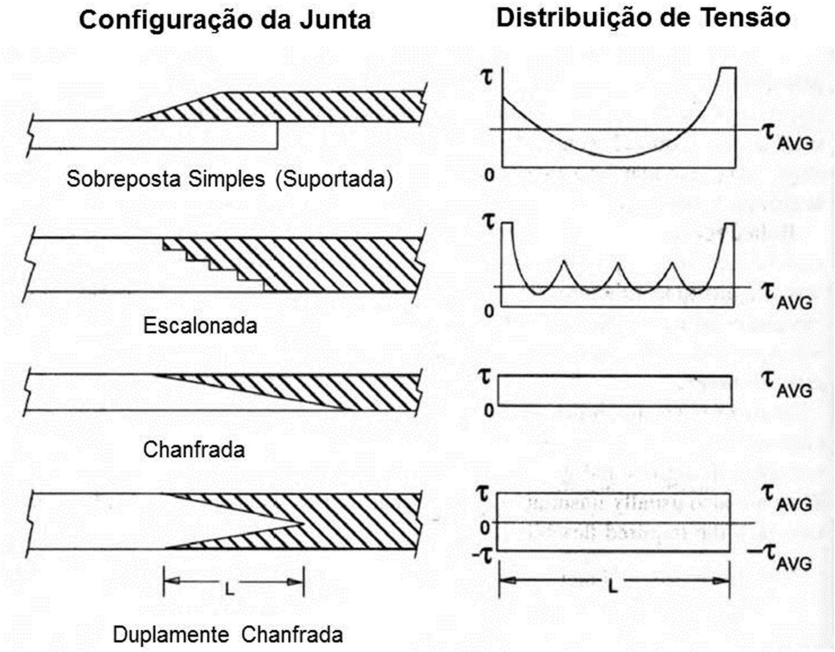


Figura 2-15 - Distribuição de Tensão na Junta em Função da Geometria de Construção (BAKER, DUTTON e KELLY, 2004).

A superioridade das uniões coladas, quando comparadas com suas equivalentes cravadas, pode ser observada quando são analisados os seguintes critérios:

- **FADIGA:** o melhor comportamento da união colada quanto à fadiga ocorre em razão das melhores condições dadas para a transferência das cargas nela atuantes, uma vez que não há entalhes severos (Figura 2-15). Além disso, por apresentar melhor distribuição das cargas, há menor concentração de tensão e, consequentemente, melhor comportamento quando solicitadas ciclicamente. Segundo Maxwell e Bond (1999), com base em idênticos corpos de prova, uniões cravadas produziram 93 falhas quando submetidas a 75.000 ciclos, enquanto que uniões coladas apresentaram apenas nove falhas, registradas nas regiões próximas à fixação dos dispositivos de teste e, nunca na união.
- **CARGA:** as uniões coladas apresentam melhor capacidade de transferir cargas do que suas equivalentes cravadas. A área de transferência de carga é maior e,

distribuída por toda a área unida, enquanto que nas uniões cravadas, há pontos discretos dentro da região de transferência.

- **PESO:** pode-se notar facilmente que as uniões coladas são mais leves, uma vez que não faz uso de fixadores.
- **MANUFATURA:** A fabricação de juntas cravadas, principalmente em estruturas de material compósito, pode ser consideravelmente complexa, em razão principalmente da rigidez elevada, que faz com que estruturas em material compósito não se deformem tanto nas redondezas dos furos à medida que a carga é aplicada (fenômeno de *bearing*). Portanto, se não houver distribuição correta dos fixadores, haverá sobrecargas localizadas e, isso pode ser comprometedor. Em sendo assim, juntas cravadas envolvendo materiais compósitos requerem o emprego de fixadores mais custosos, bem como maior cuidado no posicionamento dos furos.

Tabela 2-2 - Vantagens e Desvantagens no uso de Juntas Coladas;

Vantagens de Estruturas Coladas em Comparação com Estruturas Cravadas	
Vantagens	Desvantagens
Alta capacidade de suportar carga	Sensibilidade ao momento secundário
Reduzido fator de concentração de tensão	Cálculo complexo
Possível de ser usada em superfícies delgadas	Requer preparação superficial cuidadosa
Causa pouca ou nenhuma alteração química do aderente	Requer processo de fabricação com rígido controle de processamento
Capaz de unir materiais semelhantes ou não	Processos de cura com elevados tempos de processamento
Garante pouca abertura para acúmulo de detritos entre as partes unidades, auto-selante	Requer uso de técnicas de inspeção não destrutivas especiais para detecção de danos.
Isola térmica e eletricamente	Reparo de juntas defeituosas não é rápido
Minimiza ou previne a corrosão galvânica na união entre materiais dissimilares	Temperatura de serviço limitada
Excelente resistência à fadiga	Vida da junta é sensível ao ambiente de operação
Amortece vibrações mecânicas	Sensibilidade ao ataque de solventes
Provê elevada razão resistência / peso	Há resinas (adesivos) sensíveis ao ataque de bactérias
Montagem rápida e menos custosa	

Embora inúmeras vantagens sejam mencionadas, é importante destacar que as uniões coladas ainda não são as uniões preferencialmente aceitas e utilizadas na indústria aeronáutica. Tal fato se deve principalmente à falta de confiabilidade e repetitividade dos resultados encontrados em laboratório, quando as mesmas são expostas às condições de uso em serviço. Nas condições de operação, tem-se que a deterioração do adesivo, seguida do processo de degradação dos aderentes, muitas vezes como resultado de má preparação superficial são fatores, que podem explicar a falta de durabilidade das uniões coladas.

Cabe ainda ressaltar que para fins de certificação aeronáutica de um reparo colado, em estrutura de material compósito, há formas bastante conservadoras de abordar o processo. Isto ocorre em razão da necessidade do componente ser capaz de suportar cargas limites com uma margem de segurança de 20% sem o reparo (DAVIS e BOND, 2000). Em outras palavras, para que um componente possa ser certificado como reparável, o mesmo deve possuir uma carga admissível de no mínimo 1,2 vezes maior do que a carga atuante na condição limite sem qualquer reparo. Isso permite concluir que o reparo é aplicado apenas para reestabelecer a resistência residual do componente, fazendo com que o mesmo suporte a carga "última", ou seja, a carga de ruptura (BAKER, ROSE e JONES, 2002) (BAKER, 1999).

Sobre Processos de Fabricação de Juntas Coladas

Esta subseção se dedica à descrição detalhada do processo de colagem, de forma a subsidiar tanto a preparação do processo, como a seleção de parâmetros, que sejam de interesse para análises futuras.

O MIL-HDBK-17-3F (2002) provê um modelo para o processo de colagem de acordo com o diagrama da Figura 2-16. Nota-se, portanto, a presença de diferentes parâmetros de processo, bem como resultados que surgem da combinação das estratégias adotadas. Assim, para que o resultado da colagem se consolide dentro das tolerâncias sugeridas, é importante mencionar e relembrar as teorias que descrevem a interação entre as superfícies dos aderentes e adesivos.

As teorias são, portanto, responsáveis por proporcionar estimativas de qual e quão intensa serão as contribuições de cada mecanismo de adesão, partindo do princípio de que as superfícies estejam tão bem preparadas quanto possível pelas seguintes operações: (a) remoção de contaminante; (b) exposição de uma camada ativa do aderente; (c) modificação da superfície

pelo uso de diferentes tipos de técnicas (abrasão; *pasa-jell*; ataque químico por ácido fluorídrico; jateamento; alodine (conversão química); anodização crômica; anodização sulfúrica) (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005).

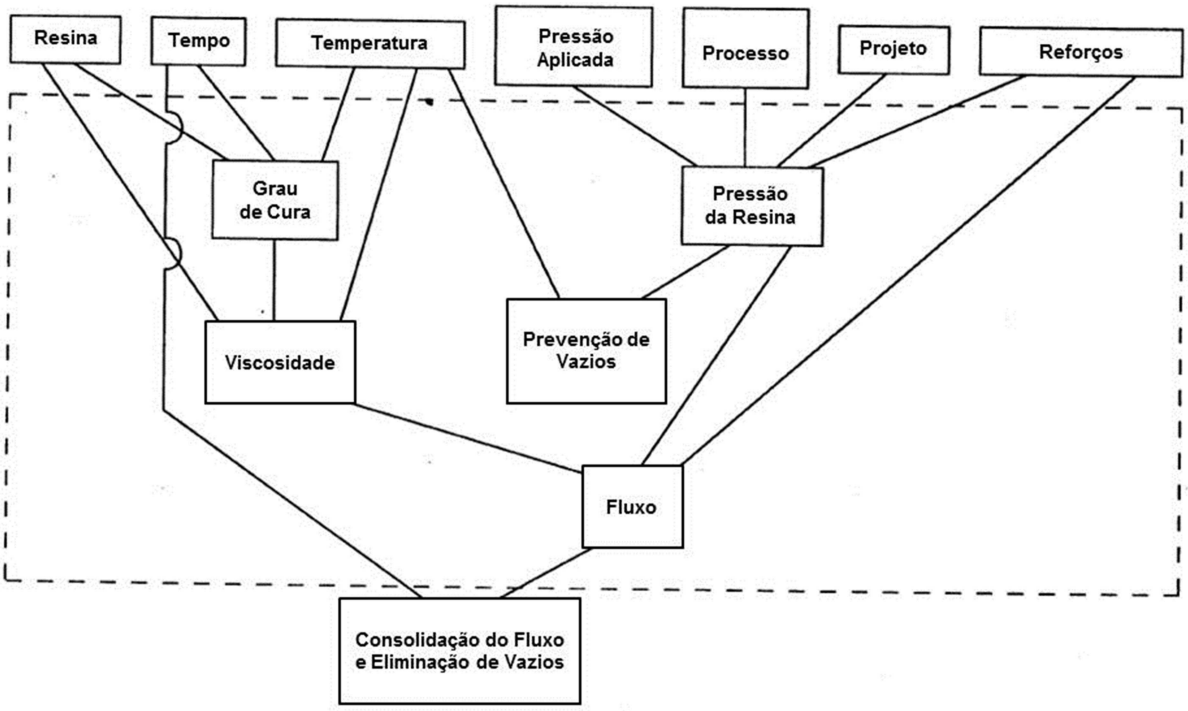


Figura 2-16 - Modelo do Processo de Colagem (MIL-HDBK-17-3F, 2002).

De acordo com Smith e Hutapea (2007), em se tratando da qualidade da colagem, os resultados obtidos pelo uso dos tratamentos superficiais empregados nas ligas de titânio apresentam-se de forma bastante similar aos resultados obtidos pelos mesmos tratamentos empregados nas ligas de alumínio. Sugere-se, portanto, que os mesmos métodos e técnicas possam ser empregados em ambas as ligas. A preparação da superfície tem como propósito alterar a composição superficial do aderente, de forma que seu núcleo se mantenha inalterado (SMITH e HUTAPEA, 2007). Entre outras necessidades como, por exemplo, aumentar a resistência à corrosão, o processo de tratamento superficial deve promover aumento da eficiência de colagem à medida que aumenta a energia livre da superfície, como é o caso dos aderentes metálicos. A título de comparação, a diferença entre a energia livre de um substrato de alumínio pode variar até 17 vezes entre uma superfície anodisada (recoberta com óxido de alumínio) e uma superfície sem tratamento (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). Para o

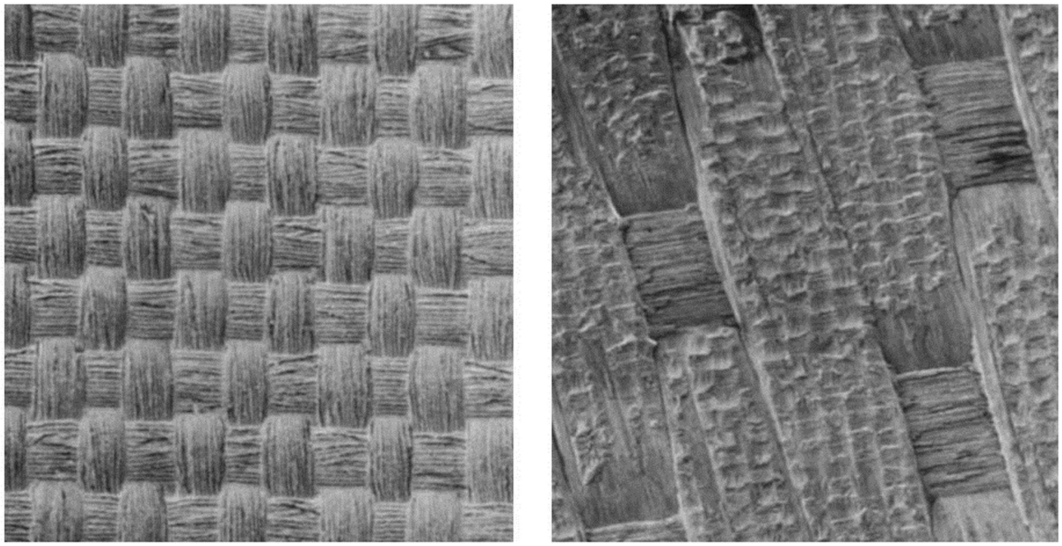
sucesso de um processo de preparação superficial, três etapas devem ser cumpridas (MAXWELL e BOND, 1999) (MESSLER, 2004), cronologicamente como segue:

1. **Remoção de contaminante:** é realizada com o propósito de remover possíveis contaminantes que reduzam a energia livre na superfície, além de melhorar as características de fluidez do adesivo – molhabilidade da superfície – para espalhamento do adesivo sobre a superfície durante sua polimerização. Ressalta-se que uma limpeza ruim resultará em má distribuição do adesivo nas superfícies de colagem, reduzindo a energia de superfície.
2. **Ataque mecânico – Exposição do Substrato:** é usado com o propósito de permitir melhor ancoramento do adesivo à superfície. Sem o ataque mecânico, há redução da capacidade de suportar cargas de cisalhamento e cargas de superfície.
3. **Proteção da superfície limpa:** a proteção das superfícies é importante para evitar que detritos contaminem a região de colagem. Além disso, estruturas metálicas ficam vulneráveis à corrosão, o que pode causar redução da qualidade superficial e liberação dos óxidos superficiais em baixas solicitações.

Além dos cuidados e processos gerais empregados, para cada tipo de aderente, existe um método de preparação, como segue.

- **Preparação de Superfícies Metálicas:** antes de iniciar o processo de tratamento superficial, é importante garantir que a superfície esteja limpa, pois, qualquer impureza nesta etapa, reduz a eficiência dos processos posteriores, uma vez que óleos e derivados reduzem a qualidade das reações químicas. Após a limpeza, deve-se seguir com o processo de produção de uma camada ativa do substrato, obtida por processos mecânicos ou químicos. Após a exposição da superfície por meio de um dos processos anteriores, é importante garantir que a superfície metálica se mantenha resistente aos processos de degradação, que ocorrem no longo prazo, como corrosão. Para isso, processos de anodização e a aplicação de *primers* criam barreiras físicas e químicas, prevenindo danos por exposição do substrato à atmosfera.
- **Preparação de Superfícies em Compósito:** o processo de preparação destas superfícies é basicamente o mesmo das partes metálicas, com exceção da necessidade de modificar a superfície como forma de protegê-la dos efeitos de

hidratação do aderente. Quanto ao processo de ativação da superfície, em virtude da estabilidade química apresentada pelas resinas termofixas, escolhe-se métodos mecânicos de preparação (Figura 2-17). Outra medida que pode ser adotada é manter a camada de *peel ply* – camada de filme desmoldante - no laminado até o momento em que a superfície será colada; o *peel ply* protege a superfície de danos e contaminação até o momento da colagem, mas é importante que haja remoção da camada de *gel coat* – filme de resina sobre o laminado de CPR- por algum processo mecânico.



(a) (b)

Figura 2-17 - Exemplo de abrasão em material compósito: (a) correta e (b) incorreta.

Para cada uma das etapas anteriormente mencionadas existem inúmeras soluções de processo disponíveis no mercado, cada qual mantendo um balanço entre produção em escala ou produção dedicada, como é o caso dos processos usados em reparos.

A remoção de sujidade por desengraxe deve ser realizada antes do processo de exposição das camadas mais ativas, sob a camada de óxido formada na superfície. Este processo pode ser feito em escala, pelo uso de técnicas de produção como desengraxe por banhos de vapor, ou localmente, pela aplicação local de panos umedecidos com solventes, geralmente Metil Etil Ketona. A escolha do tipo de tratamento deve ser feita levando em consideração parâmetros que proporcionem melhor compromisso entre qualidade e custos, podendo citar: material que compõem o substrato; grau de limpeza sugerido; custos de processo; entre outros (SMITH e HUTAPEA, 2007). Esta etapa é fundamental para garantir homogeneidade no

processo de exposição das camadas mais ativas, que se encontram sob o filme de óxido presente na superfície do aderente, e é naturalmente formado pela exposição do material ao ambiente (MAXWELL e BOND, 1999). O uso de processos abrasivos como método de limpeza e exposição do substrato, também, é recomendado por alguns fabricantes de aeronaves e por pesquisadores (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). Tal estratégia visa proporcionar uma superfície livre de gorduras, ao mesmo tempo em que uma camada ativa é formada. No entanto, alguns pesquisadores relatam que o uso destas técnicas compromete a forma como a camada ativa é gerada.

O processo de exposição da camada ativa pode ocorrer tanto por meios mecânicos quanto químicos. Métodos mecânicos comumente aplicados são jateamento e lixamento manual. Ainda que o processo de lixamento proporcione bons resultados, o jateamento se sobressai, principalmente porque é um processo sem contato manual, mas que exige bom balanceamento entre a remoção do filme de óxido e a integridade da superfície (MAXWELL e BOND, 1999). Gases inertes são sugeridos como mecanismos de transporte das partículas abrasivas como forma de evitar qualquer tipo de contaminação da superfície.

Quanto aos métodos químicos, podem ser mencionados dois tipos principais: os processos de ataque ácido, tanto ativos quanto passivos. Dentre as preparações passivas, pode-se listar o ataque ácido a substratos metálicos, os quais além de remover camadas de óxidos existentes são capazes de formar uma camada bastante estável, possibilitando que a junta não perca sua capacidade de carga ao longo do tempo. Os ataques passivos são assim denominados por contar apenas com a exposição do aderente ao fluido oxidante, enquanto que o ataque ativo conta com a intensificação e controle das reações químicas por meio da aplicação de diferenciais de potencial elétrico. Dentre os ataques químicos ativos existentes, um dos mais conhecidos são os processos de anodização.

Os processos de anodização são comumente aplicados com o propósito de modificar a superfície já exposta a um processo mecânico de ativação – jateamento ou lixamento. Além de proporcionarem uma superfície com elevado grau de estabilidade química, estes tratamentos são capazes de produzir boas características de rugosidade, particularmente, bastante homogêneas. Os processos de exposição da superfície, bem como a formação do filme de óxido têm papel fundamental tanto na obtenção de juntas com elevada capacidade de suportar cargas, quanto de serem estáveis a diferentes tipos de ambientes (SMITH e HUTAPEA, 2007).

Com exceção dos tratamentos de ativação mecânica das superfícies, os processos apresentados são empregados em superfícies metálicas. Uma vez que não se questiona a

estabilidade química dos substratos poliméricos, como epóxi, conclui-se que não há necessidade de preparação destas superfícies para a formação de camadas estáveis. No entanto, estas superfícies podem e devem ser tratadas com o propósito de elevar sua energia livre. Uma das técnicas mais comumente aplicadas baseia-se em manter a camada de *peel ply* – filme de desmoldante parte indispensável da bolsa de vácuo - aderida à superfície do aderente até o momento em que a junta seja colada. O uso desta prática garante que a superfície esteja livre de contaminantes, mas não garante que a superfície esteja ativa, uma vez que impurezas existentes nas camadas de *nylon*, e transmitidas para o compósito pelo aquecimento da cura, podem contaminar este substrato. Portanto, além do cuidado com a limpeza, é fundamental que se prepare a superfície, expondo a lâmina (camada) sob a superfície do substrato, no caso o *"gel coat"*, por meio do processo de lixamento, ou jateamento sem que haja exposição dos reforçadores (HART, BROWN e WONG, 1998). Alguns autores exemplificam casos de falha em que simplesmente nenhum traço de colagem pode ser observado, de forma que fica clara a má preparação da superfície por falta do processo de exposição da lâmina limpa, que não esteve em contato com o *peel ply*. Embora cumpram com um papel de fundamental importância no processo de fabricação, por facilitar a desmontagem da bolsa de vácuo e evitar danos por delaminação das camadas do laminado durante este processo, as camadas de *peel ply* acabam muitas vezes por contaminar a superfície do compósito com desmoldantes. Isto ocorre principalmente se o processo é realizado sob temperaturas elevadas. Se a contaminação é inapropriadamente removida durante o processo de preparação da superfície para colagens posteriores, ou até mesmo para pintura, falhas graves de adesão podem ser registradas (BALDAN, 2004).

No caso, em que o aderente também é um polímero, bons resultados de acoplamento com o adesivo podem ser obtidos sem a necessidade de modificar a condição superficial do aderente, como se é proposto com a formação do óxido de alumínio, nos casos em que aderentes metálicos são empregados.

De acordo com a Figura 2-16, verifica-se o elevado número de parâmetros que devem ser controlados no processamento de colagem de uma união, dentre os quais podem ser mencionados: tipos de adesivos (resinas poliméricas); tempo de cura; temperatura de cura; carga de compactação (nível de pressão). Sendo que para o processamento de colagem de uma junta em reparos, há dois parâmetros que devem ser destacados: tempo e temperatura. Haja vista que podem ser largamente alterados de acordo com a necessidade da estrutura a ser reparada.

A escolha da rampa de temperatura do processo de colagem, principalmente quando aplicado em reparos, deve ser feita de forma que a estrutura reparada não seja afetada por danos ocasionados pelo calor (MAXWELL e BOND, 1999). Além disso, a escolha da rampa de temperatura deve ser equivalente àquela usada no processo de fabricação, para que as propriedades físicas do material colado se mantenham as mais próximas possíveis do projeto original. De forma geral, quanto maior a temperatura de polimerização empregada, maior a estabilidade do polímero, principalmente no que diz respeito à operação em ambientes úmidos e quentes.

Os processos de fabricação de estruturas secundárias geralmente empregam temperaturas de processo de cura em torno de 120ºC, enquanto que estruturas primárias são processadas entre 175º e 180ºC. Consequentemente, as temperaturas de reparo sugeridas para se evitar danos por exposição ao calor são de aproximadamente 10ºC abaixo do valor de fabricação da peça original (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005). Quando em serviço, estruturas em material compósito, normalmente, apresentam degradação por absorção de umidade, principalmente, estruturas do tipo sanduíche. Com o decorrer do tempo, a umidade aprisionada na estrutura do material pode comprometer a integridade dos reparos de colagem, quando a exposição ao calor é geralmente necessária. Dessa forma, estruturas sob a ação de umidade quando submetidas, também, a cargas térmicas mais elevadas podem sofrer danos, tais como: delaminações e descolamentos, uma vez que a umidade aprisionada nas células dos núcleos poliméricos (das estruturas sanduíche) quando aquecida tende a expandir em volume, resultando no descolamento da estrutura. Como já mencionado, tal incremento de temperatura acarreta na redução de viscosidade e energia livre do adesivo, ao mesmo tempo em que acelera o processo de polimerização (Figura 2-18).

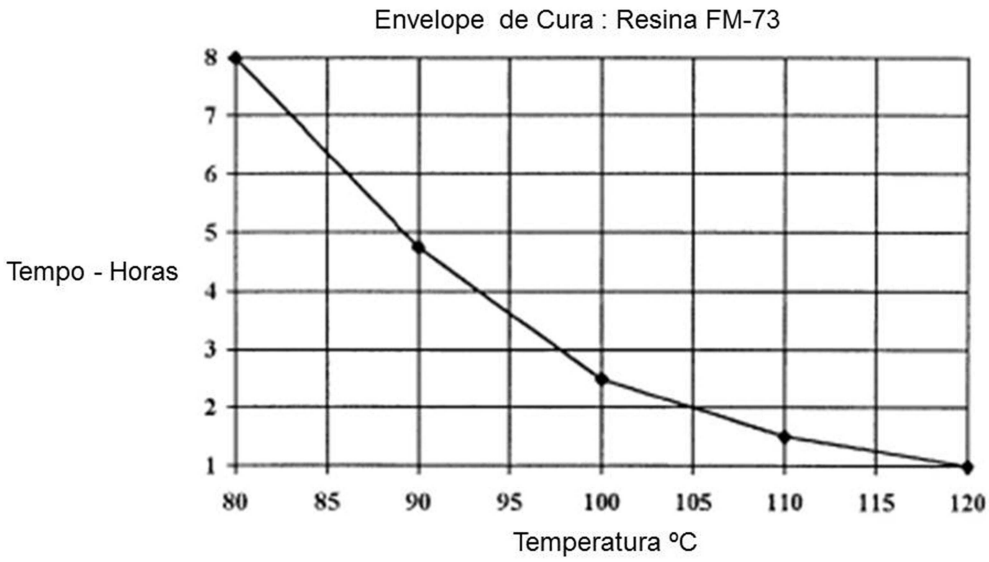


Figura 2-18 -- Ciclo de Cura típico para um filme adesivo: FM73 (MAXWELL e BOND, 1999).

Por fim, diante de tudo o que foi apresentado sobre Teorias de Adesão, Projeto e Fabricação de juntas, conclui-se que o desenvolvimento de uma junta híbrida colada envolve a escolha criteriosa de materiais, geometrias e parâmetros de processo, sendo assim algo relativamente complexo e desafiador, principalmente, quando se busca garantir requisitos aeronáuticos de certificação.

2.1.3. MECANISMOS DE FALHA EM JUNTAS COLADAS

De modo geral as juntas coladas, fabricadas em material compósito, são conhecidas por apresentarem alta concentração de tensão nas lâminas do aderente. A tensão cisalhante se deve à força cortante criada na superfície do aderente, enquanto que as tensões de "descolamento" (*Peel Stresses*) surgem em razão da excentricidade do caminho de transmissão das cargas, o que impede a formação de um mecanismo falha dominado predominantemente por tensões de cisalhamento. O efeito adverso, resultante de tal excentricidade, está diretamente relacionado com a espessura do aderente (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005), e isso propicia modos de falha bem específicos para juntas, tais como:

- **Falha nos Aderentes:** quando o modo de falha é notado no aderente, conclui-se que a falha ocorreu longe da região de transferência de carga, ou seja, a junta

fora projetada e fabricada de forma adequada. Este é o modo de falha mais desejado, uma vez que apresenta sucesso no dimensionamento dos parâmetros da junta e na fabricação da mesma.

- **Falha Interlaminar no Aderente:** este modo de falha ocorre quando existem tensões fora do plano forçando as camadas do aderente – compósito – para direção normal ao plano principal de carregamento. Se este modo de falha se faz presente em tensões abaixo dos valores admissíveis para a junta, pode-se concluir que há necessidade de se re-projetar a geometria da região de transferência de carga, com o propósito de reduzir as tensões.
- **Falha de Coesão:** a falha de coesão ocorre na região de sobreposição dos aderentes, ou seja, na região da camada de adesivo e é caracterizada, principalmente, quando se nota a presença de adesivo em ambas as faces do aderente. A presença de cargas de cisalhamento e/ou de descolamento são responsáveis pelo aparecimento deste modo de falha. Conclui-se com este tipo de falha, que as superfícies foram bem preparadas. Dessa forma, visando melhorar a capacidade de carga da junta, em casos de falha coesiva, ou seja, na camada de adesivo, recomenda-se que outro tipo de adesivo seja aplicado.
- **Falha de Adesão:** este tipo de falha ocorre na interface entre o adesivo e o aderente, e é comum em superfícies, que não tiveram boa preparação superficial. Adicionalmente, este tipo de falha prevê que a junta terá baixa durabilidade em longo prazo.

A Figura 2-19 apresenta alguns modos de falha presentes nos aderentes e no filme de adesivo para juntas metal-metal ou compósito-compósito. A maior excentricidade da carga aliada ao momento secundário produz elevadas concentrações de tensão nas bordas da união, conforme ilustrado na Figura 2-20 e, discutido anteriormente, no capítulo sobre uniões híbridas coladas.

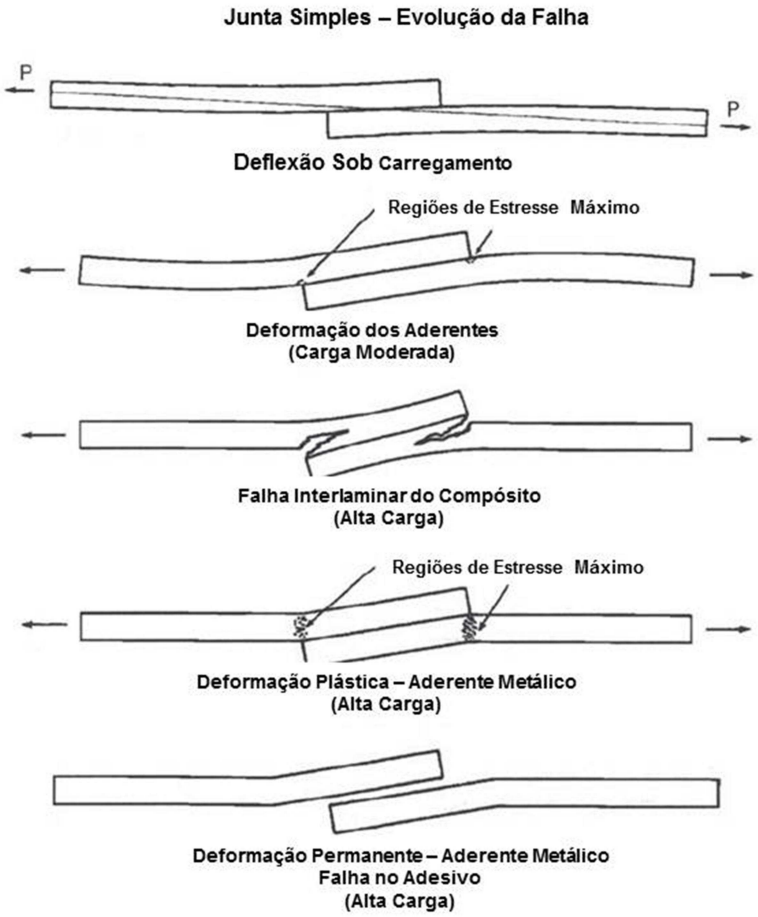
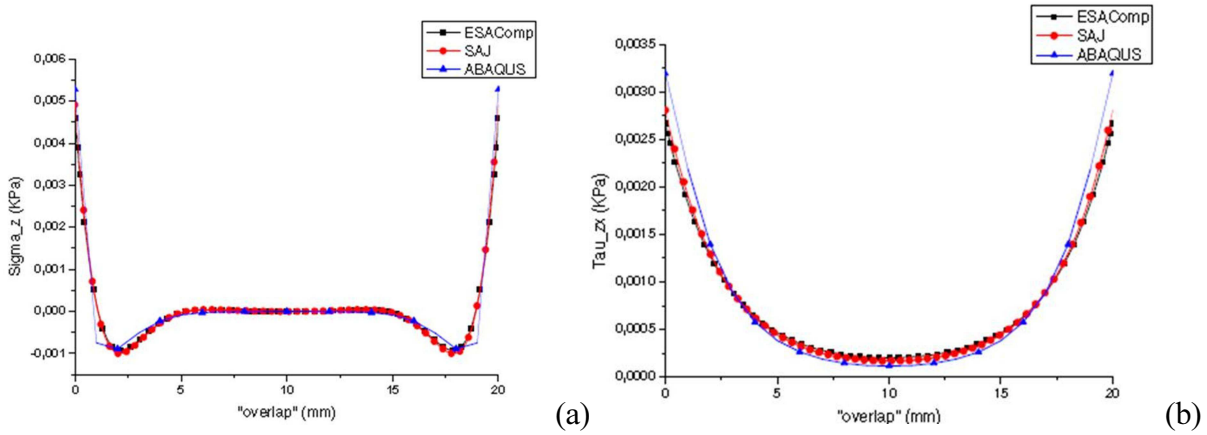


Figura 2-19 - Mecanismos de Falha Tipicamente Encontrados em Juntas Coladas Sobrepostas (Metal-Metal ou Compósito-Compósito).



EASAComp – Software comercial aplicado na análise de laminados.; SAJ – Sistema de análise de Juntas (RIBEIRO, 2009); ABAQUS – Software comercial de análise MEF.

Figura 2-20 - Variação da Tensão no adesivo, (a) tensão de "descolamento" e (b) tensão de cisalhamento transversal (RIBEIRO, 2009).

Para o caso específico das uniões híbridas, além dos efeitos induzidos pelo momento secundário, é importante atentar para os efeitos de carregamento advindos de pré-cargas térmicas. Em função desta particularidade, é importante lembrar que o adesivo a ser usado deve minimizar os efeitos indesejados causados pelas cargas térmicas. Estes efeitos podem ser bastante prejudiciais à durabilidade da junta em longo prazo, principalmente, para o caso de estruturas aeronáuticas, as quais devem ser operacionais em intervalos de temperatura bastante amplos. O efeito causado pela variação da temperatura na construção de uma junta híbrida, em razão da variação de temperatura, pode causar deformações indesejáveis entre os aderentes e o adesivo, podendo este ser exposto a sobre cargas desnecessárias (Figura 2-21).

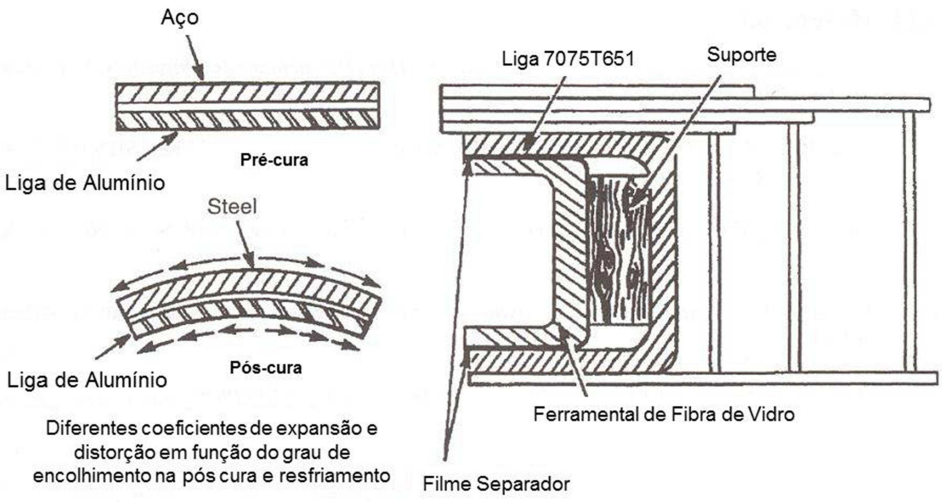


Figura 2-21 - Deformação de uma união híbrida colada em razão da diferença de coeficientes de expansão térmica (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005).

Em função da configuração da junta, diferentes resultados de tensão podem ser obtidos ao longo da região colada (Figura 2-22). Portanto, a escolha pela geometria adequada pode potencializar ou reduzir os efeitos decorrentes dos mecanismos de falha.

Adicionalmente, aderentes compósitos de matriz polimérica são consideravelmente mais sensíveis às tensões de cisalhamento quando comparados com aderentes metálicos. A deformação devido ao cisalhante transversal dos aderentes tem efeito análogo ao aumento da espessura da camada de adesivo. Esse fenômeno resulta na diminuição da resistência da junta às cargas de cisalhamento e tensões normais, comuns nas bordas dos *overlaps* (região de sobreposição).

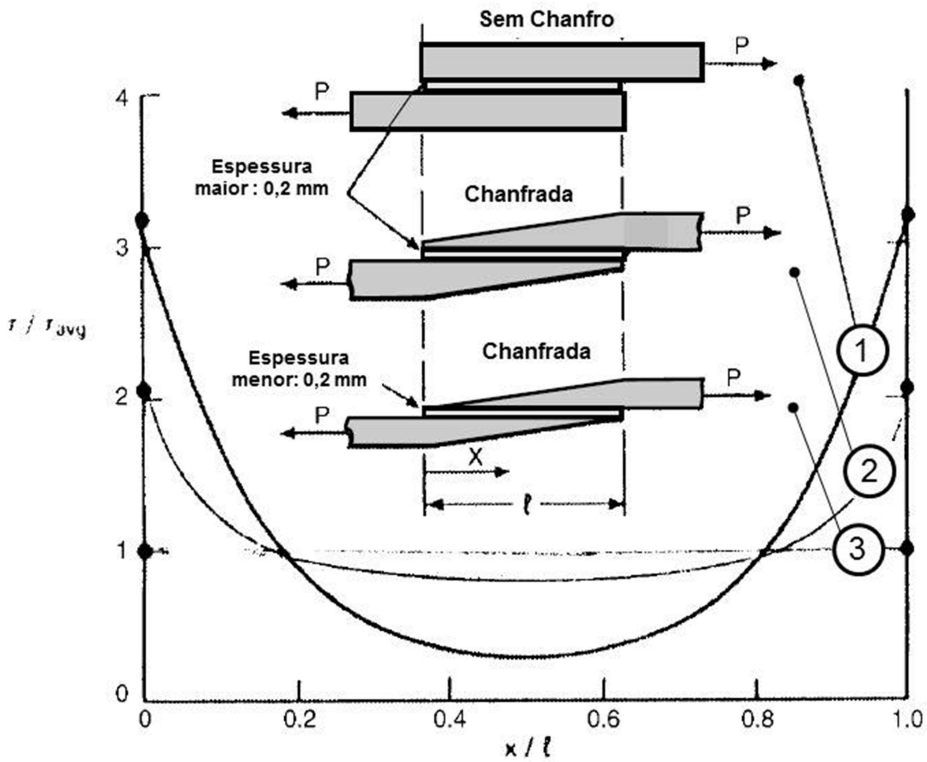


Figura 2-22 - Distribuição da Tensão de Cisalhamento em diferentes configurações de Juntas Sobrepostas Coladas: (1) Sem Chanfro; (2) Chanfrada com espessura finita; (3) Chanfrada com espessura tendendo a zero. (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005)

Deve-se ressaltar que no caso das juntas tipo sobreposta simples fabricadas em material compósito, a falha por flexão dos aderentes pode ocorrer devido ao alto momento gerado na borda da região de sobreposição, e se caracterizam por serem frágeis. Em se tratando de aderentes metálicos, as falhas por flexão se tornam tipicamente falhas por escoamento devido à formação de uma rótula plástica na região crítica.

A sequência de empilhamento proposto para o laminado também tem papel fundamental no comportamento mecânico da junta como um todo. Por exemplo, no caso de compósitos unidirecionais, as lâminas orientadas a 90º, empilhadas adjacentes ao filme de resina, que une os aderentes, por suportarem reduzidos níveis de carregamento na direção transversal às fibras, atuam como um "incremento" da espessura do aderente, reduzindo o pico da tensão no filme, uma vez que elevam a ductilidade da junta. Por outro lado, as lâminas orientadas a 0º proporcionam juntas mais rígidas e, consequentemente, maiores tensões nas regiões críticas da união. Ainda que teoricamente, as lâminas orientadas a 90º proporcionam resultados mais eficazes, na prática, observa-se que estas lâminas tendem a enfraquecer a junta, uma vez que o laminado inserido no filme da matriz passa a ser abordado como um defeito.

A ductilidade no adesivo é um fator importante na tentativa de minimizar os efeitos adversos causados pelas tensões no mesmo. Isto se justifica, pois o dimensionamento da junta é realizado levando em consideração a necessidade de manter as tensões do filme adesivo dentro do regime elástico, a fim de evitar que o mesmo trabalhe no limite de sua capacidade. A ductilidade se relaciona com a tensão cisalhante, reduzindo seus efeitos, de forma que quanto menor a ductilidade do adesivo, maior a resistência da junta ao cisalhamento. No entanto, se a junta é mais rígida, maior será a tendência de se obter uma junção frágil. A redução do efeito de rotação, pela fabricação de uma junta com adesivo mais rígido produz um efeito desejável, no sentido de aumentar a resistência da mesma. No entanto, ao mesmo tempo em que se torna mais resistente, a junta se torna menos susceptível a apresentar sinais de falha antes de entrar em colapso.

Alguns pesquisadores, na busca por obter melhores resultados de junção, propuseram o uso de uniões com o emprego de dois tipos de adesivos. Sendo empregados, adesivos mais dúcteis (DP-8005) na extremidade da sobreposição, e mais rígidos (AV-138/HV998) no centro da sobreposição, conforme proposto na Figura 2-23 (DA SILVA e LOPES, 2009). Adesivos de característica intermediária, entre dúcteis e frágeis, também foram usados (Araldite 2013 e o 2021), mas de forma que somente um deles fosse empregado. Como resultado deste experimento, Da Silva e Lopes (2009) concluíram que o comportamento mais dúctil nas regiões críticas da junta, onde há presença de cargas mais elevadas de cisalhamento transversal e tensão de "descolamento", proporciona aumento da resistência geral da junta.

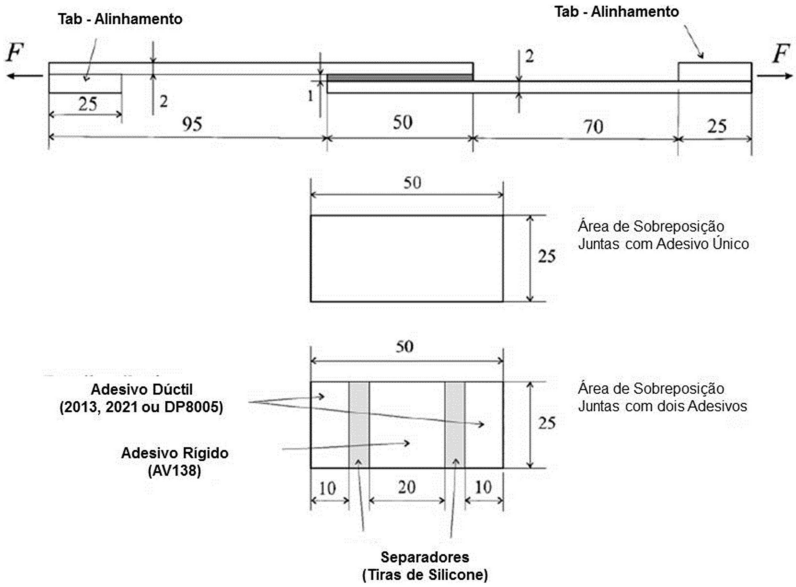


Figura 2-23 - Proposta de construção de uma união colada com uso de adesivos dúcteis e frágeis; (DA SILVA e LOPES, 2009).

Cabe ainda ressaltar que a temperatura, a umidade e os efeitos de porosidade na camada de adesivo também podem influenciar os resultados de ductilidade, ou seja, geralmente há perda de ductilidade e, consequentemente, redução da capacidade da junta.

2.2. MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Com o objetivo de aumentar a "carga paga" (*pay load*), bem como o tempo disponível de uma aeronave para operação sob condições de uso seguro, diferentes fabricantes veem desenvolvendo o uso de estruturas em material compósito como sendo uma das alternativas mais viáveis para atender as exigências de mercado dos próximos anos. Ainda assim, é razoavelmente complicado garantir a segurança de voo de uma aeronave, principalmente quando se opta, por usar em larga escala, um tipo de material que não apresenta sinais visíveis de degradação. Com o propósito de contribuir para a solução deste problema, a indústria e o meio acadêmico investem concomitantemente em pesquisa e desenvolvimento de métodos para determinar danos, principalmente aqueles não visíveis a olho nu. Sendo que a estes sistemas de monitoramento para detecção de falhas designa-se: "Sistema de Monitoramento da Integridade Estrutural" ou, simplesmente, SHM (*Structural Health Monitoring*).

2.2.1. SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Um sistema de monitoramento estrutural é aquele capaz de coletar parâmetros mecânicos relacionados a uma dada estrutura, em tempo real, fundamentais no processamento de rotinas de verificação da qualidade da mesma, como por exemplo, dados de resistência residual. Geralmente estes dados são coletados por sensores embutidos ou montados, estrategicamente, sobre a estrutura (SCOTT, BANNISTER, *et al.*, 2005). Este tipo de abordagem permite não somente a determinação de falhas em tempo real, no momento em que elas ocorrerem, mas também reduzir a quantidade de inspeções realizadas de maneira preventiva. Como anteriormente mencionado, estas inspeções demandam tempo e muitas vezes apresentam "resultados negativos", ou seja, verifica-se que não há dano algum na estrutura, evidenciando assim, a dificuldade de se prever o dano na etapa de projeto.

A arquitetura de *hardware* geralmente utilizada nos sistemas SHM é relativamente simples, sendo bem aceita e desenvolvida. Além disso, os conceitos que governam a etapa de

processamento dos sinais, como por exemplo, as teorias de vibração mecânica, também são bem conhecidas. O desafio, portanto, consiste em desenvolver metodologias suficientemente robustas para serem usadas nas rotinas de operação, sejam elas em solo ou em voo, para obtenção de dados que consequentemente sejam usados para reduzir a quantidade de paradas desnecessárias para manutenção. Por exemplo, no presente trabalho verifica-se as potencialidades e limitações do emprego de sensores piezelétricos para realizar a tarefa de monitoramento de juntas híbridas coladas.

Para o emprego de um sistema SHM, é necessário garantir a execução de quatro etapas fundamentais: (1) identificação de distúrbios mecânicos, (2) localização do dano; (3) classificação do tipo de dano; (4) determinação da severidade do dano. Estas etapas podem ser automatizadas e incorporadas em tais sistemas SHM, desde que os sinais de leitura provenientes de sensores distribuídos pela estrutura sejam captados, filtrados e interpretados. Atualmente, os sistemas de monitoramento comercialmente disponíveis são capazes de determinar apenas a existência do dano ou não. Há alguns poucos que permitem a localização do dano. Todavia, sistemas SHM (viáveis comercialmente) capazes de detalhar a discrepância de forma tão refinada, quanto possível, da severidade do dano ainda estão em desenvolvimento. Tais sistemas deverão, por exemplo, permitir o uso da informação para o cálculo da resistência residual da estrutura danificada (WORDEN, FARRAR, *et al.*, 2007).

Há dois tipos principais de sistemas, que são comumente encontrados: ativos e passivos. Os sistemas ativos conseguem de alguma forma, mas principalmente por atuadores elétricos instalados na estrutura, alterar o comportamento estrutural. Tais sistemas auxiliam na contenção do próprio dano ou modificam a forma da estrutura de modo que a mesma apresente diferentes comportamentos em fases distintas da missão. Os sistemas passivos, por outro lado, são basicamente constituídos de sensores que buscam capturar qualquer alteração significativa no comportamento da estrutura, por meio de medições contínuas. No presente trabalho serão utilizados sensores que deverão, portanto, monitorar a região mais crítica da junta, ou seja, a região de *overlap.* Além disso, para o sucesso de um sistema de monitoramento de integridade estrutural, deve-se garantir que os sensores utilizados sejam capazes de obter boas medições do comportamento da estrutura, sem alterar a natureza da mesma. Portanto, com ou sem os sensores, a estrutura deve apresentar praticamente o mesmo tipo de comportamento. No caso de verificação por análise modal, requisita-se que não haja alterações nos modos de vibrar da estrutura. Outro requisito importante a respeito dos sensores está na durabilidade e confiabilidade dos mesmos ao longo de sua vida útil. Como muitas vezes, para estruturas em

materiais compósitos, estes sensores são inseridos dentro do laminado, a substituição pode acarretar em tarefas complexas de manutenção.

Além da classificação em sistemas ativos ou passivos, os sistemas SHM atualmente disponíveis podem ser classificados, também, em função dos conceitos envolvidos nas técnicas de detecção do dano. Dessa forma, têm-se três diferentes categorias com base nas técnicas de detecção: (a) detecção por deformação; (b) detecção por vibração, e (c) detecção por "quebra" do sinal. Conforme anteriormente mencionado, este trabalho tem foco na detecção do dano em juntas híbridas coladas com base na alteração da FRF (Função de Resposta em Frequência), ou seja, com base no sinal proveniente de uma análise modal. Sinal este que será medido por meio de sensores piezelétricos. Por esta razão, a técnica de medição será a de detecção por vibração. Vale ressaltar que o uso desta técnica é criticado por alguns pesquisadores, como White (2009), pelo fato de que se faz necessário, geralmente, confrontar o resultado medido com uma curva padrão obtida da estrutura intacta, e a comparação pode ser difícil. Isto ocorre, principalmente, porque as variações de medição podem ser influenciadas pelo ambiente, tornando a tarefa de análise dos dados bastante complexa, principalmente no que diz respeito ao refinamento necessário para a detecção do dano. Quanto ao sinal de excitação, para realização da medição, este pode ser proveniente tanto de sensores ativos (instalados na própria estrutura) como de fontes externas de excitação. Além disso, o tamanho do defeito (extensão do dano), que pode ser capturado, depende do comprimento de onda empregado para excitar a estrutura.

Em se tratando das técnicas de medição, que fazem uso da análise modal, tem-se que as mesmas se baseiam na mudança de comportamento da estrutura em função do surgimento de um dano. Sendo assim, a estrutura passa a se comportar de forma diferente, em razão da mudança de rigidez. Este tipo de técnica pode ser usada para detecção de danos locais, ou danos globais, dependendo da faixa de frequência empregada para excitar a estrutura. Geralmente, frequências menores são melhores para detecção de danos globais, enquanto que frequências mais elevadas são indicadas para danos localizados. Além disso, soma-se a realização de um estudo dos modos de vibrar, tornando mais eficiente o processo de análise. Com base nos modos de vibrar, é possível obter mais informações sobre o dano, como por exemplo: localização, extensão e tipo, como uma espécie de "impressão digital" do tipo de comportamento esperado. Tendo isso argumentado, verifica-se a necessidade de elevada capacidade de processamento, principalmente em estruturas de grande porte, onde inúmeros sensores devem ser distribuídos e seus dados processados para prover a condição da mesma (ZOU, TONG e STEVEN, 1999). Por outro lado, conforme anteriormente explicitado, ganhos

consideráveis poderiam ser obtidos se um sistema confiável de detecção de danos estiver disponível para aeronaves comerciais, uma vez que as tarefas previstas para manutenção poderiam ser drasticamente reduzidas.

2.2.2. PIEZELETRICIDADE

Em 1880, Pierre e Jacques Curie descobriram o efeito piezelétrico. Este efeito é comum em diversos materiais, como por exemplo, na turmalina, no quartzo, no topázio, na cana de açúcar e no sal Rochel (KATZIR, 2006). Eles classificaram um material piezelétrico como sendo aquele que apresenta como saída um diferencial de potencial elétrico transiente quando cargas mecânicas são a ele empregadas. Alguns anos mais tarde, em 1881, Gabriel Lippmann provou matematicamente que o inverso também é verdadeiro, ou seja, quando cargas elétricas são aplicadas no material, obtém-se como resposta de saída campos de deformação, sejam de extensão ou contração. Este fenômeno fora posteriormente provado fisicamente pelos irmãos Curie (SILVA, 2007). A Figura 2-24 apresenta esquematicamente o conceito de piezeletricidade.

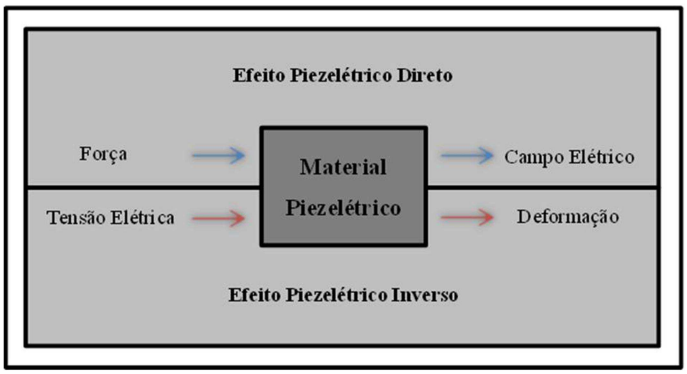


Figura 2-24 – Efeitos piezelétricos diretos e inversos (SILVA, 2007).

Nota-se, portanto, um acoplamento entre as equações mecânica e elétrica nos elementos piezelétricos, e este acoplamento é descrito por coeficientes (Figura 2-24), que mostra a equação abaixo:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C^{E}_{ijkl}\varepsilon_{kl} - e_{kij}E_k \\ D_i &= e_{kij}\varepsilon_{kl} + d^{\varepsilon}_{ik}E_k \end{aligned} \tag{44}$$

Onde estão representados os campos de tensão mecânica (Sigma), deformação mecânica (Épsilon) e elétrico (E_k); D_i é referente às componentes do vetor de deslocamentos elétricos; C^{E}_{ijkl} é o tensor elástico de quarta ordem para condições de contorno elétricas do piezo em curto-circuito ($E = cte$); d^{ε}_{ik} são as constantes dielétricas para condições da estrutura mecânica engastada livre ($\varepsilon = cte$); e e_{ikl} os coeficientes de acoplamento piezelétricos.

Uma vez que os tensores C, e e d, são simétricos, pode-se escrever a seguinte equação na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^{E} & -e^{t} \\ e & d^{\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ E \end{bmatrix} \tag{45}$$

Com o propósito de permitir melhor entendimento sobre o equacionamento dos materiais piezelétricos, em seguida, são apresentados conceitos e regras de notação e orientação destes materiais.

Sistemas de Notação e Orientação

Da mesma forma que anteriormente apresentada para os laminados sólidos, os materiais piezelétricos também serão descritos em função dos tensores constitutivos, simplificados em função da simetria do material.

Como observado na equação (44), os parâmetros associados ao material piezelétrico são descritos por coeficientes, os quais serão definidos segundo índices *i*, *j* e *k* referentes aos sistemas de orientação dos eixos x, y e z - sistema de coordenadas ortogonal (Figura 2-25). Na direção do vetor diretor *i*, associa-se o eixo entrada (por exemplo: diferença de potencial elétrico), enquanto que ao eixo *j*, se associa a saída/resposta do material (por exemplo: campo de deformação mecânica). Com o propósito de elucidar a descrição, considere como exemplo, o coeficiente piezelétrico: e_{13}. Para este coeficiente, quando um diferencial de potencial elétrico é

aplicado à direção 1, obtém-se no eixo 3, o sinal de resposta do material, neste caso, de deformação ou tensão mecânica.

Ao longo dos eixos coordenados x, y e z haverá, respectivamente, translações 1, 2 e 3, enquanto que as rotações associadas a estes eixos serão nomeadas como 4, 5 e 6 respectivamente. Vale ressaltar que para o material compósito, o sistema de coordenadas local (1-2-3) é definido em função do reforço, ou seja, a direção 1 está alinhada com a "fibra", ao passo que a direção 2 é normal ao reforço e a direção 3 é normal ao plano da lâmina. Por outro lado, para transdutores piezelétricos, tem-se que a direção 3 (sistema de coordenadas local) está relacionada com a direção longitudinal do transdutor, e as direções 1 e 2 estão relacionadas com as direções da seção transversal do mesmo. Portanto, considerando as condições supracitadas, constata-se que a direção de polarização está alinhada com a direção 2 do transdutor piezelétrico.

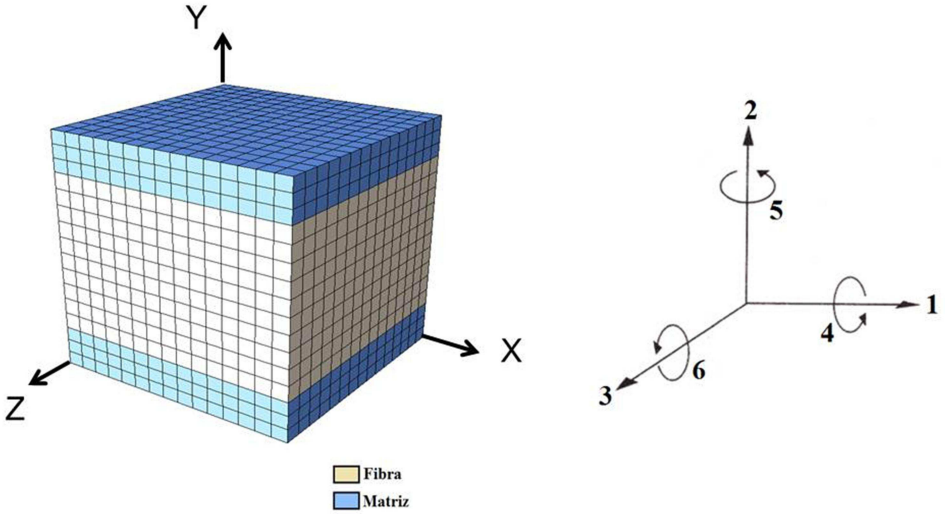


Figura 2-25 - Definição das direções do sistema de coordenadas ortogonal e local de um transdutor piezelétrico, adaptado de (BERGANDER, 2003).

Materiais Piezelétricos e Equações Constitutivas

A Figura 2-26 sumariza a classe de simetria observada para compósitos, que corresponde a diversas combinações de constituintes, matriz e fibra. A região em destaque será adotada como resultado das hipóteses feitas para o desenvolvimento deste trabalho. Portanto, verifica-se a forma da matriz constitutiva para o compósito piezelétrico com base no tipo de reforço (fibra) e matriz (resina polimérica) que serão utilizados.

Considerando a forma da matriz constitutiva a ser utilizada (em destaque na Figura 2-26), bem como a equação (5), tem-se que a equação (45) pode ser reescrita matricialmente da maneira como mostrado na equação (46):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13} \\ C_{12} & C_{11} & C_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & d_{11} & 0 \\ -e_{13} & -e_{13} & -e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \tag{46}$$

Evidencia-se assim, o fenômeno de acoplamento eletromecânico em função dos termos e_{ij} da matriz constitutiva. Cabe destacar, que em virtude deste acoplamento eletromecânico, os elementos piezelétricos possuem vasta aplicabilidade em sistemas de monitoramento estrutural, uma vez que alterações de carga e deformações mecânicas estão intimamente ligadas às condições de dano presentes.

Atualmente estima-se que 36 classes de materiais piezelétricos estão disponíveis, dependendo da natureza anisotrópica do material, sendo a mesma dada por: completamente anisotrópica, transversalmente isotrópica e isotrópica, bem como do tipo de atividade piezelétrica, sendo passiva ou ativa, conforme classificam diversos autores (Tabela 2-3)

Além disso, para cada classe de material compósito piezelétrico, diversas subclasses podem ser reconhecidas com base na orientação relativa das direções de polarização dos constituintes, matriz e fibra. Kar-Gupta e Venkatesh (2007) agruparam os materiais compósitos piezelétricos como: (a) “longitudinal” – a matriz e a fibra são polarizadas na direção longitudinal; (b) “transversal” – a matriz e a fibra são polarizadas na direção transversal. A Tabela 2-3 também correlaciona alguns trabalhos científicos, os quais têm como objetivo descrever o comportamento eletromecânico destes materiais.

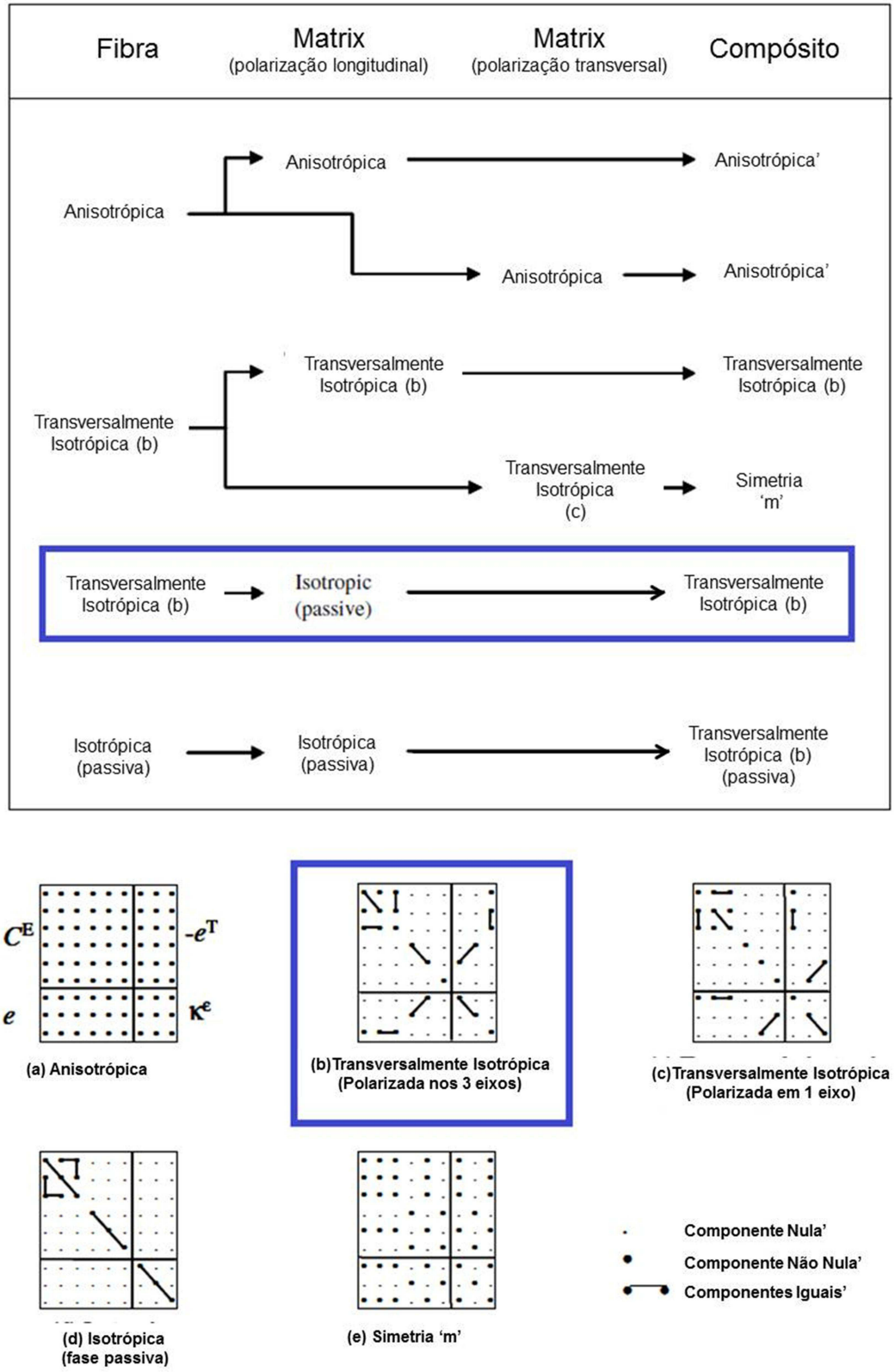


Figura 2-26 - Ilustração esquemática da simetria do cristal de compósitos criada pela combinação de constituintes da matriz e fibras com diferentes graus de anisotropia (KAR-GUPTA e VENKATESH, 2007)

Um dos materiais mais empregados na fabricação de sensores piezelétricos é o Titanato Zirconato (PZT), o qual tende a ser frágil e muitas vezes exige grande quantidade de cabos de conexão, tornando seu uso fácil de ser notado, porém difícil de ser discretamente acoplado à estrutura, em função principalmente das conexões de alimentação e leitura que são necessárias. No entanto, este será o tipo de sensor empregado no presente trabalho. Outro tipo de elemento piezelétrico que pode ser usado, ainda que não tão comum, são os polímeros piezelétricos de Difluoreto de Polivi0nilideno (PVFD), os quais podem ser conformados para atender dadas particularidades de geometria. Tais filmes poliméricos são reconhecidos por produzir sinais de saída com voltagem relativamente elevada, característica importante na medição de sinais de baixa frequência. Dentre as diversas classes cristalinas existentes para materiais piezelétricos (Figura 2-24), optou-se no presente estudo, por utilizar a classe que possui arranjo cristalino hexagonal, principalmente em função da diversidade de informações existentes em literatura e catálogos de fabricantes sobre as propriedades físico-químicas destes materiais.

Por fim, independentemente do tipo de material empregado, do ponto de vista prático, os dispositivos piezelétricos são geralmente colados nas estruturas por meio de adesivos, ou como parte integrante da estrutura, no caso de compósitos laminados. Sendo que a sensibilidade e a qualidade da medida são diretamente proporcionais à qualidade do acoplamento entre o sensor e a estrutura. Com o propósito de demonstrar a influência do acoplamento nos resultados, alguns pesquisadores, tais como White (2009), alteraram a espessura e o módulo de elasticidade do adesivo, que faz a união entre o sensor piezelétrico e o substrato. Os referidos pesquisadores concluíram que a variação destes parâmetros pode acarretar em mudanças na transferência de carga entre a estrutura e o elemento piezelétrico, ou seja, variações nos resultados. Portanto, este processo de colagem foi criteriosamente controlado pelo presente autor.

Tabela 2-3 - Trabalhos científicos aplicados a algumas classes de materiais compósitos – (MEDEIROS, 2012).

Trabalhos Científicos para Classes de Compósitos								
Compósito			Fibra					
			Anisotrópica		**Transversalmente Isotrópica**		**Isotrópica**	
			Ativa	**Passiva**	**Ativa**	**Passiva**	**Ativa**	**Passiva**
Matriz	**Anisotrópica**	**Ativa**	Kar-Gupta (2007a)					
		Passiva						
	Transversalmente Isotrópica	**Ativa**	Dunn e Taya (1993)		Bravo-Castillero et al. (1997) Guinovart-Diaz et al. (2001) Berger et al. (2005), Moreno et al. (2009) Medeiros e Tita (2011) Biscani et al. (2011) Presente Trabalho			
		Passiva						
	Isotrópica	**Ativa**						
		Passiva			Chan e Unsworth (1989), Smith e Auld (1991), Silva et al. (1998 e 1999) Trindade e Benjeddou (2011)			Whitney e Riley (1966)

Tabela 2-4 - Lista de materiais piezelétricos e suas simetrias de cristais – (KAR-GUPTA e VENKATESH, 2007).

MATERIAL	CLASSE	ARRANJO CRISTALINO
Sulfeto de cádmio **Titanato zirconato de chumbo (PZT-7A)** **Difluoreto de polivinilideno (PVDF)** **Óxido de zinco** **Sulfeto de zinco**	6mm	Hexagonal
Dihidrogenofosfato de amônio **Dihidrogenofosfato de potássio**	$\bar{4}2m$	Tetragonal
Niobato de sódio de bário	mm2	Ortorrômbico
Titanato de bário	4mm	Tetragonal
Niobato de lítio **Tantalita de lítio**	3m	Trigonal
Sal de Rochelle	222	Rômbico
Bismuto óxido de germânio **Arseneto de gálio**	$\bar{4}3m$	Cubico
Dióxido de telúrio	422	Tetragonal

2.2.3. MONITORAMENTO DE JUNTAS HÍBRIDAS

Uma das técnicas de reparo mais largamente utilizadas para estruturas aeronáuticas em CPR (Compósito Polimérico Reforçado) é a aplicação de vigas/placas de titânio sobre regiões danificadas. Isto se justifica, pois o titânio pode ser moldado de forma a se adaptar às necessidades de uma dada região da aeronave. Além disso, é o material metálico cujas propriedades mecânicas mais se aproximam dos laminados sólidos de CPR e, possui compatibilidade eletroquímica com os compósitos fabricados em carbono-epóxi. No entanto, atualmente a forma mais comum de fabricação de uma união de reparo é a cravada, ou seja, com inserção de fixadores. Tendo em vista as desvantagens apresentadas por este tipo de junção, como as evidenciadas anteriormente, torna-se estratégico o emprego de reparos colados. Todavia, garantir que uma junta colada não apresente falhas, quando da operação do produto aeronáutico, é uma tarefa complexa conforme já foi abordado. Em sendo assim, recomenda-se que as mesmas sejam monitoradas, como forma de permitir não somente a segurança de voo,

mas também o aumento da vida útil. O uso de sistemas SHM irá, assim, contribuir para a inserção de um menor número de entalhes (concentradores de tensão) e, consequentemente, reduzirá o número de paradas e tarefas indesejadas de manutenção.

Diante do que foi abordado, constata-se que o monitoramento de juntas híbridas é proposto em razão da probabilidade de falha das mesmas devido ao acoplamento entre diferentes tipos de materiais. Ainda, recomenda-se que os sensores estejam colados sob a parte metálica da junta, como forma de prevenir, inicialmente, qualquer interação entre a matriz do laminado e a resina que adere o transdutor piezelétrico à estrutura. Vale ressaltar que a técnica utilizada para a detecção do dano é baseada na análise modal, buscando, assim, observar modificações causadas pela variação da rigidez da estrutura. (THRUSBY, MACLEAN, *et al.*, 2006)

Por fim, deve-se destacar que atualmente o monitoramento de juntas se restringe basicamente às estruturas puramente metálicas ou, então, fabricadas integralmente em CPR. Juntas em materiais compósitos fabricados em laminados epóxis reforçados com fibras de boro são mais comumente encontradas. Nestes casos, o monitoramento tem sido largamente aplicado com o propósito de garantir maior domínio deste tipo de união (QING, BEARD, *et al.*, 2006). Por outro lado, são escassos os estudos que envolvem o monitoramento de juntas híbridas coladas, portanto, conclui-se que o presente estudo trata de uma contribuição relativamente inovadora.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

A junta híbrida, parte do objeto deste estudo, constitui-se da união entre um laminado de CPR (Compósito Polimérico Reforçado) e uma lamina de titânio, aderidas por um filme de adesivo epóxi. Dentre as inúmeras possibilidades que existem para laminados em carbono, ligas de titânio e filmes adesivos do tipo epóxi, foram selecionados respectivamente: (a) o laminado de M20/G0904/47 e FM3002M (resina epóxi e fibra de carbono – tecido bidirecional), (b) a liga *alpha-beta* Ti6Al4V (AMS4911) e (c) o filme epóxi Henkel EA934NA. Tal seleção foi realizada com base na vasta aplicação, que os referidos materiais possuem no ambiente aeronáutico.

As propriedades mecânicas do material metálico (liga *alpha-beta* Ti6Al4V) são facilmente adquiridas por meio de consulta à literatura técnica disponível. Por exemplo, o MIL-HDBK-5 (2003) disponibiliza estes valores (Tabela 3-1). Quanto ao laminado de CPR, como mencionado, optou-se pelo uso do *prepreg* M20 da Hexcel, com fibras G0904, na proporção de 47% em volume. A Tabela 3-2 e a Tabela 3-3 apresentam as características somente das fibras e do material pré-impregnado, respectivamente. Dentre as informações disponíveis na Tabela 3-2 e na Tabela 3-3, que são providas pelo fabricante do material, destacam-se: o tipo de filamento e sua distribuição em massa nas direções das fibras (direção 1 e 2), respectivamente *warp* e *weft*; a gramatura do tecido de reforço em gramas por unidade de área e a sua espessura. Infelizmente, informações adicionais não puderam ser obtidas, uma vez que são tratadas como propriedade intelectual do fabricante. Quanto às informações relevantes ao material pré-impregnado (*prepreg*), tem-se os módulos de elasticidade nas direções 1 e 2, providos pelo fabricante. Entretanto, tem-se conhecimento de que o processo de fabricação influencia fortemente as propriedades mecânicas do material. Dessa forma, fez-se uso dos mesmos valores de propriedades, anteriormente, determinados por Venturini (2010) (Tabela 3-4). Haja vista, que no presente trabalho, optou-se pelas mesmas condições de processamento utilizadas por Venturini (2010).

Tabela 3-1- Propriedades Mecânicas da liga metálica Ti6Al4V (MIL-HDBK-5, 2003).

Titânio (Ti6Al4V)							
Espessura (mm)	σ_{MAX} (MPa)	σ_{ADM} (MPa)	Deflexão (%)	E (GPa)	G (GPa)	υ	ρ^*
0,20 – 0,38	896	827	6	110	43	0,31	4428,5
0,38 – 0,64	896	827	8	110	43	0,31	4428,5
0,64 – 25,4	896	827	10	110	43	0,31	4428,5
25,4 – 76,2	862	793	10	110E3	43	0,31	4428,5

(*) Densidade em quilogramas por metro cúbico.

Tabela 3-2 - Descrição do tecido em fibra de carbono (HEXCEL, 2012).

Reforçadores G0904	
Parâmetro	Dado Técnico Observado
Tipos de Fios	HTA 5131 3K
Peso Nominal	193 g/m²
Tipo de Tecido	Balanceado (Plain Weave)
Comprimento Padrão	1070 mm
Espessura	0,20 mm
Porcentagem de Massa (Direção Principal)	51%

Tabela 3-3 - Propriedades Mecânicas do Prepreg M20/G0904 (HEXCEL, 2010) .

Prepreg Carbon Fiber M20/G0904		
Parâmetro Mecânico	Temperatura do Ensaio	Valor Fornecido
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_1)	RT	65 GPa
Módulo de Elasticidade Transversal (E_2)	RT	65 GPa
Espessura da Lamina	N/A (*)	0,20-0,25 mm

(*) N/A: não aplicável

Conforme abordado, as propriedades do material compósito dependem do processo de fabricação, e estas podem variar consideravelmente de processo a processo, como discutido profundamente no Capítulo 2. Sendo assim, tem-se que a seguir será apresentada a metodologia de fabricação dos corpos de prova em material compósito, bem como, os ensaios realizados, para a determinação de propriedades mecânicas e valores de resistência inerentes ao material compósito obtido em laboratório.

Tabela 3-4 - Propriedades Mecânicas do *Prepreg* M20/G0904 (VENTURINI, 2010) - adaptado.

***Prepreg Carbon Fiber* M20/G0904**		
Parâmetro Mecânico	**Temperatura do Ensaio**	**Valor Medido**
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_1)	RT	41,413 GPa
Módulo de Elasticidade Transversal (E_2)	RT	39,152 GPa
Modulo de Cisalhamento (G_{12})	RT	2,812 GPa
Espessura da Lamina (t)	N/A	0,25 mm
Densidade do Laminado (ρ)	N/A	1540 Kg/m³
Coeficiente de Poisson (υ)	RT	0,107

3.2. METODOLOGIA CIENTÍFICA

A metodologia adotada para este projeto de pesquisa pode ser dividida em dois grandes grupos: Modelagens Computacionais e Ensaios Experimentais (Figura 3-1). Sendo que todas as análises computacionais foram realizadas empregando o programa *Abaqus*.

De maneira geral, como pode ser observado na Figura 3-1, as primeiras etapas do projeto são caracterizadas pela avaliação do problema e definição dos corpos de prova através do emprego de simulações computacionais via Método dos Elementos Finitos (MEF). Sendo assim, com base nos resultados numéricos obtidos, define-se a configuração das juntas "inteligentes" a serem fabricadas, ensaiadas dinamicamente e monitoradas através de sensores piezelétricos.

Paralelamente ao processo de fabricação dos corpos de prova, modelos computacionais contendo os sensores piezelétricos são modelados, para posteriormente terem seus respectivos resultados comparados com as análises experimentais. Por fim, verificam-se as potencialidades e limitações dos modelos gerados, bem como a técnica de monitoramento utilizada.

A fim de facilitar o entendimento da Metodologia Científica empregada, segue assim, uma descrição mais detalhada de cada etapa:

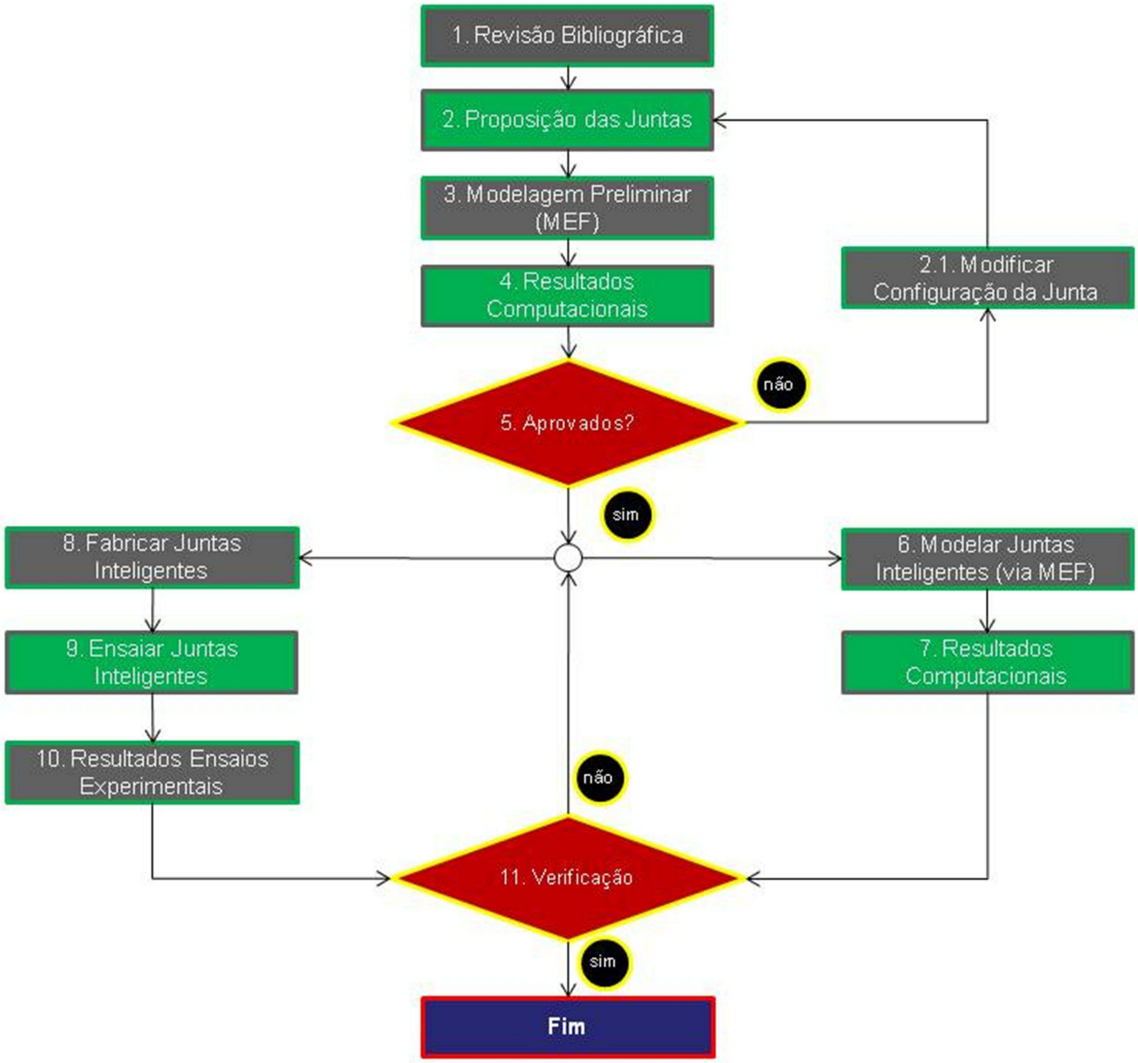


Figura 3-1 - Metodologia Científica Empregada.

1) Revisão bibliográfica e estudo orientado: esta etapa é realizada com o propósito de fundamentar tecnicamente o trabalho. Além disso, nesta etapa foram buscados trabalhos relacionados com o tema em questão e, que tinham sido publicados recentemente, de forma a contextualizar o leitor com as tendências das pesquisas relacionadas com monitoramento de estruturas;

2) Proposição das juntas (definição de parâmetros a serem avaliados): com base nas informações previamente adquiridas, propõem-se o tipo de junta a ser avaliada, bem como parâmetros e materiais a serem empregados. Como já comentado, o presente trabalho versa sobre o tema de juntas híbridas coladas, principalmente pela vasta aplicação nos meios aeronáuticos, e como tendência de solução de reparos em estruturas de material compósito;

3) Modelagem preliminar via Método dos Elementos Finitos: definido o tipo de junta, os materiais empregados e os parâmetros a serem avaliados, executa-se, nesta etapa, a elaboração de modelos computacionais preliminares das juntas híbridas coladas. Dois tipos de modelos são estudados: 1)*Modelos Tipo A*, que tem como propósito realizar um estudo comparativo dos elementos finitos a serem utilizados nas análises, com a junta intacta; 2)*Modelos Tipo B*, que visam prever possíveis problemas de contato durante a análise experimental, com a junta danificada;

4) Resultados computacionais: uma vez simulados os modelos computacionais, faz-se a análise dos resultados, traçando-se as FRFs (Funções de Resposta em Frequência);

5) Checagem dos resultados (Aprovados?): para a avaliação de possíveis incoerências, que possam existir entre os modelos e a literatura, tomam-se como base as curvas de resposta em frequência numéricas da etapa anterior. Esta análise permite estabelecer os requisitos mínimos para a fabricação dos corpos de prova (CDPs), definindo principalmente a geometria a ser empregada, bem como a extensão do dano a ser monitorado. Dessa forma, torna-se possível determinar qual a "melhor" configuração (mais adequados) para os corpos de prova e, portanto, obter conclusões a respeito das juntas a serem fabricadas. Nesta etapa podem ser sugeridas correções e modificações, que se necessárias devem ser implementadas, retroalimentando a Etapa 2 e, posteriormente, subsidiando modificações a serem implementadas na Etapa 3, para posterior reanálise na Etapa 4 (Figura 3-1). É importante notar que o trabalho de análise previamente realizado é capaz de reduzir consideravelmente os custos envolvidos na elaboração de uma matriz de ensaios (tipos de ensaios), permitindo uma análise mais acertada sobre o projeto da junta colada, bem como definindo a extensão do dano a ser monitorado (KAYA, TEKELIOGLU e FINDIK, 2004);

6) Modelar juntas inteligentes (via MEF): definidas as características da junta, segue-se para a modelagem da junta colada, agora monitorada pelo transdutor piezelétrico. Esta etapa consiste basicamente em adicionar, ao modelo das etapas anteriores, uma pastilha piezelétrica, e prepará-lo para o processo de análise computacional;

7) Resultados computacionais: com base nos resultados numéricos, obtém-se as curvas da Função de Resposta em Frequência (FRF). Sendo que as referidas FRFs são geradas, com base no sinal de saída da pastilha piezelétrica. Esta etapa consiste, portanto, em interpretar o sinal proveniente da pastilha, bem como propor possíveis alterações quanto ao seu posicionamento na junta;

8) Fabricar juntas inteligentes: com base na etapa de revisão bibliográfica e nas análises realizadas nas Etapas anteriores, fabrica-se as juntas coladas, seguindo critérios rigorosamente pré-estabelecidos;

9) Ensaiar juntas inteligentes: uma vez fabricadas as juntas inteligentes (monitoradas), bem como as juntas não-monitoradas, submete-se estas a ensaios experimentais dinâmicos para obtenção de resultados necessários para a verificação das potencialidades e limitações dos modelos computacionais previamente propostos e analisados, bem como da técnica empregada para o monitoramento deste tipo de junta;

10) Resultados experimentais: esta etapa consiste basicamente em analisar de forma criteriosa os resultados obtidos através dos ensaios dinâmicos. Portanto, num primeiro momento, obtêm-se as FRFs experimentais e, em seguida, avalia-se com profundidade as curvas medidas, visando detectar com precisão as frequências naturais das juntas híbridas intactas e danificadas;

11) Verificação: nesta etapa compara-se os resultados numéricos com os resultados experimentais, visando discutir as limitações e potencialidades dos modelos computacionais desenvolvidos, bem como, aspectos relacionados com a técnica de SHM aplicada a junções híbridas coladas (Figura 3-1).

3.3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PRELIMINARES

Com o propósito de avaliar o comportamento da junta, antes de iniciar a etapa de fabricação, e desta forma, propor ensaios experimentais mais representativos a um menor custo, faz-se, assim, com base na Metodologia Científica apresentada, o desenvolvimento de alguns modelos preliminares em elementos finitos, ou seja, modelos que não contemplam os sensores piezelétricos. Vale ressaltar que as propriedades de material requeridas para as análises computacionais foram abordadas em trabalhos anteriores desenvolvidos pelo Grupo de Estruturas Aeronáuticas da EESC/USP (VENTURINI, 2010) (MEDEIROS, 2012), conforme explicitado anteriormente. Deve-se destacar, também, que para os modelos preliminares, adotou-se a hipótese de adesão perfeita entre o adesivo e os aderentes, ou seja, o adesivo localizado na região de *overlap* não foi modelado.

As simulações computacionais preliminares consistem basicamente em **dois tipos de Modelos**:

- **Modelos Tipo A:** consiste em modelos sem dano e sem a pastilha piezelétrica, que tem como propósito realizar um estudo comparativo dos elementos finitos a serem utilizados nas análises, bem como prever o comportamento da estrutura proposta. Sendo assim, faz-se uma análise criteriosa de possíveis diferenças de resposta entre os modelos de elementos de casca (*shell*) e sólido (*solid*) para as juntas híbridas, uma vez que as pastilhas piezelétricas devem ser modeladas com elemento tipo sólido e, portanto, necessita-se julgar qual o melhor tipo de elemento para o desenvolvimento das análises posteriores.
- **Modelos Tipo B:** com base nestes modelos, busca-se prever possíveis problemas de contato, que possam ser detectados durante a análise experimental e, consequentemente, aperfeiçoar a forma como os dados podem ser tratados para as juntas danificadas. Para a realização destas análises é necessário utilizar as ferramentas de modelagem de contato, bem como o módulo *Dynamic Implicit* disponíveis no pacote de elementos finitos *Abaqus*.

Modelos Tipo A

Como mencionado anteriormente, os Modelos Tipo A consistem de juntas sem dano e sem a pastilha piezelétrica. Estes modelos serão empregados com o propósito de realizar um estudo comparativo dos elementos finitos, que serão utilizados nas análises, bem como obter uma prévia resposta do comportamento dinâmico da junta a ser construída e utilizada nos modelos posteriores. Além disso, os resultados obtidos com esta simulação devem permitir uma boa estimativa do intervalo de frequências naturais e modos a serem, posteriormente, observados no ensaio experimental.

Utilizando a linguagem *Python* para a programação de um modelo parametrizado, bem como as condições de carga, contorno, material, malha e parâmetros de análise, dois modelos iniciais foram desenvolvidos: um modelo sólido (composto por elementos C3D20 - Abaqus) e um modelo em casca (compostos por elementos S8R - Abaqus), conforme podem ser observadas esquematicamente na Figura 3-2, Figura 3-3 e Figura 3-4.

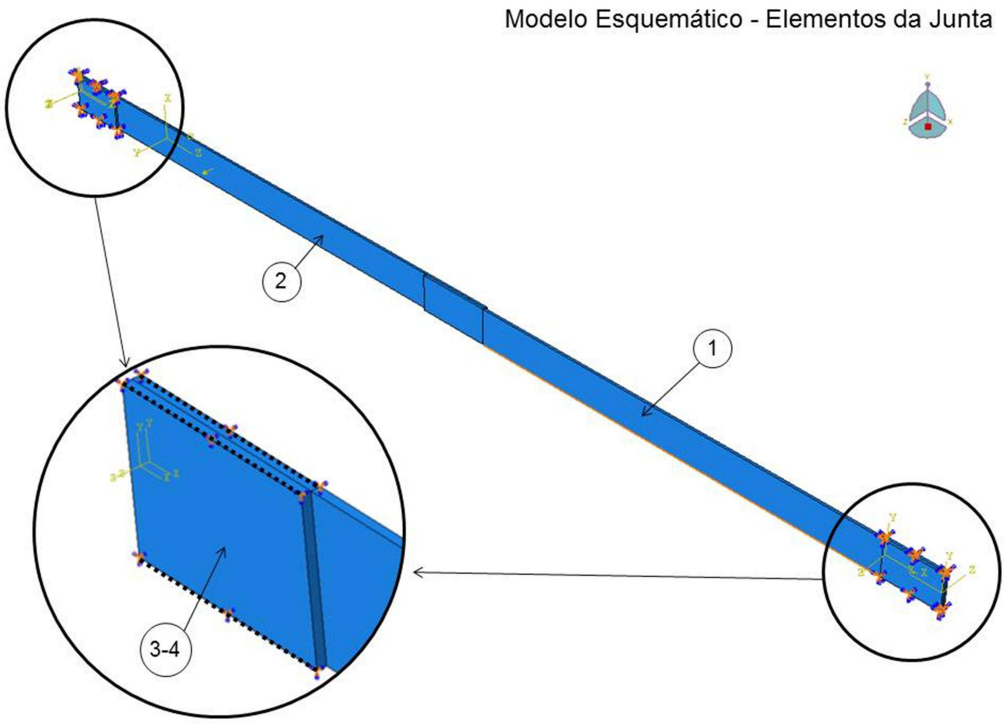


Figura 3-2 - Esquemático do Modelo de Junta e Condições de Contorno.

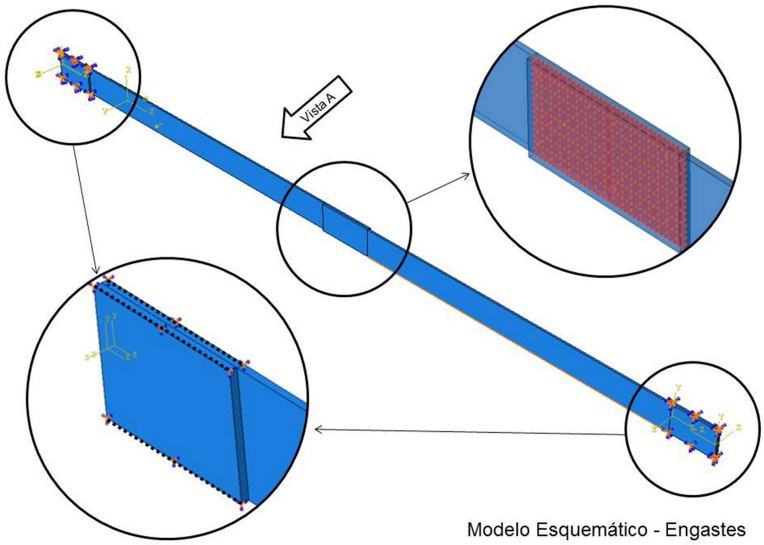
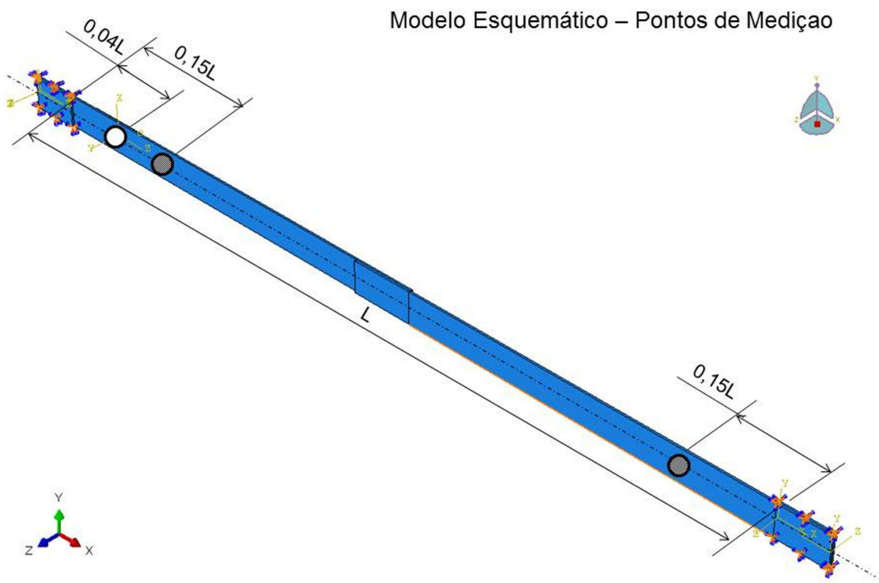


Figura 3-3 - Modelo esquemático da junta – regiões de interação entre aderentes e engaste.



Legenda	
Símbolo	**Descrição**
.....	Engastes
-.-.-.-.-	Linha de Simetria
▭	Área de Colagem
●	Marcação do Acelerômetro
○	Marcação da Excitação
L	Comprimento do Vão Livre

Figura 3-4 - Posicionamento do Nó de excitação (*Shaker*) e do Nó de resposta (Acelerômetro).

Tabela 3-5 - Materiais empregados nas juntas coladas (Figura 3- 2)

Lista de Materiais (Junta Colada Híbrida)		
Identificação	**Descrição**	**Material**
1	Aderente CPR $[0/90]_7$	M20/G0904 (0,25 mm/camada)
2	Aderente de Titânio	Ti6Al4V (1,6mm)
3	Calço de CPR	M20/G0904 (0,25 mm/camada)
4	Calço de Titânio	Ti6Al4V (1,6mm)

Verifica-se pelas figuras supracitadas que modelo computacional encontra-se sob a condição de contorno bi engastada. Esta condição de montagem foi escolhida, principalmente, por ser capaz de representar de forma mais fiel possível às condições de operação segundo a qual a estrutura será submetida. Outro aspecto importante de ser considerado são as possíveis

pré-cargas de montagem, comumente presentes nos processos de fabricação. Para uma montagem engastada-livre, livre-livre ou simplesmente suportada, este efeito de pré-carga não poderia ser observado. Além disso, a condição engastada permite uma melhor leitura dos dados provenientes da pastilha piezelétrica. Isto se explica em função do nível de deformação mecânica ser mais elevado e, portanto, os níveis de voltagem elétrica também serão.

A proposta de desenvolver os modelos em *Python* é feita com o intuito de garantir maior rapidez e versatilidade na variação de parâmetros associados a junções coladas. Por exemplo, têm-se como parâmetros da junta: o comprimento das partes integrantes (aderentes); os parâmetros elásticos destes materiais; o comprimento da sobreposição de colagem (tamanho do *overlap*), entre outros.

Além de parametrizar a construção do modelo da junta, com o propósito de realizar os ensaios dinâmicos computacionais, julgou-se necessário avaliar, na junta, dois pontos importantes: (a) o ponto de excitação da estrutura, a 0,04L do engaste; (b) o ponto de medida do acelerômetro, a 0,15L do engaste, conforme ilustrado na Figura 3-4. Sendo que estes pontos foram propostos com base em experimentos anteriormente realizados por Medeiros (2012).

Inicialmente, as partes da junta foram separadamente modeladas, ou seja, tanto o segmento de titânio, quanto o segmento de CPR foram analisados com restrição tipo fixo-fixo (bi engastado), empregando tanto o elemento s*hell* quanto o elemento *solid,* na tentativa de realizar um análise qualitativa das curvas (Figura 3-5 e Figura 3-6). Com base no resultado obtido através da modelagem dos aderentes em separado, constata-se uma boa coerência das respostas tanto para o elemento *shell* como para o elemento *solid*, permitindo proceder com a análise das juntas propriamente ditas.

A necessidade de checar as FRFs dos aderentes surgiu como resultado de incoerências observadas entre os resultados preliminares obtidos para os modelos *solid* (modelados com elemento denominado C3D8) e *shell* (modelado com elemento denominado S8R) (Figura 3-7). Estes modelos contavam com uma malha menos refinadas e, principalmente, um menor número de nós ao longo da espessura. Além disso, na região de sobreposição (*overlap*), havia dúvidas a cerca da influência do número de graus de liberdade do elemento finito na resposta. Haja vista que o elemento S8R (s*hell*) possui 8 nós, sendo que cada nó possui os 6 graus de liberdade possíveis (ou seja, todas as translações e rotações), ao passo que o elemento C3D8 (*solid*) possui 8 nós, sendo que cada nó possui somente os 3 graus de liberdade de translação.

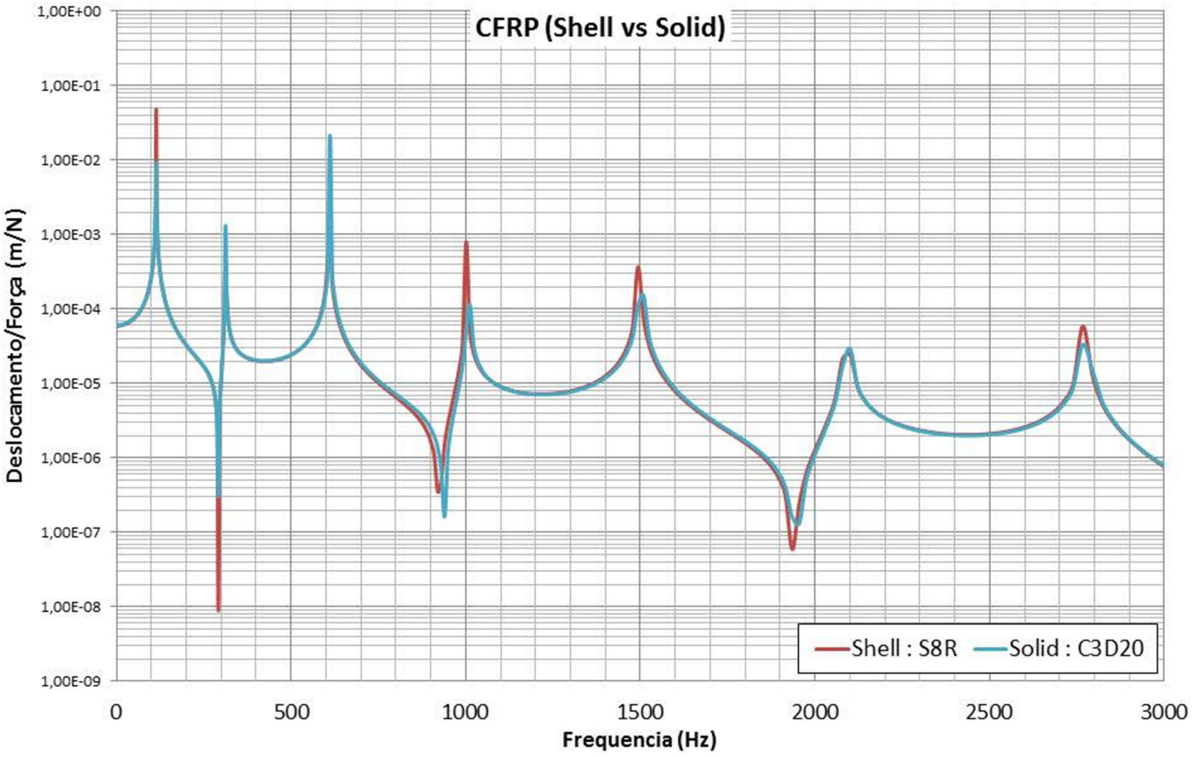


Figura 3-5 - FRF da Subparte CPR: Modelo Casca vs. Modelo Sólido.

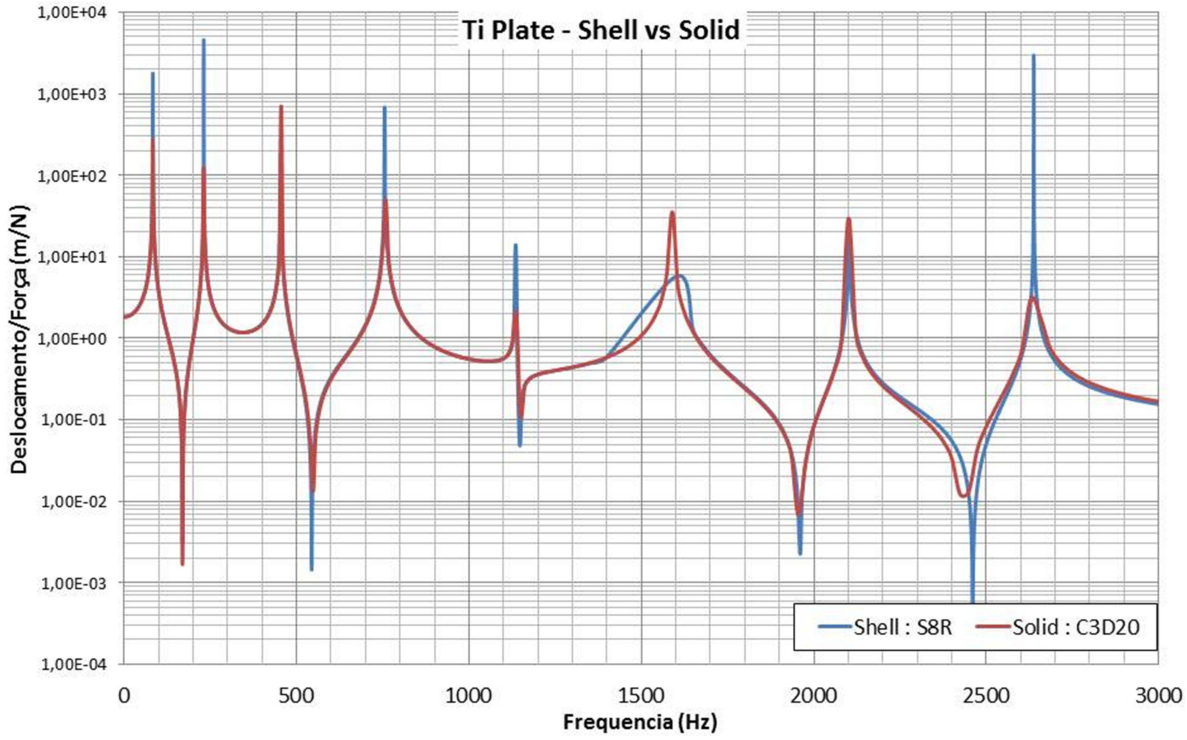


Figura 3-6 – FRF da subparte em Titânio: Modelo Casca vs. Modelo Sólido.

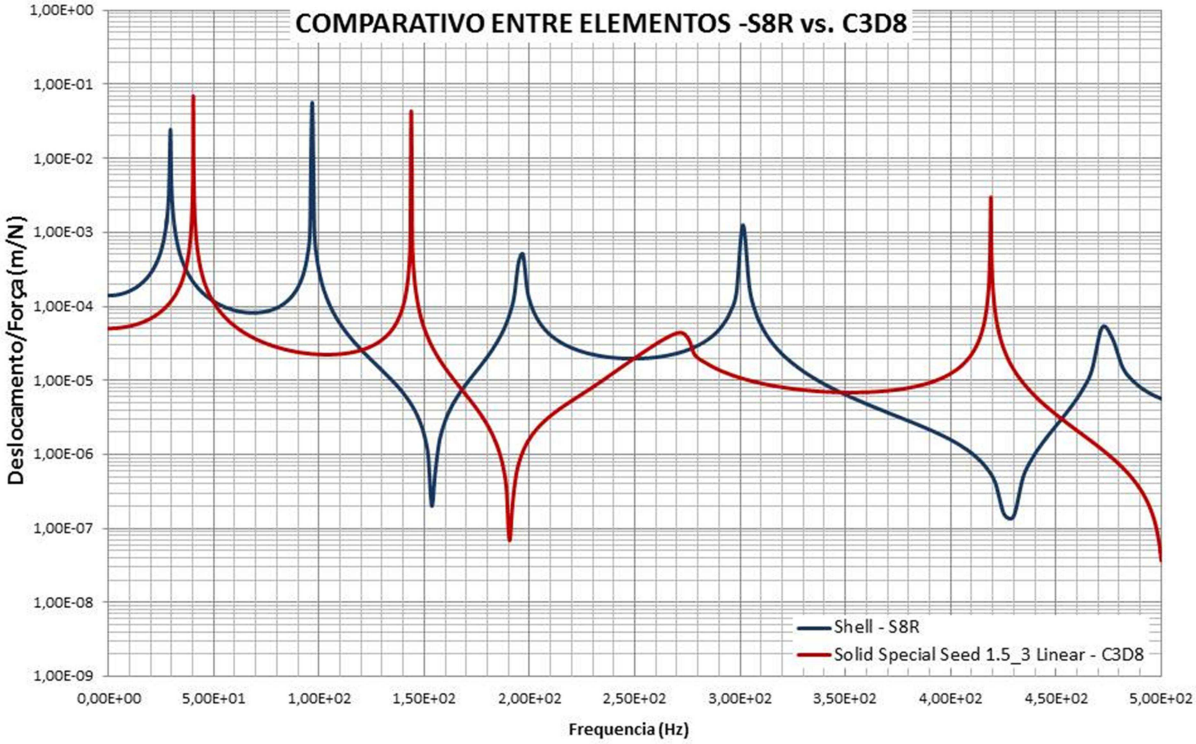


Figura 3-7 - FRFs preliminares das juntas híbridas: Modelo Casca (S8R) vs. Modelo Sólido (C3D8).

À partir das observações supracitadas, e com o propósito de aproximar o máximo possível as respostas, foram propostos os seguintes aprimoramentos ao modelo: (a) aumento da densidade linear de nós, passando de uma distribuição de 0,006 milímetros, para cada 0,003 milímetros; (b) aumento da quantidade de elementos ao longo da espessura, de 1 para 5; (c) utilização de elementos sólidos mais precisos; de C3D8 (função de forma linear) para C3D20 (função de forma parabólica).

Suportados por modelos mais refinados, partiu-se para uma nova checagem dos modelos computacionais propostos para a junta em estudo. Vale ressaltar que estas foram inicialmente parametrizadas em três segmentos principais (com auxilio da linguagem de programação Python): (a) comprimento da região de engaste; (b) comprimento da região útil; (c) comprimento de sobreposição (Figura 3-8). Além destes, outros que se mantiveram constantes ao longo do processo de avaliação também são definidos: (d) espessura dos aderentes, (e) largura da junta, (f) identificação das orientações das camadas.

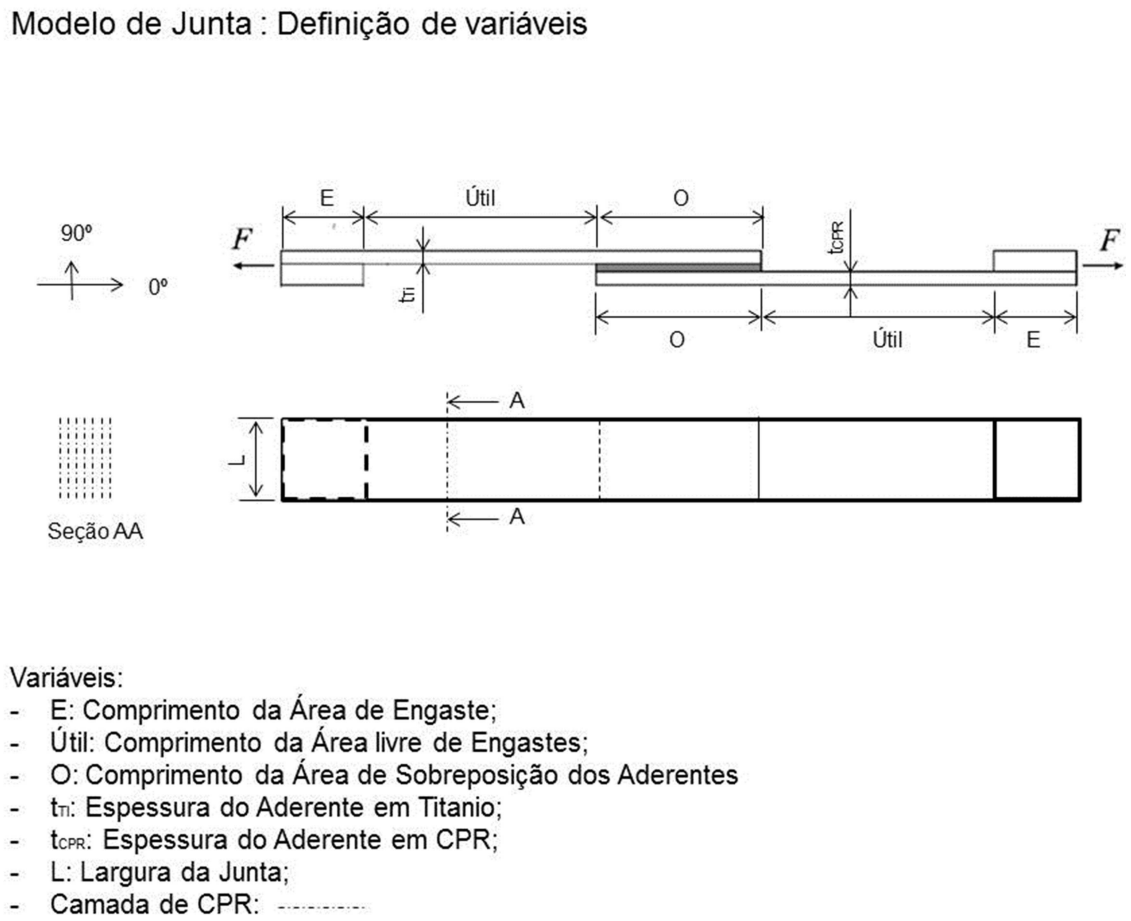


Figura 3-8 - Parâmetros da Junta para programação em Python.

Em primeira instância, o comprimento da área de sobreposição ("O") foi mantido em 50,8 milímetros, o comprimento da região de engaste ("E") em 20 milímetros e o comprimento da área útil ("Útil") em 200 milímetros, garantindo, assim, a mesma razão de comprimento entre engastes proposta por Ribeiro (2009). Com a definição dos elementos finitos, da densidade de nós, a razão entre *overlap* e o comprimento do CDP (corpos de prova), propõe-se um modelo com 200 mm de comprimento útil (Figura 3-8). Tal modelo é chamado de Modelo 200 e, gera como resposta a curva FRF da Figura 3-9, obtida a partir do algoritmo de análise *Steady State Modal* do pacote de elementos finitos *Abaqus*. Vale ressaltar que o referido algoritmo é capaz de prover curvas de resposta em frequência, independentemente do tipo de excitação.

Verifica-se, portanto, que de maneira geral, há boa correlação entre o modelo *shell* e *solid*. Todavia, observam-se ainda, pequenas variações entre os resultados, muito provavelmente em razão da região de sobreposição, pois, é um local de enrijecimento da junta (Figura 3-9).

Com base no fato de que o modelo ainda se encontra na fase inicial de desenvolvimento, alterações para o comprimento da área útil são arbitradas, com o propósito principal de avaliar a influência do comprimento do vão-livre (*span*) no comportamento dos modelos.

É importante notar que quanto menor a distância entre os engastes, maior serão as rotações existentes em cada elemento, havendo assim um incremento do efeito de cisalhamento transversal (*transverse shear effect*). Além disso, há também o incremento da contribuição do grau de liberdade em rotação, que do ponto de vista do ensaio experimental dinâmico pode ser mais complexo de ser observado, uma vez que muitos acelerômetros são capazes de realizar apenas medições axiais aos seus eixos principais, deixando, portanto, as acelerações angulares sem medição apurada, o que pode resultar em redução da acuracidade no ensaio experimental for realizado. Somado aos efeitos de rotação, a junta com menor vão livre estará, proporcionalmente, mais sujeita a influência do enrijecimento (localizado) causado pela região de *overlap*.

Conclui-se, portanto, que juntas mais longas apresentam mais deslocamentos e menos rotação, proporcionando assim melhor coerência entre os modelos sólidos e casca, a medida em que o comprimento da junta se eleva. Além disso, espera-se uma redução dos efeitos de enrijecimento causados pela região de sobreposição. Vale mencionar que o enrijecimento localizado desta área impossibilita que as deformações observadas ao longo do aderente, até à região de fronteira com a área de colagem, sejam iguais. Nesta região, portanto, induz-se mais rotação e menores deformações normais. Sendo assim, tem-se que o modelo sólido será ineficiente para monitorar estes graus de liberdade.

Com base na Tabela 3-6, observa-se que o modelo sólido é aparentemente mais rígido do que o modelo em casca (para um comprimento útil igual a 200 mm), e a razão para esta diferença se deve principalmente pela ausência dos graus de liberdade de rotação.

Com a finalidade de comprovar as observações supracitadas a cerca do comprimento da região de sobreposição, outros modelos foram analisados (Tabela 3-7), avaliando-se mais dois modelos do tipo A, respectivamente com o comprimento da área útil igual a 50 mm (Modelo 50) e 300 mm (Modelo 300).

É importante observar que a mesma metodologia de análise utilizada para o modelo 200, tanto para a obtenção dos valores de frequência natural, quanto para o cálculo do valor de diferença entre as respostas dos modelos, foram novamente utilizadas.

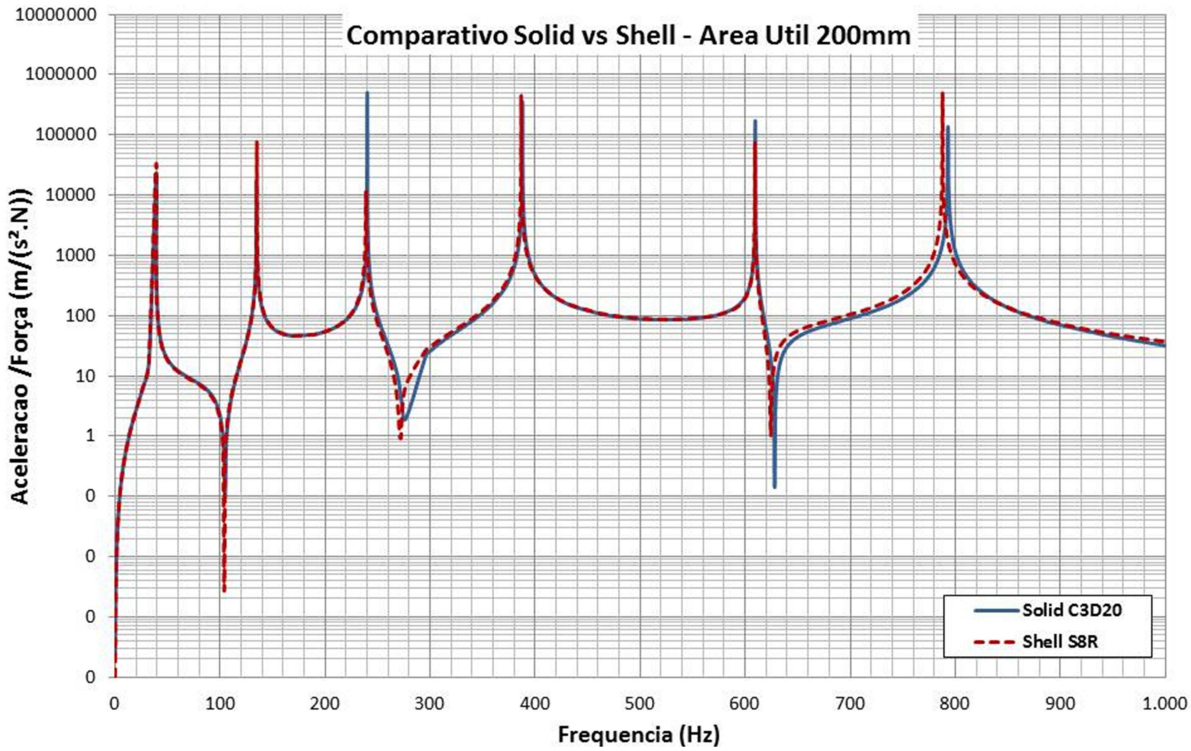


Figura 3-9 - Curvas de Resposta em Frequência para o Modelo 200: Modelo *Shell* vs Modelo *Solid*

Tabela 3-6 - Modelo *Solid* vs. Modelo *Shell* - comprimento útil 200 mm.

Comparação : Solid vs. Shell – *Span* 200 mm			
No. do Modo	Frequências Naturais (Hz)		Diferença (%)(1)
	Shell	*Solid*	
1º	38,976	39,163	0,478
2º	135,09	134,81	0,207
3º	238,93	240,23	0,542
4º	341,19	341,39	0,058
5º	386,73	387,94	0,312

(I) Diferença – calculada segundo a seguinte equação: $2.\left(\frac{\omega_{Shell}-\omega_{Solid}}{\omega_{Shell}+\omega_{Solid}}\right)$

Com o resultado da análise dos novos modelos, observa-se que o Modelo 50, apesar da boa coerência entre as FRFs, acentuou-se a diferença entre os modelos sólido e em casca, quando se comparam as diferenças percentuais das frequências naturais (Tabela 3-8). Além disso, as frequências naturais se elevaram consideravelmente, algo que pode dificultar a realização do ensaio experimental.

Tabela 3-7 - Modelos Computacionais Propostos para Análise da Junta Intacta.

Modelos Computacionais e Parâmetros Geométricos			
Parâmetro	**Modelo 300**	**Modelo 200**	**Modelo 50**
Comprimento "E'	20 mm	20 mm	20 mm
Comprimento "Útil"	300 mm	200 mm	50 mm
Comprimento "O"	50,8 mm	50,8 mm	50,8 mm
Entre Engastes ("*span*")	650,8 mm	450,8 mm	150,8 mm
Razão: "span" / "O"	**12,81**	**8,87**	**2,97**

Por outro lado, o Modelo 300 (Figura 3-11) reduziu a diferença entre as FRFs e, permitiu melhor coerência entre os valores de frequência natural. Ainda que algumas variações existam, estas se comportam de forma bastante uniforme ao longo da curva de resposta como um todo. As pequenas diferenças observadas entre o Modelo 300 sólido e em casca deve-se, basicamente, à ausência dos graus de liberdade de rotação nos elementos sólidos, conforme previamente elucidado.

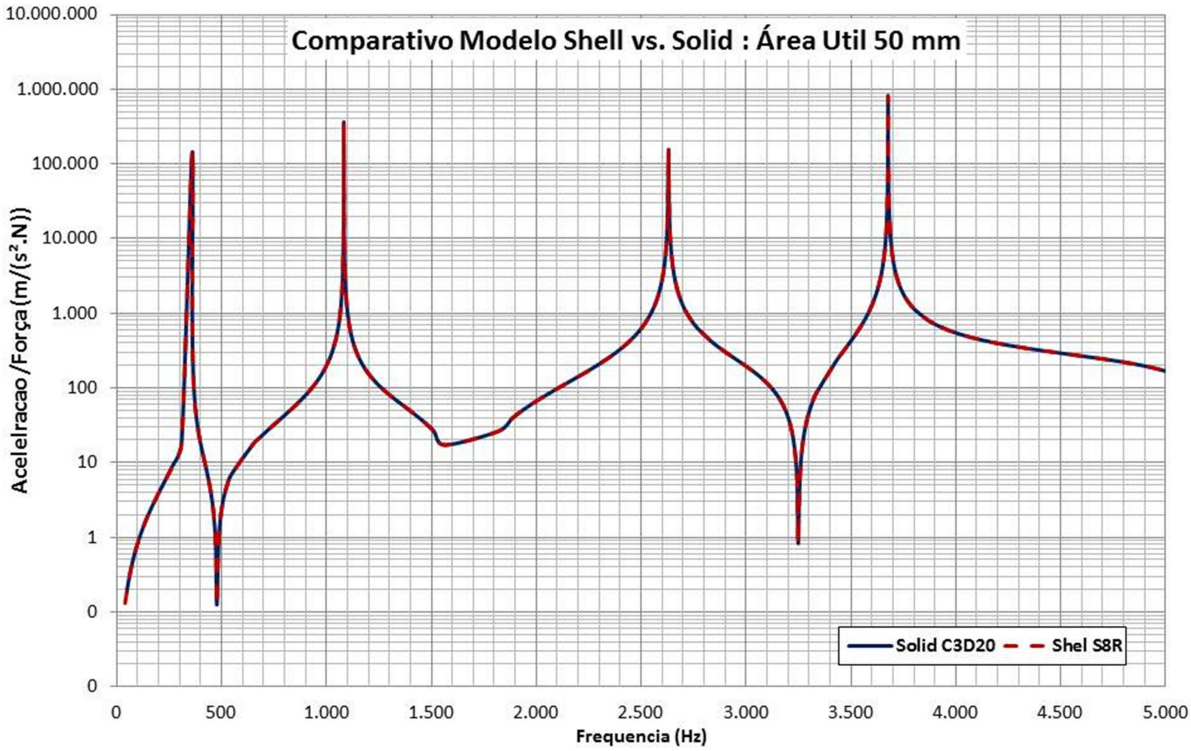


Figura 3-10 - Curvas de Resposta em Frequência para o Modelo 50: Modelo *Shell* vs Modelo *Solid*

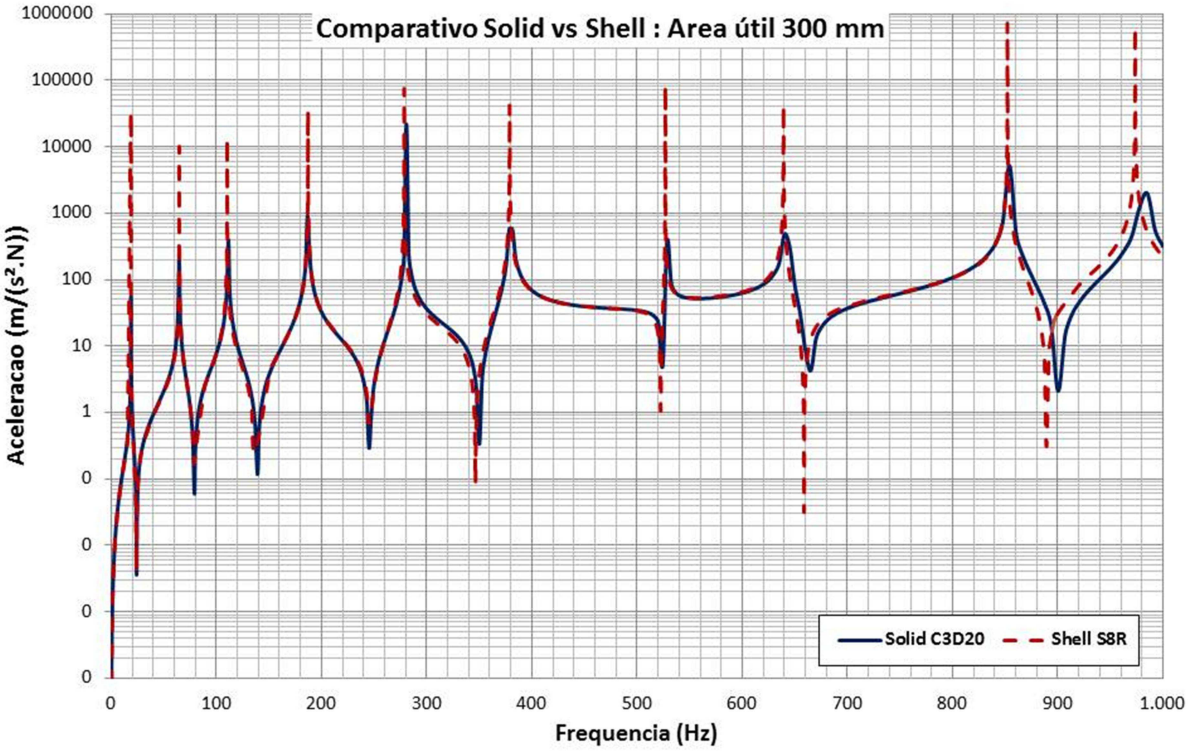


Figura 3-11 - Curvas de Resposta em Frequência para o Modelo 300: Modelo *Shell* vs Modelo *Solid*

Tabela 3-8 - Modelo *Solid* vs. Modelo *Shell* - comprimento útil 50 mm.

Comparação : *Solid vs. Shell – Span* 50 mm			
	Frequências Naturais(Hz)		
No. do Modo	***Shell***	***Solid***	**Diferença (%)(1)**
1º	349,76	359,48	2,740
2º	990,19	990,88	0,069
3º	1056,2	1083	2,505
4º	2660,6	2630,4	1,141
5º	2957,5	2982,7	0,848

(I) Diferença – calculada segundo a seguinte equação: $2\cdot\left(\frac{\omega_{Shell}-\omega_{Solid}}{\omega_{Shell}+\omega_{Solid}}\right)$

Tabela 3-9- Modelo *Solid* vs. Modelo *Shell* - comprimento útil 300 mm.

Comparação : *Solid vs. Shell – Span* 300 mm			
	Frequências Naturais (Hz)		
No. do Modo	*Shell*	*Solid*	Diferença (%)(1)
1º	18,745	18,828	0,442
2º	64,694	64,518	0,272
3º	110,29	111,24	0,858
4º	187,13	187,02	0,059
5º(*)	234,65	235,82	0,497
6º	261,5	264,89	1,288

(I) Diferença – calculada segundo a seguinte equação: $2.\left(\frac{\omega_{Shell}-\omega_{Solid}}{\omega_{Shell}+\omega_{Solid}}\right)$

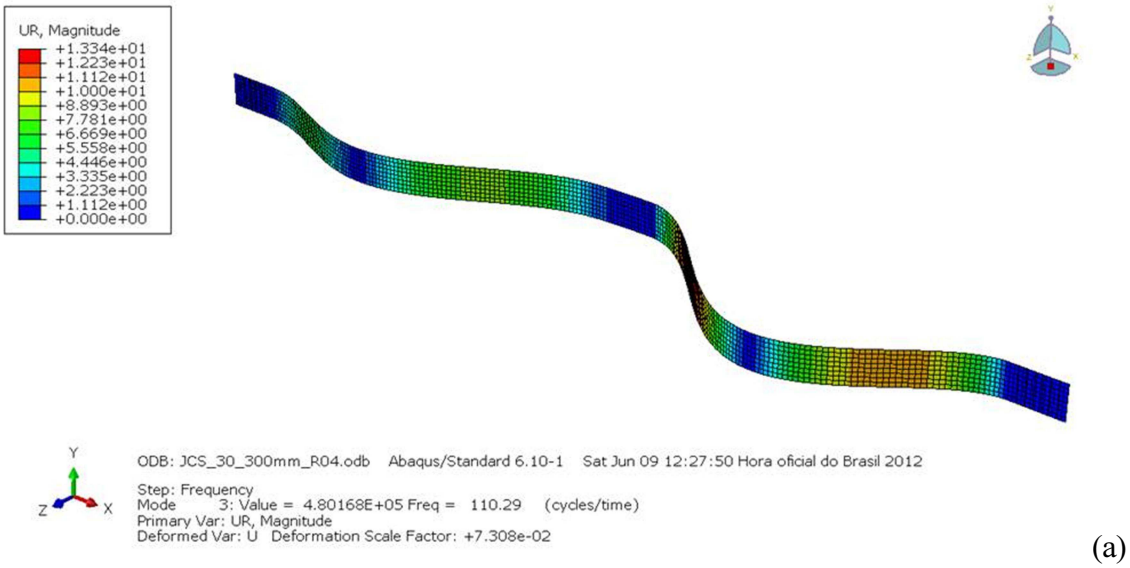
(*)Modo de Torsão.

Tabela 3-10 - Diferença em Hertz entre as frequências naturais dos modelos *Shell* e *Solid*, 200 e 300.

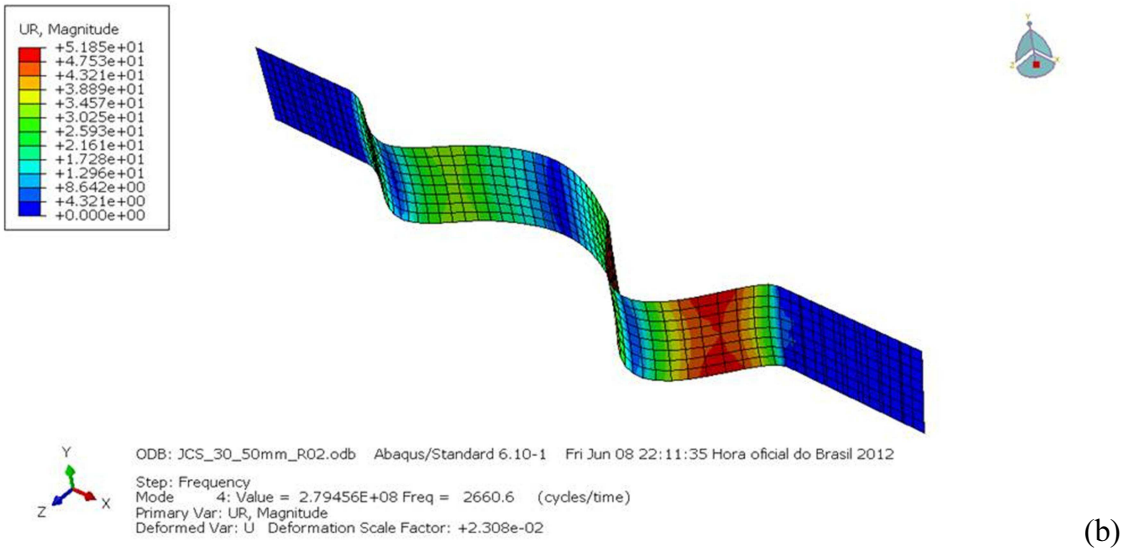
Comparação : Modelo 300 e Modelo 200		
No. do Modo	Diferença entre Frequências Naturais dos Modelos *Shell* e *Solid*	
	$\Delta\omega_{(200)}$	$\Delta\omega_{(300)}$
1º	0,187	0,083
2º	0,28	0,176
3º	1,3	0,95
4º	0,2	0,11
5º(*)	1,21	1,17
6º(*)	6,61	3,39

(*)Modo de Torsão.

O aumento do vão livre reduziu consideravelmente o efeito de rotação, principalmente no entorno da área de sobreposição (Figura 3-12), e nas regiões dos engastes, que são locais de grande concentração de tensão (Figura 3-2). Ademais, pela Figura 3-13, verifica-se que a rotação na região do engaste aumenta à medida que o vão livre diminui.



(a)



(b)

Figura 3-12 - Diferenças de Rotação entre modos Semelhantes - Modelo 50 e Modelo 300.

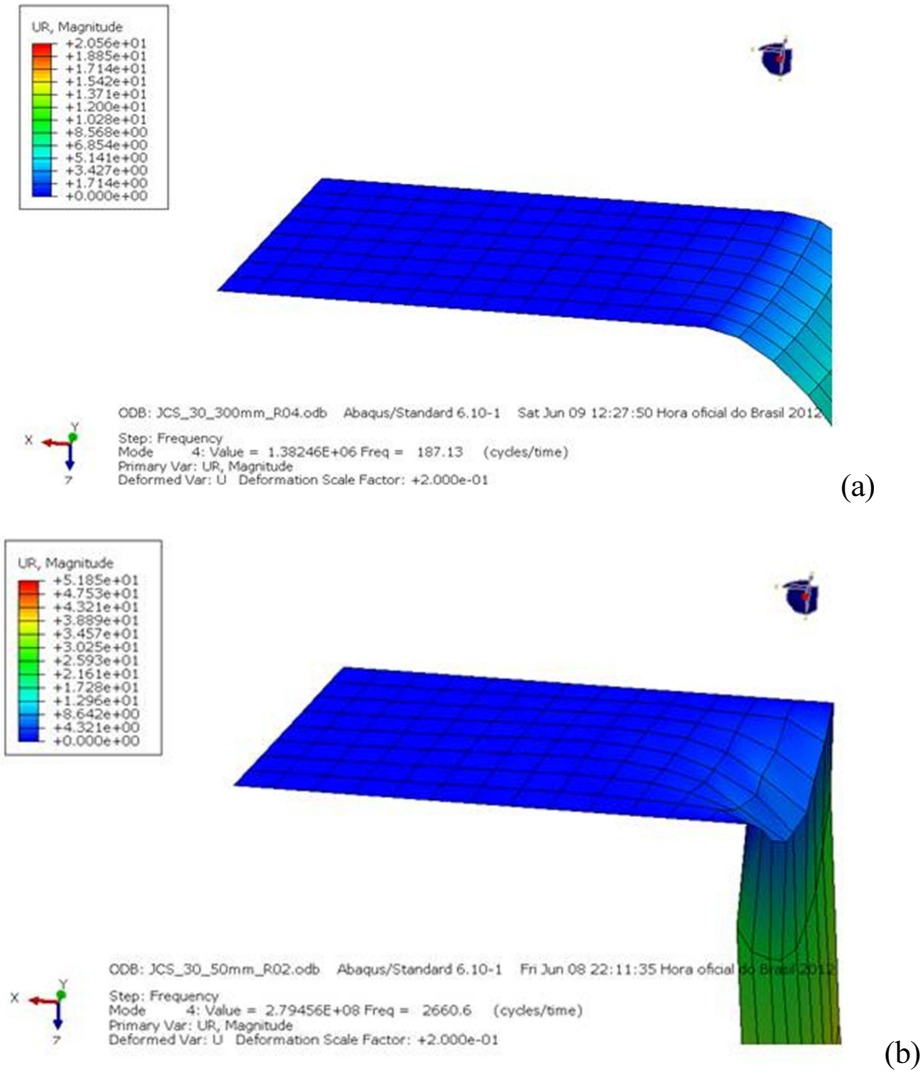
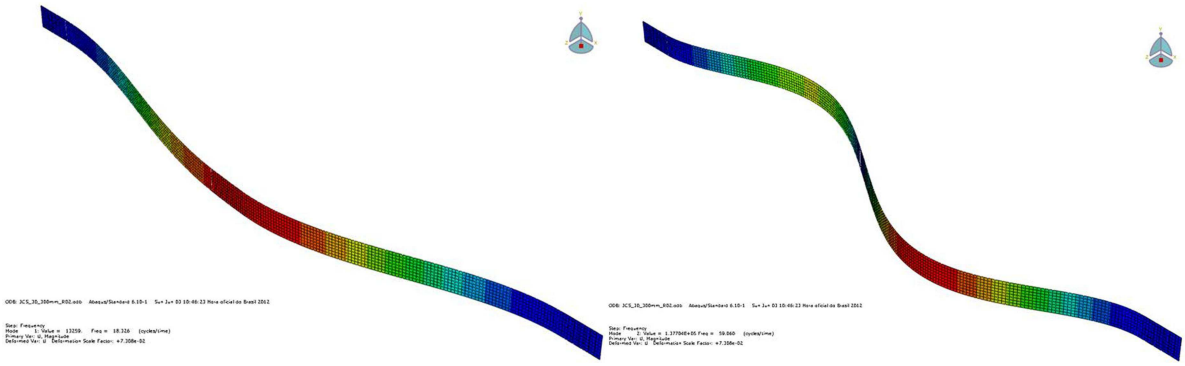


Figura 3-13 - Rotações observadas próximas aos engastes: (a)Modelo 300, (b)Modelo50.

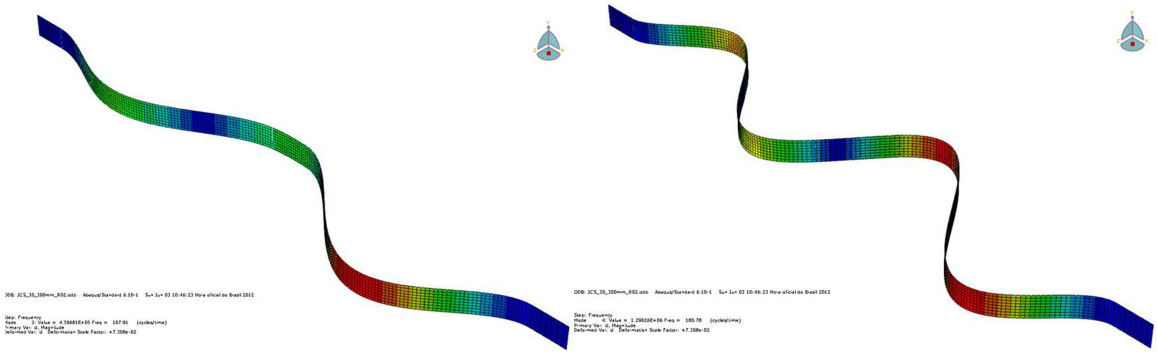
Conclui-se, portanto, através da avaliação das diferenças percentuais calculadas para cada Modelo (200, 300 e 50) (Tabela 3-8 e Figura 3-9), bem como com base nas variações entre as frequências naturais obtidas para cada tipo de elemento (*Shell* ou *Solid*) (Tabela 3-10), que o aumento do comprimento da área livre ("útil") reduz a relevância introduzida pela área de sobreposição no comportamento dinâmico do modelo. Observa-se que quanto maior a razão entre a distância dos engastes e o comprimento da região de sobreposição, menor a divergência entre as curvas FRF providas pelo modelo em elemento sólido e em casca. Sendo assim, menores são as diferenças entre as frequências naturais encontradas. Outra observação importante é que seja o modelo criado com elementos sólidos ou em casca, tem-se que os resultados encontrados apresentam boa coerência. Dessa forma, desde que garantida uma discretização do contínuo através de uma malha de elementos finitos adequada, constata-se que

as análises podem ser conduzidas tanto com elemento casca quanto com sólido sem haver perda de qualidade nos resultados, principalmente, para um *span* igual a 300 mm. Os resultados gráficos, dos modos de vibrar, obtidos para o Modelo 300, com elemento casca, podem ser observados na Figura 3-14, Figura 3-15 e Figura 3-16.



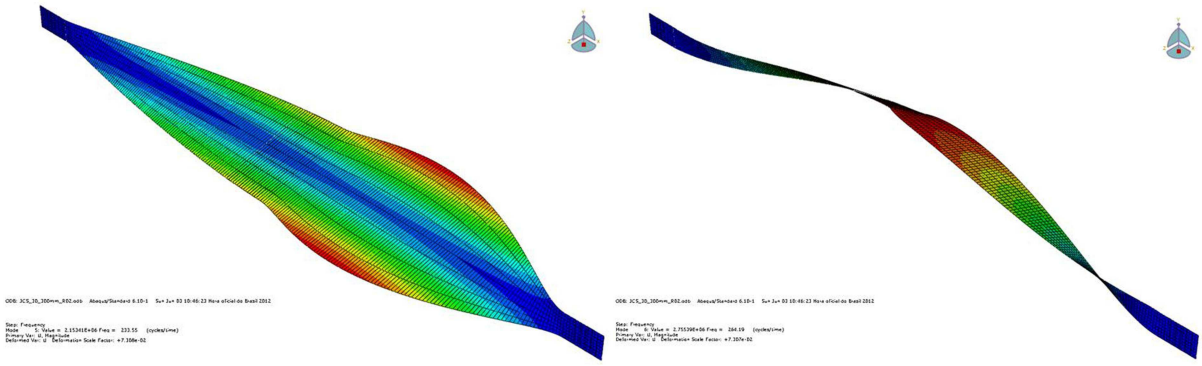
(a) (b)

Figura 3-14 - Modos de Vibrar do Modelo 300: (a) primeiro modo; (b) segundo modo.



(a) (b)

Figura 3-15 - Modos de Vibrar do Modelo 300: (a) terceiro modo; (d) quarto modo.-



(a) (b)

Figura 3-16 - Modos de Vibrar do Modelo 300: (a) quinto modo; (b) sexto modo.

As observações supracitadas, a respeito do comprimento dos CDPs, são importantes no sentido de garantir que a proposta de fabricação abranja diferentes possibilidades de ensaio e, consequentemente, permitam explorar tanto quanto possível as potencialidades de cada CDP fabricado. O comprimento do vão livre e sua relação com o comportamento dinâmico dos modelos demonstra a necessidade de levar em consideração a fabricação de CDPs com comprimento da área útil de 300 milímetros. Sendo assim, propõe-se que os CDPs sejam confeccionados conforme proposto na Figura 3-17, que evidencia a geometria a ser ensaiada.

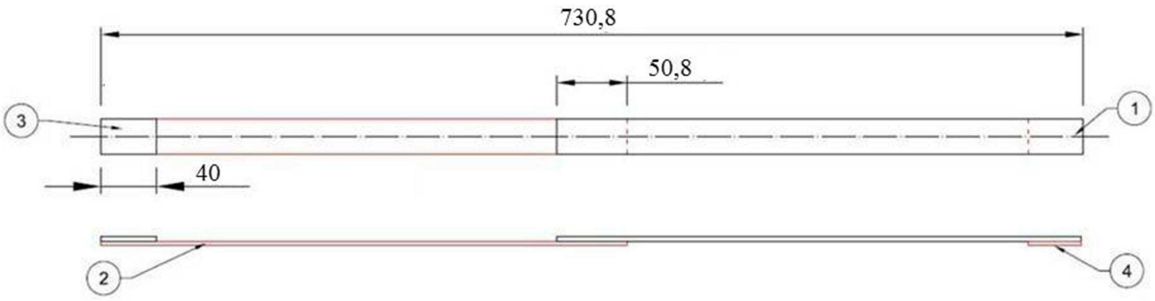


Figura 3-17 - Geometria de Corpos de Prova Propostos para Análise das Juntas Coladas Intactas.

Além das conclusões mencionadas, pode-se também observar que o esforço computacional necessário para realizar as modelagens com elementos sólidos deve ser fator preponderante, no sentido de rever a necessidade real de utilizar este tipo de elemento para toda a junta. É importante ressaltar que o modelo sólido se faz essencialmente necessário apenas na modelagem do filme adesivo, que une os aderentes, e da pastilha piezelétrica de monitoramento.

Modelos Tipo B

Como mencionado anteriormente, os Modelos Tipo B buscam prever possíveis problemas de contato, que possam ser detectados durante a análise experimental e, consequentemente, visam aperfeiçoar a forma como os dados podem ser analisados para as juntas danificadas.

Neste momento, é importante destacar que os modelos computacionais, que envolvem a modelagem de contato, não estão disponíveis para o algoritmo de análise modal convencional disponível no *Abaqus* (*Steady State Modal*). Ou seja, para estas análises com dano, utiliza-se outro algoritmo de análise dinâmica, que pode ser com integração implícita ou explícita. Tais algoritmos estão disponíveis no programa *Abaqus* e, são designados como: *Dynamic Implicit ou Dynamic Explicit.* Outro aspecto importante a respeito da análise do Modelo B está na análise dos resultados obtidos, pois, as análises dinâmicas são preferencialmente realizadas no domínio da frequência, enquanto que os resultados dos modelos computacionais processados pelo módulo *Dynamic Implicit* do programa *Abaqus* são calculados no domínio do tempo. Em sendo assim, com o propósito de adequar as curvas à necessidade da análise, deve-se aplicar a Transformada de Fourier ao sinal de tempo. Todavia, para isso é importante que o sinal de deslocamento em função do tempo seja discretizado em intervalos (de tempo) pré-definidos e, igualmente espaçados, usando o mesmo princípio empregado nos analisadores de frequências digital para transformar um sinal analógico num sinal digital (Figura 3-18) (MCCONNEL e VAROTO, 2008). Ademais, a discretização do sinal deve ser feita de maneira que os intervalos não sejam demasiadamente longos, de forma a comprometer o contorno da curva contínua de deslocamento em função do tempo – proveniente do sinal "analógico" – nem demasiadamente curtos, exigindo elevada quantidade de memória e capacidade de processamento tornando a análise demasiadamente longa e complexa de ser processada.

O processo de discretização segue, conceitualmente, os princípios da Figura 3-18, onde as funções x(t), w(t) e s(t) são respectivamente as funções que descrevem o sinal de saída ou a resposta dinâmica do conjunto expresso em função de aceleração, deslocamento ou voltagem; a janela de amostragem que representa o intervalo de tempo segundo o qual a análise é conduzida, neste caso o intervalo de tempo entre o momento de aquisição do primeiro e do último ponto; e a amostragem que representa a frequência de aquisição ou a que taxa os pontos são capturados. Observa-se também que todos os sinais estão em função do tempo.

Outro aspecto importante, relacionado à amostragem de dados, segundo a qual a Transformada de Fourier deve ser aplicada, é a quantidade de pontos que devem ser coletados.

Geralmente faz-se uso de 2^{12} ou 2^{13} pontos, sempre na base 2. Para o processamento deste estudo, julga-se que 2^{12} pontos associados a uma janela de amostragem de 0,5 segundos sejam suficientes para uma boa representação do sinal contínuo – analógico e, consequentemente, para a obtenção da curva de função de resposta em frequência (FRF).

Além da configuração da quantidade de pontos (4096) e da frequência de amostragem (8192 Hz), é importante determinar qual a forma mais eficiente de se excitar a estrutura em estudo para a geração da FRF. Para determinação da estratégia de excitação, recomenda-se modelar a junta com vibração livre ou forçada. No caso da vibração forçada, as seguintes frequências são arbitradas: 3000 Hz, 4000 Hz, 5000 Hz e 6000 Hz. A vibração livre será simulada por meio de um pulso unitário aplicado na mesma região onde será dada a entrada através de um martelo de impacto (empregado nos ensaios experimentais).

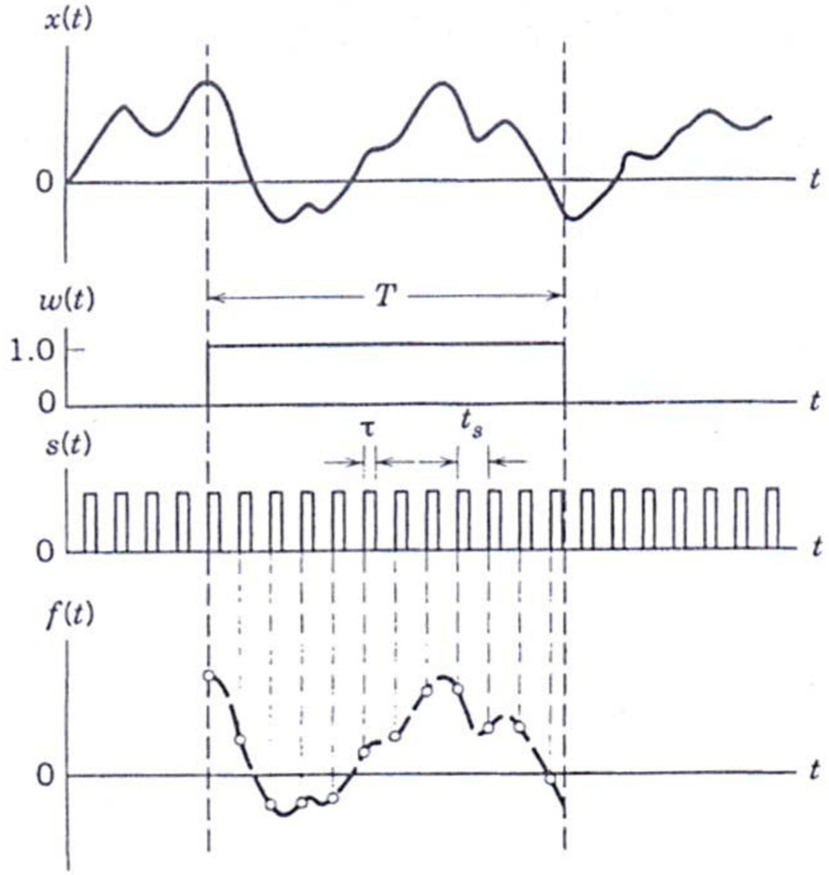


Figura 3-18 - Processo de discretização de um sinal analógico (MCCONNEL e VAROTO, 2008).

A ferramenta computacional utilizada para a aplicação da Transformada de Fourier é o Excel®, e a formatação da saída de dados, configurada no *Abaqus* 6.10 - *Dynamic Implicit* – é de aceleração em função do tempo, organizados em duas colunas, conforme exposto na Tabela

3-11. A Transformada de Fourier, portanto, é aplicada ao sinal de entrada e saída, para que se obtenham as FRFs da estrutura.

Tabela 3-11 - Saída de Dados das Análises realizadas em Abaqus.

MODELO DE SAÍDA DE DADOS: ABAQUS 6.10 (*Dynamic Implicit*)	
t_s(s)	f(t) (aceleração- m/s²)
1.53147E-008	2.70867E-005
3.06043E-008	2.70867E-005
4.58134E-008	2.70867E-005
6.13789E-008	2.70867E-005

Quanto ao domínio da frequência, este deve ser calculado conforme a equação (47) pela razão entre o intervalo de tempo da janela de amostragem e o intervalo de incremento:

$$\Delta f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{T} \tag{47}$$

Uma vez calculadas as Funções Transferência (FTs) para os pontos de interesse, e o espaçamento das frequências, projetam-se as FTs sobre o eixo imaginário a fim de se obter as FRFs. Então, as respectivas FRFs são comparadas entre si e, consequentemente, determina-se qual a melhor forma de abordar o problema dinâmico em questão.

Teoricamente a detecção do dano deve ser feita ao analisar as FRFs, mais especificamente pela variação das frequências naturais de cada junta, intacta e danificada. Assim, serão realizados dois tipos de análise: 1) A análise dinâmica da estrutura intacta, para obtenção do modo de vibrar dinâmico, bem como parâmetros que facilitem a obtenção das frequências naturais adequadas – por meio do algoritmo *Dynamic Implicit*; 2) A análise dinâmica implícita da estrutura danificada, com o propósito de rastrear possíveis modificações nas frequências naturais e/ou no modo de vibrar da estrutura danificada por meio do algoritmo *Dynamic Implicit*.

Referente à análise dinâmica da estrutura intacta, nota-se que diferentes curvas são encontradas dependendo da forma que a estrutura é estimulada. Dentre as formas propostas

anteriormente, tem-se que o ensaio por pulso unitário (*Step Unit*), bem como a excitação forçada com frequência de 3000 Hz são as melhores formas de excitar. Pois, pode-se estimular a estrutura para se obter as frequências naturais iniciais, ou seja, as frequências mais importantes e, portanto, consideradas nos projetos de engenharia (Figura 3-19). Em sendo assim, adotar-se-á o pulso unitário ou a excitação de 3000 Hz nos ensaios experimentais, com preponderante inclinação para o pulso, uma vez que a inserção de um excitador poderá comprometer a qualidade das curvas.

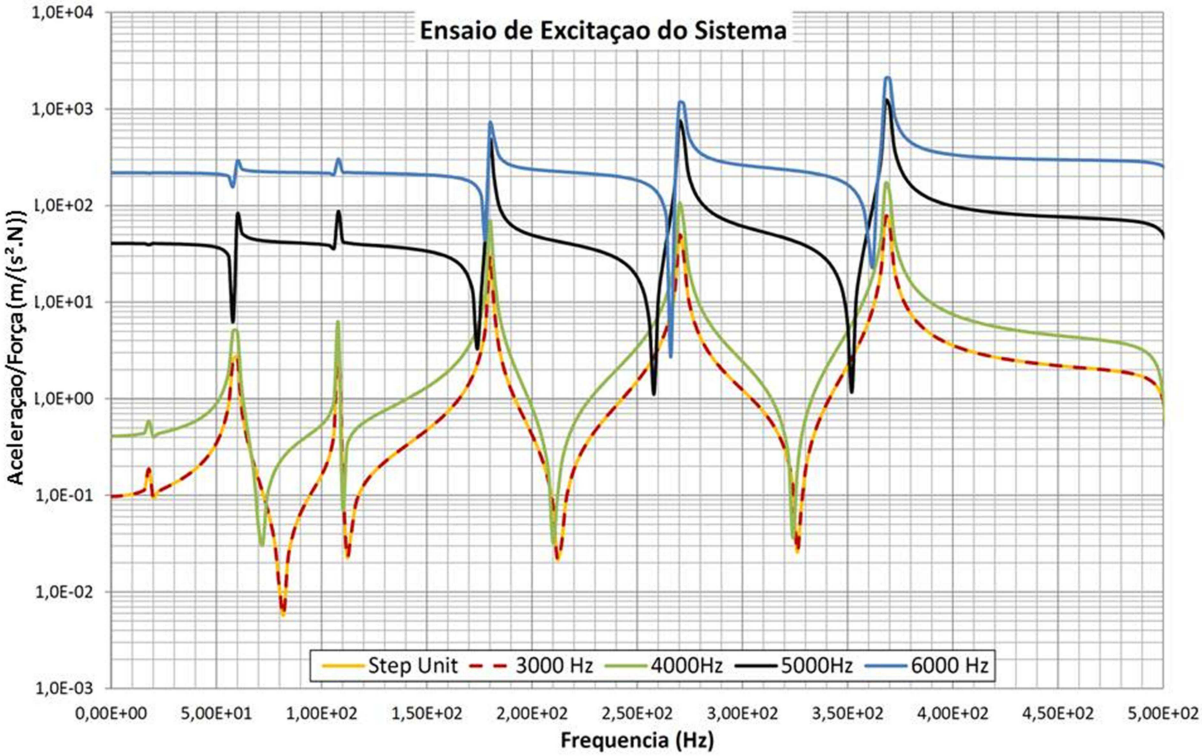


Figura 3-19 - FRF segundo diferentes formas de excitação estrutural – junta intacta.

Conforme previamente mencionado, outra fonte de indução de erro importante a ser considerada na realização da modelagem dinâmica é a taxa de amostragem segundo a qual o equipamento de monitoramento deve ser configurado. Isto deve ser criteriosamente avaliado para que não haja perda de coerência entre os valores de frequência natural medido e aquele obtido na análise computacional. Verifica-se que maiores serão os erros quanto menores forem as taxas de aquisição configurada, conforme prevê McConnel e Varoto (2008), bem como os ensaios realizados com modelos da junta e explícitos na Figura 3-20 .

Desta forma, recomenda-se manter a taxa de amostragem não menor do que 8192 Hz, com o propósito de evitar que as medidas até 1000 Hz sejam comprometidas. Ademais, as medidas estarão limitadas superiormente em 1200 Hz devido à capacidade de monitoramento e cálculo dos modelos computacionais propostos, bem como à capacidade de capturar os pontos de antirressonância, como mostra a Figura 3-20.

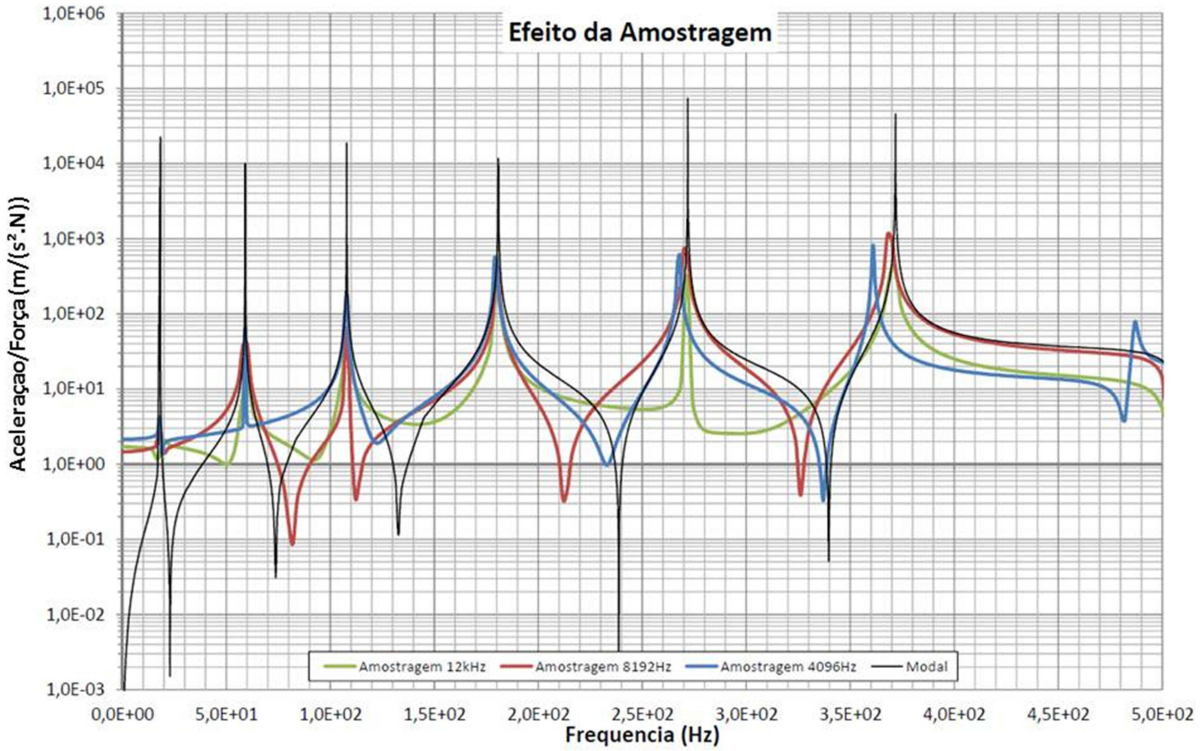


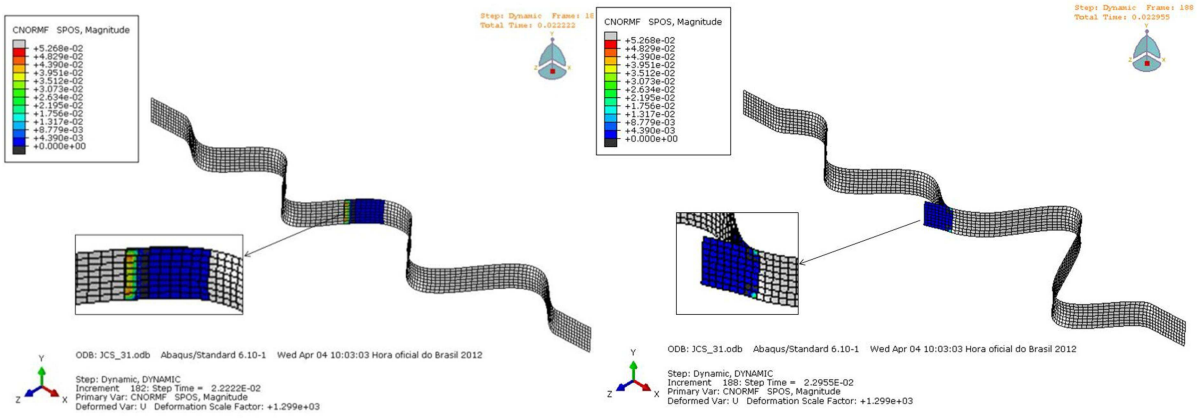
Figura 3-20 - FRFs para diferentes amostragens – junta intacta.

É importante observar que uma vez danificada, parte da junta perderá a capacidade de transferir carga e, portanto, deverá se movimentar livremente sobre o aderente ao qual a outra extremidade ainda permanece unida. Assim, a porção descolada da junta deve ser modelada não somente como incapaz de transferir carga num dado sentido, porém com possibilidade de transferir carga ao entrar em contato com a outra porção, de forma a não haver interpenetração de material das partes que compõem a junta. No *Abaqus* 6.10, apenas os algoritmos de análise dinâmica implícita ou explícita são capazes de realizar tal tarefa. Para o Modelo 300 (discutido anteriormente), apesar do esforço computacional necessário para o processamento do mesmo, optou-se pelo emprego do processo de análise dinâmica implícita, juntamente com o modelo de contato *Surface Standard* (já implementado no programa *Abaqus*).

Uma vez propostos os modelos computacionais, bem como as diferentes configurações possíveis para obtenção da resposta dinâmica, diferentes parâmetros passíveis de alteração podem ser avaliados através das curvas de resposta em frequência, por comparação dos valores de frequência natural obtidos da junta referência e da junta modificada.

O modelo selecionado para as análises computacionais é do tipo *shell* (Figura 3-2), em função principalmente do esforço computacional necessário para se conduzir as análises em CDPs com a presença de um dano na junção. Dessa forma, para uma primeira avaliação, impôs-se que a região danificada deveria ter metade da região colada comprometida, ou seja, um dano de aproximadamente 25,4 mm dentro do comprimento da área de sobreposição "O", conforme Figura 3-8 e Tabela 3-7.

Como anteriormente mencionado, a preocupação com o referido modelo computacional é prever possíveis problemas, que possam ser detectados na modelagem do dano, de forma a garantir que a interface de contato entre os aderentes interaja sem haver interpenetração de material. Além disso, deve-se modelar o mínimo coeficiente de atrito entre as partes – uma vez que, na prática, existe uma camada de teflon entre as mesmas. Esta camada de teflon foi necessária no processo de fabricação, para simular o dano e, será mais bem abordada posteriormente.



(a) (b)

Figura 3-21 - Modelo 300 danificado em momentos distintos observados durante a vibração: (a) superfícies descoladas em contato; (b) superfícies separadas.

Detalhes da interação entre as porções de aderente descoladas puderam ser visualizados com o auxílio da interface gráfica *CNORMF* (Figura 3-21), onde se observa o contato superficial com transmissão de forças, dependendo do movimento da junta.

Como previamente elucidado, as Funções Transferências são calculadas para a junta danificada e, quando projetadas sobre o eixo imaginário fornecem as respectivas FRFs (Figura 3-22). Vale ressaltar que tanto a FRF do modelo intacto como do danificado são obtidas através da medida de um acelerômetro instalado conforme Figura 3-4. Observando as FRFs da Figura 3-22, verifica-se que as frequências naturais da estrutura danificada são menores do que as da junta intacta, sendo que isto é mais acentuado para os modos mais elevados. Além disso, nota-se também que as amplitudes de vibração são geralmente menores para a junta danificada. Somado a isto, constata-se a mudança de alguns modos em virtude da dinâmica da estrutura, que ora interage comprimindo as porções descoladas contra os aderentes e, ora os separa, dependendo do modo de vibrar observado na Figura 3-14, Figura 3-15 e Figura 3-16. É importante destacar que no modelo computacional não foi simulado nenhum fenômeno de dissipação de energia, que certamente ocorre durante os ensaios experimentais.

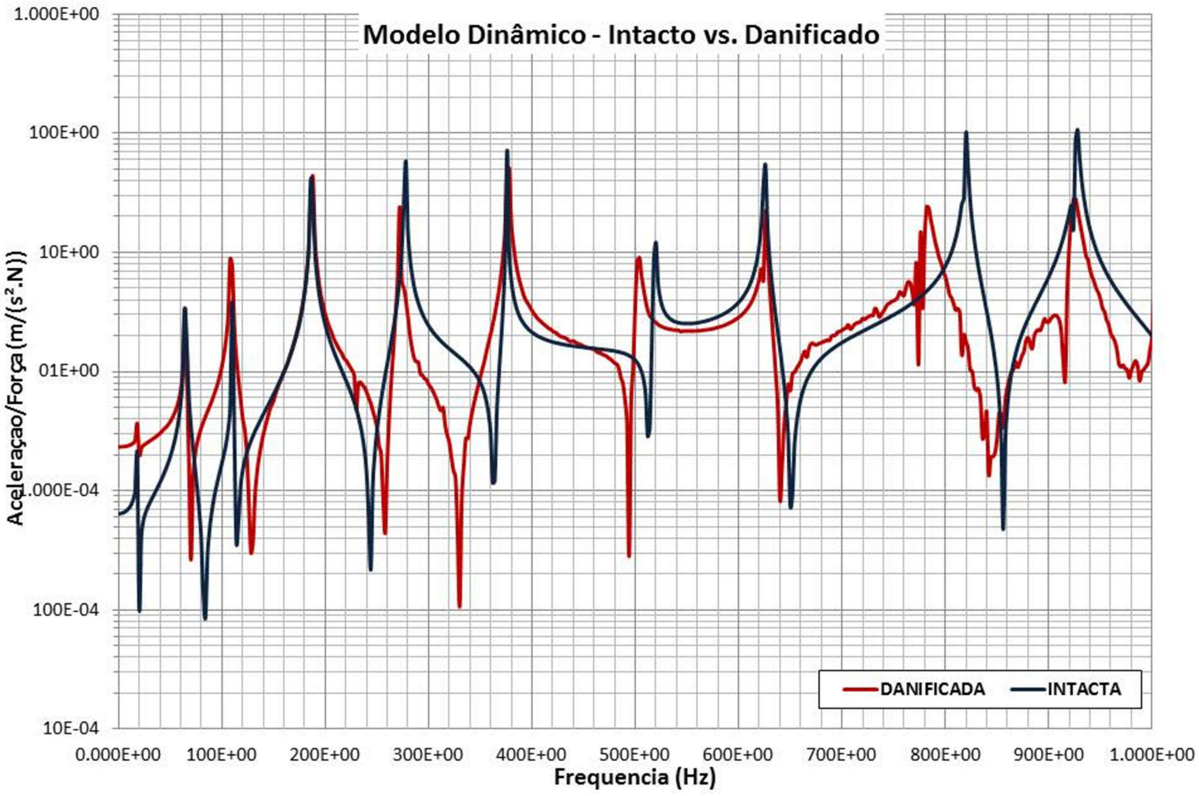


Figura 3-22 - Estrutura Intacta vs. Estrutura Danificada – Modelo 300.

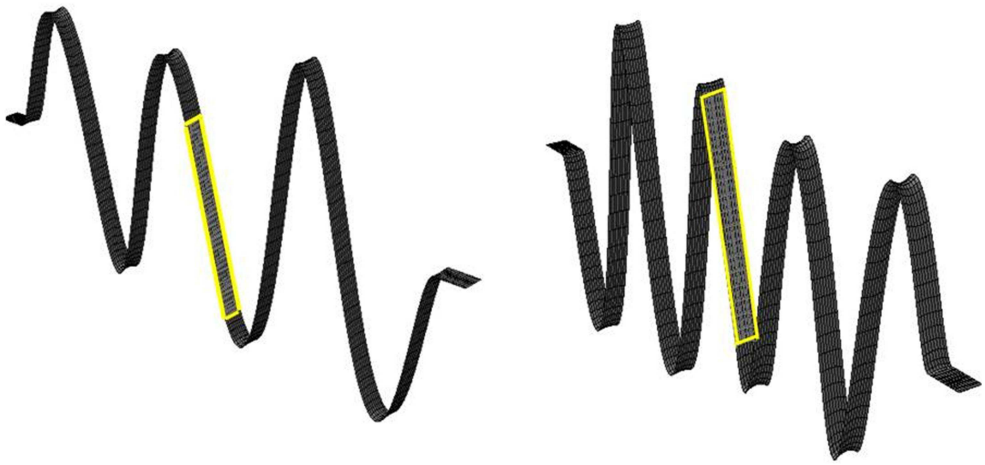
Como resultado das análises do modelo danificado, pode-se concluir que as diferenças passam a ser perceptíveis a partir do terceiro modo, com redução da frequência natural em mais de 1% (um por cento). Outras frequências naturais, aparentemente, mostram certo enrijecimento

do modelo danificado, como se pode observar no sexto e oitavo modos de flexão. Este enrijecimento aparente ocorre em função da posição que a junta assume em relação ao modo de vibrar. Pois, a região de sobreposição fica paralela ao contorno da forma assumida pelo modo. Assim, tanto no sexto quanto no oitavo modo, a região de sobreposição é solicitada apenas por cisalhamento (Figura 3-23).

Tabela 3-12 - Diferença de Frequências Naturais encontradas entre o modelo intacto e o modelo danificado.

Junta Intacta vs. Junta Danificada			
No. do Modo	**Frequência Natural (Hz)**		
(Flexão)	***Intacta***	***Danificada***	**Diferença (%)(1)**
1º	18	18	0
2º	64	64	0
3º	110	108	1,818
4º	186	184	1,075
5º	278	272	2,158
6º	376	378	-0,532
7º	520	504	3,077
8º	626	628	-0,319
9º	820	782	4,634
11º	928	926	0,216

(I) Diferença – calculada segundo a seguinte equação: $\left(\frac{\omega_{Intacta} - \omega_{Danificada}}{\omega_{Intacta}}\right)$



(a) (b)

Figura 3-23 - Posicionamento da região de sobreposição: (a) sexto modo de flexão;(b) Oitavo modo de flexão.

Ainda, de acordo com McConnel e Varoto (2008), a função de resposta em função do tempo pode ser descrita como segue:

$$f(t) = x(t) \cdot s(t) \cdot w(t) \tag{48}$$

Ou seja, o sinal é função não somente da entrada x(t), mas também da função da taxa de aquisição s(t) e, da janela de amostragem w(t). Em sendo assim, ao se aplicar a Transformada de Fourier no sinal de saída, obtido em função do tempo, aplica-se concomitantemente o mesmo processamento matemático nas funções que determinam a taxa de aquisição e a janela de amostragem utilizadas.

Nos casos supracitados, com o intuito de avaliar de forma qualitativa a influência de um dano (degradação estrutural), e evitar que efeitos indesejados fossem observados como resultado deste dano, a mesma configuração de amostragem foi mantida tanto para o processamento da curva da junta intacta, quanto para a curva da junta danificada, mantendo sempre a FRF como referência. Desta forma, com as mesmas configurações de janela de amostragem e taxa de amostragem, considera-se que as influências sejam exatamente as mesmas e, assim, comparativamente, devem proporcionar um resultado coerente.

Após as análises computacionais preliminares, segue-se então, para a elaboração dos modelos computacionais das junções híbridas intactas e danificadas monitoradas por compósitos inteligentes (pastilhas piezelétricas), apresentadas em maiores detalhes no Capítulo 4. Paralelamente, faz-se a fabricação das amostras, como indicado pela Metodologia Científica. Detalhes do processo de fabricação serão apresentados no Item 3.4, que versa sobre os parâmetros e os procedimentos para a obtenção dos CDPs (corpos de prova).

3.4. FABRICAÇÃO DA PLACA DE COMPÓSITO

Os aderentes de CPR foram obtidos a partir de uma placa de material compósito laminada. Tal placa foi fabricada segundo o roteiro proposto pela MIL-HDBK-17-3F (Figura 2-16), com a escolha do método de compactação por bolsa de vácuo, juntamente, com mantas térmicas para promover o aquecimento do material durante o processo de cura. Este método foi selecionado pelo fato de ser o mais difundido e aplicado nas situações de reparos, que envolvem

materiais desta natureza. Além disso, trabalhos anteriores realizados pelo GEA (Grupo de Estruturas Aeronáuticas - EESC/USP) também empregaram o mesmo método de processamento.

A técnica de compactação por bolsa de vácuo (Figura 3-24 e Figura 3-25) garante versatilidade de uso e facilidade operacional, podendo ser realizada dentro de ambientes controlados, como salas limpas ou até mesmo em campo (por exemplo, com o componente instalado na aeronave, no caso de um reparo). Uma bolsa de vácuo, por sua vez, consiste dos seguintes elementos, segundo Armstrong, Evan e Cole III (2005):

- **Filme Plástico para Bolsa de Vácuo:** é utilizado para isolar o laminado do ambiente externo. Dentro do ambiente criado pela bolsa deve-se impor uma pressão relativa menor do que a pressão presente no ambiente externo. A diferença de pressão aliada à flexibilidade deste filme isolante garante que a pressão externa compacte o laminado. Considerando o fato de que este material estará precariamente isolado da fonte térmica, que alimenta o processo de cura, torna-se primordial selecionar um filme plástico capaz de suportar as temperaturas de processo, ou segundo a qual o laminado deverá ser submetido durante o processo de cura. Além disso, o filme deverá ser elástico o suficiente para contornar possíveis particularidades da estrutura em seu interior. A escolha errônea deste material irá comprometer o isolamento do meio e, consequentemente promover parâmetros inadequados de temperatura, compactação e fluxo de ar e gases no interior da bolsa.

- **Selante de vácuo:** deve unir o saco de vácuo e a superfície onde é laminada a placa. Esta união garante que o fluxo de ar para o interior da bolsa seja mantido nas condições adequadas para o desenvolvimento do processo de cura, ou seja, tão mínimo quanto possível (menor do que 0,5 l/min). Este material deve ser aplicado também na inserção de cabos que se comunicam com o interior da bolsa de vácuo, como exemplo tem-se: os termopares e os cabos de alimentação das mantas térmicas (fontes de energia necessárias para o aumento de temperatura no interior da bolsa).

- **Filme Respirador:** deve garantir que o fluxo de voláteis e gases (por exemplo, o ar) circule no interior da bolsa de vácuo, permitindo assim, a distribuição homogênea da pressão sobre a região de compactação. Não se pode interromper o fluxo de gases dentro da bolsa. É importante observar que este material pode comprometer seriamente a troca de ar entre o interior da bolsa e seu exterior, o que pode acarretar em

distribuição irregular de temperatura e, consequente, redução da qualidade do laminado. Além disso, deve-se atentar para o correto posicionamento deste, uma vez que dobras excessivas podem acarretar em isolamento térmico inadequado e, consequentemente, distribuição irregular de temperatura.

- **Filme Dreno:** é essencial para drenar o excesso de resina. Este material deve garantir a proporção adequada de fração volumétrica. A remoção em excesso leva à porosidade excessiva, enquanto o excesso de resina reduz a capacidade mecânica do laminado.
- **Filme Desmoldante:** é um filme inerte à estrutura a ser curada, utilizado para auxiliar na remoção dos demais materiais da bolsa de vácuo, garantindo uma superfície limpa, rica em resina e com qualidade superficial mínima para promover adesão das camadas de proteção superficiais as quais devem ser aplicadas sobre a peça final, como por exemplo: o recobrimento por *primers* e pinturas decorativas. O não uso deste material pode comprometer a estrutura no momento em que os materiais da bolsa são removidos, podendo ocorrer assim, delaminações indesejadas.
- **Filme perfurado:** deve garantir um fluxo controlado de resina do laminado para o filme dreno e, o fluxo de gases para o exterior da bolsa. Seu papel é essencial na drenagem de resina.
- **Manta térmica:** tem a finalidade de prover energia para acelerar as reações químicas, que ocorrem durante a cura do polímero (matriz do laminado). Geralmente, utiliza-se uma manta térmica construída com resistências elétricas controladas por meio de um computador retroalimentado pelo sinal dos termopares.

Antes de todo o processo de compactação por bolsa de vácuo descrito acima, tem-se o processo de laminação do CPR. Para o presente trabalho, utilizou-se do processo de laminação manual ("*hand lay up*"), embora diferentes tipos de equipamentos automatizados sejam encontrados atualmente no mercado. Para laminação, as camadas de *prepreg* foram cortadas com 400 mm de comprimento e 240 mm de largura com o propósito de obter margens de corte (sobrematerial) na geometria final do aderente em CPR a ser utilizado na junção híbrida colada (Figura 3-26), seguindo as recomendações obtidas dos resultados computacionais preliminares.

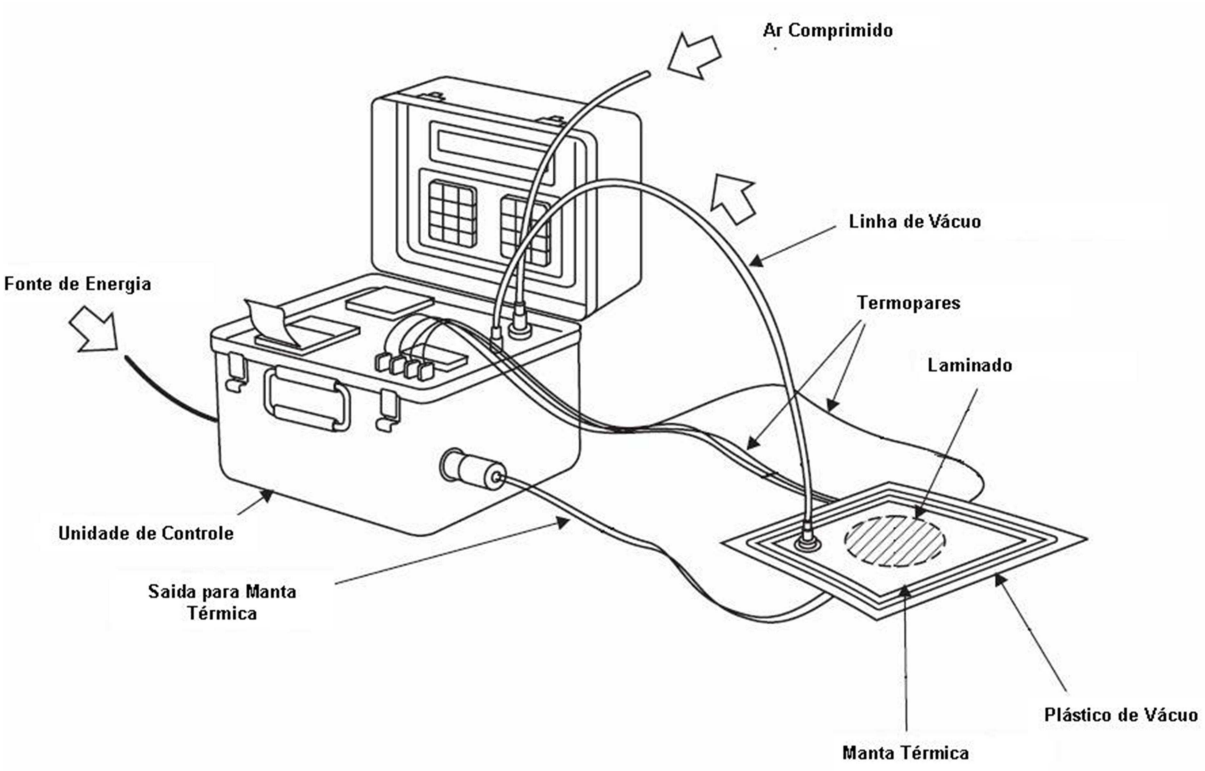


Figura 3-24 - Técnica de compactação por bolsa de vácuo (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005)

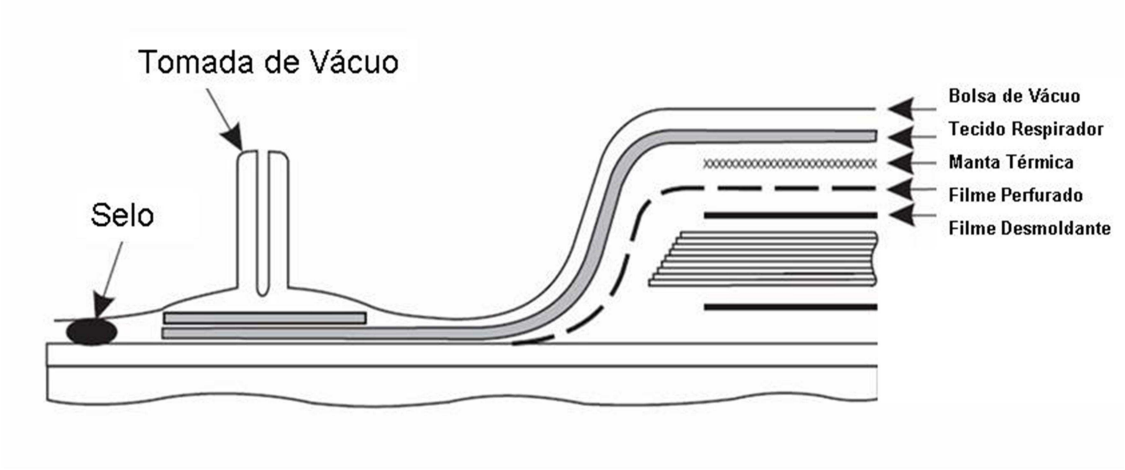


Figura 3-25 - Típica Bolsa de Vácuo e materiais consumíveis (ARMSTRONG, BEVAN e COLE II, 2005)

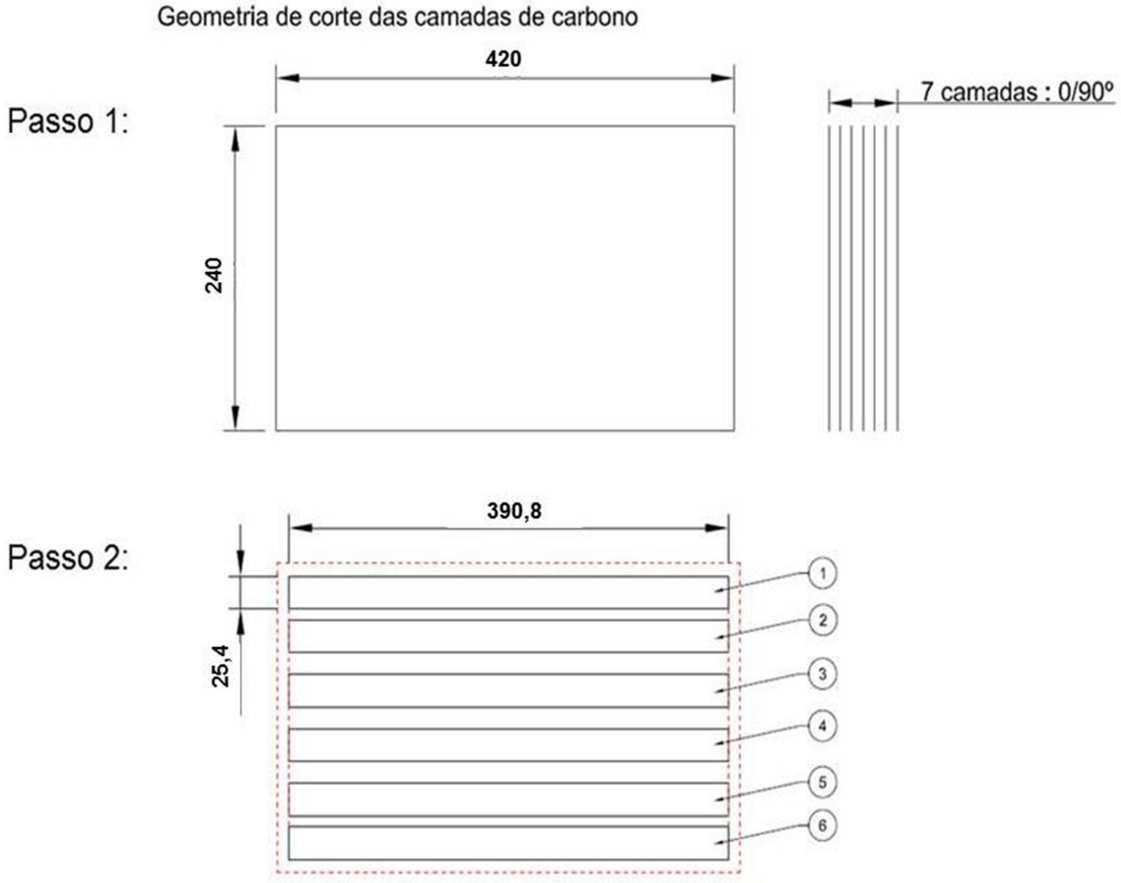


Figura 3-26 - Etapas de Preparação dos Aderentes em CPR - Passo 1: Corte das Camadas; - Passo 2: Corte da Placa Curada.

Para o controle do processo de cura foram utilizados os seguintes equipamentos: 4 termopares do tipo J; um controlador Heaton HCS 9200B retroalimentado pelos termopares e uma manta térmica Heatcon de 900Watts de Potência; além dos materiais consumíveis para montagem da bolsa de vácuo, como comentado anteriormente (Figura 3-24 e Figura 3-25).

Os valores de processo mencionados na Tabela 3-13 foram utilizados para configurar o equipamento de controle. Cabe ressaltar que foram empregados os mesmos valores de Venturini (2010), quando este necessitou determinar as propriedades mecânicas do CPR. É importante relembrar que estas propriedades estão diretamente relacionadas com os parâmetros de processo utilizados, ou seja, por essa razão buscou-se reproduzir os mesmos parâmetros anteriormente empregados para, consequentemente, obter quase o mesmo tipo de laminado.

Posteriormente ao processo de cura, a placa obtida possui 1,70 mm de espessura e foi cortada em seis segmentos de 25,4 mm de largura com 390,80 mm de comprimento. Como

resultado obtém-se laminados com sete camadas empilhadas da seguinte forma: $[0/90]_7$; conforme investigado nas simulações computacionais preliminares. Destaca-se a escolha pelo uso de sete camadas em virtude de se encontrar, no meio de manutenção aeronáutica, diversas estruturas com espessuras variando de 1,5 a 2,0 milímetros de espessura. Sendo essas, rotineiramente, reparadas através de placas cravadas mecanicamente.

Tabela 3-13 - Parâmetros de cura para CDPs de tração - ASTM D3039/D3039M (VENTURINI, 2010).

Parâmetros de Cura para o Laminado			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Vácuo (pol. Hg)	23-24	Temperatura Final (ºC)	50
Rampa de Aquecimento (ºC/min.)	3	Rampa de Resfriamento (ºC/min.)	-3
Temperatura de Cura (ºC)	120	Tempo de Cura (min.)	90

Tabela 3-14 - Geometria das amostras de CPR.

ADERENTES DE CPR $[0/90]_7$								
Amostra	Largura (mm)		Comprimento (mm)		Massa (g)		Espessura (mm)	
	Medida	Valor	Medida	Valor	Medida	Valor	Medida	Valor
1	1	25,3	1	390	1	24,1	1	1,70
	2	25,4	2	390	2	24,0	2	1,70
	3	25,1	3	390	3	24,0	3	1,70
	Média	**25,27**	**Média**	**390**	**Média**	**24.03**	**Média**	**1,70**
2	1	25,6	1	391	1	25,0	1	1,70
	2	26,0	2	391	2	25,0	2	1,70
	3	25,4	3	391	3	25,0	3	1,70
	Média	**25,33**	**Média**	**391**	**Média**	**25,0**	**Média**	**1,70**
3	1	25,1	1	390	1	24,0	1	1,70
	2	25,2	2	390	2	24,0	2	1,70
	3	25,3	3	390	3	24,0	3	1,70
	Média	**25,2**	**Média**	**390**	**Média**	**24,0**	**Média**	**1,70**
4	1	25,4	1	391	1	25,0	1	1,70
	2	25,5	2	391	2	25,0	2	1,70
	3	25,4	3	39	3	25,0	3	1,70
	Média	**25,43,**	**Média**	**391**	**Média**	**25,0**	**Média**	**1,70**
5	1	25,4	1	390	1	24,0	1	1,70
	2	25,3	2	390	2	24,0	2	1,70
	3	25,1	3	390	3	24,0	3	1,70
	Média	**25,27**	**Média**	**390**	**Média**	**24,0**	**Média**	**1,70**
6	1	25,6	1	391	1	25,0	1	1,70
	2	25,4	2	391	2	25,0	2	1,70
	3	25,3	3	391	3	25,0	3	1,70
	Média	**25,43**	**Média**	**391**	**Média**	**25,0**	**Média**	**1,70**

Por fim, para a ativação das superfícies do aderente em CPR, propôs-se o uso de jateamento de baixa intensidade, visando à remoção do excesso de resina existente em função do *gel-coat* utilizado. Além disso, houve o processo de lixamento das arestas, visando melhorar a qualidade deste aderente. Após o processamento dos cortes e operações de acabamento, cada amostra de aderente recebeu um número de identificação (Tabela 3-14), para o qual foram associados os seguintes parâmetros: comprimento, largura, massa e espessura (Figura 3-26).

3.5. FABRICAÇÃO DAS PLACAS DE TITÂNIO

Para confecção das placas de titânio foi empregada uma guilhotina do tipo de facas paralelas. Em seguida, fez-se o fresamento das arestas para melhor acabamento e montagem do conjunto final. Considerando as recomendações evidenciadas no Capítulo 2, as superfícies foram ativadas com jateamento e protegidas com filme plástico para posterior colagem. Nenhum tipo de tratamento superficial foi realizado, pelas seguintes razões: (1) o processo de colagem ocorreu antes do prazo de 2 horas após a ativação; (2) não há preocupação com a durabilidade da junta, haja vista que os ensaios ocorreram dentro do prazo de 1 (uma) semana após o processo de colagem. Portanto, para que efeitos de degradação sejam observados, faz-se necessário expor a junta a condições ambientais severas, que promovam a degradação dos aderentes, o que não foi realizado.

Os aderentes de Titânio foram fabricados tendo dimensões muito semelhantes aos aderentes de CPR, ou seja, 380 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e 1,60 mm de espessura (Figura 3-27), seguindo as recomendações das simulações computacionais preliminares. De forma análoga a anteriormente proposta para as amostras de CPR, tem-se que as amostras de Titânio também foram registradas, medidas e receberam um número de identificação (Tabela 3-15). Quanto ao procedimento utilizado para a obtenção dos aderentes de Titânio à partir da placa bruta, recomenda-se consultar a Figura 3-27.

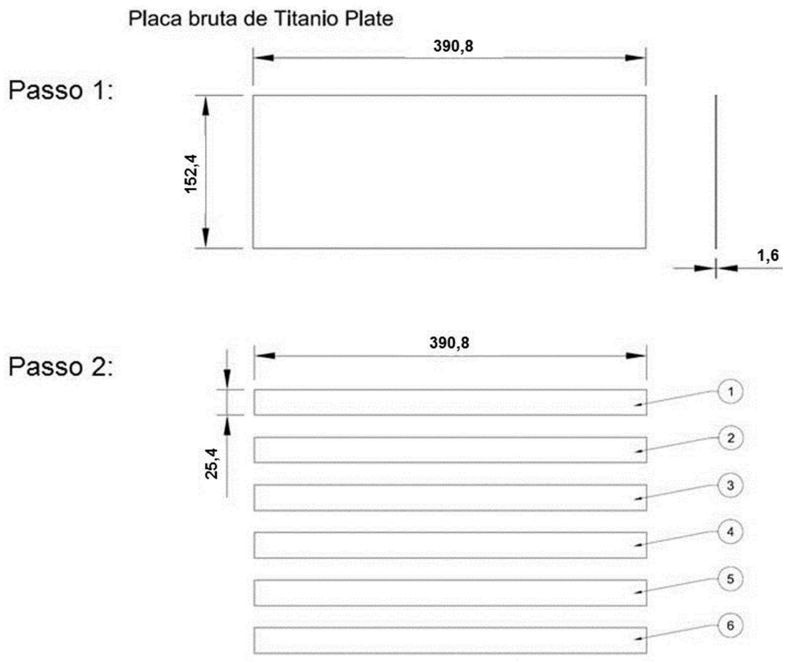


Figura 3-27 - Proposta de Corte para Fabricação do aderente de Titânio

Tabela 3-15 - Geometria das Amostras de Titânio.

ADERENTES DE TITÂNIO								
Amostra	Largura (mm)		Comprimento (mm)		Massa (g)		Espessura (mm)	
	Medida	Valor	Medida	Valor	Medida	Valor	Medida	Valor
1	1	25,9	1	390,8	1	71,0	1	1,6
	2	25,9	2	390,8	2	71,0	2	1,6
	3	25,9	3	390,8	3	71,0	3	1,6
	Média	**25,9**	**Média**	390,8	**Média**	**71,0**	**Média**	**1,6**
2	1	25,9	1	390,8	1	71,0	1	1,6
	2	25,9	2	390,8	2	71,0	2	1,6
	3	25,9	3	390,8	3	71,0	3	1,6
	Média	**25,9**	**Média**	390,8	**Média**	**71,0**	**Média**	**1,6**
3	1	25,9	1	390,8	1	71,0	1	1,6
	2	25,9	2	390,8	2	71,0	2	1,6
	3	25,9	3	390,8	3	71,0	3	1,6
	Média	**25,9**	**Média**	390,8	**Média**	**71,0**	**Média**	**1,6**
4	1	25,9	1	390,8	1	71,0	1	1,6
	2	25,9	2	390,8	2	71,0	2	1,6
	3	25,9	3	390,8	3	71,0	3	1,6
	Média	**25,9**	**Média**	390,8	**Média**	**71,0**	**Média**	**1,6**
5	1	25,9	1	390,8	1	71,0	1	1,6
	2	25,9	2	390,8	2	71,0	2	1,6
	3	25,9	3	390,8	3	71,0	3	1,6
	Média	**25,9**	**Média**	390,8	**Média**	**71,0**	**Média**	**1,6**
6	1	25,9	1	390,8	1	71,0	1	1,6
	2	25,9	2	390,8	2	71,0	2	1,6
	3	25,9	3	390,8	3	71,0	3	1,6
	Média	**25,9**	**Média**	390,8	**Média**	**71,0**	**Média**	**1,6**

3.6. FABRICAÇÃO DAS JUNTAS HÍBRIDAS COLADAS

A resina epóxi EA934NA (Henkel) foi selecionada para promover a união entre os aderentes CPR e Titânio. Esta resina é trixotrópica e tem vasta aplicação na indústria aeronáutica, cumprindo com a tarefa de unir tanto estruturas metálicas quanto estruturas em material compósito.

Para a polimerização (cura) da referida resina, duas formas distintas de processamento podem ser aplicadas. Há o processo de cura à temperatura ambiente ou, o processo de cura com aplicação de temperatura, cada qual requerendo tempos diferentes de processamento. Sendo que quanto maior a temperatura de cura, menor o tempo de processo.

Com o propósito de evitar que cargas térmicas sejam inseridas nas juntas em razão do processamento a temperaturas elevadas, a cura foi conduzida à temperatura ambiente, aproximadamente a mesma temperatura em que os ensaios foram realizados. Deve-se destacar que a temperatura de transição vítrea deste adesivo varia sensivelmente com o processo de cura aplicado (Tabela 3-16), por essa razão, os CDPs não devem ser ensaiados ou mantidos a esta temperatura, uma vez que as considerações sobre união perfeita não poderão ser mais consideradas válidas para as simulações computacionais. Ademais, cabe ressaltar que o adesivo selecionado é composto por duas partes, que devem ser misturadas na proporção de 100:30, e utilizada em até 40 minutos, considerando a temperatura ambiente não superior a 25ºC.

Tabela 3-16 - Propriedades Mecânicas do Adesivo EA934N/A (HENKEL, 2001);

Propriedades Mecânicas: RESINA EA934N/A (Henkel)		
Descrição	**Valor Medido**	**Unidade**
Tensão de Ruptura	40	MPa
Módulo de Elasticidade	3790	GPa
Elongação	****	%
Temp. de Transição Vítrea		
Cura à 25ºC	75	ºC
Cura à 90ºC	129	ºC

Definida a lista de materiais necessários para a fabricação das juntas, bem como a geometria, faz-se necessário definir alguns parâmetros de processo, visando padronizar os

procedimentos de fabricação e montagem. Assim, as seguintes ações são tomadas como medida de precaução:

- **Preparação da Superfície:** com o propósito de preparar as superfícies a serem coladas, recomenda-se a ativação por jateamento e limpeza com *Metiletilketone*. Além disso, testes foram conduzidos de acordo com o princípio do filme d'água, a fim de determinar se a superfície esta adequadamente preparada;
- **Preparação do Adesivo:** nos processos de cura à temperatura ambiente, o processo de mistura deve ser feito em laboratório. Nestes casos, um único lote é preparado para colagem de todo o conjunto de corpos de prova. Tal estratégia garantirá uniformidade entre as amostras. Vale observar que para o caso de filmes adesivos, não se faz necessário o processo de mistura;
- **Aplicação do Adesivo:** a aplicação do adesivo deve ser feita de forma contínua e homogênea sobre a superfície dos aderentes. Durante o processo de cura do adesivo, espera-se que a distribuição seja homogênea por toda a área de colagem;
- **Condições de Montagem:** com o propósito de evitar influências no processo de montagem dos corpos de prova, para que a polimerização (cura) ocorra, ter-se-á o cuidado de realizar a montagem dentro de uma sala climatizada, com controle de temperatura e umidade relativa do ar;
- **Condições de Cura:** embora o processo de cura ocorra de forma controlada, ainda podem haver algumas variações. Para evitar este tipo de problema, optou-se pela estratégia de que todos os corpos fossem preparados e curados em blocos;
- **Dispositivos de Posicionamento:** com o propósito de evitar que desvios de posicionamento resultem em caminhos de carga não previstos, propõe-se o uso de um dispositivo especial para alinhamento (Figura 3-28). Este tipo de dispositivo deve garantir o correto posicionamento das placas entre si, bem como as tolerâncias de fabricação e montagem necessárias para evitar desalinhamentos indesejados (Figura 3-29).

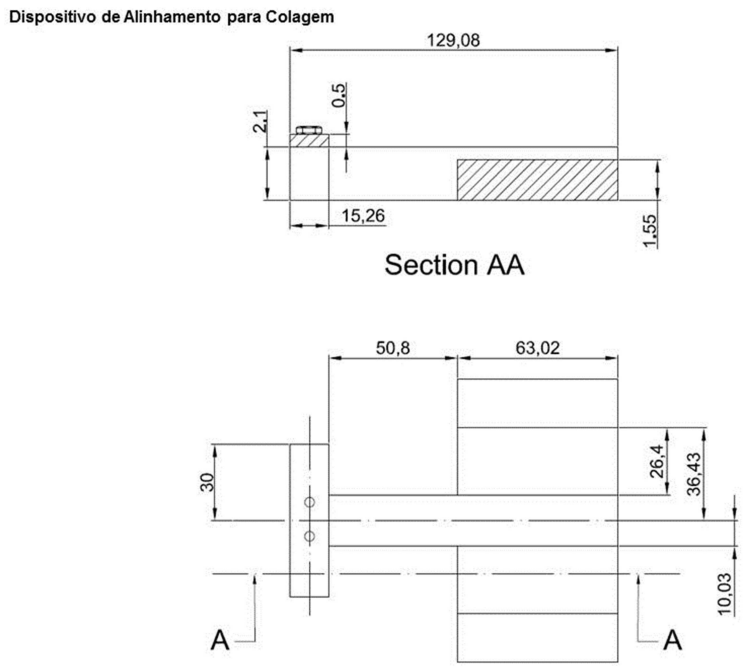


Figura 3-28 - Dispositivo para garantir o correto posicionamento dos aderentes durante o processo de colagem.

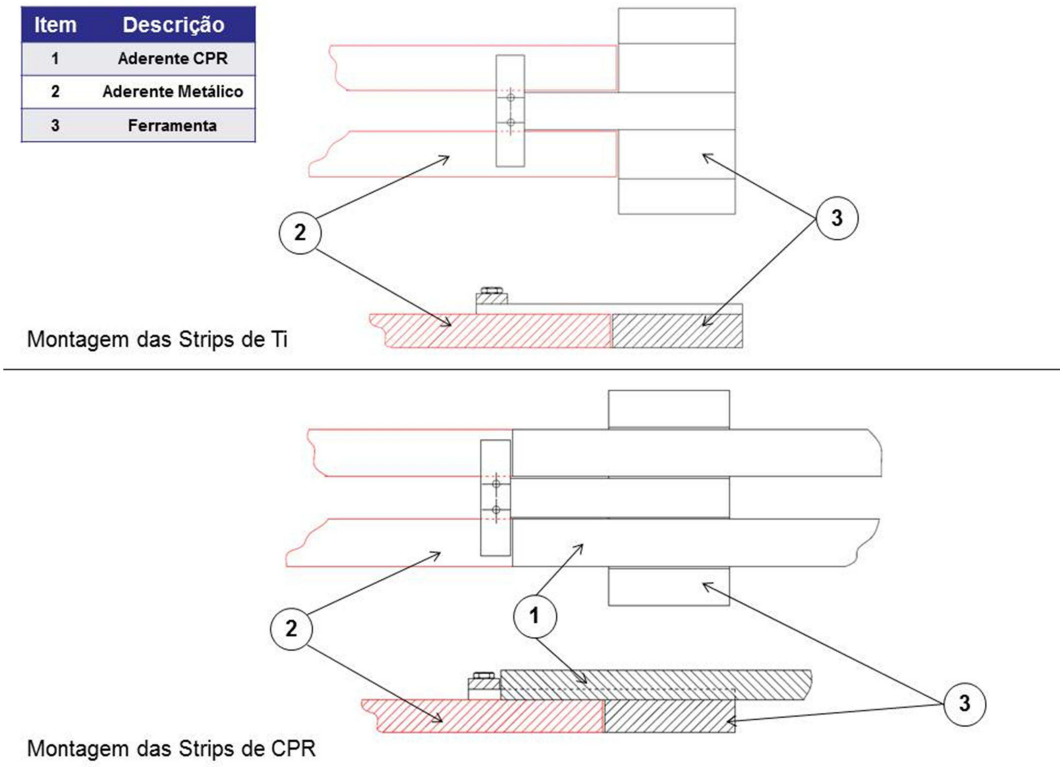


Figura 3-29 - Dispositivo para garantir o correto posicionamento dos aderentes durante a montagem

Como comentado anteriormente, a região de colagem do adesivo foi modelada como uma união perfeita para os modelos computacionais preliminares. No entanto, visando modelar o adesivo de forma mais próxima da realidade, ou seja, como um material elasto-plástico, decidiu-se, então, avaliar o comportamento mecânico do mesmo experimentalmente, uma vez que este tipo de informação não é fornecida pelo fabricante do material.

Para o estudo supracitado, optou-se por ensaiar junções híbridas coladas, com o propósito de simular as mesmas condições posteriormente encontradas nos CDPs e, seguindo assim, parcialmente as orientações da norma ASTM5528, empregando um corpo de prova do tipo DCB (*double cantilever beam)*. Esse ensaio pode prover informações valiosas sobre o comportamento do adesivo EA934NA, quando submetido ao Modo I de falha (por exemplo: tenacidade à fratura para o Modo I – G_{IC}).

Para a norma ASTM5528 (2007) ser aplicada, deve-se cumprir os seguintes requisitos na fabricação dos CDPs: (a) distribuição homogênea da temperatura para todos os corpos de prova processados; (b) processamento de pelo menos 5 (cinco) corpos de prova simultaneamente; (c) alinhamento entre as subpartes da junta, bem como do defeito inserido; (d) distribuição homogênea de pressão sobre a área de colagem. Vale ressaltar ainda que a norma ASTM5528 (2007) é especificada para ensaios em juntas compósito-compósito e, não para juntas híbridas do tipo metal-compósito.

Diante desses requisitos, projetou-se e confeccionou-se um dispositivo de colagem com duas placas em alumínio (itens: 1 e 2 –Figura 3-30), com bordas chanfradas de forma a permitir a distribuição homogênea de pressão. Ademais, cinco cavidades equidistantes foram criadas nas respectivas placas, para alocar as subpartes da junta. O dispositivo projetado ainda conta com quatro guias (item 5) para garantir o correto alinhamento da parte superior com a inferior, bem como dois mordentes (itens: 3 e 4 – Figura 3-30) paralelos às juntas para permitir a montagem do filme antiaderente (por exemplo: um filme de Teflon), que simula o defeito na colagem ou, então, um dano na junta (Figura 3-30).

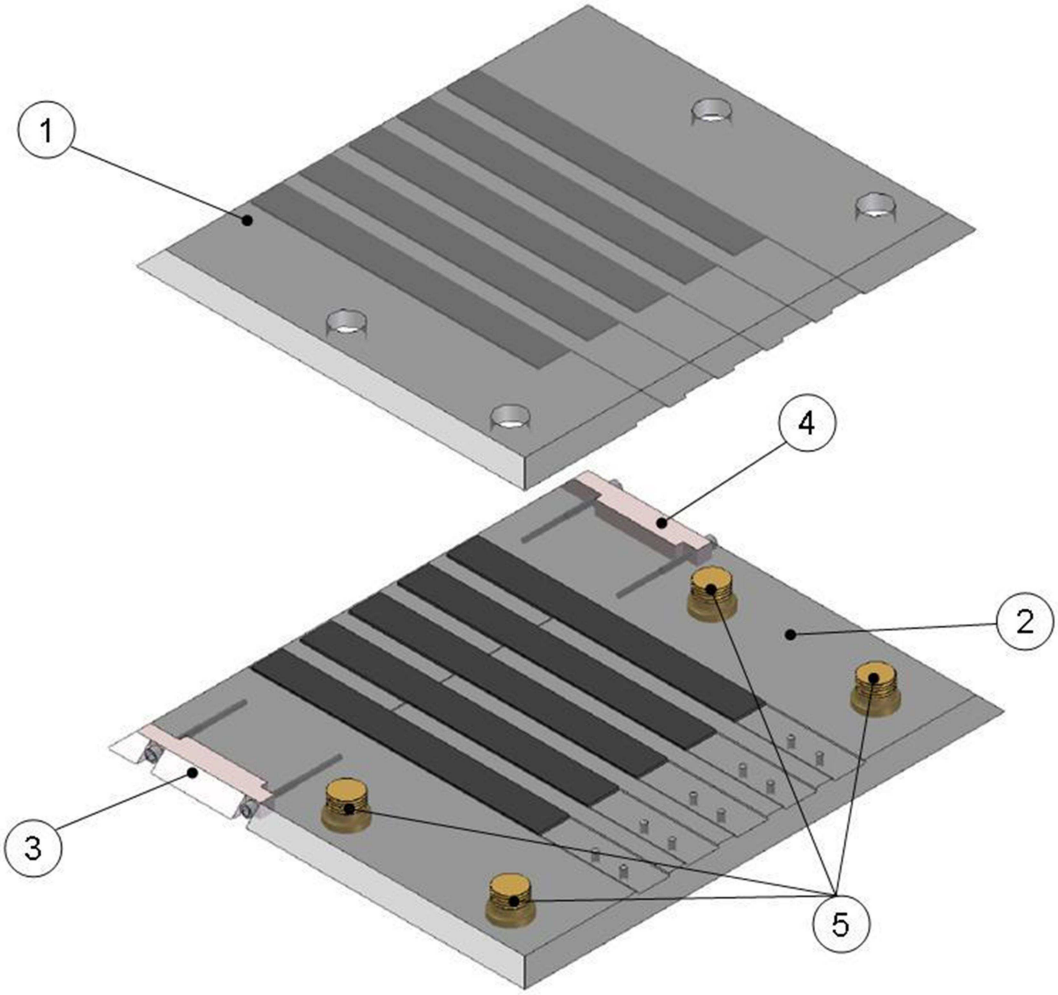
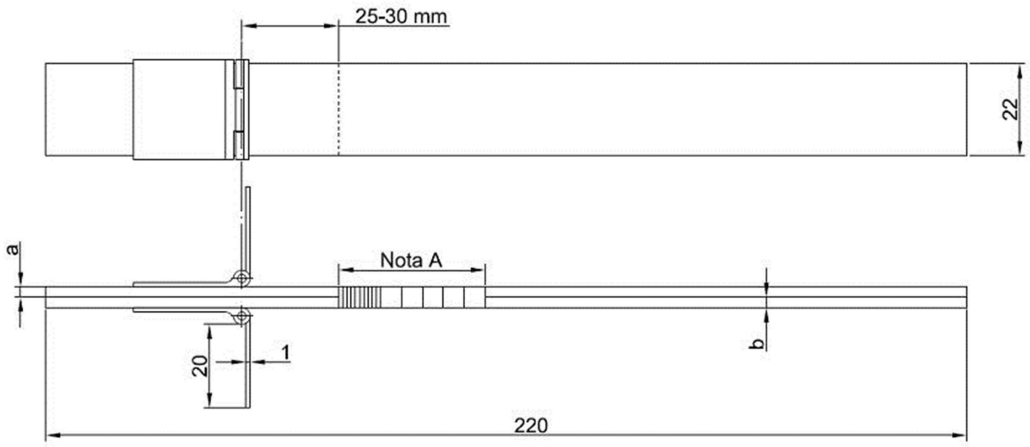


Figura 3-30 - Dispositivo de Colagem DCB seguindo requisitos da norma ASTM 5528

Uma vez cortadas nas dimensões requisitadas, as amostras de aderente em Ti6Al4V e laminado de fibra de carbono M20/G0904/40 foram montadas no dispositivo, juntamente com uma camada do filme antiaderente – na respectiva cavidade – e o adesivo EA934NA. O dispositivo, ao final, foi colocado no interior de uma bolsa de vácuo e o adesivo curado à temperatura ambiente. Uma vez processada a cura, em cada corpo de prova (CDP) foi instalada uma dobradiça (*hinge*), com adesivo do tipo Metil Cianoacrilato (Loctite 496) de forma a possibilitar que as garras do equipamento de ensaio pudessem solicitar cada CDP em Modo I (Figura 3-31).



Nota A: Os primeiros 10 milímetros devem ser demarcados com distanciamento de 1 mm, os demais entre 5 mm.

Figura 3-31 - Corpo de Prova para ensaio segundo ASTMD5528 (2007) com as dobradiças instaladas.

Ao final do processo de fabricação e ensaio dos CDPs do tipo DCB das junções híbridas, alguns fenômenos muito interessantes ocorreram, tais como: deformações provenientes de pré-cargas térmicas inerentes ao processo de cura, que distorceram o corpo de prova de forma irregular (Figura 2-21 – Capítulo 2); e efeitos de deformação anticlásticos diferentes entre o aderente em CPR e em Titânio (Figura 3-34). Estes fenômenos inseriram ao ensaio variações não pertinentes ao objetivo do estudo proposto, como pode ser observado pelo crescimento irregular da falha (Figura 3-29 e Figura 3-30). Isto pode ser justificado, também, devido ao fato de que a norma ASTM5528 (2007) seja direcionada para ensaios em juntas do tipo compósito-compósito e, não para juntas híbridas.

Estas observações passaram a contribuir, portanto, para a exclusão do estudo sobre o comportamento mecânico do adesivo em junções híbridas. Dessa forma, com o propósito de melhor compreender os fenômenos envolvidos neste tipo de comportamento, recomenda-se que um estudo dedicado seja conduzido. Em sendo assim, a interface do adesivo será, portanto, considerada, também, como uma união perfeita nos modelos computacionais do Capítulo 4, ou seja, o adesivo não será modelado e, os aderentes serão vinculados diretamente (superfície com superfície) através do comando *"tie"* nas análises via MEF.

Uma vez que a modelagem do filme de resina que une os aderentes não deve ser conduzido, serão utilizados elementos sólidos apenas para modelagem da pastilha piezelétrica unida ao modelo da junta em casca por meio do comando "*tie*".

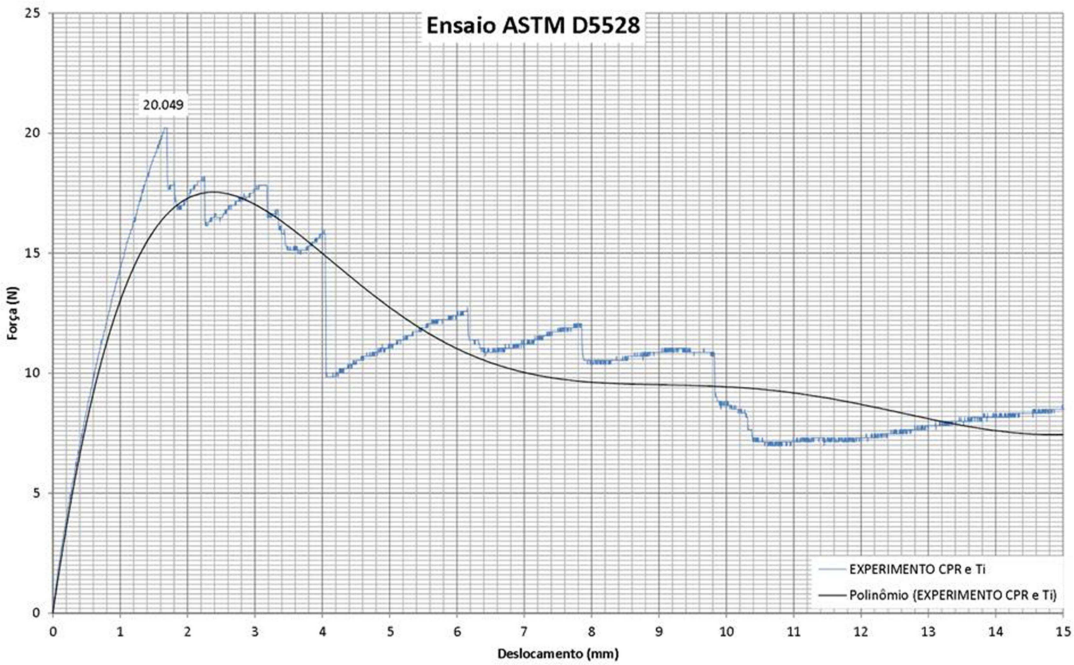


Figura 3-32 – Resultado de um ensaio experimental de um corpo de prova tipo DCB da junta híbrida metal-compósito.

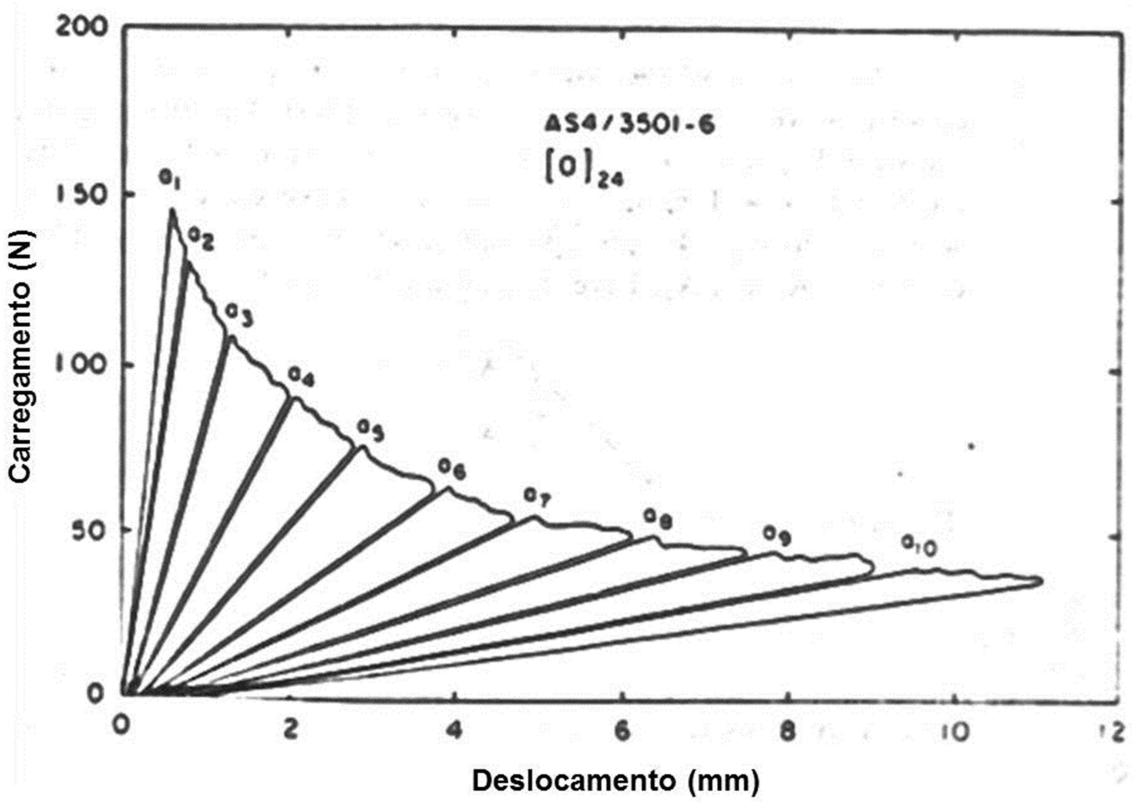


Figura 3-33 - Resultado tipicamente encontrado para ensaios de tenacidade a fratura em juntas compósito-compósito (CARLSSON e PIPES, 1987).

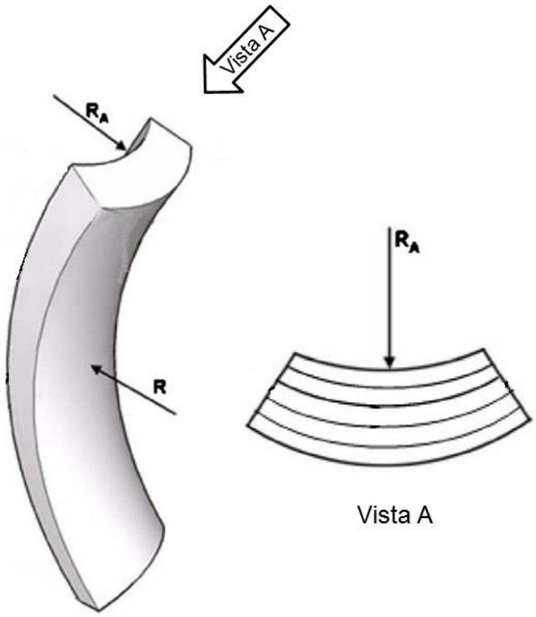
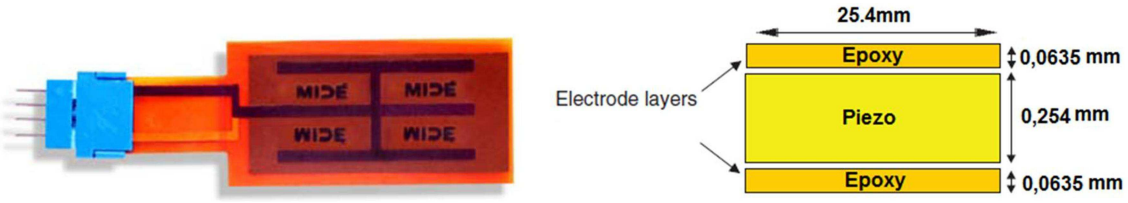


Figura 3-34 - Típico comportamento anticlástico de viga biapoiada.

3.7. MONTAGEM DAS JUNTAS HÍBRIDAS MONITORADAS

Para o monitoramento das junções híbridas coladas, optou-se pelo emprego de um transdutor piezelétrico fabricado pela Midé. Tal transdutor possui uma pastilha piezelétrica (Midé QP10n) envolvida por matriz de resina epóxi (Figura 3-35). A escolha do referido transdutor se deve à vasta aplicação deste material em projetos de engenharia e, consequentemente, à quantidade de informações que se têm disponíveis na literatura (Tabela 3-17). Além disso, este material tem sido sucessivamente utilizado pelo Grupo de Estruturas Aeronáuticas da EESC/USP (MEDEIROS, 2012), (MEDEIROS, MORENO e TITA, 2011).



(a) (b)

Figura 3-35 - Pastilha Piezelétrica Midé: (a) Transdutor piezelétrico utilizado nos experimentos; (b) Esquema da seção transversal do transdutor.

Para a determinação das propriedades eletromecânicas e de acoplamento piezelétrico do referido transdutor, utiliza-se a hipótese de que a matriz polimérica (resina epóxi) possui comportamento isotrópico com módulo de elasticidade de 4,5 GPa, constante dielétrica de 0,0797 nF/m, e densidade de 1480 kg/m^3. Além disso, adotam-se as propriedades da pastilha descritas na Tabela 3-17 e as propriedades geométricas evidenciadas na Tabela 3-19. Todavia, para que sejam determinadas as propriedades do transdutor, executa-se um procedimento de homogeneização, recorrendo-se a uma metodologia computacional baseada em Volume Elementar Representativo e Teorema das Médias, que foi desenvolvida por Medeiros (2012). Os valores obtidos e utilizados nas simulações computacionais são evidenciados na Tabela 3-18.

Para a colagem do transdutor piezelétrico faz-se uso das mesmas técnicas utilizadas para a colagem dos aderentes, ou seja, empregou-se bolsa de vácuo para compactação e remoção de voláteis, e temperatura ambiente para polimerização (cura) da resina. Deve-se destacar, também, que a adesão entre o transdutor piezelétrico e o aderente será considerada como perfeita nos modelos computacionais apresentados no Capítulo 4, ou seja, os transdutores serão vinculados aos aderentes diretamente (superfície a superfície) pelo comando *"tie"* nas análises via MEF.

Tabela 3-17 - Propriedades da pastilha piezelétrica (MIDÉ, 2010).

Propriedades da Pastilha PZT	
Coeficiente Efetivo	Valor
s_{11}^{E} **[m^2/N]**	16,4 × 10^{-12}
s_{12}^{E} **[m^2/N]**	-5,74 × 10^{-12}
s_{13}^{E} **[m^2/N]**	-7,22 × 10^{-12}
s_{33}^{E} **[m^2/N]**	18,8 × 10^{-12}
s_{44}^{E} **[m^2/N]**	47,5 × 10^{-12}
s_{66}^{E} **[m^2/N]**	44,3 × 10^{-12}
d_{13} **[m/V]**	-190,0 × 10^{-12}
d_{15} **[m/V]**	584,5 × 10^{-12}
d_{33} **[m/V]**	390,0 × 10^{-12}
$\varepsilon_{11}^{S} / \varepsilon_0$	830,0
$\varepsilon_{33}^{S} / \varepsilon_0$	913,0
ε_0 **[C^2/ (N m)]**	8,854238837 × 10^{-12}
ρ [kg/m^3]	7800

Tabela 3-18 - Propriedades Efetivas do Transdutor (MEDEIROS, 2012).

Propriedades do Transdutor	
Coeficiente Efetivo	Valor
c_{11}^{eff} **[GPa]**	81,73
c_{12}^{eff} **[GPa]**	5,23
c_{13}^{eff} **[GPa]**	50,06
c_{33}^{eff} **[GPa]**	46,35
c_{44}^{eff} **[GPa]**	5,91
c_{66}^{eff} **[GPa]**	5,63
e_{13}^{eff} **[C/m^2]**	-5,24
e_{15}^{eff} **[C/m^2]**	1,13
e_{33}^{eff} **[C/m^2]**	12,85
ε_{11}^{eff} **[nF/m]**	6,89
ε_{33}^{eff} **[nF/m]**	5,73
ρ [kg/m^3]	7400
*** considerando c^E e ε^S**	

Tabela 3-19 - Dimensões do transdutor Midé Modelo QP10n (MIDÉ, 2010)

Geometria do Transdutor	
Dimensão	Valor
Largura [mm]	25,4
Comprimento [mm]	50,8
Espessura [mm]	0,381
Faixa de tensão [V]	±200

4. ANÁLISES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

Realizadas as simulações numéricas preliminares com a estrutura intacta e danificada, com o propósito de definir a geometria dos CDPs (corpos de prova), busca-se, então, avaliar o comportamento piezo-eletro-mecânico da junta híbrida quando monitorada por transdutor piezelétrico (pastilha piezelétrica - Midé QP10n), bem como a eficácia do método experimental utilizado e as limitações/potencialidades dos modelos computacionais. Vale ressaltar, que os referidos modelos possuem sobre o aderente de titânio das juntas anteriores, uma pastilha piezelétrica colada, cujas dimensões e características eletromecânicas foram previamente apresentadas por Medeiros (2012) e, estão evidenciadas na Tabela 3-17, Tabela 3-18 e Tabela 3-19.

É importante destacar que para determinação dos coeficientes piezelétricos, foi utilizada a metodologia computacional para a determinação de coeficientes efetivos de compósitos inteligentes, proposta por Medeiros (2012). Quanto ao posicionamento do transdutor piezelétrico sobre a junta, seguindo os mesmos preceitos de Medeiros (2012), a pastilha piezelétrica foi colada próxima à região de engaste (Figura 4-1), onde, como comentado em capítulos anteriores, devem ser observadas as melhores condições para estímulo do elemento piezelétrico.

Avaliou-se, ainda, a possibilidade de colar a pastilha piezelétrica sobre a região de sobreposição (*overlap*), mais especificamente sobre a falha. Porém, de acordo com as conclusões de Medeiros (2012), as regiões de extremidades (próximas a bordas livres) são pouco interessantes para capturar sinais elétricos, uma vez que possuem nível de deformação muito reduzido. Ainda, para o caso das juntas, a região de *overlap* é a mais espessa e, portanto enrijecida, o que reduz ainda mais as deformações mecânicas locais e, consequentemente, as condições para o estímulo da pastilha piezelétrica são prejudicadas, como fora anteriormente apresentado no Capítulo 3.

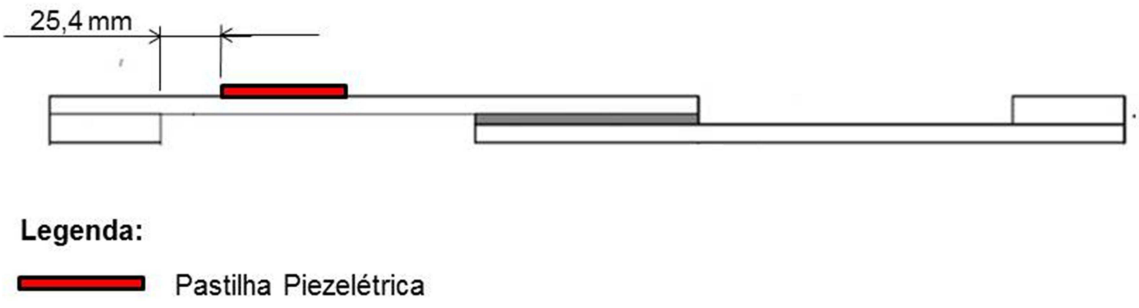


Figura 4-1 - Posicionamento da Pastilha Piezelétrica.

A seguir são apresentados quatro estudos de caso com base na Matriz de Ensaios (Figura 4-2), que representa cenários prováveis segundo os quais uma junta híbrida pode ser submetida em operação. O primeiro cenário retrata a junta intacta, e além de representar o modelo sem danos, deve ser usado como referência para comparação com os demais casos. Portanto, será abordado como o modelo da "assinatura dinâmica". Em seguida, avalia-se o modelo da junta com a falha (50% da região de *overlap* descolada), monitorada por acelerômetros, de forma a identificar qual a influência que o contato (entre as partes descoladas) terá no comportamento dinâmico da junta. Em seguida, faz-se a análise do modelo intacto com a pastilha piezelétrica, para identificação das potencialidades desta técnica em monitorar juntas do tipo híbrida, bem como, para verificar a influência do transdutor no comportamento dinâmico da estrutura. E finalmente, investiga-se o modelo danificado monitorado por pastilha piezelétrica, onde se busca avaliar a capacidade de monitoramento da junta híbrida danificada por meio de transdutores piezelétricos. Portanto, em suma, na Matriz de Ensaios (Figura 4-2), são evidenciados, nas duas primeiras linhas, dois estudos de caso em que a estrutura está intacta, sendo que a mesma pode ser monitorada por acelerômetros ou por uma pastilha piezelétrica. Em seguida, nas duas últimas linhas, são abordados dois estudos de caso em que a junta híbrida está danificada, sendo que a mesma, também, pode ser monitorada por acelerômetros ou por uma pastilha piezelétrica.

A Tabela 4-1 mostra as dimensões dos corpos de prova (CDP) fabricados, largura e comprimento total, bem como a massa, sem contabilizar a pastilha piezelétrica. Ademais, correlaciona cada CDP (o número de identificação) a um dos casos de estudo, que foram analisados, como mencionado anteriormente.

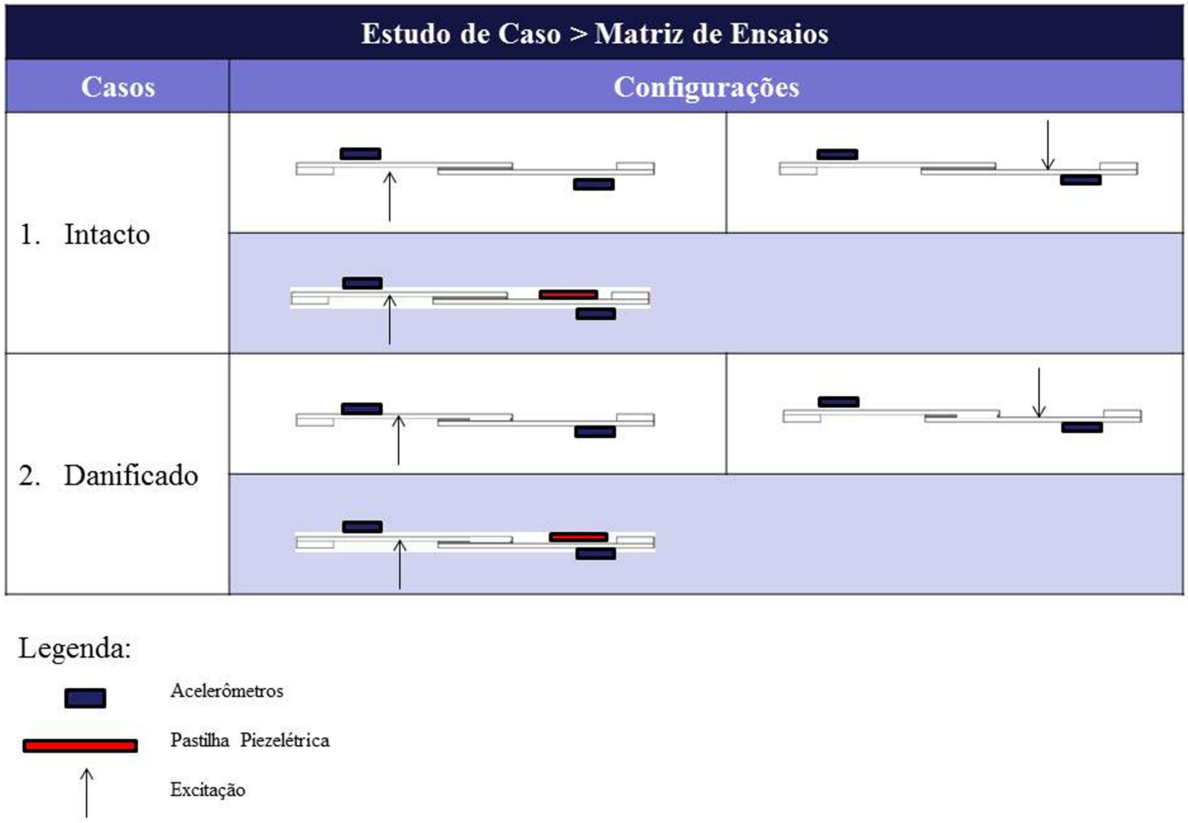


Figura 4-2 - Matriz de Ensaios Experimentais.

Tabela 4-1 - Caracterização Dimensional dos CDPs montados

CARACTERIZAÇAO DOS CDPs: CONJUNTO COMPLETO									
CDP	Aderente ID		Largura (mm)		Comprimento(*)		Massa (g) (**)		Condição
			Medida	Valor	Medida	Valor	Medida	Valor	
2	CPR	2	1	25,9	1	723	1	96,0	Danificado
			2	25,9	2	723	2	96,0	
	Ti	2	3	25,9	3	723	3	96,0	
			Média	**25,9**	**Média**	**723**	**Média**	**96,0**	
4	CPR	4	1	25,9	1	724,5	1	95,5	Intacto
			2	25,9	2	724,5	2	95,5	
	Ti	4	3	25,9	3	724,5	3	95,5	
			Média	**25,9**	**Média**	**724,5**	**Média**	**95,5**	
5	CPR	5	1	25,9	1	723	1	95,0	Intacto (PZT)
			2	25,9	2	723	2	95,0	
	Ti	5	3	25,9	3	723	3	95,0	
			Média	**25,9**	**Média**	**723**	**Média**	**95,0**	
6	CPR	6	1	25,9	1	723	1	96,0	Danificado (PZT)
			2	25,9	2	723	2	96,0	
	Ti	6	3	25,9	3	723	3	96,0	
			Média	**25,9**	**Média**	**723**	**Média**	**96,0**	

(*) Comprimento total do CDP: 2x"E"+2x"U"+"O" (Figura 3-8– Capítulo 3)

(**) massa do CDP sem contabilizar a massa da pastilha piezelétrica (PZT)

4.1. ENSAIO EXPERIMENTAL

Com o propósito de ensaiar dinamicamente as referidas juntas, conforme previamente apresentado, são utilizados os seguintes equipamentos: um acelerômetro (PCB Piezotronix – *part number*: 333B30), um martelo de impacto (*part number*: 0860) e um analisador Photon II *Model* PHO 200 LDS (Figura 4-3).

Os corpos de prova (CDPs 2, 4, 5 e 6) foram engastados sobre uma base maciça por meio de mordentes fixados com porcas e parafusos, sobre a referida base (Figura 4-4).

Para o ensaio com as pastilhas piezelétricas, além dos equipamentos supracitados, e fixações propostas, empregou-se o *Quick Pack Power ACX*, em função não somente da qualidade dos resultados obtidos em ensaios realizados anteriormente, mas devido aos intervalos de frequência e aos dados a serem medidos, conforme previsto pelos modelos computacionais.

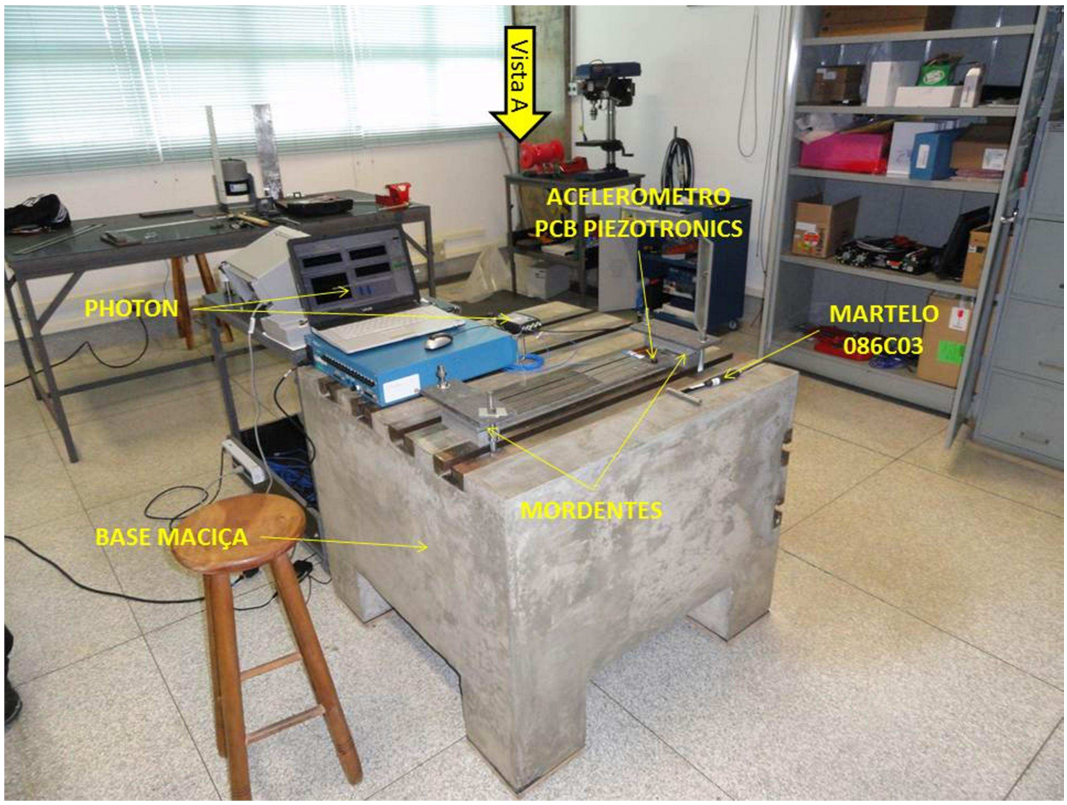


Figura 4-3 – Esquema Geral da Bancada de Ensaios.

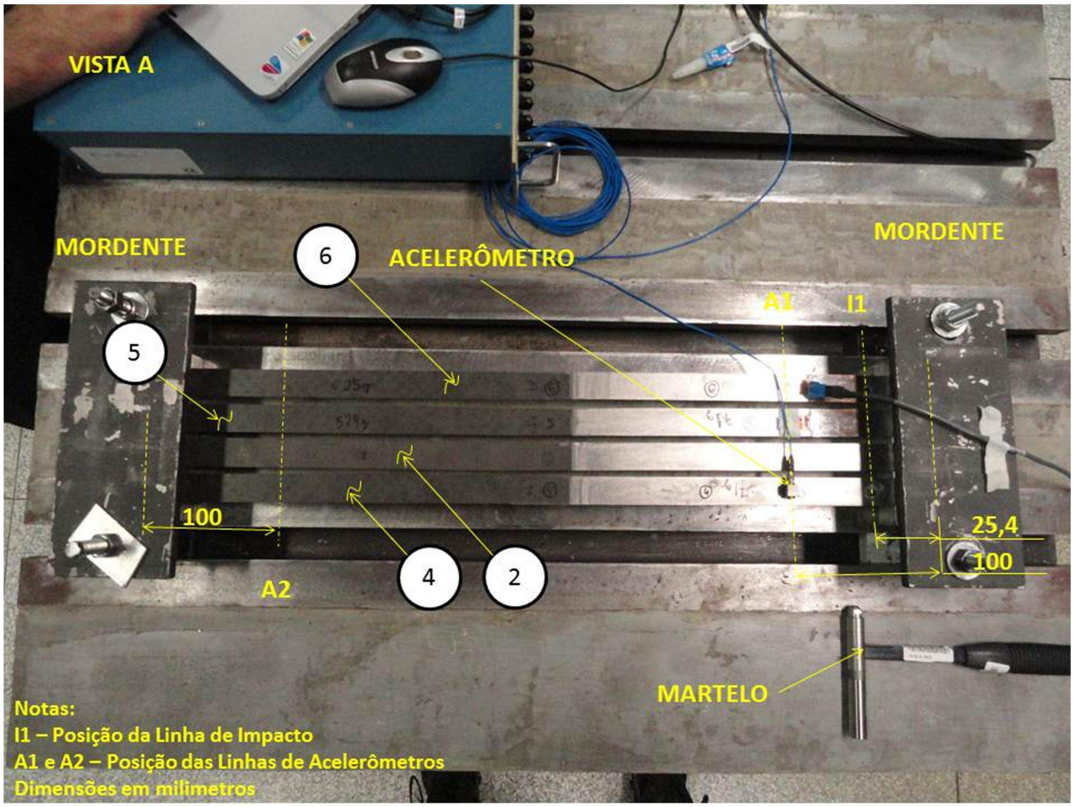


Figura 4-4 – Detalhe da Montagem dos CDPs na bancada de ensaios e Principais Posições.

Um aspecto importante a ser considerado está relacionado com a montagem dos corpos de prova. Dessa forma, para que os mesmos apresentem condições semelhantes de montagem, empregou-se a estratégia de todos serem montados juntos, como pode ser visto na Figura 4-4. Assim, minimizam-se as variabilidades inseridas pelos engastes a cada montagem. Por outro lado, como a montagem foi realizada em batelada, tem-se o efeito de interação dinâmica entre os corpos de prova. Todavia, tal efeito não foi considerado nas simulações computacionais.

Outro aspecto importante, numa condição de biengastamento, consiste na presença inerente de cargas axiais na montagem, sendo que as mesmas devem ser mantidas tão reduzidas quanto possível, uma vez que a presença de pré-cargas pode alterar o comportamento dinâmico dos corpos de prova. De maneira geral, caso a montagem seja feita com pré-cargas, espera-se que os seguintes comportamentos sejam observados:

- **Carga Axial Positiva (tração):** as frequências naturais medidas devem ser maiores do que as calculadas para os modos de flexão.

- **Carga Axial Negativa (compressão):** as frequências naturais medidas devem estar negativamente defasadas em relação aos cálculos, envolvendo apenas os modos de flexão.

Vale ressaltar que em função da montagem realizada, foram induzidas cargas axiais de tração, porém, as mesmas são muito difíceis de serem quantificadas, assim, o modelo computacional foi avaliado sem quaisquer pré-cargas atuantes.

4.2. JUNTAS INTACTAS (RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS)

Conforme previamente evidenciado pela Matriz de Ensaios, duas análises principais são conduzidas com base na junta intacta com e sem a presença da pastilha piezelétrica. Dessa forma, busca-se determinar tanto o comportamento dinâmico da junta (Caso 1) quanto à mudança que o transdutor piezelétrico pode provocar no comportamento da estrutura (Caso 2).

4.2.1. ESTUDO DE CASO 1 (A ASSINATURA DINÂMICA)

O estudo de Caso 1 tem como objetivo principal servir de referência para os estudos a cerca do comportamento dinâmico da junta híbrida colada. Além disso, este ensaio contribuirá para melhorar o modelo computacional, através de modificações, que venham a ser necessárias para adequá-lo, como por exemplo, alterações nas condições de contorno, forma de aplicação da carga e modificação dos pontos de monitoramento (pontos de aquisição de resultados). Vale ressaltar que para o estudo de Caso 1 é utilizado o CDP número 4.

Para cumprir com os objetivos deste estudo caso, os acelerômetros são estrategicamente posicionados ao longo da estrutura, conforme anteriormente proposto e evidenciado pela Figura 4-2. Para tal, as informações previamente adquiridas com base nos modelos dinâmicos foram essenciais para melhor posicioná-los. Ademais, nota-se a presença de dois pontos de medida por acelerômetros para cada ensaio. As juntas são ensaiadas na condição de contorno biengastada, buscando tanto quanto possível reproduzir as mesmas condições anteriormente utilizadas no modelo computacional.

A FRF (Função de Resposta em Frequência) encontrada para a junta intacta sem a presença da pastilha piezelétrica é expressa na Figura 4-5. Verifica-se pelo sinal que há presença de ruído, devido a uma série de fatores. Dentre os quais, pode-se mencionar aspectos relacionados à montagem do CDP junto à base, bem como ao cabeamento utilizado no ensaio.

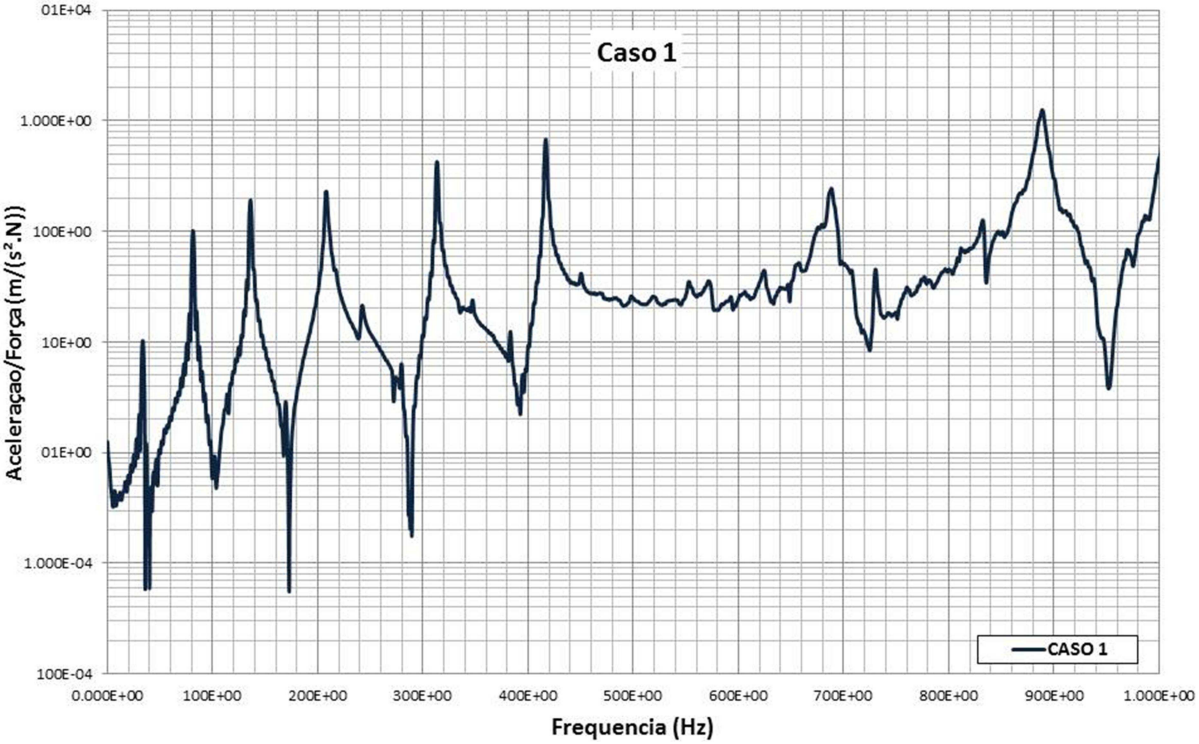


Figura 4-5 - Estudo de Caso 1 - junta híbrida intacta monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental

Nota-se que o comportamento da curva é bastante similar ao encontrado no modelo tipo A -300 (Figura 3-11), apesar das frequências naturais não serem idênticas ao anteriormente previsto. Neste caso, entende-se que a montagem biengastada possa ter sido a principal razão para as diferenças notadas (entre as frequências naturais), uma vez que o modelo não incorpora nenhuma pré-carga. Além disso, o modelo também é não-amortecido e, portanto, tende naturamente a apresentar frequências naturais menores do que o CDP real.

Outra observação importante que pode ser feita é em relação à dificuldade para se obter melhores definições para a FRF em níveis de frequência mais elevados (acima de 500 Hz). Isto, por exemplo, pode dificultar a observação de mudanças na FRF resultantes de um processo de falha e/ou danificação da junta. Uma análise comparativa entre o modelo computacional e o ensaio experimental permite evidenciar as diferenças comentadas (Figura 4-6).

Verifica-se, ainda, que alguns modos de flexão também não puderam ser detectados, como por exemplo, o sétimo e o oitavo. Isto ocorre devido ao fato do nó em análise encontrar-se muito próximo a um nó modal. Computacionalmente, o ponto a 100 milímetros do engaste é excitado, ainda que muito próximo do nó modal do sétimo e oitavo modos de flexão. No entanto, durante o experimento, com o uso de engastes reais, o amortecimento da junção que une os aderentes, o erro de posicionamento, bem como demais incertezas do ensaio experimental, como por exemplo, a pré-carga, estima-se que a linha de medição A1 (Figura 4-4) tenha ficado sobre o nó modal do sétimo modo de flexão e nas proximidades do nó modal do oitavo modo de flexão.

Outro aspecto que deve ser mencionado, e que diferencia a análise computacional do ensaio experimental, são os arredondamentos dos picos de ressonância, como resultado do amortecimento da estrutura. Nos modelos, por não incorporar amortecimento, as FRFs, nas frequências de ressonâncias, são marcadas por picos agudos. Por outro lado, verifica-se picos mais arredondados nas FRFs obtidas a partir dos ensaios experimentais. Isto evidencia o alto grau de amortecimento da estrutura, sendo que tal fenômeno é inerente às juntas do tipo coladas, devido à presença do adesivo polimérico na região da junção.

Infelizmente, devido à indisponibilidade de ferramentas adequadas para quantificar a pré-carga adicionada na montagem experimental, não se pode alterar o modelo computacional. Todavia, vale destacar que este será um problema comum a ser enfrentado durante o projeto e análise de juntas. Pois, os aderentes das juntas fazem parte de uma estrutura maior, que por sua vez será acoplada a outras estruturas. E, portanto, haverá inerentemente pré-cargas de montagem (desconhecidas) atuando na junta.

Por fim, as divergências entre os resultados experimentais e computacionais do estudo de Caso 1 podem estar também associadas a razão entre o comprimento da sobreposição e o comprimento do vão livre entre os engastes (INGOLE e CHATERJEE, 2011). Erros de até 17,8% são reportados na literatura entre o valor experimental e o valor obtido por modelos (HE, 2012). Portanto, variações até desta ordem foram consideradas como aceitáveis para o presente trabalho.

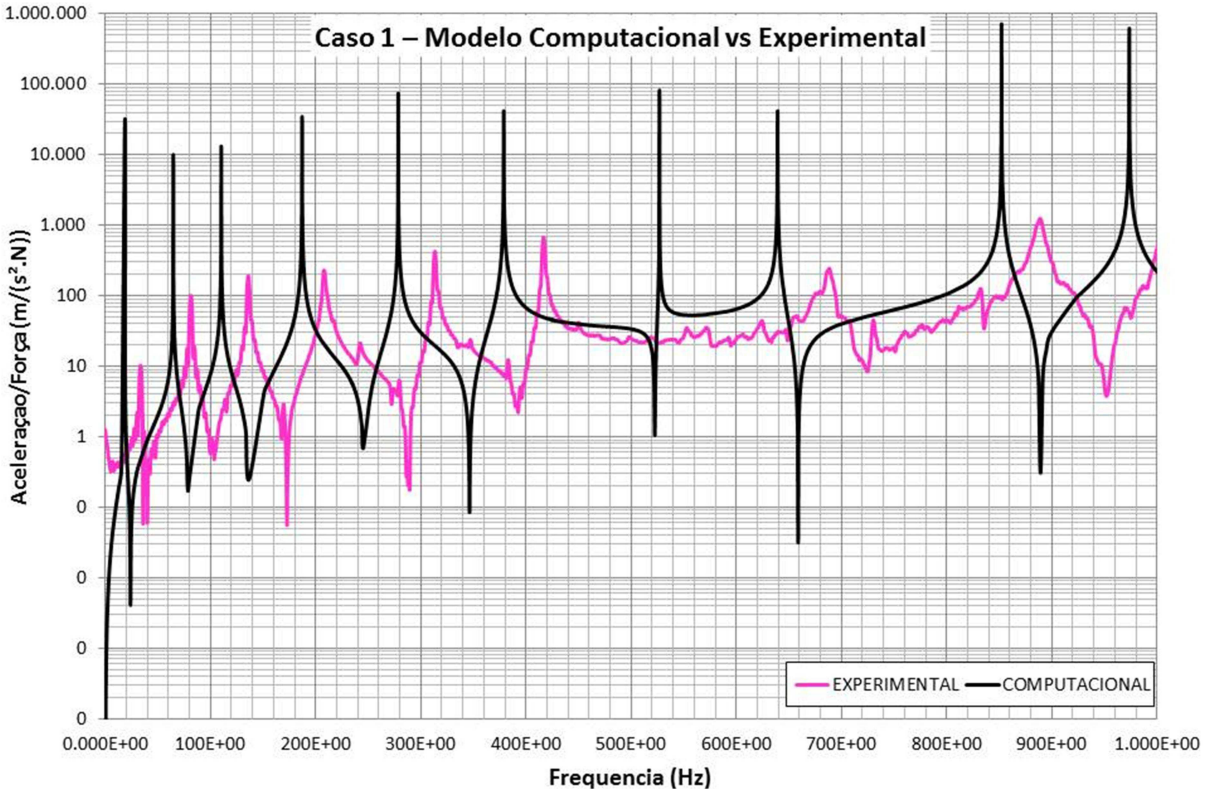


Figura 4-6 - Estudo de Caso 1: Análise Experimental vs. Modelo Computacional

4.2.2. ESTUDO DE CASO 2 (A INFLUÊNCIA DA PASTILHA PIEZELÉTRICA)

Com a montagem em batelada, conforme comentado anteriormente, busca-se condições de engaste mais uniformes e, portanto, dentro do universo dos ensaios experimentais, garantir a melhor homogeneidade possível de vinculação entre os CDPs ensaiados. Vale ressaltar que oO CDP número 5 foi selecionado para o estudo de Caso 2.

É importante lembrar que até o presente momento, nenhum tipo de modelo computacional havia sido proposto considerando a presença da pastilha piezelétrica. Dessa forma, para elaborar o referido modelo, adotou-se a seguinte estratégia: modificar a junta Tipo A, apresentada no Capítulo 3, adicionando uma pastilha piezelétrica na posição sugerida pela Figura 4-1. Deve-se destacar, também, como mencionado no Capítulo 3, que a adesão entre o transdutor piezelétrico e o aderente é considerada como perfeita nos modelos computacionais, empregando assim o comando *"tie"* do programa *Abaqus*. Além disso, para modelar o transdutor piezelétrico são utilizados elementos sólidos com interpolação parabólica, possuindo 20 nós com 4 graus de liberdade por nó (C3D20E), sendo 3 para as translações e 1 para

potencial elétrico. A Figura 4-7 e a Figura 4-8 evidenciam o modelo via elementos finitos da junta híbrida intacta com a pastilha piezelétrica.

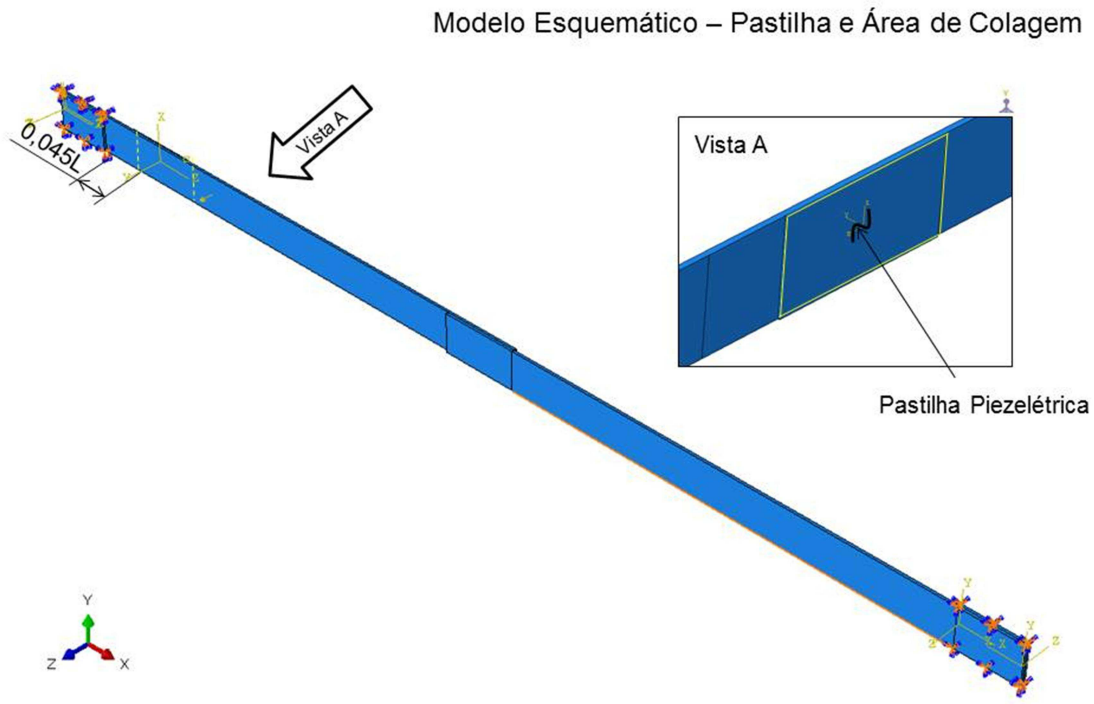


Figura 4-7 - Modelo Esquemático da Junta com a Pastilha Piezelétrica.

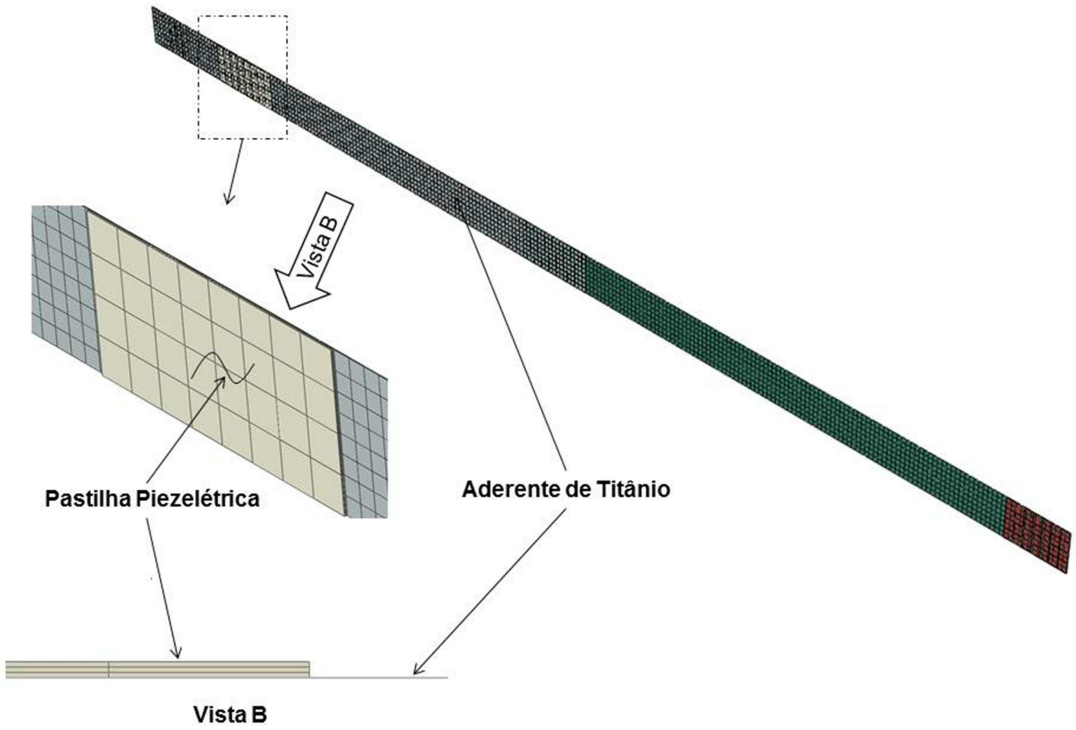


Figura 4-8 - Junta e Pastilha Piezelétrica com identificação da Malha.

Além dos aspectos supracitados, destaca-se também que as propriedades efetivas do transdutor foram obtidas com base no trabalho desenvolvido Medeiros (2012).

Com a inserção da pastilha piezelétrica, verifica-se através da Figura 4-9 e da Figura 4-10, que há uma ligeira alteração das frequências naturais, bem como nos modos de vibrar da junta híbrida avaliada no estudo de Caso 1. Tal alteração se deve ao acréscimo de massa e devido a uma alteração localizada da rigidez com a inserção do transdutor. Outra alteração perceptíve l entre os referidos modelos é a ocorrência de um pico de ressonância em 765 Hz (Figura 4-10), onde se detecta um modo de flexo-torção (Figura 4-9), anteriormente imperceptível no modelo sem a pastilha piezelétrica.

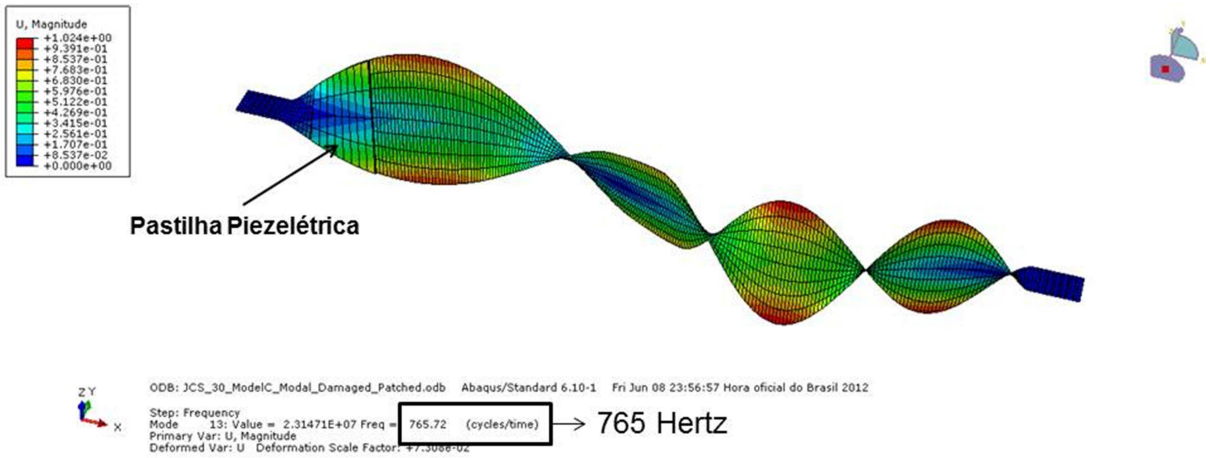


Figura 4-9 – Estudo de Caso 2: Modo de Vibrar em Flexo-torsão.

Vale ressaltar que as variações percebidas no modelo computacional não garantem necessariamente que serão observadas experimentalmente, uma vez que as variações notadas são consideravelmente pequenas. Percebe-se também, com base nos Modelos Computacionais, que ora as frequências naturais se elevaram, ora se reduziram como pode ser visto na Tabela 4-2.

Uma análise dos modos de vibrar permite concluir que este comportamento esta relacionado com a forma com que o transdutor é solicitado mecanicamente. Nota-se que as frequências naturais se elevaram, quando associadas aos modos que comprimem a pastilha piezelétrica. No entanto, para alguns modos de flexão, o elemento piezelétrico é tracionado, e as frequências naturais da estrutura foram reduzidas.

A Figura 4-11 apresenta uma análise comparativa entre as frequências naturais obtidas computacionalmente com o acelerômetro (ou seja, através de um nó do modelo em elementos finitos) e com o sensor piezelétrico (ou seja, através de um nó do elemento C3D20E). Verifica-se que ambos os procedimentos estão obtendo valores muito próximos, ou seja, os picos de ressonância, praticamente, não apresentam defasagem entre si.

Tabela 4-2 - Comparativo de frequências naturais entre o modelo computacional sem pastilha piezelétrica e com pastilha piezelétrica.

Comparação : *Solid vs. Shell – Span* 300 mm			
	Frequência Natural [Hz]		
No. do Modo	***Sem Transdutor***	***Com Transdutor***	**Diferença (%)(1)**
1º	18,745	19,208	-2,470
2º	64,694	64,676	0,028
3º	110,29	111,40	-1,006
4º	187,13	184,36	1,480
5º(*)	234,65	235,82	-0,499
6º(*)	261,5	263,97	-0,945
7º	278,56	277,84	0,258
8º(*)	349,71	352,89	-0,909
9º	378,85	372,38	1,708
10º	526,920	522,51	0,837
11º	639,27	634,00	0,824
12º(*)	649,67	654,45	-0,736

(*) Modo de Torsão

(I) Diferença – calculada segundo a seguinte equação: $\left(\frac{\omega_{Intacta} - \omega_{Danificada}}{\omega_{Intacta}}\right)$

Quanto ao ensaio experimental, conforme previamente elucidado, o CDP do Caso 1 apresentou um comportamento influenciado pela ação das cargas axiais de tração devido à montagem biengastada. Como o CDP do Caso 2, também, foi ensaiado com o mesmo *setup*, um comportamento semelhante também é notado, conforme mostrado pela Figura 4-12 e pela Figura 4-13. Portanto, as mesmas observações feitas para os ensaios experimentais do estudo de Caso 1 são válidas para o estudo de Caso 2.

Adicionalmente, ao se observar os resultados do ensaio experimental, constata-se tendência de enrijecimento do CDP com a pastilha piezelétrica colada. Por outro lado, além da presença da pastilha, deve-se destacar a camada de adesivo entre o aderente e a pastilha piezelétrica. Em sendo assim, a presença do adesivo pode, também, mesmo que pouco,

interferir no comportamento mecânico da junta. O efeito da tensão axial devido à montagem também influência fortemente a FRF.

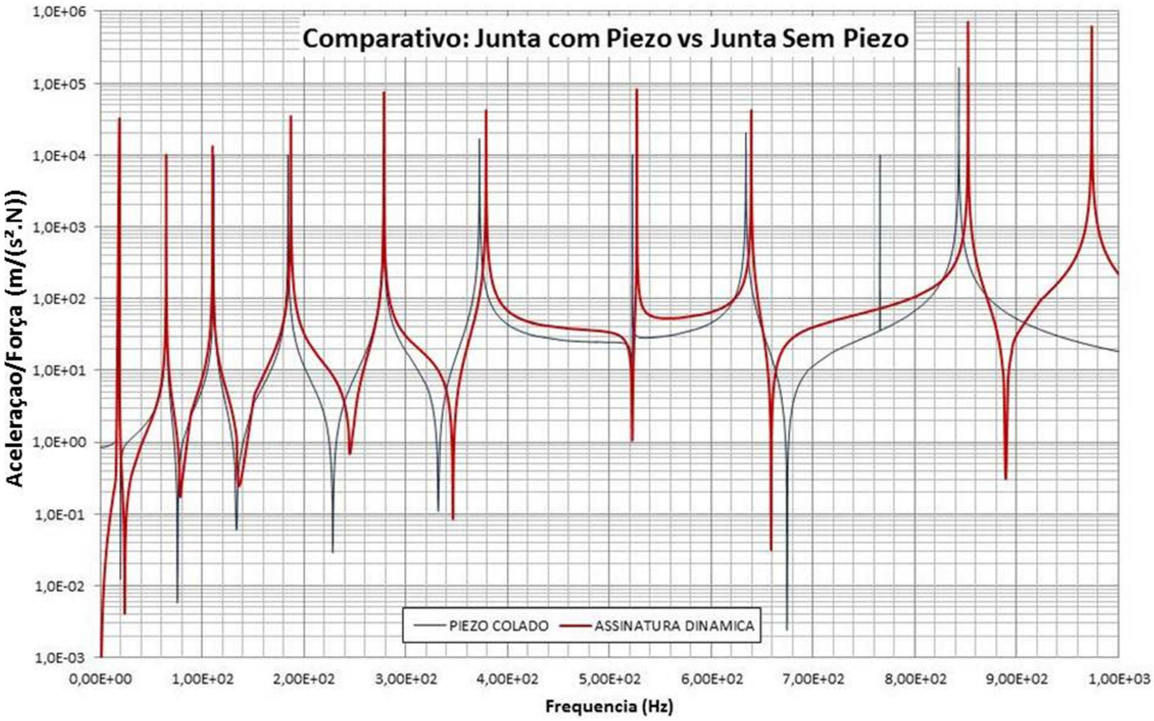


Figura 4-10 Modelos Computacionais: Caso 1 vs Caso 2.

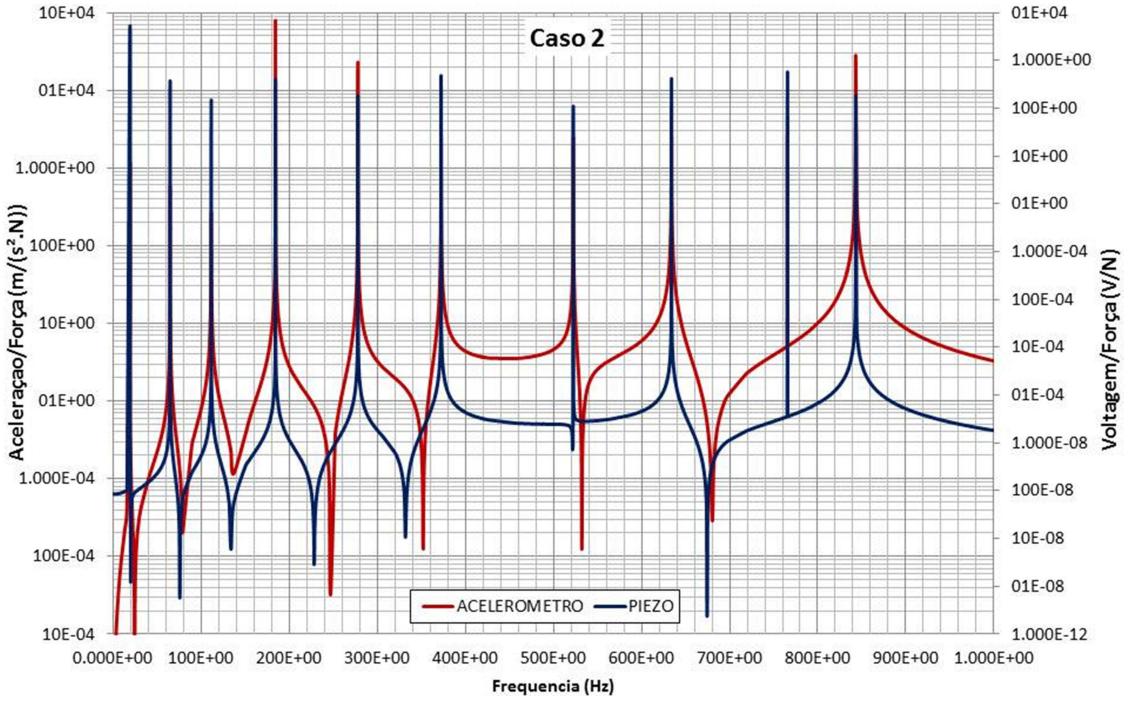


Figura 4-11 – Modelos Computacionais do Caso 2: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica.

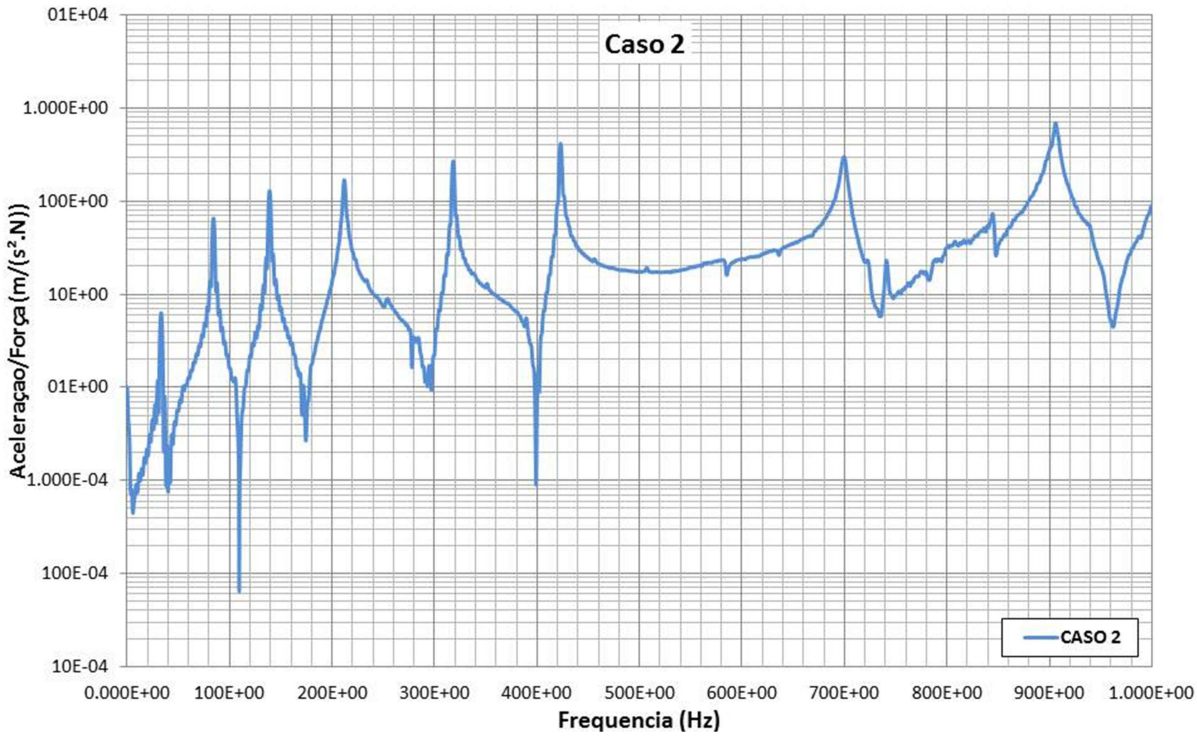


Figura 4-12 - Estudo de Caso 2 - junta híbrida intacta (com PZT) monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental.

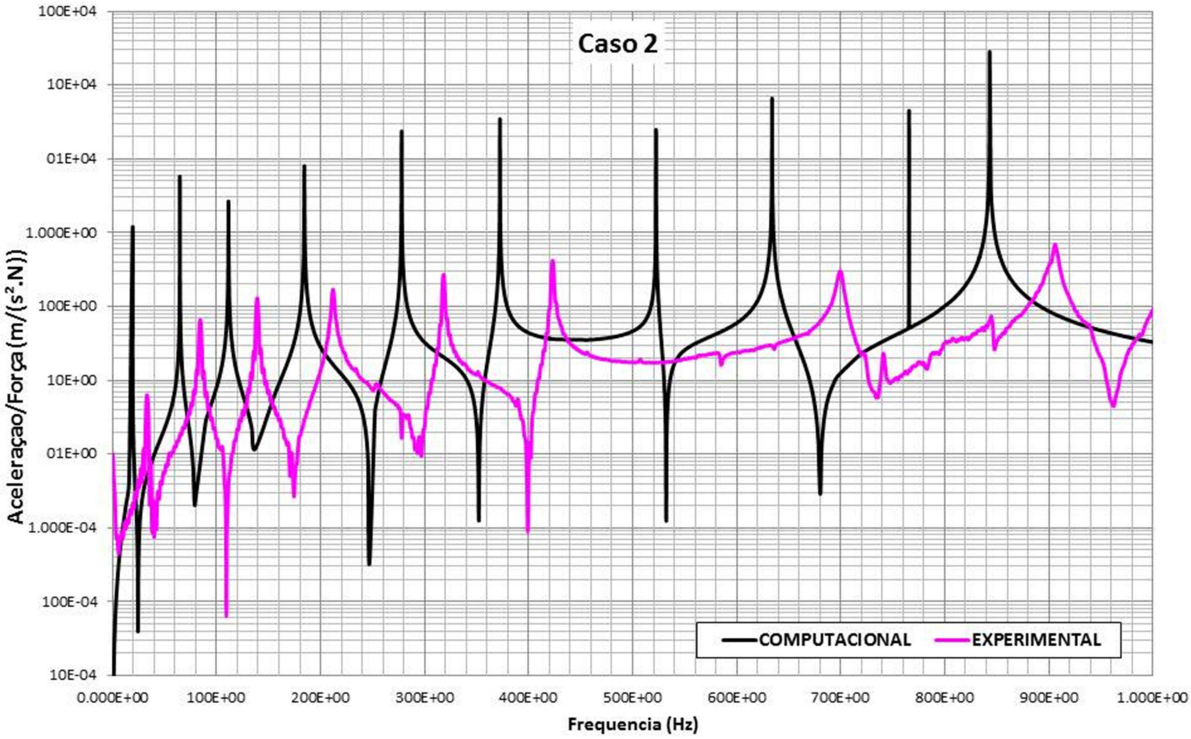


Figura 4-13 – Estudo de Caso 2: Análise Experimental vs. Modelo Computacional.

Assim como nos modelos computacionais, com base no estudo comparativo entre os ensaios experimentais do Caso 1 (intacto sem pastilha piezelétrica) e do Caso 2 (intacto com pastilha piezelétrica), constata-se uma ligeira diferença entre as frequências naturais. De acordo com a Figura 4-14, o CDP com a pastilha piezelétrica apresenta-se um pouco mais rígido do que o CDP sem o transdutor. Como já discutido anteriormente, dentre as diversas razões para a ocorrência dessa variação, tem-se que a presença da pastilha piezelétrica altera as características de rigidez dinâmica da estrutura e, portanto, modifica as frequências naturais da junta.

Quanto ao sinal medido pelo acelerômetro no ensaio experimental, nota-se que as frequências naturais puderam ser bem determinadas, inclusive o nono modo. Vale ressaltar que, anteriormente, o referido modo não havia sido detectado pelos acelerômetros, pois os mesmos estavam montados sobre esse nó modal. Outro aspecto importante observado nos ensaios experimentais é que o sinal medido pela pastilha piezelétrica possui uma leve defasagem entre o sinal proveniente do acelerômetro, principalmente para as frequências naturais mais elevadas (Figura 4-15).

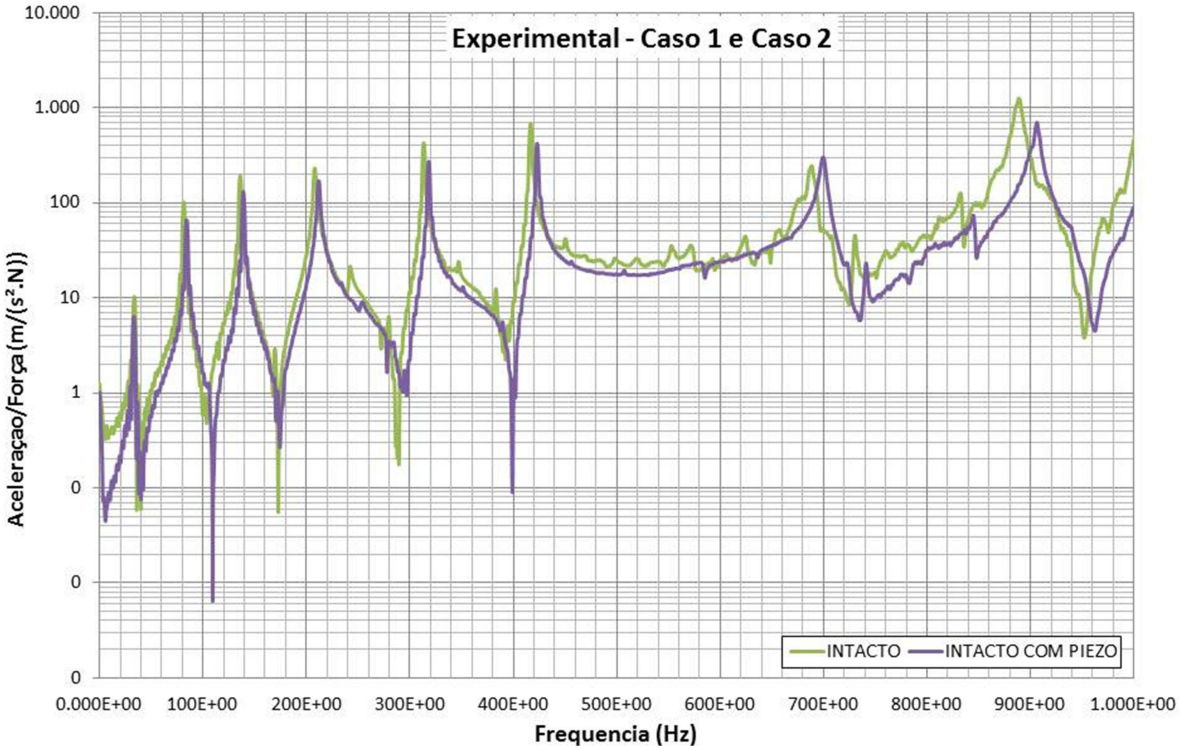


Figura 4-14 – Análises Experimentais: Caso 1 vs Caso 2.

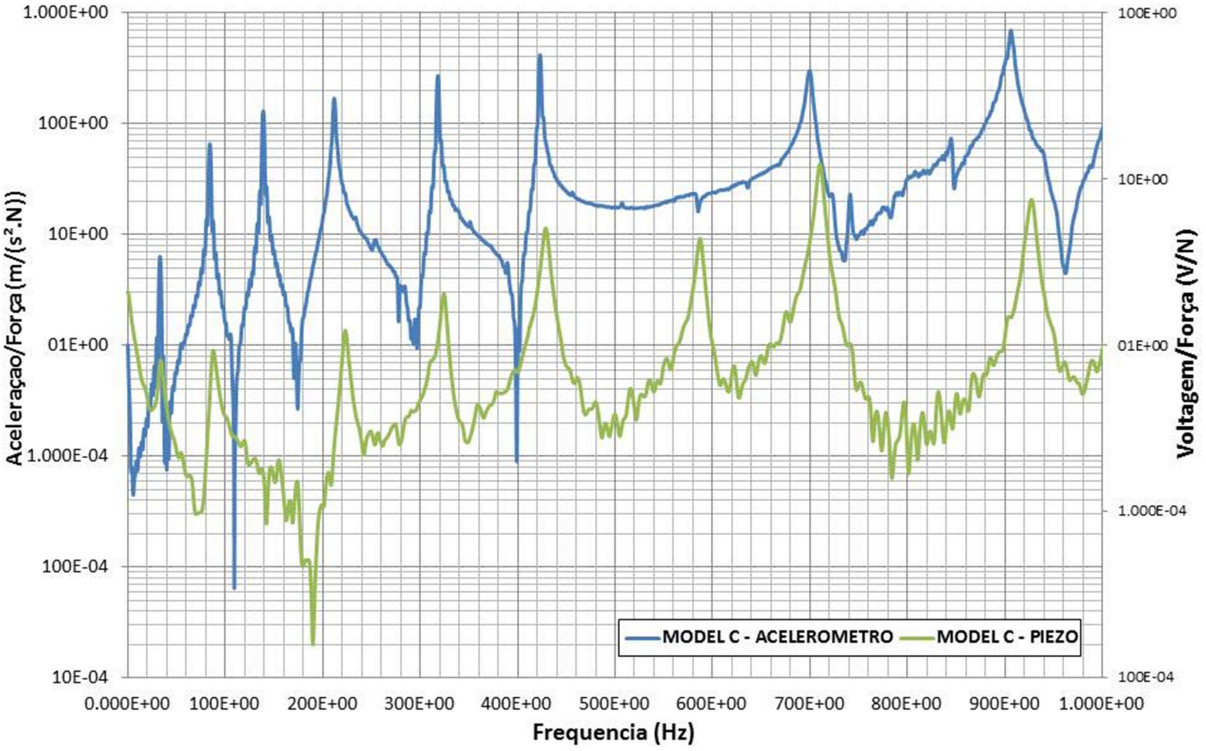


Figura 4-15 Análises Experimentais do Caso 2: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica.

4.3. JUNTAS DANIFICADAS (RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS)

Depois de realizadas as análises com as juntas intactas, faz-se a avaliação das juntas danificadas, que consistem basicamente em avaliar de forma experimental e computacional as estruturas danificadas sem a pastilha piezelétrica (Caso 3) e com a pastilha piezelétrica (Caso 4). De forma análoga ao processo anteriormente utilizado para a junta sem dano, neste capítulo, serão apresentados os resultados computacionais associados com seus respectivos resultados experimentais.

4.3.1. ESTUDO DE CASO 3 (O EFEITO DO CONTATO E A PERDA DE RIGIDEZ)

Uma vez danificada, a junta passa então a apresentar perda de rigidez estrutural, conforme previamente apresentado como resultado da avaliação computacional no Capítulo 3, por meio dos modelos Tipo B. Do ponto de vista experimental, este CDP foi ensaiado com o mesmo *setup* usado para ensaiar o CDP intacto sem e com o transdutor piezelétrico. Portanto,

empregou-se o mesmo dispositivo, conforme evidenciado pela Figura 4-4. Sendo que para o ensaio do Caso 3 (danificada sem a pastilha piezelétrica), fez-se uso do CDP número 2 (Tabela 4-1).

Como base nos resultados do estudo de Caso 3, os seguintes aspectos podem ser destacados: alteração em alguns modos, principalmente o terceiro, o quarto e o quinto modos de flexão (Figura 4-16 e Figura 4-17); redução na amplitude do pico de ressonância encontrado no nono modo de flexão - na faixa de 852 Hz. Ainda que submetidos ao efeito da carga axial de tração devido à montagem biengastada, tem-se que os resultados do modelo computacional sofrem perturbações assim como os resultados experimentais (Figura 4-17). As variações encontradas nos modelos computacionais foram similares àquelas detectadas experimentalmente, ou seja, em modos mais elevados identifica-se um comportamento anômalo da estrutura. No entanto, a Figura 4-18 revela que a técnica de monitoramento, baseada somente nas FRFs, mostra-se eficiente apenas para frequências mais elevadas.

Em virtude da perturbação da resposta medida por um acelerômetro tanto experimental como computacionalmente, devido à presença de um dano na estrutura, motiva-se o processo de detecção do mesmo dano através de pastilha piezelétrica, como mostrará o estudo de Caso 4 (junta danificada com a pastilha piezelétrica).

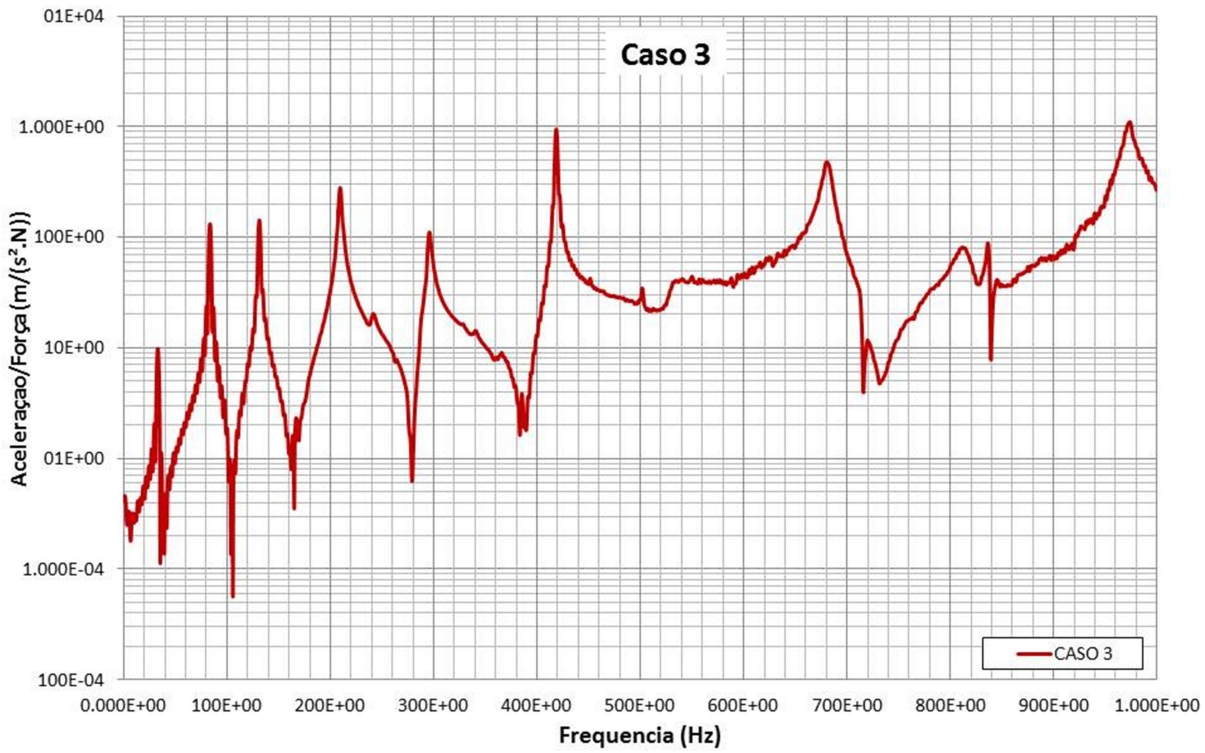


Figura 4-16 - Estudo de Caso 3 - junta híbrida danificada monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental.

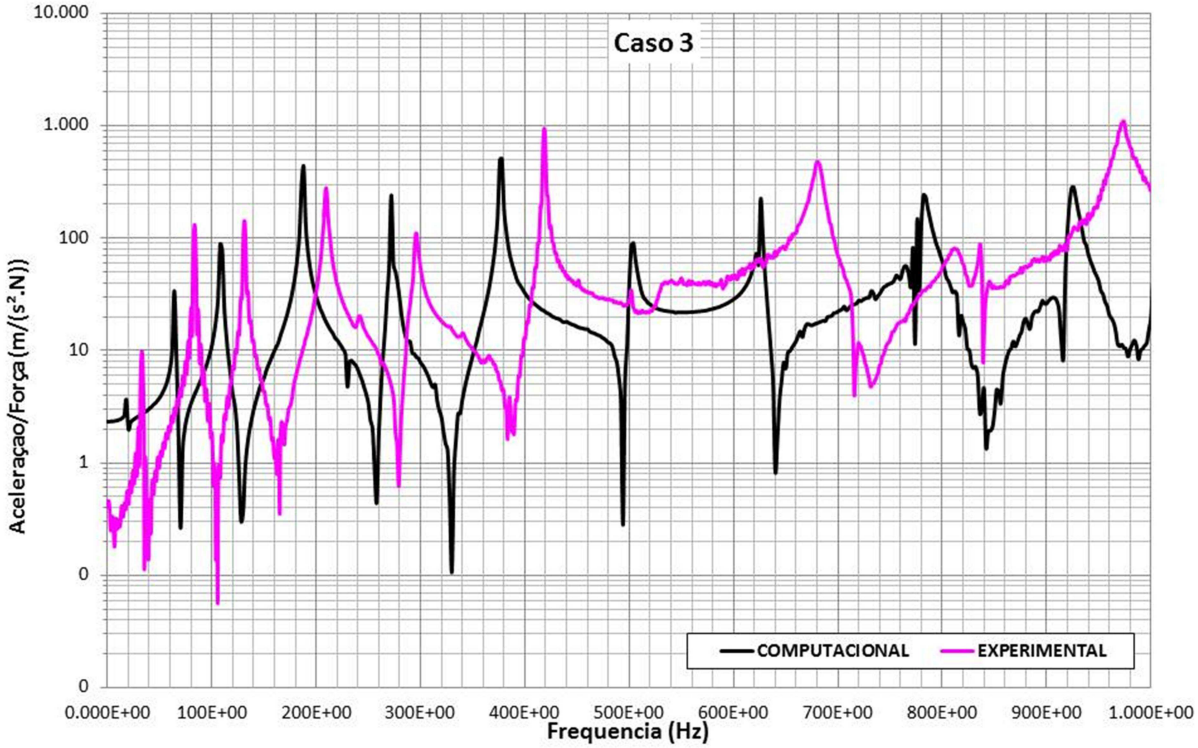


Figura 4-17 - Estudo de Caso 3: Análise Experimental vs. Modelo Computacional.

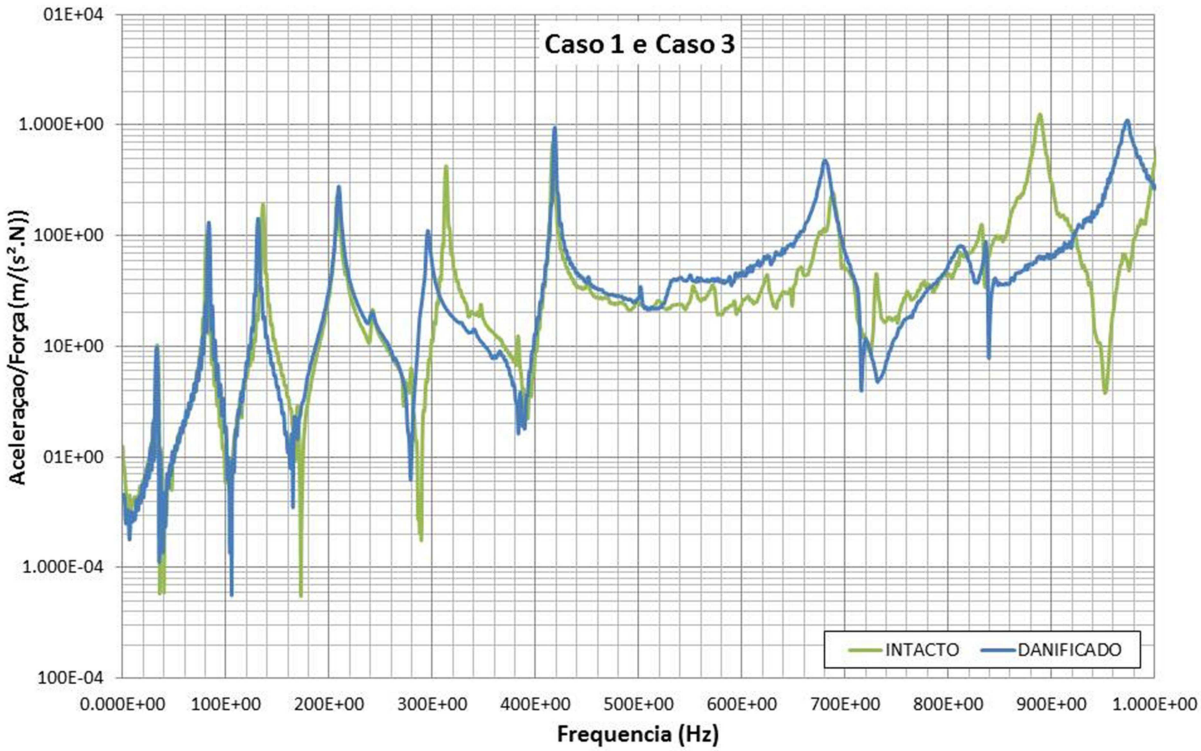


Figura 4-18 - Análises Experimentais: Caso 1 vs Caso 3.

4.3.2. ESTUDO DE CASO 4 (A TÉCNICA DE MONITORAMENTO PROPOSTA)

Uma vez que os resultados anteriormente obtidos comprovam a aplicabilidade da técnica de monitoramento, procede-se com a análise do Estudo de Caso 4, empregando o CDP número 6. Para esta análise, recorre-se novamente ao algoritmo *Dynamic Implicit* disponível no programa *Abaqus*. Tal algoritmo possibilita a aquisição de valores de deslocamento em função do tempo, para posteriormente gerar a curva de resposta em frequência para a junta danificada e monitorada pelo transdutor piezelétrico.

O resultado computacional, conforme ilustra a Figura 4-19, foi capaz de detectar alterações nos valores de frequência natural, ainda que de maneira discreta, principalmente, para o primeiro modo, no caso do sinal coletado pela pastilha piezelétrica. As antirressonâncias não tiveram vales bem distintos e definidos, mas de maneira geral os picos de ressonância foram detectados com clareza, e em concordância com a medição feita pelo acelerômetro.

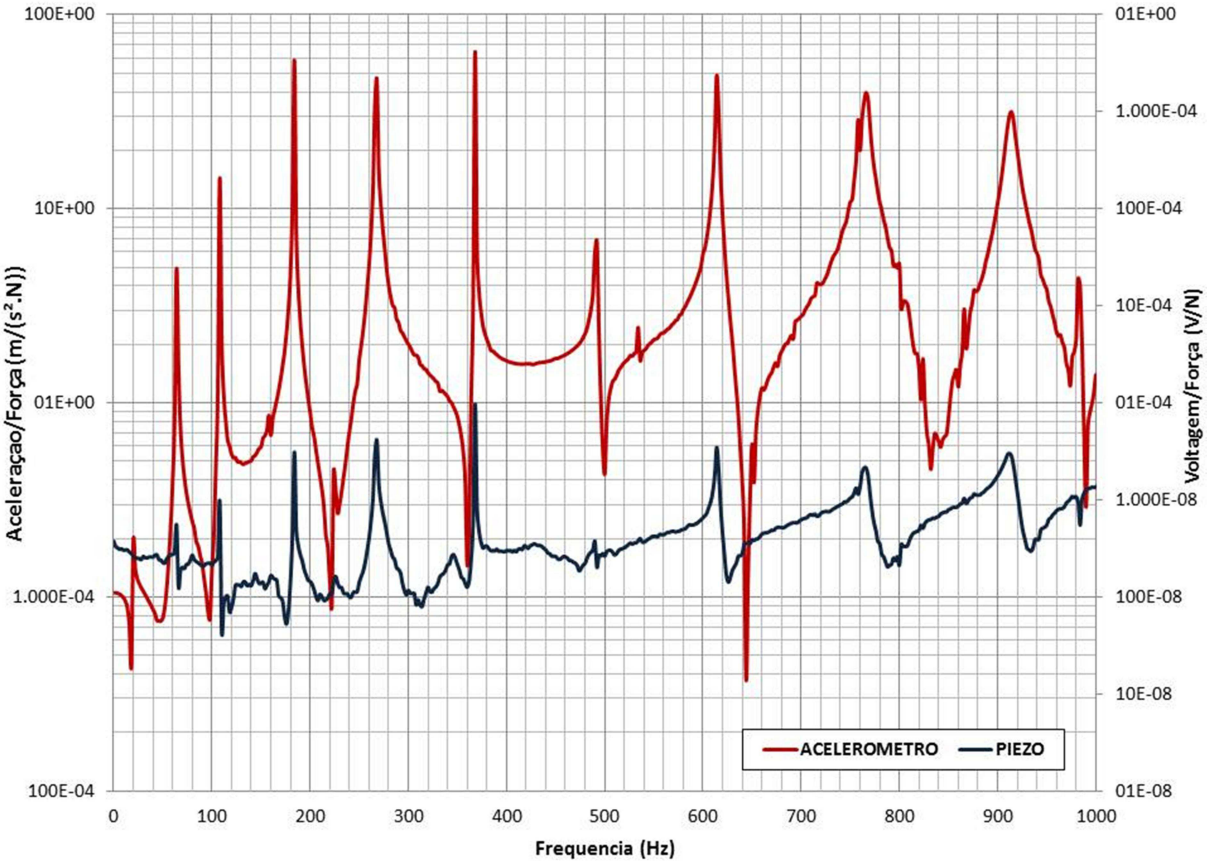


Figura 4-19 - Modelos Computacionais do Caso 4: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica.

Quanto ao ensaio experimental, a curva FRF seguiu o mesmo contorno encontrado anteriormente para o estudo de Caso 3, com perda do pico de ressonância no nono modo de flexão, ou seja, de forma semelhante para com o modelo computacional (Figura 4-20). No entanto, verifica-se que a FRF do CDP sem a pastilha piezelétrica apresenta o nono pico de ressonância com uma redução mais severa de amplitude, caso seja comparada com a FRF do CDP com o transdutor colado (Figura 4-21 e Figura 4-22).

A Figura 4-21, compara os resultados experimentais com os resultados obtidos pelo modelo computacional do Caso 4, da mesma forma que foi efetuado para o Caso 1 e para o Caso 2. Nota-se pelo efeito da pré-carga devido à montagem biengastada, bem como por demais variações que possam advir entre o modelo computacional proposto e o ensaio experimental, que algumas variações dos valores de frequência natural são relevantes. Ainda assim, o comportamento da curva experimental como computacional são bastante semelhantes caso seja removida a defasagem existente. Além disso, constata-se que o ensaio experimental não detecta muito bem algumas frequências naturais, em função da localização da pastilha piezelétrica para determinados modos de vibrar.

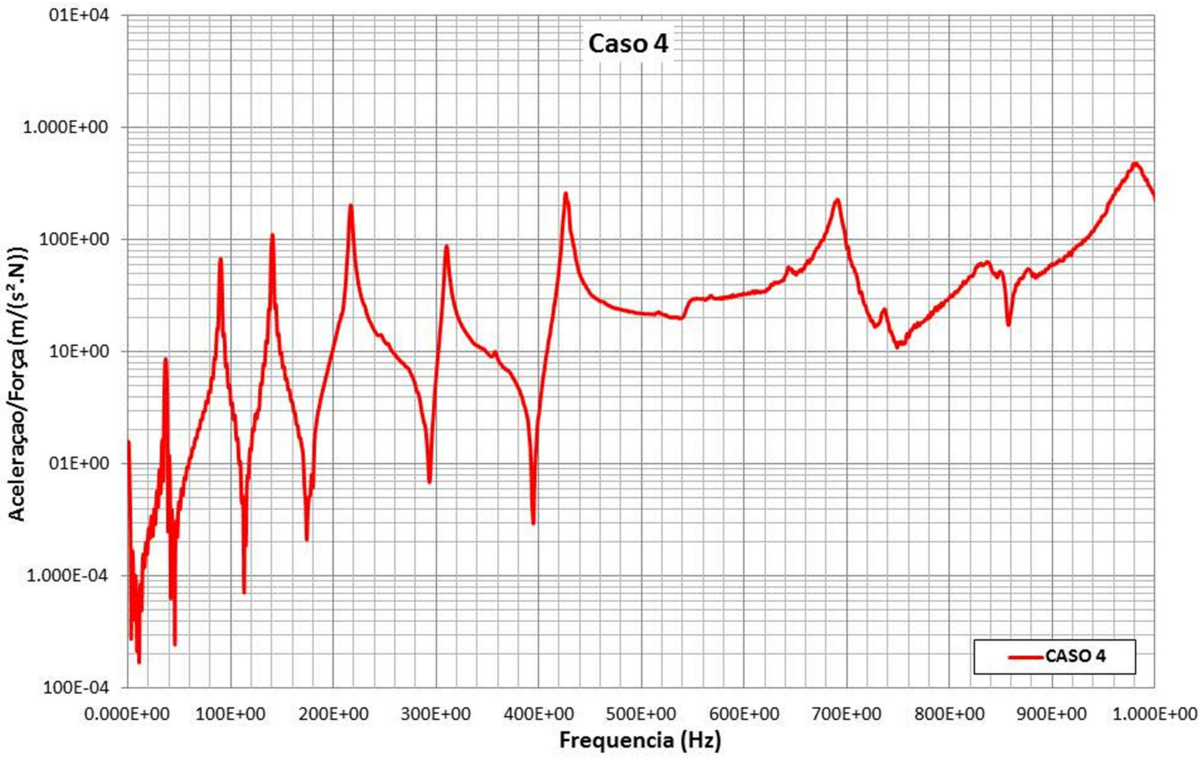


Figura 4-20 - Estudo de Caso 4 - junta híbrida danificada (com PZT) monitorada por acelerômetros: Ensaio Experimental.

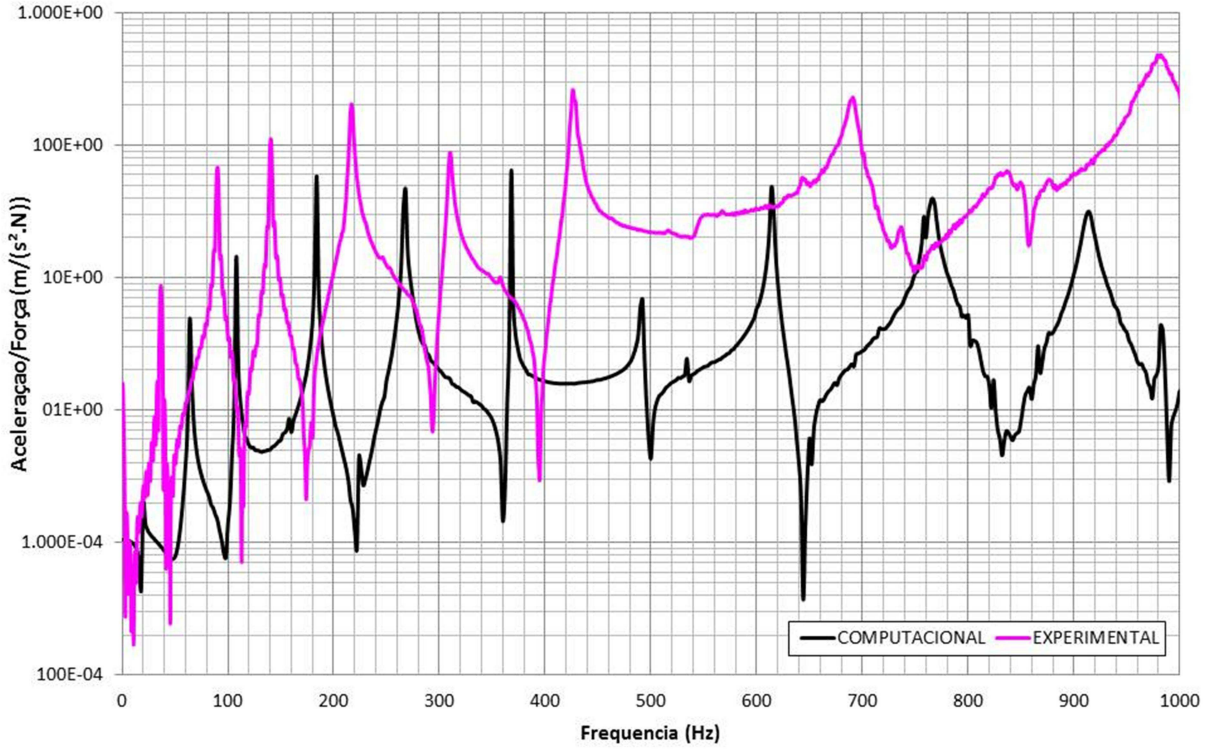


Figura 4-21 - Estudo de Caso 4: Análise Experimental vs. Modelo Computacional.

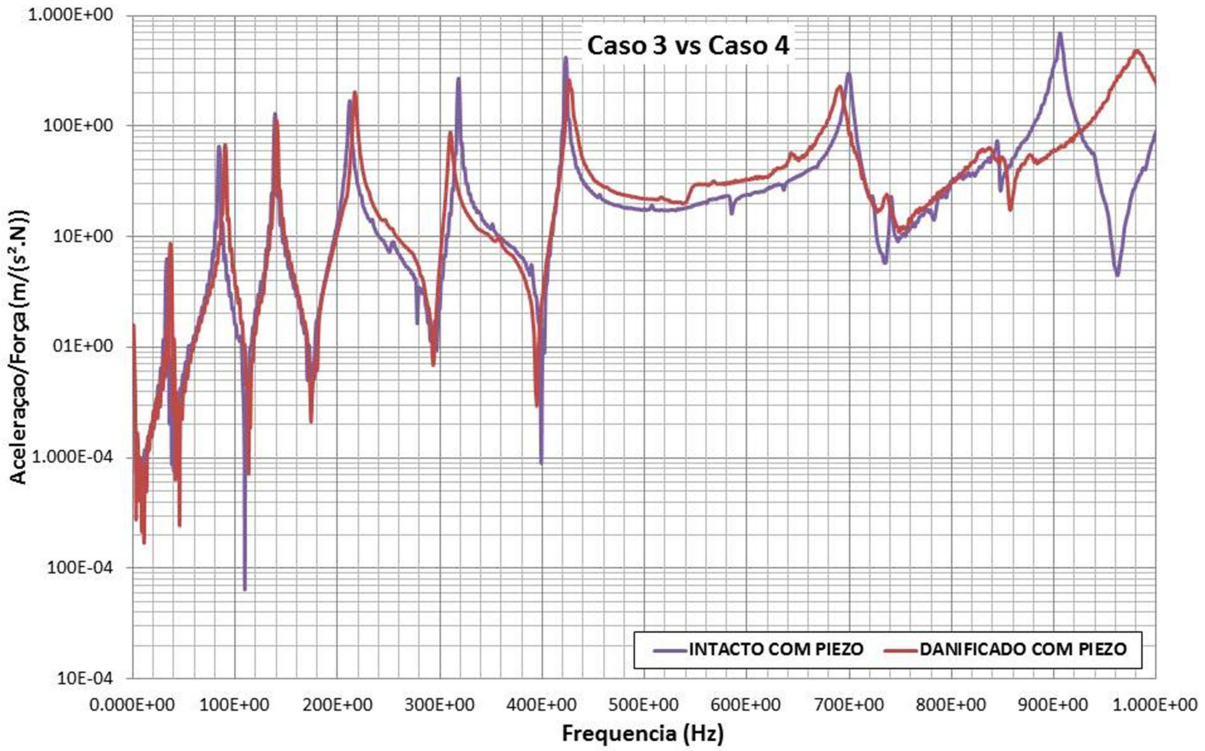


Figura 4-22 - Análises Experimentais: Caso 3 vs. Caso 4.

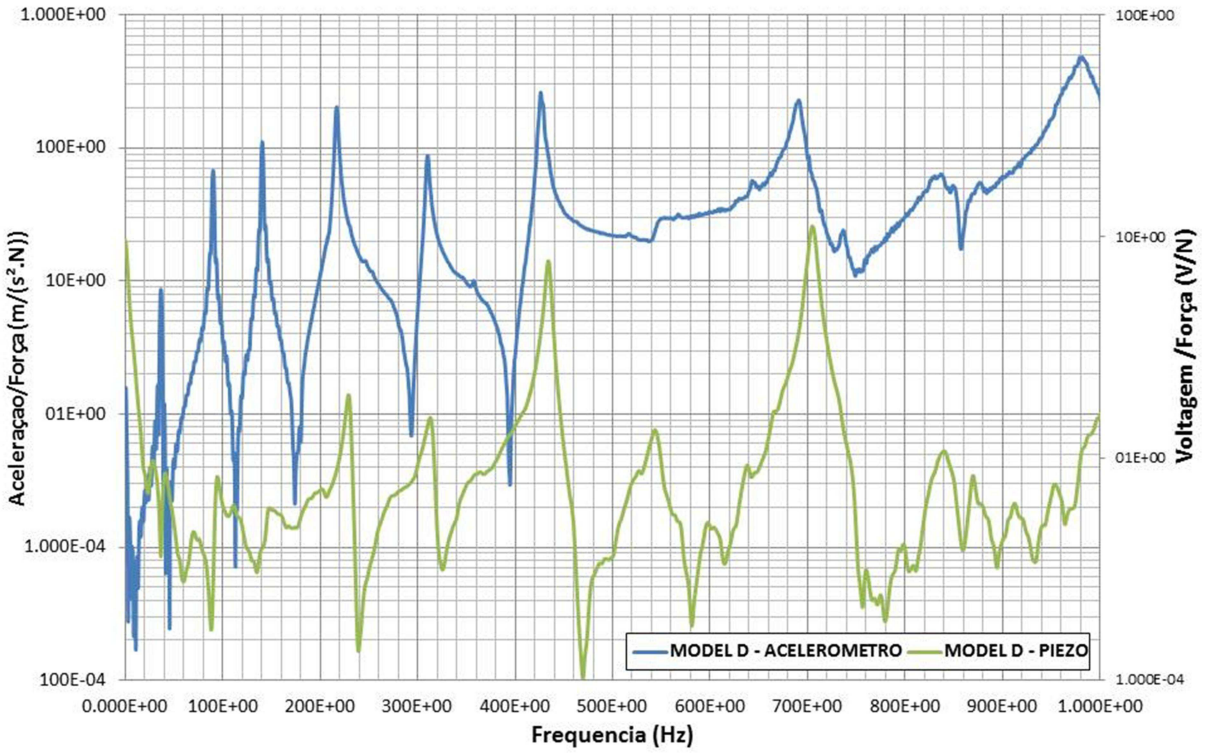


Figura 4-23 Modelos Computacionais do Caso 4: Acelerômetro vs. Pastilha Piezelétrica.

Considerando o ensaio experimental e, comparando-se as curvas FRF dos Casos 3 e 4 (Figura 4-22), verifica-se que a estrutura danificada apresenta menor rigidez, como era de se esperar, uma vez que a junta perde capacidade de transferir carga. Além disso, os sinais obtidos tanto pelo acelerômetro, quanto pela pastilha piezelétrica apresentam boa coerência, ainda que existam pequenas diferenças entre os referidos sinais. Ademais, verifica-se no Caso 4, que os picos de ressonância medidos pelo transdutor piezelétrico correspondem a frequências naturais ligeiramente superiores às dos picos de ressonância medidos pelos acelerômetros (Figura 4-21).

A Figura 4-24 apresenta o resultado das medições realizadas através de acelerômetros colados no aderente de material compósito, efetuadas para os 4 estudos de caso, e verifica-se, que guardada as devidas proporções relativas ao posicionamento dos sensores, houve pouca variação nas FRFs. Portanto, as análises não são conclusivas a respeito da falha ou da presença da pastilha piezelétrica. Em sendo assim, recomenda-se que as medidas sejam sempre realizadas no aderente de titânio.

No caso da avaliação de outra junta híbrida metal-compósito, conclui-se que para a obtenção de resultados mais precisos, os sensores devem ser colados na parte isotrópica da junta, ou seja, no aderente metálico. Por outro lado, de forma geral, os modos iniciais estão

muito próximos entre os modelos ensaiados, mesmo aqueles em que a junta está danificada, que estejam sendo monitorados pela pastilha piezelétrica ou por ambos (acelerômetro e pastilha piezelétrica). Nota-se que as diferenças maiores são encontradas nas frequências acima de 500Hz, porém, ainda, os picos não estão bem definidos. Por fim, constata-se que na nona frequência de flexão, o sinal da estrutura danificada fica nova e claramente distorcido, ou seja, sem clareza, denotando a perda desta forma de vibrar.

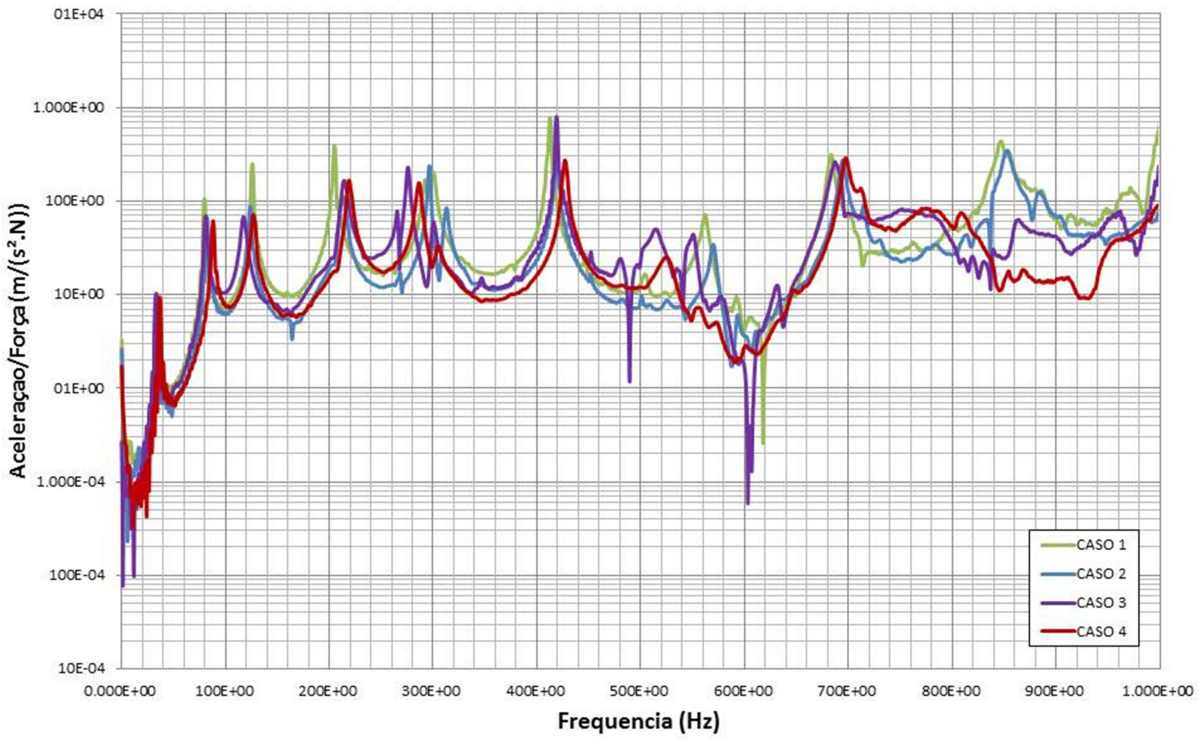


Figura 4-24 - Análises Experimentais: comparação entre os 4 estudos de caso.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Com relação à revisão bibliográfica realizada, conclui-se que a mesma apresentou os trabalhos científicos mais relevantes, bem como, os mais recentes que foram desenvolvidos na área de análise de juntas coladas, empregando abordagem numérica, analítica e/ou experimental. Todavia, constata-se que praticamente não há trabalhos publicados sobre o monitoramento de juntas coladas utilizando pastilhas piezelétricas e técnicas de SHM (*Structural Health Monitoring*), principalmente para juntas híbridas.

Com relação aos modelos computacionais preliminares, que foram desenvolvidos via MEF, tem-se que os mesmos minimizaram drasticamente o número de corpos de prova fabricados, uma vez que juntas metal-compósito foram simuladas, avaliando-se antecipadamente efeitos indesejados. Neste caso pode-se prever condições de ensaio comprometedoras antes mesmo de concluir a proposta de fabricação dos CDPs, e como resultado dos ensaios preliminares escolhas conscientes puderam ser feitas, dentre as quais podem ser citadas: a geometria da junta, para que essa apresentasse mais translação do que rotação; a escolha do melhor posicionamento para os acelerômetros e transdutores piezelétricos, bem como uma junta que pudesse ser ensaiada com o aparato laboratorial disponível.

Outra informação importante a cerca da análise computacional é a necessidade de boa capacidade de processamento, pois, os modelos dinâmicos com solução via MEF são gerados com elevada quantidade de elementos e, por conseguinte nós, que são empregados para descrever o comportamento da junta. Portanto, o uso de refinamentos desnecessários não representam bons resultados, como seria rotineiro empregar. Assim, o elevado número de elementos e, consequentemente, nós não somente dificulta o processo de análise, mas também, requer o uso de elevada capacidade de processamento, principalmente para o modelo de contato, que simula a junta danificada.

Quanto ao processo de fabricação das amostras de juntas metal-compósito, utilizado no presente trabalho, tem-se que o mesmo seguiu fielmente as recomendações encontradas na literatura. Além disso, com base nas informações contidas na revisão bibliográfica, pode-se identificar, de forma bastante prática, quais as razões que levam os processos de colagem a serem preteridos, e o porquê desta técnica ainda ter pouca aceitação no meio de manutenção aeronáutica, perdendo espaço para alternativas mais simples como, por exemplo, as soluções de

juntas mecânicas, que são mais largamente utilizadas. Conclui-se assim, a importância e a relevância do presente estudo no sentido de contribuir para o monitoramento da integridade estrutural de juntas coladas.

Quanto aos resultados experimentais dinâmicos das juntas metal-compósito sem dano, conclui-se, especificamente para o caso dos ensaios com as juntas em condição biengastadas, que deve haver grande demanda por esforços necessários no sentido de garantir a qualidade da preparação do ensaio experimental. Ainda que simples do ponto de vista conceitual, na prática, este tipo de ensaio se demonstrou bastante complexo, exigindo ao extremo a infraestrutura laboratorial disponível. Apesar do esforço no sentido de controlar as condições de carga axial inseridas nos CDPs (corpos de prova), durante a realização do ensaio experimental, constatou-se que esta condição não pode ser plenamente satisfeita, haja vista os resultados experimentais obtidos. Mesmo assim, com adaptação da infra-estrutura disponível, pôde-se conduzir os ensaios com relativa confiabilidade. Tomando os resultados apresentados sugere-se, para futuros trabalhos, que tenham como propósito obter maior domínio do ensaio, um dispositivo dedicado para esta tarefa, e que seja capaz de medir pré-cargas de montagem, bem como garantir o alinhamento axial e transversal dos CDPs. Vale destacar, também, que mesmo controlando a pré-carga não há garantias de que seus efeitos não sejam mais observados. Por isso é importante levar a pre-carga em consideração durante o projeto e análise de juntas, principalmente em função dos processos de fabricação disponíveis. Os aderentes das juntas, quando em campo, fazem parte de uma estrutura maior, que por sua vez será acoplada a outras estruturas. Assim, haverão inerentemente pré-cargas de montagem (desconhecidas) atuando na junta. Diante deste cenário, verifica-se novamente, que o presente trabalho traz uma considerável contribuição.

Quanto aos resultados experimentais dinâmicos das juntas metal-compósito com dano monitorado por transdutores piezelétricos, conclui-se que a detecção é possível, mesmo com a condição de pré-carga desconhecida. Comparativamente com CDPs expostos sob a mesma condição inicial, notou-se redução na frequência natural dos modos, demonstrando a perda de rigidez da junta. A pastilha piezelétrica, ainda que pequena, promoveu alterações no comportamento dinâmico da junta, elevando a frequência natural de alguns modos. Mesmo assim, a presença do dano foi detectada. Portanto, pode-se concluir que a técnica de monitoramento possui potencial para ser melhorada e aplicada não somente em escala laboratorial, mas também industrial.

Ainda referente aos ensaios experimentais, as medidas feitas no aderente de material compósito levaram a resultados insatisfatórios, por essa razão foram descartadas das análises. Recomenda-se, assim, que os sensores sejam instalados na parte metálica da junta híbrida a fim de que resultados mais satisfatórios sejam obtidos pelo uso da referida técnica de monitoramento. Como perspectivas para trabalhos futuros, tem-se que a técnica de monitoramento proposta possa ser refinada, a fim de que os sensores sejam colados também no aderente em material compósito.

Com base na comparação dos resultados computacionais com os experimentais, conclui-se que os modelos desenvolvidos apresentam limitações e potencialidades. Dentre as limitações, constatou-se que o modelo computacional não leva em consideração efeitos térmicos que podem alterar a leitura do transdutor. Além disso, o modelo também não contabiliza a flexibilidade do adesivo, que une o transdutor ao aderente, podendo este ser fonte tanto de amortecimento quanto de perda de rigidez. Ademais, os modelos computacionais não incorporam efeitos de amortecimento viscoso e/ou histerético, bem como não simulam o efeito da pré-carga devido à montagem biengastada. Dentre as potencialidades, tem-se que os valores de frequência natural encontrados pelos modelos são coerentes com os experimentais, ainda que uma pequena defasagem exista entre o valor obtido pelo acelerômetro e o obtido pelo transdutor piezelétrico.

Como perspectivas de trabalhos futuros, pode-se destacar a melhoria da técnica para detecção de danos ainda menores, bem como, utilizar a pastilha piezelétrica como um atuador no sentido de evitar que a junta atinja frequências naturais sem controle e, possa vir a sofrer algum tipo de dano, ou evoluir qualquer outro existente. Outra possibilidade estáa na associação desta técnica a outras, como forma de complementar não somente a detecção de danos, mas também de localizar o dano, quantificar sua extensão e, também prever uma vida e/ou resistência residual da junta danificada.

Conclui-se ainda que, mesmo não apresentando definições tão boas quanto outros métodos de detecção de danos, a presente técnica demonstra boa capacidade de ser usada para o monitoramento de estruturas em tempo real, garantindo considerável vantagem estratégica no que diz respeito às necessidades de monitoramento previamente colocadas como importantes para o mercado de aviação comercial.

6.BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics - fundamentals and applications**. 2nd. ed. New York: CRC Press, 1995.

ARMSTRONG, K. B.; BEVAN, L. G.; COLE II, W. F. **Care and Repair of Advanced Composite**. 2nd. ed. Warrendale: SAE INTERNATIONAL, 2005.

BAKER, A. A. **Issues in the certification of bonded composite patch repairs for cracked metallic aircraft structures**. in ICAF and APOS 99: Structural Integrity for the next Millennium. [S.l.]: ICAF. 1999.

BAKER, A. A.; ROSE, L. R. F.; JONES, R. Certification Issues for Critical Repairs, in Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure. **Elsevier Science Ltd**, Oxford, 2002. p. 643-657.

BAKER, A.; DUTTON, S.; KELLY, D. **Composite Materials for Aircraft Structures**. 2nd. ed. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

BALDAN, A. Review Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials:Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**, 39, 2004. 1– 49.

BERGANDER, A. **Control Wear Testing and Integration of Stick Slip Micropositioning (Phd)**. Faculté Sciences Et Techquiniques de L'ingénieur - Institut de Production et Robotique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. [S.l.], p. 189. 2003.

BERGANDER, A. **Control Wear Testing and Integration of Stick Slip Micropositioning (Phd)**. Faculté Sciences Et Techquiniques de L'ingénieur - Institut de Production et Robotique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. [S.l.], p. 189 p. 2003.

CALLISTER, W. D. **Ciencia e Engenharia de Materiais:** Uma Introdução. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Cientificos, 2002.

CARLSSON, L. A.; PIPES, R. B. **Experimental Characterization of Advanced Composite Materials**. Englewood Cliffs, New Jersey: PRENTICE-HALL, 1987.

COUTELLIER, D.; WALRICK, J. C.; GEOFFROY, P. Presentation of a Methodology for Delamination Detection within Laminated Structures. **Composites Science and Technology**, v. 66, p. 837-845, 2006.

DA SILVA, L. F. M.; LOPES, M. J. C. Q. Joint strengthoptimizationbythemixed-adhesivetechnique. **Internation Journal f Adhesion & Adhesives**, 2009. 509-514.

DANIEL, I.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials 2**. New York: Oxford University Press, 2006.

DAVIS, M.; BOND, D. **Certification of adhesive bonds for construction and repair.** in 4th Joint DoD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft. St. Louis: [s.n.]. 2000.

DIXON, M. C. **The Maintenance Costs of Aging Aircraft**. [S.l.]: Santa Monica, 2006.

GHONEAM, S. M.; HAMADA, A. A.; EL-ELAMY, M. I. Experimental and Analytical Investigation of the Dynamic Analysis of Adhesively Bonded Joints for Composite Structures. **Solid State Phenomena**, Switzerland, v. 147-149, p. 663-675, 2009.

GIURGIUTIU, V. **Multifunctional Vehicle Structural Health Monitoring Opportunities With Piezoelectric Wafer Active Sensors**. Mechanical Engineering Department Columbia. [S.l.], p. 11. 2010. (SC 29208).

HART, S.; BROWN, L. J.; WONG, S. **Handbook of Composites**. London: Chapman and Hall, 1998. pp. 667-685 p.

HE, X. Bond Thickness Effects upon Dynamic Behaviour in Adhesive Joints. **Advanced Materials Research**, Switzerland, v. 97-101, 2010.

HE, X. Numerical and experimental investigation of the dynamic resposnse of bonded beams with a single-lap joint. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Kunming, p. p.7, 2012.

HENKEL. Henkel TDS-Technical Data Sheets. **HENKEL**, 2001. Disponivel em: <https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/B8D891E40C3704B98525715C001BD4DD/$File/Hysol_EA_934NA-EN.pdf>. Acesso em: 02 Março 2012.

HEXCEL. HEXCEL M20 DATASHEET. **HEXCEL**, Março 2010. Disponivel em: <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M20_global.pdf>. Acesso em: 10 JUNHO 2012.

HEXCEL. DESCRIÇÃO TECNICA DO REFORÇADOR G0904, Agosto 2012.

IANUCCI, L. Progressive Failure Modeling of Woven Carbon Composite under Impact, 32, 2006. 1013-1043.

INGOLE, S. B.; CHATERJEE, A. Vibration analysis of single lap adhesive joint : E xperimental and analytical investigation. **Journal of Vibration and Control**, v. 17, p. 1547-1555, 2011.

KAR-GUPTA, R.; VENKATESH, T. A. Electromechanical response of 1-3 piezoeletric composites: an analytical model. **Acta Materialia**, 2007. v.55, n.3, p. 1093-1108.

KATZIR, S. **THE DISCOVERY OF THE PIEZOELECTRIC EFFECT - THE BEGINNINGS OF PIEZOELECTRICITY**. BOSTON: Springer Netherlands, 2006.

KAYA, A.; TEKELIOGLU, M. S.; FINDIK, F. Effects of various parameter on dynamic characteristics in adhesively bonded joints. **Materials Letters 58**, 2004. 3451-3456.

KIM, T. H.; KWEON, J. H.; CHOI, J. H. An experimental study on the effect of overlap length on the failure of composite to aluminum single lap bonded joints. **Journal of Reinforced Plastics, and Composites**, v.27, n. n.10, 2008. p. 1071-1081.

MAXWELL, D.; BOND, D. Principles and practices of adhesive bonded. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 19, 1999. 91-105.

MCCONNEL, K. G.; VAROTO, P. S. **Vibration Testing (THEORY AND PRACTICE)**. 2nd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

MEDEIROS, R. **Desenvolvimento de Uma Metodologia Computacional para Determinar Coeficientes Efetivos de Compósitos Inteligentes**. Departamento de Engenharia Mecanica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 133. 2012.

MEDEIROS, R.; MORENO, M.; TITA, V. Effective properties evaluation for smart composite materials. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2011.

MESSLER, R. W. **Joining of Materials and Structures from Pragmatic Process to Enabling Technology**. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2004.

MIDÉ. **QuickPack Product Material Properties & Spec Sheets**. Midé Technology Corporation. Medford MA, USA. 2010.

MIL-HDBK-17-3F. **Composite Materials Handbook:** Volume 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. [S.l.]: [s.n.], v. 3, 2002.

MIL-HDBK-5. **Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures**. [S.l.]: DEPARTMENT OF DEFENSE, 2003.

MORTENSEN, F. **Development of tools for engineering analysis and design of high-performance FRP-composite structural elements. Tese (Doutorado)**. Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University. Aalborg. 1998.

OPLINGER, D. W. **Handbook of Composites**. Londres: Chapman & Hall, 1998. pp. 610-663 p.

PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives and Sealants**. New York: McGraw-Hill, 2000.

QING, P. X. et al. A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, 2006.

RIBEIRO, M. L. **PROGRAMA PARA ANÁLISE DE JUNTAS COLADAS: COMPÓSITO/COMPÓSITO E METAL /COMPÓSITO**. Departamento de Engenharia Mecanica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 163. 2009.

SCOTT, M. et al. **Structural Health Monitoring - the future of advanced composites structures in structural health monitoring**. Advancements and Challenges for Implementation: 5th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford: DEStech Publications. 2005.

SEONG, M. et al. A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum. **Composite Structures**, Jinju, Março 2008. p. 135-145.

SEONG, M.-S. et al. A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum. **Composite Structures**, Jinju, Março 2008. p. 135-145.

SILVA, E. C. N.; FONSECA, J. S. O.; KIKUCHI, N. Optimal design of periodic piezocomposites. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v.159, n. n.1-2, jul 1998. p.49-77.

SILVA, F. C. G. **Modelagem de uma placa de materiais compósitos e piezelétricos pelo método de elementos finitos. Aplicação de controle de vibração**. Universidade Federal de Santa CATARINA. [S.l.], p. 175p. 2007.

SMITH, M.; HUTAPEA, P. Surface Engineering for Adhesively Bonded. **Journal of Ship Production**, No. 23, Maio 2007. pp. 72–81.

TESTE. artgo teste. **IJHMSN**, p. 50-60, 2012.

THOMSEN, O. T.; MORTSEN, F. Localized coupling effects in adhesive bonded joint. **Composite Structures**, v.37, n. n.1, 2002. p. 97-108.

THRUSBY, G. J. et al. Ultrasound detection of damage in complex carbon fibre/metal structures. **Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems V**, Glasgow, 2006.

TITA, V. **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico. Tese (doutorado)**. Departamento de Engenharia Mecanica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

TITA, V. **PROJETO E FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS EM MATERIAL COMPOSITO POLIMERICO**. SAO CARLOS: EDUSP, 2006.

TRABOCCO, R. E.; DONELLAN, T. M.; WILLIAMS, J. G. **Repair of Composite Aircraft, in Bonded Repair of Aircraft Structures**. Dordrecht: Matinus Nijhoff Publishers, 1988.

VENTURINI, S. N. **Estudo de Junções Aeronáuticas Híbridas (METAL-COMPÓSITO) Unidas Mecanicamente**. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 177. 2010.

WHITE, C. M. **Health Monitoring of Bonded Composite Aerospace Structures**. School of Aerospace, Mechanical & Mannufacturing Engineering - RMIT University. Victoria, p. 265. 2009.

WORDEN, K. et al. The fundamental axioms of structural health monitoring. **Proceedings of the Royal Society**, 2007. 463A(2082), p. 1639-1664.

ZOU, Y.; TONG, L.; STEVEN, G. P. Vibration based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - A Review. **Journal of Sound and Vibration**, 1999. p.357-378.

ABAQUS, Documentation. Pawtucket: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2010.

ABOUDI, J. Mechanics of Composite Materials, A Unified Micromechanical Approach. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1991.

AGNES, G. S.; INMAN, D. J. Nonlinear piezoelectric vibration absorbers. Smart Materials and Structure. v.5, p.704–714, 1996.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Ohio: 1992. 3470p.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. Volume 21 – Composites. Ohio: 2005. 2605p.

AZZOUZ, M. S.; MEI, C.; BEVAN, J. S.; RO, J. J. Finite element modeling of MFC/AFC actuators and performance of MFC. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.12, p.601-612, 2001.

BAKHVALOV, N. S.; PANASENKO, G. P. Homogenization Averaging Processes in Periodic Media. Kluwer, Dordrecht, 1989.

BENDSÙE, M. P.; KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using homogenization method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering v.71, p.197-224, 1988.

BENSSOUSAN, A.; LIONS, J. L.; PAPANICOULAU, G. Asymptotic analysis for periodic structures. Amesterdam, North Holland, 1978.

BENT, A. A.; HAGOOD, N. W. Development of piezoelectric fiber composites for structural actuation. In: Proceeding of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, volume Paper No. 93-1717-CP, La Jolla, CA, 3625–3638 pp, 1993.

BENT, A.; HAGOOD, N.; RODGERS, J. Anisotropic actuation with piezoelectric fiber composites. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.6, p.338–349, 1995.

BENT, A., HAGOOD, N. Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrode. J. Intell. Mater. Syst. Struct 8, 903–919, 1997.

BENVENISTE, Y.; DVORAK, G. J. Uniform fields and universal relations in piezoelectric composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 40, n. 6, pp. 1295-1312, 1992.

BENVENISTE, Y. Universal Relations in piezoelectric composites with eigenstress and polarization fields, Part I: Binary Media—Local fields and effective behavior. Journal of Applied Mechanics, v.60, p.265-269, 1993.

BERGANDER, A. Control wear testing and integration of stick slip micropositioning. Theses (Phd) – Faculté Sciences Et Techniques de L'ingénieur – Institut de Production et Robotique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 189p, 2003.

BERGER, H.; GABBERT, U.; KOPPE, H.; RODRIGUEZ-RAMOS, R.; BRAVO-CASTILLERO, J.; GUINOVART-DIAZ, R.; OTERO, J. A.; MAUGIN, G. A. Finite element and asymptotic homogenization methods applied to smart composite materials. Computational Mechanics, v.33 p.61–7, 2003.

BERGER, H.; KARI, S.; GABBERT, U.; RODRIGUEZ-RAMOS, R.; GUINOVART, R.; OTERO, J. A.; BRAVO-CASTILLERO, J. An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites. International Journal of Solids and Structures, v. 42, n.21-22, p.5692-5714, 2005.

BERGER, H.; KARI, S.; GABERT, U.; RODRIGUEZ-RAMOS, R.; BRAVO-CASTILLERO, J.; GUINOVART-DÍAZ, R.; SABINA, F. J.; MAUGIN, G. A. Unit cell models of piezoelectric fiber composites for numerical and analytical calculation of effective properties. Smart Materials and Structures, vol. 15, pp. 451-458, Apr., 2006.

BERGER, H.; KARI, S.; GABBERT, U.; RODRÍGUEZ-RAMOS R.; BRAVO-CASTILLERO, J.; GUINOVART-DÍAZ, R. Evaluation of effective material properties of randomly distributed short cylindrical fiber composites using a numerical homogenization technique. Journal of Mechanics of Materials and Structures, v.2, n.8, p.1561-1570, 2007.

BISCANI, F,; NASSER, H.; BELOUTTAR, S.; CARRERA, E. Equivalent electro-elastic properties of Macro Fiber Composite (MFC) transducers using asymptotic expansion approach. Composites: Part B, v.42, p.444-455, 2011.

BISEGNA, P.; LUCIANO, R. Variational bounds for the overall properties of piezoelectric composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.44, n.4, p.583-602, apr. 1996.

BISEGNA, P.; LUCIANO, R. On methosds for bounding the overall properties of periodic piezoelectric fibrous composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.45, n.8, p.1329-1356, 1997.

BRAVO-CASTILLERO, J. B.; OTERO, J. A.; RODRÍGUEZ-RAMOS, R.; BOURGEAT, A. Asymptotic homogenization of laminated piezocomposite materials. International Journal of Solids and Structures, v.35, p.527–541, 1998.

BRAVO-CASTILLERO, J.; GUINOVART-DIAZ, R.; SABINA, F. J.; RODRÍGUEZ-RAMOS, R. Closed form expressions for the effective coefficients of a fiber-reinforced composite with transversely isotropic constituents – II. Piezoelectric and square symmetry. Mechanics of Materials, v.33, p.237-248, 2001.

BRAVO-CASTILLERO, J.; RODRÍGUEZ-RAMOS, R.; MECHKOUR, H.; OTERO, J. A.; SABINA, F. J. Homogenization of magneto-electro-elastic multilaminated materials. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, v.61, n.3, p.311-332, 2008.

BRAVO-CASTILLERO, J. Notas de aula da disciplina de Métodos para o cálculo de leis efetivas de compostos elásticos não lineares. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2010.

CHAN, H. L. W.; UNSWORTH, J. Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1-3 composites used in ultrasonic transducer applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.36, n.4, p.434-441, jul. 1989.

CHEE, C. Y. K. Static shape control of laminated composite plate smart structures using piezoelectric actuators. Doctor's Thesis, University of Sydney, Sydney, 213p, 2000.

CHEN, T. Piezoelectric properties of multiphase fibrous composites: some theoretical results. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 41, n. 11, p. 1781-1794, 1993.

CHOPRA, I. Review of state of art of smart structures and integrated systems. AIAA Journal, v.40, n.11, p.2145-2187, 2002.

CIORANESCU, D.; PAULIN, J. S. J. Homogenization in open sets with holes. Journal of Mathematical Analysis and Applications, v.71, p.590-607, 1979.

CRAWLEY, E. F. Intelligent structures for aerospace: A technology overview and assessment. AIAA Journal, v.32, n.8, p.1689-1699, 1994.

DERAEMAEKER, A.; BENELECHI, S.; BENJEDDOU, A.; PREUMONT, A. Analytical and numerical computation of homogenized properties of MFCs: application to a composite boom with MFC actuators and sensors. In: Proceedings of III ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Gdansk, Poland, 2007.

DERAEMAEKER, A.; NASSER, H.; BENJEDDOU, A.; PREUMONT, A. Mixing rules for the piezoelectric properties of macro fiber composites. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.20, n.12, p.1391–1518, 2009.

DERAEMAEKER A.; NASSER H. Numerical evaluation of the equivalent properties of Macro Fiber Composite (MFC) transducers using periodic homogenization. International Journal of Solids and Structures. v.47, p.3272–3285, 2010.

DUNN, M. L.; TAYA, M. Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites. International Journal of Solids and Structures, v.30, n.2, p.161-175, 1993.

EIRAS, J. A. Sensores Teoria e Aplicacoes – Capitulo 2: Materiais piezelétricos. Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas – Departamento de Física – Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2004.

GIURGIUTIU, V. Multifunctional vehicle structural health monitoring opportunities with piezoelectric wafer active sensors, Report University of South Carolina, Mechanical Engineering Department Columbia, SC 29208, 11p, 2010.

GUEDES, J. M.; KIKUCHI, N. Pre and post processing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.83, p.143-198, 1990.

GUENNAM, A. E.; LUCCIONI, B. M. FE modeling of a closed box beam with piezoelectric fiber composite patches. Smart Materials and Structures. v.15, p.1605–1615, 2006.

HAGOOD, N. W.; VON FLOTOW, A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. Journal of Sound and Vibration, v.146, n.2, p.243–268, April, 1991.

HAGOOD, N. W.; KINDEL, R.; GKANDI, K.; GAUDENZI, P. Improving transverse actuation of piezoceramics using interdigitated surface electrodes. In: Proceedings on SPIE, Smart Structures and Materials: Smart Structures and Intelligent Systems, Albuquerque, NM, USA., vol. 1917, pp. 341–35, 1993.

HASSANI, B.; HINTON, E. A review of homogenization and topology optimization I – homogenization theory for media with periodic structure. Computers and Structures v.69, p.707-717, 1998.

HORNER, G. Piezoelectric composite device and method for making same. International patent application WO0217407, 2002.

IEEE. NORMA. ANSI /IEEE Std 176-1987: An American National Standard : IEEE Standard on Piezoelectricity. New York, NY, USA: IEEE, 74p, 1987.

GAUDENZI, P. On the electo mechanical response of active composite materials with piezoelectric inclusions. Computers & Structures, v.65, n.2, p.157-168, 1997.

GHASEMI-NEJHAD, M. N.; RUSS, R.; POURJALALI, S. Manufacturing and testing of active composite panels with embedded piezoelectric sensors and actuators. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.16, n.4, p.319-333, apr. 2005.

GHASEMI-NEJHAD, M. N.; POURJALALI, S.; UYEMA, M.; YOUSEFPOUR, A. Finite Element Method for active vibration suppression of smart composite structures using piezoelectric materials. Journal of Thermoplastic Composite Materials, v.13, n.3, p.309-352, may. 2006.

GUINOVART-DÍAZ, R.; BRAVO-CASTILLERO, J.; RODRÍGUEZ-RAMOS, R.; SABINA, F. J.; MARTÍNEZ-ROSADO, R. Overall properties of piezocomposite materials 1-3. Materials Letters, v.48, p.93-98, mar. 2001a.

GUINOVART-DÍAZ, R.; BRAVO-CASTILLERO, J.; RODRÍGUEZ-RAMOS, R.; SABINA, F. J. Closed-form expressions for the effective coefficients of fiber-reinforced composite with transversely isotropic constituents. I: Elastic and hexagonal symmetry. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.49, p.1445–1462, 2001b.

GUINOVART-DÍAZ, R.; BRAVO-CASTILLERO, J.; RODRÍGUEZ-RAMOS, R.; MARTÍNEZ-ROSADO, R.; SERRANÍA, F.; NAVARRETE, M. Modeling of elastic transversely isotropic composite using the asymptotic homogenization method. Some comparisons with other models. Materials Letters, v.56, p.889-894, nov. 2002.

ISOLDI, L. A. Analise estática e dinâmica de estruturas delgadas de materiais compostos laminados incluindo materiais piezelétricos. 2008. 2230p. Tese (Phd Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2008.

JIN, K. K.; HUANG, Y.; LEE, Y. H.; HA, S. K. Distribution of Micro Stresses and Interfacial Tractions in Unidirectional Composites. Journal of Composite Materials, v.42, p.1825-1849, 2008.

KAR-GUPTA, R.; VENKATESH, T.A. Electromechanical response of 1-3 piezoelectric composites: effect of poling characteristics. Journal af Applied Physics, v.98, n.5, 14pp., sep. 2005.

KAR-GUPTA, R.; VENKATESH, T.A. Electromechanical response of 1-3 piezoelectric composites: an analytical model. Acta Materialia, v.55, n.3, p.1093-1108, feb. 2007a.

KAR-GUPTA, R.; VENKATESH, T.A. Electromechanical response of 1-3 piezoelectric composites: a numerical model to assess the effects of fiber distribution. Acta Materialia, v.55, p.1275-1292, 2007b.

LARBI, W.; DEU, J.-F.; OHAYON, R. Finite element formulation of smart piezoelectric composite plates coupled with acoustic fluid. Composite Structures, v.94, p.501–509, 2012.

LAZARUS, K.; LUNDSTROM, M.; MOORE, J.; CRAWLEY, E. Packaged strain actuator. US Patent 5687462, 1997.

LEO, D. J. Engineering Analysis of Smart Material Systems. John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, New Jersey, 2007.

MELNYKOWYCZ, M.; KORNMANN, X.; HUBER, C.; BARBEZAT, M.; BRUNNER, A. J. Performance of integrated active fiber composites in fiber reinforced epoxy laminates. Smart Materials and Structures, v.15, p.204-212, 2006.

MIDÉ, QuickPack Products Material Properties & Spec Sheets, Midé Technology Corporation, Medford MA, USA, 2010.

MORENO, M. E., TITA, V. and MARQUES, F. D. Finite element analysis applied to evaluation of effective material coefficients for piezoelectric fiber composites. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON AEROSPACE ENG. & APPLICATIONS, 2009, São José dos Campos, Brazil. Anais… 2009.

MORENO, M. E., TITA, V. and MARQUES, F. D. Influence of boundary conditions on the determination of effective material properties for active fiber composites. In: PAN-AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, 2010, Foz do Iguaçu, Brazil. Anais… 2010.

NAN, C.-W. Physics of inhomogeneous inorganic materials, Progress in Materials Science, v.37, p.1-116, 1993a.

NAN, C.-W. Comment on ’relationships between the effective properties of transversely isotropic piezoelectric composites’ : K. Schulgasser (1992) j. mech. phys. Solids, v.40, p.473-479, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.41, p.1567-1570, 1993b.

NAN, C.-W.; JIN, F.-S. Multiple-scattering approach to effective properties of piezoelectric composites. Phisical Review B, v.48, p.8578-8582, 1993c.

NAN, C.-W.; CAI, K.-F.; YUAN, R.-Z. A relation between multiplescattering theory and micromechanical models of effective thermoelastic properties. Ceramics International, v.22, p.457-461, 1996.

NEWNHAM, R. E.; SKINNER, D. P.; CROSS, L. E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. Materials Research Bulletin, v.13, p.525-536, 1978.

ODEGARD, G. M. Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites. Acta Materialia, v.52, p.5315–5330, 2004.

PAGANI JR, C. C.; TRINDADE, M. A. Optimization of modal filters based on arrays of piezoelectric sensors. Smart Materials and Structures, v.18, p.095046+, 2009.

PAIK, S. H.; YOON, T. H.; SHIN, S. J.; KIM, S. J. Computational Material Characterization of Active Fiber Composite. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.18, P.19-28, 2007;

PANASENKO, G. P. Multi-Scale Modelling for Structures and Composites. Springer 2005.

PANDA, S.; RAY, M. C. Nonlinear analysis of smart functinally graded plates integrated with a layer of piezoelectric fiber reinforced composite. Smart Materials and Structures, v.15, p.1595-1604, 2006.

PANDA, S.; RAY, M. C. Active constrained layer damping of geometrically nonlinear vibrations of functionally graded plates using piezoelectric fiber-reinforced composites. Smart Materials and Structures, v.17, 15 pp. 2008a.

PANDA, S.; RAY, M.C. Nonlinear finite element analysis of functionally graded plates integrated with patches of piezoelectric fiber reinforced composite. Finite Elements in Analysis and Design, v.44, p.493-504, 2008b.

PARADIES, R.; MELNYKOWYCZ, M. Numerical stress investigation for piezoelectric elements with circular cross section and interdigitated electrodes. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.18, p.963-972, sep. 2007.

PÉREZ-FERNANDEZ, L. D. Un enfoque integrador de métodos asintóticos y variacionales para la evaluación del comportamiento efectivo de materiales compuestos magneto-electro-elásticos no lineales provistos de una estructura periódica. 2009. 120p. Tesis (Phd en Ciencias Matemáticas) – Instituto de Cibernética, Matemática y Física, Departamento de Física Aplicada, La Habana, Cuba, 2009.

PETTERMANN, H. E.; SURESH, S. A comprehensive unit cell model: a study of coupled effects in piezoelectric 1-3 composites. International Journal of Solids and Structures, v.37, n.39, p.5447-5464, sep. 2000.

POIZAT, C.; SESTER, M. Effective properties of composites with embedded piezoelectric fibres. Computational Materials Science, v.16, n.1-4, p.89-97, 1999.

RAO, C. V. M.; PRASAD, G. Characterization of 1-3 piezoelectric polymer composites – a numerical and analytical evaluation procedure for thickness mode vibrations. Condensed Matter Physics v.13, n.1, p.13703: 1, 2010.

RODRÍGUEZ-RAMOS, R.; SABINA, F. J.; GUINOVART-DÍAZ, R.; BRAVO-CATILLERO, J. Closed form expressions for the effective coefficients of a fiber-reinforced composite with transversely isotropic constituents – I. Elastic and square symmetry. Mechanics of Materials, v.33, p.223-235, 2001.

SABINA, F. J; RODRÍGUEZ RAMOS, R.; BRAVO CASTILLERO, J.; GUINOVART DÍAZ, R. Closed-form expressions for the effective coefficients of fibre-reinforced composite with transversely isotropic constituents-II: Piezoelectric and hexagonal symmetry. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.49, p.1463–1479, 2001.

SANCHEZ-PALENCIA, E. Non Homogeneous Media and Vibration Theory. Lecture Notes in Physics. vol. 127. Springer, Berlin, 1980.

SCHULGASSER, K. Relationships between the effective properties of transversely isotropic piezoelectric composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.40, p.473-479, 1992.

SEVOSTIANOV, I.; LEVIN, V.; KACHANOV, M. On the modeling and design of piezocomposites with prescribed properties. Archive of Applied Mechanics, v.71, p.733-747, 2001.

SHINDE VISHAL, V., Development of Active Fiber Sensors and a Data Acquisition Module for a Structural Neural System, Thesis (Masters of Science) – University of Cincinnati, Mechanical Engineering, Cincinnati, Ohio,123p, 2005.

SILVA E. C. N.; FONSECA, J. S. O.; KIKUCHI, N. Optimal Design of Piezoelectric Microstructures. Computational Mechanics, Estados Unidos, v.19, n.5, p.397-410, 1997.

SILVA, E. C. N.; FONSECA, J. S. O.; KIKUCHI, N. Optimal design of periodic piezocomposites. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.159, n.1-2, p.49-77, jul. 1998.

SILVA, E. C. N.; KIKUCHI, N. Design of piezoelectric transducers using topology optimization. Smart Materials and Structures, v.8, p.350–364, 1999.

SILVA, F. C. G., Modelagem de uma placa de materiais compósitos e piezelétricos pelo método dos elementos finitos. Aplicação de controle de vibração, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 175p, 2007.

SMITH, W. A.; AULD, B. A. Modeling 1-3 composite-piezoelectrics: thickness-mode oscillations. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.38, n.1, p.40-47, jan. 1991.

SODANO, H. A.; Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation. Thesis (Phd), Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, United States, 2003.

SUZUKI, K.; KIKUCHI, N. A homogenization method for shape and topology optimization. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.93, p.291-318, 1991.

TAN, P.; TONG, L. Micro-electromechanics models for piezoelectric-fiber-reinforced composite materials. Composites Science and Technology, v.61, p.759–769, 2001.

TAN, X. G.; VU-QUOC, L. Optimal solid shell element for large deformable composite structures with piezoelectric layers and active vibration control. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v.64, n.15, p.1981-2013, dec. 2005.

TEPLY, J. L.; DVORAK, G. C. Bounds on overall instantaneous properties of elasto-plastic composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.36, n.1, p.29-58, 1988.

TRINDADE, M. A.; BENJEDDOU A. Modelling and Characterization of Shear Actuated Piezoelectric Fibre Composites. In: Tenth International Conference On Computational Structures Technology, 2010, Stirlingshire, Scotland. Anais… 2010.

TRINDADE, M. A.; BENJEDDOU A. Modelling and characterization of shear actuated piezoelectric fibre composites. Smart Materials and Structures, v.20, n.7, 075012, 2011.

WIERACH, P. Elektromechanisches funktionsmodul. German Patent DE 10051784 C1, 2002.

WIERACH, P. Low profile piezo actuators based on multilayer technology. In: Proceedings of 17th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST2006), Taipei, Taiwan, October, 2006.

WILKIE, W. K.; HIGH, W. J.; MIRICK, P. H.; FOX, R. L.; LITTLE, B. D.; BRYANT, R. G.; HELLBAUM, R. F.; JALINK, A. J. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications. In: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. In: SPIE 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, 2000.

WILLIAMS, B. R.; PARK, G.; INMAN, D. J.; WILKIE, W. K. An overview of composite actuators with piezoceramic fibers. In: Proceedings of 20th International Modal Analysis Conference (IMAC), Los Angeles, USA, 2002a.

WILLIAMS, B. R.; GRIMSLEY, B. W.; INMAN, D. J.; WILKIE, W. K. Manufacturing and mechanics-based characterization of Macro Fiber Composite actuators. In: Proceedings of IMECE 02, New Orleans, Louisiana, USA, 2002b.

XIA, Z.; ZHANG, Y.; ELLYIN, F. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications. International Journal of Solids and Structures v.40, p1907-1921, 2003.

ZAMBRANO, M. V.; PEREIRA, A. H. A. Curso de Materiais e Dispositivos Piezelétricos: Fundamentos e Desenvolvimento. ATCP do Brasil Soluções Piezelétricas, São Carlos, Brasil, 2004.

7. OBRAS CITADAS

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics - fundamentals and applications**. 2nd. ed. New York: CRC Press, 1995.

ARMSTRONG, K. B.; BEVAN, L. G.; COLE II, W. F. **Care and Repair of Advanced Composite**. 2nd. ed. Warrendale: SAE INTERNATIONAL, 2005.

BAKER, A. A. **Issues in the certification of bonded composite patch repairs for cracked metallic aircraft structures**. in ICAF and APOS 99: Structural Integrity for the next Millennium. [S.l.]: ICAF. 1999.

BAKER, A. A.; ROSE, L. R. F.; JONES, R. Certification Issues for Critical Repairs, in Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure. **Elsevier Science Ltd**, Oxford, 2002. p. 643-657.

BAKER, A.; DUTTON, S.; KELLY, D. **Composite Materials for Aircraft Structures**. 2nd. ed. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

BALDAN, A. Review Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials:Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**, 39, 2004. 1– 49.

BERGANDER, A. **Control Wear Testing and Integration of Stick Slip Micropositioning (Phd)**. Faculté Sciences Et Techquiniques de L'ingénieur - Institut de Production et Robotique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. [S.l.], p. 189. 2003.

BERGANDER, A. **Control Wear Testing and Integration of Stick Slip Micropositioning (Phd)**. Faculté Sciences Et Techquiniques de L'ingénieur - Institut de Production et Robotique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. [S.l.], p. 189 p. 2003.

CALLISTER, W. D. **Ciencia e Engenharia de Materiais:** Uma Introdução. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Cientificos, 2002.

CARLSSON, L. A.; PIPES, R. B. **Experimental Characterization of Advanced Composite Materials**. Englewood Cliffs, New Jersey: PRENTICE-HALL, 1987.

COUTELLIER, D.; WALRICK, J. C.; GEOFFROY, P. Presentation of a Methodology for Delamination Detection within Laminated Structures. **Composites Science and Technology**, v. 66, p. 837-845, 2006.

DA SILVA, L. F. M.; LOPES, M. J. C. Q. Joint strengthoptimizationbythemixed-adhesivetechnique. **Internation Journal f Adhesion & Adhesives**, 2009. 509-514.

DANIEL, I.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials 2**. New York: Oxford University Press, 2006.

DAVIS, M.; BOND, D. **Certification of adhesive bonds for construction and repair.** in 4th Joint DoD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft. St. Louis: [s.n.]. 2000.

DIXON, M. C. **The Maintenance Costs of Aging Aircraft**. [S.l.]: Santa Monica, 2006.

GHONEAM, S. M.; HAMADA, A. A.; EL-ELAMY, M. I. Experimental and Analytical Investigation of the Dynamic Analysis of Adhesively Bonded Joints for Composite Structures. **Solid State Phenomena**, Switzerland, v. 147-149, p. 663-675, 2009.

GIURGIUTIU, V. **Multifunctional Vehicle Structural Health Monitoring Opportunities With Piezoelectric Wafer Active Sensors**. Mechanical Engineering Department Columbia. [S.l.], p. 11. 2010. (SC 29208).

HART, S.; BROWN, L. J.; WONG, S. **Handbook of Composites**. London: Chapman and Hall, 1998. pp. 667-685 p.

HE, X. Bond Thickness Effects upon Dynamic Behaviour in Adhesive Joints. **Advanced Materials Research**, Switzerland, v. 97-101, 2010.

HE, X. Numerical and experimental investigation of the dynamic resposnse of bonded beams with a single-lap joint. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Kunming, p. p.7, 2012.

HENKEL. Henkel TDS-Technical Data Sheets. **HENKEL**, 2001. Disponivel em: <https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/B8D891E40C3704B98525715C001BD4DD/$File/Hysol_EA_934NA-EN.pdf>. Acesso em: 02 Março 2012.

HEXCEL. HEXCEL M20 DATASHEET. **HEXCEL**, Março 2010. Disponivel em: <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M20_global.pdf>. Acesso em: 10 JUNHO 2012.

HEXCEL. DESCRIÇÃO TECNICA DO REFORÇADOR G0904, Agosto 2012.

IANUCCI, L. Progressive Failure Modeling of Woven Carbon Composite under Impact, 32, 2006. 1013-1043.

INGOLE, S. B.; CHATERJEE, A. Vibration analysis of single lap adhesive joint : E xperimental and analytical investigation. **Journal of Vibration and Control**, v. 17, p. 1547-1555, 2011.

KAR-GUPTA, R.; VENKATESH, T. A. Electromechanical response of 1-3 piezoeletric composites: an analytical model. **Acta Materialia**, 2007. v.55, n.3, p. 1093-1108.

KATZIR, S. **THE DISCOVERY OF THE PIEZOELECTRIC EFFECT - THE BEGINNINGS OF PIEZOELECTRICITY**. BOSTON: Springer Netherlands, 2006.

KAYA, A.; TEKELIOGLU, M. S.; FINDIK, F. Effects of various parameter on dynamic characteristics in adhesively bonded joints. **Materials Letters 58**, 2004. 3451-3456.

KIM, T. H.; KWEON, J. H.; CHOI, J. H. An experimental study on the effect of overlap length on the failure of composite to aluminum single lap bonded joints. **Journal of Reinforced Plastics, and Composites**, v.27, n. n.10, 2008. p. 1071-1081.

MAXWELL, D.; BOND, D. Principles and practices of adhesive bonded. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 19, 1999. 91-105.

MCCONNEL, K. G.; VAROTO, P. S. **Vibration Testing (THEORY AND PRACTICE)**. 2nd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

MEDEIROS, R. **Desenvolvimento de Uma Metodologia Computacional para Determinar Coeficientes Efetivos de Compósitos Inteligentes**. Departamento de Engenharia Mecanica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 133. 2012.

MEDEIROS, R.; MORENO, M.; TITA, V. Effective properties evaluation for smart composite materials. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2011.

MESSLER, R. W. **Joining of Materials and Structures from Pragmatic Process to Enabling Technology**. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2004.

MIDÉ. **QuickPack Product Material Properties & Spec Sheets**. Midé Technology Corporation. Medford MA, USA. 2010.

MIL-HDBK-17-3F. **Composite Materials Handbook:** Volume 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. [S.l.]: [s.n.], v. 3, 2002.

MIL-HDBK-5. **Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures**. [S.l.]: DEPARTMENT OF DEFENSE, 2003.

MORTENSEN, F. **Development of tools for engineering analysis and design of high-performance FRP-composite structural elements. Tese (Doutorado)**. Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University. Aalborg. 1998.

OPLINGER, D. W. **Handbook of Composites**. Londres: Chapman & Hall, 1998. pp. 610-663 p.

PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives and Sealants**. New York: McGraw-Hill, 2000.

QING, P. X. et al. A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, 2006.

RIBEIRO, M. L. **PROGRAMA PARA ANÁLISE DE JUNTAS COLADAS: COMPÓSITO/COMPÓSITO E METAL /COMPÓSITO**. Departamento de Engenharia Mecanica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 163. 2009.

SCOTT, M. et al. **Structural Health Monitoring - the future of advanced composites structures in structural health monitoring**. Advancements and Challenges for Implementation: 5th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford: DEStech Publications. 2005.

SEONG, M. et al. A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum. **Composite Structures**, Jinju, Março 2008. p. 135-145.

SEONG, M.-S. et al. A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum. **Composite Structures**, Jinju, Março 2008. p. 135-145.

SILVA, E. C. N.; FONSECA, J. S. O.; KIKUCHI, N. Optimal design of periodic piezocomposites. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v.159, n. n.1-2, jul 1998. p.49-77.

SILVA, F. C. G. **Modelagem de uma placa de materiais compósitos e piezelétricos pelo método de elementos finitos. Aplicação de controle de vibração**. Universidade Federal de Santa CATARINA. [S.l.], p. 175p. 2007.

SMITH, M.; HUTAPEA, P. Surface Engineering for Adhesively Bonded. **Journal of Ship Production**, No. 23, Maio 2007. pp. 72–81.

TESTE. artgo teste. **IJHMSN**, p. 50-60, 2012.

THOMSEN, O. T.; MORTSEN, F. Localized coupling effects in adhesive bonded joint. **Composite Structures**, v.37, n. n.1, 2002. p. 97-108.

THRUSBY, G. J. et al. Ultrasound detection of damage in complex carbon fibre/metal structures. **Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems V**, Glasgow, 2006.

TITA, V. **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico. Tese (doutorado)**. Departamento de Engenharia Mecanica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

TITA, V. **PROJETO E FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS EM MATERIAL COMPOSITO POLIMERICO**. SAO CARLOS: EDUSP, 2006.

TRABOCCO, R. E.; DONELLAN, T. M.; WILLIAMS, J. G. **Repair of Composite Aircraft, in Bonded Repair of Aircraft Structures**. Dordrecht: Matinus Nijhoff Publishers, 1988.

VENTURINI, S. N. **Estudo de Junções Aeronáuticas Híbridas (METAL-COMPÓSITO) Unidas Mecanicamente**. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 177. 2010.

WHITE, C. M. **Health Monitoring of Bonded Composite Aerospace Structures**. School of Aerospace, Mechanical & Mannufacturing Engineering - RMIT University. Victoria, p. 265. 2009.

WORDEN, K. et al. The fundamental axioms of structural health monitoring. **Proceedings of the Royal Society**, 2007. 463A(2082), p. 1639-1664.

ZOU, Y.; TONG, L.; STEVEN, G. P. Vibration based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - A Review. **Journal of Sound and Vibration**, 1999. p.357-378.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO 1 - ALGORITMO PARA MODELAGEM MODAL

```
##-----------------------------------------------------------
# Definição de objetos, modelos e variáveis constantes
##-----------------------------------------------------------
from abaqus import *
from abaqus import backwardCompatibility
from abaqusConstants import *
from connectorBehavior import *
from abaqusConstants import *
import testUtils
import section
import regionToolset
import displayGroupMdbToolset as dgm
import part
import material
import assembly
import step
import interaction
import load
import mesh
import job
import sketch
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
testUtils.setBackwardCompatibility()
## Criar um novo Modelo
Mdb()
modelName = 'SLJ'
Model = mdb.Model(name=modelName)
del mdb.models['Model-1']
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#---------- 1 - INPUT DATA --------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
##-----------------------------------------------------------
# Coupon Parameters
##-----------------------------------------------------------
# Width[mm]
W=12.7e-03
##-----------------------------------------------------------
# Thickness[mm]
```

```
Tti=1.6e-03
Tcf=1.7e-03
Dens_Ti=4428.7
Dens_Carb=1540
##-------------------------------------------------------------
# Length[mm]
Leng=40e-03 #In case of variation of this parameter, make sure the translate on assy is
checked
Lutil=280e-03
Lcola=50.8e-03
Falha=0.0 # PERCENTAGE OF THE ORIGINAL BONDING AREA
Lfalha=Lcola*(Falha/100)
##-------------------------------------------------------------
# SHAKER POSITION
##-------------------------------------------------------------
# Input Position X
Pshaker_x=275.4e-03+Lcola
# Input Position Y
Pshaker_y=0.0e-03
##-------------------------------------------------------------
# ACCELEROMETER POSITION
##-------------------------------------------------------------
# Input Position X
Paccel_x=250e-03
# Input Position Y
Paccel_y=0.0e-03

#-------------------------------------------------------------
#--------------1.0 CHECKINGS-----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
Var1=0.0
Var2=BOTTOM
if Pshaker_y > 0.0:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0+Pshaker_y
Var2= (W+Pshaker_y)/2.0-W
Var3=TOP
else:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0
Var2= Pshaker_y-(W+Pshaker_y)/2.0
Var3=BOTTOM
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 2 - GEOMETRY ----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
##Create the Sketch for Titanium Strip
# BONDED AREA
s1= Model.ConstrainedSketch(name='Lcol_T',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
```

```
s1.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(-Lcola, W))
p1 = Model.Part(name='TITANIO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p1 = Model.parts['TITANIO']
f, v, e, d = p1.faces, p1.vertices, p1.edges, p1.datums
p1.BaseShell(sketch=s1)
##AREA UTIL
#A
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s2 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_a', sheetSize=0.113, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s2.geometry, s2.vertices, s2.dimensions, s2.constraints
s2.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s2.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s2, filter=COPLANAR_EDGES)
s2.rectangle(point1=(-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s2)
#B
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s3 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_b', sheetSize=0.4, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s3.geometry, s3.vertices, s3.dimensions, s3.constraints
s3.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s3.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s3, filter=COPLANAR_EDGES)
s3.rectangle(point1=(-Lutil-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x,Pshaker_y))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s3)
#C
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[1],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s4 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_c', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s4.geometry, s4.vertices, s4.dimensions, s4.constraints
s4.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s4.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s4.rectangle(point1=(-Pshaker_x, Pshaker_y), point2=(-Lutil-Lcola, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s4)
# AREA ENGASTADA
```

```
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s5 = Model.ConstrainedSketch(name='Leng_T', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s5.geometry, s5.vertices, s5.dimensions, s5.constraints
s5.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s5.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s5, filter=COPLANAR_EDGES)
s5.rectangle(point1=(-Lcola-Lutil, -W), point2=(-Lcola-Lutil-Leng, W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s5)
s5.unsetPrimaryObject()
## DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : TITATINUM STRIP
# DESIGNATING CELLS
# At AREA A
Ptxa=-(Lcola+((Pshaker_x)-(Lcola))/2.0)
# At AREA B
Ptxb=-((Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyb=Var1
# At AREA C
Ptxc=(-(Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyc= Var2
# REGION DEFINITION
CT = p1.faces.findAt(((Ptxc,Ptyc, 0.0),),((-(Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxa, 0.0, 0.0),),((-
Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxb,Ptyb, 0.0),),) #MATERIAL
regionT = regionToolset.Region(faces = CT)
##########################################################################
###################
#####################################
##Create the Sketch for Carbono Strip
# AREA ENGASTE
s6= Model.ConstrainedSketch(name='Leng_C',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s6.geometry, s6.vertices, s6.dimensions, s6.constraints
s6.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s6.rectangle(point1=(-0.0, -W), point2=(Leng, W))
p2 = Model.Part(name='CARBONO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p2 = Model.parts['CARBONO']
f, v, e, d = p2.faces, p2.vertices, p2.edges, p2.datums
p2.BaseShell(sketch=s6)
#AREA UTIL
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s7 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_C', sheetSize=0.094, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s7.geometry, s7.vertices, s7.dimensions, s7.constraints
s7.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
```

```
s7.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s7, filter=COPLANAR_EDGES)
s7.rectangle(point1=(Leng, -W), point2=(Leng+Lutil, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s7)
# AREA COLADA
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[2],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s8 = Model.ConstrainedSketch(name='Lcola_C', sheetSize=0.48,gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s8.geometry, s8.vertices, s8.dimensions, s8.constraints
s8.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s8.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s8, filter=COPLANAR_EDGES)
s8.rectangle(point1=(Leng+Lutil, -W), point2=(Leng+Lutil+Lcola, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[2],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s8)
# DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : CARBON STRIP
# REGION DEFINITION
CC = p2.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),((Leng+(Lutil/2.0), 0.0, 0.0),),((Leng+Lutil+(
Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
regionC = regionToolset.Region(faces = CC)
##############################################################################
###################
#####################################
##Create the Sketch for TABS
##TAB00
s11= Model.ConstrainedSketch(name='TAB00',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s11.geometry, s11.vertices, s11.dimensions, s11.constraints
s11.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s11.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p3 = Model.Part(name='TAB00', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p3 = Model.parts['TAB00']
f, v, e, d = p3.faces, p3.vertices, p3.edges, p3.datums
p3.BaseShell(sketch=s11)
# REGION DEFINITION
TAB00 = p3.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB00 = regionToolset.Region(faces = TAB00)
p3.Surface(side1Faces = TAB00, name='TAB00_BOND')
##TAB01
s12= Model.ConstrainedSketch(name='TAB01',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s12.geometry, s12.vertices, s12.dimensions, s12.constraints
s12.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s12.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p4 = Model.Part(name='TAB01', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p4 = Model.parts['TAB01']
f, v, e, d = p4.faces, p4.vertices, p4.edges, p4.datums
```

```
p4.BaseShell(sketch=s12)
# REGION DEFINITION
TAB01 = p4.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB01= regionToolset.Region(faces = TAB01)
p4.Surface(side1Faces = TAB01, name='TAB01_BOND')

##-------------------------------------------------------------
# SYSTEM OF COORDINATED
##-------------------------------------------------------------
# Create a System Global
p1.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_STRIP', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(-Lcola-
Lutil-Leng, 0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p2.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_LAMINADO',
coordSysType=CARTESIAN, origin=(0.0,
0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p3.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p4.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))

#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 3 - MATERIALS AND ELEMENTS ---------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# ISOTROPIC MATERIAL - CREATING MATERIAL
Model.Material(name='Ti6Al4V')
# MECHANICAL PROPERTIES ASSIGNEMENT
TiE=110.3e09
Tipoisson=0.310
# VALUES ASSIGNEMENT
Model.materials['Ti6Al4V'].Elastic(table=((TiE, Tipoisson), ))
Model.materials['Ti6Al4V'].Density(table=((Dens_Ti, ), ))
## SECTION ASSIGNEMENT
# CREATING NEW SECTION : LAMINA DE TITANIO
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio', preIntegrate=OFF,
material='Ti6Al4V',
thicknessType=UNIFORM, thickness=Tti, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio_TAB', preIntegrate=OFF,
material=
'Ti6Al4V', thicknessType=UNIFORM, thickness=Tcf, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
```

```
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
# SECTION AND PART
p1.SectionAssignment(region=regionT, sectionName='Lamina de Titanio',
offset=0.0,offsetType=
BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
#-----------------------------------------------------------------
# ORTHOTROPIC MATERIAL
Model.Material(name='M20-G0904')
# MECHANICAL PROPERTIES
CE1=41.413E09
CE2=39.152E09
CE3=8.93E09
Cn12=0.107
Cn13=0.5
Cn23=0.5
CG12=2.812E09
CG13=2.812E09
CG23=2.812E09
# VALUES AND PAREMETERS
Model.materials['M20-G0904'].Elastic(type=ENGINEERING_CONSTANTS, table=((CE1,
CE2, CE3, Cn12,
Cn13, Cn23, CG12, CG13, CG23),))
Model.materials['M20-G0904'].Density(table=((Dens_Carb, ), ))
##SECTION
# CREATE SECTION: LAMINADO
layupOrientation = p2.datums[4]
plySystem1 = p2.datums[4]
compositeLayup = p2.CompositeLayup(name='LAMINADO', description='LAMINADO DE
CARBONO',
elementType=SHELL, offsetType=BOTTOM_SURFACE, symmetric=False,
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# COORDINATE SYSTEM
compositeLayup.ReferenceOrientation(orientationType=SYSTEM,
localCsys=layupOrientation, fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_NONE,
angle=0.0, additionalRotationField='', axis=AXIS_3, stackDirection= STACK_3)
# Ply No.1
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-1', region=regionC,
material= 'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS, thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType= ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.2
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-2', region=regionC,
material='M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType=ROTATION_NONE, numIntPoints=3)
# Ply No.3
```

```
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-3', region=regionC,
material= 'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType= ROTATION_NONE, numIntPoints=3)
# Ply No.4
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-4', region=regionC,
material='M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType= ROTATION_NONE, numIntPoints=3)
# Ply No.5
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-5', region=regionC,
material= 'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType= ROTATION_NONE, numIntPoints=3)
# Ply No.6
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-6', region=regionC,
material= 'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType= ROTATION_NONE, numIntPoints=3)
# Ply No.7
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-7', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle= 0.0,
additionalRotationField='', additionalRotationType= ROTATION_NONE, numIntPoints=3)
# TAB MATERIAL ASSIGNMENT
# TAB00
p3.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio', offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# TAB01
p4.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio_TAB',
offset=0.0, offsetType=BOTTOM_SURFACE,
offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)

#-----------------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------------
#---------- 4 - ASSEMBLY ----------------------------------
#-----------------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------------
# Create assembly 1
a = Model.rootAssembly
a.Instance(name='CARBONO-1', part=p2, dependent=ON)
a.Instance(name='TITANIO-1', part=p1, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB00_00', part=p3, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB01_01', part=p4, dependent=ON)
# SETTING THE PARTS
a.rotate(instanceList=('CARBONO-1', ), axisPoint=(0.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -W,
0.0), angle=180.0)
 a.translate(instanceList=('TITANIO-1', ), vector=(-(Lutil+Leng), 0.0, 0.0))
a.translate(instanceList=('TAB00_00', ), vector=(-Leng, 0.0, 0.0))
```

```
a.rotate(instanceList=('TAB01_01', ), axisPoint=(Leng/2.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -2.0*
W, 0.0), angle=180.0)
a.translate(instanceList=('TAB01_01', ), vector=(2*(-Leng-Lutil)-Lcola, 0.0, 0.0))

#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 5 - STEP -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create a step. The time period of the static step is 1.0, and the initial incrementation
is 0.1; the step is created after the initial step.
Model.FrequencyStep(name='Frequency', previous='Initial', numEigen=18)
Model.SteadyStateModalStep(name='Frequency Range', previous='Frequency',
subdivideUsingEigenfrequencies=OFF, frequencyRange=((0.0, 1000.0, 400, 3.0), ))

#-------------------------------------------------------------
#---------- 6 - SETS -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# TITANIUM STRIP
##-----------------------------------------------------------
# SET EDGES
Encastre_Titanio = p1.edges.findAt(((-(Lutil+Lcola)+(-Leng/2.0), -W, 0.0),),((-(Lutil+Lcola
)+(-Leng/2.0), W, 0.0),),)
p1.Set(edges=Encastre_Titanio, name='ENCASTRE TITANIO')
# PARTITION
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola+Lutil), W, 0.0), point2=(-(Lcola+Lutil), -W,
0.0), faces=CT) #JOINT BONDED AREA
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola), W, 0.0), point2=(-(Lcola), -W, 0.0), faces=
CT)
BT = p1.faces.findAt((((-Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
p1.Surface(side1Faces = BT, name='TI_BOND')
region7=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND']
BT01=p1.faces.findAt(((-Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p1.Surface(side1Faces = BT01, name='TI_TAB')
region11=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
CT2 = p1.faces.findAt(((-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),) #SHAKER LOAD INSERTION PONT
regionT2 = regionToolset.Region(faces = CT2)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Pshaker_x), W, 0.0), point2=((-Pshaker_x), -W,
0.0), faces=CT2)
CT3 = p1.faces.findAt((((-(Lutil+Lcola-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(faces = CT3)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Lutil-Lcola), Pshaker_y, 0.0), point2=((-
Pshaker_x), Pshaker_y, 0.0), faces=CT3)
verts_00 = p1.vertices.findAt(((-Pshaker_x, Pshaker_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_00, name='Shaker')
CT4 = p1.faces.findAt(((-Paccel_x,W/2.0, 0.0),),) #ACCELEROMETER INSERTION PONT
regionT4 = regionToolset.Region(faces = CT4)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Paccel_x), W, 0.0), point2=((-Paccel_x), -W, 0.0),
faces=CT4)
```

```
CT5 = p1.faces.findAt((((-Paccel_x),W/2.0, 0.0),),)
regionT5 = regionToolset.Region(faces = CT5)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(0.0, Paccel_y, 0.0), point2=((-Paccel_x), Paccel_y,
0.0), faces=CT5)
verts_01 = p1.vertices.findAt(((-Paccel_x, Paccel_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_01, name='Accelerometer')

#-------------------------------------------------------------
# CARBONO STRIP
##-------------------------------------------------------------

## SET EDGES
Encastre_Carbono = p2.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p2.Set(edges=Encastre_Carbono, name='ENCASTRE CARBONO')

# PARTITION
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng, W, 0.0), point2=(Leng, -W, 0.0), faces=CC)

# BONDED AREA
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng+Lutil, W, 0.0), point2=(Leng+Lutil, -W, 0.0),
faces=CC)
BC = p2.faces.findAt(((Leng+Lutil+(Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
p2.Surface(side1Faces = BC, name='CA_BOND')
region8=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
BC01=p2.faces.findAt((((Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p2.Surface(side1Faces = BC01, name='CARB_TAB')
region12=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']

#-------------------------------------------------------------
# TAB STRIP
##-------------------------------------------------------------

## SET EDGES
Encastre_TAB00 = p3.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p3.Set(edges=Encastre_TAB00, name='ENCASTRE TAB00')
Encastre_TAB01 = p4.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p4.Set(edges=Encastre_TAB01, name='ENCASTRE TAB01')

#-------------------------------------------------------------
#---------- 7 - MESH -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------

## TITANIUM PLATE
# SEED THE PART
p1.seedPart(size=0.003)

# MESHING CONTROLS
p1.setMeshControls(regions=CT, technique=SWEEP)
```

```
# SET THE ELEMENT
elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=S8R, elemLibrary=STANDARD)
p1.setElementType(regions=regionT, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p1.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)

## CARBONO PLATE
# SEED THE PART
p2.seedPart(size=0.003)
# MESHING CONTROLS
p2.setMeshControls(regions=CC, technique=SWEEP, elemShape=QUAD)
p2.setSweepPath(region=f[0], edge=e[1], sense=FORWARD)

# SET THE ELEMENT
p2.setElementType(regions=regionC, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p2.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)

## TAB
# SEED THE PART
p3.seedPart(size=0.006)
p4.seedPart(size=0.006)

# MESHING CONTROLS
p3.setMeshControls(regions=TAB00, technique=STRUCTURED)
p4.setMeshControls(regions=TAB01, technique=STRUCTURED)

# SET THE ELEMENT
p3.setElementType(regions=regionTAB00, elemTypes=(elemType1,elemType1,elemType1))
p4.setElementType(regions=regionTAB01, elemTypes=(elemType1,elemType1,elemType1))
p3.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
p4.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)

# CONSTRAINING BOTH PLATES
##-------------------------------------------------------------
region9=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
region10=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND'] # JOINT BONDED AREA
Model.Tie(name='JOINT BOND', master=region9, slave=region10,
positionToleranceMethod=COMPUTED
, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region13=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
region14=a.instances['TAB00_00'].surfaces['TAB00_BOND'] # TAB_CARB BONDED

AREA
Model.Tie(name='TAB_BOND_A', master=region13, slave=region14,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region15=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
region16=a.instances['TAB01_01'].surfaces['TAB01_BOND'] # TAB_Ti BONDED

AREA
```

```
Model.Tie(name='TAB_BOND_B', master=region15, slave=region16,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)

#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#---------- 8 - BOUNDARY CONDITIONS AND ----------
#---------- LOADING ----------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
# Create loads and boundary conditions BC's
# SETTING ZERO DISPLACEMENT ZONES
region_Carb = a.instances['CARBONO-1'].sets['ENCASTRE CARBONO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Carb00',
createStepName='Initial',region=region_Carb, u1=0.0
, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0,amplitude=UNSET, fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Ti = a.instances['TITANIO-1'].sets['ENCASTRE TITANIO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Ti00', createStepName='Initial', region=region_Ti,
u1=0.0,
u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab00 = a.instances['TAB00_00'].sets['ENCASTRE TAB00']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB00', createStepName='Initial',
region=region_Tab00, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab01= a.instances['TAB01_01'].sets['ENCASTRE TAB01']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB01', createStepName='Initial',
region=region_Tab01, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)

# CREATING LOAD AMPLITUDE
##-----------------------------------------------------------
Model.PeriodicAmplitude(name='Amp-1', timeSpan=STEP, frequency=3769.9, start=0.0,
a_0=0.0,
data=((0.0, 1.0), ))

# SHAKER POSITIONING at FREQUENCY RANGE
##-----------------------------------------------------------
v1 = a.instances['TITANIO-1'].vertices
verts1 = v1.findAt(((-Pshaker_x-Leng-Lutil, Pshaker_y, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(vertices=verts1)
Model.ConcentratedForce(name='Load-2', createStepName='Frequency Range',
region=regionT3,cf3=
1+0j, distributionType=UNIFORM, field='',localCsys=None)
```

```
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#---------- 9 - OUTPUT PARAMETERS -------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
# Field Output Request
# Frequency Range

Model.FieldOutputRequest(name='F-Output-2', createStepName='Frequency Range',
variables=('U',
'UT', 'UR', 'V', 'VT', 'VR', 'A', 'AT', 'AR', 'RBANG', 'RBROT'), frequency=1)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Shaker']
Model.HistoryOutputRequest(name='Input_frange', createStepName='Frequency Range',
variables=(
'A3', 'AR3'), region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
regionDef=mdb.models['SLJ'].rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Accelerometer']
Model.HistoryOutputRequest(name='Output_frange', createStepName='Frequency Range',
variables
=('A3', 'AR3'), region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)

#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#---------- 10 - JOB -------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
# Create an analysis job for the model and submit it.
mdb.Job(name='JCS_30', model='SLJ', description='', type=ANALYSIS, atTime=None,
waitMinutes=0
, waitHours=0, queue=None, memory=90,
memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True, explicitPrecision=SINGLE,
nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='', scratch='',
parallelizationMethodExplicit=DOMAIN,
multiprocessingMode=DEFAULT, numDomains=1, numCpus=1)
```

8.2. ANEXO 2 - ALGORITMO PARA MODELAGEM DINÂMICA

```
##---------------------------------------------------------
# Definicao de objetos, modelos e variaveis constantes
##---------------------------------------------------------
from abaqus import *
from abaqus import backwardCompatibility
from abaqusConstants import *
from connectorBehavior import *
from abaqusConstants import *
import testUtils
import section
```

```
import regionToolset
import displayGroupMdbToolset as dgm
import part
import material
import assembly
import step
import interaction
import load
import mesh
import job
import sketch
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
testUtils.setBackwardCompatibility()
## Criar um novo Modelo
Mdb()
modelName = 'SLJ'
Model = mdb.Model(name=modelName)
del mdb.models['Model-1']

#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#---------- 1 - INPUT DATA --------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
##-----------------------------------------------------------
# Coupon Parameters
##-----------------------------------------------------------
# Width[mm]
W=12.7e-03
##-----------------------------------------------------------
# Thickness[mm]
Tti=1.6e-03
Tcf=1.7e-03
Dens_Ti=4428.7
Dens_Carb=1540
##-----------------------------------------------------------
# Length[mm]
Leng=40e-03 #In case of variation of this parameter, make sure the translate on assy is
checked
Lutil=300e-03
Lcola=50.8e-03
Falha=0.0 # PERCENTAGE OF THE ORIGINAL BONDING AREA
Lfalha=Lcola*(Falha/100)
##-----------------------------------------------------------
# SHAKER POSITION
##-----------------------------------------------------------
# Input Position X
```

```
Pshaker_x=275.4e-03+Lcola
# Input Position Y
Pshaker_y=0.0e-03
##-------------------------------------------------------------
# ACCELEROMETER POSITION
##-------------------------------------------------------------
# Input Position X
Paccel_x=250e-03
# Input Position Y
Paccel_y=0.0e-03
#-------------------------------------------------------------
#--------------1.0 CHECKINGS-----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
Var1=0.0
Var2=BOTTOM
if Pshaker_y > 0.0:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0+Pshaker_y
Var2= (W+Pshaker_y)/2.0-W
Var3=TOP
else:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0
Var2= Pshaker_y-(W+Pshaker_y)/2.0
Var3=BOTTOM
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 2 - GEOMETRY ----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
##Create the Sketch for Titanium Strip
# BONDED AREA
s1= Model.ConstrainedSketch(name='Lcol_T',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s1.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(-Lcola, W))
p1 = Model.Part(name='TITANIO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p1 = Model.parts['TITANIO']
f, v, e, d = p1.faces, p1.vertices, p1.edges, p1.datums
p1.BaseShell(sketch=s1)
##AREA UTIL
#A
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s2 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_a', sheetSize=0.113, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s2.geometry, s2.vertices, s2.dimensions, s2.constraints
s2.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s2.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s2, filter=COPLANAR_EDGES)
```

```
s2.rectangle(point1=(-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s2)
#B
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s3 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_b', sheetSize=0.4, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s3.geometry, s3.vertices, s3.dimensions, s3.constraints
s3.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s3.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s3, filter=COPLANAR_EDGES)
s3.rectangle(point1=(-Lutil-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x,Pshaker_y))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s3)
#C
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[1],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s4 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_c', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s4.geometry, s4.vertices, s4.dimensions, s4.constraints
s4.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s4.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s4.rectangle(point1=(-Pshaker_x, Pshaker_y), point2=(-Lutil-Lcola, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,sketch=s4)
# AREA ENGASTADA
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s5 = Model.ConstrainedSketch(name='Leng_T', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s5.geometry, s5.vertices, s5.dimensions, s5.constraints
s5.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s5.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s5, filter=COPLANAR_EDGES)
s5.rectangle(point1=(-Lcola-Lutil, -W), point2=(-Lcola-Lutil-Leng, W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s5)
s5.unsetPrimaryObject()
## DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : TITATINUM STRIP
# DESIGNATING CELLS
# At AREA A
Ptxa=-(Lcola+((Pshaker_x)-(Lcola))/2.0)
```

```
# At AREA B
Ptxb=-((Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyb=Var1
# At AREA C
Ptxc=(-(Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyc= Var2
# REGION DEFINITION
CT = p1.faces.findAt(((Ptxc,Ptyc, 0.0),),((-(Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxa, 0.0, 0.0),),((-
Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxb,Ptyb, 0.0),),) #MATERIAL
regionT = regionToolset.Region(faces = CT)
##############################################################################
###################
#####################################
##Create the Sketch for Carbono Strip
# AREA ENGASTE
s6= Model.ConstrainedSketch(name='Leng_C',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s6.geometry, s6.vertices, s6.dimensions, s6.constraints
s6.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s6.rectangle(point1=(-0.0, -W), point2=(Leng, W))
p2 = Model.Part(name='CARBONO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p2 = Model.parts['CARBONO']
f, v, e, d = p2.faces, p2.vertices, p2.edges, p2.datums
p2.BaseShell(sketch=s6)
#AREA UTIL
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s7 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_C', sheetSize=0.094, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s7.geometry, s7.vertices, s7.dimensions, s7.constraints
s7.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s7.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s7, filter=COPLANAR_EDGES)
s7.rectangle(point1=(Leng, -W), point2=(Leng+Lutil, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s7)
# AREA COLADA
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[2],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s8 = Model.ConstrainedSketch(name='Lcola_C', sheetSize=0.48,gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s8.geometry, s8.vertices, s8.dimensions, s8.constraints
s8.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s8.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s8, filter=COPLANAR_EDGES)
s8.rectangle(point1=(Leng+Lutil, -W), point2=(Leng+Lutil+Lcola, W))
```

```
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[2],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s8)
# DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : CARBON STRIP
# REGION DEFINITION
CC = p2.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),((Leng+(Lutil/2.0), 0.0, 0.0),),((Leng+Lutil+(
Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
regionC = regionToolset.Region(faces = CC)
##############################################################################
##################
#################################
##Create the Sketch for TABS
##TAB00
s11= Model.ConstrainedSketch(name='TAB00',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s11.geometry, s11.vertices, s11.dimensions, s11.constraints
s11.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s11.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p3 = Model.Part(name='TAB00', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p3 = Model.parts['TAB00']
f, v, e, d = p3.faces, p3.vertices, p3.edges, p3.datums
p3.BaseShell(sketch=s11)
# REGION DEFINITION
TAB00 = p3.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB00 = regionToolset.Region(faces = TAB00)
p3.Surface(side1Faces = TAB00, name='TAB00_BOND')
##TAB01
s12= Model.ConstrainedSketch(name='TAB01',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s12.geometry, s12.vertices, s12.dimensions, s12.constraints
s12.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s12.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p4 = Model.Part(name='TAB01', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p4 = Model.parts['TAB01']
f, v, e, d = p4.faces, p4.vertices, p4.edges, p4.datums
p4.BaseShell(sketch=s12)
# REGION DEFINITION
TAB01 = p4.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB01= regionToolset.Region(faces = TAB01)
p4.Surface(side1Faces = TAB01, name='TAB01_BOND')
##-------------------------------------------------------------
# SYSTEM OF COORDINATED
##-------------------------------------------------------------
# Create a System Global
p1.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_STRIP', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(-Lcola-
Lutil-Leng, 0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p2.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_LAMINADO',
coordSysType=CARTESIAN, origin=(0.0,
0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p3.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
```

```
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p4.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 3 - MATERIALS AND ELEMENTS --------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# ISOTROPIC MATERIAL - CREATING MATERIAL
Model.Material(name='Ti6Al4V')
# MECHANICAL PROPERTIES ASSIGNEMENT
TiE=110.3e09
Tipoisson=0.310
# VALUES ASSIGNEMENT
Model.materials['Ti6Al4V'].Elastic(table=((TiE, Tipoisson), ))
Model.materials['Ti6Al4V'].Density(table=((Dens_Ti, ), ))
## SECTION ASSIGNEMENT
# CREATING NEW SECTION : LAMINA DE TITANIO
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio', preIntegrate=OFF,
material='Ti6Al4V',
thicknessType=UNIFORM, thickness=Tti, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio_TAB', preIntegrate=OFF,
material=
'Ti6Al4V', thicknessType=UNIFORM, thickness=Tcf, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
# SECTION AND PART
p1.SectionAssignment(region=regionT, sectionName='Lamina de Titanio',
offset=0.0,offsetType=
BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
#-----------------------------------------------------------
# ORTHOTROPIC MATERIAL
Model.Material(name='M20-G0904')
# MECHANICAL PROPERTIES
CE1=41.413E09
CE2=39.152E09
CE3=8.93E09
Cn12=0.107
Cn13=0.5
Cn23=0.5
CG12=2.812E09
CG13=2.812E09
```

```
CG23=2.812E09
# VALUES AND PAREMETERS
Model.materials['M20-G0904'].Elastic(type=ENGINEERING_CONSTANTS, table=((CE1,
CE2, CE3, Cn12,
Cn13, Cn23, CG12, CG13, CG23),))
Model.materials['M20-G0904'].Density(table=((Dens_Carb, ), ))
##SECTION
# CREATE SECTION: LAMINADO
layupOrientation = p2.datums[4]
plySystem1 = p2.datums[4]
compositeLayup = p2.CompositeLayup(name='LAMINADO', description='LAMINADO DE
CARBONO',
elementType=SHELL, offsetType=BOTTOM_SURFACE, symmetric=False,
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# COORDINATE SYSTEM
compositeLayup.ReferenceOrientation(orientationType=SYSTEM,
localCsys=layupOrientation,
fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_NONE, angle=0.0,
additionalRotationField='', axis=AXIS_3, stackDirection=
STACK_3)
# Ply No.1
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-1', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS, thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.2
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-2', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.3
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-3', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.4
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-4', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
```

```
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.5
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-5', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.6
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-6', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.7
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-7', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# TAB MATERIAL ASSIGNMENT
# TAB00
p3.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio', offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# TAB01
p4.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio_TAB',
offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
'
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 4 - ASSEMBLY ----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create assembly 1
a = Model.rootAssembly
a.Instance(name='CARBONO-1', part=p2, dependent=ON)
a.Instance(name='TITANIO-1', part=p1, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB00_00', part=p3, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB01_01', part=p4, dependent=ON)
# SETTING THE PARTS
a.rotate(instanceList=('CARBONO-1', ), axisPoint=(0.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -W,
0.0),
angle=180.0)
```

```
a.translate(instanceList=('TITANIO-1', ), vector=(-(Lutil+Leng), 0.0, 0.0))
a.translate(instanceList=('TAB00_00', ), vector=(-Leng, 0.0, 0.0))
a.rotate(instanceList=('TAB01_01', ), axisPoint=(Leng/2.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -2.0*
W, 0.0), angle=180.0)
a.translate(instanceList=('TAB01_01', ), vector=(2*(-Leng-Lutil)-Lcola, 0.0, 0.0))
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 5 - STEP -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create a step. The time period of the static step is 1.0, and the initial incrementation
is 0.1; the step is created
# after the initial step.
Model.ImplicitDynamicsStep(name='Dynamic', previous='Initial', maxNumInc=4097,
timeIncrementationMethod=FIXED, timePeriod=0.5, initialInc=1.221e-04, nohaf=OFF,
noStop=OFF)
#-------------------------------------------------------------
#---------- 6 - SETS -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# TITANIUM STRIP
##------------------------------------------------------------
# SET EDGES
Encastre_Titanio = p1.edges.findAt(((-(Lutil+Lcola)+(-Leng/2.0), -W, 0.0),),((-(Lutil+Lcola
)+(-Leng/2.0), W, 0.0),),)
p1.Set(edges=Encastre_Titanio, name='ENCASTRE TITANIO')
# PARTITION
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola+Lutil), W, 0.0), point2=(-(Lcola+Lutil), -W,
0.0), faces=CT) #JOINT BONDED AREA
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola), W, 0.0), point2=(-(Lcola), -W, 0.0), faces=
CT)
BT = p1.faces.findAt((((-Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
p1.Surface(side1Faces = BT, name='TI_BOND')
region7=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND']
BT01=p1.faces.findAt(((-Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p1.Surface(side1Faces = BT01, name='TI_TAB')
region11=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
CT2 = p1.faces.findAt(((-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),) #SHAKER LOAD INSERTION PONT
regionT2 = regionToolset.Region(faces = CT2)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Pshaker_x), W, 0.0), point2=((-Pshaker_x), -W,
0.0),
faces=CT2)
CT3 = p1.faces.findAt((((-(Lutil+Lcola-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(faces = CT3)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Lutil-Lcola), Pshaker_y, 0.0), point2=((-
Pshaker_x),
Pshaker_y, 0.0), faces=CT3)
verts_00 = p1.vertices.findAt(((-Pshaker_x, Pshaker_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_00, name='Shaker')
CT4 = p1.faces.findAt(((-Paccel_x,W/2.0, 0.0),),) #ACCELEROMETER INSERTION PONT
```

```
regionT4 = regionToolset.Region(faces = CT4)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Paccel_x), W, 0.0), point2=((-Paccel_x), -W, 0.0),
faces=CT4)
CT5 = p1.faces.findAt((((-Paccel_x),W/2.0, 0.0),),)
regionT5 = regionToolset.Region(faces = CT5)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(0.0, Paccel_y, 0.0), point2=((-Paccel_x), Paccel_y,
0.0), faces=CT5)
verts_01 = p1.vertices.findAt(((-Paccel_x, Paccel_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_01, name='Accelerometer')
#-----------------------------------------------------------
# CARBONO STRIP
##----------------------------------------------------------
## SET EDGES
Encastre_Carbono = p2.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p2.Set(edges=Encastre_Carbono, name='ENCASTRE CARBONO')
# PARTITION
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng, W, 0.0), point2=(Leng, -W, 0.0), faces=CC)
# BONDED AREA
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng+Lutil, W, 0.0), point2=(Leng+Lutil, -W, 0.0),
faces=CC)
BC = p2.faces.findAt(((Leng+Lutil+(Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
p2.Surface(side1Faces = BC, name='CA_BOND')
region8=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
BC01=p2.faces.findAt((((Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p2.Surface(side1Faces = BC01, name='CARB_TAB')
region12=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
#-----------------------------------------------------------
# TAB STRIP
##----------------------------------------------------------
## SET EDGES
Encastre_TAB00 = p3.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p3.Set(edges=Encastre_TAB00, name='ENCASTRE TAB00')
Encastre_TAB01 = p4.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p4.Set(edges=Encastre_TAB01, name='ENCASTRE TAB01')
#-----------------------------------------------------------
#---------- 7 - MESH -------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
## TITANIUM PLATE
# SEED THE PART
p1.seedPart(size=0.003)
# MESHING CONTROLS
p1.setMeshControls(regions=CT, technique=SWEEP)
# SET THE ELEMENT
elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=S8R, elemLibrary=STANDARD)
p1.setElementType(regions=regionT, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p1.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
## CARBONO PLATE
# SEED THE PART
p2.seedPart(size=0.003)
```

```
# MESHING CONTROLS
p2.setMeshControls(regions=CC, technique=SWEEP, elemShape=QUAD)
p2.setSweepPath(region=f[0], edge=e[1], sense=FORWARD)
# SET THE ELEMENT
p2.setElementType(regions=regionC, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p2.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
## TAB
# SEED THE PART
p3.seedPart(size=0.006)
p4.seedPart(size=0.006)
# MESHING CONTROLS
p3.setMeshControls(regions=TAB00, technique=STRUCTURED)
p4.setMeshControls(regions=TAB01, technique=STRUCTURED)
# SET THE ELEMENT
p3.setElementType(regions=regionTAB00, elemTypes=(elemType1,
elemType1,elemType1))
p4.setElementType(regions=regionTAB01, elemTypes=(elemType1,
elemType1,elemType1))
p3.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
p4.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
# CONSTRAINING BOTH PLATES
##-------------------------------------------------------------
region9=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
region10=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND'] # JOINT BONDED AREA
Model.Tie(name='JOINT BOND', master=region9, slave=region10,
positionToleranceMethod=COMPUTED
, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region13=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
region14=a.instances['TAB00_00'].surfaces['TAB00_BOND'] # TAB_CARB BONDED
AREA
Model.Tie(name='TAB_BOND_A', master=region13, slave=region14,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region15=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
region16=a.instances['TAB01_01'].surfaces['TAB01_BOND'] # TAB_Ti BONDED AREA
Model.Tie(name='TAB_BOND_B', master=region15, slave=region16,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
#-------------------------------------------------------------
#---------- 8 - BOUNDARY CONDITIONS AND ----------
#---------- LOADING -----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create loads and boundary conditions BC's
# SETTING ZERO DISPLACEMENT ZONES
region_Carb = a.instances['CARBONO-1'].sets['ENCASTRE CARBONO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Carb00',
createStepName='Initial',region=region_Carb, u1=0.0
, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0,amplitude=UNSET, fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
```

```
region_Ti = a.instances['TITANIO-1'].sets['ENCASTRE TITANIO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Ti00', createStepName='Initial', region=region_Ti,
u1=0.0,
u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab00 = a.instances['TAB00_00'].sets['ENCASTRE TAB00']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB00', createStepName='Initial',
region=region_Tab00, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab01= a.instances['TAB01_01'].sets['ENCASTRE TAB01']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB01', createStepName='Initial',
region=region_Tab01, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
# CREATING LOAD AMPLITUDE
Model.PeriodicAmplitude(name='Amp-1', timeSpan=STEP, frequency=18849.02, start=0.0,
a_0=0.0,
data=((0.0, 1.0), ))
Model.SmoothStepAmplitude(name='Amp-2', timeSpan=TOTAL, data=((0.0, 0.0), (1.221e-
05, 0.0001
), (4.884e-05, 0.0)))
# SHAKER POSITIONING at FREQUENCY RANGE
##-------------------------------------------------------------
v1 = a.instances['TITANIO-1'].vertices
verts1 = v1.findAt(((-Pshaker_x-Leng-Lutil, Pshaker_y, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(vertices=verts1)
Model.ConcentratedForce(name='Load-1', createStepName='Dynamic', region=regionT3,
cf3=1.0,
distributionType=UNIFORM, field='',localCsys=None, amplitude='Amp-2')
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 9 - OUTPUT PARAMETERS -------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Field Output Request
# Frequency Range
Model.FieldOutputRequest(name='F-Output-1', createStepName='Dynamic', variables=('U',
'UT',
'V', 'VT', 'VR', 'A', 'AT', 'AR', 'RBANG', 'RBROT'), frequency=1)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Shaker']
Model.HistoryOutputRequest(name='Input', createStepName='Dynamic', variables=('A3',),
frequency=1, region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Accelerometer']
Model.HistoryOutputRequest(name='OutPut', createStepName='Dynamic', variables=('A3',),
frequency=1, region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 10 - JOB -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
```

```
#-----------------------------------------------------------------
# Create an analysis job for the model and submit it.
mdb.Job(name='JCS_30_Dynamic', model='SLJ', description='', type=ANALYSIS,
atTime=None,
waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,
memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True, explicitPrecision=SINGLE,
nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='', scratch='',
parallelizationMethodExplicit=DOMAIN,
multiprocessingMode=DEFAULT, numDomains=1, numCpus=1)
```

8.3. ANEXO 3 - ALGORITMO PARA MODELAGEM DINÂMICA COM FALHA

```
##-----------------------------------------------------------------
# Definicao de objetos, modelos e variaveis constantes
##-----------------------------------------------------------------
from abaqus import *
from abaqus import backwardCompatibility
from abaqusConstants import *
from connectorBehavior import *
from abaqusConstants import *
import testUtils
import section
import regionToolset
import displayGroupMdbToolset as dgm
import part
import material
import assembly
import step
import interaction
import load
import mesh
import job
import sketch
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
testUtils.setBackwardCompatibility()
## Criar um novo Modelo
Mdb()
modelName = 'SLJ'
Model = mdb.Model(name=modelName)
del mdb.models['Model-1']
```

```
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 1 - INPUT DATA --------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
##------------------------------------------------------------
# Coupon Parameters
##------------------------------------------------------------
# Width[mm]
W=12.7e-03
##------------------------------------------------------------
# Thickness[mm]
Tti=1.6e-03
Tcf=1.7e-03
Dens_Ti=4428.7
Dens_Carb=1540
##------------------------------------------------------------
# Length[mm]
Leng=40e-03 #In case of variation of this parameter, make sure the translate on assy is
checked
Lutil=300e-03
Lcola=50.8e-03
Falha=0.0 # PERCENTAGE OF THE ORIGINAL BONDING AREA
Lfalha=Lcola*(Falha/100)
##------------------------------------------------------------
# SHAKER POSITION
##------------------------------------------------------------
# Input Position X
Pshaker_x=275.4e-03+Lcola
# Input Position Y
Pshaker_y=0.0e-03
##------------------------------------------------------------
# ACCELEROMETER POSITION
##------------------------------------------------------------
# Input Position X
Paccel_x=250e-03
# Input Position Y
Paccel_y=0.0e-03
#-------------------------------------------------------------
#--------------1.0 CHECKINGS-----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
Var1=0.0
Var2=BOTTOM
if Pshaker_y > 0.0:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0+Pshaker_y
Var2= (W+Pshaker_y)/2.0-W
Var3=TOP
else:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0
Var2= Pshaker_y-(W+Pshaker_y)/2.0
```

```
Var3=BOTTOM
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 2 - GEOMETRY ---------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
##Create the Sketch for Titanium Strip
# BONDED AREA
s1= Model.ConstrainedSketch(name='Lcol_T',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s1.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(-Lcola, W))
p1 = Model.Part(name='TITANIO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p1 = Model.parts['TITANIO']
f, v, e, d = p1.faces, p1.vertices, p1.edges, p1.datums
p1.BaseShell(sketch=s1)
##AREA UTIL
#A
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s2 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_a', sheetSize=0.113, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s2.geometry, s2.vertices, s2.dimensions, s2.constraints
s2.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s2.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s2, filter=COPLANAR_EDGES)
s2.rectangle(point1=(-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s2)
#B
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s3 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_b', sheetSize=0.4, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s3.geometry, s3.vertices, s3.dimensions, s3.constraints
s3.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s3.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s3, filter=COPLANAR_EDGES)
s3.rectangle(point1=(-Lutil-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x,Pshaker_y))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s3)
#C
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[1],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
```

```
s4 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_c', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s4.geometry, s4.vertices, s4.dimensions, s4.constraints
s4.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s4.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s4.rectangle(point1=(-Pshaker_x, Pshaker_y), point2=(-Lutil-Lcola, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
# AREA ENGASTADA
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s5 = Model.ConstrainedSketch(name='Leng_T', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s5.geometry, s5.vertices, s5.dimensions, s5.constraints
s5.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s5.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s5, filter=COPLANAR_EDGES)
s5.rectangle(point1=(-Lcola-Lutil, -W), point2=(-Lcola-Lutil-Leng, W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s5)
s5.unsetPrimaryObject()
## DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : TITATINUM STRIP
# DESIGNATING CELLS
# At AREA A
Ptxa=-(Lcola+((Pshaker_x)-(Lcola))/2.0)
# At AREA B
Ptxb=-((Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyb=Var1
# At AREA C
Ptxc=(-(Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyc= Var2
# REGION DEFINITION
CT = p1.faces.findAt(((Ptxc,Ptyc, 0.0),),((-(Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxa, 0.0, 0.0),),((-
Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxb,Ptyb, 0.0),),) #MATERIAL
regionT = regionToolset.Region(faces = CT)
##############################################################################
###################
#####################################
##Create the Sketch for Carbono Strip
# AREA ENGASTE
s6= Model.ConstrainedSketch(name='Leng_C',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s6.geometry, s6.vertices, s6.dimensions, s6.constraints
s6.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s6.rectangle(point1=(-0.0, -W), point2=(Leng, W))
p2 = Model.Part(name='CARBONO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p2 = Model.parts['CARBONO']
```

```
f, v, e, d = p2.faces, p2.vertices, p2.edges, p2.datums
p2.BaseShell(sketch=s6)
#AREA UTIL
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s7 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_C', sheetSize=0.094, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s7.geometry, s7.vertices, s7.dimensions, s7.constraints
s7.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s7.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s7, filter=COPLANAR_EDGES)
s7.rectangle(point1=(Leng, -W), point2=(Leng+Lutil, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s7)
# AREA COLADA
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[2],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s8 = Model.ConstrainedSketch(name='Lcola_C', sheetSize=0.48,gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s8.geometry, s8.vertices, s8.dimensions, s8.constraints
s8.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s8.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s8, filter=COPLANAR_EDGES)
s8.rectangle(point1=(Leng+Lutil, -W), point2=(Leng+Lutil+Lcola, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[2],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s8)
# DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : CARBON STRIP
# REGION DEFINITION
CC = p2.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),((Leng+(Lutil/2.0), 0.0, 0.0),),((Leng+Lutil+(
Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
regionC = regionToolset.Region(faces = CC)
##############################################################################
##################
#################################
##Create the Sketch for TABS
##TAB00
s11= Model.ConstrainedSketch(name='TAB00',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s11.geometry, s11.vertices, s11.dimensions, s11.constraints
s11.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s11.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p3 = Model.Part(name='TAB00', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p3 = Model.parts['TAB00']
f, v, e, d = p3.faces, p3.vertices, p3.edges, p3.datums
p3.BaseShell(sketch=s11)
# REGION DEFINITION
TAB00 = p3.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
```

```
regionTAB00 = regionToolset.Region(faces = TAB00)
p3.Surface(side1Faces = TAB00, name='TAB00_BOND')
##TAB01
s12= Model.ConstrainedSketch(name='TAB01',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s12.geometry, s12.vertices, s12.dimensions, s12.constraints
s12.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s12.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p4 = Model.Part(name='TAB01', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p4 = Model.parts['TAB01']
f, v, e, d = p4.faces, p4.vertices, p4.edges, p4.datums
p4.BaseShell(sketch=s12)
# REGION DEFINITION
TAB01 = p4.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB01= regionToolset.Region(faces = TAB01)
p4.Surface(side1Faces = TAB01, name='TAB01_BOND')
##-------------------------------------------------------------
# SYSTEM OF COORDINATED
##-------------------------------------------------------------
# Create a System Global
p1.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_STRIP', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(-Lcola-
Lutil-Leng, 0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p2.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_LAMINADO',
coordSysType=CARTESIAN, origin=(0.0,
0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p3.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p4.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 3 - MATERIALS AND ELEMENTS --------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# ISOTROPIC MATERIAL - CREATING MATERIAL
Model.Material(name='Ti6Al4V')
# MECHANICAL PROPERTIES ASSIGNEMENT
TiE=110.3e09
Tipoisson=0.310
# VALUES ASSIGNEMENT
Model.materials['Ti6Al4V'].Elastic(table=((TiE, Tipoisson), ))
Model.materials['Ti6Al4V'].Density(table=((Dens_Ti, ), ))
## SECTION ASSIGNEMENT
# CREATING NEW SECTION : LAMINA DE TITANIO
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio', preIntegrate=OFF,
material='Ti6Al4V',
thicknessType=UNIFORM, thickness=Tti, thicknessField='',
```

```
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio_TAB', preIntegrate=OFF,
material=
'Ti6Al4V', thicknessType=UNIFORM, thickness=Tcf, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
# SECTION AND PART
p1.SectionAssignment(region=regionT, sectionName='Lamina de Titanio',
offset=0.0,offsetType=
BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
#-----------------------------------------------------------------
# ORTHOTROPIC MATERIAL
Model.Material(name='M20-G0904')
# MECHANICAL PROPERTIES
CE1=41.413E09
CE2=39.152E09
CE3=8.93E09
Cn12=0.107
Cn13=0.5
Cn23=0.5
CG12=2.812E09
CG13=2.812E09
CG23=2.812E09
# VALUES AND PAREMETERS
Model.materials['M20-G0904'].Elastic(type=ENGINEERING_CONSTANTS, table=((CE1,
CE2, CE3, Cn12,
Cn13, Cn23, CG12, CG13, CG23),))
Model.materials['M20-G0904'].Density(table=((Dens_Carb, ), ))
##SECTION
# CREATE SECTION: LAMINADO
layupOrientation = p2.datums[4]
plySystem1 = p2.datums[4]
compositeLayup = p2.CompositeLayup(name='LAMINADO', description='LAMINADO DE
CARBONO',
elementType=SHELL, offsetType=BOTTOM_SURFACE, symmetric=False,
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# COORDINATE SYSTEM
compositeLayup.ReferenceOrientation(orientationType=SYSTEM,
localCsys=layupOrientation,
fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_NONE, angle=0.0,
additionalRotationField='', axis=AXIS_3, stackDirection=
STACK_3)
# Ply No.1
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-1', region=regionC,
material=
```

```
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS, thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.2
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-2', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.3
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-3', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.4
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-4', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.5
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-5', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.6
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-6', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.7
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-7', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
```

```
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# TAB MATERIAL ASSIGNMENT
# TAB00
p3.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio', offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# TAB01
p4.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio_TAB',
offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
'''
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 4 - ASSEMBLY ---------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create assembly 1
a = Model.rootAssembly
a.Instance(name='CARBONO-1', part=p2, dependent=ON)
a.Instance(name='TITANIO-1', part=p1, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB00_00', part=p3, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB01_01', part=p4, dependent=ON)
# SETTING THE PARTS
a.rotate(instanceList=('CARBONO-1', ), axisPoint=(0.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -W,
0.0),angle=180.0)
a.translate(instanceList=('TITANIO-1', ), vector=(-(Lutil+Leng), 0.0, 0.0))
a.translate(instanceList=('TAB00_00', ), vector=(-Leng, 0.0, 0.0))
a.rotate(instanceList=('TAB01_01', ), axisPoint=(Leng/2.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -2.0*
W, 0.0), angle=180.0)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 5 - STEP -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create a step. The time period of the static step is 1.0, and the initial incrementation
is 0.1; the step is created
# after the initial step.
Model.ImplicitDynamicsStep(name='Dynamic', previous='Initial', maxNumInc=4097,
timeIncrementationMethod=FIXED, timePeriod=0.5, initialInc=1.221e-04, nohaf=OFF,
noStop=OFF)
Model.steps['Dynamic'].setValues(noStop=ON)
#-------------------------------------------------------------
#---------- 6 - SETS -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# TITANIUM STRIP
##-----------------------------------------------------------
# SET EDGES
Encastre_Titanio = p1.edges.findAt(((-(Lutil+Lcola)+(-Leng/2.0), -W, 0.0),),((-(Lutil+Lcola
```

```
)+(-Leng/2.0), W, 0.0),),)
p1.Set(edges=Encastre_Titanio, name='ENCASTRE TITANIO')
# PARTITION
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola+Lutil), W, 0.0), point2=(-(Lcola+Lutil), -W,
0.0), faces=CT) # ENCASTRE
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola), W, 0.0), point2=(-(Lcola), -W, 0.0), faces=
CT)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola/2.0), W, 0.0), point2=(-(Lcola/2.0), -W, 0.0),
faces=CT) # JOINT BONDED AREA
BT = p1.faces.findAt((((-Lcola/4.0), 0.0, 0.0),),)
p1.Surface(side1Faces = BT, name='TI_BOND')
region7=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND']
CT = p1.faces.findAt((((-3*Lcola/4.0), 0.0, 0.0),),) # JOINT CONTACT AREA
p1.Surface(side1Faces = CT, name='TI_CONTACT')
region7=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_CONTACT']
BT01=p1.faces.findAt(((-Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p1.Surface(side1Faces = BT01, name='TI_TAB')
region11=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
CT2 = p1.faces.findAt(((-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),) #SHAKER LOAD INSERTION PONT
regionT2 = regionToolset.Region(faces = CT2)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Pshaker_x), W, 0.0), point2=((-Pshaker_x), -W,
0.0),
faces=CT2)
CT3 = p1.faces.findAt((((-(Lutil+Lcola-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(faces = CT3)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Lutil-Lcola), Pshaker_y, 0.0), point2=((-
Pshaker_x),
Pshaker_y, 0.0), faces=CT3)
verts_00 = p1.vertices.findAt(((-Pshaker_x, Pshaker_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_00, name='Shaker')
CT4 = p1.faces.findAt(((-Paccel_x,W/2.0, 0.0),),) #ACCELEROMETER INSERTION PONT
regionT4 = regionToolset.Region(faces = CT4)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Paccel_x), W, 0.0), point2=((-Paccel_x), -W, 0.0),
faces=CT4)
CT5 = p1.faces.findAt((((-Paccel_x),W/2.0, 0.0),),)
regionT5 = regionToolset.Region(faces = CT5)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(0.0, Paccel_y, 0.0), point2=((-Paccel_x), Paccel_y,
0.0), faces=CT5)
verts_01 = p1.vertices.findAt(((-Paccel_x, Paccel_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_01, name='Accelerometer')
#-------------------------------------------------------------
# CARBONO STRIP
##-------------------------------------------------------------
## SET EDGES
Encastre_Carbono = p2.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p2.Set(edges=Encastre_Carbono, name='ENCASTRE CARBONO')
# PARTITION
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng, W, 0.0), point2=(Leng, -W, 0.0), faces=CC)
# ENCASTRE AREA
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng+Lutil, W, 0.0), point2=(Leng+Lutil, -W, 0.0),
```

```
faces=CC) # BONDED AREA
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng+Lutil+(Lcola/2.0), W, 0.0),
point2=(Leng+Lutil+(
Lcola/2.0), -W, 0.0), faces=CC)
BC = p2.faces.findAt(((Leng+Lutil+((Lcola/4.0)), 0.0, 0.0),),)
p2.Surface(side1Faces = BC, name='CA_BOND')
region8=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
CC = p2.faces.findAt(((Leng+Lutil+(3*(Lcola/4.0)), 0.0, 0.0),),)
p2.Surface(side1Faces = CC, name='CA_CONTACT')
region80=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_CONTACT']
BC01=p2.faces.findAt((((Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p2.Surface(side1Faces = BC01, name='CARB_TAB')
region12=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
#-------------------------------------------------------------
# TAB STRIP
##-------------------------------------------------------------
## SET EDGES
Encastre_TAB00 = p3.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p3.Set(edges=Encastre_TAB00, name='ENCASTRE TAB00')
Encastre_TAB01 = p4.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p4.Set(edges=Encastre_TAB01, name='ENCASTRE TAB01')
#-------------------------------------------------------------
#---------- 7 - MESH -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
## TITANIUM PLATE
# SEED THE PART
p1.seedPart(size=0.003)
# MESHING CONTROLS
p1.setMeshControls(regions=CT, technique=SWEEP)
# SET THE ELEMENT
elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=S8R, elemLibrary=STANDARD)
p1.setElementType(regions=regionT, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p1.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
## CARBONO PLATE
# SEED THE PART
p2.seedPart(size=0.003)
# MESHING CONTROLS
p2.setMeshControls(regions=CC, technique=SWEEP, elemShape=QUAD)
p2.setSweepPath(region=f[0], edge=e[1], sense=FORWARD)
# SET THE ELEMENT
p2.setElementType(regions=regionC, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p2.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
## TAB
# SEED THE PART
p3.seedPart(size=0.006)
p4.seedPart(size=0.006)
# MESHING CONTROLS
p3.setMeshControls(regions=TAB00, technique=STRUCTURED)
p4.setMeshControls(regions=TAB01, technique=STRUCTURED)
```

```
# SET THE ELEMENT
p3.setElementType(regions=regionTAB00, elemTypes=(elemType1,
elemType1,elemType1))
p4.setElementType(regions=regionTAB01, elemTypes=(elemType1,
elemType1,elemType1))
p3.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
p4.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
# CONSTRAINING BOTH PLATES
##-------------------------------------------------------------
region9=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
region10=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND'] # JOINT BONDED AREA
Model.Tie(name='JOINT BOND', master=region9, slave=region10,
positionToleranceMethod=COMPUTED
, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region13=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
region14=a.instances['TAB00_00'].surfaces['TAB00_BOND'] # TAB_CARB BONDED
AREA
Model.Tie(name='TAB_BOND_A', master=region13, slave=region14,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region15=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
region16=a.instances['TAB01_01'].surfaces['TAB01_BOND'] # TAB_Ti BONDED AREA
Model.Tie(name='TAB_BOND_B', master=region15, slave=region16,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 8 - BOUNDARY CONDITIONS AND ----------
#---------- LOADING -----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create loads and boundary conditions BC's
# SETTING ZERO DISPLACEMENT ZONES
# SETTING ZERO DISPLACEMENT ZONES
region_Carb = a.instances['CARBONO-1'].sets['ENCASTRE CARBONO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Carb00',
createStepName='Initial',region=region_Carb, u1=0.0
, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0,amplitude=UNSET, fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Ti = a.instances['TITANIO-1'].sets['ENCASTRE TITANIO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Ti00', createStepName='Initial', region=region_Ti,
u1=0.0,
u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab00 = a.instances['TAB00_00'].sets['ENCASTRE TAB00']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB00', createStepName='Initial',
region=region_Tab00, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab01= a.instances['TAB01_01'].sets['ENCASTRE TAB01']
```

```
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB01', createStepName='Initial',
region=region_Tab01, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
# CREATING LOAD AMPLITUDE
Model.PeriodicAmplitude(name='Amp-1', timeSpan=STEP, frequency=18849.02, start=0.0,
a_0=0.0,
data=((0.0, 1.0), ))
Model.SmoothStepAmplitude(name='Amp-2', timeSpan=TOTAL, data=((0.0, 0.0), (1.221e-
05, 0.0001
), (4.884e-05, 0.0)))
# SHAKER POSITIONING at FREQUENCY RANGE
##-------------------------------------------------------------
v1 = a.instances['TITANIO-1'].vertices
verts1 = v1.findAt(((-Pshaker_x-Leng-Lutil, Pshaker_y, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(vertices=verts1)
Model.ConcentratedForce(name='Load-1', createStepName='Dynamic', region=regionT3,
cf3=1.0,
distributionType=UNIFORM, field='',localCsys=None, amplitude='Amp-2')"
# SURFACE INTERACTION
##-------------------------------------------------------------
Model.ContactProperty('IntProp-1')
Model.interactionProperties['IntProp-1'].TangentialBehavior(formulation=FRICTIONLESS)
Model.interactionProperties['IntProp-1'].NormalBehavior(pressureOverclosure=HARD,
allowSeparation=ON, constraintEnforcementMethod=DEFAULT)
region1=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_CONTACT']
region2=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_CONTACT']
Model.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Int-1', createStepName='Dynamic',
master=region1,
slave=region2, sliding=FINITE, thickness=ON, interactionProperty='IntProp-1',
adjustMethod=NONE, initialClearance=OMIT, datumAxis=None,
clearanceRegion=None)
Model.interactions['Int-1'].setValues(initialClearance=OMIT, adjustMethod=TOLERANCE,
sliding=
FINITE, enforcement=SURFACE_TO_SURFACE, thickness=ON,
contactTracking=TWO_CONFIG, tied=OFF, adjustTolerance=0.0001,
bondingSet=None)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 9 - OUTPUT PARAMETERS -------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Field Output Request
# Frequency Range
Model.FieldOutputRequest(name='F-Output-1', createStepName='Dynamic', variables=('U',
'UT',
'V', 'VT', 'VR', 'A', 'AT', 'AR', 'RBANG', 'RBROT', 'CFORCE', 'CSTRESS'),
frequency=1)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Shaker']
Model.HistoryOutputRequest(name='Input', createStepName='Dynamic', variables=('A3',),
```

```
frequency=1, region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Accelerometer']
Model.HistoryOutputRequest(name='OutPut', createStepName='Dynamic', variables=('A3',),
frequency=1, region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 10 - JOB -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create an analysis job for the model and submit it.
mdb.Job(name='JCS_30_Dynamic_Damaged', model='SLJ', description='',
type=ANALYSIS, atTime=
None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,
memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True, explicitPrecision=SINGLE,
nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='', scratch='',
parallelizationMethodExplicit=DOMAIN,
```

8.4. ANEXO 4 - ALGORITMO PARA MODELAGEM DINÂMICA COM FALHA E PASTILHA PIEZELÉTRICA

```
##-------------------------------------------------------------
# Definicao de objetos, modelos e variaveis constantes
##-------------------------------------------------------------
from abaqus import *
from abaqus import backwardCompatibility
from abaqusConstants import *
from connectorBehavior import *
from abaqusConstants import *
import testUtils
import section
import regionToolset
import displayGroupMdbToolset as dgm
import part
import material
import assembly
import step
import interaction
import load
import mesh
import job
import sketch
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
```

```
testUtils.setBackwardCompatibility()
## Criar um novo Modelo
Mdb()
modelName = 'SLJ'
Model = mdb.Model(name=modelName)
del mdb.models['Model-1']
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 1 - INPUT DATA --------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
##-------------------------------------------------------------
# Coupon Parameters
##-------------------------------------------------------------
# Width[mm]
W=12.7e-03
##-------------------------------------------------------------
# Thickness[mm]
Tti=1.6e-03
Tcf=1.7e-03
Dens_Ti=4428.7
Dens_Carb=1540
##-------------------------------------------------------------
# Length[mm]
Leng=40e-03 #In case of variation of this parameter, make sure the translate on assy is
checked
Lutil=300e-03
Lcola=50.8e-03
Falha=50.0 # PERCENTAGE OF THE ORIGINAL BONDING AREA
Lfalha=Lcola*(Falha/100)
##-------------------------------------------------------------
# SHAKER POSITION
##-------------------------------------------------------------
# Input Position X
Pshaker_x=275.4e-03+Lcola
# Input Position Y
Pshaker_y=0.0e-03
##-------------------------------------------------------------
# ACCELEROMETER POSITION
##-------------------------------------------------------------
# Input Position X
Paccel_x=250e-03
# Input Position Y
Paccel_y=0.0e-03
#-----------------------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
# PATCH PIEZO - SOLID
##-----------------------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
# Largura Patch Piezo [m]
```

```
Wtp = 25.4E-3
Wp = Wtp/2.0
# Comprimento Patch Piezo [m]
Ltp = 50.8E-3
Lp = Ltp/2.0
# Espessura Patch Piezo [m]
Etp = 0.508E-03
Ep = Etp/2.0
# Distancia centro da COLAGEM ate centro piezo local d1 (m)
d1 = ((Lutil+Lcola+Leng)/2.0)-(Lcola/2.0)
d2 = d1
# Partition
P11 = d1+Lp
P21 = d1-Lp
# Distancia centro da chapa ate centro piezo local d2 (m)
P12 = d1+Lp
P22 = d1-Lp
# Posicionamento do Piezo
Xpiezo = 50.8E-3
#-------------------------------------------------------------
#--------------1.0 CHECKINGS-----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
Var1=0.0
Var2=BOTTOM
if Pshaker_y > 0.0:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0+Pshaker_y
Var2= (W+Pshaker_y)/2.0-W
Var3=TOP
else:
Var1= (W-Pshaker_y)/2.0
Var2= Pshaker_y-(W+Pshaker_y)/2.0
Var3=BOTTOM
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 2 - GEOMETRY ----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
##Create the Sketch for Titanium Strip
# BONDED AREA
s1= Model.ConstrainedSketch(name='Lcol_T',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s1.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(-Lcola, W))
p1 = Model.Part(name='TITANIO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p1 = Model.parts['TITANIO']
f, v, e, d = p1.faces, p1.vertices, p1.edges, p1.datums
p1.BaseShell(sketch=s1)
##AREA UTIL
#A
```

```
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s2 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_a', sheetSize=0.113, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s2.geometry, s2.vertices, s2.dimensions, s2.constraints
s2.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s2.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s2, filter=COPLANAR_EDGES)
s2.rectangle(point1=(-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s2)
#B
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s3 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_b', sheetSize=0.4, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s3.geometry, s3.vertices, s3.dimensions, s3.constraints
s3.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s3.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s3, filter=COPLANAR_EDGES)
s3.rectangle(point1=(-Lutil-Lcola, W), point2=(-Pshaker_x,Pshaker_y))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s3)
#C
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[1],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s4 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_c', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s4.geometry, s4.vertices, s4.dimensions, s4.constraints
s4.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s4.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s4.rectangle(point1=(-Pshaker_x, Pshaker_y), point2=(-Lutil-Lcola, -W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s4)
# AREA ENGASTADA
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s5 = Model.ConstrainedSketch(name='Leng_T', sheetSize=0.5, gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s5.geometry, s5.vertices, s5.dimensions, s5.constraints
s5.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s5.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
```

```
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s5, filter=COPLANAR_EDGES)
s5.rectangle(point1=(-Lcola-Lutil, -W), point2=(-Lcola-Lutil-Leng, W))
p1.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[1],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s5)
s5.unsetPrimaryObject()
## DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : TITATINUM STRIP
# DESIGNATING CELLS
# At AREA A
Ptxa=-(Lcola+((Pshaker_x)-(Lcola))/2.0)
# At AREA B
Ptxb=-((Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyb=Var1
# At AREA C
Ptxc=(-(Lcola+Lutil-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x
Ptyc= Var2
# REGION DEFINITION
CT = p1.faces.findAt(((Ptxc,Ptyc, 0.0),),((-(Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxa, 0.0, 0.0),),((-
Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),((Ptxb,Ptyb, 0.0),),) #MATERIAL
regionT = regionToolset.Region(faces = CT)
##############################################################################
###################
#####################################
##Create the Sketch for Carbono Strip
# AREA ENGASTE
s6= Model.ConstrainedSketch(name='Leng_C',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s6.geometry, s6.vertices, s6.dimensions, s6.constraints
s6.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s6.rectangle(point1=(-0.0, -W), point2=(Leng, W))
p2 = Model.Part(name='CARBONO',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p2 = Model.parts['CARBONO']
f, v, e, d = p2.faces, p2.vertices, p2.edges, p2.datums
p2.BaseShell(sketch=s6)
#AREA UTIL
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3],
sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s7 = Model.ConstrainedSketch(name='Lutil_C', sheetSize=0.094, gridSpacing=0.002,
transform=t)
g, v, d, c = s7.geometry, s7.vertices, s7.dimensions, s7.constraints
s7.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s7.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s7, filter=COPLANAR_EDGES)
s7.rectangle(point1=(Leng, -W), point2=(Leng+Lutil, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[3], sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s7)
# AREA COLADA
```

```
t = p2.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0],
sketchUpEdge=e[2],sketchPlaneSide=SIDE1,
sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s8 = Model.ConstrainedSketch(name='Lcola_C', sheetSize=0.48,gridSpacing=0.01,
transform=t)
g, v, d, c = s8.geometry, s8.vertices, s8.dimensions, s8.constraints
s8.sketchOptions.setValues(decimalPlaces=3)
s8.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p2.projectReferencesOntoSketch(sketch=s8, filter=COPLANAR_EDGES)
s8.rectangle(point1=(Leng+Lutil, -W), point2=(Leng+Lutil+Lcola, W))
p2.Shell(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[2],
sketchPlaneSide=SIDE1,sketchOrientation=RIGHT,
sketch=s8)
# DEFINING REGION FOR SECTION ASSIGNEMENT : CARBON STRIP
# REGION DEFINITION
CC = p2.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),((Leng+(Lutil/2.0), 0.0, 0.0),),((Leng+Lutil+(
Lcola/2.0), 0.0, 0.0),),)
regionC = regionToolset.Region(faces = CC)
##############################################################################
##################
##################################
##Create the Sketch for TABS
##TAB00
s11= Model.ConstrainedSketch(name='TAB00',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s11.geometry, s11.vertices, s11.dimensions, s11.constraints
s11.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s11.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p3 = Model.Part(name='TAB00', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p3 = Model.parts['TAB00']
f, v, e, d = p3.faces, p3.vertices, p3.edges, p3.datums
p3.BaseShell(sketch=s11)
# REGION DEFINITION
TAB00 = p3.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB00 = regionToolset.Region(faces = TAB00)
p3.Surface(side1Faces = TAB00, name='TAB00_BOND')
##TAB01
s12= Model.ConstrainedSketch(name='TAB01',sheetSize=100.0)
g, v, d, c = s12.geometry, s12.vertices, s12.dimensions, s12.constraints
s12.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s12.rectangle(point1=(0.0,-W), point2=(Leng, W))
p4 = Model.Part(name='TAB01', dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)
p4 = Model.parts['TAB01']
f, v, e, d = p4.faces, p4.vertices, p4.edges, p4.datums
p4.BaseShell(sketch=s12)
# REGION DEFINITION
TAB01 = p4.faces.findAt(((Leng/2.0, 0.0, 0.0),),)
regionTAB01= regionToolset.Region(faces = TAB01)
p4.Surface(side1Faces = TAB01, name='TAB01_BOND')
##############################################################################
##################
```

```
#####################################
##Create the Sketch for the base feature
S2 = Model.ConstrainedSketch(name='PlacaPiezo', sheetSize=0.1)
g, v, d, c = S2.geometry, S2.vertices, S2.dimensions, S2.constraints
S2.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
# MODELAGEM CDP
# Create the CDP with a square in the center
S2.rectangle(point1=(-Lp, -Wp), point2=(Lp, Wp)) # Piezo
# Create a three-dimensional, deformable part
CDPPiezo1 = Model.Part(name='PIEZO', dimensionality=THREE_D,
type=DEFORMABLE_BODY)
# Create the part's base feature by extruding the sketch through a distance of 'e'
CDPPiezo1.BaseSolidExtrude(sketch = S2, depth = Etp)
S2.unsetPrimaryObject()
# Region External
pp = Model.parts['PIEZO']
f, v, e, c = pp.faces, pp.vertices, pp.edges, pp.cells
cpiezo1 = pp.cells.findAt(((0.0, 0.0, Ep),),)
regionP1 = regionToolset.Region(cells=cpiezo1)
##-------------------------------------------------------------
# SYSTEM OF COORDINATED
##-------------------------------------------------------------
# Create a System Global
p1.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_STRIP', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(-Lcola-
Lutil-Leng, 0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p2.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_LAMINADO',
coordSysType=CARTESIAN, origin=(0.0,
0.0, 0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p3.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
p4.DatumCsysByThreePoints(name='System Global_TAB', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0,
0.0), point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(1.0, 1.0, 0.0))
pp.DatumCsysByThreePoints(name='System Piezo Local', coordSysType=CARTESIAN,
origin=(0.0, 0.0
, 0.0), point1=(0.0, 1.0, 0.0), point2=(0.0, 1.0, 1.0))
##-------------------------------------------------------------
# ASSIGN MATERIAL ORIENTATION - PIEZO
##-------------------------------------------------------------
orientation = pp.datums[2]
pp.MaterialOrientation(region=regionP1, orientationType=SYSTEM, axis=AXIS_3,
localCsys=
orientation, fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_NONE,
angle=0.0, additionalRotationField='', stackDirection=STACK_3)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 3 - MATERIALS AND ELEMENTS --------------------
#-------------------------------------------------------------
```

```
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
# ISOTROPIC MATERIAL - CREATING MATERIAL
Model.Material(name='Ti6Al4V')
# MECHANICAL PROPERTIES ASSIGNEMENT
TiE=110.3e09
Tipoisson=0.310
# VALUES ASSIGNEMENT
Model.materials['Ti6Al4V'].Elastic(table=((TiE, Tipoisson), ))
Model.materials['Ti6Al4V'].Density(table=((Dens_Ti, ), ))
## SECTION ASSIGNEMENT
# CREATING NEW SECTION : LAMINA DE TITANIO
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio', preIntegrate=OFF,
material='Ti6Al4V',
thicknessType=UNIFORM, thickness=Tti, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
Model.HomogeneousShellSection(name='Lamina de Titanio_TAB', preIntegrate=OFF,
material=
'Ti6Al4V', thicknessType=UNIFORM, thickness=Tcf, thicknessField='',
idealization=NO_IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
integrationRule=SIMPSON,
numIntPts=5)
# SECTION AND PART
p1.SectionAssignment(region=regionT, sectionName='Lamina de Titanio',
offset=0.0,offsetType=
BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
#-----------------------------------------------------------
# ORTHOTROPIC MATERIAL
Model.Material(name='M20-G0904')
# MECHANICAL PROPERTIES
CE1=41.413E09
CE2=39.152E09
CE3=8.93E09
Cn12=0.107
Cn13=0.5
Cn23=0.5
CG12=2.812E09
CG13=2.812E09
CG23=2.812E09
# VALUES AND PAREMETERS
Model.materials['M20-G0904'].Elastic(type=ENGINEERING_CONSTANTS, table=((CE1,
CE2, CE3, Cn12,
Cn13, Cn23, CG12, CG13, CG23),))
Model.materials['M20-G0904'].Density(table=((Dens_Carb, ), ))
##SECTION
# CREATE SECTION: LAMINADO
```

```
layupOrientation = p2.datums[4]
plySystem1 = p2.datums[4]
compositeLayup = p2.CompositeLayup(name='LAMINADO', description='LAMINADO DE
CARBONO',
elementType=SHELL, offsetType=BOTTOM_SURFACE, symmetric=False,
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# COORDINATE SYSTEM
compositeLayup.ReferenceOrientation(orientationType=SYSTEM,
localCsys=layupOrientation,
fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_NONE, angle=0.0,
additionalRotationField='', axis=AXIS_3, stackDirection=
STACK_3)
# Ply No.1
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-1', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS, thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.2
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-2', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.3
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-3', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.4
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-4', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.5
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-5', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
```

```
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.6
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-6', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.7
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-7', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=(Tcf/7.0),
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# TAB MATERIAL ASSIGNMENT
# TAB00
p3.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio', offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# TAB01
p4.SectionAssignment(region=regionTAB00, sectionName='Lamina de Titanio_TAB',
offset=0.0,
offsetType=BOTTOM_SURFACE, offsetField='',thicknessAssignment=FROM_SECTION)
layupOrientation = p4.datums[3]
plySystem1 = p4.datums[3]
compositeLayup = p4.CompositeLayup(name='LAMINADO', description='LAMINADO DE
CARBONO',
elementType=SHELL, offsetType=BOTTOM_SURFACE, symmetric=False,
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
# COORDINATE SYSTEM
compositeLayup.ReferenceOrientation(orientationType=SYSTEM,
localCsys=layupOrientation,
fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_NONE, angle=0.0,
additionalRotationField='', axis=AXIS_3, stackDirection=
STACK_3)
# Ply No.1
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-1', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS, thickness=2.429e-04,
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.2
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-2', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=2.429e-04,
```

```
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.3
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-3', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=2.429e-04,
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.4
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-4', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=2.429e-04,
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.5
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-5', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=2.429e-04,
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.6
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-6', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=2.429e-04,
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
# Ply No.7
compositeLayup.CompositePly(suppressed=False, plyName='Camada-7', region=regionC,
material=
'M20-G0904', thicknessType=SPECIFY_THICKNESS,thickness=2.429e-04,
orientationType=CSYS, orientation=plySystem1, axis=AXIS_3, angle=
0.0, additionalRotationField='', additionalRotationType=
ROTATION_NONE,
numIntPoints=3)
#-------------------------------------------------------------
# FIBRE PIEZOELETRIC MATRIX |E| (orthotropic) [C/m^2]
Model.Material(name='PIEZO')
# fibre density material [kg,m^3]
Model.materials['PIEZO'].Density(table=((7400.0,), ))
# fibre stiffness matrix (orthotropic) [Pa]
```

```
Model.materials['PIEZO'].Elastic(type=ORTHOTROPIC, table=((81.73E9, 5.23E9, 81.73E9,
50.06E9,
50.06E9, 46.35E9, 5.63E9, 5.91E9, 5.91E9), ))
# fibre dielectric matrix (orthotropic) [F/m]
Model.materials['PIEZO'].Dielectric(type=ORTHOTROPIC, table=((6.89E-9, 6.89E-9,
5.73E-9), ))
# fibre piezoelectric matrix |e| (orthotropic) [C/m^2]
Model.materials['PIEZO'].Piezoelectric(type=STRESS, table=((0, 0, 0, 0, -5.24, 0, 0, 0, 0, 0,
0, -5.24, 1.13, 1.13, 12.85, 0, 0, 0), ))
# Create the section
Model.HomogeneousSolidSection(name='SolidPiezo', material='PIEZO',)
# Assign the above section to the part PIEZO LOCAL
pp.SectionAssignment(region = regionP1, sectionName='SolidPiezo', offset=0.0, offsetType=
MIDDLE_SURFACE, offsetField='')
## PIEZO
# SEED THE PART
# WIDTH
pickedEdges = pp.edges.findAt(((-Lp, 0.0, 0.0),), ((Lp, 0.0, 0.0),), ((-Lp, 0.0, Etp),), ((Lp
, 0.0, Etp),),)
pp.seedEdgeByNumber(edges = pickedEdges, number = 4, constraint=FIXED)
# LENGTH
pickedEdges = pp.edges.findAt(((0.0, -Wp, 0.0),), ((0.0, Wp, 0.0),), ((0.0, -Wp, Etp),), ((
0.0, Wp, Etp),),)
pp.seedEdgeByNumber(edges = pickedEdges, number = 8, constraint=FIXED)
# THICKNESS
pickedEdges = pp.edges.findAt(((-Lp, -Wp, Ep),), ((-Lp, Wp, Ep),), ((Lp, -Wp, Ep),), ((Lp,
Wp
, Ep),),)
pp.seedEdgeByNumber(edges = pickedEdges, number = 3, constraint=FIXED)
# MESHING CONTROLS
pickedRegions = pp.cells.findAt(((0.0, 0.0, Ep),),)
pp.setMeshControls(regions=pickedRegions, technique=STRUCTURED)
# SET THE ELEMENT
elemType2 = mesh.ElemType(elemCode=C3D8E, elemLibrary=STANDARD)
cells1 = pp.cells.findAt(((0.0, 0.0, Ep),),)
pickedRegions =(cells1, )
pp.setElementType(regions=pickedRegions, elemTypes=(elemType2,
elemType2,elemType2))
pp.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
#-----------------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------------
#---------- 4 - ASSEMBLY ----------------------------------
#-----------------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------------
# Create assembly 1
a = Model.rootAssembly
a.Instance(name='CARBONO-1', part=p2, dependent=ON)
a.Instance(name='TITANIO-1', part=p1, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB00_00', part=p3, dependent=ON)
a.Instance(name='TAB01_01', part=p4, dependent=ON)
```

```
a.Instance(name='PIEZO-1', part=pp, dependent=ON)
# SETTING THE PARTS
a.rotate(instanceList=('CARBONO-1', ), axisPoint=(0.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -W,
0.0),
angle=180.0)
a.translate(instanceList=('TITANIO-1', ), vector=(-(Lutil+Leng), 0.0, 0.0))
a.translate(instanceList=('TAB00_00', ), vector=(-Leng, 0.0, 0.0))
a.rotate(instanceList=('TAB01_01', ), axisPoint=(Leng/2.0, W, 0.0), axisDirection=(0.0, -2.0*
W, 0.0), angle=180.0)
a.translate(instanceList=('TAB01_01', ), vector=(2*(-Leng-Lutil)-Lcola, 0.0, 0.0))
# Translate Global and Local piezos
a.translate(instanceList=('PIEZO-1', ), vector=(-(2*Lutil+Leng+Lcola-Xpiezo), 0.0, 0.0))
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 5 - STEP -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create a step. The time period of the static step is 1.0, and the initial incrementation
is 0.1; the step is created
# after the initial step.
Model.ImplicitDynamicsStep(name='Dynamic', previous='Initial', maxNumInc=4097,
timeIncrementationMethod=FIXED, timePeriod=0.5, initialInc=1.221e-04, nohaf=OFF,
noStop=OFF)
Model.steps['Dynamic'].setValues(noStop=ON)
#-------------------------------------------------------------
#---------- 6 - SETS -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# TITANIUM STRIP
##-----------------------------------------------------------
# SET EDGES
Encastre_Titanio = p1.edges.findAt(((-(Lutil+Lcola)+(-Leng/2.0), -W, 0.0),),((-(Lutil+Lcola
)+(-Leng/2.0), W, 0.0),),)
p1.Set(edges=Encastre_Titanio, name='ENCASTRE TITANIO')
# PARTITION
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola+Lutil), W, 0.0), point2=(-(Lcola+Lutil), -W,
0.0), faces=CT) # ENCASTRE
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lcola), W, 0.0), point2=(-(Lcola), -W, 0.0), faces=
CT)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(-(Lfalha), W, 0.0), point2=(-(Lfalha), -W, 0.0), faces
=CT) # JOINT BONDED AREA
BT = p1.faces.findAt(((-(Lfalha/2.0), 0.0, 0.0),),)
p1.Surface(side1Faces = BT, name='TI_BOND')
region7=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND']
CT = p1.faces.findAt((((-3.0*Lfalha/2.0), 0.0, 0.0),),) # JOINT CONTACT AREA
p1.Surface(side1Faces = CT, name='TI_CONTACT')
region7=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_CONTACT']
BT01=p1.faces.findAt(((-Lcola-Lutil-(Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p1.Surface(side1Faces = BT01, name='TI_TAB')
region11=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
```

```
CT2 = p1.faces.findAt(((-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),) #SHAKER LOAD INSERTION PONT
regionT2 = regionToolset.Region(faces = CT2)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Pshaker_x), W, 0.0), point2=((-Pshaker_x), -W,
0.0),
faces=CT2)
CT3 = p1.faces.findAt((((-(Lutil+Lcola-Pshaker_x)/2.0)-Pshaker_x,W/2.0, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(faces = CT3)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Lutil-Lcola), Pshaker_y, 0.0), point2=((-
Pshaker_x),
Pshaker_y, 0.0), faces=CT3)
verts_00 = p1.vertices.findAt(((-Pshaker_x, Pshaker_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_00, name='Shaker')
CT4 = p1.faces.findAt(((-Paccel_x,W/2.0, 0.0),),) #ACCELEROMETER INSERTION PONT
regionT4 = regionToolset.Region(faces = CT4)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=((-Paccel_x), W, 0.0), point2=((-Paccel_x), -W, 0.0),
faces=CT4)
CT5 = p1.faces.findAt((((-Paccel_x),W/2.0, 0.0),),)
regionT5 = regionToolset.Region(faces = CT5)
p1.PartitionFaceByShortestPath(point1=(0.0, Paccel_y, 0.0), point2=((-Paccel_x), Paccel_y,
0.0), faces=CT5)
verts_01 = p1.vertices.findAt(((-Paccel_x, Paccel_y, 0.0), ), )
p1.Set(vertices=verts_01, name='Accelerometer')
Cola_Piezo = p1.faces.findAt(((Xpiezo-(Lcola+Lutil), W, 0.0),(Xpiezo-(Lcola+Lutil), -W,
0.0
),),) # PIEZO BONDING SURFACE
p1.Surface(side1Faces = Cola_Piezo, name='TiePiezo1')
region70=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TiePiezo1']
#-------------------------------------------------------------
# CARBONO STRIP
##-------------------------------------------------------------
## SET EDGES
Encastre_Carbono = p2.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p2.Set(edges=Encastre_Carbono, name='ENCASTRE CARBONO')
# PARTITION
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng, W, 0.0), point2=(Leng, -W, 0.0), faces=CC)
# ENCASTRE AREA
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng+Lutil, W, 0.0), point2=(Leng+Lutil, -W, 0.0),
faces=CC) # BONDED AREA
p2.PartitionFaceByShortestPath(point1=(Leng+Lutil+(Lfalha), W, 0.0),
point2=(Leng+Lutil+(
Lfalha), -W, 0.0), faces=CC)
BC = p2.faces.findAt(((Leng+Lutil+(Lfalha/2.0), 0.0, 0.0),),) # JOINT BONDED AREA
p2.Surface(side1Faces = BC, name='CA_BOND')
region8=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
CC = p2.faces.findAt((((Leng+Lutil+(3.0*Lfalha/2.0)), 0.0, 0.0),),) # JOINT CONTACT
AREA
p2.Surface(side1Faces = CC, name='CA_CONTACT')
region80=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_CONTACT']
BC01=p2.faces.findAt((((Leng/2.0), 0.0, 0.0),),) #TAB BONDED AREA
p2.Surface(side1Faces = BC01, name='CARB_TAB')
```

```
region12=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
#-----------------------------------------------------------
# TAB STRIP
##----------------------------------------------------------
## SET EDGES
Encastre_TAB00 = p3.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p3.Set(edges=Encastre_TAB00, name='ENCASTRE TAB00')
Encastre_TAB01 = p4.edges.findAt(((Leng/2.0, -W, 0.0),),((Leng/2.0, W, 0.0),),)
p4.Set(edges=Encastre_TAB01, name='ENCASTRE TAB01')
#-----------------------------------------------------------
#---------- 7 - MESH -------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
#-----------------------------------------------------------
## TITANIUM PLATE
# SEED THE PART
p1.seedPart(size=0.003)
# MESHING CONTROLS
p1.setMeshControls(regions=CT, technique=SWEEP)
# SET THE ELEMENT
elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=S8R, elemLibrary=STANDARD)
p1.setElementType(regions=regionT, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p1.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
## CARBONO PLATE
# SEED THE PART
p2.seedPart(size=0.003)
# MESHING CONTROLS
p2.setMeshControls(regions=CC, technique=SWEEP, elemShape=QUAD)
p2.setSweepPath(region=f[0], edge=e[1], sense=FORWARD)
# SET THE ELEMENT
p2.setElementType(regions=regionC, elemTypes=(elemType1, elemType1,elemType1))
p2.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
## TAB
# SEED THE PART
p3.seedPart(size=0.006)
p4.seedPart(size=0.006)
# MESHING CONTROLS
p3.setMeshControls(regions=TAB00, technique=STRUCTURED)
p4.setMeshControls(regions=TAB01, technique=STRUCTURED)
# SET THE ELEMENT
p3.setElementType(regions=regionTAB00, elemTypes=(elemType1,
elemType1,elemType1))
p4.setElementType(regions=regionTAB01, elemTypes=(elemType1,
elemType1,elemType1))
p3.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
p4.generateMesh(seedConstraintOverride = ON)
##----------------------------------------------------------
# PIEZO
##----------------------------------------------------------
# Create a set for the faces of the Piezo
# Face Tie Chapa
```

```
faces8 = pp.faces.findAt(((0.0, 0.0, 0.0),),) # Face Zpp.
Set(faces=faces8, name='PiZ-')
pp.Surface(side1Faces = faces8, name='PiZ-')
faces9 = pp.faces.findAt(((0.0, 0.0, Etp),),) # Face Z+ : BONDING
SURFACE AND EQUIPOTENCIAL ASSIGNMENT
pp.Set(faces=faces9, name='PiZ+')
pp.Surface(side1Faces = faces9, name='PiZ+')
# PIEZO ASSIGNING SURFACES
##-------------------------------------------------------------
tol = 1e-5
# PATCH PIEZO LOCAL
x_pos_piezo = Lp
x_neg_piezo = -Lp
y_pos_piezo = Wp
y_neg_piezo = -Wp
z_pos_piezo = Etp
z_neg_piezo = 0.0
nodes_z_neg_piezo = []
nodes_z_pos_piezo = []
# Separa o no da face do piezo
for i in pp.nodes:
# face y_neg_piezo
if (abs(i.coordinates[2] - z_neg_piezo) < tol and i.coordinates[0] > (x_neg_piezo - tol)
and i.coordinates[0] > (x_pos_piezo - tol) and i.coordinates[1] > (y_neg_piezo - tol) and
i.coordinates[1] > (y_pos_piezo - tol)):
nodes_z_neg_piezo.append(i)
# face y_pos_piezo
if (abs(i.coordinates[2] - z_pos_piezo) < tol and i.coordinates[0] > (x_neg_piezo- tol)
and i.coordinates[0] > (x_pos_piezo - tol) and i.coordinates[1] > (y_neg_piezo - tol) and
i.coordinates[1] > (y_pos_piezo - tol)):
nodes_z_pos_piezo.append(i)
# Cria um set para o no da face Z Positiva Piezo
labels1 = []
for i in nodes_z_pos_piezo:
labels1.append(i.label)
pp.SetFromNodeLabels(name='MVOLT-TOP', nodeLabels=labels1)
# Cria um set para os nos da face Z Negativa Piezo
labels2 = []
for i in nodes_z_neg_piezo:
labels2.append(i.label)
pp.SetFromNodeLabels(name='MVOLT-BOT', nodeLabels=labels2)
nodes_z_neg_piezo1 = []
nodes_z_pos_piezo1 = []
# Separa os nos da face do piezo
for i in pp.nodes:
# face y_neg_piezo
if ((abs(i.coordinates[2] - z_neg_piezo) < tol)):
nodes_z_neg_piezo1.append(i)
# face y_pos_piezo
if ((abs(i.coordinates[2] - z_pos_piezo) < tol)):
```

```
nodes_z_pos_piezo1.append(i)
# Cria um set para os nos da face Z Positiva Piezo
labels3 = []
for i in nodes_z_pos_piezo1:
labels3.append(i.label)
saux = map(str, labels1)
saux = ''.join(saux)
iaux = int(saux)
labels33 = []
for i in labels3:
if i != iaux:
labels33.append(i)
pp.SetFromNodeLabels(name='VOLT-TOP', nodeLabels=labels33)
# Cria um set para os nos da face Z Negativa Piezo
labels4 = []
for i in nodes_z_neg_piezo1:
labels4.append(i.label)
saux = map(str, labels2)
saux = ''.join(saux)
iaux = int(saux)
labels44 = []
for i in labels4:
if i != iaux:
labels44.append(i)
pp.SetFromNodeLabels(name='VOLT-BOT', nodeLabels=labels44)
# EQUIPOTENTIAL ASSIGNMENT
##-------------------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
# PIEZO 1
# Aplica Equipotencial na face Z- Piezo
Model.Equation(name='EQ1', terms=((1.0, 'PIEZO-1.VOLT-BOT', 9), (-1.0, 'PIEZO-
1.MVOLT-BOT', 9
)))
# Aplica Equipotencial na face Z+ Piezo
Model.Equation(name='EQ2', terms=((1.0, 'PIEZO-1.VOLT-TOP', 9), (-1.0, 'PIEZO-
1.MVOLT-TOP', 9
)))
# CONSTRAINING BOTH PLATES
##-------------------------------------------------------------
region9=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_BOND']
region10=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_BOND'] # JOINT BONDED AREA
Model.Tie(name='JOINT BOND', master=region9, slave=region10,
positionToleranceMethod=COMPUTED
, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region13=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CARB_TAB']
Model.Tie(name='TAB_BOND_A', master=region13, slave=region14,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
region15=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_TAB']
region16=a.instances['TAB01_01'].surfaces['TAB01_BOND'] # TAB_Ti BONDED AREA
```

```
Model.Tie(name='TAB_BOND_B', master=region15, slave=region16,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
# PIEZO BONDING
region3= a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TiePiezo1']
region4= a.instances['PIEZO-1'].surfaces['PiZ+']
Model.Tie(name='PIEZO_BONDING', master=region3, slave=region4,
positionToleranceMethod=
COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 8 - BOUNDARY CONDITIONS AND ----------
#---------- LOADING -----------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create loads and boundary conditions BC's
# SETTING ZERO DISPLACEMENT ZONES
region_Carb = a.instances['CARBONO-1'].sets['ENCASTRE CARBONO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Carb00',
createStepName='Initial',region=region_Carb, u1=0.0
, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0,amplitude=UNSET, fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Ti = a.instances['TITANIO-1'].sets['ENCASTRE TITANIO']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-Ti00', createStepName='Initial', region=region_Ti,
u1=0.0,
u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab00 = a.instances['TAB00_00'].sets['ENCASTRE TAB00']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB00', createStepName='Initial',
region=region_Tab00, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
region_Tab01= a.instances['TAB01_01'].sets['ENCASTRE TAB01']
Model.DisplacementBC(name='FIXED-TAB01', createStepName='Initial',
region=region_Tab01, u1=
0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET,fixed=OFF,
distributionType=UNIFORM, fieldName='',localCsys=None)
# CREATING LOAD AMPLITUDE
Model.PeriodicAmplitude(name='Amp-1', timeSpan=STEP, frequency=18849.02, start=0.0,
a_0=0.0,
data=((0.0, 1.0), ))
Model.SmoothStepAmplitude(name='Amp-2', timeSpan=TOTAL, data=((0.0, 0.0), (1.221e-
05, 0.0001
), (4.884e-05, 0.0)))
# SHAKER POSITIONING at FREQUENCY RANGE
##-----------------------------------------------------------
v1 = a.instances['TITANIO-1'].vertices
verts1 = v1.findAt(((-Pshaker_x-Leng-Lutil, Pshaker_y, 0.0),),)
regionT3 = regionToolset.Region(vertices=verts1)
```

```
Model.ConcentratedForce(name='Load-1', createStepName='Dynamic', region=regionT3,
cf3=1.0,
distributionType=UNIFORM, field='',localCsys=None, amplitude='Amp-2')
# SETTING EP = 0 ON Y- PIEZO
region = a.instances['PIEZO-1'].sets['MVOLT-BOT']
Model.ElectricPotentialBC(name='V0-P1', createStepName='Initial', region=region,
distributionType=UNIFORM, fieldName='', magnitude=0.0)
# SURFACE INTERACTION
##-------------------------------------------------------------
Model.ContactProperty('IntProp-1')
Model.interactionProperties['IntProp-1'].TangentialBehavior(formulation=FRICTIONLESS)
Model.interactionProperties['IntProp-1'].NormalBehavior(pressureOverclosure=HARD,
allowSeparation=ON, constraintEnforcementMethod=DEFAULT)
region1=a.instances['CARBONO-1'].surfaces['CA_CONTACT']
region2=a.instances['TITANIO-1'].surfaces['TI_CONTACT']
Model.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Int-1', createStepName='Dynamic',
master=region1,
slave=region2, sliding=FINITE, thickness=ON, interactionProperty='IntProp-1',
adjustMethod=NONE, initialClearance=OMIT, datumAxis=None,
clearanceRegion=None)
Model.interactions['Int-1'].setValues(initialClearance=OMIT, adjustMethod=TOLERANCE,
sliding=
FINITE, enforcement=SURFACE_TO_SURFACE, thickness=ON,
contactTracking=TWO_CONFIG, tied=OFF, adjustTolerance=0.0001,
bondingSet=None)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 9 - OUTPUT PARAMETERS -------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Field Output Request
# Frequency Range
Model.FieldOutputRequest(name='F-Output-1', createStepName='Dynamic', variables=('U',
'UT',
'V', 'VT', 'VR', 'A', 'AT', 'AR', 'RBANG', 'RBROT', 'CFORCE', 'CSTRESS'),
frequency=1)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Shaker']
Model.HistoryOutputRequest(name='Input', createStepName='Dynamic', variables=('A3',),
frequency=1, region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
regionDef=Model.rootAssembly.instances['TITANIO-1'].sets['Accelerometer']
Model.HistoryOutputRequest(name='OutPut', createStepName='Dynamic', variables=('A3',),
frequency=1, region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#---------- 10 - JOB -------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------
# Create an analysis job for the model and submit it.
mdb.Job(name='JCS_30_Dynamic_Damaged_Patched', model='SLJ', description='',
type=ANALYSIS,
```

```
atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,
memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True, explicitPrecision=SINGLE,
nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='', scratch='',
parallelizationMethodExplicit=DOMAIN,
multiprocessingMode=DEFAULT, numDomains=1, numCpus=1)
```