

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 16/11/2016.

LUCAS GIOVANETTI

**ANÁLISE DO COEFICIENTE GEOMÉTRICO DE INTENSIDADE DE
TENSÕES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

LUCAS GIOVANETTI

**ANÁLISE DO COEFICIENTE GEOMÉTRICO DE INTENSIDADE DE TENSÕES
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Projetos.

Orientador: Professor Doutor Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2016

| | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G512a | <p>Giovanetti, Lucas</p> <p>Análise do coeficiente geométrico de intensidade de tensões utilizando o método dos elementos finitos / Lucas Giovanetti – Guaratinguetá, 2016. 79 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 78-79</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Mecânica da fratura 2. Método dos elementos finitos 3. Tensões residuais I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.172.24(043)</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

LUCAS GIOVANETTI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador / UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP-FEG



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CHAVES
UNITAU

Maio de 2016

DADOS CURRICULARES

Lucas Giovanetti

| | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 06.08.1976 – TAUBATÉ / SP |
| FILIAÇÃO | Nelson Giovanetti Maria Aparecida Rocha Giovanetti |
| 1996/2001 | Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá |
| 2007/2008 | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica, nível de Especialização, na Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A. |
| 2014/2016 | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista. |

especialmente a minha esposa Francine, e aos meus filhos
Diego e João Lucas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Nelson Giovanetti e Maria Aparecida Rocha Giovanetti*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

à minha querida esposa *Francine de Almeida Giovanetti*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre me apoiou durante a realização deste trabalho.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

às secretárias da pós-graduação *Eliane da Silva Leite Paterniane Rita e Maria Aparecida Ribeiro Vasconcelos* pela dedicação e alegria no atendimento.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone de Beauvoir

GIOVANETTI, L. **Análise do coeficiente geométrico de intensidade de tensões utilizando o método dos elementos finitos**. 2016. 79 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

O coeficiente geométrico de intensidade de tensões é utilizado em análises de propagação de trincas, ou seja, em análises de estruturas tolerantes a dano, como é o caso da maioria das estruturas aeronáuticas primárias. Para estruturas com geometrias simples, estes coeficientes podem ser obtidos através de equações presentes na literatura, normas e manuais. Nos casos onde as geometrias são complexas, os coeficientes geométricos de intensidade de tensões ou fatores de correção geométrica podem ser obtidos através do método dos elementos finitos. Este trabalho tem como objetivo determinar os coeficientes geométricos de intensidade de tensões utilizando o método dos elementos finitos. Para isto, três tipos de estruturas são analisadas. A primeira estrutura analisada é uma placa plana finita com uma trinca central, submetida à tensão normal de tração (Caso 1). A segunda estrutura analisada neste trabalho é uma placa plana finita com uma trinca lateral na borda esquerda, submetida à tensão normal de tração (Caso 2). E a terceira estrutura analisada neste trabalho é uma placa plana finita com duas trincas laterais nas bordas, submetida à tensão normal de tração (Caso 3). Estas configurações foram escolhidas propositalmente porque são geometrias simples que possuem soluções analíticas para o coeficiente geométrico. Os modelos de elementos finitos foram construídos considerando trincas, que variavam de 1,5 a 25,5 mm. Para cada tamanho de trinca, o coeficiente geométrico foi calculado numericamente e analiticamente, para os três tipos de configurações. Os resultados foram obtidos e comparados. O erro médio obtido para todos os tamanhos de trincas foi de 2,56%, considerando o Caso 1. Para o Caso 2, a diferença média entre os cálculos numéricos e analíticos considerando todos os tamanhos de trincas foi de 3,552%. E, para o Caso 3, o erro médio obtido foi de 2,655%. Conclui-se que de uma maneira geral, o método de obtenção do fator de correção geométrica apresentado neste trabalho possui uma boa segurança e erros relativamente pequenos.

PALAVRAS-CHAVE: Fator de correção geométrica. Propagação de trincas. Método dos elementos finitos. Fator de intensidade de tensões.

GIOVANETTI, L. **Analysis of the geometric coefficient of stresses intensity using the finite element method.** 2016. 79 f. Master's degree dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

Geometric coefficient of stress intensity is used in analyzes of crack propagation, or damage tolerant structures analyzes, as is the case of most primary aeronautics structures. For structures with simple geometries, these coefficients can be obtained by equations present in the literature, standards and manuals. In cases where the geometry is complex, the geometric coefficients of stresses intensity or factors of geometric correction can be obtained through the finite element method. Objective of this dissertation is to determine the geometric coefficients of intensity of stresses using finite element method. For this purpose, three types of structures are analyzed. The first structure analyzed is a finite flat plate with a central crack, subjected to normal tensile stress (Case 1). Second structure analyzed in this study is a finite flat plate with a lateral crack at the left edge, subjected to a normal tensile stress (Case 2). The third structure analyzed in this work is a finite flat plate with two lateral cracks on the edges, subjected to normal tensile stress (Case 3). These configurations were selected because they are simple geometries that have exact analytical solutions for the geometric coefficient of stresses intensity. Finite element models were built considering cracks ranging from 1.5 to 25.5 mm. For each crack size, the geometrical factor was calculated numerically and analytically for the three types of configurations. Results were obtained and compared. Average error obtained for all cracks sizes was 2.56% for Case 1. In Case 2, the average difference between the numerical and analytical calculations of all cracks sizes was 3,552%. And, for Case 3, the average error obtained was 2.655%. It is concluded that in general, the method of obtaining the geometric correction factor has a good safety and it presented small errors.

KEYWORDS: Geometric correction factor. Crack propagation. Finite Element Method. Stress intensity factor.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Configurações geométricas de placas planas submetidas à tensão normal de tração que são analisadas: (a) Placa com trinca central de tamanho $2a$. (b) Placa com trinca lateral de tamanho a . (c) Placa com trincas laterais de tamanho a . | 17 |
| Figura 2 - Foto do navio Liberty que partiu ao meio devido a falhas por fadiga. | 23 |
| Figura 3 - Foto da falha reproduzida dentro do laboratório do Avião Comet. | 24 |
| Figura 4 - Aspecto da aeronave Boeing 737 da Aloha Airlines após o colapso da estrutura | 25 |
| Figura 5- Ciclos de carregamento: (a) Ciclo totalmente alternado, (b) Ciclo repetido e (c) Ciclo flutuante. | 26 |
| Figura 6- Diagrama $S-N$ ou Curva de Wöhler (resistência à fadiga <i>versus</i> vida esperada). | 27 |
| Figura 7 - Trem de pouso de nariz (<i>Piper - Apache</i>). | 28 |
| Figura 8 - Curva de crescimento de trinca. | 30 |
| Figura 9 - Diferentes fases da vida em fadiga e fatores relevantes. | 31 |
| Figura 10 - Deslizamento cíclico leva a nucleação da trinca. | 32 |
| Figura 11 - Seção transversal da micro-trinca. | 33 |
| Figura 12 - O problema de engenharia. (a) Curva de crescimento de trinca. (b) Curva de resistência residual. | 35 |
| Figura 13 - Os Modos de Carregamento. Modo I: Modo de Abertura. Modo II: Modo de cisalhamento. Modo III: Modo de cisalhamento fora do plano (rasgamento). | 36 |
| Figura 14 - Corpo arbitrário com uma trinca arbitrária submetido a carregamento do tipo Modo I. | 37 |
| Figura 15 - Princípio da superposição para uma placa sem trincas. | 40 |
| Figura 16 - Princípio da composição para uma placa com uma trinca elíptica de superfície. (a) Trinca de superfície. (b) ϕ^2 versus $a/2c$. (c) β_{FFS} versus $a/2c$. | 41 |
| Figura 17 - Obtenção do valor de K através do modelo de elementos finitos com trinca. (a) Tensões do modelo de elementos finitos. (b) Fator de intensidade de tensões. | 43 |
| Figura 18 - Modelo da placa plana finita carregada em tração e trinca central de tamanho $2a$. | 44 |
| Figura 19 - Modelo da placa plana finita carregada em tração e trinca de borda lateral com tamanho a . | 45 |
| Figura 20 - Modelo da placa plana finita carregada em tração e trincas de bordas laterais com tamanho a . | 46 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 - Fator de correção geométrica. Placa Plana carregada em tração com trinca central 2a. | 47 |
| Figura 22 - Fator de correção geométrica. Placa Plana carregada em tração com trinca de borda lateral. | 47 |
| Figura 23 - Fator de correção geométrica. Placa Plana carregada em tração com trincas laterais nas duas bordas. | 48 |
| Figura 24 - Elemento SHELL 181. | 49 |
| Figura 25 - Modelo de elementos finitos (291.165 elementos) - Placa plana finita com trinca central 2a (carregamento de tração). | 51 |
| Figura 26 - Modelo de elementos finitos - Placa plana finita com trinca central 2a (carregamento de tração). Detalhe do refinamento da malha. | 51 |
| Figura 27 - Modelo de elementos finitos (184.973 elementos) - Placa plana finita com trinca na borda lateral (carregamento de tração). | 52 |
| Figura 28 - Modelo de elementos finitos - Placa plana finita com trinca na borda lateral (carregamento de tração). Detalhe do refinamento da malha. | 52 |
| Figura 29 - Modelo de elementos finitos (331.146 elementos) - Placa plana finita com duas trincas nas bordas laterais (carregamento de tração). | 53 |
| Figura 30 - Modelo de elementos finitos - Placa plana finita com duas trincas nas bordas laterais (carregamento de tração). Detalhe do refinamento da malha. | 53 |
| Figura 31 - Tensões SY - Placa plana finita com duas trincas nas bordas laterais (carregamento de tração). | 55 |
| Figura 32 - Tensões SY - Placa plana finita com trinca central de tamanho 2a (carregamento de tração) - Zona Plástica. | 56 |
| Figura 33 - Tensões SY - Nós de referência para obtenção do fator de intensidade de tensões - Placa plana finita com trinca central de tamanho 2a (carregamento de tração). | 56 |
| Figura 34 - Linearização dos dados obtidos numericamente. | 58 |
| Figura 35 - Comparativo entre os valores de β calculados analiticamente e numericamente. | 59 |
| Figura 36 - Comparativo entre os valores de K calculados analiticamente e numericamente. | 60 |
| Figura 37 - Tensões SY - Placa plana finita com trinca lateral (carregamento de tração). | 62 |
| Figura 38 - Tensões SY - Placa plana finita com trinca lateral na borda (carregamento de tração) - Zona Plástica. | 62 |
| Figura 39 - Tensões SY - Nós de referência para obtenção do fator de intensidade de tensões - Placa plana finita com trinca na borda (carregamento de tração). | 63 |
| Figura 40 - Linearização dos dados obtidos numericamente. | 64 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 41 - Comparativo entre os valores de β calculados analiticamente e numericamente. | 65 |
| Figura 42 - Comparativo entre os valores de K calculados analiticamente e numericamente. | 66 |
| Figura 43 - Tensões SY - Placa plana finita com trinca lateral (carregamento de tração). | 68 |
| Figura 44 - Tensões SY - Placa plana finita com duas trincas nas bordas laterais (carregamento de tração - lado esquerdo) - Zona Plástica. | 69 |
| Figura 45 - Tensões SY - Placa plana finita com duas trincas nas bordas laterais (carregamento de tração - lado direito) - Zona Plástica. | 69 |
| Figura 46 - Tensões SY - Nós de referência para obtenção do fator de intensidade de tensões - Placa plana finita com duas trincas nas bordas laterais (carregamento de tração). | 70 |
| Figura 47 - Linearização dos dados obtidos numericamente. | 71 |
| Figura 48 - Comparativo entre os valores de β calculados analiticamente e numericamente. | 72 |
| Figura 49 - Comparativo entre os valores de K calculados analiticamente e numericamente. | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Coordenadas dos Nós 302, 303, 304. | 57 |
| Tabela 2 - Tensões dos Nós 302, 303, 304, 305 e 306. | 58 |
| Tabela 3 - Fatores de intensidade de tensão e fatores de correção geométrica. | 61 |
| Tabela 4 - Coordenadas dos Nós 302, 303, 304, 305 e 306. | 63 |
| Tabela 5 - Tensões dos Nós 302, 303, 304. | 64 |
| Tabela 6 - Fatores de intensidade de tensão e fatores de correção geométrica. | 67 |
| Tabela 7 - Coordenadas dos Nós 328, 329, 330, 331 e 332. | 70 |
| Tabela 8 - Tensões dos Nós 302, 303, 304. | 71 |
| Tabela 9 - Fatores de intensidade de tensão e fatores de correção geométrica. | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|------|---|----------------------------------------------|
| APDL | - | <i>ANSYS Parametric Design Language</i> |
| BFS | - | <i>Back free surface</i> |
| CDP | - | Corpo-de-prova |
| CFC | - | <i>Crack front curvature</i> |
| ERJ | - | Embraer Regional Jet |
| FFS | - | <i>Front free surface</i> |
| MEF | - | Método dos Elementos Finitos |
| MFLE | - | Mecânica da Fratura Linear Elástica |
| MSD | - | <i>Multiple Site Damage</i> |
| SI | - | Sistema Internacional de Unidades |
| VCCM | - | <i>Virtual Crack Closure-integral Method</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A | - Área líquida | mm^2 |
| A_{NET} | - Área líquida da seção transversal da placa | mm^2 |
| a | - Comprimento da trinca | mm |
| a_c | - Comprimento da trinca crítico | mm |
| a_d | - Comprimento da trinca detectável | mm |
| E | - Módulo de Elasticidade Longitudinal do Material | GPa |
| K | - Fator de Intensidade de Tensões | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K_I | - Fator de Intensidade de Tensões com Modo I de carregamento | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K_{IC} | - Tenacidade a fratura com Modo I de carregamento | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K_{II} | - Fator de Intensidade de Tensões com Modo II de carregamento | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K_{III} | - Fator de Intensidade de Tensões com Modo III de carregamento | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K^A, \dots, K^Z | - Fator de Intensidade de Tensões devido a configuração geométrica A, ... Z | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K_C | - Tenacidade a Fratura | $(N/mm^2).(mm)^{0.5}$ |
| K_t | - Fator de concentração de tensões | Adimensional |
| n | - Número de ciclos de carregamento | ciclos |
| P | - Força | N |
| r | - Distância entre a ponta da trinca e o elemento submetido ao estado de tensões | mm |
| S_a | - Amplitude de tensão | MPa |
| S_e | - Limite de resistência a fadiga | MPa |
| S_m | - Tensão média | MPa |
| S_f' | - Resistência à Fadiga não corrigida | MPa |
| S_Y | - Tensão normal na direção Y obtida através do software de elementos finitos Ansys | MPa |
| W | - Largura da placa | mm |
| x | - Distância medida na horizontal a partir da ponta da trinca | mm |

| | | |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| x_1 | - Distância medida na horizontal a partir da ponta da trinca até o ponto 1 | <i>mm</i> |
| x_2 | - Distância medida na horizontal a partir da ponta da trinca até o ponto 2 | <i>mm</i> |
| x_3 | - Distância medida na horizontal a partir da ponta da trinca até o ponto 3 | <i>mm</i> |
| x_4 | - Distância medida na horizontal a partir da ponta da trinca até o ponto 4 | <i>mm</i> |
| β | - Fator de correção geométrica | Adimensional |
| $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ | - Fator de correção geométrica para as configurações geométricas 1, 2, ..., n | Adimensional |
| β_{BFS} | - Fator de correção geométrica para a configuração geométrica BFS (superfície livre traseira) | Adimensional |
| β_{CFC} | - Fator de correção geométrica para a configuração geométrica CFC (curvatura frontal da trinca) | Adimensional |
| β_{FFS} | - Fator de correção geométrica para a configuração geométrica FFS (superfície livre frontal) | Adimensional |
| β_w | - Fator de correção geométrica para a configuração geométrica W (largura) | Adimensional |
| θ | - Ângulo de orientação da direção da trinca | <i>radianos</i> |
| μ | - Coeficiente de Poisson | Adimensional |
| σ | - Tensão normal uniforme aplicada a placa plana no princípio da superposição | <i>MPa</i> |
| σ_{ADM} | - Tensão admissível | <i>MPa</i> |
| σ_{MAX} | - Tensão máxima longe da trinca | <i>MPa</i> |
| σ_{ref} | - Tensão de Referência | <i>MPa</i> |
| σ_x | - Tensão normal na direção x | <i>MPa</i> |
| σ_y | - Tensão normal na direção y | <i>MPa</i> |
| τ_{xy} | - Tensão de cisalhamento no plano xy | <i>MPa</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1. | OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.2. | JUSTIFICATIVA..... | 15 |
| 1.3. | FORMULAÇÃO DO PROBLEMA..... | 16 |
| 1.3.1. | DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO..... | 16 |
| 1.3.2. | DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO..... | 17 |
| 1.3.2.1. | FATOR DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA (β)..... | 17 |
| 1.3.2.2. | MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS..... | 18 |
| 1.4. | DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO..... | 18 |
| 1.5. | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 18 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 20 |
| 2.1. | CONCEITOS DE FADIGA..... | 22 |
| 2.1.1. | HISTÓRICO..... | 22 |
| 2.1.2. | CARREGAMENTOS CÍCLICOS..... | 25 |
| 2.1.3. | FILOSOFIAS DE PROJETO..... | 27 |
| 2.1.3.1. | PROJETO VIDA SEGURA..... | 27 |
| 2.1.3.2. | PROJETO FALHA SEGURA..... | 28 |
| 2.1.3.3. | PROJETO TOLERANTE A DANO..... | 29 |
| 2.1.4. | AS DIFERENTES FASES DA VIDA EM FADIGA..... | 30 |
| 2.1.4.1. | INICIAÇÃO..... | 31 |
| 2.1.4.2. | PROPAGAÇÃO..... | 32 |
| 2.1.4.3. | RUPTURA..... | 33 |
| 2.2. | CONCEITOS DA MECÂNICA DA FRATURA..... | 34 |
| 2.2.1. | INTRODUÇÃO À MECÂNICA DA FRATURA..... | 34 |
| 2.2.2. | FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES (K)..... | 36 |
| 2.2.3. | TENACIDADE À FRATURA (K_C)..... | 38 |
| 2.2.4. | FATOR DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA (β)..... | 38 |
| 2.2.5. | PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO..... | 39 |
| 2.2.6. | PRINCÍPIO DA COMPOSIÇÃO..... | 40 |
| 2.3. | MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS..... | 42 |
| 3. | METODOLOGIA..... | 44 |
| 3.1. | FATOR DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA - CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS - CÁLCULO ANALÍTICO..... | 44 |

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. | CÁLCULO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS..... | 48 |
| 3.2.1. | MODELO DE ELEMENTOS FINITOS..... | 49 |
| 4. | RESULTADOS | 55 |
| 4.1. | CASO 1 - PLACA PLANA FINITA COM TRINCA CENTRAL 2A (CARREGAMENTO DE TRAÇÃO) | 55 |
| 4.2. | CASO 2 - PLACA PLANA FINITA COM TRINCA NA BORDA LATERAL (CARREGAMENTO DE TRAÇÃO) | 61 |
| 4.3. | CASO 3 - PLACA PLANA FINITA COM TRINCA NAS BORDAS LATERAIS (CARREGAMENTO DE TRAÇÃO) | 68 |
| 4.4. | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 74 |
| 5. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 76 |
| 5.1. | CONCLUSÕES | 76 |
| 5.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 76 |
| | REFERÊNCIAS | 77 |

1. INTRODUÇÃO

Com frequência, conclui-se que componentes de máquinas falharam sob a ação de tensões repetidas ou flutuantes. Porém, uma análise mais cuidadosa revela que as tensões máximas estavam bem abaixo da resistência última do material e, muito frequentemente, abaixo mesmo da resistência ao escoamento. A característica mais distinguível dessas falhas é que as tensões foram repetidas muitas e muitas vezes. Daí a falha ser chamada falha por fadiga. As falhas por fadiga possuem aparência similar a à de uma fratura frágil, uma vez que as superfícies de fratura são planas e perpendiculares ao eixo de tensão, com ausência de estrição (SHIGLEY, MISCHKE, BUDYNAS, 2005).

O processo de fadiga ocorre pela iniciação e propagação de trincas, em geral, perpendiculares ao carregamento aplicado. A prevenção de fratura por fadiga é uma preocupação essencial no projeto de máquinas e elementos estruturais.

Segundo Norton (2013), a maioria das falhas ocorridas em máquinas se devem a cargas que variam com o tempo e não a cargas estáticas. Estas falhas sempre ocorrem em níveis de tensão muito abaixo do limite elástico dos materiais.

A partir da falha estrutural no nível nuclear, devido à aplicação de cargas repetidas ou devido à combinação de cargas ou ataques ambientais, poderá eventualmente provocar o desenvolvimento da trinca. A análise do desenvolvimento da trinca é feita através dos conceitos da mecânica da fratura. Mecânica da fratura é uma disciplina de engenharia que analisa quantitativamente as condições sob as quais um corpo submetido um carregamento pode falhar devido ao crescimento de uma trinca dominante contida nesse corpo (SILVA, 2005).

Para se fazer uma análise de propagação de trincas, é necessário calcular o fator intensidade de tensão para cada tamanho de trinca. O fator intensidade de tensão deve ser corrigido pelo fator geométrico. Para geometrias simples, o fator de correção geométrica pode ser determinado analiticamente. A determinação analítica do fator de correção geométrica pode ser encontrada na literatura, ou seja, existem livros, manuais e normas que apresentam o cálculo analítico do fator geométrico para geometrias simples. Quando a geometria do componente é complexa, outros procedimentos de cálculo devem ser utilizados de forma a calcular o fator de correção geométrica. Uma forma de calcular este fator consiste em utilizar métodos numéricos, como por exemplo, o método dos elementos finitos. Este trabalho tem como objetivo determinar o fator de correção geométrica β para alguns tipos de estruturas

utilizando o método numérico de elementos finitos. Ou seja, utilizando a metodologia apresentada de forma detalhada neste trabalho, é possível determinar o fator de correção geométrica para qualquer geometria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do software de elementos finitos ANSYS comprova a eficiência em obter resultados de análise de estruturas de forma precisa e rápida. Ou seja, garantir que as estruturas resistam às cargas aplicadas.

A seguir apresentam-se as conclusões do trabalho.

5.1. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado. Ou seja, os resultados dos fatores de intensidade de tensões e fatores de correção geométricos se aproximaram com os cálculos analíticos.

Conclui-se que de uma maneira geral, o método de obtenção do fator de correção geométrica possui uma boa segurança e pequenos erros. Isto porque os valores calculados numericamente se aproximaram bastante dos valores obtidos analiticamente. E também porque os valores encontrados numericamente são ligeiramente maiores que os resultados analíticos, ou seja, trata-se de um método de cálculo a favor da segurança.

Analisando os resultados sob o ponto de vista dos erros calculados, nota-se que os valores dos fatores de correção geométrica se aproximaram mais quando as trincas são menores. Este fato é razoável, já que a presença de trincas grandes aumentam os possíveis erros numéricos gerados pela não linearidade geométrica do modelo.

Comparando os três casos e analisando os resultados, conclui-se que o caso 2 é o mais crítico. Ou seja, foi o caso em que a tensão na ponta da trinca apresentou o maior valor. Além disto, este caso apresentou o maior valor do fator de intensidade de tensões.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são descritas algumas sugestões para trabalhos futuros, de forma a utilizar a metodologia apresentada neste trabalho em outros casos:

Sugere-se primeiramente uma análise de uma geometria complexa, onde não há uma equação que permita determinar o fator de correção geométrica de forma analítica.

Sugere-se também a análise do fator de intensidade de tensões considerando os resultados obtidos através de um ensaio destrutivo de um corpo-de-prova.

Por fim, sugere-se a determinação do fator de correção geométrica através do método dos elementos finitos utilizando o método da energia. A partir dos resultados obtidos, compará-los com o método utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALOHA FLIGHT 243, AIRCRAFT ACCIDENT REPORT, ALOHA AIRLINES, FLIGHT 243, BOEING 737-200, N7371I, NEAR MAUI, HAWAII, APRIL 28, 1988.

Disponível em: <<http://www.aloha.net/~icarus/>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

AVIATION SAFETY NETWORK. Photo of de Havilland DH-106 Comet 1 G-ALYU. 2015. Disponível em: < <https://aviation-safety.net/photos/displayphoto.php?id=19540110-1&vnr=6&kind=C>>. Acesso em: 04 de julho de 2016.

ANSYS. ANSYS Release 14.0 Help Topics. 2011.

ANDERSON, T. L., Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications. Second Edition. CRC Press. Boca Raton London New York Washington, D.C. 1994.

BROEK, D. The Practical Use of Fracture Mechanics. by Kluwer Academic Publishers Group. P.O. Box 322, 3300, AH Dordrecht, The Netherlands. 1988.

BROEK, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. by Martinus Nijhoff Publishers, The Hague. 1984.

BRUHN, E. F. Analysis and Design of Flight Vehicle Structures. Tri-State Offset Company. U.S.A. 1973.

FERTÉ, G., MASSIN, P., MOES, N. **3D Crack Propagation with Cohesive Elements in the Extended Finite Element Method.** *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 300 (2016) 347–374. 2015.

KOMOROWSKI, J. **ICAF 2011 Structural Integrity: Influence of Efficiency and Green Imperatives.** Proceedings of the 26th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue 1 - 3 June 2011, Montreal, Canada. Springer. 2011.

LIU, W. N., MANG, H. A., LIU, C. H. **Numerical Evaluation of the Stress Distribution ahead of a Crack Tip for a Finite-Width Centre-Cracked Specimen Loaded by Stresses along a Portion of the Crack.** Blackwell Science Ltd. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 22, 453–456. 1999.

MANZOLI, P. R. P., PASTOUKHOV, V., RAMOS JR., I. D. C. **Simulação de propagação de trincas em nova instalação de antena na fuselagem de aeronave comercial.** SIMMEC/EMMCOMP 2014. XI Simpósio de Mecânica Computacional e II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional. ABMEC, Juiz de Fora, MG, 28-30 de maio de 2014.

NISHIMURA, T., UCHIMOTO, T., HIRAOKA, K. **Stress intensity factor for a crack passing through a thickness step.** *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 37, No. I, pp. 175-183, 1990.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas - Uma abordagem integrada.** Editora Bookman. 4^a Edição. 2013.

OKADA, H., KAWAI, H., TOKUDA, T., FUKUI, Y. **Fully automated mixed mode crack propagation analyses based on tetrahedral finite element and VCCM (virtual crack closure-integral method).** *International Journal of Fatigue* 50 (2013) 33–39. 2012.

ROSKAM, J. **Airplane Design. Part III: Layout Design of Cockpit, Fuselage, Wing and Empennage: Cutaways and Inboard Profiles.** Roskam Aviation and Engineering Corporation. Rt4, Box 274. Ottawa, Kansas, 66067. 1989.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. Kluwer Academic Publishers. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. 2001.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Editora Bookman. 7ª Edição. 2005.

SILVA, P. A. **Determinação do coeficiente geométrico de intensidade de tensões através do método de energia utilizando modelagem por elementos finitos**. 2005. Tese (Monografia de Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

SWIFT, T. **Damage Tolerance Technology – Stress Analysis Oriented Fracture Mechanics**. EADS Airbus GmbH, Hamburgo, 2000.