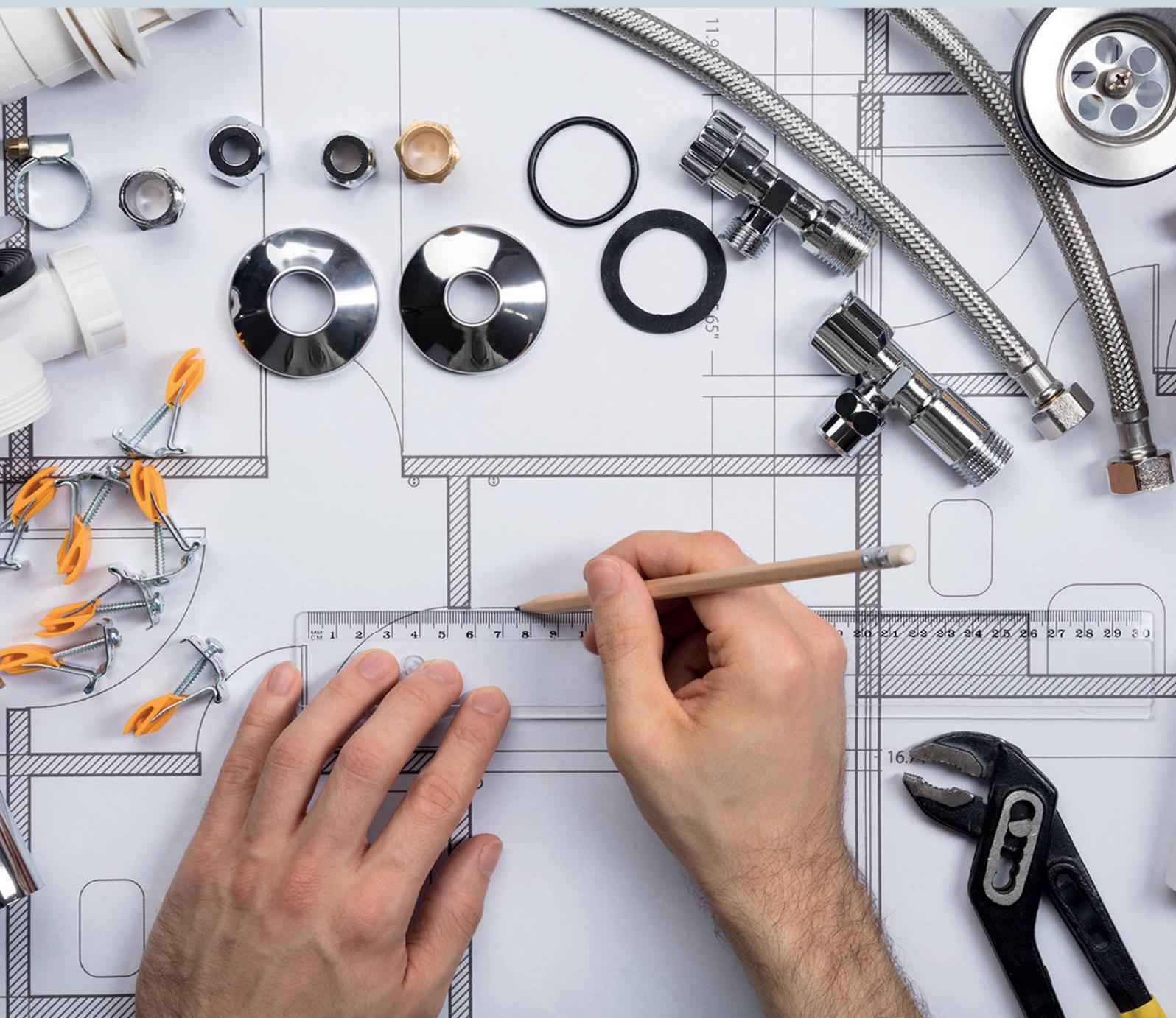


Ciência e Engenharia de Materiais

2

Marcia Regina Werner Schneider Abdala
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

MARCIA REGINA WERNER SCHNEIDER ABDALA

(Organizadora)

Ciência e Engenharia de Materiais

2

Atena Editora
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C569 Ciência e engenharia de materiais 2 [recurso eletrônico] / Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Ciência e Engenharia de Materiais; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-85107-63-5

DOI 10.22533/at.ed.635183010

1. Engenharia. 2. Materiais I. Abdala, Marcia Regina Werner Schneider. II. Série.

CDD 620.11

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Você já percebeu a importância dos materiais na sua vida diária? Os materiais estão provavelmente mais imersos na nossa cultura do que a maioria de nós imagina. Diferentes segmentos como habitação, saúde, transportes, segurança, informação/comunicação, vestuário, entre outros, são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

De fato a utilização dos materiais sempre foi tão importante que os períodos antigos eram denominados de acordo com os materiais utilizados pela sociedade primitiva, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, etc.

A humanidade está em constante evolução, e os materiais não são exceções. Com o avanço da ciência e da tecnologia a cada dia surgem novos materiais com características específicas que permitem aplicações pormenorizadas e inovação nas mais diferentes áreas.

Todos os dias centenas de pesquisadores estão atentos ao desenvolvimento de novos materiais e ao aprimoramento dos existentes de forma a integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras.

Estamos entrando em uma nova era caracterizada por novos materiais que podem tornar o futuro mais fácil, seguro e sustentável. O campo da Ciência e Engenharia de Materiais aplicada está seguindo por novos caminhos. A iminente escassez de recursos está exigindo inovações e ideias criativas.

Nesse sentido, este livro evidencia a importância da Ciência e Engenharia de Materiais, apresentando uma coletânea de trabalhos, composta por quatro volumes, que permitem conhecer mais profundamente os diferentes materiais, mediante um exame das relações entre a sua estrutura, as suas propriedades e o seu processamento.

Considerando que a utilização de materiais e os projetos de engenharia mudam continuamente e que o ritmo desta mudança se acelera, não há como prever os avanços de longo prazo nesta área. A busca por novos materiais prossegue continuamente...

Boa leitura!

Marcia Regina Werner Schneider Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CARBETO DE VANÁDIO NA MOAGEM E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 52100, PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ	
<i>Leandra Fernandes de Oliveira</i>	
<i>Bruna Horta Bastos Kuffner</i>	
<i>Daniela Sachs</i>	
<i>Gilbert Silva</i>	
<i>Geovani Rodrigues</i>	
CAPÍTULO 2	12
INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM INNERSHIELD NAS CARACTERÍSTICAS DA SOLDA DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM – A36	
<i>Waldemir dos Passos Martins</i>	
<i>Paulo Victor Cunha Caetano</i>	
<i>Valdemar Silva Leal</i>	
<i>Valter Alves de Meneses</i>	
CAPÍTULO 3	25
CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO AÇO INOXIDÁVEL 17-4 PH NITRETADO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	
<i>Ane Caroline Celestino Silva</i>	
<i>Lucas da Silva Vicente</i>	
<i>Christian Egídio da Silva</i>	
<i>Cristina de Carvalho Ares Elisei</i>	
<i>Cirlene Fourquet Bandeira</i>	
<i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
CAPÍTULO 4	32
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO BAIXO CARBONO APÓS PROCESSO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	
<i>Vanessa Moura de Souza</i>	
<i>Vinicius Martins</i>	
CAPÍTULO 5	43
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS MATRIZES METÁLICAS DO SISTEMA FE-CU-NB OBTIDAS POR Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Marcello Filgueira</i>	
CAPÍTULO 6	58
ESTUDO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA 356.0	
<i>Laura Ferrazza Kirch</i>	
<i>Amanda Yuki Shimosaka</i>	
<i>Dalmarino Setti</i>	
CAPÍTULO 7	65
ESTUDO SOBRE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DAS MATRIZES METÁLICAS DE FE-CU-25%NB E FE-CU-25%CO DURANTE A Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Adriano Corrêa Batista</i>	
<i>Luis Guerra Rosa</i>	
<i>Paulo Santos Assis</i>	

CAPÍTULO 8	84
TRANSIÇÃO OBSERVADA ENTRE OS MODOS DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR “RISCAMENTO” E POR “ROLAMENTO” EM WC-CO P20 E AÇO-FERRAMENTA M2	
<i>Ronaldo Câmara Cozza</i>	
CAPÍTULO 9	92
ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DO AÇO ABNT 1045 APÓS TÊMPERA E REVENIMENTO	
<i>João Paulo Montalvân Shica</i>	
<i>Matheus Henryque Almeida e Silva</i>	
CAPÍTULO 10	105
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE RIGIDEZ SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PLACAS DE ALUMÍNIO	
<i>Pietro Olegário da Silva</i>	
<i>Adriana Amaro Diacenco</i>	
CAPÍTULO 11	118
ANÁLISE DA MICRODUREZA E CORROSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW NA CHAPA DE AÇO DOBRADA TIPO U	
<i>Josemairon Prado Pereira</i>	
<i>Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves</i>	
CAPÍTULO 12	129
ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E EQUAÇÕES DE SOLDAGEM	
<i>Thyálita Coêlho Moreira Mousinho</i>	
<i>Thaís Spíndola Garcêz</i>	
<i>José Francisco dos Reis Sobrinho</i>	
<i>Nelson Guedes de Alcântara</i>	
CAPÍTULO 13	138
MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO ND:YAG EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L	
<i>Dair Ferreira Salgado Junior</i>	
<i>Vicente Afonso Ventrella</i>	
<i>Juno Gallego</i>	
CAPÍTULO 14	153
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LÂMINAS DE SERRA NO CORTE DA MADEIRA COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	
<i>Daniel Villas Bôas</i>	
<i>Elder Jesus Lima Machado</i>	
<i>Vanessa Ferreira Neves</i>	
CAPÍTULO 15	160
O EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE HOMOGENEIZAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO EM DEFORMAÇÃO A FRIO DAS LIGAS TI-35NB E TI-35NB-0,15SI	
<i>Késia Filadélfia Dionizio Silva Ramos</i>	
<i>Helton José Rodrigues Cabral</i>	
<i>Reinan Tiago Fernandes dos Santos</i>	
<i>Wilton Walter Batista</i>	
CAPÍTULO 16	173
LIGA DE MAGNÉSIO AZ91D: AVALIAÇÃO DA BIODEGRABILIDADE E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	
<i>Ronaldo Veronês Nascimento</i>	
<i>Ângela Beatriz Coelho Arnt</i>	
<i>Marcio Roberto da Rocha</i>	
<i>Steferson Luiz Stares</i>	

CAPÍTULO 17	184
INFLUÊNCIA DO PH E DO TEMPO DE IMERSÃO NA SILANIZAÇÃO JUNTO DE TANINOS PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇOS GALVANIZADOS	
<i>Bruno Pienis Garcia</i> <i>Álvaro Meneguzzi</i>	
CAPÍTULO 18	194
A NEW PROCEDURE TO DETERMINE THE PERMITTIVITY OF RADAR ABSORBING MATERIALS	
<i>Tamara Indrusiak Silva</i> <i>Iaci Miranda Pereira</i> <i>Jorge A. Mitrione Souza</i> <i>Marbey Manhães Mosso</i> <i>Ângelo M. Leite Denadai</i> <i>Jéferson Gomes da Silva</i> <i>Alan Reis de Oliveira</i> <i>Bluma Guenther Soares</i>	
CAPÍTULO 19	204
DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO A BASE DE NIÓBIO PARA PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO DE AÇO-CARBONO (SAE 1020)	
<i>Paloma Detlinger</i> <i>Brian Utri</i> <i>Guilherme Arielo Rodrigues Maia</i> <i>Rodrigo Helleis</i> <i>Cynthia Beatriz Fürstenberger</i> <i>Everson do Prado Banczek</i>	
CAPÍTULO 20	213
CORROSÃO E BIOCORROSÃO EM AÇO CARBONO	
<i>Diana Magalhães Frazão</i> <i>Ivanilda Ramos de Melo</i> <i>Severino Leopoldino Urtiga Filho</i>	
SOBRE A ORGANIZADORA	218

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE RIGIDEZ SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PLACAS DE ALUMÍNIO

Pietro Olegário da Silva

Centro Universitário de Itajubá – Fepi
Itajubá – Minas Gerais

Adriana Amaro Diacenco

Centro Universitário de Itajubá – Fepi
Itajubá – Minas Gerais

RESUMO: Este trabalho trata-se da descrição do comportamento mecânico de placas constituídas de alumínio danificadas. Nesse sentido, o dano será definido como uma redução de rigidez, analisando a sua influência nas funções de resposta em frequência. Para tanto, será utilizada a Teoria da deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) combinada com o Método dos Elementos Finitos (MEF) e implementado em ambiente de programação MatLab®, com isto, é possível obter as características de resposta da placa (frequências naturais e funções de resposta em frequência) sem a consideração do dano, isto é, o estado inicial da placa. O estado danificado é obtido efetuando-se uma redução de rigidez em determinados elementos finitos da malha discretizada e, de acordo com isto, será possível analisar as alterações das características de resposta desta placa para diferentes valores da redução da rigidez.

PALAVRAS-CHAVE: perda de rigidez,

frequências naturais, elementos finitos, placas de alumínio.

ABSTRACT: This paper it is about the description of the mechanical behavior of plates made of aluminum damaged. In this sense, the damage will be defined as a reduction of stiffness, analyzing their influence on the frequency response functions. Therefore, will be used the Shear Deformation Theory of the First Order combined with the Finite Element Method and implemented on a programming environment called MatLab®, with this, it is possible to get the response characteristics of the plate (natural frequencies and frequency response functions) without consider the damage, which is the initial state of plate. The damaged state is obtained by performing a reduction of rigidity in certain finite elements of the discretized mesh and, accordingly to this, will be possible to analyze the changes in the response characteristics of the plate for different amounts of reduced stiffness.

KEYWORDS: loss of stiffness, natural frequency, finite element, aluminum plates.

1 | INTRODUÇÃO

Na indústria automobilística, os componentes de alumínio representam, em média, 8,6% do peso total dos veículos. Na indústria aeronáutica, cerca de 70% da estrutura dos aviões é composta de alumínio (VILLALVA BRAGA, 2011).

Hoje, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores de alumínio do mundo. Porém ambos não possuem jazidas de bauxita em seus territórios, sendo dependentes da importação. A terceira maior reserva do minério no mundo, está localizada no Brasil na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné. Além da Amazônia, o alumínio pode ser encontrado do sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas (MG) e Cataguases (MG). A bauxita é o minério mais importante para a produção de alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio (CHIAVERINI, 1986).

O alumínio foi desenvolvido por Heroult, na França, e por Hall, nos EUA, em 1886, desde então, o alumínio está cada vez mais, ganhando aplicações diversas por apresentar características de leveza, trabalhabilidade, elevada resistência mecânica e corrosão. A economia relacionada ao custo de manutenção para a qual o alumínio apresenta, são de grandes vantagens devido a sua grande resistência a corrosão, fazendo deste um material adequado para ambientes corrosivos. Com isto, resulta a importância de ser estudado em termos de análises estáticas e dinâmicas deste material (DIACENCO, 2010).

Estruturas de aviões, como são submetidas a carga variáveis e cíclicas por tempo prolongados, sofrem com problemas de fadiga. Como se sabe, a fratura por fadiga inicia-se na superfície do material sob tensões de tração, portanto, esforços no sentido de minimizar as tensões de tração na superfície são essenciais.

Antigamente não haviam técnicas avançadas para prever o comportamento de um produto, então era usada a técnica de tentativa e erro sendo muito custosa. Hoje em dia com a atenção redobrada na economia, estudasse todos os dias melhores caminhos para a redução de custo. É aí que entra o Método de Elementos Finitos (MEF) como uma ferramenta poderosa, que consegue obter resultados importantes na prevenção de possíveis falhas no comportamento de um produto a ser projetado.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise estrutural foi reconhecido internacionalmente a partir de meados dos anos cinquenta do século XX devido aos trabalhos de um grupo de engenheiros da Boeing liderado pelo professor Ray W. Clough, e do professor John Argyris que atuava no Imperial College em Londres (VAZ, 2011).

A combinação do método de elementos finitos com a teoria analítica, implementada em ambiente de programação MatLab®, dá a possibilidade de obter as características de resposta de uma determinada placa de alumínio (frequências naturais). Existem diversas teorias analíticas utilizadas no estudo de placas e cascas a saber: A Teoria Clássica dos Laminados (CLT), baseia-se nas hipóteses cinemáticas de Kirchhoff

empregadas no estudo de placas e de Kirchhoff-Love utilizadas no estudo de cascas. Outra teoria é a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT), baseia-se nas hipóteses assumidas pela Teoria das Placas de Mindlin-Reissner. E por fim a Teoria da Deformação Cisalhante de Ordem Superior (HSDT), que é uma teoria melhor elaborada já que as teorias CLT e FSDT não são apropriadas para previsão do comportamento estático e dinâmico de estruturas laminadas em determinadas circunstâncias (DIACENCO, 2010).

Um importante tema para a integridade estrutural é a avaliação do dano em estruturas e, nesse sentido, modelos numéricos que modelem o comportamento mecânico do material na presença de alguma alteração na estrutura apresentam bastante significância. Dano pode estar associado a falhas em componentes estruturais que podem surgir ao longo da vida útil da peça e, estão geralmente associados a diversos fatores variando desde alterações dependentes de fatores ambientais a solicitações às quais estão submetidas. O dano pode ser modelado como sendo uma redução de rigidez e, então, pode se comparar os dois estados: o estado inicial (desconsiderando a redução de rigidez) e o estado danificado (considerando a redução de rigidez). Neste trabalho, o dano será modelado como sendo uma variação no módulo de elasticidade o que acarretará uma alteração na matriz de rigidez global.

Será utilizado neste trabalho devido ao baixo custo computacional a teoria FSDT, combinada com o MEF, aplicados em uma placa de alumínio (2024-T3 placas de ligas de alumínio) de utilização aeronáutica e, será verificado a influência da redução da rigidez sobre as funções de resposta em frequência desta placa.

2 | TEORIA FSDT ASSOCIADA AO MEF

A Teoria FSDT pertence a uma classe de teorias denominada Teoria das Camadas Equivalente Única, também chamada de Teoria da Camada Equivalente Simples, as quais são baseadas na técnica de separação de variáveis para descrever o campo de deslocamentos mecânicos, onde o número de graus de liberdade independe do número de camadas da estrutura (REDDY, 1997).

Os campos de deslocamentos da FSDT, proposto por Reddy (1997), é expresso conforme a equação (A):

$$\begin{aligned}u(x,y,z,t) &= u_0(x,y,t) + z\psi_x(x,y,t) \\v(x,y,z,t) &= v_0(x,y,t) + z\psi_y(x,y,t) \\w(x,y,z,t) &= w_0(x,y,t)\end{aligned}\tag{A}$$

sendo ψ_x e ψ_y as rotações dos segmentos normais à superfície de referência em torno dos eixos y e x respectivamente.

A equação (A) pode ser reescrita matricialmente como mostrado na equação (B).

$$u(x,y,z,t) = A(z)u(x,y,t) \quad (B)$$

Na equação (B) pode ser reescrita conforme a equações (Ca, Cb, Cc).

$$U(x, y, z, t) = \left[u \ x, y, z, t \quad v \ x, y, z, t \quad w \ x, y, z, t \right]^T \quad (Ca)$$

$$A(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & z \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (Cb)$$

$$u(x, y, t) = \left[u_0(x, y, t) \ v_0(x, y, t) \ w_0(x, y, t) \ \psi_x(x, y, t) \ \psi_y(x, y, t) \right]^T \quad (Cc)$$

Da Teoria da Elasticidade Linear tem-se que as deformações mecânicas são definidas em termos de formas diferenciais dos deslocamentos mecânicos, tal qual mostra a equação (D).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (D)$$

Substituindo cada linha da equação (A) nas equações (D) e, considerando separadamente as deformações de membrana e cisalhamento, têm-se as equações (E) e (F).

$$\varepsilon_b(x, y, z, t) = [D_{b0} + z \cdot D_{b1}]u(x, y, t) = D_b(z)u(x, y, t) \quad (E)$$

$$\varepsilon_s(x, y, z, t) = [D_{s0}]u(x, y, t) = D_s(z)u(x, y, t) \quad (F)$$

As matrizes $D_i (i = 0, \dots, 2)$ são formadas por operadores diferenciais, conforme mostrado nas matrizes das equações (Ga, Gb).

$$D_b = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & z \cdot \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & z \cdot \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & z \cdot \frac{\partial}{\partial y} & z \cdot \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (Ga)$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Gb})$$

3 | O ELEMENTO SERENDIPITY

O elemento finito do tipo Serendipity consiste em um elemento retangular de placa plana que apresenta 8 (oito) pontos nodais (Figura 1).

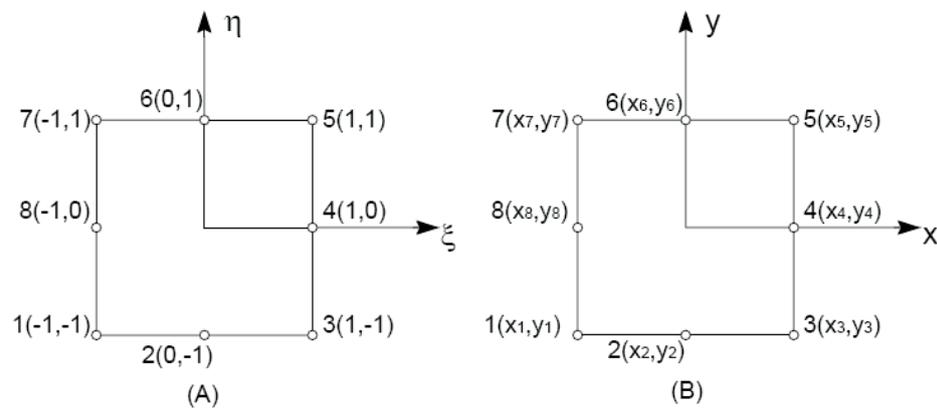


Figura 1 - Forma retangular do elemento empregado na formulação por elementos finitos (a) coordenadas locais (b) coordenadas globais.

Existem relações entre as coordenadas globais e locais, deste elemento, das pelas equações (Ha) e (Hb).

$$\xi = \frac{2x - x_8 - x_4}{x_8 - x_4} \quad (\text{Ha})$$

$$x = \frac{1}{2}[\xi(x_8 - x_4) + x_4 + x_8] \quad (\text{Hb})$$

$$\eta = \frac{2y - y_6 - y_2}{y_6 - y_2} \quad (\text{Ia})$$

$$y = \frac{1}{2}[\eta(y_6 - y_2) + y_6 + y_2] \quad (\text{Ib})$$

A matriz quadrada da equação (J) é a matriz jacobiana que relaciona a derivada das funções de forma (equações Ha, Hb, Ia e Ib) com relação às coordenadas globais com a derivada das funções de forma com relação às coordenadas locais é expressa

por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_8 - x_4) & 0 \\ 0 & (y_6 - y_2) \end{bmatrix} \quad (J)$$

O Jacobiano é definido como o determinante da matriz Jacobiana e é expresso por:

$$J = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} = \frac{(y_6 - y_2)(x_8 - x_4)}{4} \quad (K)$$

As funções de forma, que relaciona os deslocamentos em um ponto qualquer com os deslocamentos nos pontos nodais são expressas por:

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta) \\ N_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1+\xi)(1-\eta) \\ N_3(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\xi)(1-\xi+\eta) \\ N_4(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1+\xi)(1+\eta)(1-\eta) \\ N_5(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(1-\xi+\eta) \\ N_6(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1+\xi)(1+\eta) \\ N_7(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(1+\xi-\eta) \\ N_8(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1+\eta)(1-\eta) \end{aligned} \quad (L)$$

A escolha do elemento finito do tipo *Serendipity* se justifica devido ao fato de que ele apresenta um bom desempenho na modelagem de materiais compósitos e de estruturas inteligentes, conforme demonstrado no trabalho de Chee, Tong e Steven (2001).

As variáveis mecânicas apresentadas nas equações (A), (E) e (F) são convertidas para a formulação em elementos finitos usando as funções de forma do elemento finito *Serendipity* equações (Ha) e (Hb)

$$U(x, y, z, t) = A(z)N(\xi, \eta)u(t) \quad (\text{Ma})$$

$$\varepsilon_b(x, y, z, t) = D_b(z)N(\xi, \eta)u(t) = B_b(\xi, \eta, z)u(t) \quad (\text{Mb})$$

$$\varepsilon_s(x, y, z, t) = D_s N(\xi, \eta)u(t) = B_s N(\xi, \eta)u(t) \quad (\text{Mc})$$

Sendo que $N(x, h)$ representa a matriz das funções de forma de dimensão 5×40 , mostrado na equação (L).

$$\begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \quad (\text{N})$$

4 | OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE MASSA E RIGIDEZ

As matrizes de massa e rigidez elementares segundo a Teoria de Elementos Finitos para um elemento de placa são dadas conforme a equação (O).

$$M^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} \rho_k N^T(\xi, \eta) A^T(z) A(z) N(\xi, \eta) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (\text{O})$$

Sendo que ρ é a densidade, $N^T(\xi, \eta)$ é a matriz transposta das funções de forma do elemento *Serendipity*, A^T é a matriz transposta da matriz A , expressa na equação (Cb), $N(\xi, \eta)$ é a matriz das funções de forma e J é o jacobiano.

A matriz de rigidez foi separada em dois efeitos: flexão-membrana e cisalhamento, conforme as equações (P) e (Q), respectivamente.

$$K_b^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} B_b^T(\xi, \eta, z) C_b^k B_b(\xi, \eta, z) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (\text{P})$$

$$K_s^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} B_s^T(\xi, \eta, z) C_s^k B_s(\xi, \eta, z) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (\text{Q})$$

Sendo que B_b^T e B_s^T são as matrizes transpostas dos operadores das equações (Ga) e (Gb), respectivamente, aplicados as funções de forma do elemento *Serendipity* em coordenadas locais, B_b e B_s são as matrizes dos operadores em coordenadas locais.

As matrizes e , podem ser expressas da seguinte forma:

$$K_b = K_{b0} + K_{b1} + K_{b2} \quad (\text{Ra})$$

$$K_s = K_{s0} \quad (\text{Rb})$$

Sendo que:

$$K_{b0} = B_{b0}^T(\xi, \eta, z) C_b^k B_{b0}(\xi, \eta, z);$$

$$K_{b1} = B_{b0}^T(\xi, \eta, z) C_b^k B_{b1}(\xi, \eta, z) + B_{b1}^T(\xi, \eta, z) C_b^k B_{b0}(\xi, \eta, z);$$

$$K_{b2} = B_{b1}^T(\xi, \eta, z) C_b^k B_{b1}(\xi, \eta, z);$$

$$K_{s0} = B_{s0}^T(\xi, \eta, z) C_s^k B_{s0}(\xi, \eta, z);$$

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (\text{S})$$

Sendo $M = \mathbf{U}_{e=1}^{\text{nelem}} M^{(e)}$ e $K = \mathbf{U}_{e=1}^{\text{nelem}} K^{(e)}$ as matrizes de rigidez global e de massa. O símbolo \mathbf{U} indica a matriz de montagem, $q(t)$ é o vetor de deslocamento global e $f(t)$ é o vetor de cargas generalizadas.

A ordem das matrizes de massa e rigidez depende do número de graus de liberdade adotados no sistema. Assim, para um sistema de N graus de liberdade, as matrizes terão ordem $N \times N$ e os vetores ordem $N \times 1$.

A equação (S) pode ser expressa no domínio da frequência, considerando a condição de vibração livre. Considerando $f(t) = 0$ tem-se a solução harmônica para a Equação (T).

$$\{q(t)\} = \{Q\} e^{i\omega t} \quad (\text{T})$$

Derivando, duas vezes, a Equação (T) em função do tempo é possível obter a Equação (U).

$$\{\ddot{q}(t)\} = -\omega^2 \{Q\} e^{i\omega t} \quad (\text{U})$$

Substituindo as Equações (T) e (U) na Equação (S), tem-se a Equação (V).

$$(K - \omega^2)\{Q\} = 0 \quad (\text{V})$$

onde:

ω^2 são os autovalores que representam o quadrado das frequências naturais;

$\{Q\}$ são os autovetores que representam os correspondentes deslocamentos dos seus respectivos modos.

5 | MODELAGEM DE DANO

A partir do desenvolvimento da metodologia de elementos finitos aplicada a uma placa de alumínio, é possível coletar as frequências naturais da placa e, então analisar a influência da redução de rigidez sobre as frequências naturais desta placa. Esta redução foi simulada como sendo o valor da rigidez sem o dano multiplicado por um fator α , conforme expresso na Equação (W).

$$K_d^e = (1 - \alpha)K_{nd}^e, \alpha \leq 1 \quad (W)$$

Onde:

K_d^e representa a rigidez elementar do elemento danificado;

K_{nd}^e representa a rigidez elementar do elemento não danificado;

α representa o fator de redução de rigidez.

É importante ressaltar que a redução de rigidez em determinado elemento e/ou região deste elemento afeta outros elementos finitos vizinhos, o que deve ser considerado no problema de detecção de danos. Para modelar o dano foi considerada a redução de rigidez de determinado nó, conseqüentemente há uma redução de rigidez em torno deste nó, logo pode-se definir uma região a qual pertence ao dano, conforme o exemplo ilustrado na Figura 2 (DIACENCO, 2016).

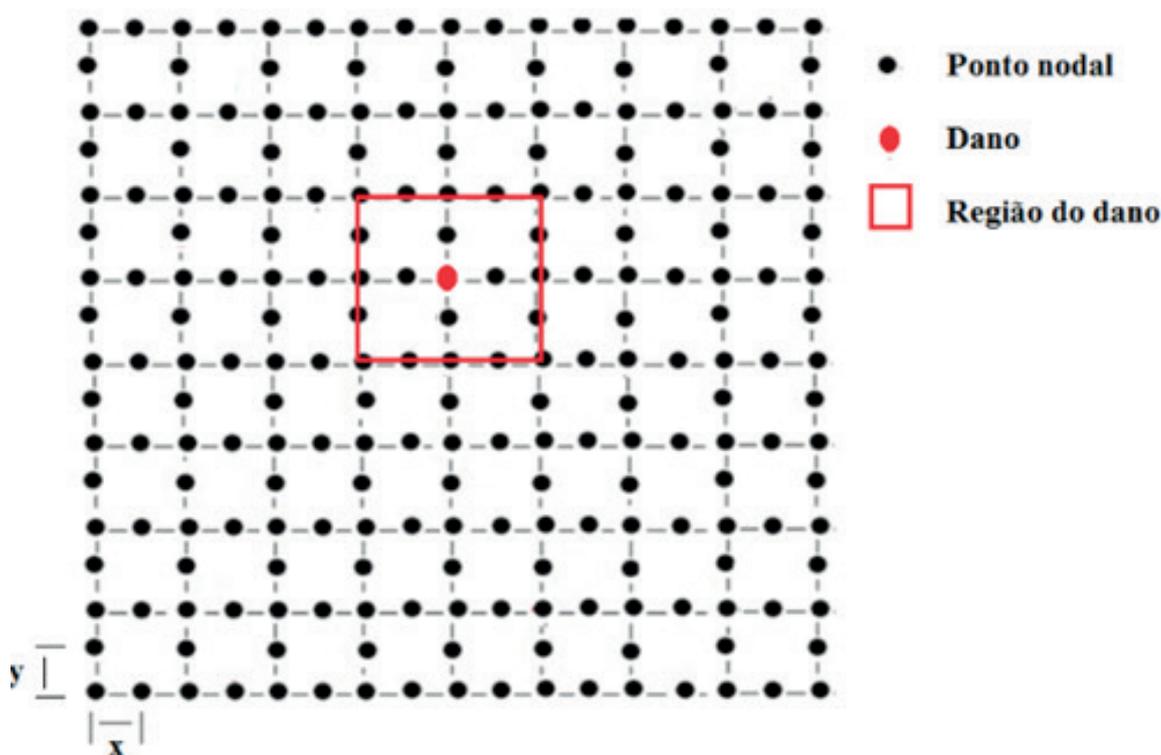


Figura 2 – Esquema da modelagem do dano.

6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise da metodologia de detecção de danos formulada neste trabalho considera-se uma placa plana constituída de alumínio com espessura de 0,004 m com lados $L_x = L_y = 0,20$ a placa foi discretizada em 64 elementos de placa plana (elemento Serendipity), conforme a Figura 3.

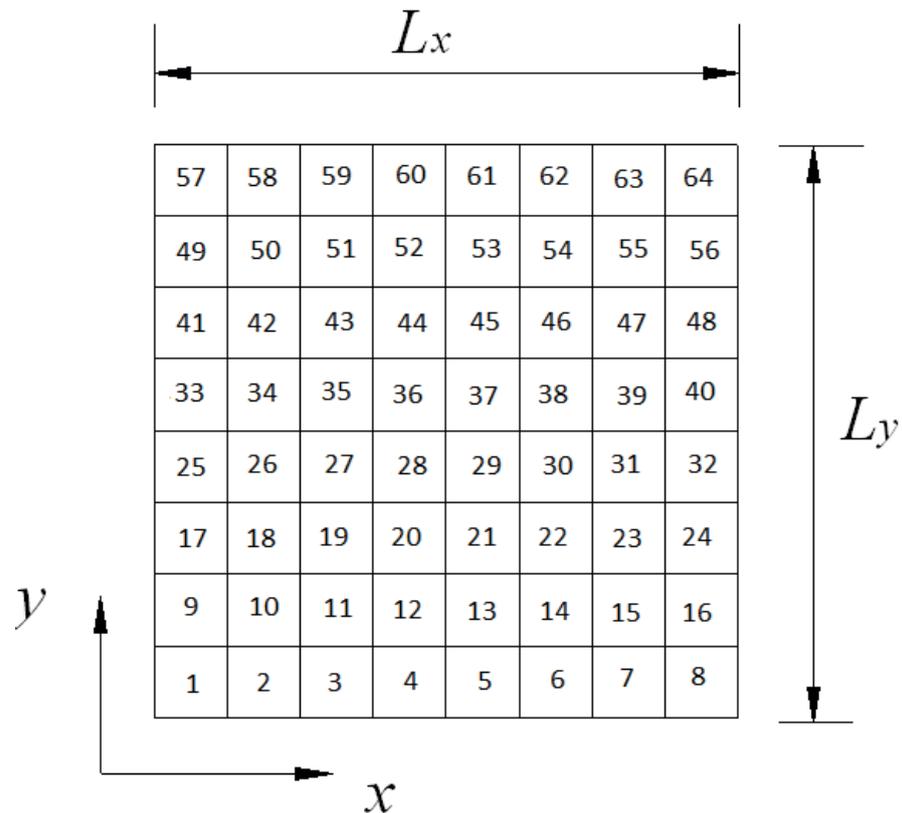


Figura 3 – Discretização da placa. (Diacenco, 2016)

Os valores das propriedades do material que constitui a placa estão mostrados na Tabela 1.

Propriedades do alumínio	Valores
E (GPa)	0,69
N	0,33
ρ (g/m ³)	2.7 g/m ³

Tabela 1 - Propriedades da placa de alumínio.

A condição de contorno adotada para a placa foi a condição de simplesmente apoiada (CORREIA et al, 2000), isto é:

- Para as bordas da placa paralelas ao eixo x : $u_0 = w_0 = \psi_x = 0$;

- Para as bordas da placa paralelas ao eixo y: $v_0 = w_0 = \psi_y = 0$.

A partir da implementação do modelo de elementos finitos foi possível obter as cinco primeiras frequências naturais da placa de alumínio e, visto que a redução da rigidez tem como consequência uma variação em todo conjunto de frequências naturais do modelo, estas cinco primeiras frequências naturais foram tomadas como referência para analisar a influência desta redução de rigidez. Diante disto, para cada redução de rigidez associada a determinado ponto nodal tem-se que todas as frequências naturais do modelo estarão diferentes das frequências naturais iniciais (sem a redução de rigidez).

7 | APLICAÇÃO NUMÉRICA

A Tabela 2 mostra, respectivamente, os valores das cinco primeiras frequências naturais da placa de alumínio.

Frequências	Valores
1 ^a	17,5061
2 ^a	21,6061
3 ^a	23,9100
4 ^a	25,4802
5 ^a	27,3344

Tabela 2– Cinco frequências naturais [Hz].

Foram realizados uma redução de rigidez em quatro pontos selecionados na placa de alumínio, conforme mostrado na Figura 4.

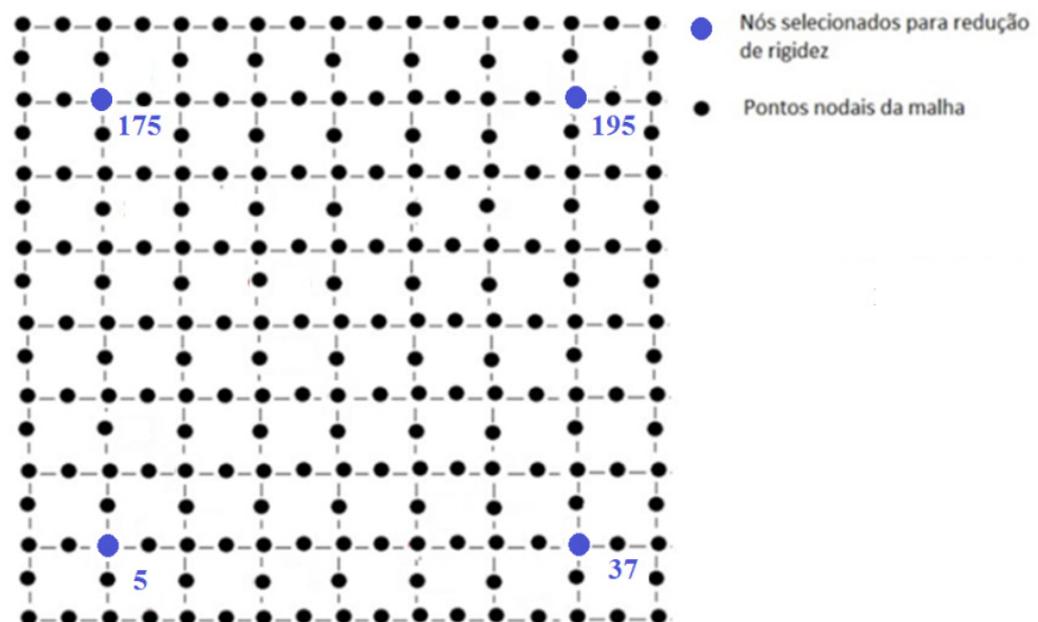


Figura 4 – Esquema da malha de elementos finitos ilustrando os pontos de redução de rigidez.

Após uma redução de 40% na rigidez na região dos pontos nodais selecionados, foi possível obter cinco novas frequências naturais. Observa-se na Tabela 3 que as frequências naturais sofreram alterações mediante a redução de rigidez.

Frequências	Valores
1 ^a	20,4127
2 ^a	24,5235
3 ^a	26,6293
4 ^a	27,1569
5 ^a	28,6518

Tabela 3– Cinco frequências naturais [Hz] após a redução de rigidez

A Tabela 4 mostra as frequências naturais relativas dadas pela equação (X).

$$f_r = \left| \frac{f_d - f_a}{f_a} \right| \quad (X)$$

Sendo:

f_r é definido como frequência relativa;

f_a é definida como a frequência antes da redução da rigidez;

f_d é definida como a frequência após da redução da rigidez;

Frequências	Valores
1 ^a	16,60
2 ^a	13,50
3 ^a	11,37
4 ^a	6,58
5 ^a	4,82

Tabela 4– Valores das frequências naturais relativas [%]

8 | CONCLUSÃO

Um modelo numérico em elementos finitos foi elaborado utilizando a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) para a placa de alumínio considerada. A elaboração deste modelo numérico foi fundamental para conhecer previamente o comportamento dinâmico da estrutura com o objetivo de se obter as frequências naturais para um estado que foi considerado como o estado inicial sem a presença de qualquer tipo de dano. De acordo com isto, foi possível formular o obter as frequências naturais após a redução de rigidez e verificar que, houve pequenas variações nas frequências naturais, mas a partir desta análise será possível, para um trabalho futuro, formular um problema de detecção de danos utilizando as frequências

naturais alteradas.

REFERÊNCIAS

CHEE, C.; TONG, L.; STEVEN, G. P. **Static shape control of composite plates using a curvature - displacement based algorithm**. International Journal of Solid and Structures, v. 38, p. 6381-6403, 2001.

CORREIA, V. M. F. et al. **Modelling and Desing of adaptive composite structures comput**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 185, n. 2, p. 325-346, 2000.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Materiais de construção mecânica**. v.3, ed.2. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DIACENCO, A. A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibração e ruído**. 2010. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Itajubá. 2010.

DIACENCO, A. A. **Modelagem de otimização aplicada à topologia de sensores para identificação e localização de danos em placa compósita**. 2016. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2016.

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis**. 2.ed. Florida: CRC Press, 1997.

VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VILLALVA BRAGA, A. P. **Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas - caracterização e previsão de deformação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia nas áreas de Metalúrgica e de Materiais) - SÃO PAULO, SP, 2011.

SOBRE A ORGANIZADORA:

Marcia Regina Werner Schneider Abdala: Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui experiência na área de Educação a mais de 06 anos, atuando na área de gestão acadêmica como coordenadora de curso de Engenharia e Tecnologia. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se a atuação como professora de ensino superior atuando em várias áreas de graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Atuou como inspetora de Aviação Civil, nas áreas de infraestrutura aeroportuária e segurança operacional em uma instituição federal.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-63-5

