

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CHRISTOPH ROBERTO KUNZLER**

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DE**  
***RAINFLOW* PARA CONTAGEM DE CICLOS E INTERAÇÃO COM *SOFTWARE* DE**  
**CAE PARA PREVISÃO DE VIDA EM FADIGA**

**São Leopoldo**  
**2021**

CHRISTOPH ROBERTO KUNZLER

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DE  
*RAINFLOW* PARA CONTAGEM DE CICLOS E INTERAÇÃO COM *SOFTWARE* DE  
CAE PARA PREVISÃO DE VIDA EM FADIGA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica, pelo Curso de  
Engenharia Mecânica da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Ms. Nederson da Silva Koehler

São Leopoldo

2021

## RESUMO

A fadiga é conhecida como uma das principais causas de falhas em componentes mecânicos. A falha é caracterizada pelo rompimento do componente quando solicitado a tensões cíclicas que podem ser muito abaixo dos limites para carregamento estático. Considerando o supracitado, é plausível afirmar que a fadiga e a busca de métodos de previsão e mitigação da sua ocorrência são questões importantes para a sociedade e para o Engenheiro Mecânico. Um dos métodos consideravelmente disseminados de avaliação de fadiga, principalmente de alto ciclo, é o que envolve a curva S-N (Tensão-Número de ciclos) para um determinado material. Neste método é utilizada a amplitude da tensão alternada de carregamento para se chegar em um limite de número de ciclos ao qual o componente mecânico pode ser submetido a um dano causado que levará a falha. No entanto, a amplitude da tensão de carregamento pode não ser constante durante o histórico de utilização do sistema mecânico, variando por vezes de forma randômica, ainda que, possivelmente, de forma repetida. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento de aplicação do método de contagem de ciclos de *Rainflow* no *software* de cálculo *Excel* e realizar a interface com o *software* de CAE FEMAP NASTRAN no intuito de obter a vida em fadiga de componentes mecânicos diversos. Após a realização do procedimento, validação dos resultados do procedimento foi realizada na máquina universal de ensaios da UNISINOS. Foi possível implementar o método de *Rainflow* para contagem de ciclos de fadiga e o método de Palmgren Miner para contabilização do dano de fadiga em uma planilha eletrônica, e obter resultados que são úteis na previsão de vida futura em carregamentos cíclicos de amplitude variada. A validação experimental foi realizada para o modelo de carregamento em tração e foram observadas descontinuidades que indicam início de dano de fadiga quando o dano por Palmgren Miner excedeu a unidade. As indicações não foram observadas para Palmgren Miner abaixo da unidade.

**Palavras-chave:** Fadiga. *Rainflow*. Amplitude Variada. CAE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corpo de prova para geração da curva S-N no método <i>R-R Moore rotating-beam</i> .....	15
Figura 2 - Cálculo da A95 para algumas geometrias de seção transversal. ....	19
Figura 3 - Ilustração básica do conceito de concentração de tensão.....	22
Figura 4 - Tensões em carregamento cíclico .....	27
Figura 5 - Ilustração do conceito da regra de Palmgren-Miner.....	32
Figura 6 - Representação de histórico de carregamento com amplitudes de carregamento variando de forma randômica.....	32
Figura 7 - Conceito do método Rainflow de contagem de ciclos.....	33
Figura 8 - Biela (b) subdividida em elementos finitos (a) para FEA.....	35
Figura 9 - Elementos utilizados em uma análise por FEA.....	35
Figura 10 - Ilustração de componentes básicos de uma análise por FEA.....	38
Figura 11 - Modelo de componente para análise de fadiga .....	39
Figura 12 - Condições de contorno no modelo da figura 11.....	39
Figura 13 - Espectro de carregamento esquemático.....	40
Figura 14 - Linhas de fluxo de força na transição de diâmetros.....	41
Figura 15 - Distribuição de tensões (setas horizontais vermelhas) na flexão.....	42
Figura 16 - Distribuição de tensões de cisalhamento na flexão .....	42
Figura 17 - Referência para extração do fator de sensibilidade .....	44
Figura 18 - Referência para extração do coeficiente de concentração de tensões ...	44
Figura 19 - Referência para a análise de tensões por elementos finitos.....	45
Figura 20 - Seleção para inserir a malha no FEMAP NX Nastran.....	46
Figura 21 - Seleção de comando para análise no FEMAP NX Nastran .....	47
Figura 22 - Comando de verificação dos resultados da análise de tensões no FEMAP NX Nastran .....	48
Figura 23 - Primeiras etapas da primeira fase da contagem de ciclos por Rainflow .	49
Figura 24 - Etapas subsequentes da primeira fase da contagem de ciclos por Rainflow .....	49
Figura 25 - Segunda fase de contagem de ciclos por Rainflow.....	50
Figura 26 - Terceira fase de contagem de ciclos por Rainflow.....	51
Figura 27 - Número total de ciclos por Rainflow.....	51
Figura 28 - Compilação da tensão alternada na planilha do Excel.....	52

Figura 29 - Compilação da tensão média na planilha do Excel.....	53
Figura 30 - Compilação da tensão máxima na planilha do Excel.....	53
Figura 31 - Limites $S_e$ e $S_e'$ e coeficientes de correção no Excel.....	54
Figura 32 - Número de ciclos permissíveis e dano de fadiga em cada ciclo .....	55
Figura 33 - Importação de dados de carregamento do Microsoft Excel para o Femap Nx nastran.....	57
Figura 34 - Parte de código escrito para API no Femap .....	58
Figura 35 - Acesso a ferramenta API no Femap .....	58
Figura 36 - Foto da máquina para validação dos resultados.....	59
Figura 37 - Espectro da figura 13 transferido par o <i>SolidWorks</i> .....	60
Figura 38 - Valores representativos dos picos e vales do espectro da figura 37.....	61
Figura 39 - Ilustração do modelo selecionado para possibilitar a validação experimental dos resultados.....	62
Figura 40 - Ilustração do detalhe do furo central.....	63
Figura 41 - Coeficiente de concentração de chapa com furo central .....	64
Figura 42 - Compilação dos dados do modelo e concentração de tensões no Excel. .....	65
Figura 43 - Primeira planilha secundária do procedimento .....	66
Figura 44 - Contagem de ciclos da primeira etapa.....	66
Figura 45 - Tensões e danos em fadiga da Planilha1 .....	67
Figura 46 - Coeficientes de correção e limites de fadiga para o primeiro modelo.....	67
Figura 47 - Eliminação dos valores dos ciclos contabilizados na primeira etapa .....	68
Figura 48 - Segunda etapa da contagem de ciclos .....	69
Figura 49 - Terceira etapa de contabilização de ciclos .....	70
Figura 50 - Planilha secundária de contabilização total dos ciclos e do dano de fadiga .....	70
Figura 51 - Parte do código VBA de transferência de dados e eliminação de zeros entre planilhas do procedimento .....	71
Figura 52 - Código VBA para limpar resultados .....	72
Figura 53 - Botões inseridos para automatização do procedimento.....	73
Figura 54 - Condições de contorno para FEA .....	74
Figura 55 - Perfil de tensões por FEA no entorno do furo para o caso de carregamento 11 .....	75

Figura 56 - Perfil de tensões por FEA no entorno do furo para o caso de carregamento 18 .....	75
Figura 57 - Exportação de resultados para o Excel.....	76
Figura 58 - Tabela de dados gerada no Femap .....	76
Figura 59 - Resultados de aplicação do comando “ <i>Results to Data Table</i> ” .....	77
Figura 60 - Concentração de tensão e sensibilidade ao entalhe para o segundo modelo .....	78
Figura 61 - Limites de fadiga e coeficientes de correção para o segundo modelo....	79
Figura 62 - Valores de tensão e dano de fadiga da Planilha1 do segundo modelo ..	79
Figura 63 - Total de dano de fadiga para o segundo modelo .....	80
Figura 64 - Condições de contorno para FEA do segundo modelo de carregamento .....	81
Figura 65 - Perfil geral de tensões por FEA do segundo modelo.....	82
Figura 66 - Perfil de tensões no entorno do raio de concordância entre diâmetros por FEA do segundo modelo.....	82
Figura 67 - Planilha de carregamentos para API.....	84
Figura 68 - Início da programação API para transferência dos casos de carregamento do Excel para o Femap .....	84
Figura 69 - Final da programação API para transferência dos casos de carregamento do Excel para o Femap .....	85
Figura 70 - Casos de carregamento gerados no Femap a partir do Excel .....	85
Figura 71 - Primeiro modelo de carregamento fabricado .....	86
Figura 72 - Chapa para a remoção do componente da figura 71 .....	87
Figura 73 - Ferramentas utilizadas nas medições, marcações e acabamento de bordas .....	87
Figura 74 - Equipamento utilizado na medição de dureza .....	89
Figura 75 - Padrão utilizado na aferição do equipamento da figura 79 .....	89
Figura 76 - Placa de dados do equipamento da figura 74 .....	89
Figura 77 - Modelo fabricado montado na MTS .....	90
Figura 78 - Ciclos de forças realizados na MTS.....	90
Figura 79 - Geratriz 1 do lado 1 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque .....	91
Figura 80 - Geratriz 2 do lado 1 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque .....	91
Figura 81 - Geratriz 1 do lado 2 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque .....	92

Figura 82 - Geratriz 2 do lado 2 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque.....	92
Figura 83 - Geratriz 1 do lado 1 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	93
Figura 84 - Geratriz 2 do lado 1 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	93
Figura 85 - Geratriz 1 do lado 2 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	94
Figura 86 - Geratriz 2 do lado 2 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	94
Figura 87 - Geratriz 1 do lado 1 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	95
Figura 88 - Geratriz 2 do lado 1 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	95
Figura 89 - Geratriz 2 do lado 1 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	96
Figura 90 - Geratriz 2 do lado 2 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x; sem ataque.....	96

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 Tema</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Problema</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>11</b>
1.3.1 Objetivo geral .....	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
<b>1.4 Justificativa</b> .....	<b>12</b>
<b>1.5 Delimitação do Tema</b> .....	<b>12</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Análise por tensão-curva S-N</b> .....	<b>14</b>
2.1.1 Limite de resistência à fadiga $Se'$ .....	16
2.1.2 Limite de resistência à fadiga $Sf'$ na transição para fadiga de baixo ciclo .....	17
2.1.3 Fatores que modificam o limite de resistência à fadiga $Se'$ .....	18
2.1.4 Concentradores de tensão .....	22
2.1.4.1 Sensibilidade ao concentrador de tensão.....	23
2.1.5 Número de ciclos para falha por fadiga .....	25
2.1.6 Efeito da tensão média na resistência a fadiga .....	26
2.1.6.1 Método alternativo para contabilização do número de ciclos admissíveis com tensão média.....	30
<b>2.2 Espectros de carregamento</b> .....	<b>30</b>
2.2.1 A regra de Palmgren-Miner .....	31
2.2.2 O método Rainflow de contagem de ciclos .....	33
<b>2.3 Análise de tensões</b> .....	<b>34</b>
2.3.1 Teoria básica de análise de tensões por elementos finitos (FEA) .....	34
2.3.2 Aplicação da teoria de FEA através de <i>softwares</i> para análise de componentes .....	36
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1 Definição do modelo do componente para verificação da vida em fadiga</b> ..	<b>39</b>
<b>3.2 Definição do histórico de amplitudes de carregamento cíclico que será aplicado ao componente</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3 Definição da metodologia de cálculo das tensões</b> .....	<b>41</b>
3.3.1 Metodologia analítica de cálculo das tensões .....	41

3.3.2 Metodologia numérica de cálculo das tensões.....	45
<b>3.4 Inclusão do histórico de carregamentos na análise .....</b>	<b>48</b>
3.4.1 Tratamento do espectro de carregamentos.....	48
3.4.2 Tensões, número de ciclos permissíveis e dano de fadiga do histograma de carregamentos .....	52
<b>3.5 Interface com o software de elementos finitos.....</b>	<b>56</b>
3.5.1 Interação singular com extração do coeficiente de concentração de tensões..	56
3.5.2 Importação e tratamento do espectro de carregamento dentro do software de elementos finitos .....	56
<b>3.6 Validação dos resultados .....</b>	<b>58</b>
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1 Adequação do espectro de carregamento .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 Modelos de componente de aplicação do carregamento.....</b>	<b>62</b>
4.2.1 Primeiro modelo de análise.....	62
4.2.1.1 Tensões de carregamento do primeiro modelo .....	63
4.2.1.2 Análise do espectro de forças .....	65
4.2.1.3 Automatização da planilha do procedimento.....	71
4.2.1.4 Modelamento do sistema de carregamento do primeiro modelo no <i>software</i> de elementos finitos .....	73
4.2.2 Segundo modelo de análise .....	77
4.2.2.1 Tensões de carregamento do segundo modelo .....	78
4.2.2.2 Modelamento do sistema de carregamento do segundo modelo no software de elementos finitos .....	80
4.2.2.3 Criação de casos de carregamento no Femap através de API .....	82
<b>4.3 Validação experimental.....</b>	<b>86</b>
4.3.2 Etapas de fabricação.....	86
4.3.3 Etapa de validação do dano de fadiga na máquina universal de ensaios (MTS) .....	88
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As primeiras investigações em relação à fadiga ocorreram em torno de 200 anos atrás, quando falhas ocorriam em pontes e ferrovias de maneira inesperada e sob carregamentos muito abaixo dos que eram considerados como limites para o colapso estático dos componentes. Estas falhas não ocorriam somente em componentes metálicos, mas nos diversos tipos de materiais. Com o passar do tempo, as exigências em relação à performance das máquinas e equipamentos fabricados levou a um crescimento nas falhas por fadiga, e suas origens ainda não eram conhecidas. Somente em 1900 os pesquisadores passaram a desenvolver teorias para o processo de fadiga (ASM, 1997).

O estudo de fadiga é complexo devido às diversas especialidades envolvidas no processo, menciona-se conhecimentos de materiais, processos produtivos, mecânica dos sólidos, domínio de ensaios não destrutivos e suas sensibilidades, manutenção e fatores de influência e engenharia de confiabilidade. Ultimamente, quatro etapas são consideradas fazerem parte do processo de falha por fadiga: a nucleação de microtrincas, a propagação de microtrincas, a propagação de macrotrincas e a instabilidade final. Dentre as etapas supracitadas, as fases de nucleação e propagação de microtrincas são consideradas depender mais de condições da superfície, enquanto que as demais dependeriam, principalmente de propriedades do material (ASM, 1997).

Existem duas principais divisões iniciais no estudo da resistência e previsão de vida em fadiga, chamadas de fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo. Na fadiga de baixo ciclo, as tensões cíclicas são mais próximas ou iguais aos limites de resistência à carregamento estático do material, em que a plasticidade pode ocorrer de maneira cíclica. Na fadiga de alto ciclo as tensões são mais baixas, em que o processo predomina macroscopicamente dentro do regime elástico.

Para a execução de previsão de vida em fadiga de um determinado componente, é necessário estabelecer as amplitudes de carregamento a que o mesmo será submetido em serviço. Muitas vezes é necessário também conhecer ou estimar o histórico de amplitudes de carregamento a que o elemento foi submetido em operação até o momento. Com esse histórico ou estimativa futura de carregamentos, se pode determinar, juntamente com equações da curva S-N, a vida em fadiga do componente mecânico. No entanto, as amplitudes de carregamento nem sempre são

as mesmas durante o histórico de operação, podendo variar de forma randômica. Além disso, nem sempre é possível determinar de maneira prática a tensão próxima de concentradores de tensão de forma analítica, requerendo a utilização de softwares de análise por elementos finitos.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um procedimento de contagem de ciclos de amplitudes variadas pelo método de *Rainflow* em um componente de geometria simplificada sob carregamento uniaxial, utilizando o *software* Excel. As tensões para a utilização do procedimento de contagem de ciclos e estimativa de vida em fadiga serão exportadas do *software* de análise por elementos finitos Femap NX Nastran. Com os resultados teóricos realizar-se-á a validação dos resultados na máquina universal de ensaios.

## 1.1 Tema

Componentes que trabalham sob carregamentos cíclicos requerem um projeto que forneça sua vida em fadiga baseada nas tensões que atuarão no elemento e no número de ciclos que são permitidos para os determinados níveis de tensão atuantes. No regime de fadiga de alto ciclo, são considerados os efeitos de tensões médias e alternadas na resistência ao dano por fadiga no material do componente. Em determinadas aplicações é necessário prever a vida em fadiga de determinado componente de forma a garantir a segurança para o tempo em operação, enquanto se tem carregamentos com amplitudes variadas.

O tema deste trabalho é a estimativa de vida em fadiga em componentes metálicos sob carregamentos com tensões médias e com tensões alternadas, de amplitudes que variam no decorrer dos ciclos de seus históricos de carregamento.

## 1.2 Problema

Em carregamentos de amplitudes variadas é necessário contabilizar o número de ciclos de um histórico de carregamentos, contabilizar o dano de fadiga acumulado e prever a vida futura sob aqueles carregamentos. Como se pode contabilizar o número de ciclos efetivos no dano de fadiga? Contribuem todos os picos e vales para a contagem de ciclos? Como se chegar ao dano já ocorrido (vida em fadiga consumida) e prever a vida futura? É possível elaborar um procedimento de estimativa

de vida em fadiga que utilize importações das tensões de carregamento cíclico de um *software* de elementos finitos e as utilize no procedimento de contagem de ciclos e estimativa de dano?

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um procedimento que permita contabilizar o número de ciclos efetivos a partir de um histórico de carregamento com amplitudes variadas, estimado para um componente mecânico genérico com concentradores de tensão, contabilizar o dano acumulado de fadiga, estimar o espectro futuro de amplitudes de carregamento e prever a vida futura em fadiga. Este procedimento irá utilizar o método *Rainflow* de contagem de ciclos, fará interface com *software* de análise por elementos finitos que auxiliará na geração das tensões a partir de carregamentos e da geometria do componente.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Seguem os objetivos específicos deste trabalho:

- a) Elaborar modelo do componente mecânico com os concentradores de tensões;
- b) Estimar um histórico passado e futuro (podem ser iguais) de forças cíclicas uniaxiais com amplitudes variadas aplicadas ao componente;
- c) Utilizar o *software* de elementos finitos Femap NX Nastran para cálculo das tensões ou para estimar o coeficiente de concentração de tensão nos concentradores;
- d) Importar as tensões ou utilizar o coeficiente de concentração de tensões e transformar o histórico de carregamento em um histórico de tensões no *software* Excel;
- e) Aplicar o método de *Rainflow* através de equações do *software* Excel ao histórico de tensões e prever a vida futura em fadiga do componente modelado;
- f) Validar os resultados na máquina universal de ensaios.

## 1.4 Justificativa

Os carregamentos reais em componentes mecânicos podem muitas vezes possuir amplitudes variadas que devem ser analisadas no intuito de contabilizar o dano em fadiga já sofrido pelo componente e prever quanto mais tempo ele resiste a aquele histórico de carregamentos. Essa previsão é importante, pois muitos desses componentes são utilizados em veículos, que transportam pessoas, e em máquinas na indústria, onde a falha por fadiga pode levar a consequências catastróficas que podem impactar não só o ser humano, mas o meio ambiente e demais espécies.

## 1.5 Delimitação do Tema

A análise de fadiga pode atingir diversos níveis de complexidade, que envolvem variadas técnicas de abordagem para que as previsões e dimensionamentos sejam realizados. Neste trabalho será analisada a fadiga em regime de alto ciclo, acima de 1000 ciclos, com equações da curva S-N, sem efeitos e correções em relação à plasticidade localizada. O componente em questão não apresenta nenhuma espécie de descontinuidade, como trincas, o que requereria uma análise com base nos conceitos de mecânica da fratura. O carregamento e as tensões são uniaxiais. Não existem efeitos de danos que dependem da frequência e da forma e taxa de carregamento dos ciclos de tensão, como corrosão e, ou fluência térmica. O método de previsão do dano acumulado é o método simplificado de Palmgren-Miner que não contabiliza efeitos de sequência de amplitudes de tensão no dano por fadiga. O efeito das tensões médias será contabilizado pelo método do diagrama de Goodman modificado, apesar da literatura abordar que a parábola Gerber pode ser utilizada como alternativa menos conservativa para materiais dúcteis.

Existem diversas teorias para a explicação das causas para a fadiga e da resistência dos materiais à fadiga, que envolvem efeitos de material, microestrutura, isotropia, tipo de carregamento, processos de fabricação, temperatura e outros. Esses efeitos não serão discutidos em profundidade neste trabalho, porém alguns de seus efeitos serão contabilizados no limite de fadiga através da análise baseada na curva S-N. A contabilização dos possíveis efeitos supracitados será feita através de coeficientes retirados da literatura.

Não será realizada análise modal do sistema de carregamento (espectro; modelo). A análise modal tem por objetivo analisar o sistema de carregamento do ponto de vista de vibrações, das frequências naturais do componente do modelo e da resposta do mesmo quando submetido à excitação por força cíclica de determinada frequência. A análise de vibrações é imprescindível no projeto de componentes submetidos a esforços cíclicos, que serão aplicados em situações reais, pois as condições de ressonância podem amplificar a transmissibilidade de forças aos componentes envolvidos, gerando risco de colapso das estruturas e mecanismos. No entanto, essa análise ficará como sugestão de continuidade para outros trabalhos envolvendo ciclos de amplitudes variadas.

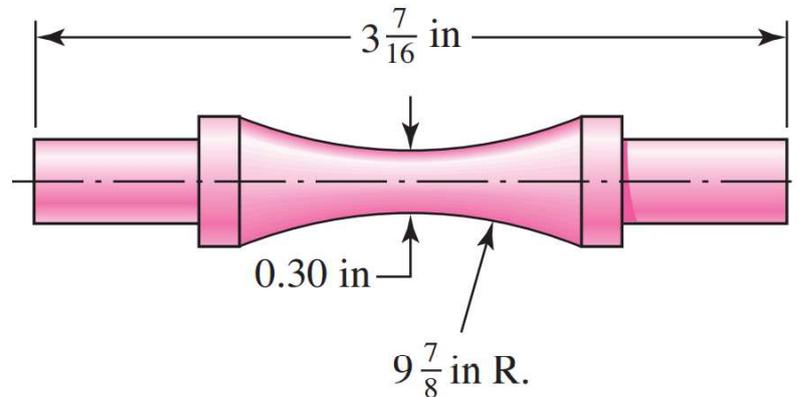
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem, principalmente, três abordagens para a estimativa de vida em fadiga, a análise baseada na tensão através das curvas S-N, a análise baseada na deformação e a análise baseada na mecânica da fratura. A análise baseada na tensão através da curva S-N, apesar de ser citada na literatura como a menos precisa das teorias, por não contabilizar adequadamente os efeitos de tensão média local nos concentradores de tensão, tensões e deformações reais presentes no material e devido ao grau de incerteza nos coeficientes utilizados no estabelecimento da resistência do material à fadiga, ainda possui vasta utilização nos projetos e verificações que incluem fadiga de alto ciclo. Além disso a literatura reporta que os dados empíricos levantados para materiais ferrosos, nesse tipo de análise, ainda são relativamente confiáveis. A análise através da curva S-N não pode ser utilizada com boa confiabilidade em previsões de fadiga quando descontinuidades, como trincas estão contidas nos elementos e quando efeitos consideráveis de plasticidade são previstos nos concentradores de tensão. As próximas seções descrevem a análise por tensão com base na curva S-N.

### 2.1 Análise por tensão-curva S-N

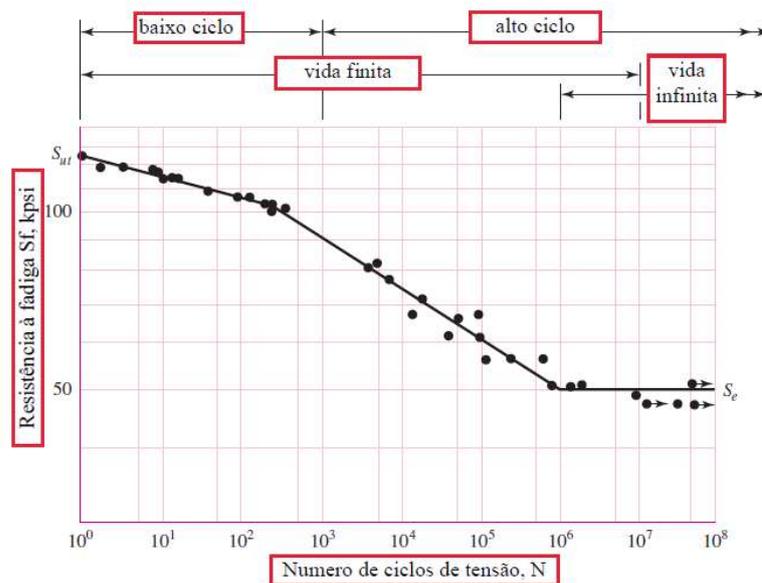
Para determinar a resistência de um determinado material metálico à fadiga são realizados testes e gerada uma curva de tensão alternada máxima aplicada (S) e número de ciclos (N) que o material suporta até a falha por fadiga naquela condição. O método de teste mais amplamente utilizado na construção da referida curva é o método *R-R Moore rotating beam machine*, no qual uma tensão cíclica de flexão pura é aplicada a um corpo de prova com geometria específica até a falha por fadiga. Vários testes são realizados em diferentes níveis de tensão de flexão (S) e o número de ciclos até a falha é contabilizado e relacionado na curva S-N ao nível de tensão (Shigley, 2008). Desenho do corpo de prova utilizado no método *R-R Moore rotating beam machine* pode ser verificado na figura 1. Curva S-N ilustrativa para aço AISI 4130 (UNS G41300) pode ser verificada no gráfico 1.

Figura 1 - Corpo de prova para geração da curva S-N no método *R-R Moore rotating-beam*



Fonte: Shigley (2008, p. 266).

Gráfico 1 – Curva S-N ilustrativa de um aço 4130, normalizado, submetido a tensão normal de tração cíclica.



Fonte: Shigley (2008, p. 266).

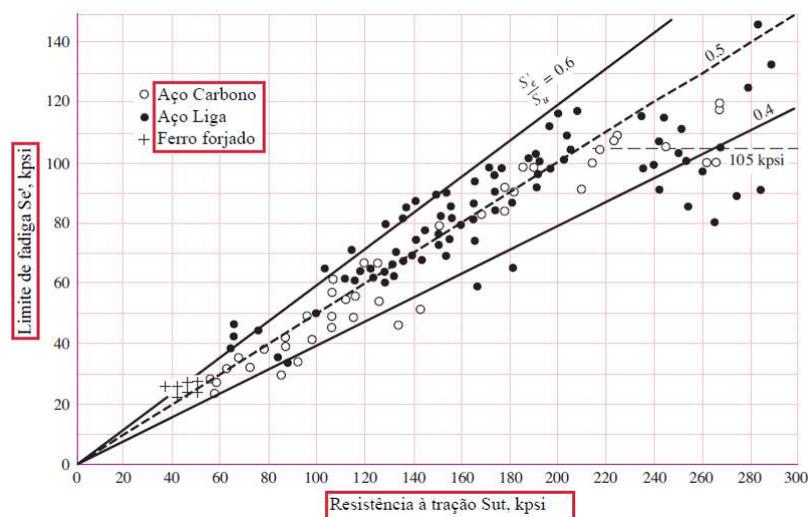
Na curva S-N do gráfico 1 se pode observar três regiões distintas com taxas de variação da resistência a fadiga com o número de ciclos em uma base log-log diferentes. A primeira região à esquerda do gráfico que se estende até aproximadamente 1000 ciclos é nomeada de regime de baixo ciclo, no qual as tensões

alternadas são elevadas, dominando efeitos de plasticidade, para o que uma abordagem deformação versus número de ciclos seria mais adequada. A região seguinte da esquerda para a direita entre  $10^3$  e  $10^6$  ciclos é nomeada de regime de fadiga de alto ciclo com vida finita e a região acima de  $10^6$  ciclos é nomeada de regime de fadiga de alto ciclo com vida infinita, para o qual é considerado que não haverá falha por fadiga independentemente do aumento no número de ciclos. Esse último regime existe apenas para alguns materiais como aços de baixo carbono, aços de baixa liga, titânio, etc.

### 2.1.1 Limite de resistência à fadiga $S_e'$

Como pode ser observado no gráfico 1, existe uma região a direita da curva S-N em que o aumento do número de ciclos não reduz mais a tensão admissível de fadiga. A tensão limite ( $S_e'$ ) a partir da qual esse comportamento é esperado para o aço carbono e demais materiais que possuem esse limite é determinada experimentalmente. Ensaio experimental em laboratórios mostraram que para aços carbono de baixa liga com limite de resistência mecânica em tração de até 1450 MPa essa tensão  $S_e'$  varia de 0,4 a 0,6 vezes o limite de resistência em tração ( $S_{ut}$ ), conforme pode ser verificado no gráfico 2 (Shigley, 2008).

Gráfico 2 - Gráfico do limite de resistência à fadiga versus o limite de resistência à tração para os materiais da legenda.



Fonte: Shigley (2008, p. 275)

Se' pode ser adotada como 0,5 vezes Sut para aços com Sut menor ou igual a 1400 MPa e 700 MPa para aços com Sut maior que 1400 MPa (Shigley, 2008).

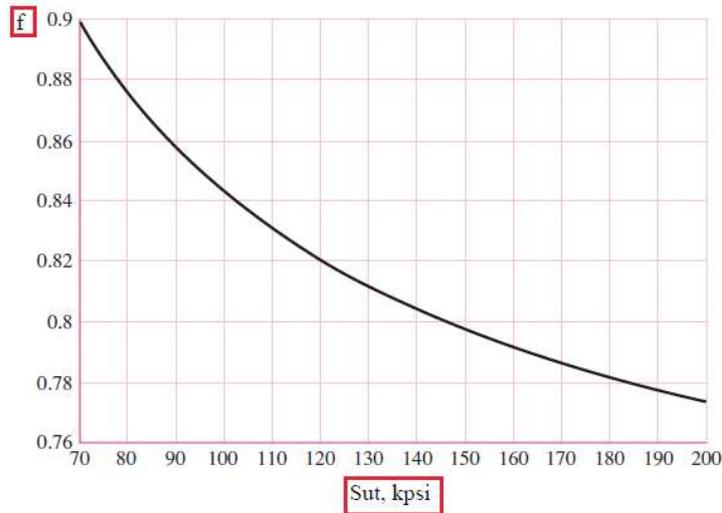
O limite Se' é afetado por mudanças na microestrutura para um mesmo material, conforme esse é submetido a diferentes tipos de processos de fabricação e tratamentos térmicos ou termoquímicos. Existem dados experimentais de testes para determinar Se' para um mesmo material em diversas condições microestruturais e sempre que estes dados estiverem disponíveis, deverão ser utilizados no lugar da estimativa mais generalizada do gráfico 2 (Shigley, 2008).

### 2.1.2 Limite de resistência à fadiga Sf' na transição para fadiga de baixo ciclo

Observando-se novamente o gráfico 1, tem-se no lado direito uma mudança na inclinação da curva em aproximadamente 1000 ciclos, que é nomeada de limite entre a fadiga de alto e baixo ciclo. Sf' pode ser determinado com o uso da equação 1.

$$Sf' = f \cdot Sut \quad (1)$$

Em que f é um fator determinado com o auxílio de conceitos e equações da análise de fadiga pelo método da deformação versus número de ciclos (Shigley, 2008). A dedução da equação para o fator f será omitida no presente trabalho, por não fazer parte do objetivo específico do mesmo. No entanto, o fator f depende do limite de resistência do material em tração, conforme pode ser verificado no gráfico 3.

Gráfico 3 - Variação do fator  $f$  em relação ao limite de resistência à tração

Fonte: Shigley (2008, p. 277)

### 2.1.3 Fatores que modificam o limite de resistência à fadiga $Se'$

Os testes de laboratório realizados para encontrar o limite  $Se'$  são desenvolvidos cautelosamente sob condições superficiais polidas, temperatura ambiente, sem efeitos de atmosferas agressivas, processos de fabricação de alta qualidade, material de boa qualidade e sem choque. Em aplicações reais essas condições dificilmente poderão ser reproduzidas, o que impacta negativamente o limite de fadiga na região de alto ciclo. Para contabilizar o efeito dessas condições discrepantes em relação aos testes em laboratório, foram gerados coeficientes que reduzem  $Se'$ , conforme as condições às quais o componente está exposto e conforme as características de material e geometria do próprio componente.

Foram desenvolvidos 6 coeficientes que contabilizam os efeitos de tamanho do componente ( $k_b$ ), os efeitos de condições superficiais ( $k_a$ ), os efeitos de temperatura ( $k_d$ ), os efeitos de tipo de solicitação mecânica ( $k_c$ ), a confiabilidade ( $k_e$ ) e efeitos miscelâneos ( $k_f$ ) (Shigley, 2008).

Os efeitos de tamanho do componente são levados em consideração devido aos ensaios para  $Se'$  serem realizados em corpos de prova em determinados tamanhos, conforme verificado na figura 1. Para componentes maiores existe uma maior probabilidade de defeitos microestruturais e inclusões nas regiões de atuação das tensões e, portanto, uma maior probabilidade de início de um dano por fadiga

(Norton, 2013). O conjunto de equações 2 pode ser utilizado na correção para o tamanho de um componente cilíndrico solicitado em flexão rotativa.

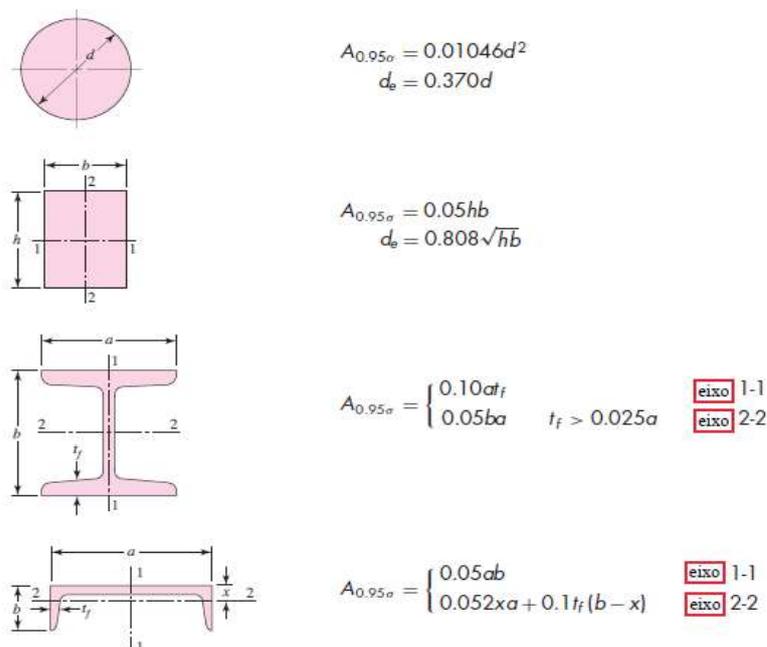
$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

Quando o componente não estiver rotacionando, ou não tiver seção transversal circular, são requeridas modificações. O diâmetro ( $d$ ) a ser utilizado no conjunto de equações 2 é um diâmetro equivalente ( $d_e$ ) calculado com base na área da seção transversal que está solicitada a 95 por cento ou mais da máxima tensão da solicitação (A95). O diâmetro equivalente ( $d_e$ ) é calculado conforme a equação 3.

$$d_e = \left( \frac{A_{95}}{0,0766} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

A área A95 para algumas geometrias pode ser verificada na figura 2.

Figura 2 - Cálculo da A95 para algumas geometrias de seção transversal.



Fonte: Fonte: Shigley (2008, p. 282)

O coeficiente dos efeitos de condições superficiais é necessário, pois as condições do ensaio para determinar ( $S_e'$ ) são em corpos de prova polidos, sem rugosidades excessivas na superfície e sem riscos de processos de fabricação. Esse coeficiente de correção também leva em consideração o limite mínimo de resistência do material a tração ( $S_{ut}$ ), conforme a equação 4.

$$k_a = a \times S_{ut}^b \quad (4)$$

Os coeficientes da equação 4 podem ser extraídos da tabela 1, conforme o processo de fabricação do componente.

Tabela 1 - Coeficientes para o uso na equação 4

Acabamento superficial	Fator a		Expoente b
	$S_{utr}$ kpsi	$S_{utr}$ MPa	
Retificado	1.34	1.58	-0.085
Usinado ou estirado a frio	2.70	4.51	-0.265
Laminado a quente	14.4	57.7	-0.718
Como forjado	39.9	272.	-0.995

Fonte: Fonte: Shigley (2008, p. 280)

Os efeitos de temperatura podem ser contabilizados através do conjunto de equações 5 (Norton, 2013).

$$\begin{aligned} \text{se } T \leq 450^\circ\text{C}: kd &= 1 \\ \text{se } 450^\circ\text{C} > T \leq 550^\circ\text{C}: kd &= 1 - 0,0058 \times (T - 450) \end{aligned} \quad (5)$$

A justificativa consiste em que em temperaturas acima de  $450^\circ\text{C}$  é esperada influência de outros fatores de forma mais acentuada, como a redução do limite de escoamento e fluência. Porém a análise por tensão da curva S-N não fornece condições suficientes para análise da influência dos fatores em altas temperaturas (Norton, 2013).

O fator de carregamento é utilizado para contabilizar os efeitos do tipo de carregamento no componente. Carregamentos de tração axial e de torção conferem menor resistência à fadiga ao material, portanto um coeficiente de 0,85 para o

carregamento de tração axial e 0,59 para torção pura são utilizados na redução de  $S_e'$  (Shigley, 2008). O coeficiente da torção pode ser combinado em uma equação de von Mises, gerando uma tensão equivalente, podendo ser considerado 1. Na tração uniaxial é considerada maior a probabilidade de uma descontinuidade estar presente no campo de tensão máxima, pois este se estende por toda a seção transversal do componente, diferentemente da flexão, na qual a tensão varia ao longo da seção transversal, se tornando nula na linha neutra. Outra justificativa para a redução na resistência em tração axial é a dificuldade de evitar excentricidades no carregamento, atuando, conjuntamente à tração, um carregamento de flexão induzida pela excentricidade.

O fator de confiabilidade tem por objetivo considerar os fatores que causam dispersão nos dados de resistência à fadiga, conforme pode ser verificado no gráfico 2. A tabela 2 pode ser utilizada para alguns valores mais utilizados de confiabilidade (Shigley, 2008).

Tabela 2 - Fator de confiabilidade.

Confiabilidade, %	Fator de confiabilidade, $k_f$
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

Fonte: Shigley (2008, p. 280)

O fator de efeitos miscelâneos tem por objetivo considerar os efeitos de corrosão, frequência de carregamento, tensões residuais, acabamentos superficiais de outros compostos químicos e além. No entanto, como se tem pouco embasamento e espaço para abordar a ampla teoria desses efeitos, esse fator será considerado 1 neste trabalho.

### 2.1.4 Concentradores de tensão

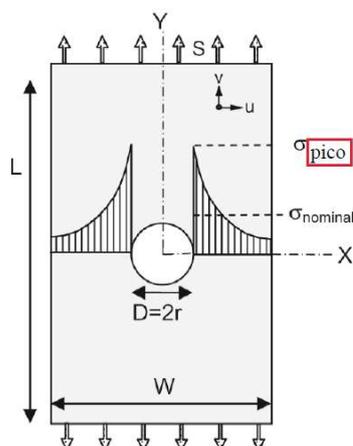
Em estruturas e componentes de máquinas e equipamentos, raramente se tem uma geometria constante que possibilite um campo de tensões uniforme de maneira que os carregamentos aplicados sejam igualmente distribuídos no material. O que se encontra majoritariamente são geometrias mais complexas com furos, reentrâncias, saliências e variações de seção transversal. Essas características modificam e reduzem a uniformidade da distribuição de tensões no componente, podendo gerar tensões localizadas maiores que as tensões nominais calculadas pelos equacionamentos convencionais de cada tipo de carregamento.

O fator de concentração de tensões  $K_t$  é utilizado na contabilização dos efeitos das características geométricas dos componentes solicitados aos carregamentos. Esse fator é definido como a razão entre a tensão de pico localizada na raiz do concentrador de tensão geométrico e a tensão nominal que existiria se não houvesse o concentrador, conforme a equação 6 (Schijve, 2009).

$$K_t = \frac{\sigma_{pico}}{\sigma_{nominal}} \quad (6)$$

A figura 3 ilustra o conceito de concentração de tensão na borda de um furo em uma chapa retangular solicitada em tração uniaxial na direção do eixo y.

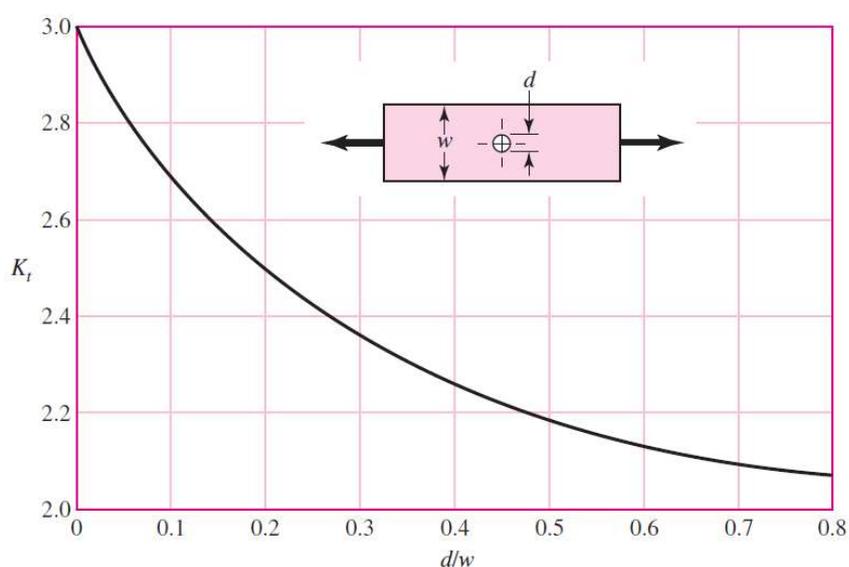
Figura 3 - Ilustração básica do conceito de concentração de tensão.



Fonte: Schijve (2009, p. 60)

A concentração de tensões envolve uma série de fatores de estudo e pode variar de acordo com a geometria e direção das tensões principais no componente, existindo questões de sobreposição de concentradores e gradiente de tensão a partir do concentrador, porém essas questões não serão abordadas no presente trabalho. Para os concentradores mais comuns encontrados em componentes, como o furo na chapa da figura 3 existem soluções gráficas como pode ser verificado no gráfico 4.

Gráfico 4 - Fator de concentração de tensões para um furo em uma chapa retangular em tração.



Fonte: Shigley (2008, p. 1005)

Assim como o gráfico 4 existem diversos outros para carregamentos de flexão e torção além de tração e também para diferentes tipos de concentradores. Neste trabalho, quando necessário serão usados esses gráficos disponíveis na literatura para contabilizar os efeitos de concentração de tensões.

#### 2.1.4.1 Sensibilidade ao concentrador de tensão

O princípio da similaridade afirma que a mesma tensão alternada que gera uma microtrinca capaz de levar a um dano por fadiga em um componente sem concentradores de tensão deve ser a mesma que a tensão de pico que gera a microtrinca para o dano por fadiga em um componente com concentrador de tensão. A equação 7 demonstra esse conceito (Schijve, 2009).

$$\sigma_{pico} = K_t \times S_{ep} = S_e \quad (6)$$

*S<sub>ep</sub>*: tensão limite de fadiga nominal no componente com concentrador de tensão

*S<sub>e</sub>*: tensão limite de fadiga no componente sem concentrador de tensão

Rearranjando os termos da equação 6 se obtém a equação 7.

$$S_{ep} = \frac{S_e}{K_t} \quad (7)$$

No entanto, experimentos diversos indicaram que essa relação sofre variações de outros fatores, portanto o princípio da similaridade deve ser corrigido considerando os demais fatores de influência, como o tamanho do concentrador de tensão e a resistência mecânica do material do componente em estudo (Schijve, 2009). Os experimentos mostraram que o limite de fadiga para componentes com concentradores de tensão pode ser representado pela equação 8.

$$S_{ep} = \frac{S_e}{K_f} \quad (8)$$

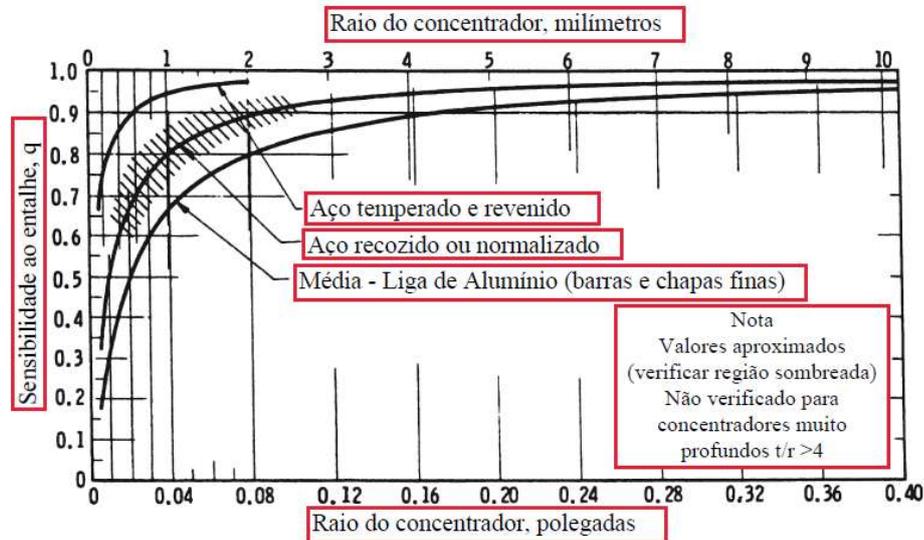
$$K_f \leq K_t$$

Com isso é estabelecido que um componente pode ser menos sensível aos concentradores de tensão do que é considerado por  $K_t$ . O termo sensibilidade ao entalhe é estimado pela equação 9.

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (9)$$

Experimentos diversos realizados geraram o gráfico 5 para a sensibilidade ao concentrador.

Gráfico 5 - Sensibilidade ao concentrador de tensões em solicitações de tensão alternada e carregamento de flexão rotativa.



Fonte: Schijve (2009, p. 175)

Outros gráficos estão disponíveis na literatura para extração dos valores de sensibilidade ao concentrador e esses poderão ser utilizados no desenvolvimento do trabalho, e serão citados na etapa de metodologia e resultados.

### 2.1.5 Número de ciclos para falha por fadiga

A partir da curva S-N se pode obter uma equação para o número de ciclos admissíveis para um determinado componente com base na tensão alternada a qual o mesmo está submetido e nos limites  $Sf'$  e  $Se$  estipulados para o sistema de carregamento. Com base no gráfico 1,

$$\log S = \log Sf' - \left( \frac{\log Sf' - \log Se}{\log 10^6 - \log 10^3} \right) \times (\log N - \log 10^3)$$

$$\log S = \log Sf' - \left( \left( \frac{1}{3} \right) \times \log \left( \frac{Sf'}{Se} \right) \right) \times \log \left( \frac{N}{10^3} \right)$$

$$b = - \left( \left( \frac{1}{3} \right) \times \log \left( \frac{Sf'}{Se} \right) \right)$$

$$\log S = \log S f' + \log N^b - \log 10^{3b}$$

$$\log S = \log S f' + \log N^b - 3b$$

$$\log S = \log S f' + \log S f' - \log S_e + \log N^b$$

$$\log S = \log \left( \frac{S f'^2}{S_e} \right) + \log N^b$$

$$S = \left( \frac{S f'^2}{S_e} \right) \times N^b$$

$$a = \left( \frac{S f'^2}{S_e} \right)$$

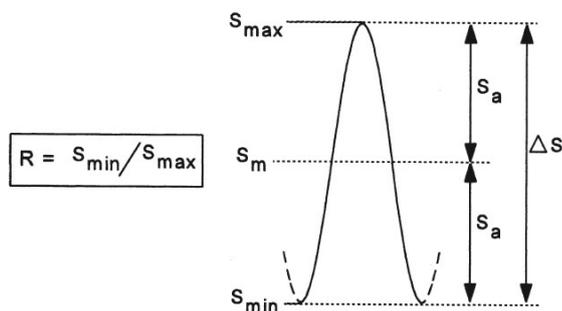
$$S = a \times N^b \quad (10)$$

Na dedução acima  $S$  é a tensão alternada admissível para um número de ciclos  $N$  e,  $S_e$  e  $S f'$  são o limite para vida infinita e de divisão entre fadiga de alto e baixo ciclo para tensão média igual a zero, respectivamente.

#### 2.1.6 Efeito da tensão média na resistência a fadiga

Em um sistema de carregamento cíclico, conforme verificado na figura 4, discrimina-se diferentes tipos de tensão.  $S_{max}$  é a tensão máxima do carregamento,  $S_a$  é a tensão alternada do carregamento,  $S_{min}$  é a tensão mínima do carregamento e  $S_m$  é a tensão média do carregamento. Quando o carregamento é alternado, a tensão média é zero e o número de ciclos que o componente em carregamento suporta em segurança depende da tensão alternada. No entanto, quando a tensão média destoa de zero, outras teorias e considerações devem ser utilizadas na previsão da vida em fadiga.

Figura 4 - Tensões em carregamento cíclico



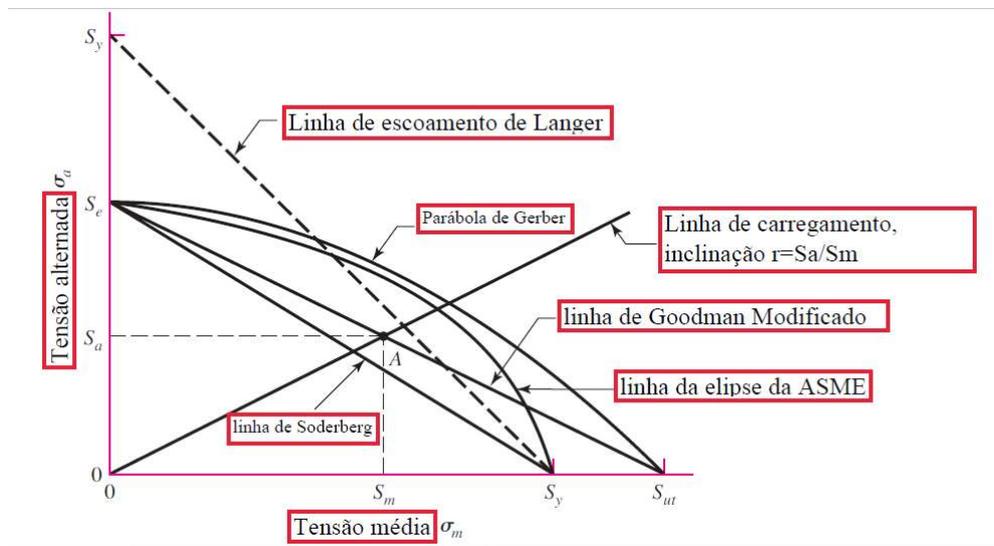
Fonte: Schijve (2009, p. 142)

Quando a tensão média é maior que zero, tem-se uma carga extra em tração que é somada a tensão alternada, gerando uma tensão máxima maior que a que se teria em regime alternado. Essa condição é chamada de carregamento pulsante ou repetido, dependendo da razão  $R$  mostrada na figura 4.

Com a tensão máxima maior, o potencial de abertura da microtrinca que pode levar ao dano de fadiga é maior, o que diminui o número de ciclos admissíveis naquela condição, ou a tensão alternada admissível para um determinado número de ciclos. Quando a tensão média é elevada ao nível da tensão de limite de resistência, a tensão alternada admissível é zero (Schijve, 2009).

Existem cinco teorias principais utilizadas na contabilização dos efeitos do aumento da tensão média na resistência à fadiga. O gráfico 6 mostra as curvas dos critérios de falha para cada uma das teorias. No eixo das abscissas se tem as tensões médias e no eixo das ordenadas se tem as tensões alternadas. Para um determinado tipo de carregamento, se a intersecção da tensão média com a tensão alternada resultar em um ponto acima da curva da teoria que está sendo considerada, não haverá segurança de utilização do componente para fadiga (Shigley, 2008). Dentre as curvas, a linha de Soderberg é considerada a mais conservativa e a linha de Goodman Modificado é conservativa para materiais dúcteis, no entanto, fornece resultados dentro da segurança para materiais com maior resistência mecânica ou endurecidos (Schijve, 2009). Neste trabalho será utilizada a linha de Goodman Modificado.

Gráfico 6 – Critérios de falha para fadiga em tensões médias maiores que zero



Fonte: Shigley (2008, p. 297)

A equação 11 descreve a linha de Goodman Modificado.

$$1 = \frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} \quad (11)$$

*Sa*: tensão alternada

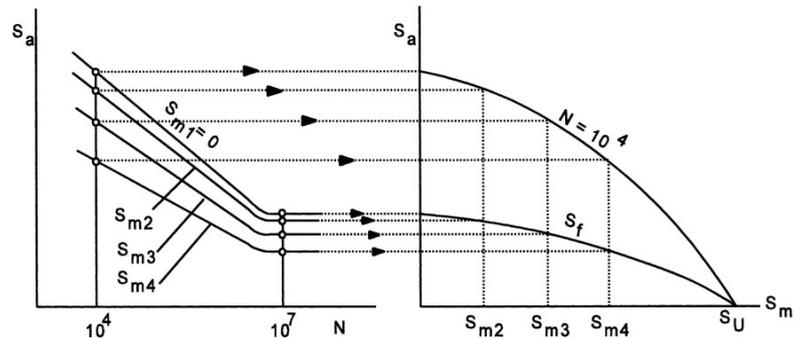
*Se*: tensão limite para vida infinita

*Sm*: tensão média

*Sut*: tensão limite de resistência

O efeito da tensão média na curva S-N pode ser verificado no gráfico 7, no qual  $S_{m1}$ ,  $S_{m2}$ ,  $S_{m3}$  e  $S_{m4}$  são tensões médias maiores que zero. Pode-se observar um decréscimo dos limites  $S_e$  e  $S_f'$  com o aumento da tensão média, e que o efeito mais pronunciado está relacionado a  $S_f'$ .

Gráfico 7 – Efeitos da tensão média na curva S-N



Fonte: Schijve (2009, p. 147)

No lado da curva S-N próximo à região de fadiga de baixo ciclo a falha ocorre quando a soma da tensão alternada com a tensão média é igual a  $S_f'$  (Schijve, 2009). Essa condição pode ser representada pela equação 12.

$$S_f' = S_a + S_m \quad (12)$$

Portanto, para a elaboração da equação do número de ciclos permitidos entre os limites de  $10^3$  e  $10^6$  ciclos, quando existe uma tensão média maior que zero associada ao carregamento, utiliza-se a equação 12 que pode ser manipulada para gerar a equação 13 que estipula o novo limite  $S_{fm}'$  para 1000 ciclos.

$$S_a = S_f' - S_m = S_{fm}' \quad (13)$$

A partir da equação 11, resolvendo para  $S_a$  obtém-se o novo limite  $S_{em}$  para vida infinita, conforme mostrado na equação 14.

$$S_a = S_e - S_m \times \left( \frac{S_e}{S_{ut}} \right) = S_{em} \quad (14)$$

Com os dois limites  $S_{fm}'$  e  $S_{em}$  incluindo os efeitos da tensão média definidos, os mesmos podem ser aplicados no lugar de  $S_f'$  e  $S_e$  para encontrar o número de ciclos admissíveis com a equação 10.

2.1.6.1 Método alternativo para contabilização do número de ciclos admissíveis com tensão média.

A equação 15 pode ser utilizada para a contabilização do número de ciclos admissíveis com tensão média associada (Norton, 2003).

$$N = \frac{10^{\frac{b}{m}}}{\sigma f^{\frac{1}{m}}} \quad (15)$$

$$\sigma f = \frac{S_a}{\left(1 - \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)\right)}$$

$$b = \log\left(\frac{(0,9 \times S_{ut})^2}{S_e}\right)$$

$$m = \left(\frac{1}{3}\right) \times \log\left(\frac{(0,9 \times S_{ut})}{S_e}\right)$$

As definições das variáveis  $S_a$ ,  $S_m$ ,  $S_e$  e  $S_{ut}$ , que constituem a equação 15, foram feitas na equação 11.

## 2.2 Espectros de carregamento

Para se proceder com a avaliação de determinado componente ou equipamento sob carregamento cíclico, em relação ao dano de fadiga acumulado em determinado período de operação e a previsão de vida futura do componente dentro do regime de segurança, é necessário conhecer ou poder estimar um histórico de carregamentos já ocorridos e futuros.

Existem os carregamentos determinísticos, que podem ser estimados através da previsão de operacionalidade do equipamento. Nesse caso é possível prever com maior assertividade os históricos de carregamentos passados e futuros. Exemplo de carregamento determinístico pode ser um vaso de pressão na indústria, que trabalha com pressões variadas, porém conhecidas e, por vezes, programadas. Por outro lado, existem os carregamentos estocásticos, que são carregamentos que variam de forma randômica e são mais complexos de prever para o futuro e estimar os anteriores. Exemplos de carregamentos estocásticos podem ser, automóveis rodando sobre as

estradas com buracos, carregamentos nas asas de aviões durante o voo e postes de lâmpadas na lateral de estradas (Schijve, 2009).

Nessas situações de carregamento cíclico com amplitudes variadas, são utilizados alguns métodos para a contagem de ciclos e avaliação de vida em fadiga, conjuntamente com as equações da curva S-N e da linha de Goodman Modificado.

### 2.2.1 A regra de Palmgren-Miner

A regra que se classifica como Palmgren-Miner teve origem em 1920, porém, somente foi utilizada mais amplamente a partir de 1945. Essa regra, que visa contabilizar o dano de fadiga, pode ser representada pela equação 16.

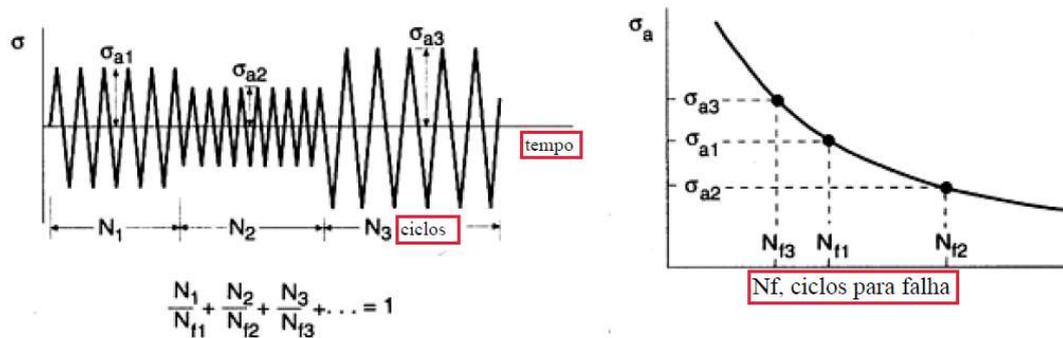
$$\sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1 \quad (16)$$

*N<sub>j</sub>: número de ciclos em um determinado carregamento*

*N<sub>fj</sub>: número de ciclos permitidos sem falha para aquele carregamento,  
com base na curva S – N*

A regra de Palmgren-Miner também pode ser verificada na figura 5, em que N1, N2 e N3 são o número de ciclos de operação em cada um dos regimes de tensão alternada  $\sigma_{a1}$ ,  $\sigma_{a2}$  e  $\sigma_{a3}$ , e Nf1, Nf2 e Nf3 são os números de ciclos permitidos para cada tensão dos regimes, lidos na curva S-N na direita da figura. Com o dano acumulado para cada um dos regimes, procede-se com o somatório dos danos dos três regimes, que fornece o dano total, que é esperado ser menor que 1 para permitir a continuidade operacional com segurança (ASM Handbook, Volume 19, 1997).

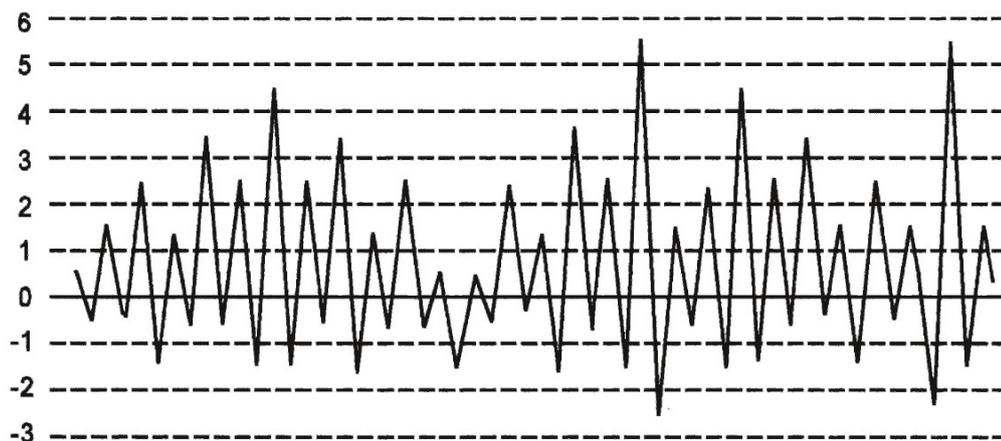
Figura 5 - Ilustração do conceito da regra de Palmgren-Miner



Fonte: ASM Handbook, Volume 19 (1997, p. 253)

O histórico de carregamento representativo da figura 5, apesar de conter amplitudes variadas, permite facilmente a identificação das amplitudes e uma contagem de ciclos em cada regime de amplitude diferente relativamente simples. No entanto, existem históricos de carregamento com variações de amplitudes como representado na figura 6, em que é difícil uma avaliação visual das amplitudes e contabilização do número de ciclos que contribuem efetivamente para o dano de fadiga.

Figura 6 - Representação de histórico de carregamento com amplitudes de carregamento variando de forma randômica



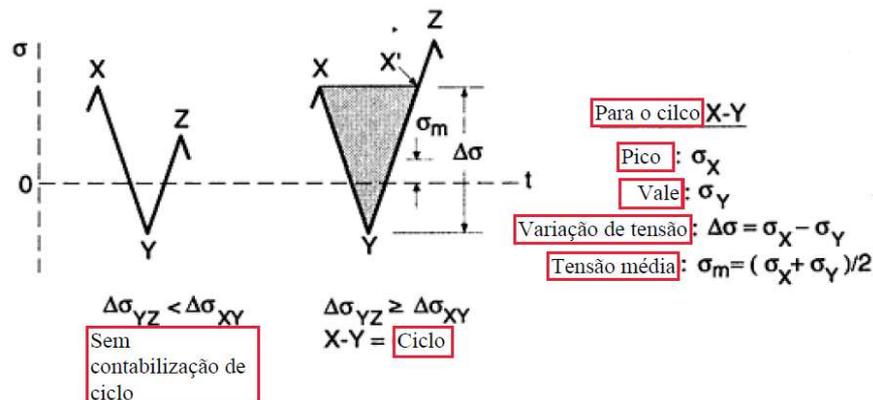
Fonte: Schijve (2009, p. 269)

### 2.2.2 O método Rainflow de contagem de ciclos

Para históricos de carregamento como os representados pela figura 6, existem diversos métodos propostos pela literatura e normas para contabilização do número de ciclos que contribuem efetivamente para o dano de fadiga. Uma das principais normas que estabelece os métodos de contagem de ciclos em análises de fadiga é a ASTM E 1049, na qual são fornecidos algoritmos para a programação computacional dos principais métodos.

O método que tem mostrado melhores resultados na prática para a contagem de ciclos efetivos é o método de Rainflow. O método de Rainflow estabelece que um ciclo efetivo deve ser contabilizado toda a vez que a variação de amplitude entre um pico e um vale anterior seja menor que a variação de amplitude entre um pico e um vale posterior. O conceito pode ser verificado na figura 7, em que se observam duas condições. No eixo das abscissas, se tem o tempo e no eixo das ordenadas, se tem as tensões. X e Z representam dois picos de tensão e Y representa um vale de tensão. Na condição do lado esquerdo da figura, a variação de tensão anterior, entre o pico X e o vale Y, é maior que a variação de tensão posterior entre o vale Y e o pico Z, ocorrendo que nessa condição a variação de tensão entre X e Y não contabiliza um ciclo efetivo por Rainflow. Diferentemente, na condição do lado direito da figura, observa-se que a variação de tensão anterior entre X e Y é menor que a variação de tensão posterior entre Y e Z, ocorrendo que nessa condição a variação de tensão entre X e Y contabiliza um ciclo efetivo por Rainflow (ASM Handbook, Volume 19, 1997).

Figura 7 - Conceito do método Rainflow de contagem de ciclos



Fonte: ASM Handbook, Volume 19 (1997, p. 254)

Com o conceito supracitado é possível elaborar um algoritmo que realize a contagem de ciclos em um computador, pois para históricos mais longos uma análise visual torna-se muito extenuante. Existem programas específicos para essa contagem, porém uma análise pode também ser realizada através de procedimentos utilizando planilhas do *software* Excel da Microsoft.

## **2.3 Análise de tensões**

No item 2.1.4 foi abordado o conceito de concentradores de tensão para contabilizar os efeitos da variação da geometria de um elemento submetido a um determinado carregamento em amplificar a tensão nominal nos locais de mudança de geometria. Esta abordagem é relativamente prática para geometrias mais simples e que possuem soluções de normas ou literatura para as equações de concentração de tensões. No entanto, existem muitas geometrias mais complexas que não possuem essa solução disponível. Nesses casos se recorre geralmente a uma análise computacional por *software* que utiliza a teoria de elementos finitos como base para a análise de tensões.

### **2.3.1 Teoria básica de análise de tensões por elementos finitos (FEA)**

Um elemento mecânico submetido a carregamentos é um corpo contínuo que pode ser discretizado (subdividido) em uma grande quantidade finita de outros elementos (shigley, 2009). O termo genérico “grande quantidade” é utilizado, pois a quantidade de elementos depende do nível de precisão da análise que o profissional necessita, pode variar muito e impacta na capacidade computacional necessária para realizar a análise de tensões. A FEA pode fornecer diretamente a tensão localizada nas variações geométricas do componente em estudo, sem a necessidade de se determinar especificamente um coeficiente de concentração de tensões. Imagem representativa de uma biela de um mecanismo eixo manivela discretizada para a aplicação da análise de tensões por elementos finitos pode ser verificada na figura 8.

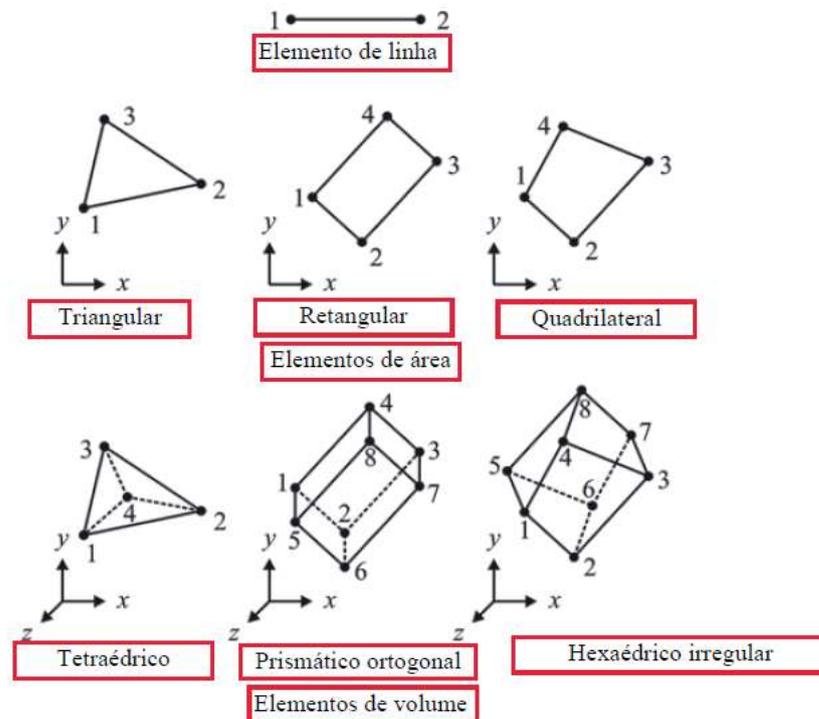
Figura 8 - Biela (b) subdividida em elementos finitos (a) para FEA



Fonte: Shigley (2008, p. 934)

Exemplos de elementos utilizados na divisão de um corpo contínuo podem ser verificados na figura 9.

Figura 9 - Elementos utilizados em uma análise por FEA



Fonte: Madenci e Guven (2015, p. 4)

Nos elementos da figura 9, utilizados na discretização do contínuo, os pontos numerados são chamados de nós e descrevem, em conjunto com os demais nós do

elemento, uma função polinomial. Quanto maior o número de nós que um elemento possui, maior é o grau do polinômio associado ao elemento para a análise. O conjunto dos vários elementos que formam o contínuo é chamado de malha. Na análise das tensões, os polinômios são arranjados de forma matricial e soluções para as diversas variáveis de deslocamento são extraídas computacionalmente. A matemática analítica de base para a análise por elementos finitos é consideravelmente complexa e não será abordada no referencial teórico deste trabalho.

Visto que aos elementos são associadas propriedades, que são oriundas das propriedades do material que se estabelece para um componente, as soluções matemáticas das matrizes de deslocamento são utilizadas em conjunto com teorias de elasticidade, para que sejam fornecidas as tensões resultantes de um determinado carregamento. A maioria dos softwares fornece como tensão, a tensão equivalente de von Mises, que é uma medida para a energia de distorção do componente submetido à um carregamento. As tensões fornecidas pela análise computacional por FEA podem ser comparadas a tensões admissíveis de códigos para verificação de segurança estática ou para análises de vida em fadiga.

### 2.3.2 Aplicação da teoria de FEA através de *softwares* para análise de componentes

Como mencionado no item anterior, a matemática analítica para a solução das matrizes de equações polinomiais da malha dos elementos finitos que representa um componente é expressivamente complexa e praticamente impossível de ser executada sem auxílio computacional. Portanto, existem *softwares* que podem ser programados para essas soluções, dentre eles o Femap NX Nastran.

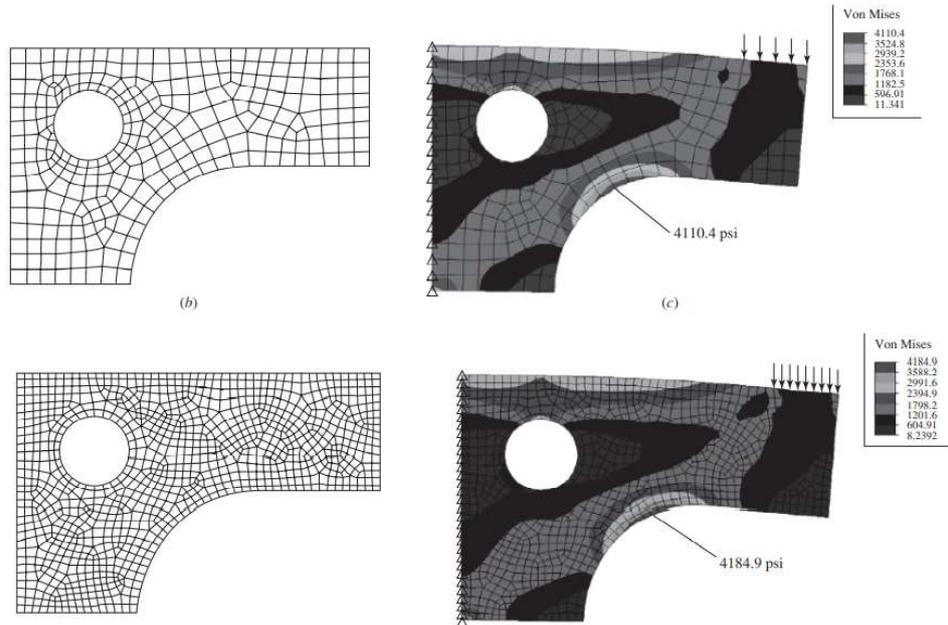
O procedimento de análise consiste em elaborar um modelo (componente mecânico) no próprio *software* de FEA, ou em algum software de CAD e importar para o de FEA. Sobre esse modelo, que deve representar o mais fidedignamente possível o componente real, principalmente no que tange às geometrias complexas e aos concentradores de tensão, é elaborada uma malha de elementos finitos aos quais é atribuída uma propriedade, através da seleção do material do componente. A seleção do tipo de elemento, depende do grau de refinamento requerido na análise, que é diretamente proporcional à capacidade computacional requerida. Elementos triangulares são geralmente evitados pela dificuldade de formarem geometrias curvas e por não fornecerem resultados de tensões muito precisos em relação aos demais

tipos de elementos. No entanto, elementos com muitos nós e geometria tridimensional, que geram resultados consideravelmente mais refinados, consomem muito da capacidade computacional. O que geralmente pode ser realizado é uma análise de sensibilidade, variando o tamanho dos elementos da malha e o tipo e verificar as mudanças nos resultados. Na medida em que o aumento no refinamento da malha não causa diferenças expressivas nos resultados de análise de pós-processamento, o mesmo não é mais justificado (Norton, 2013).

Além da seleção do tipo e tamanho do elemento da malha, é necessário definir as condições de contorno para que na aplicação do carregamento seja garantida a estabilidade do sistema. As condições de contorno estão, geralmente, relacionadas aos graus de liberdade dos nós da malha. Para determinados tipos de carregamento, como o engaste, por exemplo, alguns dos nós de elementos da malha que constitui o contínuo deverão ter os três graus de liberdade translacionais e os três graus de liberdade rotacionais restritos.

Posteriormente ao estabelecimento das condições de contorno, pode-se prosseguir com a configuração do sistema de carregamento, que podem ser força concentrada, pressão, e diversos outros. Podem também ser estabelecidas funções de carregamento. A figura 10 ilustra um componente representativo, com uma malha de elementos elaborada, um carregamento na extremidade direita superior do componente e condições de contorno para o engaste aplicadas aos nós do lado esquerdo do componente. A figura 10 também ilustra dois graus de refinamento de malha e o resultado nas tensões de von Mises.

Figura 10 - Ilustração de componentes básicos de uma análise por FEA



Fonte: Shigley (2008, p. 944)

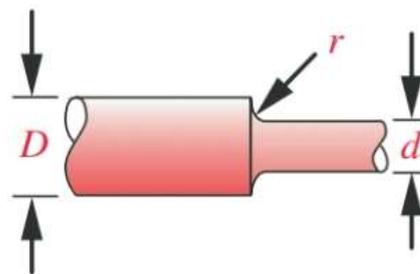
### 3 METODOLOGIA

Neste item serão descritos os métodos utilizados na aplicação do procedimento para a solução do problema de avaliação de vida em fadiga, conforme descrito no item 1.

#### 3.1 Definição do modelo do componente para verificação da vida em fadiga

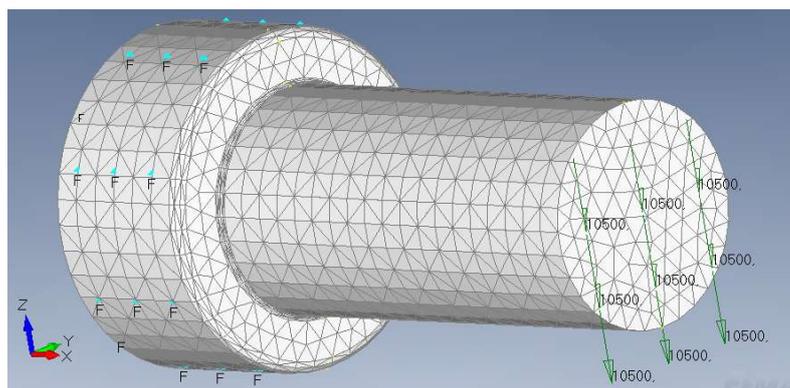
O modelo de componente que será utilizado no desenvolvimento do procedimento pode ser verificado nas figuras 11 e 12.

Figura 11 - Modelo de componente para análise de fadiga



Fonte: Norton (2013, p. 1000)

Figura 12 - Condições de contorno no modelo da figura 11



Fonte: Elaborado pelo autor

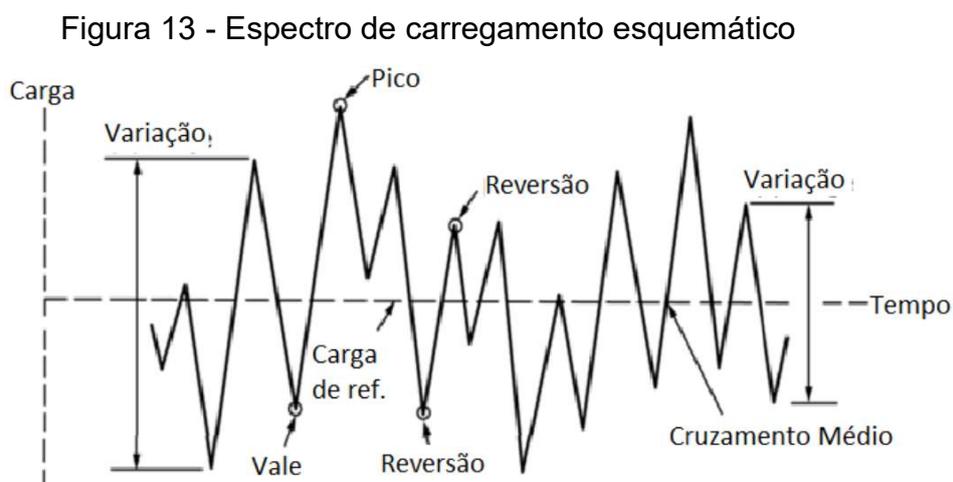
No modelo da figura 11 o diâmetro maior “D” terá dimensão de 60 mm, o diâmetro menor “d” terá dimensão de 40 mm e o raio “r” terá dimensão de 1,5 mm. O

comprimento da região com o diâmetro maior será de 40 mm e o comprimento da região de diâmetro menor será de 100 mm.

O componente será engastado no lado de maior diâmetro “D”, na posição da face de transição entre os dois diâmetros, e uma força “F” será modelada como aplicada na extremidade da região de menor diâmetro.

### 3.2 Definição do histórico de amplitudes de carregamento cíclico que será aplicado ao componente

Para estabelecer o procedimento de estimativa de dano por fadiga e previsão de vida futura, será estipulado um histórico de carregamentos variados arbitrário, como pode ser observado na figura 13.



Fonte: ASTM E 1049 (2017, p. 2)

O histograma de carregamento da figura 13 será utilizado no desenvolvimento do procedimento de contagem de ciclos pelo método de Rainflow e para o dano de fadiga pelo método de Palmgren-Miner. A cada pico e vale do espectro serão atribuídas forças de carregamento teóricas e o espectro será repetido 4000 vezes para estimar-se o dano de fadiga ocorrido e o tempo de vida futuro dentro do regime de segurança, trabalhando com esse formato cíclico de carregamento. Nenhum dos valores de tensões que serão atribuídos aos picos e vales terá valor menor ou igual a zero. As forças de carregamento serão estabelecidas de maneira que gerem tensões

no componente na região de alto ciclo da curva S-N, porém não na região de vida infinita, abaixo do limite “Sem” para tensões médias acima de zero. A variação entre essas forças será estabelecida por análise visual do espectro esquemático da figura 13, com auxílio de elementos computacionais para gerar linhas paralelas horizontais nos picos e vales e com o uso de proporção entre os comprimentos verticais dos mesmos.

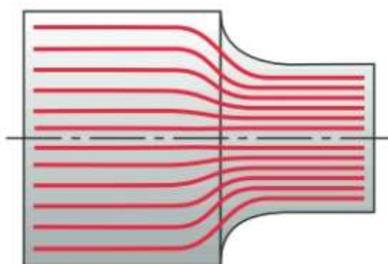
### 3.3 Definição da metodologia de cálculo das tensões

Para o cálculo das tensões serão utilizadas duas metodologias, uma analítica, visto que o componente a ser analisado possui geometria pouco complexa, e outra numérica, visto que o procedimento poderá ser aplicado em componentes com geometrias mais complexas, para as quais poderá não haver solução analítica disponível. O modelo numérico tem por objetivo, também, estabelecer a interface com os dois softwares utilizados, o FEMAP NX Nastran e o Microsoft Excel.

#### 3.3.1 Metodologia analítica de cálculo das tensões

Pela análise visual do componente da figura 11, pode-se observar que a região em que ocorre o desvio mais abrupto das linhas de força é na região do raio de concordância entre o diâmetro menor e a face da seção transversal na transição de diâmetros, como pode ser verificado na figura 14. Portanto a região é considerada um concentrador de tensões e será utilizada no cálculo das tensões para a análise de fadiga.

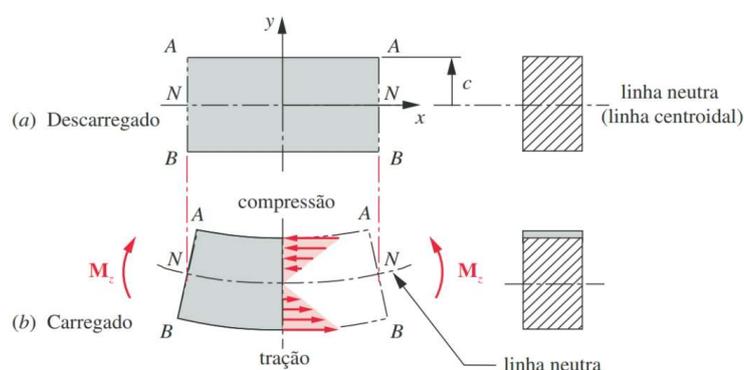
Figura 14 - Linhas de fluxo de força na transição de diâmetros



Fonte: Norton (2013, p. 191)

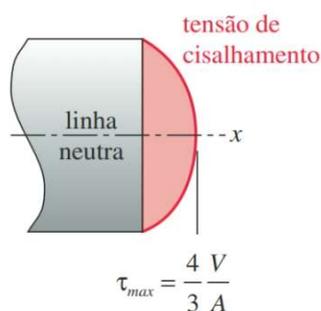
As linhas de fluxo de força são mais sinuosas e o efeito da mudança de geometria em aumentar as tensões é mais expressivo na região externa, próximo ao raio “r” de concordância. As maiores tensões de flexão se localizam próximo do raio “r” da figura 11, como pode ser visto, representativamente na figura 15, e as maiores tensões de cisalhamento se localizam no centro da seção transversal, como pode ser observado, representativamente na figura 16.

Figura 15 - Distribuição de tensões (setas horizontais vermelhas) na flexão



Fonte: Norton (2013, p. 156)

Figura 16 - Distribuição de tensões de cisalhamento na flexão



Fonte: Norton (2013, p. 161)

Como as tensões de flexão são mais expressivas na região de concentração de tensão, serão utilizadas somente as tensões de flexão na análise de fadiga, visto que as tensões de cisalhamento são desprezíveis próximo a superfície externa, onde há a maior concentração de tensões.

A equação 17 será utilizada no cálculo da tensão máxima de flexão na região do concentrador de tensões, que é na mudança de diâmetros.

$$\sigma_{f_{m\acute{a}x}} = Kf \times \left( \frac{Mf_{m\acute{a}x} \times c}{I} \right) \quad (17)$$

*Kf: coeficiente de concentração de tensões*

*corrigido para a sensibilidade ao concentrador; adimensional*

*Mf<sub>máx</sub>: momento fletor máximo na transição de diâmetros; N × mm*

*c: distância da linha neutra a fibra mais externa; mm*

*I: momento de inércia; mm<sup>4</sup>*

A máxima tensão de flexão na equação 17 será calculada pela observação do modelo a ser analisado pelo lado esquerdo, onde será aplicada a sequência de carregamentos cíclicos de amplitude variada. A equação 18 será utilizada no cálculo do momento máximo de flexão.

$$Mf_{m\acute{a}x} = F \times a \quad (18)$$

*F: força de carregamento oriunda do histograma; N*

*a: distância da extremidade livre do engaste até a transição de diâmetros; mm*

*Mf<sub>máx</sub>: momento fletor máximo; N × mm*

A equação 19 será utilizada no cálculo do momento de inércia para uma seção transversal cilíndrica, conforme o modelo escolhido para ser utilizado no procedimento.

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad (19)$$

*d: diâmetro menor do componente; mm*

*I: momento de inércia da área da seção transversal no plano normal à linha de centro do componente cilíndrico; mm<sup>4</sup>*

Como o componente não é curvo, ou seja, a linha de centro é uma curva com raio infinito, a distância “c”, na equação 17 será a metade do diâmetro.

O coeficiente *Kf*, na equação 17 será calculado através da equação 20.

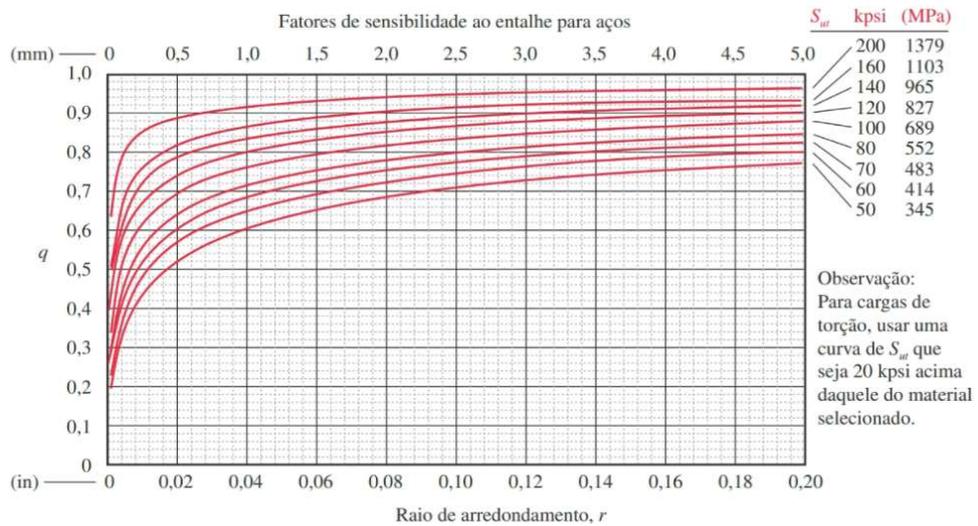
$$Kf = (q \times (Kt - 1)) + 1 \tag{20}$$

*q*: fator de sensibilidade ao concentrador; adimensional

*Kt*: coeficiente de concentração de tensões; adimensional

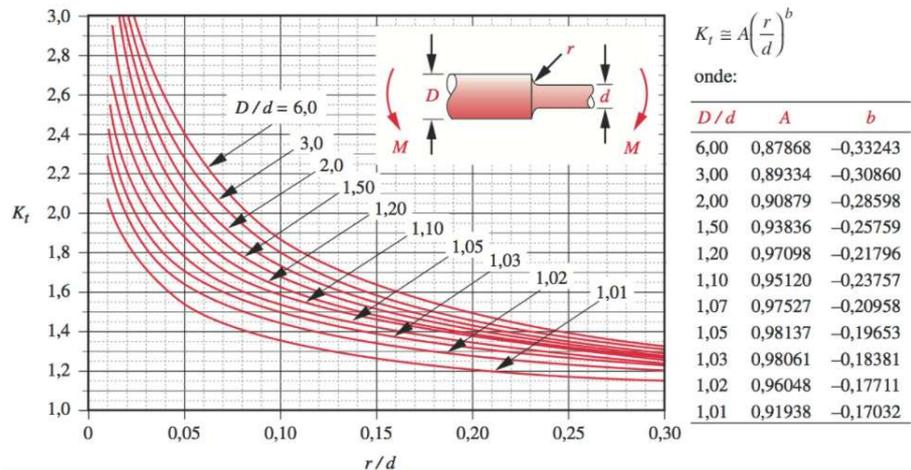
O fator de sensibilidade ao concentrador *q* e o coeficiente de concentração de tensões *Kt* serão extraídos das figuras 17 e 18, respectivamente, utilizando os dados de tensão de resistência máxima do aço 1045 laminado a quente e as características geométricas do modelo descrito no item 3.1

Figura 17 - Referência para extração do fator de sensibilidade



Fonte: Norton (2013, p. 344)

Figura 18 - Referência para extração do coeficiente de concentração de tensões



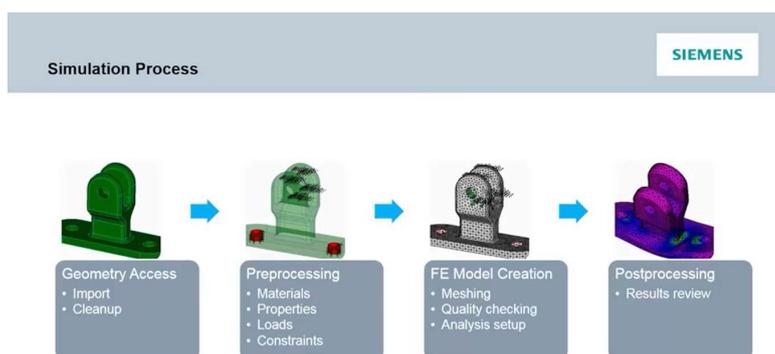
Fonte: Norton (2013, p. 1000)

### 3.3.2 Metodologia numérica de cálculo das tensões

Na metodologia numérica, o cálculo das tensões será feito através do software de elementos finitos FEMAP NX Nastran. Primeiramente, será elaborado o modelo do componente a ser analisado no software SolidWorks, através dos recursos de sketch, extrude e fillet para a execução dos círculos de base para o cilindro, execução da extrusão dos cilindros com os comprimentos estabelecidos no item 3.1 e para a execução do raio de arredondamento estabelecido no item 3.1, respectivamente.

Posteriormente, será realizada a análise por elementos finitos do modelo do item 3.1, no software FEMAP NX Nastran, utilizando a orientação de mídia da figura 19, disponível no canal da Siemens, que é a empresa criadora do software. Nessa primeira etapa ainda não será trabalhada a interface com o Microsoft Excel.

Figura 19 - Referência para a análise de tensões por elementos finitos



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=kPL6cwfvE08>

Essa primeira análise, sem a inclusão do histórico tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade para o refinamento da malha de elementos no modelo. Essa etapa é importante para que o refinamento da malha não seja insuficiente, incorrendo em redução expressiva de precisão, ou além do suficiente, incorrendo em uso desnecessário de capacidade computacional que não é revertido em precisão dos resultados.

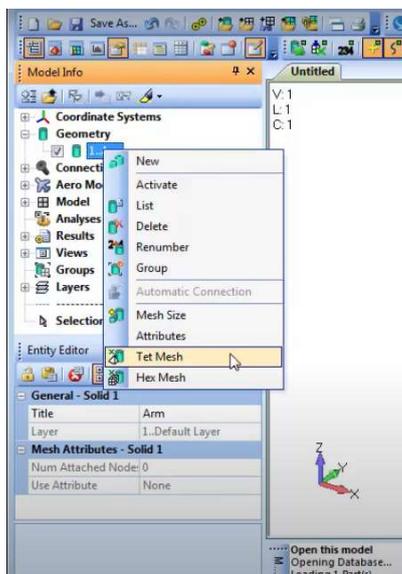
A primeira etapa será a importação do modelo do *SolidWorks*, através do comando *Import Geometry* e a identificação e correção de deficiências do modelo através do comando *Solid Cleanup*. Na sequência serão estabelecidos a propriedade de material, a propriedade dos elementos, o carregamento e as condições de contorno

da modelagem. A propriedade de material será configurada pela escolha do aço 1045 na biblioteca de materiais do *software*, nisso está incluso as propriedades de módulo de elasticidade, peso específico, limites de escoamento e de máxima resistência, e condições de isotropia do material. A propriedade dos elementos será selecionada no comando *property* e o tipo de elemento será selecionado *solid*.

Selecionado o material e a propriedade dos elementos, será selecionada a carga no comando *Load* e será atribuída uma força localizada na extremidade livre do cilindro de menor diâmetro do componente descrito no item 3.1. A magnitude da força será de 12000 N, o que gera uma tensão dentro dos limites entre as regiões de fadiga de baixo ciclo e a fadiga de alto ciclo e vida infinita. A força será aplicada no nó do último elemento da malha. Por conseguinte, serão estabelecidas as condições de contorno para o sistema de carregamento através do comando *constraints* e gerar-se-á uma restrição de todos os graus de liberdade em toda a superfície cilíndrica de diâmetro maior “D”. Essa restrição será realizada através do comando *constraints, on surface, fixed* e estabelece a condição de engaste do elemento em estudo.

Posteriormente, será estabelecida a malha de elementos finitos através do menu de comando, conforme pode ser verificado na figura 20.

Figura 20 - Seleção para inserir a malha no FEMAP NX Nastran



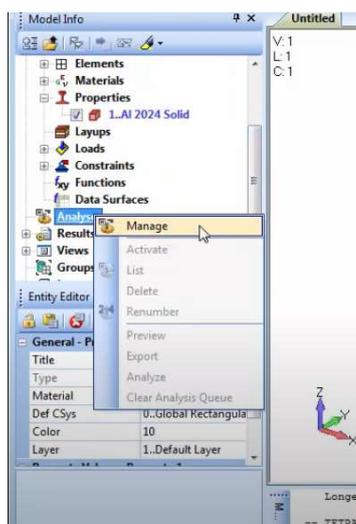
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=JalWBEgK6aQ>

O comando *Tet Mesh* observado na figura 20 refere-se à seleção de um elemento de volume de forma tetragonal com 4 nós, semelhante ao elemento

tetraédrico mostrado na figura 9. Inicialmente se estabelecerá um tamanho de 2,5 para o elemento. Esse parâmetro poderá ser modificado conforme a análise iterativa de sensibilidade da malha.

Na etapa seguinte, será realizada a análise das tensões através do comando mostrado na figura 21.

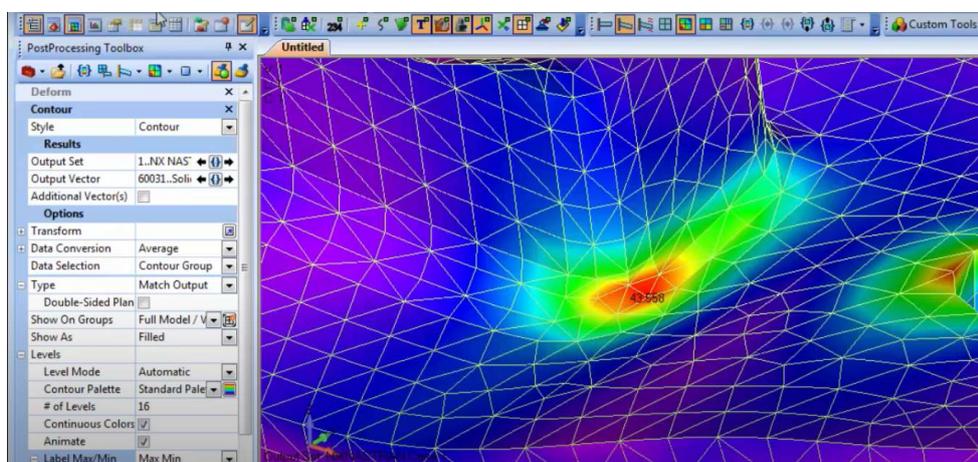
Figura 21 - Seleção de comando para análise no FEMAP NX Nastran



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=JalWBEgK6aQ>

Uma última etapa da primeira iteração será a etapa de pós processamento em que serão analisadas as tensões na região de interesse que é na mudança de diâmetros do componente descrito no item 3.1. Para essa etapa utilizar-se-ão os recursos do comando *PostProcessing* do FEMAP NX Nastran para atribuir escala de cores e amplificar deformações. Parte desses recursos pode ser verificada na figura 22 em que pode se observar parte de um elemento analisado pelo software em que as variações de cores indicam a região de concentração de tensões. Espera-se que se possa com esse recurso otimizar a análise de sensibilidade.

Figura 22 - Comando de verificação dos resultados da análise de tensões no FEMAP NX Nastran



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=8hJcqmNRHM8>

A análise descrita acima será reiterada com subsequentes refinamentos de malha para se verificar o tamanho de elemento finito mais adequado para atender os requisitos de precisão e não onerar excessivamente o recurso de capacidade computacional. A análise considerando o histórico de amplitudes variadas será abordada em outro item da metodologia do presente trabalho.

### 3.4 Inclusão do histórico de carregamentos na análise

Para cada pico e cada vale do histórico de carregamentos estipulado para a análise, conforme figura 13, será atribuído um valor de força para o carregamento de engaste e os métodos de Rainflow e Palmgren-Miner serão utilizados para a contabilização do dano por fadiga.

#### 3.4.1 Tratamento do espectro de carregamentos

Após atribuídas forças para cada pico e vale do espectro da figura 13, através de uma análise visual e com auxílio computacional simples para traçar linhas paralelas a cada pico e a cada vale, proceder-se-á com o método de contagem de Rainflow, descrito no item 2.2.1. Esse procedimento será realizado no software Microsoft Excel, através de uma sequência de etapas utilizando a função condicional “SE”, a transferência de valores entre colunas e entre tabelas, e utilizando a função “SOMA” para contabilizar o número de ciclos em cada etapa da contagem. As figuras 23 e 24

ilustram as etapas da primeira parte da metodologia de contagem de ciclos para valores representativos da proporção dos picos e vales. Esses ainda não são valores de forças, porém o procedimento quando da aplicação com valores de forças será o mesmo e deverá fornecer o mesmo número de ciclos, pois o que rege a contagem são as relações entre picos e vales subsequentes. Os valores de força que serão atribuídos para a análise do modelo serão discutidos na análise dos resultados.

Figura 23 - Primeiras etapas da primeira fase da contagem de ciclos por Rainflow

	G	I	J	K	L
1					
2	Etapas	máximo	mínimo		
3	1ª	74	2		
4	2ª	74	2		
5	3ª	74			

Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Etapas subsequentes da primeira fase da contagem de ciclos por Rainflow

	D	E	F	G	H	I	J	K	L
10	Valores representativos dos picos e vales do histograma. Já arranjados iniciando pelo maior valor.	4ª- contabilizar para cada conjunto de três valores a faixa de tensões: se a diferença entre os dois primeiros for maior que a diferença entre os dois últimos, não contabiliza ciclo e o valor é zero.	PRIMEIRA CONTAGEM DE CICLOS quando o número em E for um e o que antecede for 0, certamente ter-se-á um ciclo. Se o que antecede for 1, o ciclo que formou anteriormente não foi removido ainda, portanto não há certeza de que forme o ciclo presente, portanto, no momento, este é considerado 0 até segunda contagem	5ª- replicar os valores de D		6ª- replicar os valores de F	7ª- primeira etapa de eliminação dos ciclos já contabilizados	8ª- segunda etapa de eliminação dos valores dos ciclos já contabilizados	Novos valores para recontagem de ciclos, após a remoção dos ciclos já contabilizados. Necessário eliminar os 0
11	74	0	0	0	74	0	74	74	74
12	39	1	1	1	39	1	0	0	0
13	62	0	0	0	62	0	62	0	0
14	14	0	0	0	14	0	14	14	14
15	49	1	1	1	49	1	0	0	0
16	27	0	0	0	27	0	27	0	0
17	49	0	0	0	49	0	49	49	49
18	2	0	0	0	2	0	2	2	2
19	35	1	1	1	35	1	0	0	0
20	9	0	0	0	9	0	9	0	0
21	62	1	1	1	62	1	0	0	0
22	19	0	0	0	19	0	19	0	0
23	74	0	0	0	74	0	74	74	74
24	24	1	1	1	24	1	0	0	0
25	51	0	0	0	51	0	51	0	0
26	17	1	1	1	17	1	0	0	0
27	36	1	1	1	36	0	36	0	0
28	4	0	0	0	4	0	4	4	4
29	64	1	1	1	64	1	0	0	0
30	14	0	0	0	14	0	14	0	0
31	74	0	0	0	74	0	74	74	74
32		Primeiro somatório de ciclos	7						

Fonte: Próprio autor

Nas figuras 23 e 24 pode-se observar na barra de equação “fx” a função utilizada para a contabilização dos ciclos, baseada no conceito do método de Rainflow do item 2.2.1. As equações no Excel e as etapas do procedimento foram elaboradas pelo autor deste trabalho com base na interpretação do conceito dos métodos do Handbook da ASM, volume 19, de 1998 e na norma ASTM E 1049.

Como pode ser verificado nas figuras 23 e 24, primeiramente, o histórico de valores representativo dos picos e vales é organizado de tal forma que todos os valores a frente do maior pico são transferidos para o início da sequência, isso é verificado na coluna “D” da figura 24. Por conseguinte, procede-se com as etapas 4, 5, 6, 7 e 8 antes da seguinte fase do procedimento, que é feita em outra tabela, cujo título pode ser observado na parte inferior da figura 24 como “Segunda contagem de ciclos”. Para a primeira contagem de ciclos o número resultante foi de 7 ciclos, como pode ser observado na parte inferior da figura 24.

A metodologia da segunda e da terceira fase de contagem de ciclos pode ser observada nas figuras 25 e 26, respectivamente, assim como as funções na barra de função “fx”.

Figura 25 - Segunda fase de contagem de ciclos por Rainflow

	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1									
2	valores remanescentes da primeira contagem	Primeira etapa da segunda contagem	Segunda etapa da segunda contagem	replicar valores de C	replicar valores de E	terceira etapa da eliminação de ciclos já contados	segunda etapa da eliminação de ciclos já contados	Valores para a próxima etapa	
3	74	0	0	74	0	74	74	74	
4	14	1	1	14	1	0	0		
5	49	1	0	49	0	49	0		
6	2	0	0	2	0	2	2		
7	74	1	1	74	1	0	0		2
8	4	1	0	4	0	4	0		
9	74	0	0	74	0	74	74		74
10									
11									
12		Somatório da segunda contagem		2					
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

Fonte: Próprio autor

Figura 26 - Terceira fase de contagem de ciclos por Rainflow

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2			valores remanescentes da primeira contagem	Primeira etapa da segunda contagem	Segunda etapa da segunda contagem	replicar valores de C	replicar valores de E	primeira etapa da eliminação de ciclos já contados	segunda etapa da eliminação de ciclos já contados	
3			74	1	1	74	74			
4			2	1	0	2	2			
5			74	0	0	74	74			
6				Somatório da terceira etapa	1					
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										

Fonte: Próprio autor

A figura 27 mostra o número total de ciclos contabilizados nas três fases e a equação utilizada na barra de funções.

Figura 27 - Número total de ciclos por Rainflow

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Total de ciclos	10													
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															

Fonte: Próprio autor

O espectro de carregamento da figura 13 será repetido aproximadamente 4000 vezes, o que será multiplicado pelos 10 ciclos contabilizados no espectro, totalizando 40000 ciclos.

### 3.4.2 Tensões, número de ciclos permissíveis e dano de fadiga do histograma de carregamentos

Após a utilização do método de Rainflow para a contabilização do número de ciclos do histórico de carregamentos estipulado com as variações de carregamento representadas pela figura 13, calcular-se-á para cada ciclo contabilizado em cada uma das 3 etapas descritas no procedimento do item 3.4.1, a tensão média, a tensão alternada, a tensão máxima, o número de ciclos de carregamento permitidos e o dano de fadiga no elemento do modelo.

As tensões máximas, tensões médias e alternadas serão calculadas utilizando a equação 17 repetida abaixo.

$$\sigma_{f_{m\acute{a}x}} = Kf \times \left( \frac{Mf_{m\acute{a}x} \times c}{I} \right) \quad (17)$$

Na qual, o momento de flexão será calculado pela equação 18, repetida abaixo.

$$Mf_{m\acute{a}x} = F \times a \quad (18)$$

Para as três tensões, serão utilizadas as forças estabelecidas e as equações 17 e 18 serão compiladas na planilha do Microsoft Excel, conforme pode ser verificado nas figuras 28, 29 e 30. Em cada uma dessas figuras a equação utilizada pode ser verificada na barra de funções fx e na própria célula. A unidade de tensão nas planilhas é MPa.

Figura 28 - Compilação da tensão alternada na planilha do Excel

	R	S	T	U	V
8					
9					
	Ciclos da contagem-columa l	base	Força(N)	Tensão de flexão da planilha de tensões	tensão alternada
10					
11	0	300	22200	608,8606811	=SE(R11=1;ABS((U12-U11)/2);0)
12	1	300	11700	320,8860347	94,62024099
13	0	300	18600	510,1265166	0
14	0	300	4200	115,1898586	0
15	1	300	14700	402,1645051	00,50631747

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Compilação da tensão média na planilha do Excel

	R	S	T	U	V	W
8						
9						
	Ciclos da contagem-coluna I	base	Força(N)	Tensão de flexão da planilha de tensões	tensão alternada	tensão média
10						
11	0	300	22200	608,8606811	0	=SE(R11=1;((U12+U11)/2);0)
12	1	300	11700	320,8860347	94,62024099	415,5062756
13	0	300	18600	510,1265166	0	0
14	0	300	4200	115,1898586	0	0
15	1	300	14700	403,1645051	90,50631747	312,6581876
16	0	300	8100	222,1518701	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Compilação da tensão máxima na planilha do Excel

	T	U	V	W	X
8					
9					
	Força(N)	Tensão de flexão da planilha de tensões	tensão alternada	tensão média	Tensão máxima
10					
11	22200	608,8606811	0	0	=W11+V11
12	11700	320,8860347	94,62024099	415,5062756	510,1265166
13	18600	510,1265166	0	0	0
14	4200	115,1898586	0	0	0
15	14700	403,1645051	90,50631747	312,6581876	403,1645051
16	8100	222,1518701	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida serão estabelecidos os limites  $S_e$  e  $S_f'$  para o sistema de carregamento. Esses limites serão os mesmos para todos os ciclos, pois o carregamento será selecionado de maneira a se trabalhar dentro do regime elástico, em uma perspectiva macroscópica de fadiga. Conforme o item 2.1.1, o limite  $S_e'$  será de 0,5 vezes o limite de resistência a tração ( $S_{ut}$ ), que resulta em 282,5 MPa. O limite  $S_f'$ , conforme o item 2.1.2, será calculado pela equação 1 repetida abaixo.

$$S_f' = f^* S_{ut} \quad (1)$$

O fator  $f$  será extraído do gráfico 3, com entrada da tensão de limite de resistência a ruptura do material do modelo, que é de 565 MPa. Com isso o fator  $f$  é de aproximadamente 0,878 e o limite  $Sf'$  calculado é de 496,07 MPa.

O limite  $Se$  corrigido para fatores de temperatura, carregamento, tamanho, condição de superfície e confiabilidade, conforme descrito no item 2.1.3, será calculado através da equação 21.

$$Se = Se' \times ka \times kb \times kc \times kd \times ke \quad (21)$$

A descrição dos fatores modificadores na equação 21 foi realizada no item 2.1.3. Na figura 31 pode ser verificada a compilação dos fatores e dos limites  $Se$  e  $Se'$  na planilha de Excel do procedimento que será desenvolvido. O limite  $Sf'$  será compilado diretamente na equação do número de ciclos. A unidade das tensões é MPa.

Figura 31 - Limites  $Se$  e  $Se'$  e coeficientes de correção no Excel

	A	B	C	D	E	F
53	Limite de fadiga para 10 <sup>6</sup> ciclos(Se')	correção carregamento	correção temperatura	correção tamanho	correção de superfície(figura 6-26 do norton-usinado)	correção de confiabilidade(95%)
54	282,5	1	1	0,831346429	0,8	0,868
56	Limite de fadiga corrigido(Se)					
57	163,0835662					

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cálculo do número de ciclos permissíveis sem falha ( $N$ ), considerando-se as tensões médias e alternadas de cada ciclo contabilizado pelo método de Rainflow no espectro de carregamento e os limites  $Se$  e  $Sf'$ , será utilizada a equação 15 do item 2.1.6.1, repetida abaixo.

$$N = \frac{10^{\frac{b}{m}}}{\sigma f^{\frac{1}{m}}} \quad (15)$$

$$\sigma f = \frac{Sa}{\left(1 - \left(\frac{Sm}{Sut}\right)\right)}$$

$$b = \log\left(\frac{(0,9 \times S_{ut})^2}{S_e}\right)$$

$$m = \left(\frac{1}{3}\right) \times \log\left(\frac{(0,9 \times S_{ut})}{S_e}\right)$$

O número de ciclos permissíveis (N) para os valores de tensão em cada ciclo contabilizado será usado para calcular o dano de fadiga em cada ciclo através da regra de Palmgren-Miner do item 2.2.1. A compilação desse processo será realizada nas tabelas das etapas de contabilização de ciclos no Excel, como pode ser verificado na figura 32 para a primeira tabela de contagem de ciclos. A equação que será utilizada pode ser verificada na célula.

Figura 32 - Número de ciclos permissíveis e dano de fadiga em cada ciclo

	V	W	X	Y	Z	AA
	tensão alternada	tensão média	Tensão máxima	Número de ciclos permissíveis		Dano de Palmgren-Miner
10						
11	0	0		=SE(R11=0;0;10^((('Cálculo tensões problema'!\$A\$63)/('Cálculo tensões problema'!		
12	94,62024099	415,5062756	510,1265166	\$A\$66)))/((V11/(1-(W11/('Cálculo tensões problema'!\$B\$4))))^1/('Cálculo tensões		
13	0	0		problema'!\$A\$66))))		
14	0	0			0	0
15	90,50631747	312,6581876	403,1645051		267312,9786	3,74093E-06
16	0	0	0		0	0
17	0	0	0		0	0
18	0	0	0		0	0
19	106,9620116	181,0126349	287,9746465		1241204,228	8,05669E-07
20	0	0	0		0	0
21	176,8987114	333,2278052	510,1265166		2721,424488	0,000367455

Fonte: Elaborado pelo autor

O dano acumulado de fadiga de todas as tabelas das etapas será somado, resultando em um dano total que também será multiplicado pelas vezes que o histórico de carregamentos é repetido, o que gera um dano global, que se for menor que 1 indica que o componente ainda pode continuar trabalhando naquele regime de carregamentos. O tempo, ou número de vezes que o carregamento ainda poderá ser aplicado ao componente dentro da segurança pode ser contabilizado diminuindo da unidade o dano já acumulado. O valor resultante da subtração pode ser dividido pelo dano total gerado em um dos históricos de carregamento, o que informa o número de históricos de vida em fadiga ainda admissíveis para o componente.

### 3.5 Interface com o software de elementos finitos

Duas abordagens de interação com o software de elementos finitos Femap NX Nastran serão exploradas no procedimento de previsão de vida em fadiga com amplitudes de carregamento variadas.

#### 3.5.1 Interação singular com extração do coeficiente de concentração de tensões

Nesta abordagem, o *software* supracitado será utilizado no início do procedimento, com aplicação de um carregamento estático ao modelo pré-definido, conforme descrito no item 3.3.2. Dessa primeira análise será obtida uma tensão máxima na região de concentração de tensões mais severa e um coeficiente de concentração de tensões  $K_{tn}$  será obtido através da equação 22.

$$K_{tn} = \frac{\sigma}{\left(\frac{M_{f_{máx}} \times c}{I}\right)} \quad (22)$$

$\sigma$ : tensão máxima fornecida pelo software de elementos finitos

Os termos no denominador da equação 22 estão definidos na equação 17 do item 3.3.1. A tensão é em MPa e o coeficiente  $K_{tn}$  obtido será utilizado em substituição ao coeficiente  $K_f$  na equação 17 e compilado na análise da contagem de ciclos e estimativas de vida em fadiga, conforme descrito no item 3.4.2. Essa abordagem pode ser considerada como adequada, pois se está considerando que os carregamentos impostos mantém as tensões para as diversas amplitudes do espectro de carregamento dentro do regime elástico, portando o mesmo  $K_{tn}$  será utilizado para todos os carregamentos dos ciclos contabilizados, independentemente da magnitude da carga.

#### 3.5.2 Importação e tratamento do espectro de carregamento dentro do software de elementos finitos

Nessa abordagem se explorará a possibilidade de análise do histórico de carregamentos dentro do software Femap NX Nastran. Isso consiste na importação dos dados de carregamento variado do *software* Excel para o *software* Femap através da ferramenta ilustrada na figura 33.

Figura 33 - Importação de dados de carregamento do Microsoft Excel para o Femap  
Nx nastran

LOAD SET ID	LOAD SET TITLE	NODE ID	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	Csys
1	Test1	1	172759,4	-7054,33	-71481,4	18612980	37306690	-65320	0
1	Test1	2	184786,4	-1765,48	-122789	46605590	42919150	-2121290	0
2	Test2	3	281500,8	-3327,41	-162270	19121395	27788715	-25530	0
2	Test2	4	293336,4	-5935,73	-348102	42658790	32929560	-1834020	0
2	Test2	5	273004	-4057,55	-173380	7604950	18500625	-994865	0

0 = basic rectangular  
Coordinate system to be used

1/ Columns D & K are to be filled by users. Nodes IDs and CSYS must all in the Femap model.

2/ The load set ID must be repeated for each nodal load to be included case

3/ Different load application methods could be defined by users.

Fonte: <https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000061xoCjSAI/api-create-load-cases-using-excel-spreadsheet>

Alternativa à planilha mostrada na figura 33, que foi adquirida de um questionamento respondido para um caso semelhante de carregamento variado de um usuário na comunidade *online* da Siemens, funções API (Application Programming Interface) podem ser utilizadas para que o software realize a análise. As funções API fornecem ao usuário um ambiente de programação dentro do *software* Femap, no qual é possível importar e analisar as tensões geradas por um histórico de carregamentos variados, através de uma linguagem de programação VBA (Visual Basic for Applications). O código de programação escrito dentro do Femap importa os dados de carregamento da planilha do Microsoft Excel, que devem ser convertidos em CSV (Comma Separated Values) antes da importação, e gera casos de carregamento que resultam nas diversas respectivas tensões para os ciclos do espectro. Figura de parte de um código API utilizado para importar dados de entrada para a análise no Femap pode ser verificada na figura 34. A função API pode ser acessada no Femap conforme mostrado na figura 35.

Figura 34 - Parte de código escrito para API no Femap

```

← → ↻ 🏠 appliedcax.com/support-and-training/apis/downloads/Nonuniform_Pressure_Applier.BAS
'Attach to the model in a FEMAP session that is already running.

Dim femap As Object
Set femap = GetObject(, "femap.model")

Dim f As Object
Set f = femap.feRead

Dim nd As Object
Set nd = femap.feNode

Dim e1 As Object
Set e1 = femap.feElem

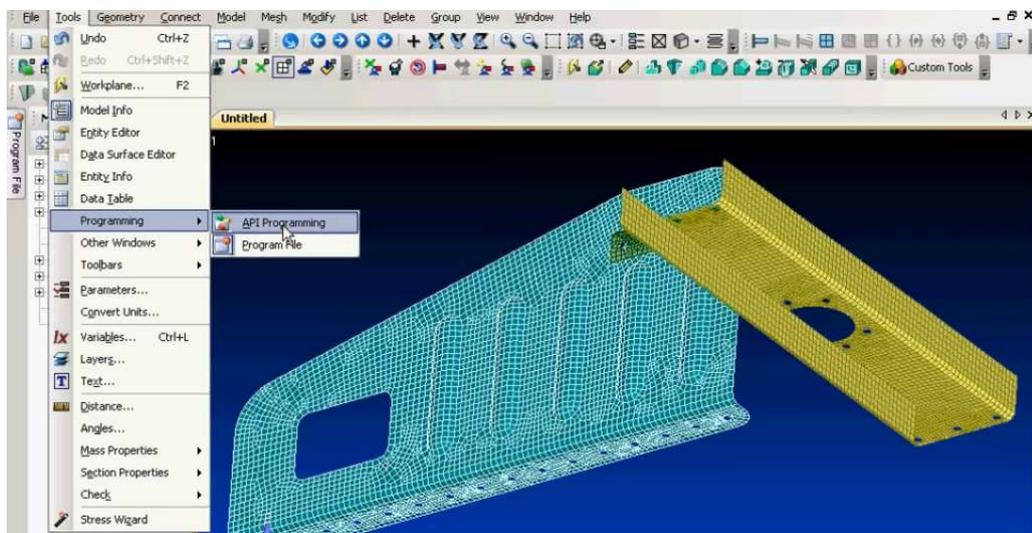
Dim elSet As Object
Set elSet = femap.feSet

Dim rc As Long
Dim fName As String
Dim dataX() As Double
Dim dataY() As Double
Dim dataPress() As Double

```

Fonte: [https://www.appliedcax.com/support-and-training/apis/downloads/Nonuniform\\_Pressure\\_Applier.BAS](https://www.appliedcax.com/support-and-training/apis/downloads/Nonuniform_Pressure_Applier.BAS)

Figura 35 - Acesso a ferramenta API no Femap



Fonte: <https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware/search?query=API>

### 3.6 Validação dos resultados

Após a conclusão da parte teórica da análise do sistema de carregamento em fadiga proposto, foi explorada a abordagem de validação dos resultados na máquina

MTS universal de ensaios disponível no laboratório da UNISINOS. A máquina que será utilizada pode ser verificada na figura 36.

Figura 36 - Foto da máquina para validação dos resultados



Fonte: Laboratório da UNISINOS

Foi explorada a possibilidade de testar o modelo proposto de engaste do item 3.1. A validação desse modelo na MTS foi considerada de maior complexidade, portanto, foi gerado um modelo mais simplificado com carregamento de tração em chapa com furo central. Nessa circunstância a equação da tensão foi modificada, porém as demais etapas do procedimento não sofreram modificações significativas.

A confecção do modelo envolveu etapas de usinagem de torneamento com passes de desbaste e de acabamento para os quais as definições dos parâmetros serão feitas de forma iterativa experimental com as ferramentas disponíveis na UNISINOS.

Como reportado pelo ASM Handbook, volume 19, a definição dos coeficientes modificadores dos limites de fadiga é algo que está sujeito a uma variabilidade considerável na análise de fadiga por tensão versus número de ciclos, e a definição desses coeficientes é afetada pelo método e pelas condições de fabricação e qualidade superficial do componente.

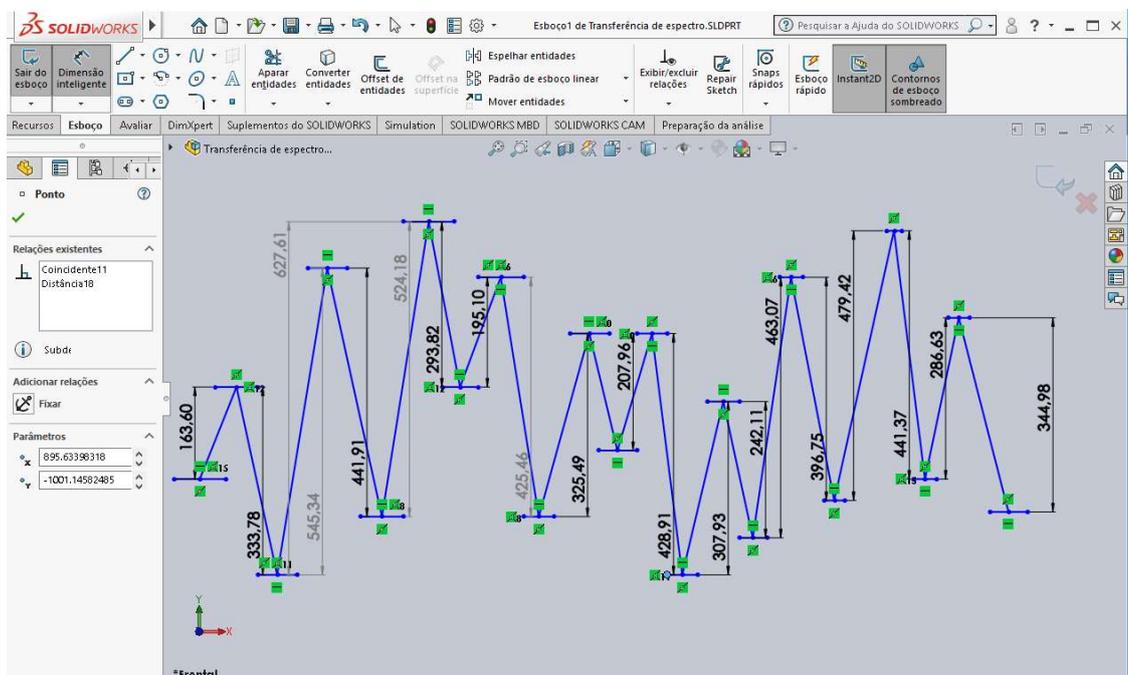
## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa são descritas as adaptações realizadas na metodologia apresentada no item 3 devido às restrições encontradas na aplicação das etapas e são descritos os resultados da aplicação da metodologia abordada. Foram analisados dois modelos de carregamento, o primeiro modelo consistiu em uma chapa com furo central carregada em tração, e o segundo consistiu em eixo engastado em uma extremidade carregado em flexão, com variação de diâmetro.

### 4.1 Adequação do espectro de carregamento

Inicialmente, o espectro de carregamento foi transferido para o *software SolidWorks* e foram extraídas as dimensões entre picos e vales para melhor estimativa da relação entre eles. O espectro transferido com as cotas representativas pode ser verificado na figura 37.

Figura 37 - Espectro da figura 13 transferido par o *SolidWorks*



Fonte: Elaborado pelo autor no *SolidWorks* da UNISINOS

Com as cotas da figura 37 foi estipulado um valor representativo de pico de 68 e os demais valores representativos foram estabelecidos por proporção, o que gerou a coluna de valores representativa dos picos e vales do espectro, conforme pode ser verificado na coluna D da planilha do Excel da figura 38.

Figura 38 - Valores representativos dos picos e vales do espectro da figura 37

	A	B	C	D
11	68,0		5	68,0
12	41,8		6	41,8
13	59,2		7	59,2
14	21,2		8	21,2
15	50,3		9	50,3
16	31,7		10	31,7
17	50,3		11	50,3
18	12,0		12	12,0
19	39,5		13	39,5
20	17,9		14	17,9
21	59,2		15	59,2
22	23,8		16	23,8
23	68,0		17	68,0
24	28,6		18	28,6
25	54,2		19	54,2
26	23,4		20	23,4
27	38,0		1	38,0
28	14,0		2	14,0
29	62,7		3	62,7
30	23,2		4	23,2
31	68,0		5	68,0
32				
33				

Fonte: elaborado pelo autor

Cada um dos valores da coluna D foi multiplicado por um valor de base de 305 para o primeiro modelo e de 230 para o segundo modelo, o que gerou uma força para cada pico e vale, na unidade  $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ . Essas forças foram utilizadas nos respectivos modelos para a aplicação do procedimento de análise de vida em fadiga. Esses valores de base foram estabelecidos por iteração, observando as tensões máximas de cada modelo para que não ultrapassassem o limite de elasticidade. A necessidade do processo acima descrito foi identificada durante a produção de resultados e é justificada para a tentativa de manter o espectro de carregamentos dentro dos limites entre fadiga de baixo ciclo e fadiga de vida infinita, que é a proposta do trabalho. Em uma aplicação prática o usuário da planilha do procedimento entraria com dados de força diretamente na coluna D e a parte de multiplicação pela base seria eliminada da planilha. Alternativa seria entrar com dados de deslocamento na coluna D, porém algumas modificações básicas na planilha seriam necessárias.

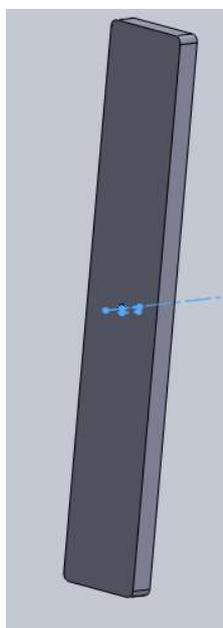
## 4.2 Modelos de componente de aplicação do carregamento

Foram analisados dois modelos para aplicação do procedimento de contagem de ciclos e estimativa de vida. O primeiro modelo foi de chapa com furo no centro, carregada em tração, que não foi abordado de forma específica na metodologia, pois foi uma adição necessária, verificada na produção dos resultados para possibilitar a validação experimental. O segundo modelo consiste no eixo carregado em flexão, proposto na metodologia do item 3. O primeiro modelo foi adicionado para tentativa de validação experimental dos resultados na máquina universal de ensaios.

### 4.2.1 Primeiro modelo de análise

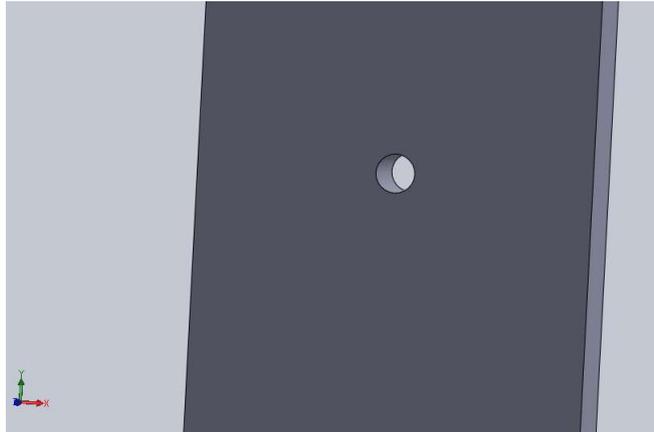
O primeiro modelo consiste na chapa com furo no centro, carregada em tração ao longo de sua maior dimensão, conforme ilustrado nas figuras 39 e 40.

Figura 39 - Ilustração do modelo selecionado para possibilitar a validação experimental dos resultados



Fonte: Elaborado pelo autor no SolidWorks da UNISINOS

Figura 40 - Ilustração do detalhe do furo central



Fonte: Elaborado pelo autor no SolidWorks da UNISINOS

As dimensões da chapa antes da fabricação foram 152,4 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e 6,35 mm de espessura. O furo central possui diâmetro de 2,5 mm. No entanto, após a etapa de fabricação desse modelo para a validação, a dimensão de espessura passou a ser de 5,8 mm devido à etapa de retificação das superfícies laterais da chapa perpendiculares à linha de centro do furo.

#### 4.2.1.1 Tensões de carregamento do primeiro modelo

A tensão de carregamento para cada força do espectro da figura 37 é calculada pela equação 23, e se prevê que as maiores tensões, desconsiderando as distribuições de tensão nas extremidades da chapa, conforme o teorema de Saint Venant, ocorrem no entorno do furo.

$$\sigma_{máxtrat} = \frac{kf_{trat} \times F_{trat}}{A} \quad (23)$$

$\sigma_{máxtrat}$ : Tensão máxima de tração no entorno do furo –  $\frac{N}{mm^2}$

$kf_{trat}$ : coeficiente de concentração de tensões em tração – adimensional

$F_{trat}$ : Força de tração – N

$A$ : área da seção transversal da chapa –  $mm^2$

O coeficiente de concentração de tensões,  $kf_{trat}$ , foi calculado através da equação 20, repetida abaixo para melhor clareza.

$$Kf = (q \times (Kt - 1)) + 1 \quad (20)$$

$q$ : fator de sensibilidade ao concentrador; adimensional

$Kt$ : coeficiente de concentração de tensões; adimensional

O  $Kt$  para o modelo da figura 37 foi retirado da figura 41, com a compilação da equação que acompanha o gráfico na planilha de Excel, apresentada no item 3.4.1, modificada para o modelo da figura 37. A sensibilidade ao entalhe,  $q$ , foi retirada da figura 17. O  $Kf$  resultante foi de 2,34, conforme pode ser verificado na figura 42. A figura 42 também mostra o valor da área transversal da equação 23.

Figura 41 - Coeficiente de concentração de chapa com furo central

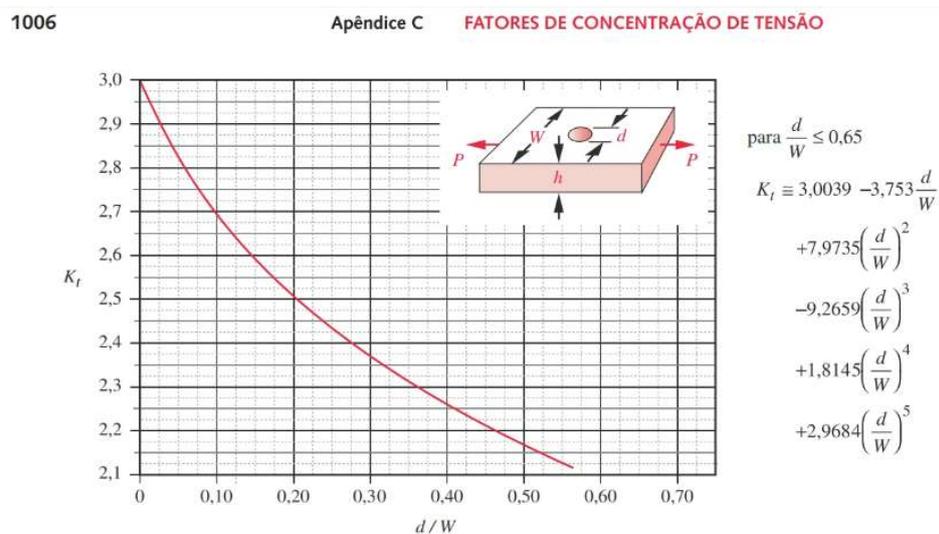


FIGURA C-13

Fator geométrico de concentração de tensão  $K_t$  para uma barra plana com orifício transversal em tração axial.

Fonte: Norton (2013, p. 1006)

Figura 42 - Compilação dos dados do modelo e concentração de tensões no Excel.

	A	B	C	D	E	F
40						
41	Kt para chapa com furo em tração(figura C-13, Norton)	d(mm)	W(mm)	d/W	espessura da chapa	d equiv(Figura 2 TCC-seção quadrangular)
42	2,70311638	2,5	25,4	0,098425197	5,8	9,8071364
43	sensibilidade ao entalhe(figura 6-36 do Norton)	0,79				
44						
45	Kf para chapa com furo em tração	2,34546194				
46						
47	Daos de dimensão do modelo					
48	Comprimento(mm)	152,4				
49	Largura(mm)	25,4				
50	espessura(mm)	5,8				
51	diâmetro do furo(mm)	2,5				
52	Área da seção transversal(mm²)	147,32				
53						
54						

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1.2 Análise do espectro de forças

Com os dados de força, dados geométricos do modelo e dados de concentração de tensões, analisou-se o espectro de carregamento quanto ao número efetivo de ciclos por Rainflow, conforme descrito no item 2.2.2, item 3 e na ASTM E 1049. Essa análise foi realizada no software Excel e a contagem dos ciclos efetivos do espectro foi realizada automaticamente pela planilha elaborada, que contempla o procedimento que é propósito deste trabalho. A planilha é dividida em oito planilhas secundárias, cada uma com uma função específica dentro do procedimento. Dentro da referida planilha é contabilizado também o dano acumulado em fadiga por Palmgren-Miner, conforme descrito no item 2.2.1

Na planilha secundária, Planilha1, está a parte do procedimento em que o usuário alimenta os dados de picos e vales do seu espectro particular e realiza um tratamento inicial, em que é identificado o maior valor do espectro e o conjunto dos demais valores a partir desse até o final dos dados. Esse conjunto é recortado e transferido para o início do conjunto original de dados. Isso está orientado na planilha e poderá ser automatizado se for optado pelo aprimoramento do procedimento. Concluída essa etapa, os dados são transferidos para a coluna D da Planilha1 e a primeira etapa de contagem e eliminação dos ciclos é realizada automaticamente através das equações inseridas nas células E e F pelo autor deste trabalho. O que foi descrito acima pode ser verificado na figura 43.

Figura 43 - Primeira planilha secundária do procedimento

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data in columns D, E, and F:

	D	E	F
10	Valores representativos dos picos e vales do espectro- Já arranjados iniciando pelo maior valor.	4º- contabilizar para cada conjunto de três valores a faixa de tensões: se a diferença entre os dois primeiros for maior que a diferença entre os dois últimos, não contabiliza ciclo e o valor é zero.	PRIMEIRA CONTAGEM DE CICLOS(quando o número em E for um e o que antecede for 0, certamente ter-se-á um ciclo. Se o que antecede for 1, o ciclo que formou anteriormente não foi removido ainda, portanto não há certeza de que forme o ciclo presente, portanto, no momento, este é considerado 0 até segunda contagem
11	68,0	0	0
12	41,8	1	1
13	59,2	0	0
14	21,2	0	0
15	50,3	1	1
16	31,7	1	0
17	50,3	0	0
18	12,0	0	0
19	39,5	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

A equação escrita para as células da coluna E pode ser verificada na barra de função e acima dos dados das colunas existe uma breve descrição do critério utilizado no desenvolvimento da equação. O somatório dessa primeira etapa de contagem é automaticamente contabilizado da coluna F, conforme pode ser verificado na linha 39 da planilha, na figura 44, em que também se verifica a equação das células da coluna F, na barra de função.

Figura 44 - Contagem de ciclos da primeira etapa

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data in columns D, E, and F:

	D	E	F
24	28,6	1	1
25	54,2	0	0
26	23,4	1	1
27	38,0	1	0
28	14,0	0	0
29	62,7	1	1
30	23,2	1	0
31	68,0	0	0
32		0	0
33		0	0
34		0	0
35		0	0
36		0	0
37		0	0
38		0	0
39			Primeiro somatório de ciclos

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os ciclos contabilizados na Planilha1 são automaticamente calculados pelas equações da planilha, as tensões alternadas, tensões médias, tensões máximas, o número de ciclos permitidos para cada conjunto de tensões referentes a cada ciclo e o dano de fadiga, baseado nas teorias e equações abordadas nos itens 2, 3 e 4.2.1.1. O supracitado pode ser verificado na figura 45.

Figura 45 - Tensões e danos em fadiga da Planilha1

Ciclos da contagem - coluna F	base	Força(N)	Tensão de tração da planilha de tensões(no furo,multiplicado por Kf)	tensão alternada	tensão média	Tensão máxima	Número de ciclos permissivets	Dano de Palmgren-Miner
10	0	305	20740,0	330,1987553	0	0	0	0
11	1	305	12743,9	202,893584	42,26607946	245,1596634	2824731,248	3,54016E-07
12	0	305	18093,4	287,4257429	0	0	0	0
13	0	305	6474,8	103,0841133	0	0	0	0
14	1	305	15332,8	244,1111354	45,05204451	199,0590909	244,1111354	5,29372E-07
15	0	305	9673,3	154,0070464	0	0	0	0
16	0	305	15332,8	244,1111354	0	0	0	0
17	0	305	3660,3	58,2740135	0	0	0	0
18	1	305	12040,4	191,6933979	52,4502332	139,2431647	191,6933979	6,761947,528
19	0	305	5451,5	86,79293148	0	0	0	0
20	1	305	18053,7	287,4300757	85,951138	201,4789377	287,4300757	188948,3945
21	0	305	7256,4	115,5277996	0	0	0	0
22	0	305	20740,0	330,1987553	0	0	0	0
23	1	305	8728,4	138,9637016	62,09495825	201,0586599	263,1536181	996063,9325
24	0	305	16528,9	263,1536181	0	0	0	0
25	1	305	7140,4	113,6820436	35,44198154	149,1240252	184,5660067	42565431,54
26	0	305	7140,4	113,6820436	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os coeficientes de correção e limites de fadiga para esse primeiro modelo podem ser verificados na figura 46.

Figura 46 - Coeficientes de correção e limites de fadiga para o primeiro modelo

	correção carregamento(tracção)	correção temperatura	correção tamanho(Figura 2-do TCC-usando seção retangular)	correção de superfície(figura 6-26 do norton-usinado)	correção de confiabilidade(95%)
Limite de fadiga para 10 <sup>6</sup> ciclos(Se)	234,5	0,7	1	0,952801122	0,8
Limite de fadiga corrigido(Se)	108,60576				
Limite de fadiga para 10 <sup>3</sup> ciclos(SF)	410,375	0,875			
Parâmetros para a contagem de número de ciclos permitidos- livro do Norton 3ª edição					
b	3,214977845				
m	0,196520831				

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a primeira contagem, parte da continuação do procedimento consiste em eliminar do espectro os ciclos já contabilizados e realizar uma nova contagem com os valores remanescentes, com os mesmos critérios da primeira. A eliminação dos ciclos já contabilizados é realizada automaticamente pelas equações da planilha elaborada, conforme pode ser verificado nas colunas J e K da Planilha1, apresentadas na figura 47.

Figura 47 - Eliminação dos valores dos ciclos contabilizados na primeira etapa

I	J	K	L
6ª-replicar os valores de F	7ª- primeira etapa de eliminação dos ciclos já contabilizados	8ª-segunda etapa da eliminação dos valores dos ciclos já contabilizados	
0	68	68	
1	0	0	
0	59,19147241	0	
0	21,22878858	21,22878858	
1	0	0	
0	31,71568331	0	
0	50,27141059	50,27141059	
0	12,00089227	12,00089227	
1	0	0	
0	17,87383885	0	
1	0	0	
0	23,79139912	0	
0	68	68	
1	0	0	
0	54,19295422	0	
1	0	0	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores da coluna K são transferidos para a Planilha3 para a próxima etapa de contagem de ciclos, conforme pode ser observado na figura 48.

Figura 48 - Segunda etapa da contagem de ciclos

	A	B	C	D	E	F	G	
	valores remanescentes da primeira contagem	Primeira etapa da segunda contagem	Segunda etapa da segunda contagem	replicar valores de A	replicar valores de C	primeira etapa da eliminação de ciclos já contados	segunda etapa da eliminação de ciclos já contados	
1								
2	68,0	0	0	68	0	68	68	
3	21,2	1	1	21,22878858	1	0	0	
4	50,3	1	0	50,27141059	0	50,27141059	0	
5	12,0	0	0	12,00089227	0	12,00089227	12,00089227	
6	68,0	1	1	68	1	0	0	
7	14,0	1	0	14	0	14	0	
8	68,0	0	0	68	0	68	68	
9		0	0	0	0	0	0	
10		0	0	0	0	0	0	
11		0	0	0	0	0	0	
12		0	0	0	0	0	0	
13		0	0	0	0	0	0	
14		0	0	0	0	0	0	
15		0	0	0	0	0	0	
16		0	0	0	0	0	0	
17		0	0	0	0	0	0	
18		0	0	0	0	0	0	
19		0	0	0	0	0	0	
20	Somatório da segunda contagem						2	

Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda etapa, que ocorre na Planilha3 do procedimento também contabiliza de forma automatizada o número de ciclos, as tensões alternadas, médias e máximas, o número de ciclos permissíveis e o dano de fadiga por Palmgren-Miner. Novamente, os ciclos contabilizados são eliminados e o espectro restante transferido para a Planilha6 para, no caso desse espectro, ser a parte final de contabilização de ciclos e danos. A Planilha6 pode ser verificada na figura 49.

Figura 49 - Terceira etapa de contabilização de ciclos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	valores remanescentes da segunda contagem	Primeira etapa da segunda contagem	Segunda etapa da segunda contagem	replicar valores de C	replicar valores de E	segunda etapa da eliminação de ciclos já contados				Multiplicador replicado da coluna F	Ciclos da contagem coluna E	base	Força(N)	Tensão de tração da planilha de tensões (no furo, multiplicado por Kf)	tensão alternada	tensão média	tensão máxima	número de ciclos permissíveis	Dano de Palmgren-Miner	
2	68	1	1	68					68	1	305	20740,0	330,1987553	135,962	194,2367	330,19876		20985,22317	4,76526E-0	
3	12,00089227		0	12,00089227					12,0009	0	305	3660,3	58,27470135	0	0	0		0	0	
4	68	0	0	68					68	0	305	20740,0	330,1987553	0	0	0		0	0	
5		Somatório da terceira etapa	1																Somatório do dano de Palmgren-Miner	4,76526E-0
13																		número de ciclos	20985,22317	

Fonte: Elaborado pelo autor

Na planilha secundária são contabilizados automaticamente o número de ciclos das 3 contagens, o dano acumulado de fadiga, e em caso de o espectro ser repetido em aplicação, o dano acumulado da repetição do espectro. A planilha *Total de ciclos e danos* pode ser verificada na figura 50.

Figura 50 - Planilha secundária de contabilização total dos ciclos e do dano de fadiga

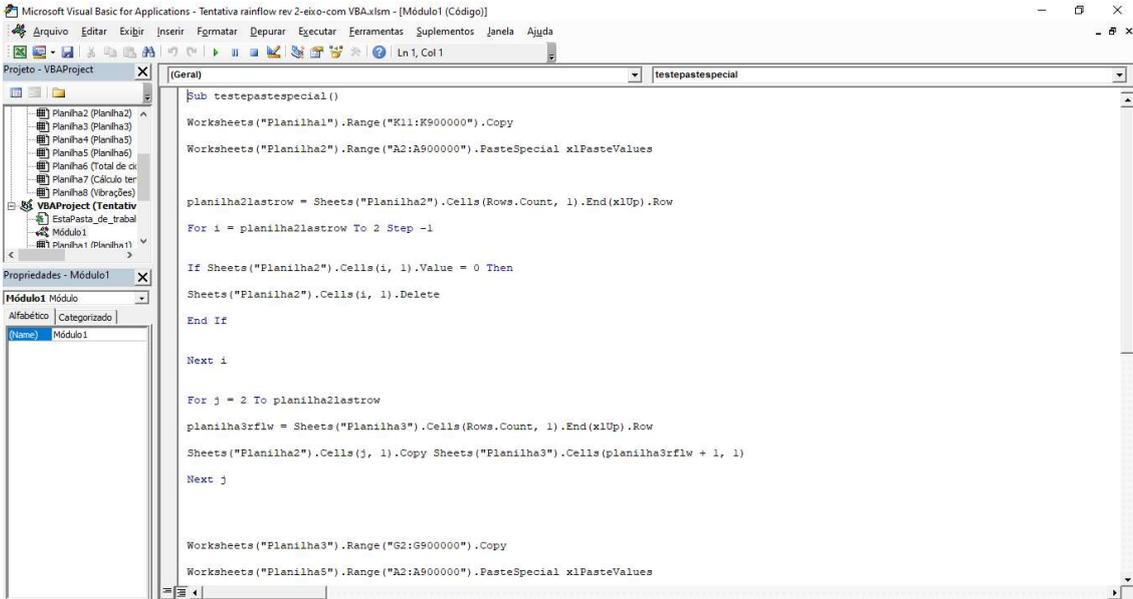
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Total de ciclos	10									
4	Total de dano de fadiga para um espectro	0,00010969									
7	Para repetições do espectro	0,87750921									
10	Número de vezes por ciclo										
11	8000										

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1.3 Automatização da planilha do procedimento

Como pode ser observado no processo descrito no item 4.2.1.2, há uma quantidade de dados que devem ser transferidos entre as planilhas secundárias das etapas de contagem dos ciclos. Também devem ser eliminados os zeros do conjunto de dados transferidos. Em espectros maiores, para os quais pode haver mais etapas além de 3, esse processo de transferência e eliminação de zeros entre planilhas pode se tornar extenuante se realizado de forma manual, apesar das automatizações que há dentro de cada planilha secundária. Por conseguinte, foi lançado mão de um código básico em linguagem *Visual Basics* que realiza essa transferência e eliminação dos zeros de forma automatizada entre planilhas. O código foi escrito neste trabalho para esse espectro, no entanto, o mesmo pode ser ampliado para espectros maiores, conforme necessário. Foram escritos dois códigos, um para a realização da transferência e eliminação de zeros e outro para limpar os resultados. A programação dos dois comandos pode ser verificada nas figuras 51 e 52, respectivamente.

Figura 51 - Parte do código VBA de transferência de dados e eliminação de zeros entre planilhas do procedimento



```

Sub testepastespecial()
Worksheets("Planilha1").Range("K11:K900000").Copy
Worksheets("Planilha2").Range("A2:A900000").PasteSpecial xlPasteValues

planilha2lastrow = Sheets("Planilha2").Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
For i = planilha2lastrow To 2 Step -1
If Sheets("Planilha2").Cells(i, 1).Value = 0 Then
Sheets("Planilha2").Cells(i, 1).Delete
End If
Next i

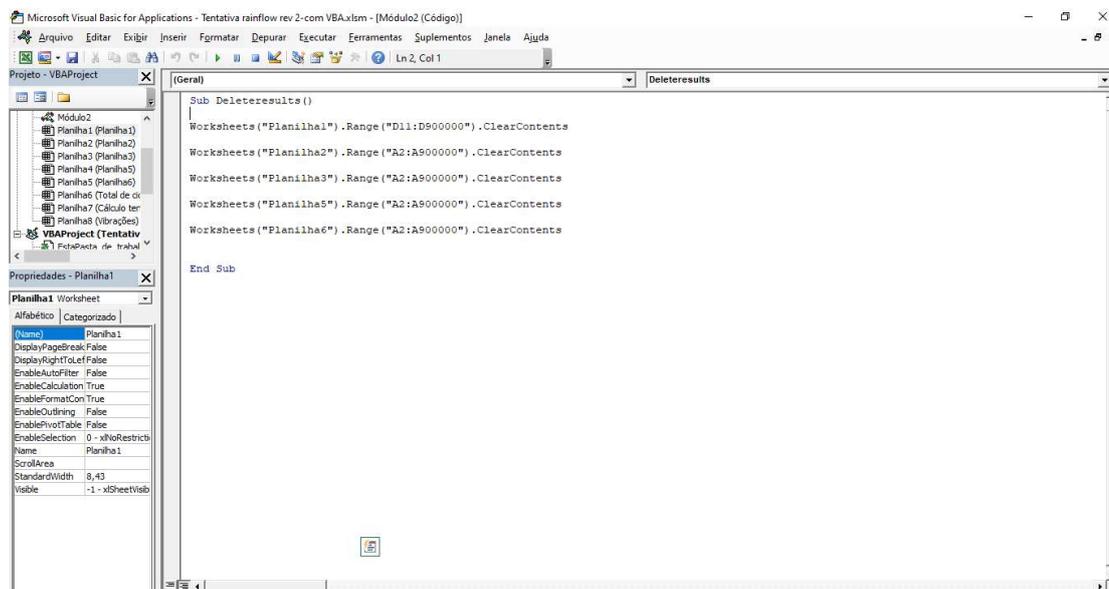
For j = 2 To planilha2lastrow
planilha3rflw = Sheets("Planilha3").Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
Sheets("Planilha2").Cells(j, 1).Copy Sheets("Planilha3").Cells(planilha3rflw + 1, 1)
Next j

Worksheets("Planilha3").Range("G2:G900000").Copy
Worksheets("Planilha5").Range("A2:A900000").PasteSpecial xlPasteValues

```

Fonte: Elaborado pelo autor

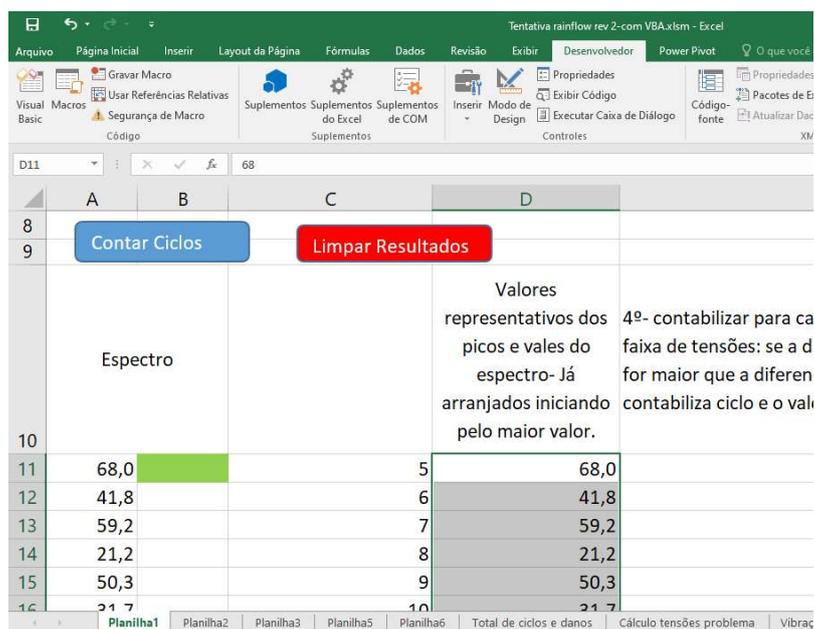
Figura 52 - Código VBA para limpar resultados



Fonte: Elaborado pelo autor

A execução desses códigos, que automatiza os processos de transferência de dados entre planilhas e limpeza de resultados para uma nova análise pode ser realizada através de dois botões inseridos na Planilha1. O botão “Contar Ciclos” é acionado depois que o usuário realizou o primeiro tratamento básico dos valores do espectro e alimentou na coluna D. O botão “Limpar Resultados” é acionado quando o usuário deseja realizar uma nova análise, de algum outro espectro, por exemplo. Os botões inseridos podem ser verificados na figura 53.

Figura 53 - Botões inseridos para automatização do procedimento



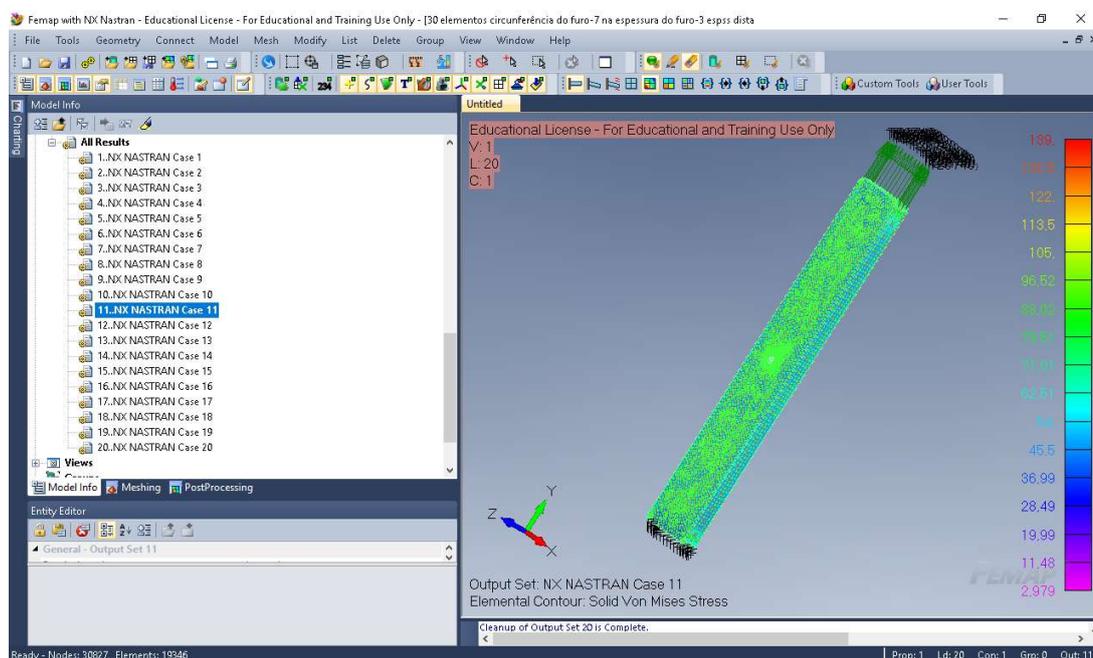
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1.4 Modelamento do sistema de carregamento do primeiro modelo no *software* de elementos finitos

Foi realizada análise por elementos finitos no *software* Femap NX Nastran, no intuito de consolidar essa etapa como parte do procedimento para a análise de fadiga para a extração do coeficiente de concentração de tensões. Para o primeiro modelo existem soluções analíticas de tabelas e gráficos para a concentração de tensões, no entanto, para componentes com geometria mais complexa, conforme a demanda do usuário, essa etapa é imprescindível para a obtenção do “kt”. As tensões obtidas de uma análise estática de elementos finitos (FEA) não foram utilizadas diretamente para contabilizar o dano de fadiga na planilha em Excel do procedimento, pois o carregamento em questão é dinâmico, e existem correções, de sensibilidade ao entalhe, por exemplo, que devem ser realizadas posteriormente à FEA.

O modelo do *SolidWorks* foi importado ao *Femap* e foram estabelecidos os 20 casos de carregamento de tração longitudinal na direção Y positivo, através do comando “*Loads on Surface*”, e a restrição de fixação na superfície da outra extremidade. Os 20 casos de carregamento são oriundos da análise do espectro de carregamento da figura 37. O supracitado pode ser verificado na figura 54.

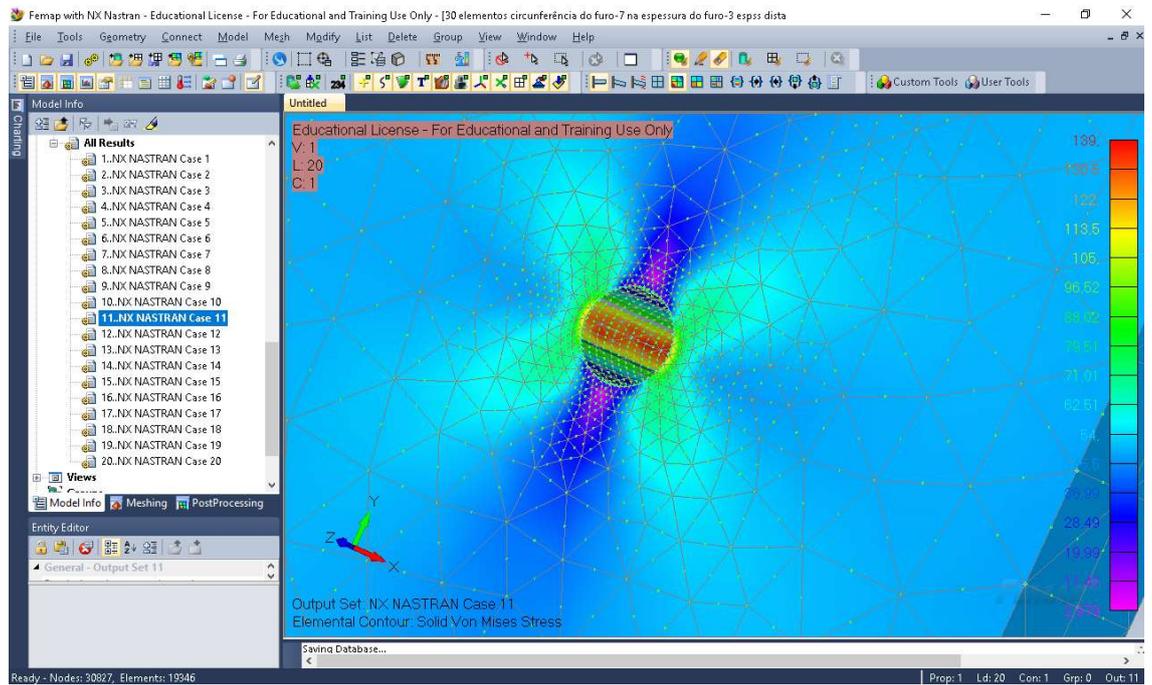
Figura 54 - Condições de contorno para FEA



Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

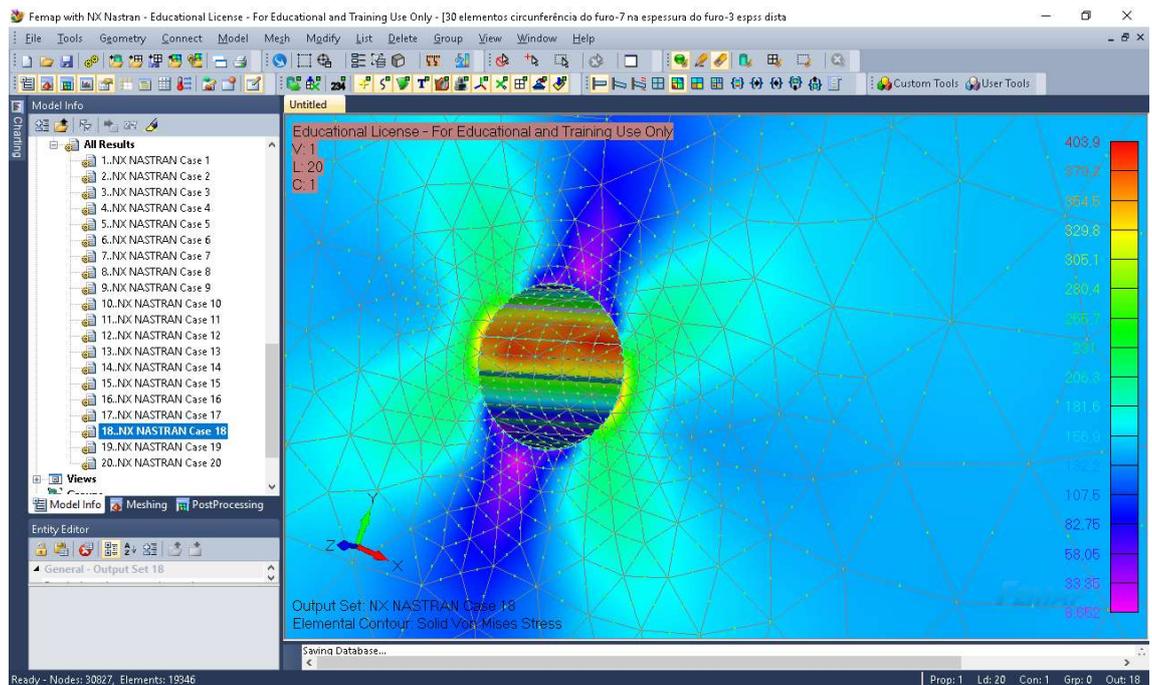
Inicialmente, foi utilizado um tamanho de malha tetragonal uniforme para todo o modelo, no entanto, houve discrepância entre os dados de tensão da planilha do Excel e as tensões da FEA. Por conseguinte, foi refinada a malha no entorno do furo, estabelecendo-se 30 elementos no perímetro da circunferência e 7 elementos na espessura. Distante do furo foi mantido um tamanho de malha 3. A análise foi repetida após o refinamento e os resultados de tensão em relação a planilha tiveram diferenças em torno de 5 a 7 MPa, o que foi considerado aceitável. O perfil de tensões equivalentes de von Mises no entorno do furo para os casos 11 e 18 de carregamento podem ser verificados nas figuras 55 e 56, respectivamente.

Figura 55 - Perfil de tensões por FEA no entorno do furo para o caso de carregamento 11



Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

Figura 56 - Perfil de tensões por FEA no entorno do furo para o caso de carregamento 18

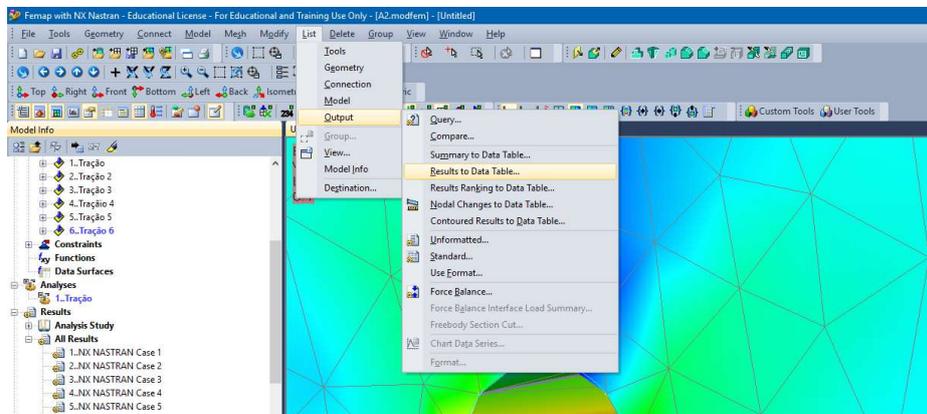


Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

O coeficiente de concentração de tensões “kt” foi estimado através da análise FEA dividindo a máxima tensão no entorno do furo pela tensão nominal nas regiões afastadas do furo, para 4 casos de carregamentos com tensões bem distintas. O resultado foi um “kt” de 2,8 para todos os casos analisados, próximo de 2,7 encontrado pela forma analítica com as figuras da literatura.

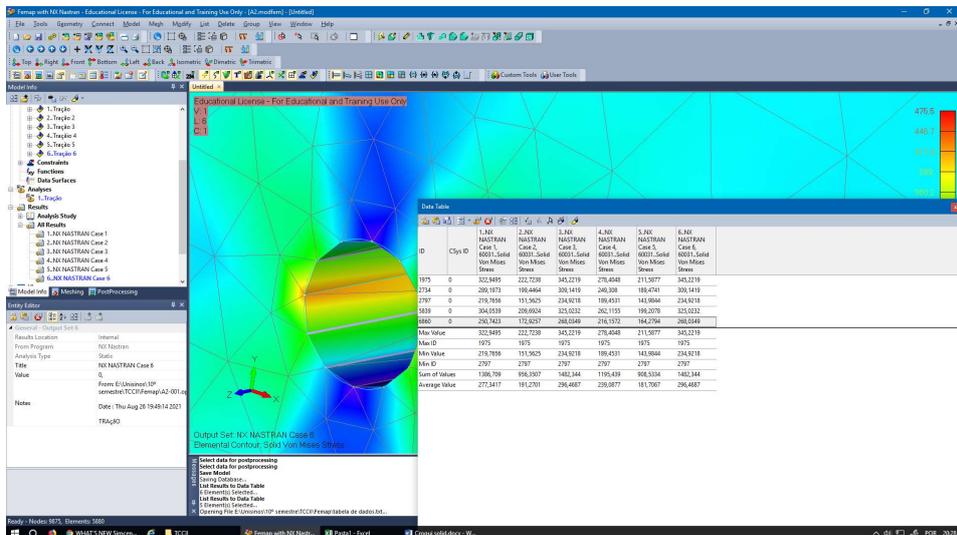
Para o caso da necessidade de utilização dos dados de FEA para os diversos casos de carregamento, os resultados podem ser exportados para o Excel através do campo “Data Table” do Femap, conforme pode ser verificado nas figuras 57 e 58.

Figura 57 – Exportação de resultados para o Excel



Fonte: O autor no Femap da UNISINOS

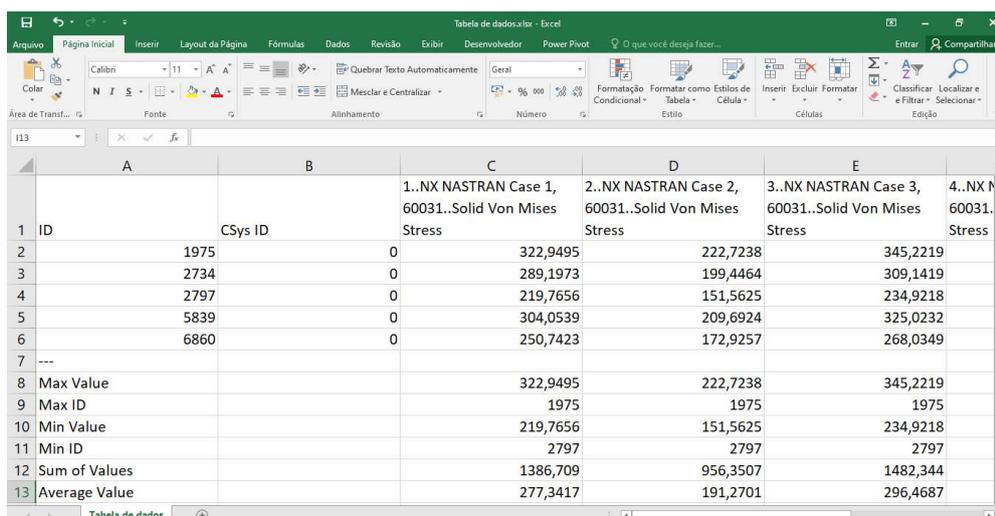
Figura 58 - Tabela de dados gerada no Femap



Fonte: O autor no Femap da UNISINOS

Esse comando foi realizado para alguns casos de carregamento, não exatamente os do espectro, para o primeiro modelo, para consolidar parte do procedimento. O resultado que se obtém com esse comando pode ser verificado na figura 59.

Figura 59 - Resultados de aplicação do comando “Results to Data Table”



	A	B	C	D	E	F
		C\$ys ID	1..NX NASTRAN Case 1, 60031..Solid Von Mises Stress	2..NX NASTRAN Case 2, 60031..Solid Von Mises Stress	3..NX NASTRAN Case 3, 60031..Solid Von Mises Stress	4..NX NASTRAN Case 4, 60031..Solid Von Mises Stress
1	ID					
2		1975	0	322,9495	222,7238	345,2219
3		2734	0	289,1973	199,4464	309,1419
4		2797	0	219,7656	151,5625	234,9218
5		5839	0	304,0539	209,6924	325,0232
6		6860	0	250,7423	172,9257	268,0349
7	---					
8	Max Value			322,9495	222,7238	345,2219
9	Max ID			1975	1975	1975
10	Min Value			219,7656	151,5625	234,9218
11	Min ID			2797	2797	2797
12	Sum of Values			1386,709	956,3507	1482,344
13	Average Value			277,3417	191,2701	296,4687

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa etapa pode ser essencial quando não se tem uma equação analítica para o cálculo de tensões em um componente com geometria complexa. Os dados da tabela dos resultados exportados podem ser tratados quanto a sensibilidade ao entalhe e alimentados na planilha de contagem de ciclos por Rainflow. Não houve necessidade dessa etapa para os dois modelos de geometria simples analisados neste trabalho.

#### 4.2.2 Segundo modelo de análise

O segundo modelo analisado foi o eixo maciço cilíndrico engastado carregado em flexão, conforme descrito no item 3.1, no entanto o raio de concordância indicado teve sua dimensão alterada para 1 mm. O modelo foi elaborado no *SolidWorks* para ser exportado para o *Femap* para a análise de FEA. O material do modelo foi selecionado o aço AISI 1045 laminado a frio. O espectro de picos e vales e seus valores representativos são os mesmos do primeiro modelo, no entanto a diferença

passa a ser na base de multiplicação para gerar as forças, que para este modelo foi de 230.

#### 4.2.2.1 Tensões de carregamento do segundo modelo

As tensões de carregamento para o segundo modelo são estabelecidas através da equação 17. O coeficiente de concentração de tensão, “kt” foi extraído da figura 18 utilizando a equação contida na figura. A sensibilidade ao entalhe foi extraída da figura 17 com o dado de limite de resistência do material do modelo. Os dados coletados foram compilados à planilha do procedimento para esse segundo modelo e podem ser verificados na figura

Figura 60 - Concentração de tensão e sensibilidade ao entalhe para o segundo modelo

	A	B	C
33			
34	kt para flexão alternada(usada figura C2 do Norton)	sensibilidade ao entalhe(figura 6-36 do Norton)	kf para a flexão
35	2,426856626	0,74	2,055873903
36			
37			
38			
39			

Fonte: Elaborado pelo autor

Os limites de fadiga e coeficientes de correção foram calculados para o segundo modelo, conforme a metodologia estabelecida no item 3.4.2 e foram compilados na respectiva planilha do Excel, conforme pode ser verificado na figura 61.

Figura 61 - Limites de fadiga e coeficientes de correção para o segundo modelo

	A	B	C	D	E	F
52					correção de superfície(figura 6-26 do norton-usinado)	correção de confiabilidade(95%)
53	Limite de fadiga para 10 <sup>6</sup> ciclos(Se)	correção carregamento	correção temperatura	correção tamanho		
54	313,5	1	1	0,831346429	0,8	0,861
55						
56	Limite de fadiga corrigido(Se)					
57	180,979462					
58						
59						
60	Parâmetros para a contagem de números de ciclos permitidos-livro do Norton 3ª edição					
61						
62	b					
63	3,245390808					
64						
65	m					
66	0,164626919					
67						
68						

Fonte: Elaborado pelo autor

A etapa de contabilização segue a mesma metodologia do primeiro modelo, portanto será omitida nesse item para evitar repetições, no entanto ela está compilada na planilha do procedimento para o segundo modelo. Os valores de tensão são diferentes do primeiro modelo, conforme pode ser verificado na figura 62, que mostra parte da Planilha1 do segundo modelo.

Figura 62 - Valores de tensão e dano de fadiga da Planilha1 do segundo modelo

LN	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	Multiplicador-replicado de coluna G	Ciclos da contagem-coluna I	base	Força(N)	Tensão de flexão da planilha de tensões	tensão alternada	tensão média	Tensão máxima	Número de ciclos permissíveis	Dano de Palmgren-Miner
10										
11	68	0	230	15640	434,9829956	0	0	0	0	0
12	41,8	1	230	9614	267,3866061	55,6522362	323,0388423	378,6910785	=SE(O12=0;10*(('Cálculo tensões problema'!\$A\$63)/('Cálculo tensões problema'!\$A\$66))/((S12/1-(T12/('Cálculo tensões problema'!\$B\$4))))^1/('Cálculo tensões problema'!\$B\$5)^1/('Cálculo tensões problema'!\$A\$66))	
13	59,2	0	230	13616	378,6910785	0	0	0	0	0
14	21,2	0	230	4876	135,6123457	0	0	0	0	0
15	50,3	1	230	11569	321,7594805	59,49032145	262,2691591	321,7594805	SE(teste_lógico;[valor_se_verdadeiro];[valor_se_falso])	34E-08
16	31,7	0	230	7291	202,7788376	0	0	0	0	0
17	50,3	0	230	11569	321,7594805	0	0	0	0	0
18	12	0	230	2760	76,7617051	0	0	0	0	0
19	39,5	1	230	9085	252,673946	69,0853459	183,5884114	252,673946	42325012,63	2,36267E-08
20	17,9	0	230	4117	114,5028768	0	0	0	0	0
21	59,2	1	230	13616	378,6910785	115,223515	265,4675635	378,6910785	609257,1087	1,64134E-06
22	23,8	0	230	5474	152,2440485	0	0	0	0	0
23	68	0	230	15640	434,9829956	0	0	0	0	0
24	28,6	1	230	6578	182,9487305	81,87915211	264,8278826	346,7070347	4410708,642	2,26721E-07
25	54,2	0	230	12466	346,7070347	0	0	0	0	0
26	23,4	1	230	5382	149,6853249	46,69670394	195,3820289	243,0787328	382484046,8	2,61449E-09
27	38	0	230	8740	243,0787328	0	0	0	0	0
28	14	0	230	3220	89,2553262	0	0	0	0	0
29	62,7	1	230	14421	401,0799092	126,336973	274,7429362	401,0799092	267383,7281	3,73994E-06
30	23,2	0	230	5336	148,4059632	0	0	0	0	0
31	68	0	230	15640	434,9829956	0	0	0	0	0
32									Somatório do dano de Palmgren-Miner	5,72842E-06

Fonte: Elaborado pelo autor

As demais planilhas secundárias do segundo modelo seguem a mesma metodologia do primeiro, incluindo as ferramentas de VBA para automatização e serão omitidas neste item para evitar repetições. A planilha secundária de dano total acumulado de fadiga por Palmgren-Miner para esse segundo modelo para 20000 repetições do espectro pode ser verificada na figura 63.

Figura 63 - Total de dano de fadiga para o segundo modelo

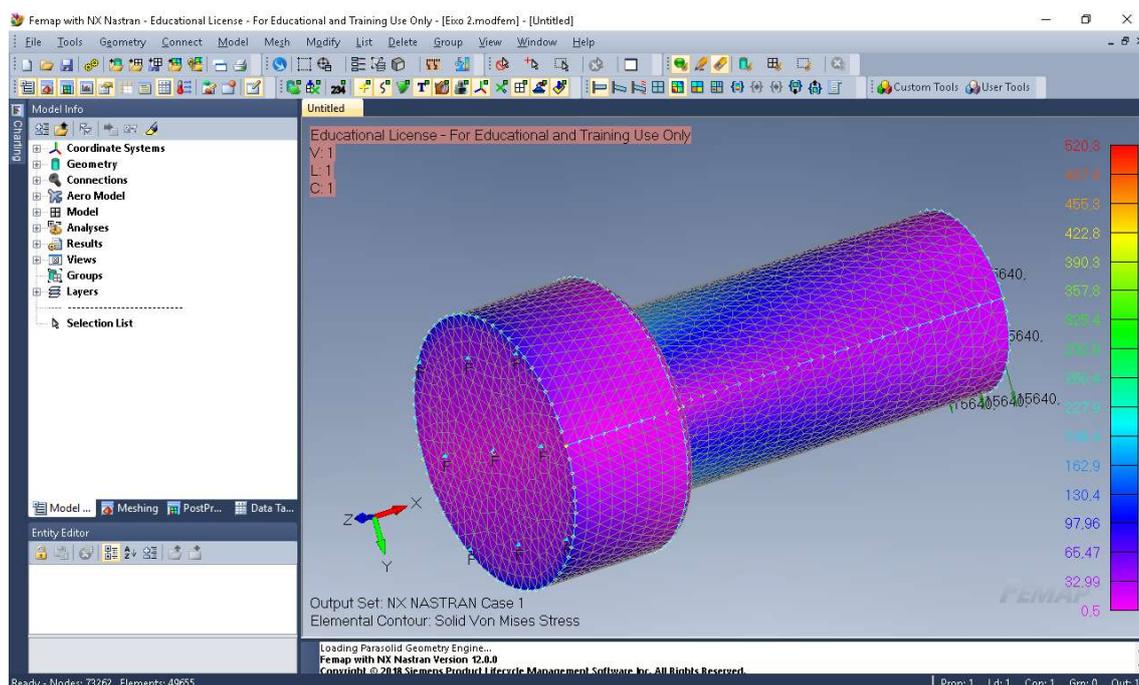
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Total de ciclos	10														
2																
3																
4	Total de dano de fadiga para um espectro	4,9E-05														
5																
6																
7	Dano total vezes as repetições do espectro	0,97865														
8																
9	Repetições do espectro	20000														
10																
11																
12																
13																

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2.2 Modelamento do sistema de carregamento do segundo modelo no software de elementos finitos

O segundo modelo de carregamento foi analisado por elementos finitos para consolidar a etapa no procedimento. Foi exportado o modelo elaborado no *SolidWorks* para o *Femap* através do comando “*import geometry*”. Foram estabelecidas as condições de contorno, a saber, condição de superfície de engaste fixa em uma das extremidades e força de carregamento na direção Y positivo na superfície da extremidade do eixo oposta ao engaste, conforme pode ser verificado na figura 64.

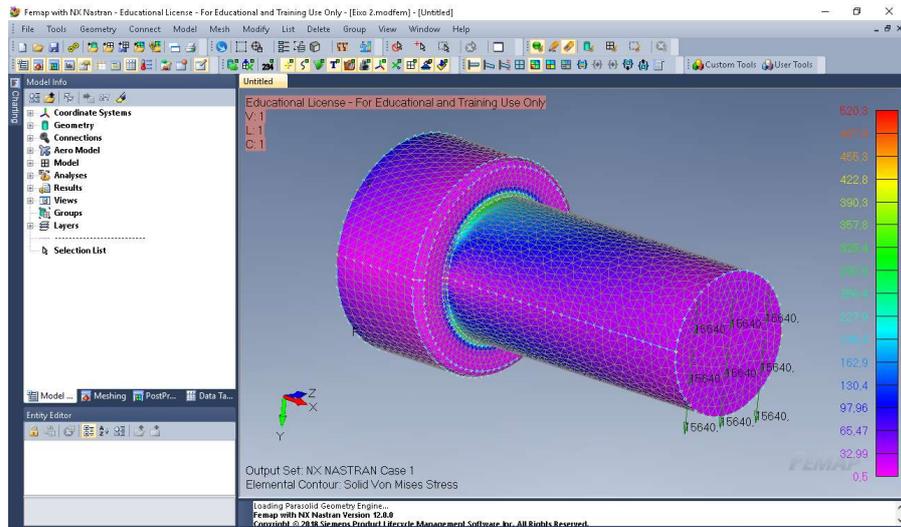
Figura 64 - Condições de contorno para FEA do segundo modelo de carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

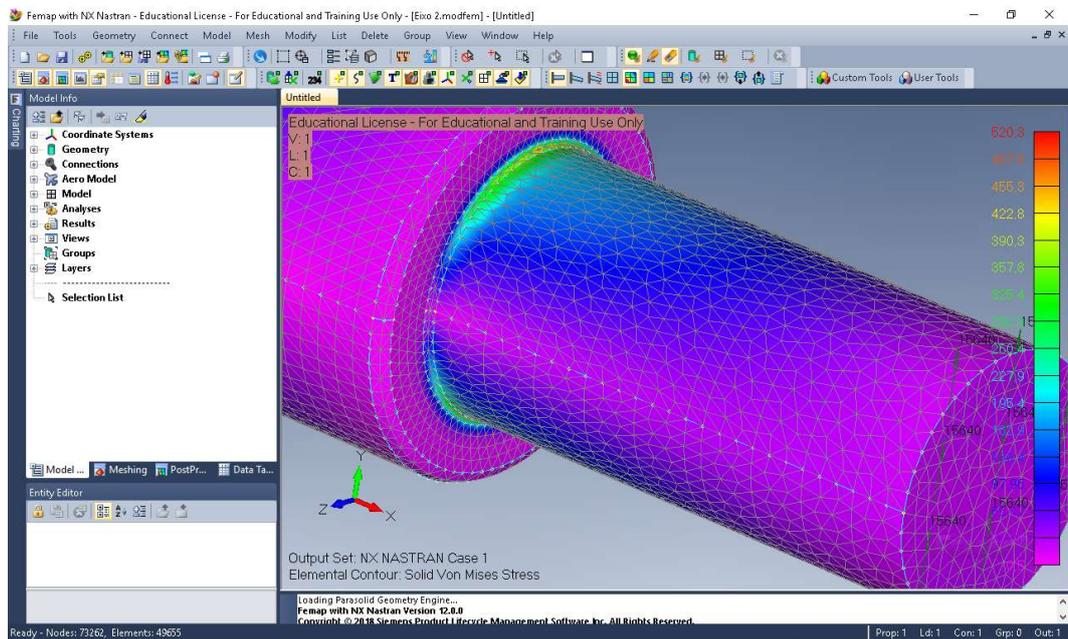
Inicialmente o modelo fora analisado com malha tetragonal de tamanho uniforme de 4, no entanto houve diferença inaceitável em relação as tensões da planilha do procedimento com equações analíticas. Por conseguinte, foi refinada a malha no entorno do raio de concordância de 1 mm na transição do diâmetro menor para o maior, inserindo-se 50 elementos circunferenciais. O modelo foi reanalisado e as tensões comparadas com as da planilha, verificando-se em torno de 7 MPa de diferença, o que se considerou aceitável, visto que configurou uma diferença de acréscimo conservativo em relação à segurança. O perfil de tensões obtido no segundo modelo por FEA pode ser verificado nas figuras 66 e 67.

Figura 65 - Perfil geral de tensões por FEA do segundo modelo



Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

Figura 66 - Perfil de tensões no entorno do raio de concordância entre diâmetros por FEA do segundo modelo



Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

#### 4.2.2.3 Criação de casos de carregamento no Femap através de API

Para o espectro da figura 37, a criação dos casos de carregamento para as forças representativas dos picos e vales do espectro, dentro do software de CAE, não configura uma tarefa excessivamente extenuante, no entanto, dependendo do

espectro específico, podem ocorrer situações de centenas de casos de carregamento, o que tornaria a tarefa supracitada impraticável. Portanto, para caracterizar e consolidar como uma possível etapa do procedimento de análise de fadiga, buscou-se uma alternativa para a criação de casos de carregamento no Femap a partir de uma planilha em Excel, de forma automatizada. Para isso foi realizada uma pesquisa na internet e um questionamento na comunidade da Siemens, acessível pelo item *Help, Siemens Community*, na barra de ferramentas superior, através da criação de um usuário. Foi obtida uma resposta que consistia em um código de programação API (Application Programming Interface) em VBA para realização do processo. No entanto, o código não correspondeu diretamente ao esperado, gerando erros e também não continha a programação de gerar vários casos para o mesmo ID de elemento nodal ou geométrico. Foi realizada comparação com o código API enviado como resposta para o questionamento de outro usuário, sobre o mesmo procedimento. No entanto, a resposta para o outro usuário foi um código API para casos de carregamento em nós da malha, através do um comando *fe.LoadMesh*. No caso dos modelos deste trabalho se necessita de carregamento em superfícies, para o que o código API é diferente. Por conseguinte, foi consultado o guia de programação API (FEMAP API Reference), contido nos arquivos de instalação do software. Através da consulta do referido guia e dos programas enviados na comunidade da Siemens como resposta aos questionamentos, foi ajustado um código através do comando principal *fe.LoadGeom* e de um *Loop* para a criação de 21 casos de carregamento no Femap a partir de forças de uma planilha em Excel. A planilha em Excel com os casos de carregamento pode ser verificada na figura 67. O código API elaborado no Excel através das referências citadas pode ser verificado nas figuras 68 e 69, e o resultado da aplicação do código no Femap, 21 casos de carregamento, pode ser verificado na figura 70. Na figura 70 se observa os casos de carregamento e um dos casos listado na barra inferior, em que se observa o carregamento de 9614 N, na direção Y da superfície com ID 9, que é a extremidade de diâmetro menor do eixo. Isso está em acordo com o caso 2 de carregamento da planilha da figura 67. Os casos são criados automaticamente no Femap através do acionamento do botão “Criar carregamentos no Femap”.

Figura 67 - Planilha de carregamentos para API

ID do caso de carregamento	Nomenclatura do caso de carregamento	X	Y	Z	ID da superfície
1	Load1			15640	9
2	Load2			9614	9
3	Load3			13616	9
4	Load4			4876	9
5	Load5			11569	9
6	Load6			7291	9
7	Load7			11569	9
8	Load8			2760	9
9	Load9			9085	9
10	Load10			4117	9
11	Load11			13616	9
12	Load12			5474	9
13	Load13			15640	9
14	Load14			6578	9
15	Load15			12466	9
16	Load16			5382	9
17	Load17			8740	9
18	Load18			3220	9
19	Load19			14421	9
20	Load20			5336	9
21	Load21			15640	9

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 68 - Início da programação API para transferência dos casos de carregamento do Excel para o Femap

```

Sub createSurfaceLoad()
    Dim App As Object
    Set App = GetObject(, "femap.Model")

    Dim srf As Object
    Set srf = App.feSurface

    Dim ldSet As Object
    Set ldSet = App.feLoadSet

    Dim ldDef As Object
    Set ldDef = App.feLoadDefinition

    Dim ldGeom As Object
    Set ldGeom = App.feLoadGeom

    Dim ldSetID As Long
    Dim ldDefID As Long

    Dim j As Long
    j = 4

    Do While Cells(j, 4) <> ""
        ldSetID = ldSet.NextEmptyID

        ldSet.Active = ldSetID

        ldSet.Title = Cells(j, 2)

        ldSetID = Cells(j, 1)

        ldSet.Put (ldSetID)
    
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 69 - Final da programação API para transferência dos casos de carregamento do Excel para o Femap

```

Microsoft Visual Basic for Applications - Put_load_on_surface-From Siemens Community answerMOD1.xlsm - [Module1 (Código)]
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Depurar Executar Ferramentas Suplementos Janela Ajuda
Projeto - VBAProject (Geral) createSurfaceLoad
ldDefID = ldDef.NextEmptyID
ldDef.SetID = ldSetID
ldDef.loadType = 161
ldDef.DataType = 14

ldDef.Put (ldDefID)

ldGeom.SetID = ldSetID
ldGeom.LoadDefinitionID = ldDefID
ldGeom.geomtype = 5

ldGeom.geomID = Cells(j, 6)
ldGeom.CSys = 0

ldGeom.dof(0) = True
ldGeom.dof(1) = True
ldGeom.dof(2) = True

ldGeom.Load(0) = Worksheets("Sheet1").Cells(j, 3).Value
ldGeom.Load(1) = Worksheets("Sheet1").Cells(j, 4).Value
ldGeom.Load(2) = Worksheets("Sheet1").Cells(j, 5).Value

ldGeom.Put (ldGeom.NextEmptyID)

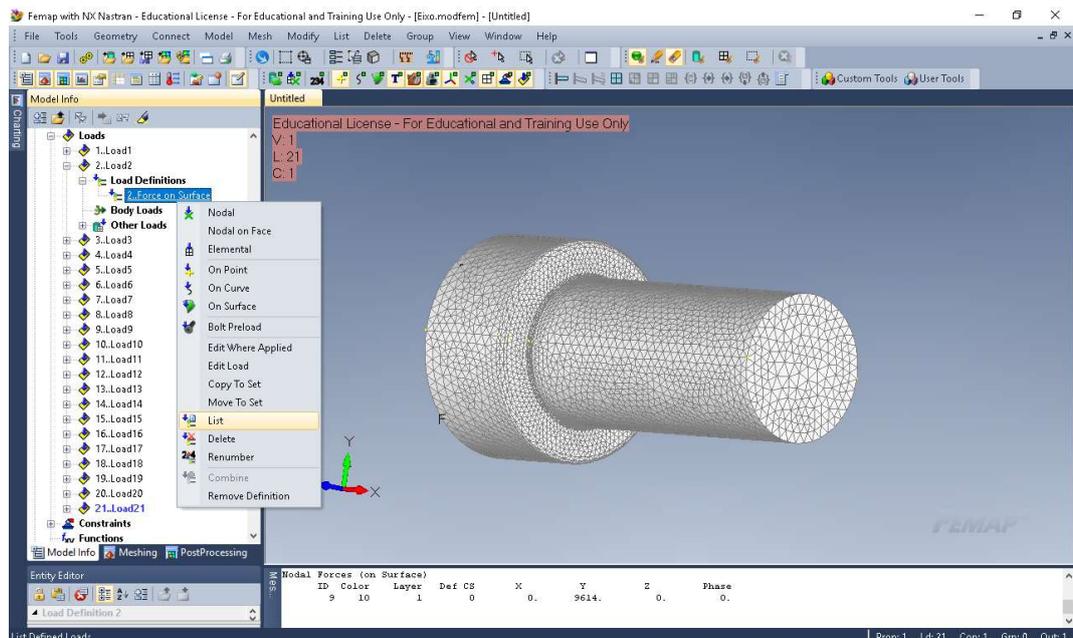
j = j + 1
Loop

App.feViewRegenerate (0)
End Sub

```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 70 - Casos de carregamento gerados no Femap a partir do Excel



Fonte: Elaborado pelo autor no Femap da UNISINOS

Com o exposto acima, verifica-se que é possível a criação de múltiplos casos de carregamento de forma relativamente automatizada e rápida para os diversos espectros de carregamento de fadiga que possam ocorrer.

### 4.3 Validação experimental

Foi buscada alternativa de validação experimental da quantificação do dano por fadiga do espectro de carregamento da figura 37 para o primeiro modelo. No entanto, a validação do método de Rainflow necessitaria de mudanças de configurações da máquina universal de ensaios, o que, segundo o fabricante, poderia ser feito somente através da visita de um técnico especializado. Portanto, considerando questões de cronograma e prazo de entrega do trabalho, foi definido em conjunto com o orientador a tentativa de validação somente do dano de fadiga por Palmgren-Miner, com a validação do método de Rainflow como proposta de continuidade do trabalho. Para isso, foi fabricado o primeiro modelo de carregamento, conforme pode ser verificado na figura 71.

Figura 71 - Primeiro modelo de carregamento fabricado



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de manufatura da UNISINOS

#### 4.3.2 Etapas de fabricação

O componente da figura 71 foi retirado por corte da chapa da figura 72 através de corte manual com disco de corte.

Figura 72 - Chapa para a remoção do componente da figura 71



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de manufatura da UNISINOS

As medições, marcações e acabamentos das bordas foram realizados com o auxílio das ferramentas da figura 73.

Figura 73 - Ferramentas utilizadas nas medições, marcações e acabamento de bordas



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de manufatura da UNISINOS

Posteriormente ao corte do componente e acabamento das bordas, foi realizada retificação das duas superfícies perpendiculares à linha de centro do furo com máquina retificadora mecanizada. Nessa etapa de retificação para remoção da carepa de fabricação a espessura foi reduzida de 6,35 mm para 5,8 mm.

Após a retificação se realizou a furação central com diâmetro de 2,5 mm com furadeira manual de bancada, em rotação de 1300 RPM e com água como refrigerante.

#### 4.3.3 Etapa de validação do dano de fadiga na máquina universal de ensaios (MTS)

Partiu-se para a tentativa de estimativa da resistência do material da chapa escolhida para o componente. Para isso, a alternativa que se teve foi realizar um ensaio de dureza Brinell que, segundo a bibliografia da referência 8, pode ser relacionada ao limite de resistência à tração do material em análise através da equação 24.

$$LRT(MPa) = 3,45 \times HB \quad (24)$$

O ensaio foi realizado no equipamento verificado nas figuras 74 e 76, anteriormente, foi realizada verificação do equipamento com o padrão de dureza da figura 75. A dureza foi medida na chapa remanescente do corte do modelo, figura 72, afastado 15 mm da borda mais próxima, e o valor de dureza encontrado na média das três medições realizadas foi 158,5HB 2,5/187,5/30. Com o valor de dureza encontrado, verificou-se que a espessura da chapa também é maior que 17 vezes a profundidade da calota gravada na peça (Callister, 2008)

Através da equação 24, com o valor de dureza HB, se chegou ao valor de limite de resistência (Sut) de 546,82 MPa. O valor de dureza e de limite de resistência encontrados foram comparados com materiais da bibliografia (Norton, 2013). Estima-se que o material da chapa seja 1045 laminado à quente, que apresenta, na bibliografia, os dados de limite de resistência à tração e dureza de 565 MPa e 163 HB, respectivamente.

O dado de 546,82 MPa foi inserido na planilha de contabilização de ciclos e de dano de fadiga apresentada no item 4.2.1.2 e o dano de fadiga para esse material é de 0,45 para os ciclos da figura 76.

Figura 74 - Equipamento utilizado na medição de dureza



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de ensaios mecânicos da Unisinos

Figura 75 - Padrão utilizado na aferição do equipamento da figura 79



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de ensaios mecânicos da Unisinos

Figura 76 - Placa de dados do equipamento da figura 74



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de ensaios mecânicos da Unisinos

Depois da fabricação, o componente da figura 71 foi montado na MTS conforme pode ser verificado na figura 77 e foram executados os ciclos de carregamento da planilha verificada na figura 78. Com esses ciclos não foi verificada a falha localizada do material na geratriz do furo na direção perpendicular à direção de carregamento, conforme pode ser visualizado nas figuras 79, 80, 81 e 82.

As figuras 79, 80, 81 e 82 foram realizadas em microscópio óptico do laboratório de metalografia da Unisinos, após a realização das etapas de lixamento e polimento manuais localizados, com as lixas 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, e pasta de alumina, no entorno do furo central do componente da figura 71.

Figura 77 - Modelo fabricado montado na MTS



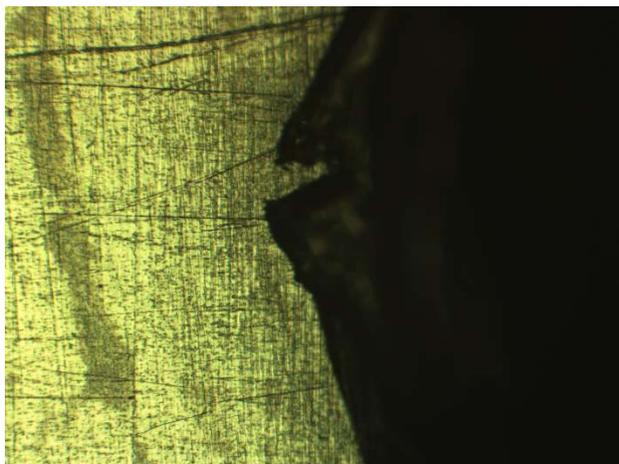
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de ensaios mecânicos da  
UNISINOS

Figura 78 - Ciclos de forças realizados na MTS

Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F1(N)-Mínima	12743,9	9673,3	5451,5	7256,4	8728,4	7140,4	7084,8	6474,8	4270,0	3660,3
F2(N)-Máxima	18053,4	15332,8	12040,4	18053,7	16528,9	11592,7	19111,1	15332,8	20740,0	20740,0
Número de repetições	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	25000
Tensão máxima (MPa)	287,426	244,111	191,693	287,43	263,154	184,566	304,265	244,111	330,199	330,199
Tensão mínima (MPa)	202,894	154,007	86,7929	115,528	138,964	113,682	112,796	103,084	67,9821	58,2747
Tensão alternada (MPa)	42,2661	45,052	52,4502	85,9511	62,095	35,442	95,7345	70,5135	131,108	135,962
Tensão média (MPa)	245,16	199,059	139,243	201,479	201,059	149,124	208,53	173,598	199,09	194,237
Dano de fadiga por Palmgren Miner	0,00055	0,00037	0,00036	0,01023	0,00194	5,5E-05	0,01966	0,00251	0,08464	0,3389

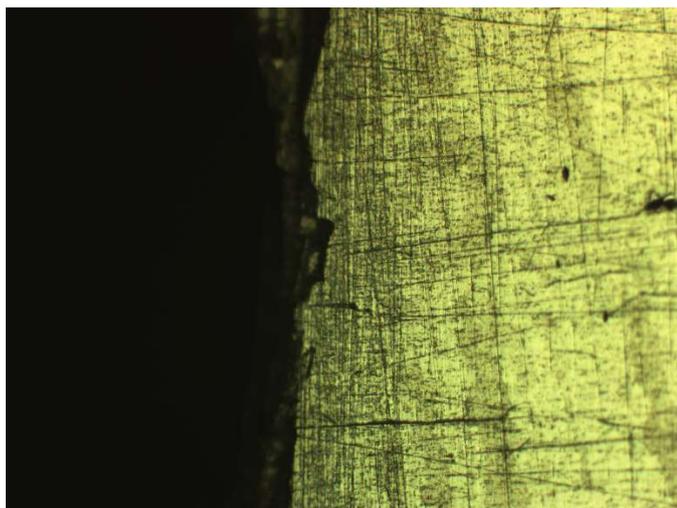
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 79 - Geratriz 1 do lado 1 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque



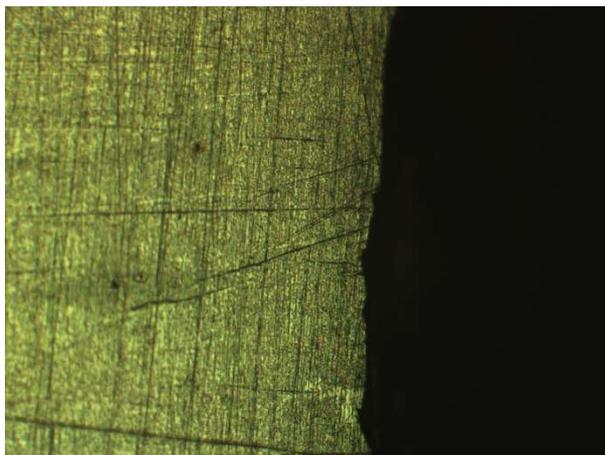
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 80 - Geratriz 2 do lado 1 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque



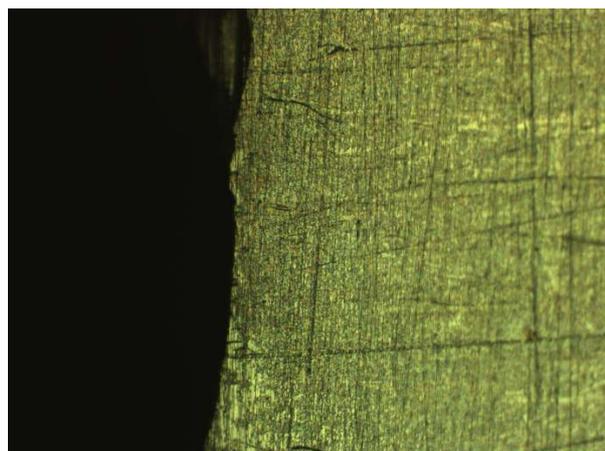
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 81 - Geratriz 1 do lado 2 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 82 - Geratriz 2 do lado 2 de maiores tensões no furo; 100x; sem ataque



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Através da análise das figuras 79, 80, 81 e 82, observa-se algumas indicações que, pela morfologia, se estima serem indicações das etapas de lixamento e polimento, devido ao arraste de material das etapas anteriores, apesar da limpeza interna realizada no furo entre as etapas.

Como se estimou que não se verificou dano neste primeiro conjunto de ciclos, foi prosseguido com os ensaios na MTS para mais verificações. Para isso o ciclo 10 de forças da figura 78 foi realizado mais 35000 vezes, o que geraria um dano acumulado por Palmgren-Miner de 0,92, conforme calculado na planilha do procedimento elaborada e descrita conforme item 4.2.1.2. Após a submissão do

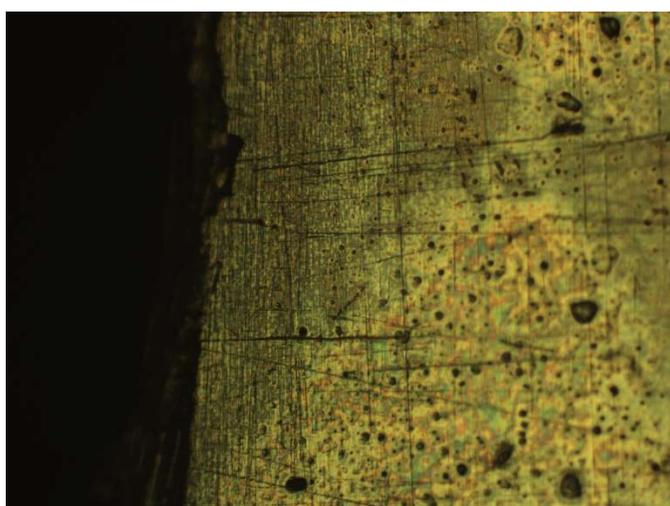
componente a esses ciclos, foi realizada nova verificação em 100x no microscópio óptico, conforme pode ser verificado nas figuras 83, 84, 85 e 86.

Figura 83 - Geratriz 1 do lado 1 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



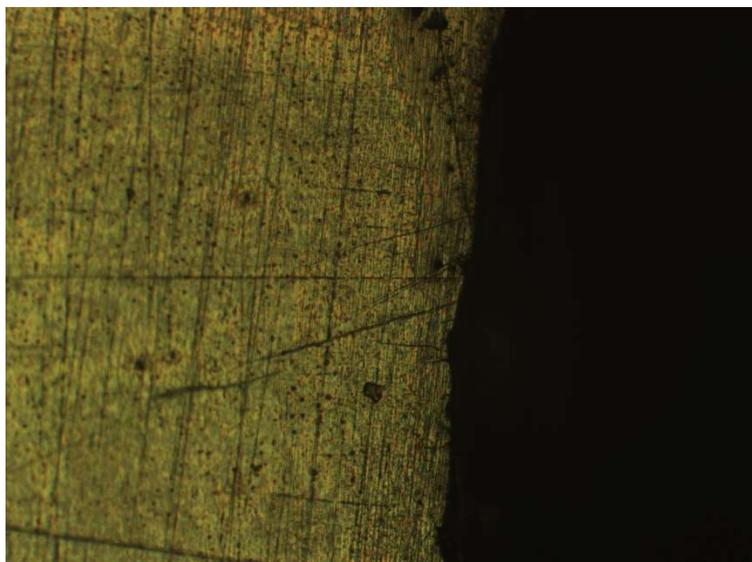
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 84 - Geratriz 2 do lado 1 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



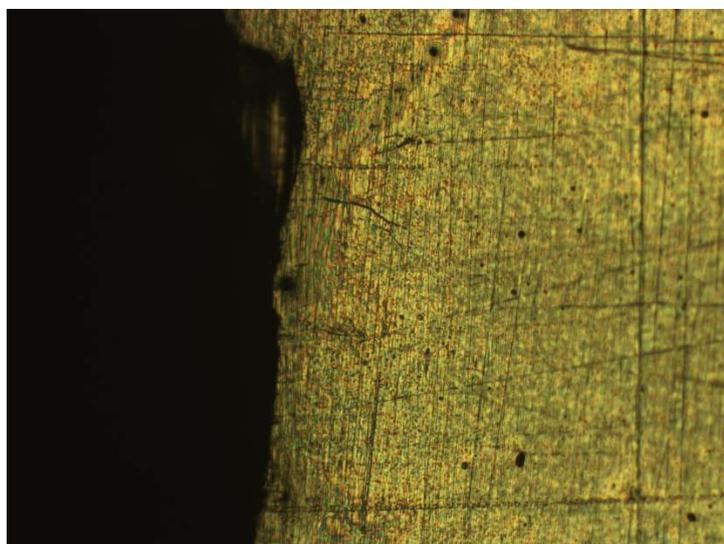
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 85 - Geratriz 1 do lado 2 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 86 - Geratriz 2 do lado 2 para 35000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



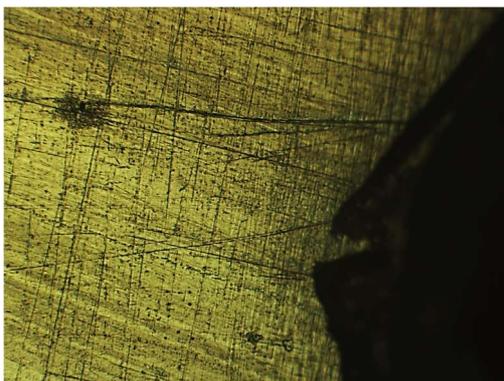
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Através das imagens das figuras 83, 84, 85 e 86, se estima, em comparação com as figuras anteriores, que as marcações não evoluíram em comprimento e abertura, corroborando a hipótese de que sejam marcas de preparação da superfície e com o dano de 0,92, para o que não é esperada falha.

Foi investigada a possibilidade de falha no componente, repetindo-se o ciclo 10 de carregamento da tabela verificada na figura 80 mais 20000 vezes, o que geraria um dano de fadiga por Palmgren-Miner de 1,18, calculado através das ferramentas apresentadas no item 4.2.1.2. Essa condição representa, teoricamente, a falha do material em fadiga. Falha, neste contexto, seria esperada com o surgimento de descontinuidade planar do tipo trinca com sentido de propagação perpendicular ao sentido de carregamento, com origem na circunferência do furo, na posição onde a reta tangente à circunferência é paralela a direção de carregamento.

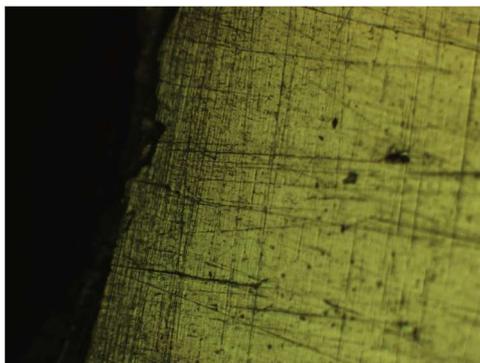
Após a realização do procedimento supracitado foi realizada nova análise no microscópio, e as imagens podem ser verificadas nas figuras 87, 88, 89 e 90.

Figura 87 - Geratriz 1 do lado 1 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



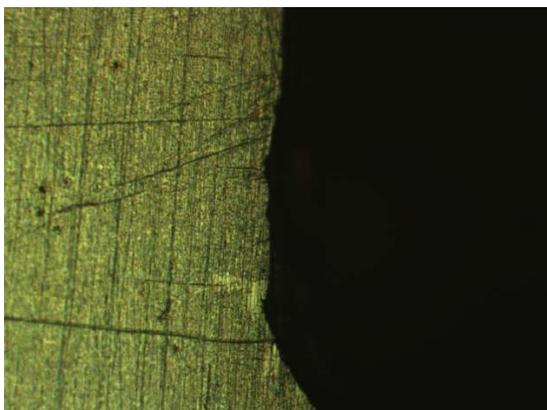
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 88 - Geratriz 2 do lado 1 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



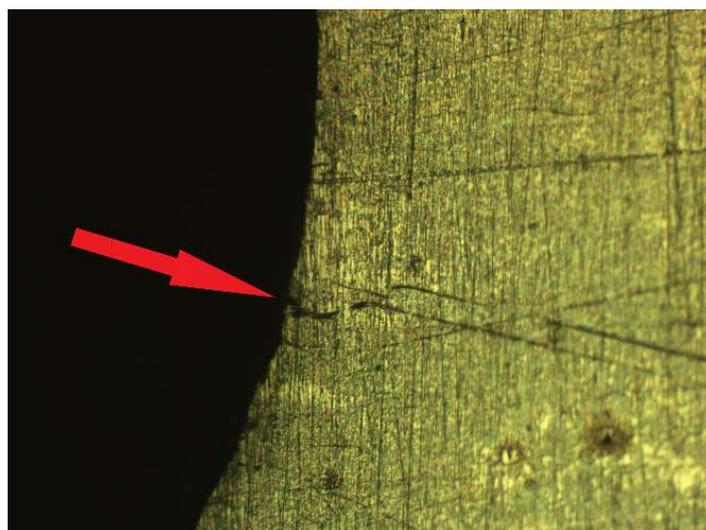
Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 89 - Geratriz 2 do lado 1 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Figura 90 - Geratriz 2 do lado 2 para 55000 repetições excedentes do ciclo 10; 100x;  
sem ataque



Fonte: Elaborado pelo autor no laboratório de metalografia da UNISINOS

Através da análise das figuras 87, 88, 89 e 90, se verificou uma indicação antes não observada na varredura realizada no entorno da circunferência do furo. Estima-se que a indicação na figura 90 possa ser o início da propagação de uma descontinuidade gerada pelos esforços cíclicos. Apesar de estar alinhada com a continuidade de uma possível indicação oriunda da preparação, a abertura da indicação estimada de dano observada é significativamente maior que a da descontinuidade estimada de preparação, e indica ter origem no furo, com direção

aproximadamente perpendicular aos carregamentos, como previsto pelas teorias contidas nas bibliografias (Schijve, Jaap, 2009) (ASM, 1997).

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos se pode concluir que é possível analisar espectros de carregamento com amplitude variada, com relação ao número de ciclos efetivos para o dano de fadiga, através do método Rainflow.

Além disso, verificou-se que é possível aplicar o método de Palmgren Miner para a contabilização do dano em fadiga já ocorrido em determinado componente metálico, e prever o número de ciclos de vida em fadiga que o material ainda pode suportar.

Os resultados mostram que é possível compilar os métodos de Rainflow e de Palmgren Miner em uma planilha eletrônica, e através de programação em *Visual Basics*, automatizar o processo de tratamento do espectro de forças ou tensões.

Foi verificada ainda a possibilidade de tratar os modelos numericamente por elementos finitos, o que é útil em geometrias mais complexas, e que com uso de funções API, é possível transferir o espectro de carregamentos de uma planilha eletrônica para dentro do *software* de elementos finitos de forma automatizada.

Verificou-se que não houve o rompimento do componente para o qual foi realizada a validação experimental, mesmo que o dano estimado tenha sido suficiente para tal. Depreende-se que esse fato possa estar relacionado com a fabricação do componente, em parâmetros como acabamento superficial que foi retificado e possíveis variações em propriedades do material, conforme reportam as bibliografias (Schijve, Jaap, 2009) (ASM, 1997) (Nisbett, Budynas, 2009) (Norton, 2013).

Como propostas de melhoria e continuidade do trabalho, poder-se-ia sugerir, primeiramente, testes das ferramentas de planilha elaboradas com diversos formatos de espectro, inclusive os espectros com tensões alternadas e também ajustes dos códigos para que consumam menos recursos computacionais para realizar as tarefas programadas e que as equações das células pudessem ser adicionadas à programação. Para a parte de interação com o *software* de CAE, seria muito efetivo um aprimoramento dos códigos de programação API para que se incluísse a parte de modelamento e geração de malha dentro do comando automatizado. Em relação à validação experimental, melhorias poderiam ser realizadas na qualidade do acabamento de fabricação, e poderiam ser realizados ensaios mais abrangentes para confirmação de resistência e falha. Uma análise estatística de resultados seria

recomendada, devido à característica de variabilidade de resultados de testes de fadiga reportada nas bibliografias (Schijve, Jaap, 2009) (ASM, 1997).

## REFERÊNCIAS

- 1.The American Society for Testing Materials (ASTM), **ASTM E1049 – Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis**. In: Annual Book of ASTM, 2017.
- 2.Schijve, Jaap. **Fatigue of Structures and Materials**. 2nd. ed. The Netherlands: Springer, 2009.
- 3.The American Society for Metals (ASM), **ASM Handbook: Fatigue and Fracture**. Volume 19, ASM International, 1997.
- 4.Nisbett, J. Keith; Budynas, Richard G. **Shigley’s Mechanical Engineering Design**. 8th. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2009.
- 5.Norton, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- 6.The American Petroleum Institute (API). **API 579-1/ASME FFS-1. Fitness for Service**, Washington: DC, 2016.
- 7.Madenci, Erdogan; Guven, Ibrahim. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS**. 2nd. ed. USA: Springer, 2015.
- 8.Callister, William D Jr; Rethwisch, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

9. Siemens Softwares. **Femap Basics 1: UI Overview**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware>>. Acesso em: 29 maio. 2021.
  
10. Siemens Softwares. **Femap Basics 2: Geometry Preparation**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware>>. Acesso em: 29 maio. 2021.
  
11. Siemens Softwares. **Femap Basics 3: Properties, Loads and Boundary Conditions**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware>>. Acesso em: 29 maio. 2021.
  
12. Siemens Softwares. **Femap Basics 4: Meshing**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware>>. Acesso em: 29 maio. 2021.
  
13. Siemens Softwares. **Femap Basics 5: Postprocessing**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware>>. Acesso em: 29 maio. 2021.
  
14. Siemens Softwares. **Femap Basics 6: Program Files and API Scripts**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/SiemensSoftware>>. Acesso em: 29 maio. 2021.
  
15. Siemens Community. **Siemcenter Femap**. Disponível em: <<https://community.sw.siemens.com/s/topic/0TO4O000000MikcWAC/siemcenter-femap>>. Acesso em: 15 outubro. 2021.