

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

MODELAGEM MATEMÁTICA DO DANO EM
FADIGA DO AÇO 4140 UTILIZANDO
O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

João Bosco dos Santos

Belo Horizonte
2011

João Bosco dos Santos

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO DANO EM
FADIGA DO AÇO 4140 UTILIZANDO
O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Pedro Américo Almeida Magalhães Jr., Dr.

Co-orientador: Prof. Ernani Sales de Palma, Dr.- Ing

Belo Horizonte
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S237m Santos, João Bosco dos
Modelagem matemática do dano em fadiga do aço 4140 utilizando o método de elementos finitos / João Bosco dos Santos. Belo Horizonte, 2011.
102f. : Il.

Orientador: Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

Co-orientador: Ernani Sales de Palma

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Aço – Fadiga. 2. Mecânica de fratura. 3. Métodos de elementos finitos. I. Magalhães Júnior, Pedro Américo Almeida. II. Palma, Ernani Sales de. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 669.14

João Bosco dos Santos

MODELAGEM MATEMÁTICA DO DANO EM FADIGA DO AÇO 4140 UTILIZANDO
O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica

Prof. Pedro Américo Almeida Magalhães Junior
Orientador
PUC Minas

Prof. Sidney Nicodemos da Silva
Examinador Externo
CEFET MG

Examinador Interno
Prof. Perrin Smith Neto
PUC Minas

Examinador Interno
Prof. José Rubens Gonçalves Carneiro
PUC Minas

Belo Horizonte, 12 de julho de 2011

Agradecimentos

Agradeço à DEUS pela vida

Aos meus pais e familiares, pela presença constante, na minha caminhada

Ao Professor Pedro Américo Magalhães, pelo entusiasmo e orientação do trabalho desenvolvido

Ao Professor Ernani Sales Palma, pelo apoio e motivação na escolha do tema e co-orientação

Ao doutorando Daniel Lelis, pelas discussões precisas no fechamento da dissertação

A secretaria do programa, na pessoa da Valéria Gomes por propiciar um convívio saudável aos alunos do programa e pelos esclarecimentos às normas do programa de pós-graduação

Ao funcionário Jomar Delvedio Francisco, pelo apoio na instalação e manutenção dos softwares do programa da PUC

Ao engenheiro Jorge Luiz Santos Junior, pelas primeiras simulações, no software de simulação numérica

Ao mestrando Leandro Gonçalves, pela paciência em ensinar no manuseio da plataforma Ansys

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC

Aos colegas do mestrado pela troca de experiências durante o desenvolvimento da dissertação

A CAPES pelo apoio financeiro

Para Larissa e Isadora,

como incentivo
ao estudo e a pesquisa

e a Silvana
pelo apoio e dedicação

RESUMO

No presente trabalho foi estudado a vida de um aço ABNT 4140 sob determinadas condições de carregamento utilizando tensão cíclica em corpos-de-prova padronizados no ensaio de fadiga do tipo flexo-rotativo. O método de elementos finitos (MEF) foi aplicado por um software comercial na quantificação dos danos em fadiga deste aço. Foi avaliado o efeito da rugosidade em corpo-de-prova usinado, polido e recozido na geração do dano de fadiga. Os resultados obtidos pelo método experimental, analítico e numérico foram comparados entre si. A regra linear de Palmgren-Miner mostrou-se adequado na previsão da falha por fadiga quando aplicado aos resultados experimentais. O modelo analítico proposto apresentou uma ótima correlação entre o dano de fadiga obtido pelo método numérico previsto pelo programa comercial Ansys 12.1 Workbench. A rugosidade teve pouca influência na geração do dano em fadiga para as condições propostas pelo experimento: usinado, polido e recozido. O aumento do número de pontos nodais e números de elementos além do padrão determinado pelo software não teve efeito na geração de danos para estas condições estabelecidas para os corpos-de-prova.

Palavras Chave: Fadiga Mecânica, Dano de Fadiga, Acúmulo de Dano, Método de Elementos Finitos

ABSTRACT

This work presents the study of fatigue life of 4140 steel under certain conditions using alternating stress in specimen standard in the fatigue test of flexion rotation type. The finite element method (FEM) was implemented by commercial software ANSYS quantification of fatigue damage in this material. The effect of roughness, machining, polishing and annealing specimen was evaluated in the generation of fatigue damage. The results obtained by experimental, analytical and numerical method was compared. The rule Palmgren-Miner was adequate in predicting fatigue failure when applied to the experimental results. The analytical model proposed was an excellent correlation between the fatigue damage obtained by the numerical method provided by commercial software. The roughness had little influence on the generation of damage in fatigue to the conditions proposed by the experiment machined, polished and annealed. The increase in the number of nodal points and number of elements had no effect on the generation of damage to these conditions.

Keywords: Mechanical Fatigue, Damage Fatigue, Accumulated Damage, Finite Element Method

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação da tensão no tempo	21
Figura 2: Diagrama de Wöhler	21
Figura 3: Fadiga de alto e baixo ciclo.....	22
Figura 4: Correção da tensão média por modelos teóricos.....	23
Figura 5: Representação do acúmulo de danos	27
Figura 6: Esquema da máquina para realização do ensaio – Flexão rotativa.....	28
Figura 7: Fluxo para gerar modelo matemático a partir de eixo de motores arrefecimento.....	30
Figura 8: Tipos de elementos finitos	31
Figura 9: Malha dos elementos finitos	33
Figura 10: Método de estimativa da vida de fadiga.....	35
Figura 11: Fluxograma de Comparação entre Métodos Aplicados	39
Figura 12: Fluxo do Método Experimental	44
Figura 13: Geometria corpo-de-prova no ensaio fadiga.....	45
Figura 14: Região do corpo-de-prova sob carregamento de fadiga.....	49
Figura 15: Valores experimentais do corpo-de-prova usinado aplicando no modelo analítico	54
Figura 16: Valores experimentais do corpo-de-prova polido aplicando no modelo analítico	55
Figura 17 – Gráfico de comparação entre as tensões alternadas aplicadas I.....	57
Figura 18– Gráfico comparação entre as tensões alternadas aplicadas II	59
Figura 19– Imagem do corpo-de-prova discretizado.....	60
Figura 20 – Corpo-de-prova discretizado após simulação de carregamento.....	60
Figura 21 – Tensão equivalente pelo critério de Von Mises	61
Figura 22 – Discretização por elemento finito tetraédrica de 4 nós	62
Figura 23 – Deformação para discretização tetraédrica de 4 nós	62
Figura 24 - Comparação entre a Malha utilizada: Usinado.....	64
Figura 25 - Comparação entre a Malha utilizada: Recozido	65
Figura 26 - Comparação entre a Malha utilizada: Polido.....	65
Figura 27 – Condição usinado: comparação do dano entre métodos aplicados	68
Figura 28 – Condição recozido: comparação do dano entre métodos aplicados.....	69
Figura 29 – Condição polido: comparação do dano entre métodos aplicados	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química média do aço ABNT 4140.....	45
Quadro 2 - Propriedades Mecânicas do aço AISI 4140.....	48
Quadro 3 - Parâmetros após Usinagem	49
Quadro 4– Fator rugosidade superficial	55
Quadro 5 – Dano médio pela regra linear para corpo de prova rompido	70
Quadro 6 – Efeito recozimento: média e desvio do número de ciclos	71
Quadro 7 – Efeito rugosidade em superfície polida: dano médio pela regra linear	71
Quadro 8 – Efeito rugosidade em superfície usinada: dano médio pela regra linear	72
Quadro 9 – Efeito rugosidade em material usinado: média e desvio do número de ciclos	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação modelo analítico para condição: corpo-de-prova polido	51
Tabela 2 - Comparação entre os resultados experimentais e modelo aplicado	53
Tabela 3 – Comparação entre as tensões alternadas aplicadas I.....	56
Tabela 4– Comparação entre as tensões alternadas aplicadas II	58
Tabela 5 - Comparação entre os resultados experimentais e Ansys.....	64
Tabela 6 – Condição Usinado: $R_a = 1,68 + 0,36 \mu\text{m}$	66
Tabela 7 – Condição Usinado e Recozido: $R_a = 4,79 + 0,13 \mu\text{m}$	67
Tabela 8 – Condição Polido: $R_a = 0,15 + 0,01 \mu\text{m}$	67

SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição	Unidade
a_p	Profundidade de corte	Mm
b	Coefficiente de modificação aço 4140	Adimensional
D	Dano em fadiga	Adimensional
D_{acu}	Dano acumulado em fadiga	Adimensional
E	Módulo de elasticidade	GPa
f	Avanço	mm/rot
F_A	Força aplicada pelos pesos mortos	N
F_{CP}	Força atuante no corpo-de-prova	N
I	Distância do apoio (ponto A) ao ponto de aplicação de F_{CP} da figura A.1	Mm
I_i	É a relação entre o número de ciclos obtido para vida longa 1.000.000 e o número de ciclos medido para dano igual 0,99 aplicado ao modelo analítico.	Adimensional
J	Momento de inércia da área da seção transversal	m^4
m	Expoente do material aço 4140	Adimensional
M_R	Momento resultante na máquina de fadiga	N.m
M_{FT}	Momento fletor máximo atuante no corpo-de-prova	N.m
n_i	Número de ciclos inicial	Adimensional
N_i	Número de ciclos aplicados	Adimensional
N_f	Número de ciclos que leva o material a fratura	Adimensional

Símbolo	Descrição	Unidade
P_{ap}	Carga aplicada	Kgf
R	Razão de tensão	Adimensional
R_{cp}	Raio da área da seção transversal do corpo-de-prova	mm
R_a	Rugosidade média	μm
R_q	Rugosidade média quadrática	μm
R_t	Rugosidade máxima	μm
R_z	Rugosidade	μm
S_e	Limite de resistência à fadiga	MPa
S_y	Limite de resistência ao escoamento	MPa
S_u	Limite de resistência à tração	MPa
S_r	Limite de resistência à ruptura	MPa
ΔD	Incremento de dano	Adimensional
σ_a	Tensão alternada	MPa
σ_e	Tensão escoamento	MPa
σ_{aeq}	Tensão alternada equivalente	MPa
σ_m	Tensão média	MPa
σ_{min}	Tensão mínima ciclo	MPa
σ_{max}	Tensão máxima ciclo	MPa
σ_r	Limite de ruptura	MPa
σ_{rf}	Limite de resistência à fadiga	MPa

Símbolo	Descrição	Unidade
σ_u	Limite de resistência à tração	MPa
σ_{RO}	Tensão de resistência do material aço 4140	MPa
ν	Coefficiente de Poisson	Adm

ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas/Abreviaturas	Descrição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
MEF	Método Elementos Finitos
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	18
<i>1.1.1 Objetivos Gerais:.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2 Objetivos Específicos:.....</i>	<i>18</i>
1.2 Justificativa	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Fadiga Mecânica	20
<i>2.1.1 Mecanismos de falha por fadiga</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2 Danos em fadiga</i>	<i>25</i>
2.2 Metodologias Experimentais para Determinação de Danos de Fadiga.....	28
<i>2.2.1 Ensaios de fadiga.....</i>	<i>28</i>
2.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)	29
<i>2.3.1 Malha dos elementos finitos.....</i>	<i>33</i>
2.4 Estado da Arte	34
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
3.1 Método Analítico	40
3.2 Método Numérico	43
3.3 Método Experimental (ENSAIO FADIGA)	44
<i>3.3.1 Material.....</i>	<i>44</i>
<i>3.3.2 Corpo-de-prova</i>	<i>45</i>
<i>3.3.3 Fabricação corpo-de-prova</i>	<i>46</i>
<i>3.4.1 Usinagem</i>	<i>46</i>
<i>3.4.2 Ensaio de fadiga</i>	<i>46</i>
<i>3.4.3 Alívio de tensão</i>	<i>47</i>
<i>3.4.4 Propriedades mecânicas</i>	<i>48</i>
<i>3.4.5 Medição da rugosidade.....</i>	<i>48</i>
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 Método Analítico e Numérico.....	50
<i>4.1.1 Aplicação Modelo Analítico</i>	<i>50</i>
<i>4.1.2 Aplicação do Programa Ansys</i>	<i>56</i>
<i>4.1.2.1 <u>Ansys WorkBench versão 12.1</u></i>	<i>59</i>
4.2 Comparação entre os Métodos Aplicados: Regra Linear, Modelo Analítico-Numérico e Simulação pelo Ansys	66
4.3 Considerações e análises sob resultados experimentais:.....	70
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	74
5.1 Conclusões	74
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICES	78

1 INTRODUÇÃO

O trabalho proposto teve como objetivo estudar a vida útil em componentes estruturais utilizando o método de elementos finitos em corpos-de-prova padronizados do ensaio de fadiga. Para seu desenvolvimento foi simulado o carregamento e seu efeito na geração de dano de fadiga no corpo-de-prova em ensaio de flexão rotativa. Os resultados analítico-numéricos foram comparados com aqueles obtidos pelo método experimental.

A estimativa da vida útil de estruturas submetidas a esforços é importante nos projetos de componentes mecânicos a fim de assegurar sua estabilidade. Os modelos empregados para determinar a falha do material consideram a amplitude da tensão aplicada. Para aplicar estes modelos existe a necessidade de conhecer as propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos componentes mecânicos, tais como: limite de ruptura, limite de escoamento e resistência à fadiga.

Entende-se por fadiga mecânica como sendo a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico, ou seja, fadiga é um problema que afeta qualquer componente estrutural ou parte que se move.

A maioria das falhas de componentes mecânicos em serviço ocorre devido à fadiga do material. O percentual de falhas em aços estruturais que estão relacionadas com a fadiga e fratura são elevados. A fadiga é um processo de acúmulo de danos causados por tensões cíclicas em componentes estruturais. Normalmente, a fadiga ocorre em regime elástico, em regiões de concentração de tensões e deformações onde as tensões locais excedem o limite de escoamento do material.

Após certo número de ciclos os danos acumulados no material causam a iniciação e a subsequente propagação de trincas em regiões danificadas plasticamente. Este processo pode ser a causa da fratura de componentes, conforme Mansur (2003).

Cerca de cento e dez corpos-de-prova usinados foram obtidos sob a forma cilíndrica para realização do ensaio de fadiga do tipo flexão rotativa. Doze desses corpos-de-prova que apresentaram a maior rugosidade média em torno de $4,79 \mu\text{m}$ foram submetidos ao recozimento em virtude do processo de acabamento empregado usinagem e torneamento. Objetivando estudar o efeito da rugosidade na geração de dano durante o ensaio de fadiga, quinze corpos-de-prova

desse conjunto foram submetidos ao polimento superficial alcançando uma rugosidade média de 0,15 μm .

Os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de fadiga apresentam tensões deixadas pelo ensaio, tais como: deformação plástica e tensões elásticas que provocam mudanças nas propriedades do material. Assim, adotou-se nesse experimento uma metodologia alicerçada pela pesquisa bibliográfica que sugeriu avaliar o dano gerado no corpo-de-prova fabricado a partir do aço classe AISI 4140.

A regra linear de Palmgren-Miner apresentou-se como uma ferramenta adequada na previsão da falha por fadiga quando aplicado aos resultados experimentais obtidos por Lopes (2006), sendo uma boa aproximação para o cálculo de dano gerado durante o ensaio.

O modelo analítico numérico proposto por Warhadpande *et al* (2010) apresentou uma ótima correlação na previsão de vida de fadiga e do dano em fadiga aos resultados numéricos gerados pela plataforma comercial Ansys 12.1 Workbench, em todas as condições de estudo proposta para os corpos-de-prova: usinado, polido e recozido.

Verificou-se ainda nesse estudo que a rugosidade teve pouca influência na geração do dano em fadiga. Uma explicação talvez seja em função da tensão residual devido a irregularidades da superfície para a faixa de rugosidade apresentada pelos corpos-de-prova. Assim, após comparar os resultados obtidos pelos três métodos adotados na metodologia proposta verificou-se que não houve uma diferença significativa no dano produzido pelo corpo-de-prova usinado, polido e recozido.

A simulação pela plataforma Ansys mostrou-se uma boa aproximação para a discretização dos elementos finitos adotado como tetraédrico de 4 nós. O tamanho da malha adotada pelo padrão do software gerou valores danos próximo aos valores obtidos experimentalmente. O refinamento da malha no melhoramento de resultados da deformação e tensão dentro de cada elemento de domínio estudado foi bem significativo. Em todas as condições de ensaio de fadiga ao aumentar o número de pontos nodais e números de elementos além do padrão determinado pelo software não houve diferenças significativas na geração de danos para estas condições estabelecidas para os corpos-de-prova.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais:

Estudo comparou vida útil e o dano em fadiga em corpos-de-prova padronizados através do método analítico, numérico e experimental de um aço AISI 4140. Neste trabalho de pesquisa foi possível aplicar o modelo teórico para cálculo do dano conforme a Regra de Palmgren-Miner, aos resultados obtidos pelos experimentos.

1.1.2 Objetivos Específicos:

O objetivo específico deste projeto de pesquisa é quantificar os danos do ensaio de fadiga presentes nos corpos-de-prova de aço carbono. Para tanto, utilizou-se o método analítico, através de equações, a simulação numérica e o método experimental em corpos-de-prova padronizados. O dano provocado no material por alterações na superfície sob carregamento cíclico alternado foi mensurado.

Pretende-se atingir os seguintes objetivos numericamente:

- a) Determinar os danos em fadiga em componentes estruturais, utilizando para tanto a Regra de Palmgren-Miner;
- b) Estudar o efeito da rugosidade, devido os diferentes processos de fabricação do corpo-de-prova: usinado e polido mensurando o dano produzido em cada caso separadamente;
- c) Pesquisar o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões na superfície do corpo-de-prova na geração do dano em fadiga;

1.2 Justificativa

Praticamente toda gama de materiais de engenharia usados na indústria metal-mecânica pode utilizar de simulação numérica por elementos finitos para prever a vida em fadiga dos componentes mecânicos. Pode-se viabilizar esta previsão de vida por meio da quantificação das deformações plásticas sofridas, das avaliações de degradação mecânica do material e, principalmente, do acúmulo que os danos em fadiga podem causar em estruturas de sustentação.

As pesquisas na área de fadiga indicam tendências na aplicação de modelos constitutivos baseados na teoria do dano. Assim estabelecer comparações entre resultados previstos por esses modelos, produzindo refinamentos sucessivos entre os valores das simulações numéricas e os valores experimentais na geração de fatores de correção constituem uma das importâncias tecnológica deste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fadiga Mecânica

A fadiga pode ser definida como sendo a tendência à nucleação de trincas do material em um carregamento inferior ao limite nominal de resistência à tração, após este material ter permanecido sob ação de ciclos repetidos de carregamentos. É um processo progressivo e localizado, que ocorre em um ou vários pontos, que pode resultar em descontinuidades ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carregamento.

De acordo com a norma ASTM E-1823-96, o termo fadiga pode ser definido como um processo pelo qual, mudanças progressivas e localizadas de natureza irreversível ocorrem no material sujeito a carregamentos ou deformações flutuantes. Esses esforços resultam em trincas e/ou na falha completa do material.

O estudo da fadiga é importante porque a maior parte das falhas de componentes mecânicos em serviços se deve à fadiga. A ruptura por fadiga ocorre sem nenhum aviso prévio, ou seja, num dado instante o componente está funcionando, no instante seguinte ele falha. Algumas das publicações admitem que cerca de 90% das rupturas das peças em serviço ocorre por fadiga.

O fenômeno da fadiga foi observado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um curto espaço de tempo em serviço. Em 1870, August Wöhler foi o responsável pela investigação sobre a falha por fadiga em eixos sob carregamento alternado identificando que o número de ciclos de tensão, provenientes de cargas variantes no tempo, eram os causadores da falha. Logo, a fadiga é um processo cumulativo, localizado, gradual e irreversível em função dos efeitos elastoplásticos que são introduzidos no material. Entende-se por efeito elastoplástico como sendo o comportamento mecânico do material que é avaliado considerando sua dependência quanto ao tempo.

A variação da tensão de tração máxima e da tensão de compressão mínima ao longo do tempo em ciclos alternados de cargas dinâmicas é representada pela Figura 1.

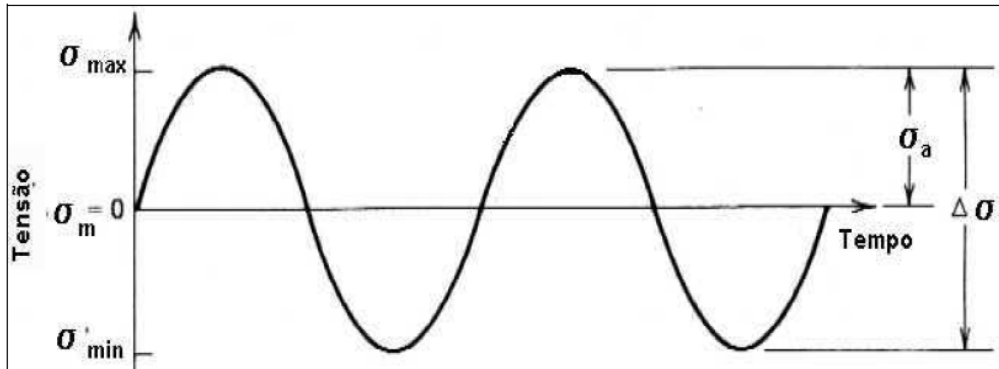


Figura 1: Variação da tensão no tempo
Fonte: LEE (2005)

Os diagramas de Wöhler (Curva S-N), mostrado na Figura 2, informam a respeito do comportamento dos materiais submetidos a estas solicitações cíclicas que relaciona a tensão (S) aplicada como uma função do número de ciclos (N).

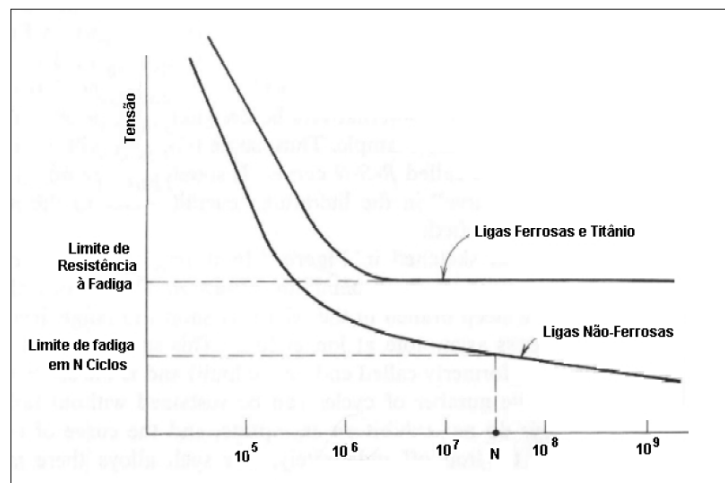


Figura 2: Diagrama de Wöhler
Fonte: LEE (2005)

Segundo Castro (2009), o limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}) é compreendido como sendo tensão limite abaixo do qual a falha por fadiga não ocorrerá. Para ligas ferrosas e titânio a curva S-N torna-se horizontal a partir de um determinado valor de número de ciclos. Este limite de resistência representa o maior valor da amplitude da tensão alternada que não causará falha no material, mesmo que o número de ciclos seja infinito.

Conforme Bannantine (1990), os métodos de análise de fadiga podem ser divididos em fadiga controlada por tensão, fadiga controlada por deformação e mecânica da fratura aplicada à fadiga. A fadiga controlada por tensão caracteriza-se como fadiga de alto ciclo apresentando vidas maiores do que 10^4 ciclos, estando submetida baixa tensão com a ocorrência de comportamento elástico. A fadiga controlada por deformação é uma fadiga de baixo ciclo apresentando vidas menores do que 10^4 ciclos, submetida a altas tensões com a ocorrência de deformação plástica. A mecânica da fratura aplicada à fadiga caracteriza-se por poder estimar o tempo de propagação da trinca até ocorrer falha. Uma representação esquemática está presente na Figura 3.

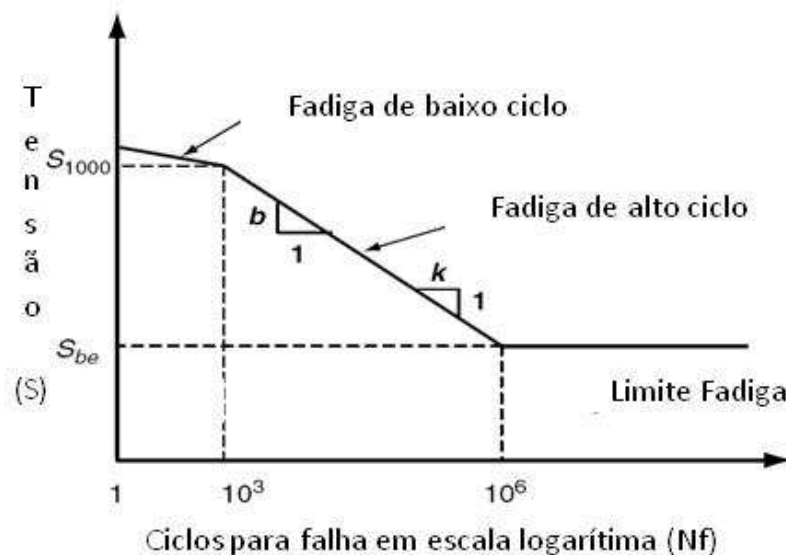


Figura 3: Fadiga de alto e baixo ciclo
Fonte: LEE (2005)

As falhas por fadiga iniciam-se em pequenas trincas e podem se manifestar no material a partir do processo de manufatura do componente, ou então se desenvolver ao longo do tempo devido às deformações cíclicas desse componente em serviço. As falhas estão presentes na forma de um entalhe, como uma descontinuidade superficial que pode agir como concentrações de tensões.

2.1.1 Mecanismos de falha por fadiga

De acordo com Lee (2005) a carga média não-nula gera efeitos de acúmulo de dano em carregamento complexos e, portanto devem ser considerados. Existem métodos de correção tradicionais que levam em consideração as cargas médias e são definidos em termos de relações e diagramas de vida constante. Esses diagramas combinam valores de tensões alternadas e tensões médias, de forma a obter uma tensão alternada equivalente considerando uma mesma vida, em função das propriedades do material, figura 4.

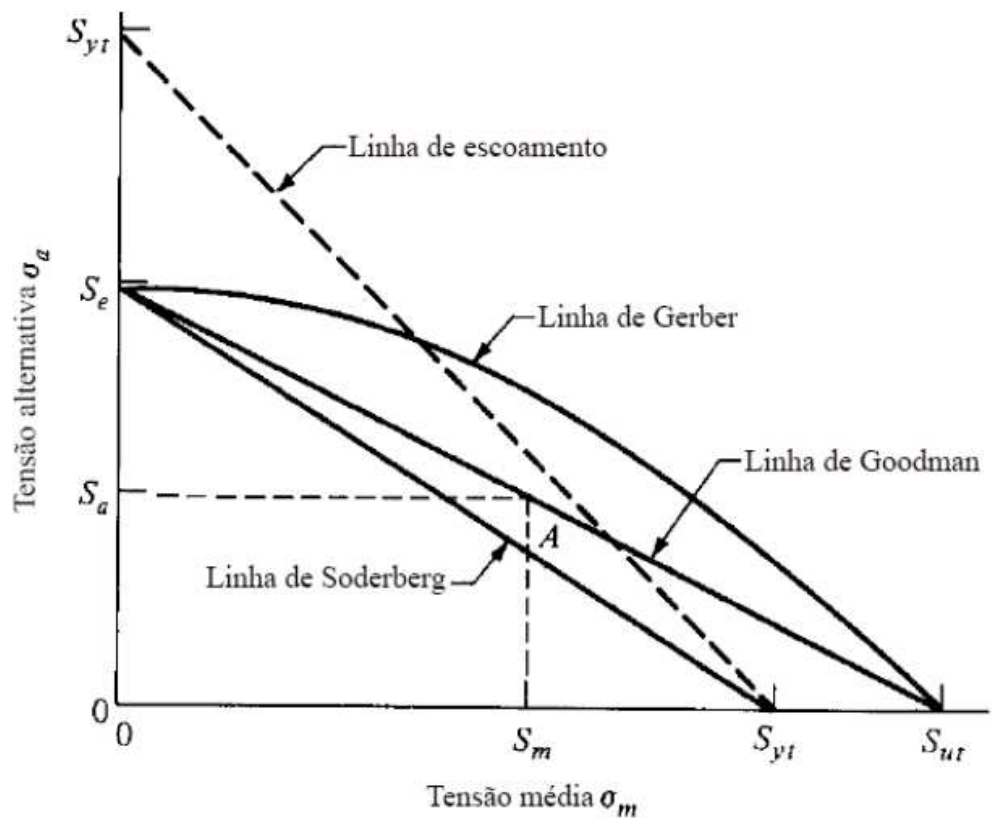


Figura 4: Correção da tensão média por modelos teóricos
Fonte: CASTRO (2009)

As relações entre tensão alternada e tensão média mais conhecidas são as demonstradas pelas equações de Geber, Goodman e Soderberg, que estão apresentadas abaixo conforme Bannantine (1990):

$$\text{Soderberg (USA, 1930): } \sigma_a / S_e + \sigma_m / S_y = 1$$

$$\text{Goodman (England, 1889): } \sigma_a / S_e + \sigma_m / S_u = 1$$

$$\text{Gerber (Germany, 1874): } \sigma_a / S_e + (\sigma_m / S_u)^2 = 1$$

$$\text{Morrow (USA, 1960s): } \sigma_a / S_e + \sigma_m / \sigma_f = 1$$

Onde:

S_e é o limite de fadiga para carregamento reverso

S_y é o limite de resistência ao escoamento

S_u é o limite de fratura verdadeira

S_r é o limite de resistência à ruptura

σ_a é a amplitude da tensão

σ_m é a tensão média

σ_f é a tensão média no eixo

Segundo Lee (2005), as considerações sobre esses modelos de correção afirmam que o método atribuído a Soderberg mostra-se muito conservador e, portanto é raramente aplicado, ao passo que os métodos de Goodman e Gerber são os mais utilizados porque tendem a apresentar bons resultados em testes práticos.

2.1.2 Danos em fadiga

O acúmulo de danos causados por tensões cíclicas em componentes estruturais, normalmente, ocorre em regime elástico, em regiões de concentração de tensões e deformações onde as tensões locais excedem o limite de escoamento do material. Após certo número de ciclos, os danos acumulados no material causam a iniciação e a subsequente propagação de trincas, em regiões danificadas plasticamente, sendo esta a causa da fratura dos componentes (Castro, 2009).

A iniciação de trincas por fadiga em inclusões na superfície do material pode ocorrer pelo rompimento da continuidade do material, como por exemplo, inclusão com a interface da matriz metálica ou pela fratura da própria inclusão. Nos estudos de fadiga, um dos principais objetivos para explicar os mecanismos de iniciação de trincas é identificar os locais preferenciais para nucleação destas trincas e verificar se estes locais estão associados a alguma particularidade micro estrutural. Estes locais são possivelmente responsáveis pela fadiga prematura ou iniciação de trincas contribuindo para reduzir a vida de fadiga dos componentes, conforme Lee (2005).

Durante o carregamento cíclico, a deformação plástica localizada pode ocorrer em pontos de tensão elevada, sendo que esta deformação induz um dano permanente no componente e a trinca começa a se desenvolver. Uma vez que o componente sofre um aumento do número de cargas cíclicas conseqüentemente o comprimento da trinca aumenta, e após determinados números de ciclos esta trinca causa a falha do componente. Este início da trinca está localizado nos planos de cisalhamento, próximos a regiões de alta concentração de tensão, tais como: as bandas de escorregamento, inclusão porosidade e descontinuidade, segundo Lee (2005).

Para uma estimativa correta da vida útil de um componente é interessante utilizar teorias de acúmulo de danos, tendo como base as curvas do S-N de amplitudes constantes, Alvarenga (2001).

O objetivo destas teorias é prever falha sob determinado tipo de carregamento, através da adição de incrementos de danos. Dentre os modelos propostos existem vantagens e limitações, sendo que, o modelo mais utilizado devido aplicabilidade e simplicidade é o de Palmgren-Miner.

Em 1945, Miner, com base nos trabalhos de Palmgren de 1924, propôs a seguinte regra para o acúmulo de dano em componentes submetidos a carregamentos com amplitude e tensão

média variáveis sendo n_i o número de ciclos que um carregamento σ_i é aplicado e N_i o respectivo número de ciclos máximo que o componente suporta o carregamento σ_i .

A teoria proposta por Palmgren-Miner, citados por Alvarenga (2001) e Mansur (2003), admite que o dano referente a cada solicitação possa ser quantificado em termos de quociente entre o número de ciclos n aplicados e o número de ciclos N necessários para causar a falha. Em seguida, admite-se que a fratura por fadiga ocorra quando a soma dos quocientes dos danos relativos, a cada solicitação, seja igual à unidade, 1. Apesar do valor da unidade ser o mais comumente aceito, não existe consenso em relação ao valor máximo considerado para a soma das relações n_i / N_i que podem variar de 0,1 a 10.

Os erros mais significativos na previsão dessa teoria é o fato de não levar em conta nenhuma influência na ordem de aplicação de vários níveis de tensão, supondo que os danos venham a se acumular na mesma taxa em um mesmo nível de tensão, sem considerar o histórico passado. Os valores experimentais para a soma até a falha estão na faixa de aproximadamente 0,25 até aproximadamente 4, dependendo do tipo de decréscimo e de acréscimo das amplitudes cíclicas de tensão usadas. O próprio Miner cita valores entre 0,7 e 2,2, conforme Castro (2009).

Existem diversas teorias para previsão da vida em fadiga propondo mecanismo de acúmulo de danos linear ou não-linear, podendo-se citar as teorias propostas por: Marco-Starkey, Henry, Gatts, Corten-Dolan, Marin e Manson. Em todas as teorias propostas o objetivo é de prever corretamente a falha sob determinadas condições de carregamento por meio de incrementos de danos. Neste projeto de pesquisa o modelo adotado será a teoria de Palmgren-Miner.

Os modelos empíricos, analíticos ou semi-analíticos, visam melhorar as discrepâncias dos conceitos de acúmulo de dano em fadiga, introduzidas por Palmgren e Miner. Dentre esses modelos, cada um consegue tratar de maneira satisfatória apenas alguns dos fatores fenomenológicos associados ao acúmulo de dano em fadiga. Devido a complexidade envolvida, nenhum dos modelos permite englobar todos os fatores e a aplicabilidade de cada um varia caso a caso.

A regra de Palmgren-Miner ainda é usada de maneira predominante nos projetos mecânicos, apesar das controvérsias. Para obter um modelo geral e confiável para previsão correta da vida de componentes é necessário muito esforço científico no estudo de fenômenos de acúmulo de dano em fadiga.

A evolução do dano proposto por este modelo pode ser representado num ensaio em fadiga pela Equação 1

$$D = \frac{n i}{N f} \quad (1)$$

onde, D é o dano limitado a uma unidade, $n i$ é o número de ciclos que o material está submetido à tensão σi e $N f$ é o número de ciclos que leva o material a fratura na mesma tensão.

A Figura 5 apresenta gráfico típico do número de ciclos (N) versus os danos em fadiga (D).

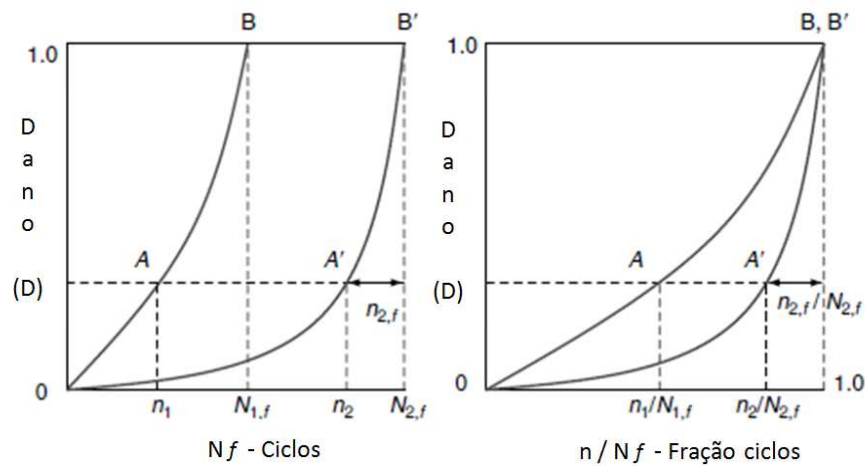


Figura 5: Representação do acúmulo de danos
Fonte: LEE (2005)

Conforme Bannantine *et al* (1990), numa análise das falhas por fadiga de alto ciclo de qualquer componente deve ser adotada a seguinte seqüência para abordagem:

- a) Calcular a amplitude da tensão alternada e da tensão média que atua sobre o componente;
- b) Fazer o levantamento do diagrama S-N do material do componente;
- c) Obter a vida do componente em número de ciclos por meio do diagrama S-N;
- d) Obter os valores das amplitudes de tensão alternada e de tensão média;

E nos casos em que a amplitude da tensão não for constante ao longo do tempo mede-se o acúmulo de dano através da regra de Palmgren-Miner.

2.2 Metodologias Experimentais para Determinação de Danos de Fadiga

2.2.1 Ensaio de fadiga

A metodologia utilizada em análise de danos de fadiga pode ser analítica, numérica ou experimental, sendo que nos casos de análises analítica e numérica utiliza-se de modelos e a quantificação destes resultados é obtida por simulação.

No caso experimental o corpo-de-prova é fixado numa máquina flexo-rotativa e mede-se o número de ciclos (n_i) que o material está submetido à tensão (σ_i), em seguida determina-se o número de ciclos (N_f) que levou o material até a fratura na mesma tensão (σ_i).

O percentual de dano em fadiga (D) é obtido dividindo o número de ciclos inicial (n_i) pelo número de ciclos final (N_f), segundo Lee (2005).

Um dos ensaios para o estudo da fadiga é a flexão rotativa que consiste de uma solicitação usada em máquinas de ensaios de fadiga, no qual as fibras constituintes do corpo de prova estão sujeitas a solicitação alternada. Uma máquina típica para a realização deste ensaio é apresentada pela Figura 6. Os corpos-de-prova utilizados em ensaios de fadiga apresentam acabamento polido rugosidade média menor $0,30 \mu\text{m}$. Este ensaio consiste em determinar o número de ciclos (N) até a ruptura, correspondente a uma determinada carga aplicada (P). A tensão média, σ_m , é nula e a amplitude da tensão, σ_a , é igual máxima tensão aplicada, de acordo com Lee (2005).

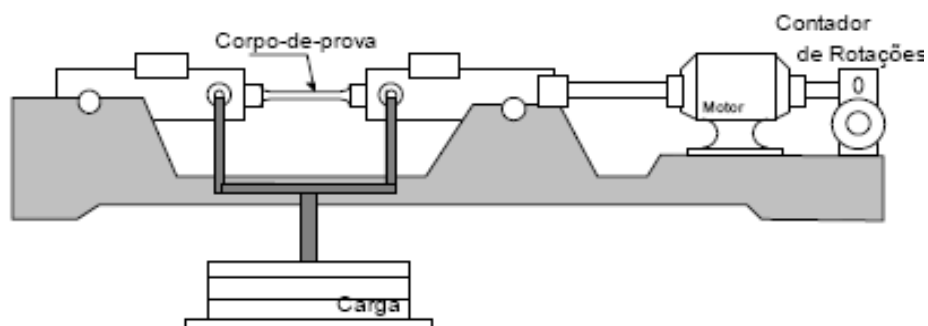


Figura 6: Esquema da máquina para realização do ensaio – Flexão rotativa
Fonte: LOPES (2006)

Conforme Bannataine *et al* (1990), o ensaio de fadiga depende de alguns fatores, como: as condições superficiais dos corpos-de-prova, o tamanho, a carga solicitada, a temperatura e a concentração de tensão.

2.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Na década de 50, o método dos elementos finitos foi aplicado basicamente na área de engenharia civil. Em 1960 Turner, Clough, Martin e Topp utilizaram pela primeira vez o nome de método dos elementos finitos. Um dos pioneiros da Mecânica Computacional no Brasil foi Fernando Venâncio Filho, professor do ITA, onde o primeiro computador dedicado ao cálculo científico foi instalado em 1960 na PUC-Rio, um Datatron B205 da Burroughs, Vaz (2011).

Na conformação mecânica a aplicação do método surgiu também na década de 60 sendo aplicado na resolução de vários problemas elasto-elásticos planos e axissimétricos, tais como compressão simples e a extrusão, Vaz (2011).

O Método dos Elementos Finitos (MEF ou FEM em inglês) é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento como a mecânica estrutural, mecânica dos fluidos e eletromagnetismo, Avelino (2000).

Os problemas de engenharia estrutural podem ser resolvidos com base na mecânica do contínuo, onde a matéria é considerada como um meio contínuo, sendo necessário identificar os fatores relevantes que a descrevem. A figura 7 ilustra o desenvolvimento de um modelo matemático que representa um eixo de motores para sistema de arrefecimento.

A solução de modelos quase sempre recai na resolução de equações consideradas complexas, como diferenciais parciais e diferenciais ordinárias, obedecendo às condições iniciais de contorno que lhe são impostas. Para obter a solução desses problemas são utilizados métodos numéricos, dentre os quais o Método dos Elementos Finitos aparece como uma poderosa ferramenta, atuando de maneira a obter uma aproximação da solução por interpolações algébricas de resolução menos complexa, segundo Avelino (2000).

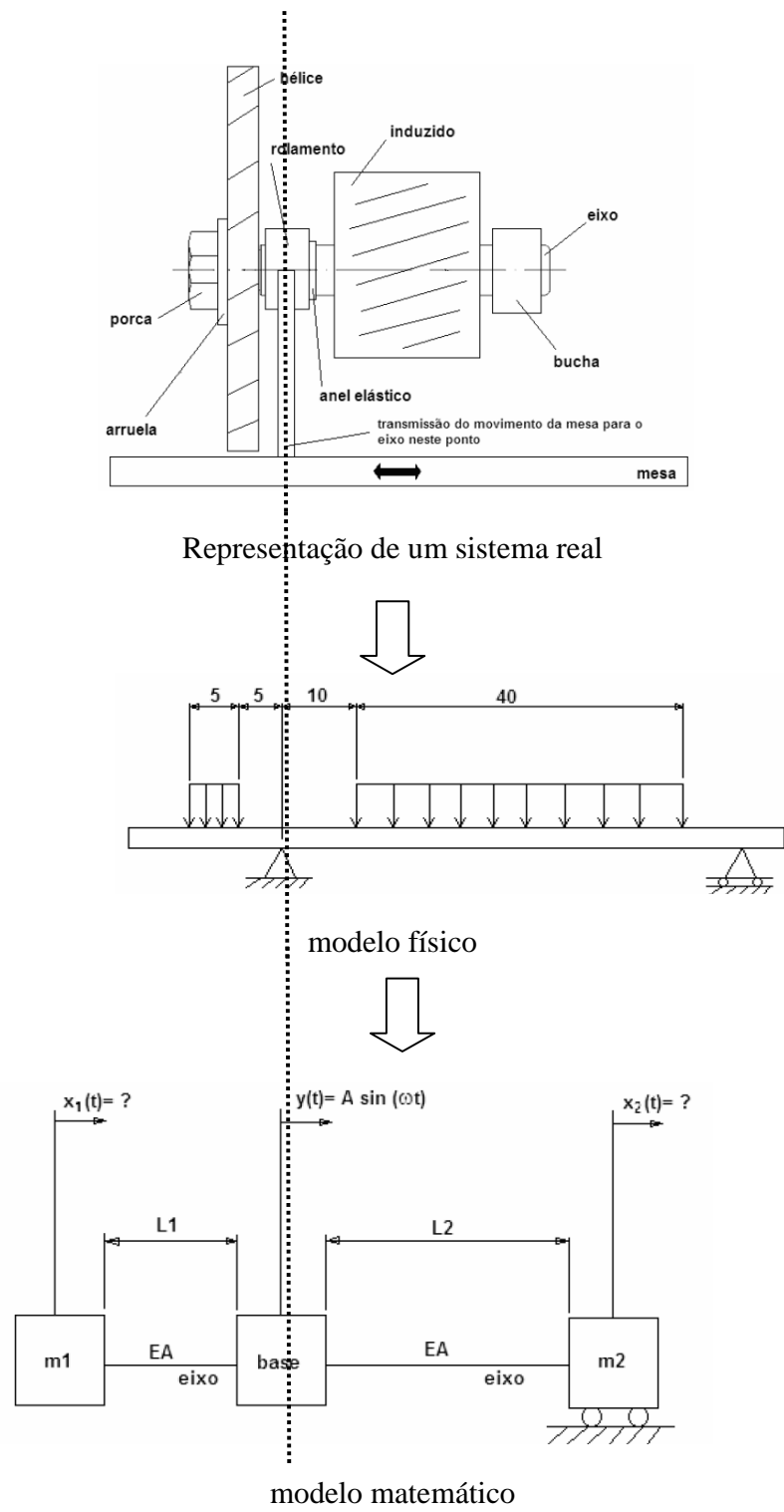


Figura 7: Fluxo para gerar modelo matemático a partir de eixo de motores arrefecimento
Fonte: ALBUQUERQUE (2005)

De acordo com Avelino (2000) os softwares utilizam diversas técnicas para solucionar equações, e uma dessas técnicas é o método dos elementos finitos que foi elaborada para resolver equações diferenciais parciais. Nesse contexto, as equações parciais são aquelas equações que modelam problemas que envolvem funções desconhecidas de várias variáveis como elasticidade, propagação de calor, dinâmica dos fluidos, ou seja, qualquer processo que é distribuído no espaço e no tempo.

Este método do domínio está dividido em uma quantidade inteira de sub-domínios chamados elementos, os quais mantêm as mesmas propriedades do meio original. Cada elemento é um variante dependente de um campo de elementos que variam ao longo de todo domínio. Eles são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos. Esses elementos apresentam formas geométricas diversas (por exemplo, triangular, quadrilateral, cúbico, etc) em função do tipo e da dimensão do problema (uni, bi, ou tridimensional), (figura 8).

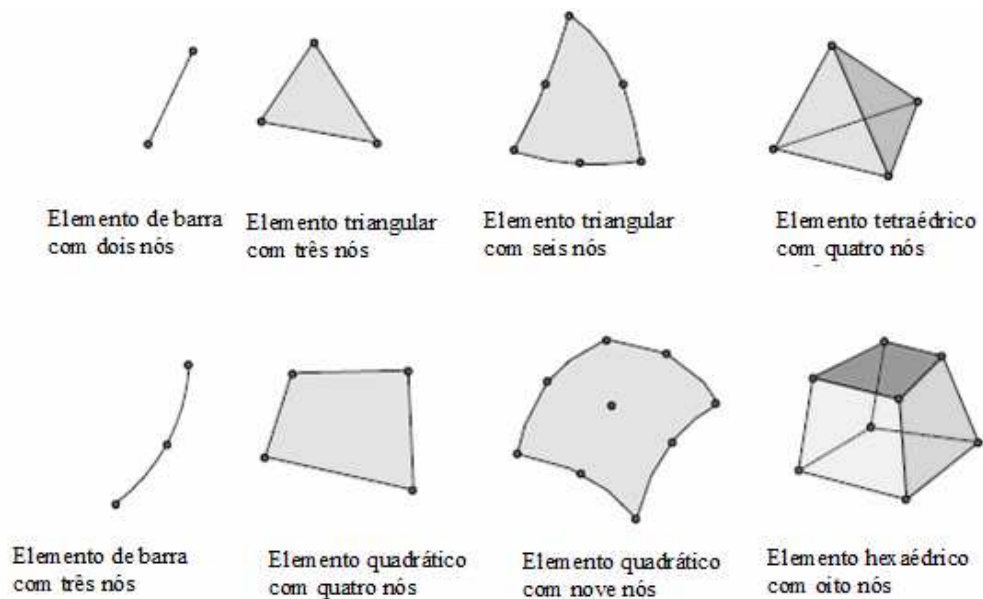


Figura 8: Tipos de elementos finitos
Fonte: ALBUQUERQUE (2005)

Ainda segundo Avelino (2000) esse método surgiu a partir de técnicas computacionais utilizadas para prever a tensão e a deformação nas estruturas sólidas. O método dos elementos finitos é utilizado em quase todos os pacotes de softwares comerciais como a engenharia estrutural. O método pode ser usado para resolver uma variedade de equações diferenciais parciais, apropriada para a solução de muitos problemas físicos, tais como as equações que regem a mecânica do estado sólido.

A vantagem do método dos elementos finitos se baseia na sua versatilidade e generalidade possibilitando o estudo de quaisquer peças independentemente da forma geométrica das matrizes e das condições de atrito existentes entre as mesmas e o material em deformação. O método dos elementos finitos permite ainda obter as distribuições das principais variáveis de campo no interior das peças e nas interfaces destas com as ferramentas, conduzindo a um dimensionamento correto das peças e das ferramentas.

Para compreender como o método funciona em grandes deformações, deve ser consideradas equações de equilíbrio de tensões relativas a um elemento de volume genérico. O método possibilita encontrar uma solução aproximada para deslocamentos, deformações, tensões, forças e outras possíveis variáveis, tais como temperatura em um corpo sólido.

Muitas vezes, deve-se levar em consideração a história do carregamento, onde se procura a resposta do corpo em diversos instantes do tempo. A solução pelo Método dos Elementos Finitos é resultado de vários tipos de aproximação da geometria da peça, da equação governante do problema, e do processo de solução. Conforme o processo é adotado, tem-se uma formulação forte ou clássica do problema ou uma formulação fraca ou variacional. Através de simulações computacionais e análises numéricas, é possível reduzir o tempo e o custo do projeto, incorporando no modelo o comportamento dinâmico repetitivo aos quais as peças estão sujeitas durante os ensaios, segundo Ferreira (2002).

Na descrição do modelo numérico deve ser considerado: a malha, o modelo constitutivo, as condições de contorno e o carregamento.

2.3.1 Malha dos elementos finitos

A malha, como é conhecida, é o conjunto de elementos e nós utilizados na discretização de um modelo geométrico para o cálculo com o método de elementos finitos, figura 9.

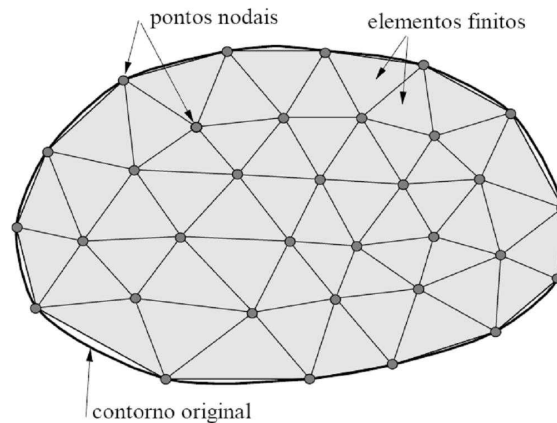


Figura 9: Malha dos elementos finitos
Fonte: ALBUQUERQUE (2005)

Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais.

O processo de geração de malha em um modelo é algo de fundamental importância para se definir o nível de precisão dos resultados a serem obtidos. Quanto maior o número de elementos e nós, maior é a precisão do resultado. A malha deve se ajustar da melhor forma possível ao formato geométrico do modelo da peça estudada, entretanto a sua densidade pode variar localmente conforme a necessidade geométrica local.

Isto significa que em regiões menores sob estudo é necessária uma densidade maior da malha para melhor representá-la. Quando se trata de fadiga, a região mais provável a sofrê-la deve sempre ter um bom refinamento na malha, pois a precisão das tensões obtidas na região deve ser a melhor possível. Ao mesmo tempo estas regiões costumam a ter geometrias mais complexas o que reforça a necessidade de se ter uma malha refinada nesta região, Avelino (2000).

A área de simulação computacional e otimização em problemas de fadiga ainda é muito incipiente. Os trabalhos que tem sido apresentado nesse campo do conhecimento nas últimas décadas se concentram em modelos de fratura e propagação de trincas aplicadas juntamente com o Método dos elementos Finitos. Esta limitação consiste no fato de que a grande maioria dos modelos para fadiga são extremamente empíricos, não existindo até o presente momento um modelo matemático constitutivo confiável, geral e com ampla aceitação pela comunidade científica ou mesmo pela indústria.

Os modelos de plasticidade cíclica com base na mecânica dos meios contínuos é uma realidade. O problema é que esses modelos ainda não são suficientemente gerais e compatíveis com a experimentação, além de exigir determinação prévia de propriedades dos materiais que não se encontram tabelados, o que dificulta a implementação de tais modelos em simulação computacional, Assan (2003).

A implementação do método dos elementos finitos no presente trabalho se deu pela utilização do software comercial Ansys 12.1 Workbench cujo objetivo foi prever a quantificação de danos e o número de ciclos em fadiga, além de propiciar a visualização do comportamento do corpo-de-prova sob carregamento cíclico alternado nas regiões propensas a falha.

O elemento finito adotado nesse estudo pela plataforma Ansys foi o tetraédrico de 4 nós. Afim de comparação foram utilizados 244 nós, 1.245 nós (padrão do software) e 1.719 pontos nodais do elemento tetraédrico para verificar precisão dos resultados gerados pela simulação.

2.4 Estado da Arte

O estado da arte do dano em fadiga de componentes e estruturas dos materiais de engenharia envolve questões de quantificação, precisão dos danos e condições específicas de carregamento. O tema foi investigado por mais de um século e continua sendo pesquisado por Murakami e Miller (2005) sob ponto de vista da fadiga de baixo ciclo.

Em regime de fadiga de baixo ciclo, Murakami e Miller (2005) conseguiram elucidar a causa da perda de ductilidade por fratura, utilizando corpos-de-prova plano e com presença de

furo. A metodologia utilizada por eles foi estabelecer correlação entre a iniciação e propagação de micro trincas e as teorias de danos proposta por Coffin-Manson e Palmgren-Miner.

Através de observações microscópicas, Murakami e Miller (2005) constataram que vida inicial esta associado com a criação e o crescimento de micro trincas no período da vida de fadiga de superfícies lisas durante o primeiro ciclo de carregamento. Eles verificaram que a história prévia da fadiga não tem efeito no dano de fadiga e é fortemente influenciada pela taxa de crescimento das micro-trincas. Observaram ainda que a camada de superfície de um corpo de prova fadigado deveria ser retirada por usinagem para remover a superfície de trincas, onde o fenômeno de perda da ductilidade de fadiga desaparece. E em caso de corpo de prova plano, a perda de ductilidade de fratura torna-se aparente somente depois de relativo número de ciclos. Enfim, eles concluíram que a causa da perda de ductilidade de fratura durante a fadiga de baixo ciclo é devido existência de pequenas trincas na superfície.

Para Jono Masahiro (2005), entender o conceito de dano de fadiga acumulada e crescimento de trinca sob carga variável foi objeto de pesquisa por mais de trinta anos e o resumo do método de estimativa da vida de fadiga é apresentada na Figura 10. Quando a vida é estimada baseada nas curvas S-N, vários fatores podem afetar a vida de fadiga e o valor de danos acumulados muda dependendo do material e das condições de carga.

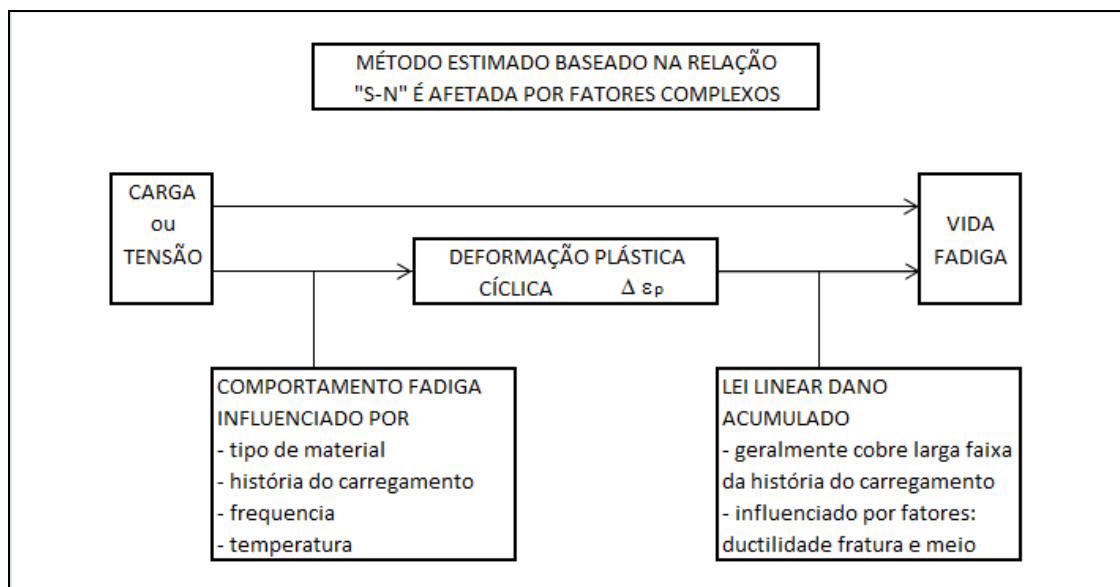


Figura 10: Método de estimativa da vida de fadiga

Fonte: JONO MASAHIRO (2005)

Traduzido pelo autor

Podem existir efeitos complexos na relação entre tensão-deformação devido taxa de deformação e ao histórico de carregamento. Observa-se, também, a estimativa do método de crescimento da trinca para trabalho experimental sob carregamento de amplitude variável. A história da carga neste caso afeta somente o comportamento de fechamento da trinca e o incremento de crescimento da trinca pode ser bem estimado pela integração linear.

Os resultados levaram a conclusão de que a lei de dano acumulado confirmou ser uma boa aproximação para previsão de vida sob carregamento de amplitude variável para regimes de baixo ciclo, e que o efeito de variações de carga aparece na relação tensão-deformação plástica, fazendo estimativa de vida baseada nas curvas S-N. Além de que existem outros fatores complexos de concepção fundamental que afetam o acúmulo de dano por fadiga, como por exemplo o meio ambiente, a transição de mecanismo da trinca devido a variações de carga e o efeito não estacionário da carga, que requerem mais estudos e pesquisa.

Koh (2002) investigou o comportamento de fadiga de um aço de alta resistência sob condições controladas por deformação, e avaliou dano em presença da tensão média e da densidade da energia de deformação. Sua investigação mostrou que a vida de fadiga é fortemente influenciada pela tensão média, e aumentam consideravelmente quando esta tensão média é de compressão e reduzir quando a tensão média é de tração.

Curtis *et al* (2003) propuseram um modelo empírico para crescimento da trinca de fadiga no regime elasto-plástico de mecânica de fratura. Tendo observado que grãos e contornos de fases controlam o crescimento da trinca do tipo plástico além de que quando a ponta da trinca aproximasse de um contorno de grão, o escorregamento é bloqueado, e o tamanho da região deformada plasticamente a frente diminui. E em consequência a deformação plástica da ponta da trinca e taxa de crescimento da trinca diminuem.

Puchi-Cabrera *et al* (2008) estudaram as propriedades mecânicas dos materiais e observaram que elas são alteradas devido aos danos de fadiga e desenvolveram um modelo de previsão de vida de fadiga quando sujeita tensão de amplitude variável. O objetivo era por meio da variação nas propriedades, módulo de elasticidade, tensão de resistência e escoamento, ductilidade avaliar o efeito do dano em fadiga na mudança das propriedades. Concluíram que o dano induzido em amostra entalhada causou aumento na tensão escoamento, enquanto que as outras propriedades permaneceram constantes. Observaram também que o número de ciclos de fadiga pode ser previsto por meio da relação linear dano acumulado (regra de Palmgren-Miner).

Guo e Warren (2008) estudaram o mecanismo do dano de fadiga para propagação da trinca superficial e sub-superficial – considerando efeito do processo induzido na integridade da superfície.

Díaz *et al* (2004) estudaram a imagem digital para avaliar a deformação plástica gerada no metal sob carga sob o ponto de vista da mudança na rugosidade superficial. A utilidade do sistema de medição através de imagem digital era avaliar, de forma não destrutiva, o processo de acúmulo de dano plástico na superfície de um corpo-de-prova entalhado. Concluíram que nos primeiros mil (1000) ciclos ocorre o estágio de crescimento da trinca, e que o baixo número de ciclos é o suficiente para gerar uma nova zona plástica que cresce não somente à frente do entalhe, mas também na direção y e ao longo da raiz do entalhe. Observaram que o efeito do amolecimento do material é produzido por ciclos, que a taxa de crescimento para avaliação da trinca não é contínua, porque inicialmente é rápida e então desacelera, e que ocorre geração de deformação plástica em volta do entalhe no local da zona plástica.

Novovic *et al* (2004) estudaram o efeito dos parâmetros de usinagem na superfície do corpo-de-prova visando o desempenho da fadiga. Concluindo que na ausência da tensão residual o valor da rugosidade tem forte influencia na vida de fadiga, e que a presença de inclusões anula o efeito da topografia superficial. Para rugosidade (R_a) de 2,5 a 5,0 microns a tensão residual não é fator significativo na vida de fadiga e que o tratamento superficial é benéfico ao corpo de prova, porém depende das propriedades dos materiais.

Starke, Walther e Eifler (2009) estudaram a relação entre o material de base e as propriedades de fadiga, calculando o tempo de vida para quatro tipos de tratamento. Concluíram que a deformação plástica, mudança temperatura, mudança resistência elétrica são suficientes para caracterizar o comportamento do ciclo de deformação sob carregamento em serviço, e que com número de ciclos para falha num teste de amplitude constante, a curva S-N foi calculada de acordo com as generalizações da equação de Basquim.

Para Mansur (2003) a definição de uma variável representativa do estado de deterioração de uma peça, com o objetivo de caracterizar o dano por fadiga, é um problema complexo. Como exemplo destas variáveis tem-se: as microtrincas e as cavidades na estrutura do material, as grandezas físicas globais, tais como a densidade e a resistividade elétrica do material, as grandezas mecânicas como a elasticidade, a plasticidade e a viscoplasticidade. As medições dimensionais das microtrincas e cavidades, das variações das grandezas físicas e mecânicas são formas de

quantificar danos. O período compreendido na fase inicial do processo de fadiga, quando ocorre a nucleação e crescimento de micro trincas, é um período de progresso estável do dano, que ocupa a maior parte da vida em fadiga, por volta de 80%.

Assim, a trinca superficial parece ser a medida mais natural do progresso do dano por fadiga, portanto, devido as limitações das técnicas de medição das trincas, a medição do dano é restrita ao estágio final da micro trinca. Observa-se que a quantificação do dano no estágio de formação da micro trinca é uma atividade complexa e apresenta resultados satisfatórios somente em laboratórios.

Warhadpande *et al* (2010) pesquisaram a evolução do dano em fadiga em corpo de prova de um aço AISI 4140 sob várias condições de carregamento e determinaram a deformação e a vida em fadiga em diferentes níveis de tensão, o que possibilitou a investigação de falhas do material, uma vez que os parâmetros foram obtidos pelo ensaio de fadiga. No estudo realizado por estes pesquisadores, a variável dano (D) foi obtida usando o método de variação do módulo de elasticidade (E) sendo que a curva experimental do dano (D) versus número de ciclo (N) foi utilizada para determinar a propriedade resistência (σ_R).

Na pesquisa conduzida por Zhang *et al* (2010), os estudos concluíram que os parâmetros de materiais podem ser obtidos por resultados de teste de fadiga em corpo-de-prova padrão, onde a simulação numérica numa plataforma de software comercial pode ser utilizada para prever o início da trinca de fadiga.

Parte do material pesquisado faz referência ao início de nucleação da trinca no regime de baixo ciclo. No presente estudo o regime adotado será a fadiga de alto ciclo, portanto não estará sendo estudado o início e a propagação de trinca. Conforme maioria dos pesquisadores citados o dano acumulado confirmou ser uma boa aproximação para previsão de vida na medida em que o histórico de cargas provoca um estado crescente de danos.

A regra de Palmgren-Miner, denominada a partir de então de regra linear, se mostra como uma boa aproximação para cálculo do dano. A variação das propriedades mecânicas pode ser uma forma de avaliar o dano causado por fadiga no material. Assim, decidiu-se testar esta hipótese no projeto de trabalho alicerçado no modelo analítico proposto que se baseia na variação do módulo de elasticidade do material. Uma vez que será possível determinar o limite de resistência do material a partir do gráfico experimental de dano por número de ciclos.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental adotada no desenvolvimento desta dissertação foi uma comparação entre os métodos aplicados para previsão de dano em fadiga, como ilustra a figura 11, sendo que a metodologia está dividida em duas etapas, a saber:

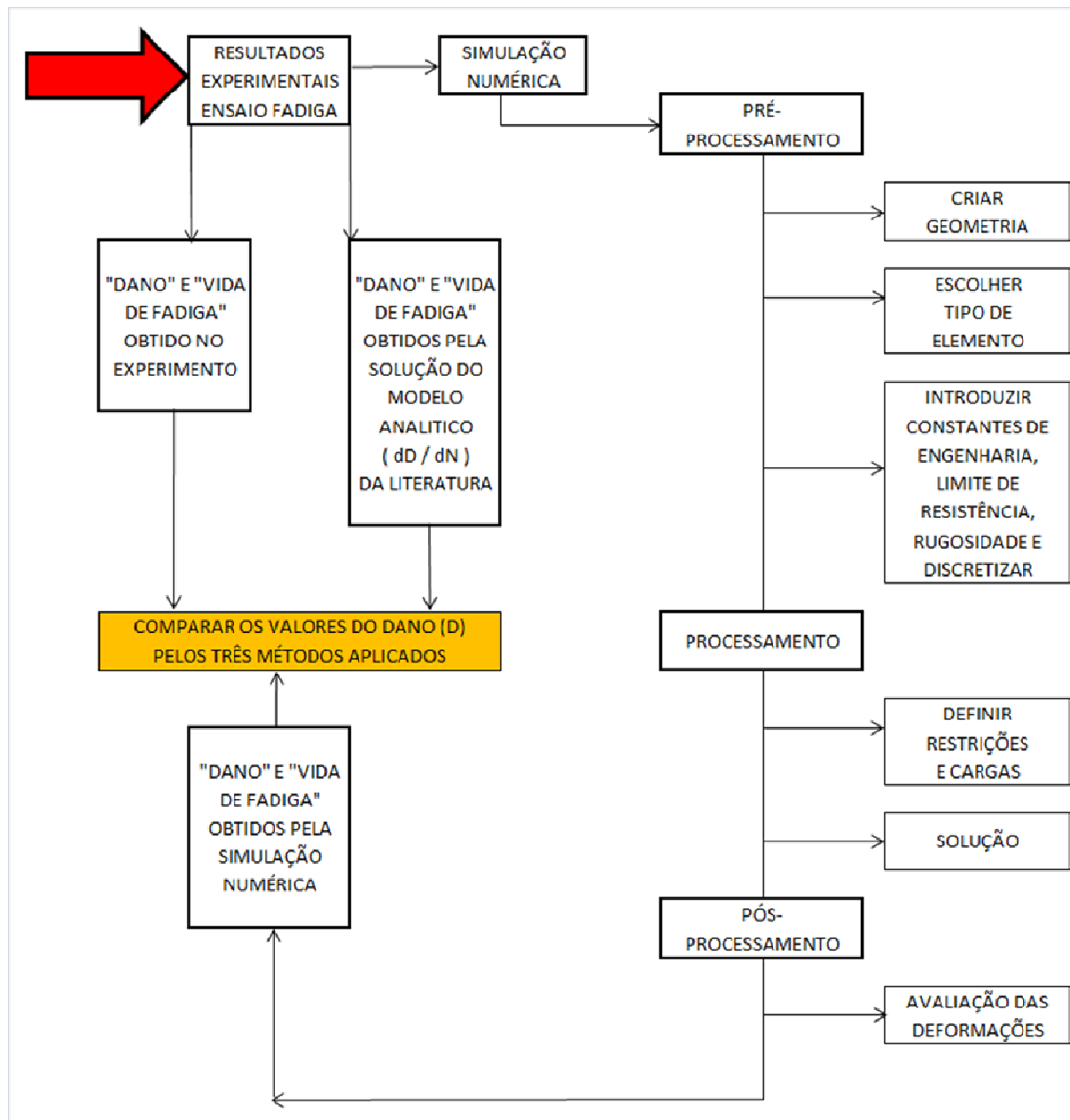


Figura 11: Fluxograma de Comparação entre Métodos Aplicados
Elaborado pelo autor

1ª ETAPA

A primeira etapa consistiu em estimar o dano acumulado (D_{acu}) pela vida de fadiga (N) utilizando para tanto o Microsoft Office Excell, ou seja, foi uma solução numérica para avaliar o modelo analítico desenvolvido. A equação proposta pelo método analítico foi calculada pela introdução dos parâmetros e condições de contornos utilizados na fase experimental quando foram ensaiados os corpos-de-prova em fadiga no ensaio de flexão rotativa obtida por Lopes (2006).

2ª ETAPA

Na segunda etapa será realizada a simulação no estado plano de tensão de corpos-de-prova padronizados para realização do ensaio de fadiga de flexão rotativa através do software comercial da plataforma ANSYS. Assim, simulando as condições superficiais previstas no trabalho experimental de Lopes (2006), tais como a diferença de rugosidade devido ao processo empregado na fabricação dos corpos-de-prova, e adotando a técnica de refino da malha nas regiões mais susceptíveis a falha por fadiga, poder-se-á obter o valor do dano causado no corpo-de-prova pela solução aproximada das equações de carregamento.

3.1 Método Analítico

A equação 2, proposta por Warhadpande *et al* (2010), expressa a variação do dano (D) em fadiga com o número de ciclos (N).

$$\frac{dD}{dN} = \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_R(1-D)} \right)^m \quad (2)$$

$$\sigma_R = \sigma_{RO} \left(1 - b \frac{\sigma_{média}}{\sigma_u} \right) \quad (3)$$

$$\bar{E}_c = E(1-hD) \quad (4)$$

$$\bar{E}_t = E(1-D)$$

$$\bar{\nu} = \nu \quad (5)$$

Onde:

m – expoente para o aço 4140: (valor de $m = 3,97$)

σ_R – limite de resistência final

$\Delta \sigma$ – faixa de tensão

σ_{RO} – tensão de carregamento reverso : (valor de $\sigma_{RO} = 6486,5$ MPa)

σ_u – limite de ruptura

b – coeficiente modificação para aço 4140: (valor de $b = 0,41$)

E_c – módulo elasticidade na compressão

E_t – módulo elasticidade na tração

ν – taxa de Poisson

$\underline{\nu}$ – taxa de Poisson no dano

Resolvendo-se as equações 2 a 5, para as condições de contorno obtém-se a equação 6:

$$D = \left\{ 1 - \left[1 - (m+1) \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma_R} \right)^m N \right]^{\frac{1}{m+1}} \right\} \quad (6)$$

Onde:

D – variável dano

N – número de ciclos

m , σ_{RO} e b são constantes empíricas introduzidas na lei de evolução dos danos. Admite-se que a faixa de tensão ($\Delta \sigma$) é constante.

Uma rotina sob forma de algoritmo poderá ser implementada para determinar o número de ciclos (N), a partir da equação 7.

$$\left(\frac{dD}{dN} \right)_j^i = \left(\frac{(\Delta \sigma)_j^i}{\sigma_R(1 - D_j^i)} \right)^m \quad (7)$$

1-A evolução da taxa em cada elemento é avaliada conhecendo o histórico de tensão no bloco e o estado decorrente do dano no elemento triangular.

$$\left(\frac{dD}{dN}\right)_{critico}^i = \text{Max}\left(\frac{dD}{dN}\right)_j^i \quad (8)$$

2-O elemento triangular com máxima taxa de evolução do dano é escolhida com o elemento triangular crítico para o bloco corrente de ciclos.

$$\Delta N^i = \frac{\Delta D}{\left(\frac{dD}{dN}\right)_{critico}^i} \quad (9)$$

3-O número de ciclos computado no bloco corrente de ciclos.

$$N = N + \Delta N^i \quad (10)$$

4-O número de ciclos decorridos.

$$\Delta D_j^i = \left(\frac{dD}{dN}\right)_j^i \Delta N^i \quad (11)$$

5-Incremento no dano para cada elemento triangular durante o bloco corrente.

$$D_j^{i+1} = D_j^i + \Delta D_j^i \quad (12)$$

6-Estado do dano para cada elemento triangular no início do próximo bloco de ciclos.

$$(E_c)_j^i = E(1 - hD_j^i) \quad (13)$$

$$(E_t)_j^i = E(1 - D_j^i) \quad (14)$$

7-Módulo elástico é modificado para o início do próximo bloco de ciclos.

3.2 Método Numérico

Pretende-se por meio de simulação estudar o efeito da rugosidade em corpos-de-prova usinado e polido sob carregamento cíclico alternado na geração de danos de fadiga ao longo de determinado tempo.

Os valores de tensão (σ) e do número de ciclos (N) que serão utilizados para alimentar as simulações numéricas são provenientes da pesquisa conduzida por Lopes (2006), e encontram-se no apêndice D.

As propriedades mecânicas do aço AISI 4140 como o módulo de elasticidade, o limite de resistência à fadiga, o limite de escoamento e o limite de resistência à ruptura são valores necessários para alimentar o software de simulação. No presente caso os valores utilizados serão aqueles medidos nas pesquisas realizadas por Lopes (2006).

Nesta simulação pelo programa ANSYS, o corpo-de-prova nas dimensões padronizadas para ensaio de fadiga será submetido a carregamentos já desenvolvidos por Lopes (2006).

O elemento finito adotado nesse estudo pela plataforma Ansys será o tetraédrico de 4 nós. Para comparação nesse estudo serão utilizados 244 nós, 1.245 nós (padrão do software) e 1.719 pontos nodais do elemento tetraédrico para verificar precisão dos resultados gerados pela simulação numérica.

3.3 Método Experimental (ENSAIO FADIGA)

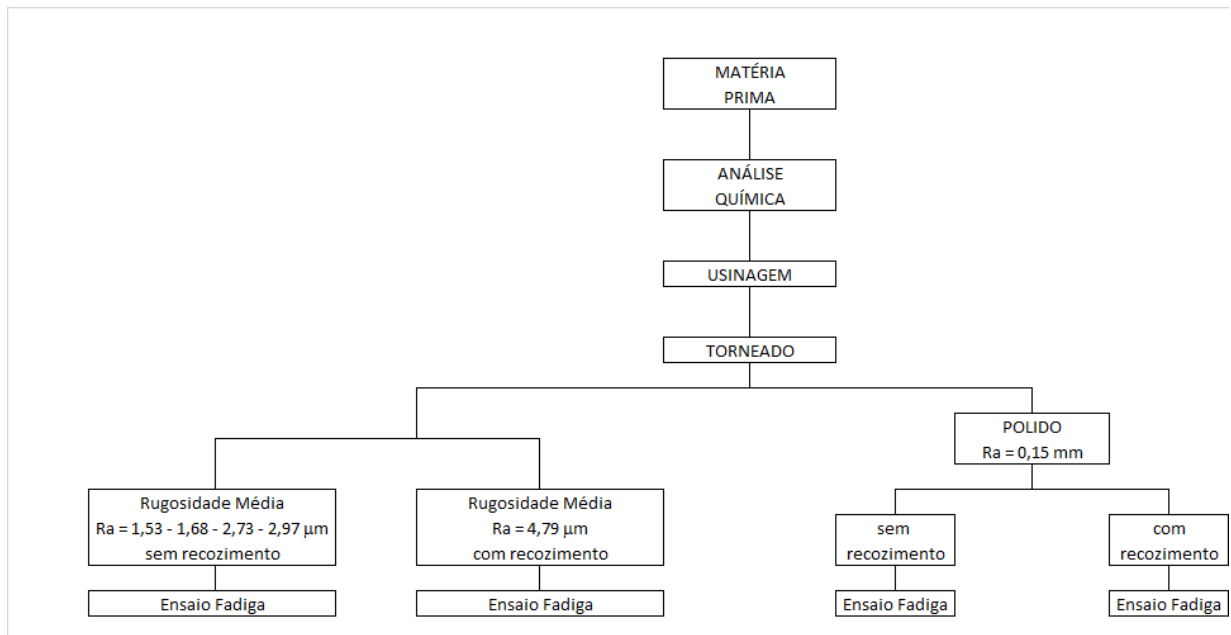


Figura 12: Fluxo do Método Experimental
Fonte: LOPES (2006)

3.3.1 Material

O material utilizado na pesquisa foi o aço ABNT 4140, devido a sua larga aplicação comercial.

O aço AISI 4140 é um aço cromo-molibdênio de temperabilidade relativamente elevada. A dureza deste aço na condição temperada varia de 54 a 59 HRC, conforme Gomes (2011).

Este aço possui ótima forjabilidade, razoável usinabilidade e boa resistência à torção e à fadiga. Suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas através da nitretação (GERDAU, 2009).

O aço AISI 4140 é aplicado na indústria mecânica e automotiva na confecção de componentes que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, tais como virabrequins, engrenagens, bielas, eixos, peças para equipamentos de perfuração de petróleo, etc. A composição química média deste aço está mostrada no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição química média do aço ABNT 4140

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Mo
Mín	0,38	0,75	0,20	0,80	0,15
Média	0,40	0,87	0,25	0,95	0,20
Máx.	0,43	1,00	0,35	1,10	0,25

Fonte: LOPES, 2006

Para fabricação dos corpos-de-prova, foram utilizadas barras cilíndricas laminadas do aço AISI 4140 sem tratamento térmico posterior. As barras têm um comprimento de 3000 mm e diâmetro de 16,88 mm (5/8”), de acordo com Lopes (2006).

3.3.2 Corpo-de-prova

A geometria dos corpos-de-prova utilizados para ensaios de fadiga flexo-rotativa está mostrada pela Figura 13 e possui as dimensões, em mm, de acordo com norma ASTM E 466-96 e pela norma DIN 50113 (MANSUR, 2003).

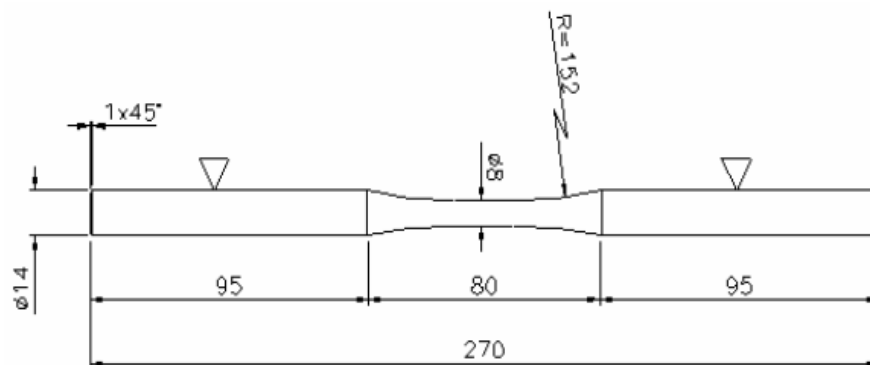


Figura 13: Geometria corpo-de-prova no ensaio fadiga

Fonte: MANSUR, 2003

3.3.3 Fabricação corpo-de-prova

Dois grupos de corpos-de-prova do aço AISI 4140 foram fabricados para a análise de fadiga. As dimensões foram as mesmas para todos os corpos-de-prova utilizados nos ensaios. Os grupos existentes distinguem-se pelo acabamento final. O grupo 1 tem acabamento retificado com valores de rugosidade superficial (R_a) inferior a $0,30 \mu\text{m}$. O grupo 2 (subgrupo 2.1) possui valor do avanço (f) usado na sua fabricação de $0,12 \text{ mm/rot}$, velocidade de corte de 60 m/min e profundidade de corte (a_p) de $1,2 \text{ mm}$ com rugosidade superficial (R_a) aproximadamente $2,0 \mu\text{m}$. Estes parâmetros de usinagem foram obtidos por Lopes (2006).

3.4 Equipamentos e Ensaios

3.4.1 Usinagem

Os corpos-de-prova foram fabricados em um torno CNC, modelo CNC Romi Centur 30D, com ferramenta de corte modelo DCMT 11 T 304 – PM5, WAM-20, fabricante Walter. O processo foi refrigerado por fluido de corte Kutwell 40 fabricado pela ExxonMobil.

Os parâmetros de torneamento controlados para usinagem dos corpos-de-prova foram o avanço, velocidade e profundidade de corte, sendo que os demais parâmetros do processo de usinagem foram mantidos constantes. Assim foram torneados corpos-de-prova com estes parâmetros, referenciados por Lopes (2006).

3.4.2 Ensaio de fadiga

Para o ensaio de fadiga, foi utilizada máquina de ensaio de flexão rotativa, com uma tensão média nula ($R=-1$). O ensaio foi realizado à temperatura ambiente. Ele baseia-se em um corpo-de-

prova fixo em suas extremidades que estavam sob o efeito de um momento fletor, resultante da carga aplicada. Este corpo-de-prova é então rotacionado em torno de seu eixo, de forma que suas extremidades radiais estavam sob constante alternância de tração e compressão, formando-se assim ciclos de tensões alternadas de mesma magnitude, caracterizando a tensão média nula.

Na extremidade desta máquina, existe um contador que registrou o número de ciclos no ensaio. Quando acontecia o rompimento do corpo-de-prova, a contagem de ciclos era automaticamente interrompida.

A máquina utilizada neste trabalho tem um contador com capacidade de contagem máxima de 10^9 ciclos, e possui um sistema de refrigeração que possibilita ensaios com temperatura constante. Os corpos-de-prova foram rotacionados por um motor elétrico de 3500 rpm, sendo que a massa colocada no sistema de balança teve um fator multiplicativo de 10 unidades em relação à carga aplicada no corpo-de-prova. Assim toda carga aplicada implicou numa força de 10 vezes maior no corpo-de-prova. A descrição das forças atuantes na máquina de ensaio de fadiga está apresentada no apêndice A.

3.4.3 Alívio de tensão

O tratamento de alívio de tensão residual foi realizado em metade dos corpos-de-prova torneados e em metade dos corpos-de-prova retificados. O tratamento de recozimento para alívio de tensões consiste no aquecimento do componente até uma temperatura próxima ao limite inferior da zona crítica, onde o material não sofre mudança em seus constituintes. Os parâmetros para este tratamento são aquecimento até a temperatura de 720°C, por um tempo de 20 minutos, seguido de resfriamento lento ao forno. (CATÁLOGO VILLARES, 2004). Após o tratamento térmico, estes corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de fadiga flexo-rotativa.

3.4.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do material foram determinadas através dos ensaios de tração e dureza, e estão mostradas no quadro 2. Com estes ensaios foi possível determinar resultados referentes à resistência mecânica dos materiais.

Os ensaios de tração foram realizados na máquina Wolpert, com capacidade de 200 kN à temperatura ambiente. Nestes ensaios foram obtidas as curvas tensões deformação convencional, onde foi possível determinar a tensão de escoamento, o limite de resistência à tração e o limite de ruptura do material.

Foram utilizados corpos-de-prova de cada condição de usinagem, conforme previsto na figura 12, fluxo método experimental. As dimensões dos corpos-de-prova estão especificadas na figura 13.

Quadro 2 - Propriedades Mecânicas do aço AISI 4140

Limite Escoamento 0.2 (MPa)	Limite Resistência (MPa)	Limite Ruptura (MPa)	Dureza (HV)
758,1 \pm 31,6.	965,0 \pm 21,8.	714,8 \pm 11,5	256,7 \pm 34,0

Fonte: LOPES, 2006

3.4.5 Medição da rugosidade

A rugosidade superficial foi definida pelos parâmetros de rugosidade R_a , R_z , R_q , e R_t que foram medidos por um rugosímetro SurfTest SJ-400 fabricado pela Mitutoyo. As medições foram realizadas na região onde o corpo-de-prova sofreu maior ação do carregamento de fadiga, região AB na Figura 14. Estas medidas foram realizadas em quatro pontos radialmente equidistantes (90°), cobrindo a mesma circunferência. De posse dos resultados foi realizado o cálculo médio dos parâmetros de rugosidade, acompanhados de respectivos desvios padrões. Os valores de rugosidade estão mostrados no quadro 3.

Estes ensaios têm o intuito de investigar qual o efeito da qualidade do acabamento superficial do corpo-de-prova sobre o ensaio de fadiga.

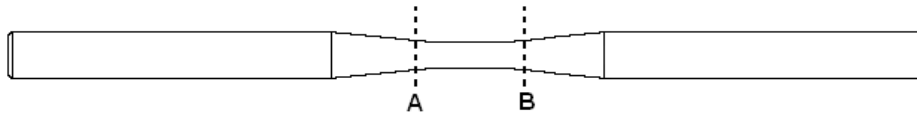


Figura 14: Região do corpo-de-prova sob carregamento de fadiga
Fonte: LOPES, 2006

Quadro 3 - Parâmetros após Usinagem

Condição Usinagem	Rugosidade média Ra (μm)	Resistência à Fadiga (MPa)	Tensão Alternada (MPa)
Variando Profundidade (f)	2,73 \pm 0,22 1,68 \pm 0,36	287,9 \pm 21,5	min. 323,2 máx. 381,1
Variando o avanço (ap)	1,62 \pm 0,30 2,97 \pm 0,13 4,79 \pm 0,13	366,8 \pm 16,3	min. 396,0 máx. 424,5
Variando velocidade corte (v)	2,59 \pm 0,37 1,53 \pm 0,09	341,1 \pm 13,7	min. 366,6 máx. 410,1
Polido	0,15 \pm 0,01	396,0 \pm 7,7	min. 395,6 máx. 439,0

Fonte: LOPES, 2006

As condições experimentais do ensaio de fadiga estão listadas no Apêndice C.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

4.1 Método Analítico e Numérico

4.1.1 Aplicação Modelo Analítico

O Apêndice D possui tabelas contendo os resultados experimentais de Lopes (2006) que estão dispostas em ordem crescente do número sequencial do corpo-de-prova, a tensão alternada aplicada em MPa, a quantidade de ciclos aplicados pela máquina e a confirmação se houve fratura. Acrescentou-se a essas tabelas os resultados do dano obtido pela regra linear admitindo uma vida de fadiga de 1.000.000 ciclos, para 10%, 50% e 90% de falha. Os corpos-de-prova do ensaio de fadiga foram usinados, polidos e submetidos a tratamento de recozimento.

Puchi-Cabrera *et al* (2008) observaram que o número de ciclos de fadiga pode ser previsto por meio da relação linear dano acumulado (regra de Palmgren-Miner). Eles desenvolveram um modelo de previsão de vida de fadiga quando o corpo-de-prova é submetido tensão de amplitude variável.

As tabelas contendo os resultados aplicando o modelo analítico estão dispostas no Apêndice E. A avaliação do modelo matemático com os resultados experimentais do ensaio de fadiga foi realizada empregando os coeficientes empíricos do material AISI 4140 proposto por Warhadpande *et al* (2010) e os valores das propriedades mecânicas utilizadas no experimento, presentes no Apêndice B.

A partir da solução da equação 6,

$$D = \left\{ 1 - \left[1 - (m+1) \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_R} \right)^m N \right]^{\frac{1}{m+1}} \right\} \quad 6$$

obteve-se o valor do dano (D) a partir do número de ciclos (N) cujos resultados estão na tabela 1.

Os valores apresentados são aqueles previstos para a simulação numérica do dano (D) a partir do número de ciclos (N) para o primeiro corpo-de-prova do experimento denominado de condição: corpo-de-prova polido.

Tabela 1 – Aplicação modelo analítico para condição: corpo-de-prova polido

E	2,10E+11		Dano (D)	Nº Ciclos (N)
v	0,3		0,003	1.000
σ_R	9,65E+08		0,035	10.000
X	40 microns		0,077	20.000
ΔD	0,01		0,291	50.000
σ_{RO}	6,49E+09		0,560	60.000
m	3,97		0,781	61.000
b	0,41		0,820	61.020
σ_{max}	4,24E+08		0,839	61.025
$\sigma_{médio}$	0		0,991	61.032
σ_{min}	-4,24E+08			

Fonte: Elaborado pelo autor

No modelo analítico proposto a variável dano é uma função limitada ente 0,00 e 1,00, não sendo possível quantificar o numero de ciclos para dano maior que a unidade. Portanto, na avaliação do modelo analítico optou-se por determinar o número de ciclos para dano igual a 0,99.

Decidiu-se inicialmente comparar a condição corpo-de-prova polido com rugosidade média de 0,15 μm . Pela análise dos resultados presentes na tabela 1, observa-se que o número de ciclos previsto pelo modelo é de 61.032 ciclos para um dano de 0,99, quando o corpo-de-prova deveria romper sujeito a uma tensão alternada de 424,0 MPa.

Os resultados experimentais medidos foram de 1.448.260 ciclos tendo ocorrido o rompimento desse corpo-de-prova número 1, o que pode ser confirmado pela análise da tabela 5. O modelo analítico-numérico mostrou-se conservativo, uma vez que a partir de 61.032 ciclos o

corpo-de-prova deveria falhar durante o ensaio, e o rompimento somente ocorreu vinte vezes depois.

Aplicando o modelo na previsão da falha pode-se prever que para valores abaixo de 0,25, o corpo-de-prova não deverá falhar enquanto que acima desse valor é previsto falha do corpo-de-prova durante o ensaio. Pela análise dos valores na tabela 2 é possível comparar os resultados experimentais com a situação de cada corpo-de-prova e o modelo analítico aplicado para previsão do dano de vida em fadiga.

Conforme Mansur (2003), os melhores resultados obtidos são para 50% de probabilidade de falha, onde a regra linear apresenta resultados de previsão de vida próximos a unidade. Verificou-se que os cálculos esperados por essa regra estão coerentes com os resultados experimentais, onde aplicou a relação de dano como sendo o número de ciclos previstos para a falha e o número real de ciclos registrados pelo contador da máquina de ensaio de fadiga flexo-rotativa. Os valores de dano maior do que 0,25 foram àqueles casos em que houve o rompimento do corpo-de-prova enquanto que para resultado menor ou igual a 0,25 não houve falha por fadiga.

O apêndice D apresenta tabelas de D1 à D8 contendo todos os resultados para as condições de ensaio de fadiga utilizando a regra linear para 10%, 50% e 90% de falha.

Esta mesma metodologia foi aplicada aos resultados obtidos pelo modelo analítico, onde se obteve o número de ciclos previstos pelo modelo para dano igual a 0,99 e os valores reais registrados pela máquina de ensaio.

Definiu-se um índice (I) com sendo a relação entre o número de ciclos previsto para vida longa e número de ciclos aplicando o modelo analítico-numérico para dano igual a 0,99.

Tabela 2 - Comparação entre os resultados experimentais e modelo aplicado

Rugosidade Média (Ra) = 0,15 ± 0,01 mm						
Corpo de prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	424,5	1.448.260	SIM	0,345	3.343	0,003
2	410,1	2.021.432	NÃO	0,247	3.829	0,004
3	424,5	1.249.064	SIM	0,400	3.343	0,003
4	410,1	2.032.966	NÃO	0,246	3.829	0,004
5	424,5	2.120.577	NÃO	0,236	3.343	0,003
6	439,0	770.593	SIM	0,649	2.904	0,003
7	424,5	687.268	SIM	0,728	3.343	0,003
8	410,1	2.950.870	NÃO	0,169	3.829	0,004
9	424,5	1.383.786	SIM	0,361	3.343	0,003
10	410,1	3.535.380	NÃO	0,141	3.829	0,004
11	424,5	1.634.038	SIM	0,306	3.343	0,003
12	410,1	2.003.125	NÃO	0,250	3.829	0,004
13	424,5	1.887.755	SIM	0,265	3.343	0,003
14	410,1	555.495	SIM	0,900	3.829	0,004
15	395,6	1.066.326	SIM	0,469	4.453	0,004

Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico da figura 15 apresenta uma relação entre o dano (D) e o número de ciclos (N) gerado pela aplicação do modelo aos resultados experimentais da condição 1.1: corpo-de-prova usinado, conforme previsto por Warhadpande *et al* (2010). Os resultados experimentais da condição corpo-de-prova polido são ilustrados pelo gráfico da figura 16.

Pela análise desses gráficos pode-se dizer que tanto o polimento quanto a usinagem do corpo-de-prova teve influência no dano gerado. Conforme aplicação do modelo analítico a previsão de vida para corpo-de-prova usinado foi maior do que polido para uma mesma tensão alternada aplicada.

No caso do corpo-de-prova polido observam-se pontos mais próximos para as quatro tensões aplicadas para ciclos de fadiga mais baixo se comparado aos resultados do corpo-de-prova usinado.

Nota-se que a vida de fadiga é menor para a maior tensão alternada máxima aplicada onde os pontos tendem ao dano máximo assintoticamente para vida de 9.000 ciclos enquanto que para menores tensões aplicadas registra-se um dano de 0,3 para o mesmo número de ciclos.

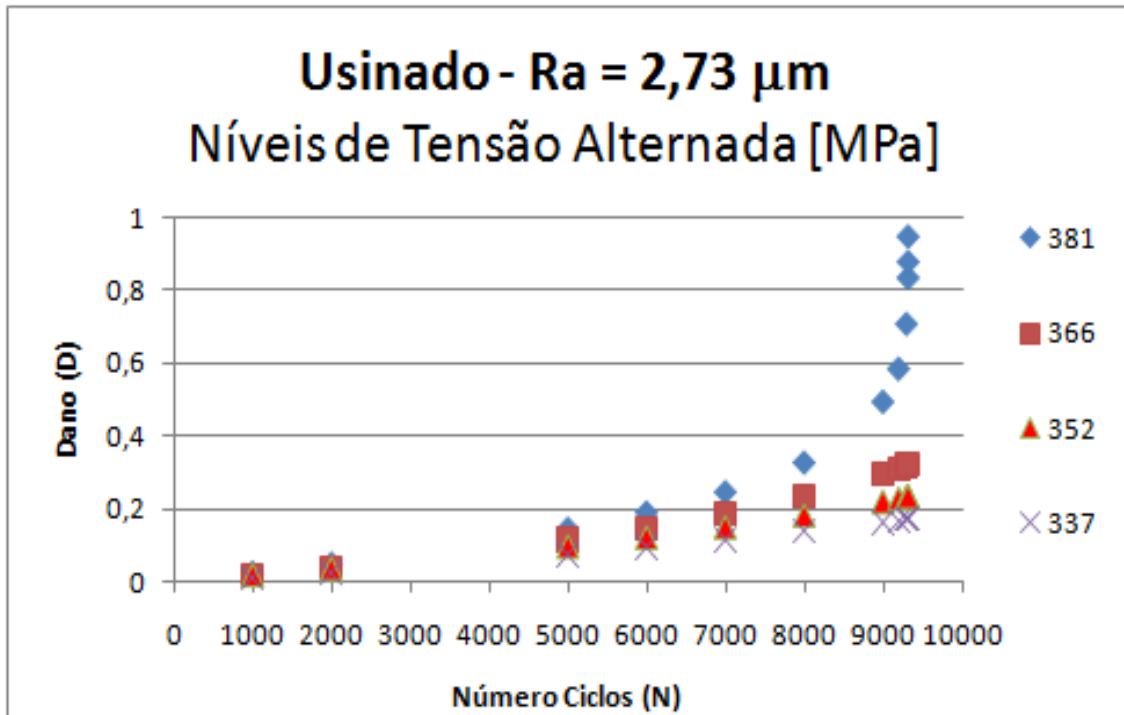


Figura 15: Valores experimentais do corpo-de-prova usinado aplicando no modelo analítico
Fonte: Elaborado pelo autor

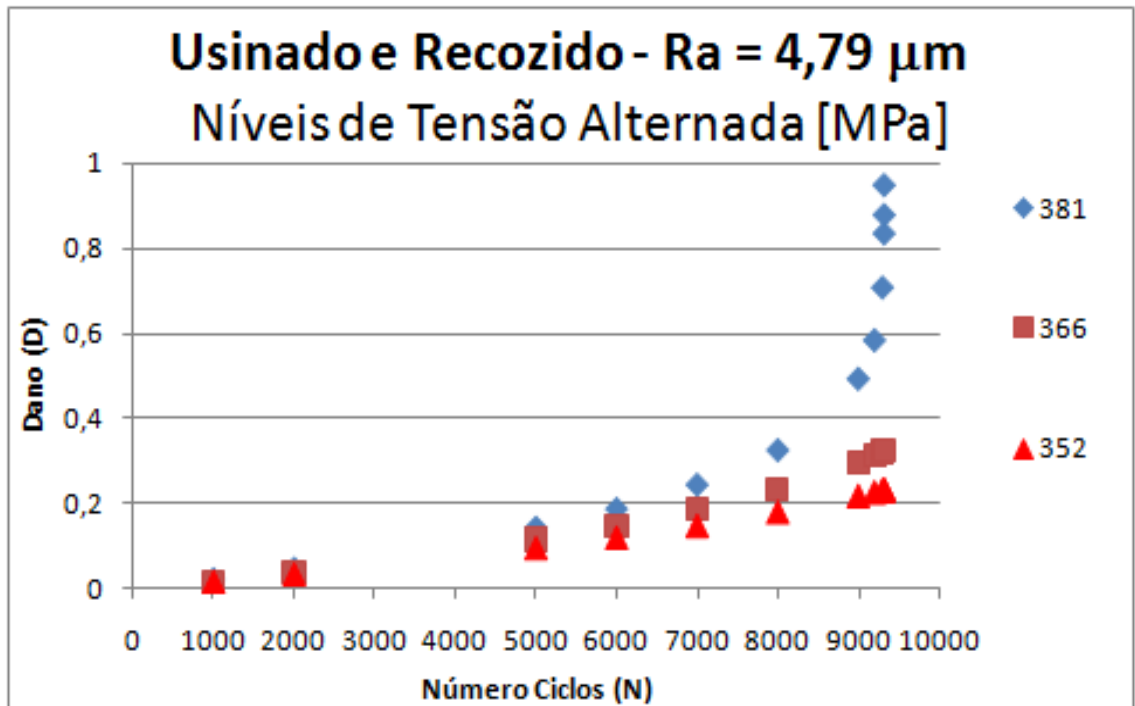


Figura 16: Valores experimentais do corpo-de-prova polido aplicando no modelo analítico
Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 4– Fator rugosidade superficial

Condição	R_a (microns)	Efeito rugosidade
1.1	2,73	0,85
1.3	1,68	0,89
2.1	1,62	0,89
2.2	2,97	0,85
2.3	4,79	0,80
Polido	0,15	0,98

Fonte: LEE (2005) Ábaco 4.18 página 137

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Aplicação do Programa Ansys

Antes de apresentar a simulação pelo programa Ansys faz-se necessário algumas considerações a respeito da tensão cíclica aplicada em cada condição do experimento.

Observa-se pelos valores da tabela 3, que o esforço de carregamento aplicado ao corpo-de-prova polido/recozido foi sistematicamente menor do que nas outras condições. Com exceção para corpos-de-prova de número 12 e 13, cujas tensões cíclicas foram de 395,6 e 410,1 MPa respectivamente, a tensão aplicada na condição 2.3 (usinada) e usinada/recozida apresenta o mesmo comportamento oscilando numa mesma proporção, o que pode ser comprovado pela visualização do gráfico da figura 17. A rugosidade média dessa condição era a mesma de 4,79 μm na superfície.

Tabela 3 – Comparação entre as tensões alternadas aplicadas I

Corpo De Prova	Condição			
	1.1	2.3	Usinado Recozido	Polido Recozido
1	352,1	352,1	366,6	337,6
2	337,6	337,6	352,1	323,1
3	352,1	352,1	366,6	337,6
4	366,6	366,6	352,1	352,1
5	352,1	352,1	366,6	337,6
6	366,6	366,6	352,1	352,1
7	381,1	381,1	366,6	337,6
8	366,6	366,6	381,1	352,1
9	352,1	381,1	366,6	337,6
10	366,6	366,6	381,1	323,1
11	352,1	381,1	366,6	337,6
12	337,6	395,6	352,1	323,1
13	352,1	410,1	-	337,6
Média	356,6	369,9	364,2	337,6
Desvio padrão	12,4	19,8	10,4	10,3

Fonte: Elaborado pelo autor

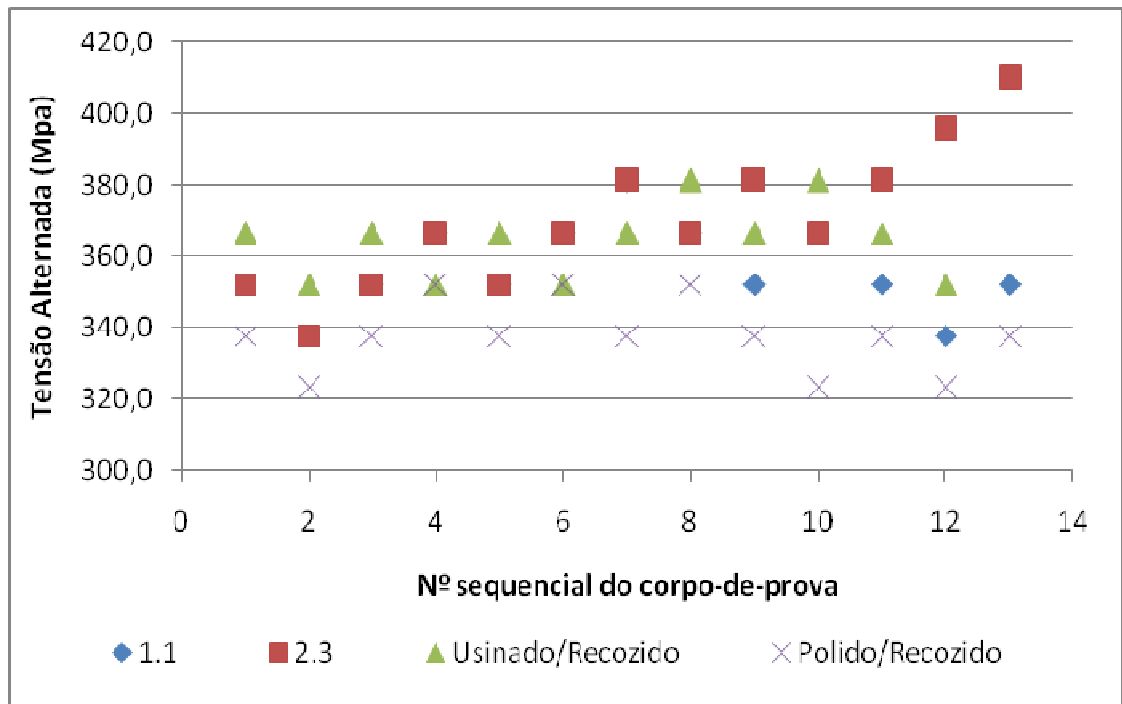


Figura 17 – Gráfico de comparação entre as tensões alternadas aplicadas I
Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se na tabela 4, que não existe diferença entre a média das tensões alternadas aplicadas na condição polida e usinada (1.3), e analisando a distribuição dos valores no gráfico da figura 18 observa-se uma homogeneidade dos valores das tensões aplicadas em torno de 410MPa.

Tabela 4– Comparação entre as tensões alternadas aplicadas II

Corpo de prova	Condição			
	1.3	2.1	2.2	Polido
1	439,0	468,0	381,1	424,5
2	424,5	453,5	366,6	410,1
3	439,0	424,5	381,1	424,5
4	424,5	410,1	395,6	410,1
5	410,1	424,5	381,1	424,5
6	424,5	410,1	366,6	439,0
7	410,1	424,5	381,1	424,5
8	424,5	439,0	395,6	410,1
9	410,1	424,5	410,1	424,5
10	424,5	439,0	395,6	410,1
11	410,1	424,5	381,1	424,5
12	395,6	410,1	366,6	410,1
13	410,1	395,6	381,1	424,5
Média	419,0	426,8	383,3	420,1
Desvio padrão	12,6	19,5	13,0	9,1

Fonte: Elaborado pelo autor

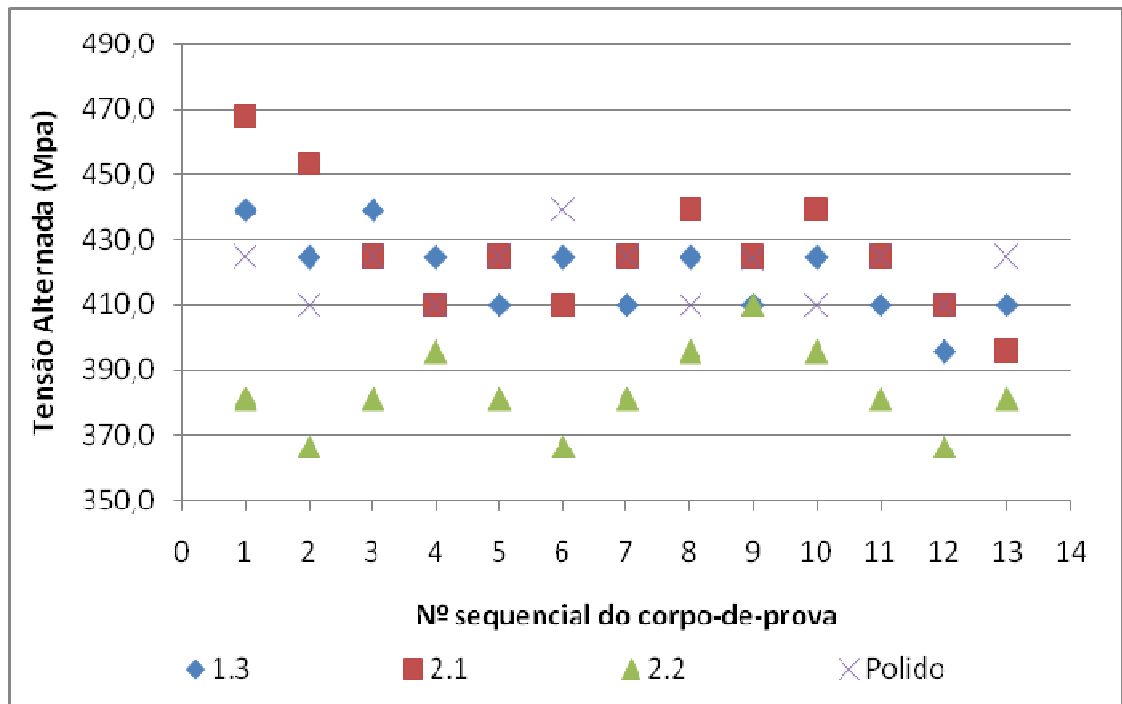


Figura 18– Gráfico comparação entre as tensões alternadas aplicadas II
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2.1 Ansys WorkBench versão 12.1

Nos estudos conduzidos por Zhang *et al* (2010), alguns parâmetros de materiais foram obtidos num ensaio de fadiga em corpo-de-prova padronizado, onde a simulação numérica utilizou-se do software comercial Ansys para estudar a trinca de fadiga. Portanto, utilizar essa ferramenta em simulação numérica constitui uma metodologia já amplamente adotada para comparar resultados obtidos experimentalmente.

A simulação no programa Ansys, versão 12.1, do corpo-de-prova padronizado gerou a tensão de carregamento e a deformação equivalente pelo critério de Von Mises. O carregamento foi de aproximadamente 21000N para corpo-de-prova polido (com rugosidade média $R_a \sim 0,15 \mu\text{m}$), e o diagrama com os resultados obtidos encontram-se nas figuras 19, 20 e 21.

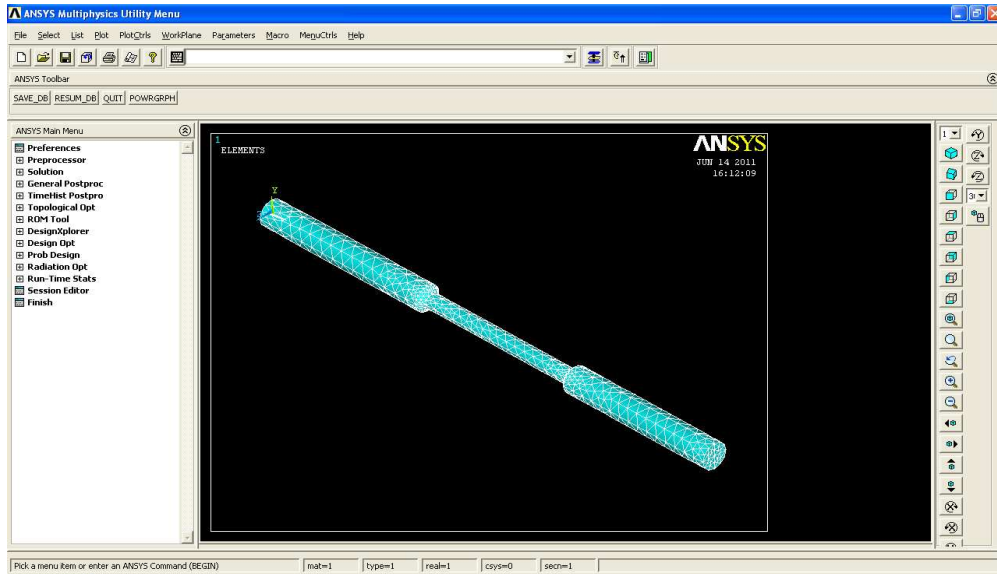


Figura 19– Imagem do corpo-de-prova discretizado
Fonte: Elaborado pelo autor

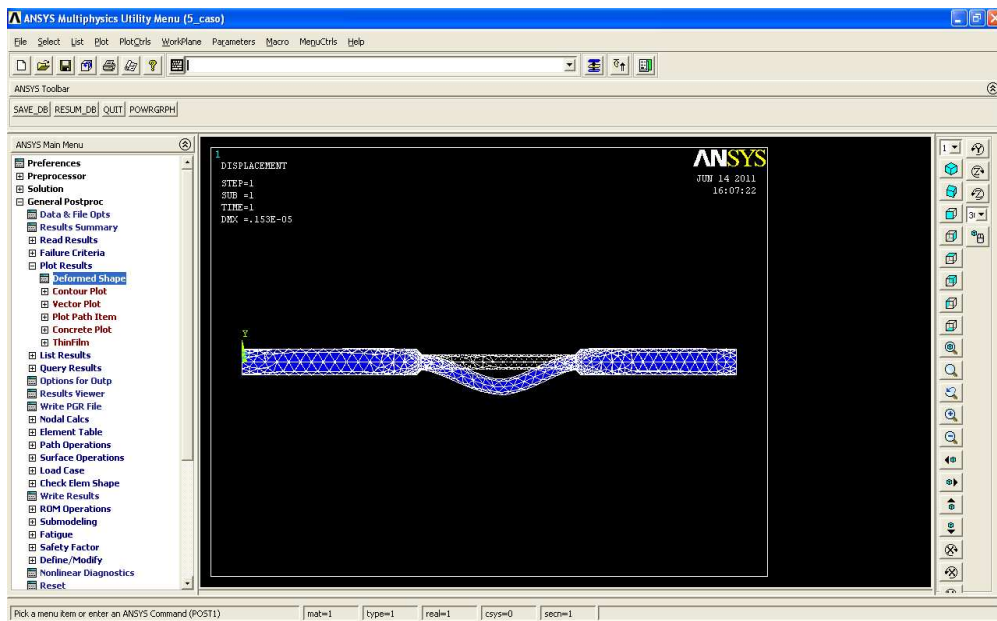


Figura 20 – Corpo-de-prova discretizado após simulação de carregamento
Fonte: Elaborado pelo autor

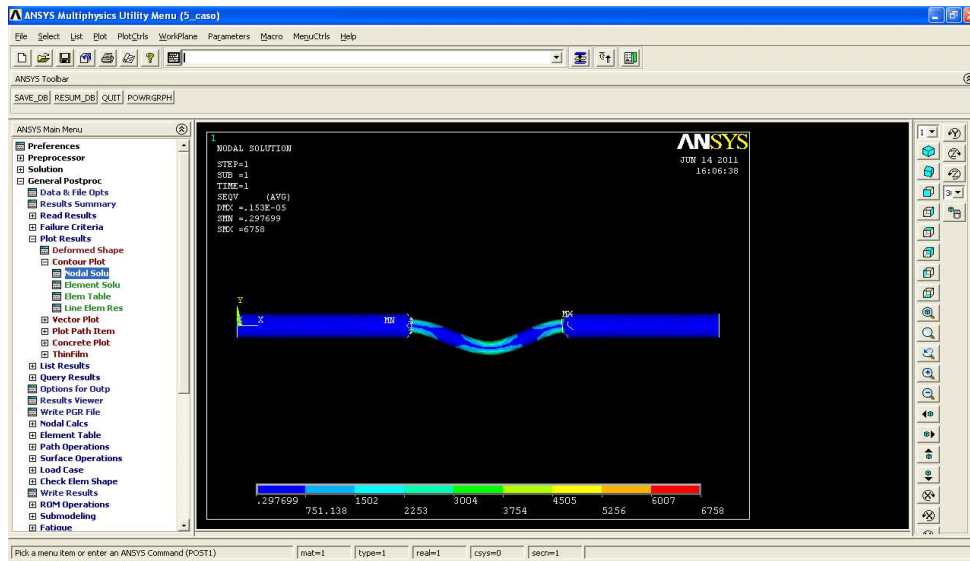


Figura 21 – Tensão equivalente pelo critério de Von Mises
Fonte: Elaborado pelo autor

O efeito do tamanho da malha e do elemento escolhido na geração da tensão e deformação equivalente foi estudado. Adotou-se a discretização por elemento finito tetraédrico com 4 nós no corpo-de-prova padronizado para ensaio de fadiga. Os resultados obtidos para discretização e deformação do corpo-de-prova são ilustrados pelas figuras 22 e 23.

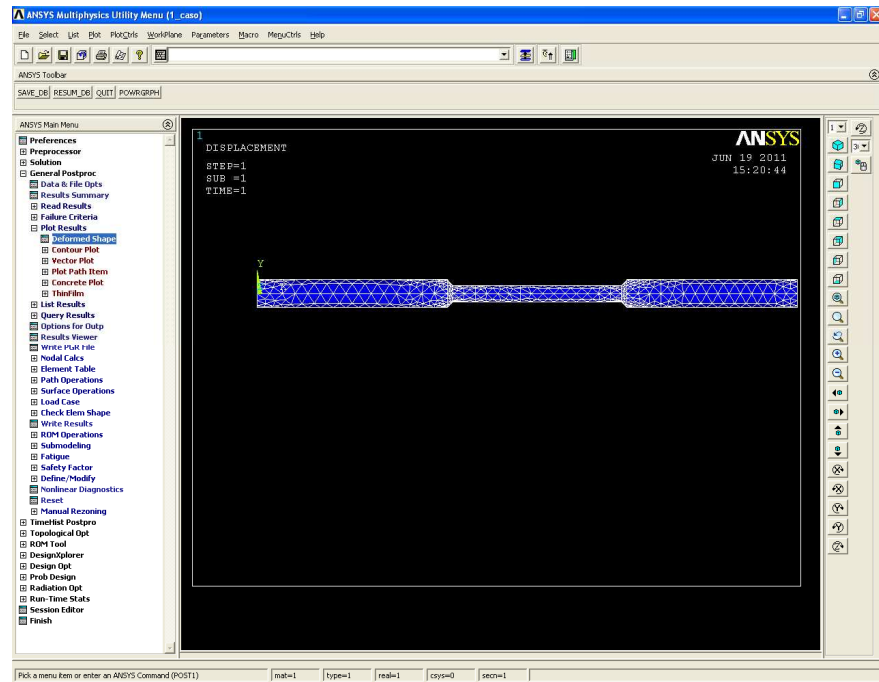


Figura 22 – Discretização por elemento finito tetraédrica de 4 nós
Fonte: Elaborado pelo autor

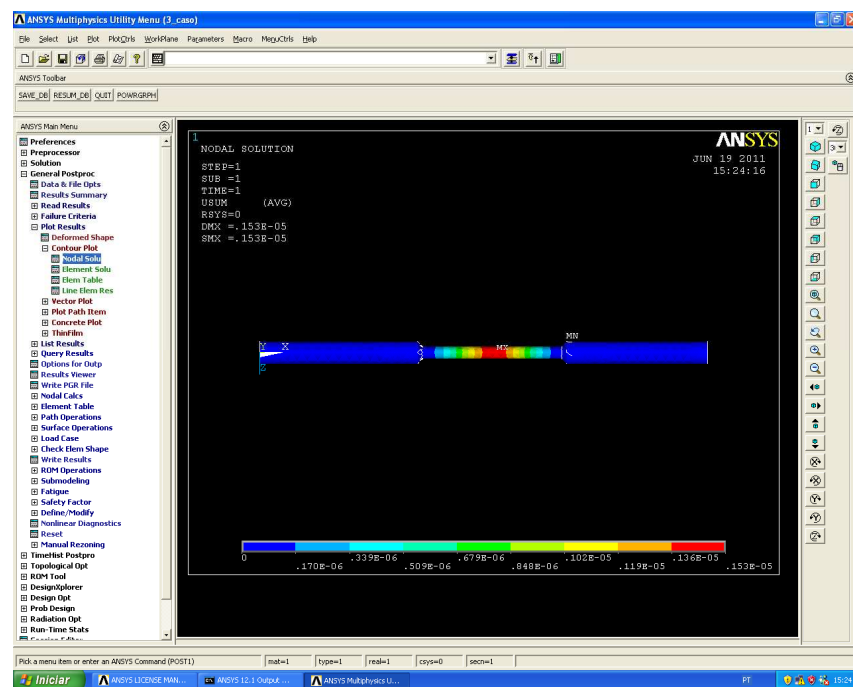


Figura 23 – Deformação para discretização tetraédrica de 4 nós
Fonte: Elaborado pelo autor

O Apêndice F ilustra saídas do programa Ansys 12.1 para interface gráfica do Workbench. A plataforma do programa Ansys 12.1 Workbench foi alimentado com os mesmos valores de carregamentos executados pelos ensaios experimentais de fadiga de flexão rotativa. O regime escolhido foi o transiente simulando análise dinâmica previsto para o ensaio de fadiga.

As dimensões do corpo-de-prova padrão, previstas pela figura 13, para construção da geometria utilizada no ensaio de fadiga de flexão rotativa foram informadas ao programa na fase de pré-processamento durante a criação da geometria.

Ainda na fase de pré-processamento, foi selecionado o tipo de material aço austenítico empregado na simulação e as condições superficiais previstas para as situações: usinado e polido.

A malha adotada foi o padrão do programa com 1257 pontos nodais e 590 elementos. Para verificar o efeito na malha na geração do dano durante a simulação foram definidas também as condições: II e III. Na condição II foi definida como sendo composta por 244 pontos nodais e 607 elementos. A condição III foi definida como sendo composta por 1.719 pontos nodais e 4.451 elementos.

Na fase de processamento da simulação numérica foram definidas as condições de contorno previstas para as condições do ensaio como: a tensão cíclica, a rotação do motor de 3500 rpm (aproximadamente 366,2 radianos/segundos) impondo a mesma rotação ao corpo-de-prova, bem como os pontos de fixação na máquina para o ensaio de fadiga.

Ainda na fase de processamento, foram selecionadas as variáveis previstas no estudo como: a vida, o dano, o fator de segurança, a deformação total e a tensão equivalente segundo critério de Von Mises. Na interface com o programa Ansys optou-se pela correção da tensão média pelo modelo de Goodman.

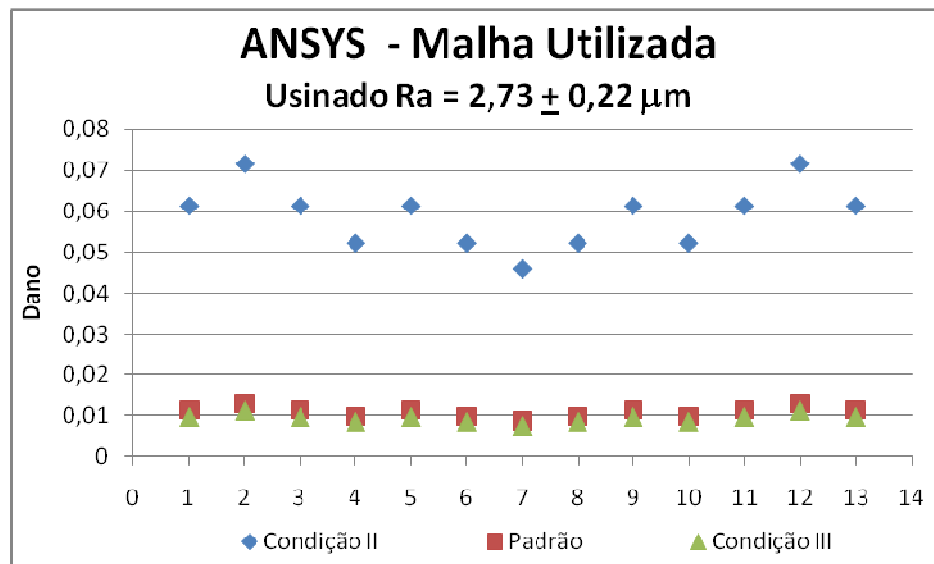
Na fase de pós-processamento da simulação numérica foram obtidos os resultados presentes na tabela 5 para condição 1.1: corpo-de-prova usinado. Os demais resultados para as demais condições experimentais de ensaio encontram-se no Apêndice G.

Conforme a proposta de Jono Masahiro (2005), ao estudar o dano de fadiga acumulada sob carga variável a vida de fadiga e o dano mudam dependendo dessas condições de carregamento. Assim, o efeito de variações de carga aparece na relação tensão-deformação plástica, fazendo-se estimativa de vida de fadiga baseada nas curvas S-N. A tabela 5 ilustra essa evidência, uma vez que para cada valor de carregamento foi gerado um valor de dano.

Tabela 5 - Comparação entre os resultados experimentais e Ansys

Rugosidade Média (Ra) = $2,73 \pm 0,22 \mu\text{m}$								
Corpo de prova	Experimental				Numérico - Software ANSYS			
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Vida (Ciclos)	Dano	Tensão Equivalente (MPa)	Deformação
1	352,1	1.389.600	Sim	0,360	11.494	0,011	267,8	5,67E-05
2	337,6	2.003.521	Não	0,250	13.269	0,013	256,8	5,44E-05
3	352,1	3.339.463	Não	0,150	11.494	0,011	267,8	5,67E-05
4	366,6	1.237.495	Sim	0,404	10.008	0,010	278,9	5,91E-05
5	352,1	4.245.752	Não	0,118	11.494	0,011	267,8	5,67E-05
6	366,6	2.003.366	Não	0,250	10.008	0,010	278,9	5,91E-05
7	381,1	1.251.517	Sim	0,400	8.877	0,009	289,9	6,14E-05
8	366,6	543.271	Sim	0,920	10.008	0,010	278,9	5,91E-05
9	352,1	2.000.000	Não	0,250	11.494	0,011	267,8	5,67E-05
10	366,6	439.092	Sim	1,139	10.008	0,010	278,9	5,91E-05
11	352,1	814.324	Sim	0,614	11.494	0,011	267,8	5,67E-05
12	337,6	2.002.667	Não	0,250	13.269	0,013	256,8	5,44E-05
13	352,1	3.632.319	Não	0,138	11.494	0,011	267,8	5,67E-05

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 24 - Comparação entre a Malha utilizada: Usinado**

Fonte: Elaborado pelo autor

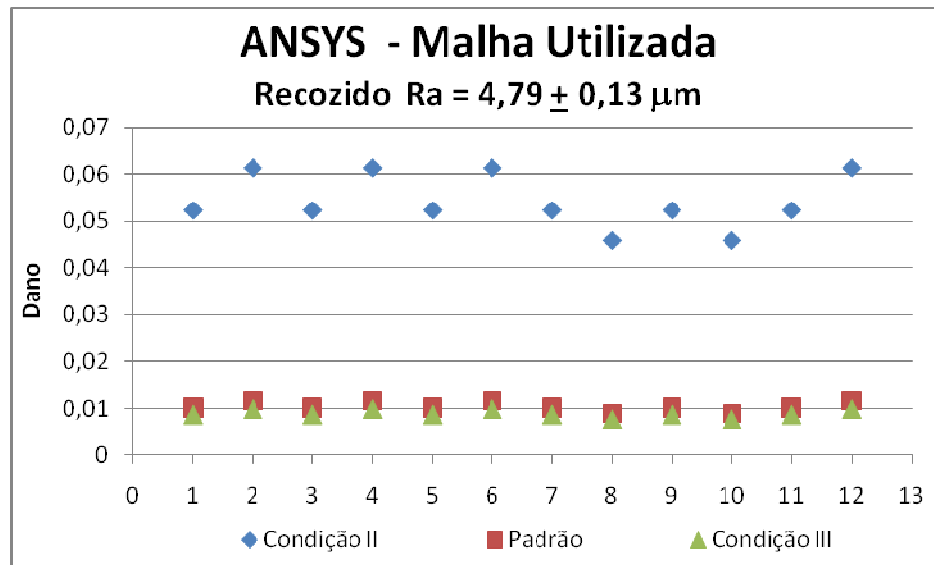


Figura 25 - Comparação entre a Malha utilizada: Recozido
Fonte: Elaborado pelo autor

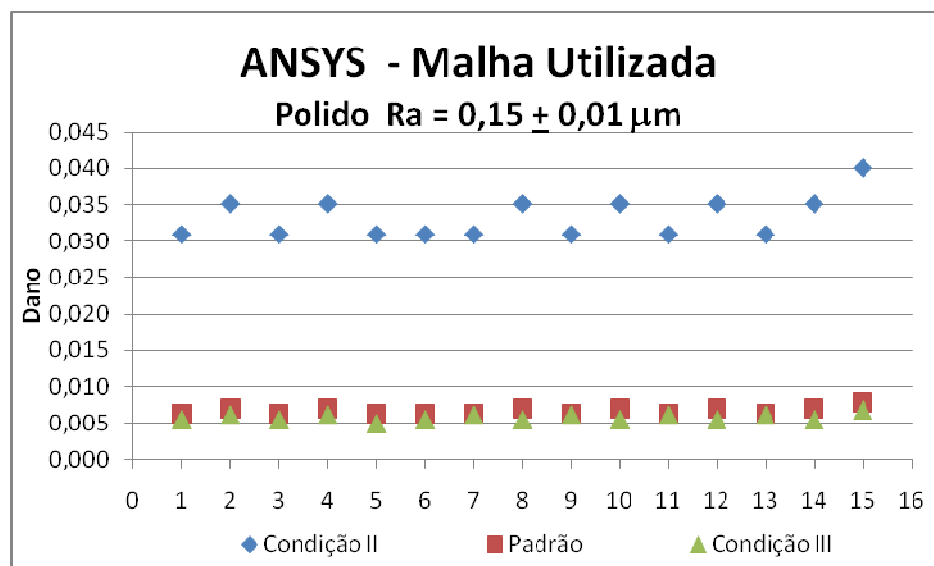


Figura 26 - Comparação entre a Malha utilizada: Polido
Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos das figuras 24, 25 e 26 apresentam o comportamento do dano em fadiga obtida pela simulação no Ansys variando a malha para as condições padrão, II e III. A malha na condição padrão do programa utiliza 1257 pontos nodais e 590 elementos. Na condição II a malha é composta por 244 pontos nodais e 607 elementos. Na condição III a malha é composta por 1.719 pontos nodais e 4.451 elementos.

Verifica-se que a condição padrão do programa e a condição III são coincidentes na geração de dano em fadiga, ou seja, não apresentam diferença no dano para as três situações propostas em estudo: usinado, recozido e polido.

4.2 Comparação entre os Métodos Aplicados: Regra Linear, Modelo Analítico-Numérico e Simulação pelo Ansys

As tabelas 6, 7 e 8 ilustram os resultados obtidos para o dano em fadiga aplicando os três métodos previstos pela metodologia adotada: a regra linear (experimental), o modelo analítico e a simulação numérica pelo programa Ansys nas condições de rugosidade apresentadas pelos corpos-de-prova dos resultados experimentais.

Observa-se pelos valores presentes nas tabelas 6, 7 e 8, que não existe um valor fixo que possa utilizado como fator de correlação entre os três métodos estudados na previsibilidade de falha do corpo-de-prova.

Tabela 6 – Condição Usinado: $R_a = 1,68 \pm 0,36 \mu\text{m}$

Corpo de prova	Experimental	Numérico	Analítico
1	0,0045	0,0057	0,0029
2	0,0020	0,0064	0,0033
3	0,0029	0,0057	0,0029
4	0,0017	0,0064	0,0033
5	0,0060	0,0057	0,0029
6	0,0024	0,0064	0,0033
7	0,0025	0,0057	0,0029
8	0,0042	0,0054	0,0026
9	0,0043	0,0057	0,0029
10	0,0040	0,0064	0,0033
11	0,0031	0,0071	0,0038
12	0,0025	0,0079	0,0045
13	0,0025	0,0071	0,0038
14	0,0033	0,0064	0,0033
15	0,0025	0,0071	0,0038

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Condição Usinado e Recozido: $R_a = 4,79 \pm 0,13 \mu\text{m}$

Corpo de prova	Experimental	Numérico	Analítico
1	0,0027	0,0100	0,0060
2	0,0025	0,0115	0,0071
3	0,0028	0,0100	0,0060
4	0,0023	0,0115	0,0071
5	0,0027	0,0100	0,0060
6	0,0025	0,0115	0,0071
7	0,0022	0,0100	0,0060
8	0,0034	0,0089	0,0051
9	0,0020	0,0100	0,0060
10	0,0030	0,0089	0,0051
11	0,0044	0,0100	0,0060
12	0,0060	0,0115	0,0071

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Condição Polido: $R_a = 0,15 \pm 0,01 \mu\text{m}$

Corpo de prova	Experimental	Numérico	Analítico
1	0,0035	0,0064	0,0033
2	0,0025	0,0071	0,0038
3	0,0040	0,0064	0,0033
4	0,0025	0,0071	0,0038
5	0,0024	0,0064	0,0033
6	0,0065	0,0064	0,0029
7	0,0073	0,0064	0,0033
8	0,0017	0,0071	0,0038
9	0,0036	0,0064	0,0033
10	0,0014	0,0071	0,0038
11	0,0031	0,0064	0,0033
12	0,0025	0,0071	0,0038
13	0,0026	0,0064	0,0033
14	0,0090	0,0071	0,0038
15	0,0047	0,0079	0,0045

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que cada modelo separadamente, pode ser aplicável na previsão como critério de falha. Nesta análise deverá ser fixado o mesmo nível de tensão adotado para efetuar a comparação, ou seja, fixa-se um nível de tensão dentro do conjunto de dados e compara para um fator balizado pelos resultados experimentais de falha, se a partir daquele valor ou corpo-de-prova irá falhar ou não.

Os gráficos das figuras 27, 28 e 29 apresentam a distribuição do dano em fadiga para os três métodos adotados em função do número seqüencial do corpo-de-prova.

O dano apresentado pelo método experimental foi obtido dividindo o a vida de fadiga por 10.000 a fim de normalizar os valores de danos para efeito de comparação com os outros métodos adotados. Verificou-se nesse caso que o dano gerado foi o mesmo para as três situações de comparação nesse estudo: usinado, recozido e polido. Portanto nessa comparação pode-se dizer que não existe diferença no nível de dano gerado no corpo-de-prova usinado, recozido ou polido, os valores alcançados estiveram em torno de 0,003.

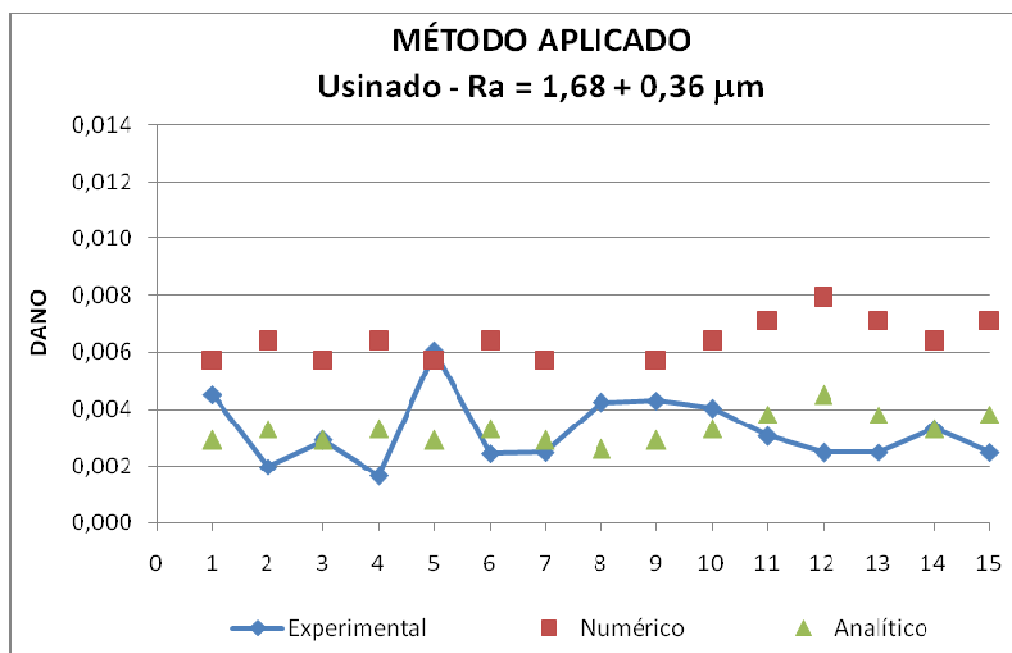


Figura 27 – Condição usinado: comparação do dano entre métodos aplicados
Fonte: Elaborado pelo autor

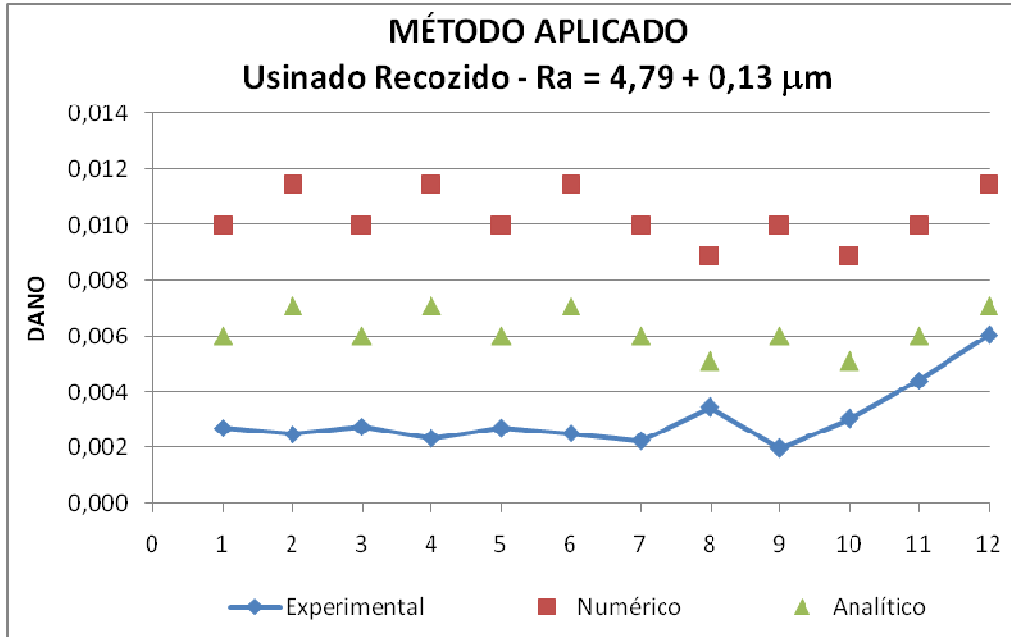


Figura 28 – Condição recozido: comparação do dano entre métodos aplicados
Fonte: Elaborado pelo autor

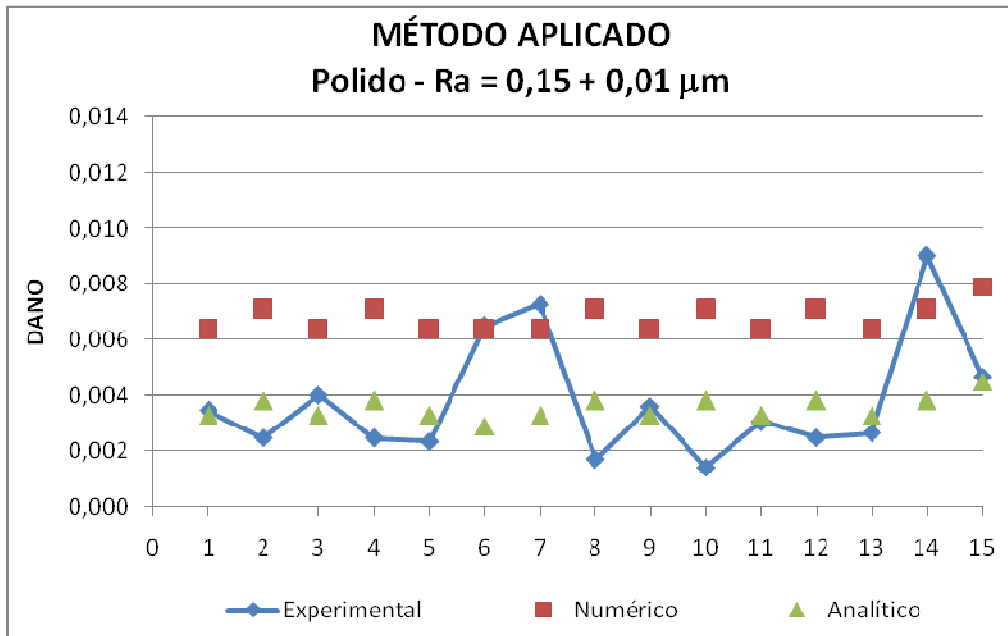


Figura 29 – Condição polido: comparação do dano entre métodos aplicados
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se um mesmo comportamento matemático do dano produzido para o método analítico e numérico nas três situações objeto de comparação: usinado, recozido e polido.

Verifica-se ainda que os valores do dano pelo método numérico foram sistematicamente maiores do que pelo método analítico.

Na situação polida pode-se dizer que não existe diferença entre o método analítico e o método experimental, ou seja, existe uma boa aproximação entre os métodos experimentais e analíticos.

Nos estudos realizados por Novovic *et al* (2004) sobre efeito dos parâmetros de usinagem na superfície do corpo-de-prova na fadiga, conclui-se que o valor da rugosidade tem forte influência na vida de fadiga.

Nesse estudo esta evidência não pode ser verificada talvez devido presença da tensão residual que para a faixa de rugosidade (Ra) de 2,5 a 5,0 microns, conforme Novovic *et al* (2004), não é um fator significativo na vida de fadiga.

4.3 Considerações e análises sob resultados experimentais:

a) Efeito do recozimento na mesma condição: corpo-de-prova usinado (Ra = 4,79 μm)

Ao comparar o recozimento para material usinado o dano gerado parece não ter grande influência uma vez que adotando uma mesma tensão alternada mais baixa ou mais alta a variação do dano parece não ter sido relevante. O quadro 5 mostra esta comparação.

Quadro 5 – Dano médio pela regra linear para corpo de prova rompido

Tensão alternada aplicada (MPa)	Condição Usinado	Condição Usinado e Recozido
352,0	1,22	2,42
366,0	1,20	1,27
381,0	1,24	1,30

Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma mesma tensão aplicada com mesma rugosidade superficial, o recozimento parece ter pouca influência no número de ciclos produzido até a ruptura. O corpo-de-prova somente

usinado manteve-se com uma vida de fadiga sempre maior se comparado ao corpo-de-prova recozido, e isto foi observado tanto tensões alternadas maiores quanto tensões menores.

b) Efeito do recozimento na mesma condição: corpo-de-prova polido ($R_a = 0,15 \mu\text{m}$)

Em princípio não foi possível estabelecer uma comparação para uma mesma tensão alternada. Os resultados da tensão aplicada para corpo-de-prova polido e corpo-de-prova polido e recozido são diferentes. Considerando o tratamento de recozimento adotado não houve um aumento significativo no número de ciclo de vida até a ruptura dos materiais antes e após o recozimento para o material polido. O que pôde ser observado foi uma dispersão maior nos valores para o material polido/recozido para situações em que não houve rompimento do corpo-de-prova, conforme quadro 6.

Quadro 6 – Efeito recozimento: média e desvio do número de ciclos

Corpo-de-prova	Polido	Polido e Recozido
Com Rompimento	$(1,2 \pm 0,5) \times 10^6$	$(1,4 \pm 0,6) \times 10^6$
Sem Rompimento	$(2,4 \pm 0,2) \times 10^6$	$(2,6 \pm 1,2) \times 10^6$

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao dano gerado os resultados obtidos são os valores presentes no quadro 7, sendo que o recozimento parece ter um efeito na redução do dano gerado.

Quadro 7 – Efeito rugosidade em superfície polida: dano médio pela regra linear

Corpo-de-prova	Polido	Polido e Recozido
Com rompimento	1,97	1,50
Sem rompimento	0,86	0,86

Fonte: Elaborado pelo autor

c) Efeito somente da rugosidade no corpo-de-prova usinado ($R_a = 2,73 \mu\text{m}$ versus $R_a = 4,79 \mu\text{m}$)

Para uma faixa estreita de tensão alternada aplicada 357,0 e 364,0 MPa respectivamente, foram comparados um conjunto dados oriundos de duas rugosidades diferentes: condição 1.1: corpos-de-prova usinados ($R_a = 2,73 \mu\text{m}$) e condição 2.3: corpos-de-prova usinados ($R_a = 4,79 \mu\text{m}$). O efeito da rugosidade na geração do dano e no número de ciclos até o rompimento para o ensaio de fadiga foi avaliado. O dano gerado (2,56) pelo material usinado numa rugosidade superficial média de $2,73\mu\text{m}$ é maior se comparado ao dano (1,44) do mesmo material usinado para uma rugosidade de $4,79\mu\text{m}$, segundo quadro 8.

Nesse caso o número de ciclos de fadiga média para o material que rompeu durante o ensaio foi muito inferior (945.883 versus 1.507.055), conforme quadro 9. A rugosidade tem efeito significativo na vida em fadiga e no dano gerado no material durante o ensaio.

Quadro 8 – Efeito rugosidade em superfície usinada: dano médio pela regra linear

Corpo-de-prova	$R_a = 2,73 \mu\text{m}$	$R_a = 4,79 \mu\text{m}$
Com rompimento	2,56	1,44
Sem rompimento	0,80	0,92

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 9 – Efeito rugosidade em material usinado: média e desvio do número de ciclos

Corpo-de-prova	$R_a = 2,73 \mu\text{m}$	$R_a = 4,79 \mu\text{m}$
Com Rompimento	$(0,9 \pm 0,4) \times 10^6$	$(1,5 \pm 0,4) \times 10^6$
Sem Rompimento	$(2,7 \pm 1,0) \times 10^6$	$(2,2 \pm 0,2) \times 10^6$

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme previsto por Jono Masahiro (2005), a vida em fadiga é influenciada por fatores como a rugosidade superficial, o encruamento e a tensão residual. Para a faixa de rugosidade estudada nesse experimento o efeito da rugosidade na geração do dano não foi verificado. Portanto, um aumento da rugosidade pode gerar um aumento de concentração de tensões devido ao nível de irregularidades da superfície.

Puchi-Cabrera *et al* (2008) estudaram as propriedades mecânicas dos materiais e observaram que essas propriedades podem ser alteradas devido aos danos de fadiga. Um corpo-de-prova polido possui maior limite de resistência à fadiga talvez devido a presença de tensão residual compressiva na superfície gerada durante o polimento. Assim, a vida em fadiga aumenta em corpo-de-prova após polimento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A regra linear de Palmgren-Miner mostrou-se adequado na previsão da falha por fadiga quando aplicado aos resultados experimentais obtidos por Lopes (2006).

O modelo analítico proposto apresentou uma ótima correlação na previsão de vida (N) e do dano (D) em fadiga com os resultados numéricos previstos pelo programa comercial Ansys 12.1 Workbench, para todas as condições propostas: usinado, polido e recozido.

Nesse estudo a rugosidade teve pouca influência na geração do dano em fadiga. Após comparar os resultados obtidos pelos três métodos adotados na metodologia proposta verificou-se que não houve uma diferença significativa no dano produzido pelo corpo-de-prova usinado, polido e recozido.

A simulação pela plataforma Ansys mostrou-se boa aproximação para a discretização dos elementos finitos adotado como tetraédrico de 4 nós. O tamanho da malha adotada pelo padrão do software gerou valores danos próximo aos valores obtidos experimentalmente. O refinamento da malha no melhoramento de resultados da deformação e tensão dentro de cada elemento de domínio estudado foi bem significativo.

Em todas as condições de ensaio de fadiga ao aumentar o numero de pontos nodais e números de elementos além do padrão determinado pelo software não houve um efeito na geração de danos para estas condições pré-estabelecidas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Quantificar o efeito da tensão residual devido concentração de tensão devido irregularidade deixada na superfície do corpo-de-prova usinado e polido na geração do dano em fadiga.

Avaliar em outra máquina de ensaio de fadiga de flexão rotativa os corpos-de-prova do aço 4140, que pudesse fornecer também informações sobre o comportamento de fadiga térmica, adotando a mesma metodologia de simulação numérica.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, E. L. **Investigação sobre a variabilidade da resposta dinâmica de painéis reforçados**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Mecânica, Campinas, 2005.
- ALVARENGA JUNIOR, A. **Acúmulo de danos por fadiga no aço SAE 8620**. 128f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2001.
- ANSYS, INC. **Ansys version 12.0 Workbench**. Technology Drive Canonsburg: 2006. Disponível em: <http://www.ansys.com/products/workbenchportal.asp>, acesso em 01/02/2011
- ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 2.ed. Campinas: Ed. da Unicamp, 2003. 298p
- AVELINO, A.F.; **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Erica, 2000.V1
- BANNANTINE, J.A.; COMER, J.J.; HANDDROCK, J.L.; **Fundamentals of Metal Analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, In. 1990.
- CASTRO, J.T.P.; MEGGIOLARO, M.A. **Fatiga Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço** Editora CreateSpace, Estados Unidos, 2009.
- CURTIS, S.A. et al Predicting the interfaces between fatigue crack growth regimes in 7150-T651 aluminium alloy using the fatigue damage map **Materials Science Engineering A** , v. 344, p.79-85, 2003.
- DÍAZ, F.V. et al. Nondestructive evaluation of the fatigue damage accumulation process around a notch using a digital image measurement system **Optics Lasers Engineering**, v. 41, p. 477-487, 2004
- FERREIRA, W. G. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para análise estrutural em fadiga e geração de malhas de elementos finitos**. 193f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Mecânica, Campinas, 2002.
- GERDAU PRODUTOS. **Aços Especiais Para Beneficiamento**. Disponível em: <www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto.aspx?familia=283>. Acesso em agosto 2009.
- GOMES, D. J. **Determinação de resistência à fadiga em aços ABNT 4140 em vidas superlongas (giga ciclos)**. 2011. 160f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.
- GUO, Y.B.; WARREN, A.W.; The impact of surface integrity by hard turning vs. grinding on fatigue damage mechanisms in rolling contact **Surface & Coatings Technology**, v. 203, p. 291-299, 2008.

- GUPTA, S.; RAY, A.; KELLER, E.; Online fatigue damage monitoring by ultrasonic measurements: A symbolic dynamics approach **International Journal of Fatigue**, v.29, p.1100-1114, 2007.
- JONO, M.; Fatigue damage and crack growth under variable amplitude loading with reference to the counting methods of stress-strain tanges **International Journal of Fatigue**, v. 27, p.1006-1015 2005.
- KOH, S.K.; Fatigue damage evaluation of a high pressure tube steel using cyclic strain energy density **Pressure Vessels and Piping**, v.79, p.791-798, 2002.
- LEE, Yung-Li et al. **Fatigue testing and analysis: Theory and practice**. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- LOPES, K. S. S. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. 163f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2006.
- MANSUR, T. R. **Avaliação e desenvolvimento de modelos de determinação de acúmulo de danos por fadiga em um aço estrutural**. 185f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2003.
- MURAKAMI, Y.; MILLER, K. J.; What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process **International Journal of Fatigue**, v. 27, p. 991-1005, 2005.
- NOVOVIC, D. et al. The effect of machined topography and integrity on fatigue life **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, p. 125-134, 2004.
- PUCHI-CABRERA, E.S. et al. High cycle fatigue behavior of 316L stainless steel **International Journal of Fatigue**, v. 30, p. 2140-2146, 2008.
- STARKE, P.; WALTHER, F.; EIFLER, D.; New fatigue life calculation method for quenched and tempered steel SAE 4140 **Materials Science and Engineering: A**, v. 523, p. 246-252, 2009.
- VAZ, L. E.; **Método dos elementos finitos em análise de estruturas** Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- WANNENBURG, J.; HEYNS, P.S.; RAATH, A.D.; Application of a fatigue equivalent static load methodology for the numerical durability assessment of heavy vehicle structures **International Journal of Fatigue**, v.31, p. 1541-1549, 2009.
- WARHADPANDE, A. et al. A new finite element fatigue modeling approach for life scatter in tensile steel specimens **International Journal of Fatigue**, v. 32, p. 685-697, 2010.
- ZHANG, L.M. et al. Damage mechanics method for fatigue life prediction of Pitch-Change-Link **International Journal of Fatigue**, v. 32, p. 1683-1688, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE – A

DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES NA MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA

A máquina de ensaio por flexo-rotação permite a aplicação de uma carga que propicia um momento fletor ao longo do corpo-de-prova, como ilustrado na figura A1.

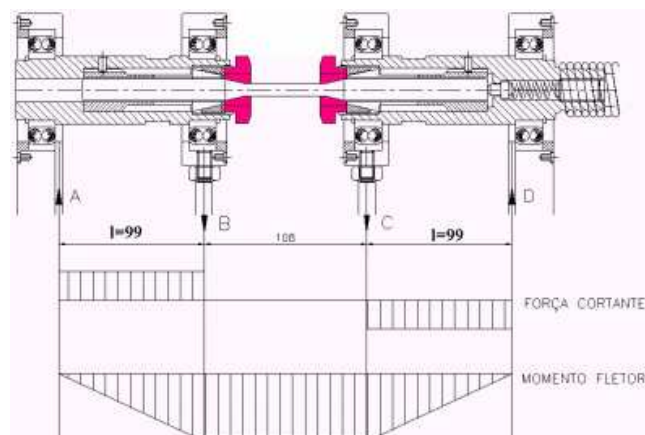


Figura A.1: Diagrama dos momentos fletores e da força cortante atuante no corpo-de-prova
Fonte: MANSUR, 2003

A aplicação das cargas é realizada por meio de um sistema de balança. Em um dos lados da balança existe um peso de compensação e no outro se aplica os pesos mortos, conforme a tensão que se deseja aplicar ao corpo-de-prova. A figura A.2 ilustra esquematicamente o sistema de aplicação de cargas, onde estão mostrados a força atuante no corpo-de-prova F_{CP} e força aplicada pelos pesos mortos F_A .

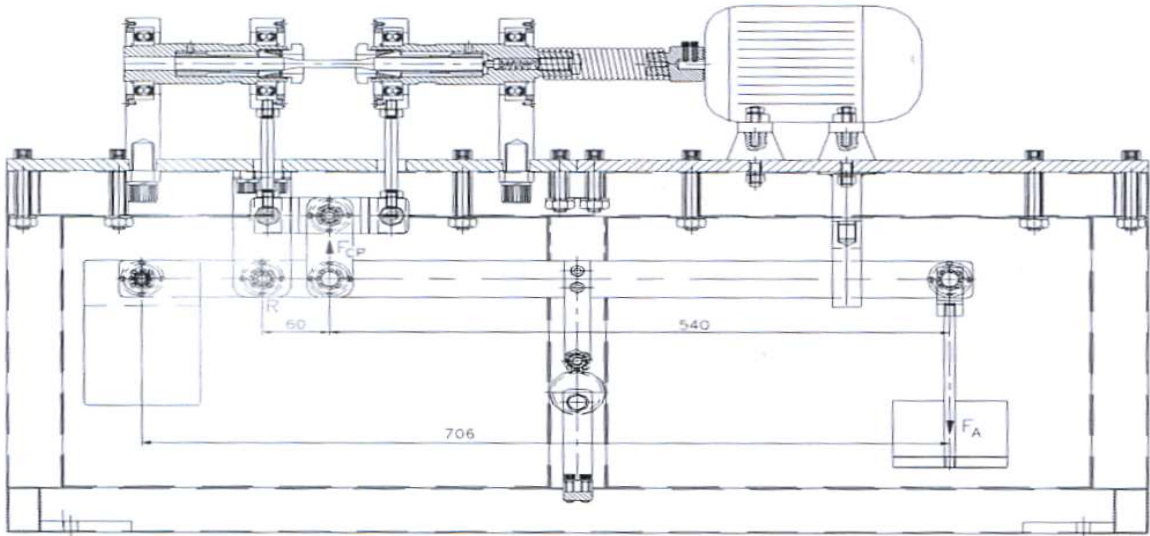


Figura A.2: Esquema ilustrando a aplicação de cargas
Fonte: MANSUR, 2003

Aplicando-se a equação de equilíbrio do momento na rótula R, tem-se:

$$\sum M_R = F_{CP} \cdot (60) - F_A \cdot (600) = 0$$

$$F_{CP} = (10)F_A \quad (A1)$$

Considerando-se que o corpo-de-prova tenha seção transversal circular e que esteja perfeitamente alinhado, tem-se a linha neutra passando pelo centro da área da seção transversal. A tensão aplicada ao corpo-de-prova é dada da seguinte forma:

$$\sigma = \left(\frac{M_{FT} \cdot r}{J} \right) \quad (A2)$$

Onde:

M_{FT} = Momento fletor máximo determinado pelas equações de equilíbrio

J = Momento de inércia da área da seção transversal

r = Raio da área da seção transversal do corpo-de-prova

σ = tensão normal máxima que atua na área da seção transversal do corpo-de-prova

Aplicando-se a equação de equilíbrio de momento no ponto A, conforme figura A.1 obtém-se o momento fletor máximo:

$$M_{FT} = \frac{F_{CP} \cdot I}{2} \quad (A3)$$

Onde $(F_{CP}/2)$ é a força atuante nos pontos B e C do corpo-de-prova e I é a distância do apoio (ponto A) ao ponto de aplicação de $(F_{CP}/2)$ conforme figura A.1. O momento de inércia J da seção circular é:

$$J = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \quad (A4)$$

Com base nas equações A.1 a A.4, obtém-se:

$$\sigma = \frac{20 \cdot F_A \cdot I}{\pi \cdot r^3}$$

$$F_A = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot r^3}{20 \cdot I} \quad (A5)$$

Onde σ é a tensão que se deseja aplicar ao corpo-de-prova, que daqui a diante será chamada de “tensão alternada aplicada”.

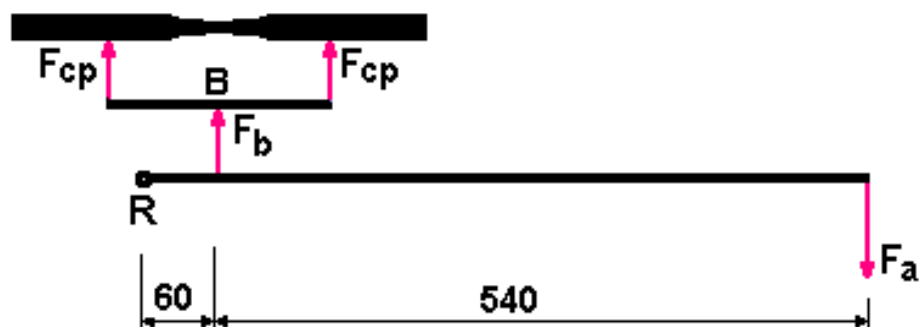


Figura A.3: Esquema de carregamento na máquina flexo-rotativa

Fonte: LOPES, 2006

APÊNDICE - B
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 4140

Fonte: WARHADPANDE *et al.* (2010)

Tabela B.1 – Propriedades Mecânicas do aço ABNT 4140

Parâmetros de Simulação	
Módulo de elasticidade do material (E)	210 GPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,30
Limite de Resistência Final	1250 MPa
Tamanho médio do elemento	40 μm
Incremento de dano (ΔD)	0,01
Limite de Resistência (σ_{RO})	6486,5 MPa
Expoente “m”	3,97
Coeficiente de modificação “b”	0,41

Fonte: Traduzido pelo autor

APÊNDICE C
PARÂMETROS DO EXPERIMENTO

Tabela C.1 – Parâmetros da usinagem

Condição de usinagem	V _c (m/min)	f (mm/rot)	a _p mm	R _a (μm)	DP (μm)
1.1	60,0	0,12	0,40	2,73	0,222
1.2	60,0	0,12	1,20	1,62	0,301
1.3	60,0	0,12	2,00	1,68	0,357
2.1	60,0	0,12	1,20	1,62	0,301
2.2	60,0	0,18	1,20	2,97	0,126
2.3	60,0	0,25	1,20	4,79	0,130
3.1	15,0	0,12	1,20	2,59	0,370
3.2	60,0	0,12	1,20	1,62	0,301
3.3	100,0	0,12	1,20	1,53	0,086

Fonte: LOPES, 2006

Tabela C.2 – Valores de Rugosidade

Condição	Rugosidade média (R _a)(μm)	Limite de Resistência à Fadiga (S _e)(MPa)
1.1	2,73 + 0,22	306,11 + 11,76
1.3	1,68 + 0,36	368,17 + 19,84
2.1	1,62 + 0,30	366,84 + 16,32
2.2	2,97 + 0,13	362,05 + 8,50
2.3	4,79 + 0,13	228,22 + 41,98
3.1	2,59 + 0,37	341,10 + 13,72
3.3	1,53 + 0,09	378,53 + 11,76
Polido	0,15 + 0,01	395,98 + 7,68

Fonte: LOPES, 2006

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.1: Resultados experimentais - condição 1.1: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 2,73 ± 0,22 µm						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	352,1	1.389.600	Sim	0,072	0,360	0,648
2	337,6	2.003.521	Não	0,050	0,250	0,449
3	352,1	3.339.463	Não	0,030	0,150	0,270
4	366,6	1.237.495	Sim	0,081	0,404	0,727
5	352,1	4.245.752	Não	0,024	0,118	0,212
6	366,6	2.003.366	Não	0,050	0,250	0,449
7	381,1	1.251.517	Sim	0,080	0,400	0,719
8	366,6	543.271	Sim	0,184	0,920	1,657
9	352,1	2.000.000	Não	0,050	0,250	0,450
10	366,6	439.092	Sim	0,228	1,139	2,050
11	352,1	814.324	Sim	0,123	0,614	1,105
12	337,6	2.002.667	Não	0,050	0,250	0,449
13	352,1	3.632.319	Não	0,028	0,138	0,248

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.2: Resultados experimentais - condição 1.3: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 1,68 ± 0,36 µm						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	439,0	1.108.298	SIM	0,090	0,451	0,812
2	424,5	2.541.757	NÃO	0,039	0,197	0,354
3	439,0	1.720.474	SIM	0,058	0,291	0,523
4	424,5	3.029.888	NÃO	0,033	0,165	0,297
5	439,0	831.162	SIM	0,120	0,602	1,083
6	424,5	2.042.000	NÃO	0,049	0,245	0,441
7	439,0	2.000.381	NÃO	0,050	0,250	0,450
8	453,5	1.186.892	SIM	0,084	0,421	0,758
9	439,0	1.165.466	SIM	0,086	0,429	0,772
10	424,5	1.244.599	SIM	0,080	0,402	0,723
11	410,1	1.637.713	SIM	0,061	0,305	0,550
12	395,6	2.014.828	NÃO	0,050	0,248	0,447
13	410,1	2.007.513	NÃO	0,050	0,249	0,448
14	424,5	1.501.524	SIM	0,067	0,333	0,599
15	410,1	2.006.053	NÃO	0,050	0,249	0,449

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.3: Resultados experimentais - condição 2.1: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 1,62 ± 0,30 µm						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	468,0	619.445	SIM	0,161	0,807	1,453
2	453,5	1.144.957	SIM	0,087	0,437	0,786
3	424,5	1.279.188	SIM	0,078	0,391	0,704
4	410,1	3.656.830	NÃO	0,027	0,137	0,246
5	424,5	1.366.895	SIM	0,073	0,366	0,658
6	410,1	3.032.132	NÃO	0,033	0,165	0,297
7	424,5	2.380.198	NÃO	0,042	0,210	0,378
8	439,0	1.511.246	SIM	0,066	0,331	0,596
9	424,5	2.008.895	NÃO	0,050	0,249	0,448
10	439,0	591.802	SIM	0,169	0,845	1,521
11	424,5	1.334.121	SIM	0,075	0,375	0,675
12	410,1	1.749.504	SIM	0,057	0,286	0,514
13	395,6	2.547.266	NÃO	0,039	0,196	0,353
14	410,1	1.424.690	SIM	0,070	0,351	0,632
15	395,6	2.038.841	NÃO	0,049	0,245	0,441
16	424,5	1.104.310	SIM	0,091	0,453	0,815

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.4: Resultados experimentais - condição 2.2: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 2,97 ± 0,13 µm						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	381,1	1.538.970	SIM	0,065	0,325	0,585
2	366,6	2.060.254	NÃO	0,049	0,243	0,437
3	381,1	2.005.523	NÃO	0,050	0,249	0,449
4	395,6	1.530.230	SIM	0,065	0,327	0,588
5	381,1	3.059.124	NÃO	0,033	0,163	0,294
6	395,6	1.748.889	SIM	0,057	0,286	0,515
7	381,1	2.364.627	NÃO	0,042	0,211	0,381
8	395,6	1.283.957	SIM	0,078	0,389	0,701
9	381,1	2.043.855	NÃO	0,049	0,245	0,440
10	395,6	2.022.029	NÃO	0,049	0,247	0,445
11	410,1	906.562	SIM	0,110	0,552	0,993
12	395,6	1.137.845	SIM	0,088	0,439	0,791
13	381,1	1.455.976	SIM	0,069	0,343	0,618

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.5: Resultados experimentais - condição 2.3: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = $4,79 \pm 0,13 \mu\text{m}$						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	352,1	1.635.284	SIM	0,061	0,306	0,550
2	337,6	2.011.427	NÃO	0,050	0,249	0,447
3	352,1	3.132.279	NÃO	0,032	0,160	0,287
4	366,6	1.671.103	SIM	0,060	0,299	0,539
5	352,1	2.011.878	NÃO	0,050	0,249	0,447
6	366,6	2.005.657	NÃO	0,050	0,249	0,449
7	381,1	1.687.707	SIM	0,059	0,296	0,533
8	366,6	4.489.748	NÃO	0,022	0,111	0,200
9	381,1	1.545.181	SIM	0,065	0,324	0,582
10	366,6	3.340.384	NÃO	0,030	0,150	0,269
11	381,1	2.000.734	NÃO	0,050	0,250	0,450
12	395,6	2.746.262	NÃO	0,036	0,182	0,328
13	410,1	1.372.094	SIM	0,073	0,364	0,656

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.6: Resultados experimentais - condição 2.3: corpo-de-prova usinado e recozido

Rugosidade Média (Ra) = $4,79 \pm 0,13 \mu\text{m}$						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	366,6	1.839.290	SIM	0,054	0,272	0,489
2	352,1	2.005.757	NÃO	0,050	0,249	0,449
3	366,6	1.808.260	SIM	0,055	0,277	0,498
4	352,1	2.145.356	NÃO	0,047	0,233	0,420
5	366,6	1.848.670	SIM	0,054	0,270	0,487
6	352,1	2.000.000	NÃO	0,050	0,250	0,450
7	366,6	2.232.204	NÃO	0,045	0,224	0,403
8	381,1	1.450.952	SIM	0,069	0,345	0,620
9	366,6	2.538.514	NÃO	0,039	0,197	0,355
10	381,1	1.643.307	SIM	0,061	0,304	0,548
11	366,6	1.131.793	SIM	0,088	0,442	0,795
12	352,1	827.115	SIM	0,121	0,605	1,088

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.7: Resultados experimentais - condição: corpo-de-prova polido

Rugosidade Média (Ra) = 0,15 ± 0,01 µm						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				10%	50%	90%
1	424,5	1.448.260	SIM	0,069	0,345	0,621
2	410,1	2.021.432	NÃO	0,049	0,247	0,445
3	424,5	1.249.064	SIM	0,080	0,400	0,721
4	410,1	2.032.966	NÃO	0,049	0,246	0,443
5	424,5	2.120.577	NÃO	0,047	0,236	0,424
6	439,0	770.593	SIM	0,130	0,649	1,168
7	424,5	687.268	SIM	0,146	0,728	1,310
8	410,1	2.950.870	NÃO	0,034	0,169	0,305
9	424,5	1.383.786	SIM	0,072	0,361	0,650
10	410,1	3.535.380	NÃO	0,028	0,141	0,255
11	424,5	1.634.038	SIM	0,061	0,306	0,551
12	410,1	2.003.125	NÃO	0,050	0,250	0,449
13	424,5	1.887.755	SIM	0,053	0,265	0,477
14	410,1	555.495	SIM	0,180	0,900	1,620
15	395,6	1.066.326	SIM	0,094	0,469	0,844

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS REGRA LINEAR DANO

Tabela D.8: Resultados experimentais - condição: corpo-de-prova polido e recozido

Rugosidade Média (Ra) = 0,15 ± 0,01 µm						
Corpo de prova	Experimental			Regra Linear		
	Tensao (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Dano admitindo falha		
				1%	50%	90%
1	337,6	1.111.848	SIM	0,090	0,450	0,809
2	323,1	2.039.898	NÃO	0,049	0,245	0,441
3	337,6	5.449.357	NÃO	0,018	0,092	0,165
4	352,1	1.289.251	SIM	0,078	0,388	0,698
5	337,6	2.019.530	NÃO	0,050	0,248	0,446
6	352,1	1.053.343	SIM	0,095	0,475	0,854
7	337,6	2.003.244	NÃO	0,050	0,250	0,449
8	352,1	1.336.343	SIM	0,075	0,374	0,673
9	337,6	1.616.533	SIM	0,062	0,309	0,557
10	323,1	2.014.754	NÃO	0,050	0,248	0,447
11	337,6	1.645.389	SIM	0,061	0,304	0,547
12	323,1	3.060.057	NÃO	0,033	0,163	0,294
13	366,6	1.565.340	SIM	0,064	0,319	0,575

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – E

RESULTADOS APLICANDO MODELO ANALÍTICO

Tabela E.1: Resultado analítico-numérico - condição 1.1: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 2,73 ± 0,22 mm						
Corpo De prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	352,1	1.389.600	SIM	0,360	7.092	0,007
2	337,6	2.003.521	NÃO	0,250	8.408	0,008
3	352,1	3.339.463	NÃO	0,150	7.092	0,007
4	366,6	1.237.495	SIM	0,404	6.023	0,006
5	352,1	4.245.752	NÃO	0,118	7.092	0,007
6	366,6	2.003.366	NÃO	0,250	6.023	0,006
7	381,1	1.251.517	SIM	0,400	5.148	0,005
8	366,6	543.271	SIM	0,920	6.023	0,006
9	352,1	2.000.000	NÃO	0,250	7.092	0,007
10	366,6	439.092	SIM	1,139	6.023	0,006
11	352,1	814.324	SIM	0,614	7.092	0,007
12	337,6	2.002.667	NÃO	0,250	8.408	0,008
13	352,1	3.632.319	NÃO	0,138	7.092	0,007

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – E

RESULTADOS APLICANDO MODELO ANALÍTICO

Tabela E.2: Resultado analítico-numérico - condição 1.3: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 1,68 ± 0,36 µm						
Corpo de prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	439,0	1.108.298	SIM	0,451	2.904	0,003
2	424,5	2.541.757	NÃO	0,197	3.343	0,003
3	439,0	1.720.474	SIM	0,291	2.904	0,003
4	424,5	3.029.888	NÃO	0,165	3.343	0,003
5	439,0	831.162	SIM	0,602	2.904	0,003
6	424,5	2.042.000	NÃO	0,245	3.343	0,003
7	439,0	2.000.381	NÃO	0,250	2.904	0,003
8	453,5	1.186.892	SIM	0,421	2.557	0,003
9	439,0	1.165.466	SIM	0,429	2.904	0,003
10	424,5	1.244.599	SIM	0,402	3.343	0,003
11	410,1	1.637.713	SIM	0,305	3.829	0,004
12	395,6	2.014.828	NÃO	0,248	4.453	0,004
13	410,1	2.007.513	NÃO	0,249	3.829	0,004
14	424,5	1.501.524	SIM	0,333	3.343	0,003
15	410,1	2.006.053	NÃO	0,249	3.829	0,004

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – E

RESULTADOS APLICANDO MODELO ANALÍTICO

Tabela E.3: Resultado analítico-numérico - condição 2.1: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 1,62 ± 0,30 µm						
Corpo de prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	468,0	619.445	SIM	0,807	2.241	0,002
2	453,5	1.144.957	SIM	0,437	2.557	0,003
3	424,5	1.279.188	SIM	0,391	3.343	0,003
4	410,1	3.656.830	NÃO	0,137	3.829	0,004
5	424,5	1.366.895	SIM	0,366	3.343	0,003
6	410,1	3.032.132	NÃO	0,165	3.829	0,004
7	424,5	2.380.198	NÃO	0,210	3.343	0,003
8	439,0	1.511.246	SIM	0,331	2.904	0,003
9	424,5	2.008.895	NÃO	0,249	3.343	0,003
10	439,0	591.802	SIM	0,845	2.904	0,003
11	424,5	1.334.121	SIM	0,375	3.343	0,003
12	410,1	1.749.504	SIM	0,286	3.829	0,004
13	395,6	2.547.266	NÃO	0,196	4.453	0,004
14	410,1	1.424.690	SIM	0,351	3.829	0,004
15	395,6	2.038.841	NÃO	0,245	4.453	0,004
16	424,5	1.104.310	SIM	0,453	3.343	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – E

RESULTADOS APLICANDO MODELO ANALÍTICO

Tabela E.4: Resultado analítico-numérico - condição 2.2: corpo-de-prova usinado

Rugosidade Média (Ra) = 2,97 ± 0,13 µm						
Corpo de prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	381,1	1.538.970	SIM	0,325	5.148	0,005
2	366,6	2.060.254	NÃO	0,243	6.023	0,006
3	381,1	2.005.523	NÃO	0,249	5.148	0,005
4	395,6	1.530.230	SIM	0,327	4.453	0,004
5	381,1	3.059.124	NÃO	0,163	5.148	0,005
6	395,6	1.748.889	SIM	0,286	4.453	0,004
7	381,1	2.364.627	NÃO	0,211	5.148	0,005
8	395,6	1.283.957	SIM	0,389	4.453	0,004
9	381,1	2.043.855	NÃO	0,245	5.148	0,005
10	395,6	2.022.029	NÃO	0,247	4.453	0,004
11	410,1	906.562	SIM	0,552	3.829	0,004
12	395,6	1.137.845	SIM	0,439	4.453	0,004
13	381,1	1.455.976	SIM	0,343	5.148	0,005

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – E

RESULTADOS APLICANDO MODELO ANALÍTICO

Tabela E.5: Resultado analítico-numérico – condição 2.3: corpo-de-prova usinado e recozido

Rugosidade Média (Ra) = 4,79 ± 0,13 µm						
Corpo de prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	366,6	1.839.290	SIM	0,272	6.023	0,006
2	352,1	2.005.757	NÃO	0,249	7.092	0,007
3	366,6	1.808.260	SIM	0,277	6.023	0,006
4	352,1	2.145.356	NÃO	0,233	7.092	0,007
5	366,6	1.848.670	SIM	0,270	6.023	0,006
6	352,1	2.000.000	NÃO	0,250	7.092	0,007
7	366,6	2.232.204	NÃO	0,224	6.023	0,006
8	381,1	1.450.952	SIM	0,345	5.148	0,005
9	366,6	2.538.514	NÃO	0,197	6.023	0,006
10	381,1	1.643.307	SIM	0,304	5.148	0,005
11	366,6	1.131.793	SIM	0,442	6.023	0,006
12	352,1	827.115	SIM	0,605	7.092	0,007

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – E

RESULTADOS APLICANDO MODELO ANALÍTICO

Tabela E.6: Resultado analítico-numérico - condição: corpo-de-prova polido

Rugosidade Média (Ra) = 0,15 ± 0,01 µm						
Corpo de prova	Experimental				Analítico-Numérico	
	Tensão (Mpa)	Nº Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Nº Ciclos para dano D = 0.99	Índice (I)
1	424,5	1.448.260	SIM	0,345	3.343	0,003
2	410,1	2.021.432	NÃO	0,247	3.829	0,004
3	424,5	1.249.064	SIM	0,400	3.343	0,003
4	410,1	2.032.966	NÃO	0,246	3.829	0,004
5	424,5	2.120.577	NÃO	0,236	3.343	0,003
6	439,0	770.593	SIM	0,649	2.904	0,003
7	424,5	687.268	SIM	0,728	3.343	0,003
8	410,1	2.950.870	NÃO	0,169	3.829	0,004
9	424,5	1.383.786	SIM	0,361	3.343	0,003
10	410,1	3.535.380	NÃO	0,141	3.829	0,004
11	424,5	1.634.038	SIM	0,306	3.343	0,003
12	410,1	2.003.125	NÃO	0,250	3.829	0,004
13	424,5	1.887.755	SIM	0,265	3.343	0,003
14	410,1	555.495	SIM	0,900	3.829	0,004
15	395,6	1.066.326	SIM	0,469	4.453	0,004

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – F

RESULTADOS PLATAFORMA ANSYS

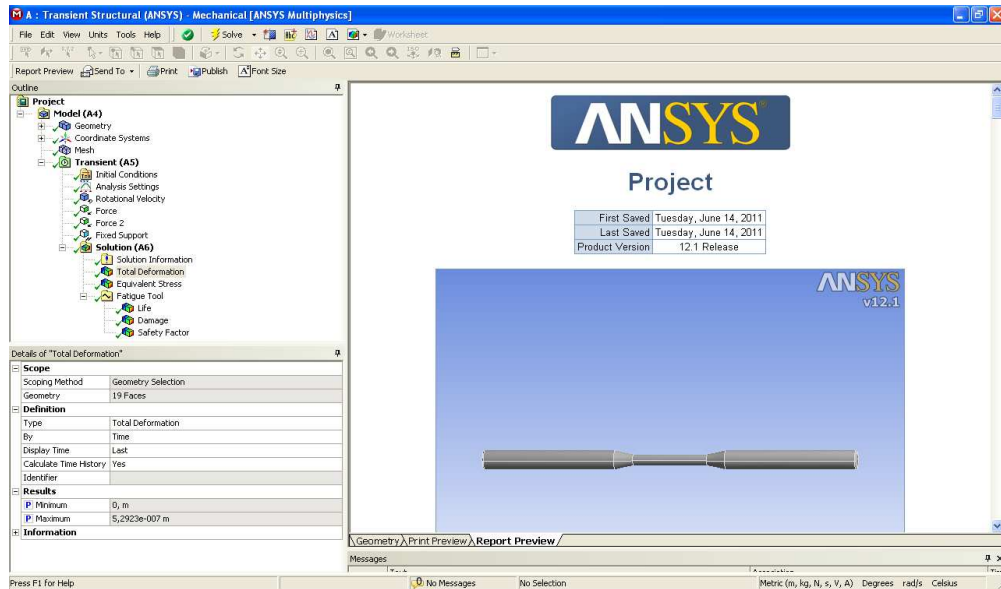


Figura F.1: Resultados Ansys - relatório de saída após simulação

Fonte: Elaborado pelo autor

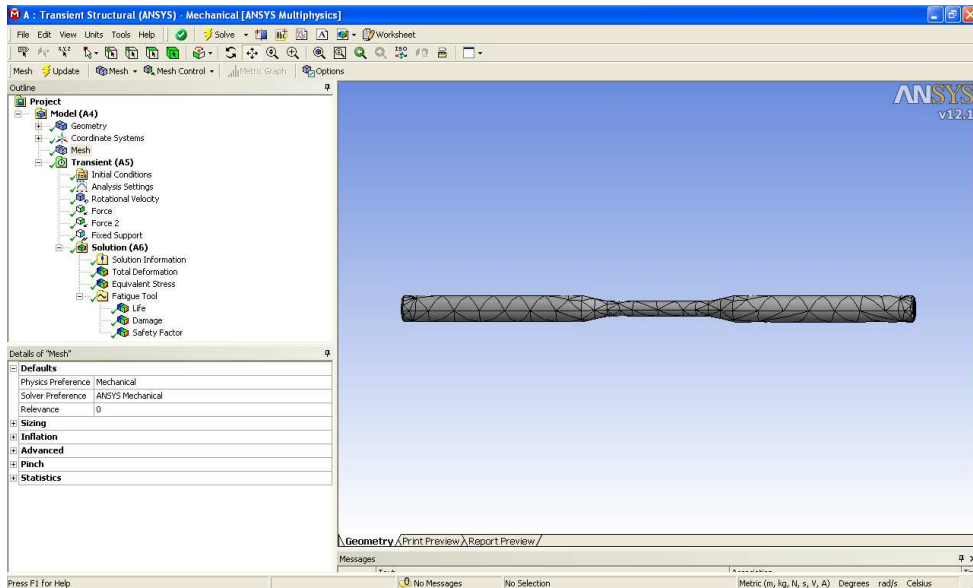


Figura F.2: Resultados Ansys - discretização da malha adotada

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – F

RESULTADOS PLATAFORMA ANSYS

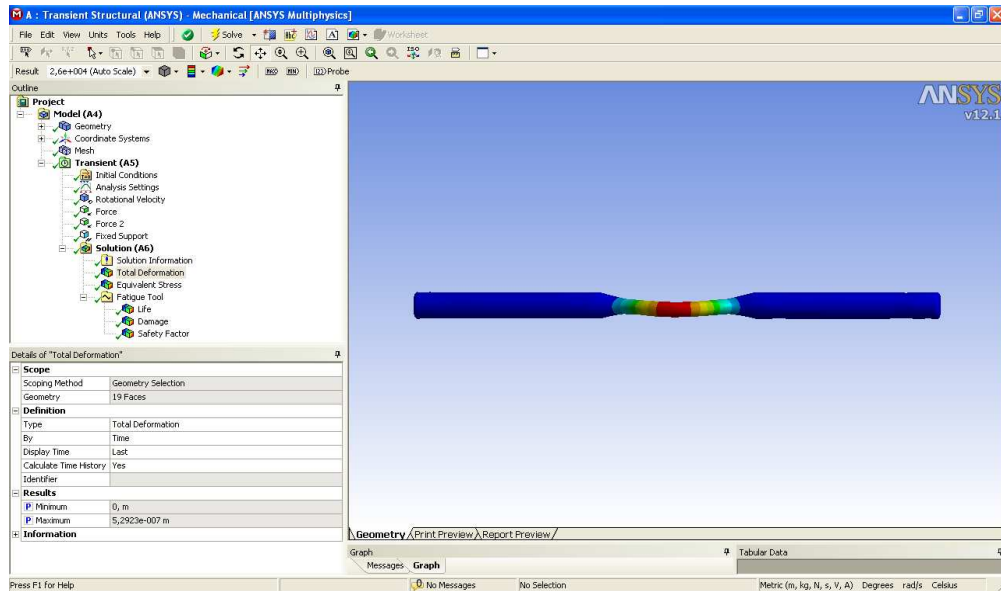


Figura F.3: Resultados Ansys - deformação total do corpo-de-prova

Fonte: Elaborado pelo autor

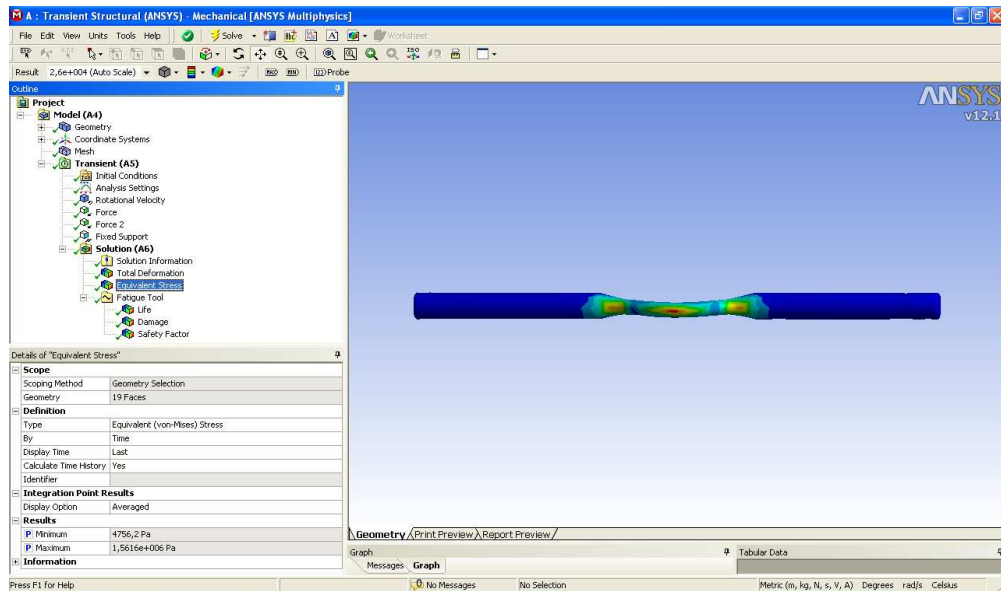


Figura F.4: Resultados Ansys - tensão equivalente do corpo-de-prova

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – F

RESULTADOS PLATAFORMA ANSYS

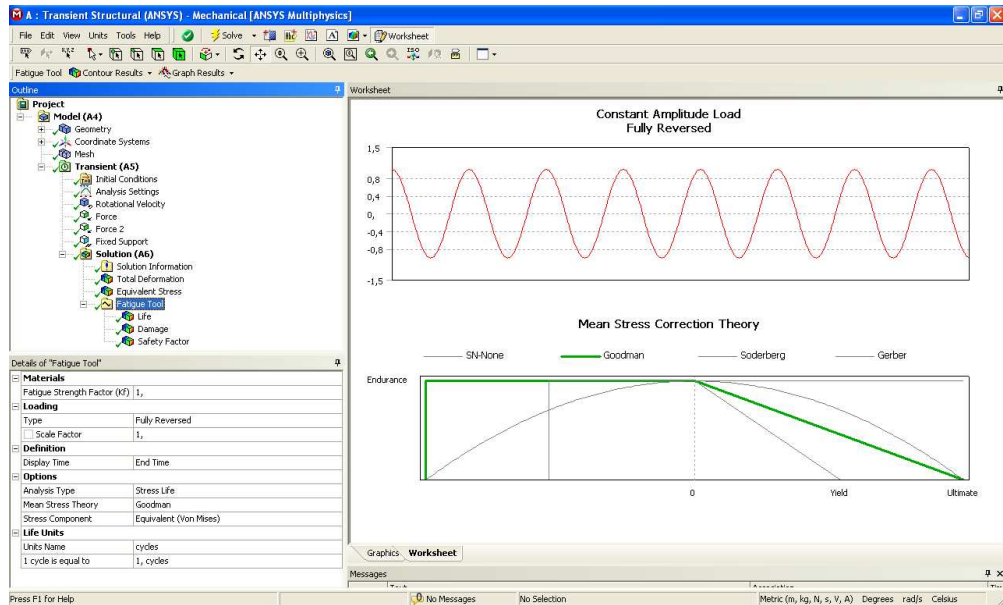


Figura F.5: Amplitude com carregamento reverso e correção da tensão média

Fonte: Elaborado pelo autor

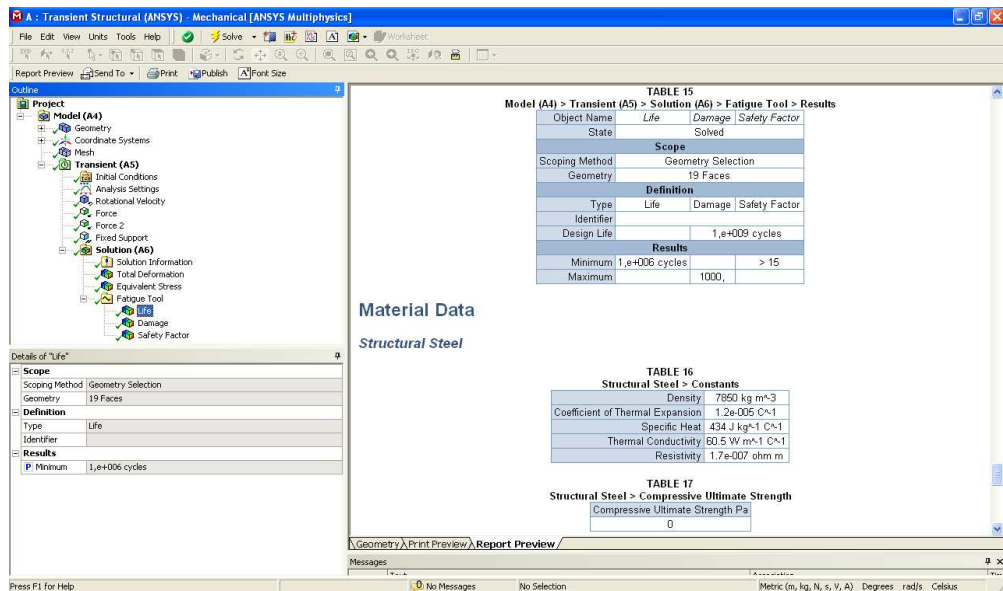


Figura F.6: Resultados Ansys - cálculo da vida do corpo-de-prova

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – F

RESULTADOS PLATAFORMA ANSYS

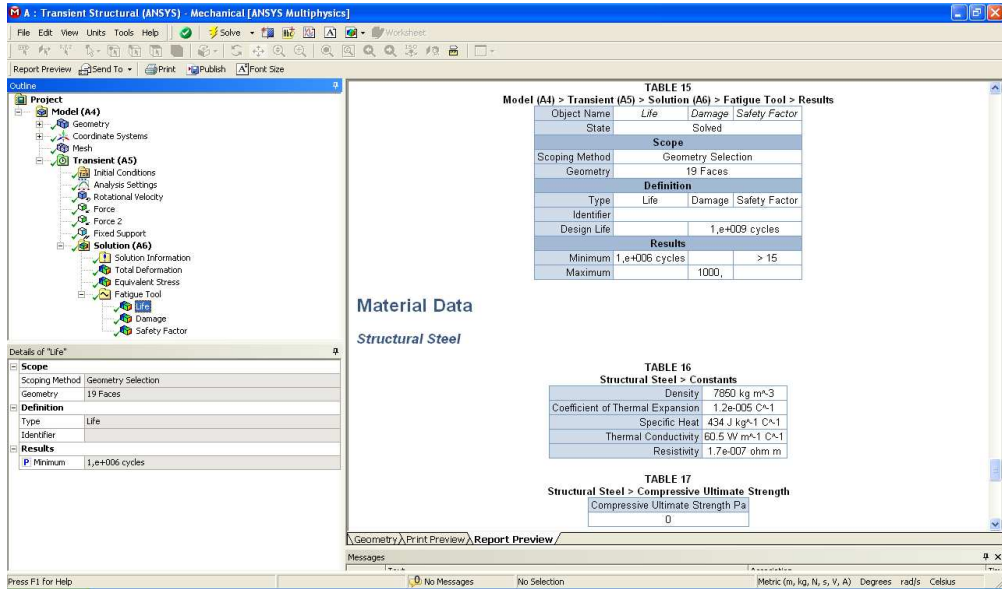


Figura F.7: Resultados Ansys - cálculo de dano do corpo-de-prova

Fonte: Elaborado pelo autor

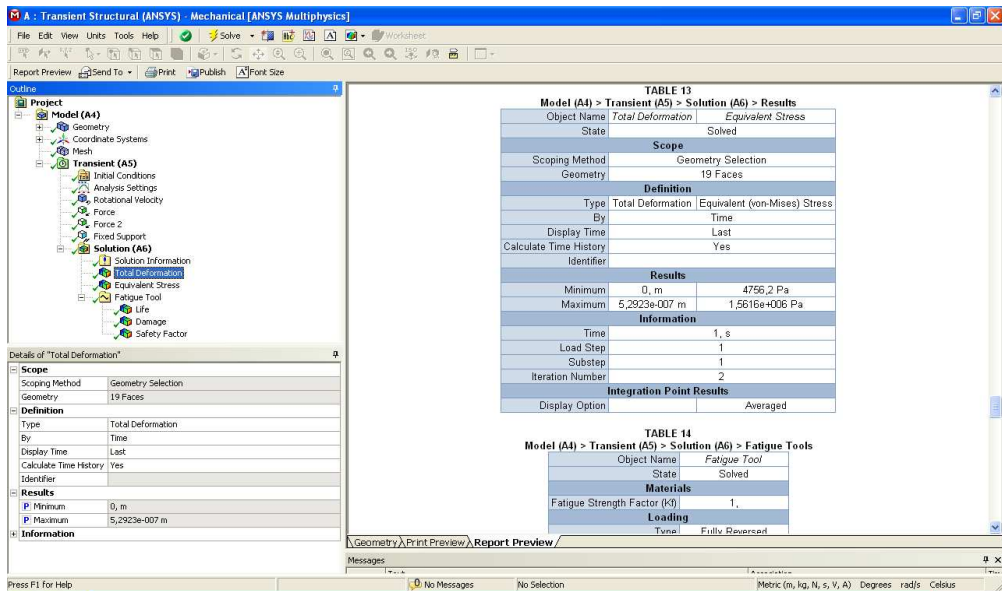


Figura F.8: Resultados Ansys - fator de segurança

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – G

RESULTADOS PLATAFORMA ANSYS

Tabela G.1: Resultados Ansys - condição 2.3: corpo-de-prova usinado e recozido

Rugosidade Média (Ra) = $4.79 \pm 0.13 \mu\text{m}$								
Corpo de prova	Experimental				Numérico - Software ANSYS			
	Tensão (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Vida (ciclos)	Dano	Tensão Equivalente (Mpa)	Deformação
1	366,6	1.839.290	SIM	0,272	10.008	0,010	360,4	5,98E-06
2	352,1	2.005.757	NÃO	0,249	11.492	0,011	346,1	5,74E-06
3	366,6	1.808.260	SIM	0,277	10.008	0,010	360,4	5,98E-06
4	352,1	2.145.356	NÃO	0,233	11.492	0,011	346,1	5,74E-06
5	366,6	1.848.670	SIM	0,270	10.008	0,010	360,4	5,98E-06
6	352,1	2.000.000	NÃO	0,250	11.492	0,011	346,1	5,74E-06
7	366,6	2.232.204	NÃO	0,224	10.008	0,010	360,4	5,98E-06
8	381,1	1.450.952	SIM	0,345	8.877	0,009	374,6	6,22E-06
9	366,6	2.538.514	NÃO	0,197	10.008	0,010	360,4	5,98E-06
10	381,1	1.643.307	SIM	0,304	8.877	0,009	374,6	6,22E-06
11	366,6	1.131.793	SIM	0,442	10.008	0,010	360,4	5,98E-06
12	352,1	827.115	SIM	0,605	11.492	0,011	346,1	5,74E-06

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE – G

RESULTADOS PLATAFORMA ANSYS

Tabela G.2: Resultados Ansys - condição: corpo-de-prova polido

Rugosidade Média (Ra) = $0.15 \pm 0.01 \mu\text{m}$								
Corpo de prova	Experimental				Numérico - Software ANSYS			
	Tensão (Mpa)	Ciclos Aplicados	Houve fratura?	Regra Linear	Vida (ciclos)	Dano	Tensão Equivalente (Mpa)	Deformação
1	424,5	1.448.260	SIM	1,38	6360	0,006	417,4	6,93E-06
2	410,1	2.021.432	NÃO	0,99	7077	0,007	403,1	6,69E-06
3	424,5	1.249.064	SIM	1,6	6360	0,006	417,4	6,93E-06
4	410,1	2.032.966	NÃO	0,98	7077	0,007	403,1	6,69E-06
5	439	770.593	SIM	2,6	5733	0,006	431,6	7,16E-06
6	424,5	687.268	SIM	2,91	6360	0,006	417,4	6,93E-06
7	410,1	2.950.870	NÃO	0,68	7077	0,007	403,1	6,69E-06
8	424,5	1.383.786	SIM	1,45	6360	0,006	417,4	6,93E-06
9	410,1	3.535.380	NÃO	0,57	7077	0,007	403,1	6,69E-06
10	424,5	1.634.038	SIM	1,22	6360	0,006	417,4	6,93E-06
11	410,1	2.003.125	NÃO	1	7077	0,007	403,1	6,69E-06
12	424,5	1.887.755	SIM	1,06	6360	0,006	417,4	6,93E-06

Fonte: Elaborado pelo autor