

SIDNEI ANDRÉ DOS SANTOS

ANÁLISE DE FALHAS POR FADIGA DE ALTO CICLO EM
EIXOS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2011

S237a

Santos, Sidnei André dos

Análise de falhas por fadiga de alto ciclo em eixos de transmissão utilizando o método dos elementos finitos / Sidnei André dos Santos – Guaratinguetá : [s.n], 2011.

63 f : il.

Bibliografia: f. 58

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Fadiga 2. Método dos elementos finitos I. Título

CDU 620.178.3

**ANÁLISE DE FALHAS POR FADIGA DE ALTO CICLO EM EIXOS DE
TRANSMISSÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

SIDNEI ANDRÉ DOS SANTOS

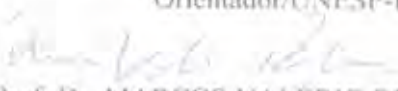
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP-FEG


Eng. WALTER LUIZ MEDEIROS TUPINAMBA
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus*, companheiro inseparável em todos os momentos, por estar vencendo mais uma fase da minha vida, pela minha família e pelos amigos,

à minha mãe, *Maria Delmina dos Santos*, que sempre incentivou meus estudos e sonhos, por mais que as dificuldades aparecessem pelo caminho,

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva*, pelo apoio e dedicação na realização deste trabalho,

à *Urbano Gonçalves de Oliveira*, pela imensa ajuda na confecção dos corpos de prova para realização dos ensaios,

à *Walter Luiz Medeiros Tupinamba* pelo auxílio, presteza e dedicação na realização dos ensaios de flexão,

à *Rafael Gustavo Bonora e Manoel Francisco dos Santos*, pelo apoio e auxílio na realização do ensaio de fadiga, sem o qual não seria possível alcançar os objetivos do trabalho,

Aos amigos pelos momentos de discussão e descontração

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita”.

Gandhi

SANTOS, S. A. **Análise de falhas por fadiga de alto ciclo em eixos de transmissão utilizando o método dos elementos finitos.** 2011. 63 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo que visa validar a análise de fadiga desenvolvida no *software* comercial de elementos finitos, *ANSYS Workbench*, tendo-se como base a realização de ensaios mecânicos de tração e dureza para verificar as propriedades mecânicas do material com o qual foi usinado o eixo (aço ABNT 1045), ensaio de flexão, com a finalidade de comprovar o grau de confiabilidade da análise computacional, obtendo a tensão máxima em uma determinada condição de trabalho com aplicação de um carregamento de 40 [kgf] e por fim o ensaio de fadiga para obtenção do número de ciclos que o eixo de transmissão suporta em condição de trabalho aplicando-se um carregamento de 8 [kgf]. Os resultados obtidos ao longo do trabalho apresentaram-se bastante satisfatórios com relação ao esperado teoricamente.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga. Eixo de transmissão. Método dos Elementos Finitos. *Ansys*.

SANTOS, S. A. **Failure analyses by high cycle fatigue in transmission shafts using the finite elements methods**. 2011. 63 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, São Paulo University State Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

This work presents a study that aims to validate the fatigue analyses developed on finite element commercial software, ANSYS Workbench. It was based on mechanical tests development of traction and hardness, to verify the mechanical properties of material that the shaft was manufactured (ABNT 1045 steel), it was developed bend test, with purpose to prove the confiability degree of computational analyses, obtaining the maximum stress in a work condition determined with 40 [kgf] of load applied, and at the end, was developed the fatigue test to obtain the number of cycles that the transmission shaft can support in a work condition with 8 [kgf] of load applied. The results obtained during the work present, have to be quite satisfactory with the theoretically expected.

KEYWORDS: Fatigue. Transmission Shaft. Finite Elements Method. Ansys.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Eixo de transmissão	12
Figura 2 - Características de falhas por fadiga	16
Figura 3 - Tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes	17
Figura 4 – Correção da tensão média	19
Figura 5 - Diagrama de corpo livre	22
Figura 6 - Fluxograma para análise estrutural.	24
Figura 7 - Modelo de eixo de transmissão	25
Figura 8 - Configuração do eixo de transmissão para o 1º estudo de caso.....	25
Figura 9 - Elemento tetraédrico com 10 nós	26
Figura 10 -Modelo de elementos finitos.....	26
Figura 11 - Modelo de elementos finitos – Região de entalhe.	27
Figura 12 - Configuração da condição de trabalho do eixo de transmissão.	27
Figura 13 - Carregamento e condições de contorno.	28
Figura 14 - Configuração do eixo de transmissão para análise de fadiga.	29
Figura 15 - Configuração do eixo de transmissão para o 2º estudo de caso.....	29
Figura 16 - Modelo com malha de elementos finitos.	29
Figura 17 - Modelo com malha de elementos finitos – Região com refinamento.....	30
Figura 18 - Carregamento e condições de contorno aplicadas.	31
Figura 19 - Curva S-N do aço SAE 1045.	32
Figura 20 – Fator de superfície.....	33
Figura 21 - Fator de confiabilidade..	34
Figura 22 - Fluxograma para análise experimental.	35
Figura 23 - Processo de usinagem dos eixos de transmissão.	36
Figura 24 - Corpo de prova para ensaio de tração – ASTM E8.	36
Figura 25 - Equipamento utilizado no ensaio de tração.	37
Figura 26 - Início da estricção no ensaio de fadiga.	37
Figura 27 - Penetrador cônico.	38
Figura 28 - Máquina de ensaio de dureza Rockwell.	39
Figura 29 - Corpo de prova para o ensaio de flexão.....	40
Figura 30 - Configuração para o ensaio de flexão.....	40
Figura 31 - Disposição dos extensômetros na região de entalhe do eixo.....	41

Figura 32- Ponte de Weatstone.....	41
Figura 33 - Aplicação de carregamento para ensaio de flexão.....	42
Figura 34 - Equipamentos de aquisição de dados.	43
Figura 35 - Corpo de prova para ensaio de fadiga.....	43
Figura 36 - Instron R. R. Moore para ensaio de fadiga por flexão rotativa	44
Figura 37 - Acoplamento do corpo de prova na máquina Instron R. R. Moore.....	45
Figura 38 - Sistema de aplicação da carga.	45
Figura 39 - Distribuição de tensão Von-Mises.....	48
Figura 40 - Máxima tensão Von-Mises no eixo.	48
Figura 41 - Máxima deformação no eixo.	49
Figura 42 - Tensões Von-Mises.....	50
Figura 43 - Região de falha do eixo e número de ciclos em sob condições específicas de trabalho.	51
Figura 44 - Curva tensão [MPa] <i>versus</i> deformação [mm/mm] do aço 1045.	52
Figura 45 - Curva carga [N] <i>versus</i> deformação [μm/m].	54
Figura 46 - Números de ciclos visualizados no conta-giros.....	55
Figura 47 - Corpo de prova fraturado.....	56
Figura 48 - Fratura do corpo de prova.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados do modelo de elementos finitos.....	27
Tabela 2 -	Dados do modelo de elementos finitos – Análise de fadiga.	30
Tabela 3 -	Dados de fadiga do aço ABNT 1045 temperado.....	31
Tabela 4 -	Instron R. R. Moore.	44
Tabela 5 -	Reações nos apoios.....	49
Tabela 6 -	Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.....	52
Tabela 7 -	Dureza Rockwell para o Aço ABNT 1045.	53
Tabela 8 -	Resultados de deformação.....	53
Tabela 9 -	Resultados do ensaio de fadiga	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
CNC	-	Computer Numeric Control
CPD	-	Corpo de Prova
DME	-	Departamento de Mecânica
DMT	-	Departamento de Materiais
FEG	-	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
MEF	-	Método dos Elementos Finitos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Eixo de transmissão	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Justificativas	13
1.4	Métodos e análise	13
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
2.1	Introdução	14
2.2	Fadiga	14
2.2.1	Mecanismo de Falha por Fadiga	15
2.2.2	Carregamentos de Fadiga	16
2.2.3	Carregamento em mecanismos rotativos.	17
2.2.4	Teste em viga rotativa.	20
2.3	Método dos Elementos Finitos.....	20
2.3.1	Modelagem Matemática.....	21
2.3.2	Tipos de Elementos	22
2.3.3	Malha de Elementos Finitos	23
3.	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
3.1	1º Estudo de caso – Análise de tensão flexão:	24
3.1.1	Propriedades mecânicas do material	25
3.1.2	Pré-processamento.....	25
3.1.3	Processamento.....	27
4.	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	35
4.1	Usinagem do eixo de transmissão:	35
4.2	Ensaio de tração:	36
4.3	Ensaio de dureza:	38
4.4	Ensaio de flexão:	39
4.5	Ensaio de fadiga:.....	43
5.	RESULTADOS	47
5.1	Resultado das análises pelo método dos elementos finitos.....	47
5.1.1	Resultado do 1º estudo de caso (Análise de tensão).....	47
5.1.2	Resultado do 2º estudo de caso (Análise de fadiga)	49
5.2	Resultados das análises experimentais.....	51
5.2.1	Resultado do ensaio de tração	51
5.2.2	Resultado do ensaio de dureza	52
5.2.3	Resultado do ensaio de tensão de flexão por extensometria (1º estudo de caso)....	53
5.2.4	Resultado do ensaio de fadiga (2º estudo de caso)	55
6.	CONCLUSÕES.....	57
7.	REFERÊNCIAS.....	58
	ANEXO A – Dados do ensaio de tração	59

1. INTRODUÇÃO

1.1 Eixo de transmissão

Eixos de transmissão são propriamente usados em todas as partes de máquinas rotativas para transmitir movimento de rotação e torque de um local para outro. Assim, o projeto de máquina é freqüentemente encarado com a tarefa de projetar eixos, aos quais são acoplados outros elementos mecânicos, como engrenagens, polias, ventiladores, rodas centradas, etc. Os eixos de transmissão são alocados nas máquinas e fixados ou apoiados por mancais de deslizamento ou rolamento, apresentam seções circulares, variáveis e geralmente mássicas. É comum ao longo do eixo a abertura de rasgos de chavetas e canais para fixação dos componentes, como mostrado na Figura 1.

Máquinas de produção automática possuem linhas de eixos que estendem o comprimento da máquinas (mais de 300 cm) e carregam a potência de toda a estação de trabalho.

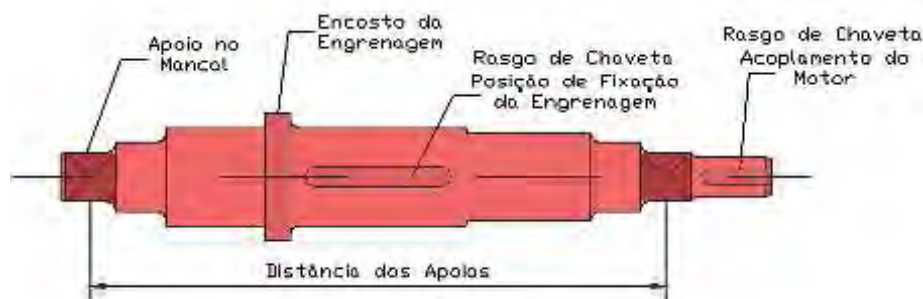


Figura 1- Eixo de transmissão - (Fonte: Neto P. S., 2005, p. 129)

Em trabalho, os eixos podem ser submetidos a esforços de flexão, tração, compressão ou torção, que podem atuar isoladamente ou de maneira combinada. Assim é esperado que esses esforços atuem de forma combinada, o que leva o projetista a ter que considerar a resistência à fadiga e as cargas estáticas como parâmetros importantes no desenvolvimento do projeto, uma vez que o eixo pode estar submetido a tensões estáticas, tensões reversíveis e tensões repetidas, que normalmente atuam de forma simultânea, que podem vir a provocar a falha do eixo e até mesmo de todo o sistema.

1.2 Objetivos

Demonstrar através da comparação de resultados de análises computacional e ensaios mecânicos que é possível obter resultados com satisfatório grau de confiança em análises de fadiga de componentes mecânicos utilizando o método dos elementos finitos através do software comercial *ANSYS*. O estudo é desenvolvido especificamente na análise de eixos de transmissão submetidos a carregamentos cíclicos.

1.3 Justificativas

O fenômeno da fadiga é altamente complexo, estando presente na maioria das aplicações de componentes mecânicos e é responsável pela grande maioria das falhas estruturais que ocorrem nestes componentes.

Com o advento da tecnologia computacional se torna cada vez mais vantajoso desenvolver e utilizar softwares baseados no método dos elementos finitos com capacidade de realizarem simulações numéricas de ensaios em várias áreas da engenharia, que antes só eram realizadas em laboratórios, e assim obter resultados com alto grau de confiança reduzindo dessa forma custos e tempo.

Dessa forma, este trabalho visa demonstrar através de simulações computacionais e ensaios reais que se pode utilizar o software comercial *ANSYS* para estimar a vida em fadiga de eixos de transmissão e assim, de uma forma geral, em estruturas mais complexas.

1.4 Métodos e análise

Neste trabalho são realizados ensaios mecânicos no laboratório de fadiga dos materiais, tendo como objetivo analisar as propriedades do material (aço ABNT1045) com ensaio de tração e dureza, a fim de garantir a confiabilidade da análise estrutural é realizado ensaio de flexão colando-se extensômetros no entalhe do eixo para verificar a tensão máxima e por fim realiza-se ensaio de fadiga para levantar o número de ciclos do eixo de transmissão simulando uma condição de trabalho. Após obter os resultados experimentais, é desenvolvida análise estrutural e de fadiga utilizando o software comercial de elementos finitos *ANSYS Workbench*, dessa forma podendo fazer uma comparação entre os resultados experimental e computacional.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados, de forma sucinta, o fenômeno da fadiga e abordagem sobre o método dos elementos finitos.

2.2 Fadiga

Na obtenção de propriedades de materiais relacionados com o diagrama tensão-deformação, aplica-se a carga gradualmente, dando-se tempo suficiente para o desenvolvimento das deformações. Nas condições usuais, testa-se o corpo de prova até a sua destruição, de modo que as tensões sejam aplicadas apenas uma vez. Estas condições, conhecidas como estáticas, aparecem de modo muito semelhante em componentes estruturais e mecânicos. Frequentemente, entretanto, em muitos tipos de estruturas, os valores das tensões variam ou flutuam ao longo do tempo. Por exemplo, em elemento sobre a superfície de um eixo rotativo, sujeito a ação de cargas de flexão, fica submetido à tração e compressão alternadamente, em cada rotação do eixo. Se o eixo for de um motor elétrico girando a 1725 RPM, o elemento ficará submetido a tensões de tração e compressão 1725 vezes por minuto. Se, adicionalmente, o eixo for carregado também axialmente (causado, por exemplo, por uma engrenagem helicoidal ou parafuso sem fim), haverá superposição de um componente axial de tensão sobre as tensões devidas a flexão. Isto resulta no aparecimento, em outro ponto do corpo e com diferente intensidade, de outra tensão flutuante. Estas e outras espécies que ocorrem em peças de máquinas produzem tensões chamadas repetidas, alternadas ou flutuantes, (Shigley, 1984).

A maioria das falhas em componentes mecânicos é devida mais a carregamentos variáveis que carregamentos estáticos. Estas falhas ocorrem tipicamente sob níveis de tensões menores que a tensão de escoamento do material. Porém as tensões se caracterizam por um grande número de repetições, levando o material ao estresse, o que é chamado de fadiga. Assim, usando somente teorias de falhas estáticas podem-se induzir a projetos inseguros quando os carregamentos são dinâmicos.

2.2.1 Mecanismo de Falha por Fadiga

Ao longo dos estudos sobre o fenômeno da fadiga, constatou-se que as falhas sempre começam através de uma trinca. A trinca pode ter estado presente no material desde sua produção, ou ela pode ter se desenvolvido ao longo do tempo devido à deformação cíclica em torno de um concentrador de tensão. As trincas de fadiga geralmente iniciam em um entalhe ou outro concentrador de tensão. Como exemplo, tem-se o caso da aeronave *Comet* que teve sua falha iniciada por trincas menores que 0.07 polegadas de comprimento próximas aos cantos das janelas que eram quase quadradas, assim produzindo concentrações de altas tensões.

Há três estágios de falhas de fadiga: iniciação da trinca, propagação da trinca e fratura repentina devido ao crescimento instável da trinca. O primeiro estágio pode ser de curta duração, o segundo estágio envolve mais da vida da peça e o terceiro estágio é instantâneo (Norton, 2006).

- **Estágio de iniciação da trinca**

Nesse estágio a trinca se inicia na microestrutura do material, propagando-se inicialmente ao longo de planos de altas tensões cisalhantes, até ser desacelerada por barreiras microestruturais, como contornos de grãos, inclusões, etc.

- **Estágio de propagação da trinca**

É o estágio em que a trinca está em crescimento, assim o fator de intensidade de tensão aumenta provocando alteração na direção de propagação em relação ao carregamento. Uma característica desse estágio é a presença de estrias na superfície do material, que são marcas deixadas na superfície devido a um mecanismo de arredondamento e reaguçamento sucessivos na ponta da trinca. Outras características observadas são: aspecto mais liso na região de propagação, as “marcas de praia” que são originadas no ponto de nucleação da trinca, resultado de paradas ou diminuição na taxa de crescimento da trinca.

- **Fratura**

Esse estágio é caracterizado pela ruptura repentina do material, uma vez que o tamanho da trinca vai crescendo até um certo ponto, onde a intensidade do fator de tensão na trinca torna-se demasiado ocasionando a falha.

A figura 2 mostra as rupturas causadas por falhas devido à fadiga.



Figura 2 - Características de falhas por fadiga – (Fonte: Norton, 2006, p. 305).

2.2.2 Carregamentos de Fadiga

O carregamento variável sobre um componente mecânico pode vir a causar a falha por fadiga. Porém o tipo de carregamento pode variar de uma aplicação para outra. Em componentes atuando sob movimento rotativo, o carregamento tende a ser consistente em amplitude ao longo do tempo e repetido com alguma frequência.

Em equipamentos de serviços (veículos de todos os tipos), os carregamentos tendem a serem completamente variáveis em amplitude e frequência ao longo do tempo e muitos podem até mesmo ser randômicos por natureza (Norton, 2006).

Para se descrever um carregamento variável geralmente se usa uma representação de função senoidal, onde o carregamento é variável ao longo do tempo, apresentando um período e uma frequência.

Assim como os carregamentos podem ser descritos por uma curva senoidal ou forma ondulada em relação ao tempo, as tensões e deformações causadas por esses carregamentos também podem ser descritas da mesma maneira, em outras palavras, as curvas senoidal da tensão em função do tempo ou deformação em função do tempo terão a mesma forma geral e frequência que a curva senoidal do carregamento em função do tempo. Os fatores significantes são a amplitude e o valor médio da curva tensão em função do tempo ou deformação em função do tempo e o número total de ciclos de tensão /deformação que a peça tem experimentado.

2.2.3 Carregamento em mecanismos rotativos.

As típicas funções de tensão em função do tempo experimentadas em mecanismos rotativos podem ser modeladas como mostradas na figura 3, a qual mostra essas funções como ondas senoidais. A figura **a** mostra um caso totalmente reverso para o qual o valor médio é zero. A figura **b** mostra um caso de tensão no qual a curva estende de zero para um valor máximo com um valor médio igual ao componente alternado, e a figura **c** mostra uma versão dos casos mais gerais (chamado tensão flutuante) com todos os valores dos componentes diferentes de zero. É importante notar que algumas partes dessas curvas podem estar sob regime de tensão compressiva. Algumas dessas curvas podem ser caracterizadas por dois parâmetros, suas componentes médias ou alternadas, seus valores máximos e mínimos, ou razões desses valores.

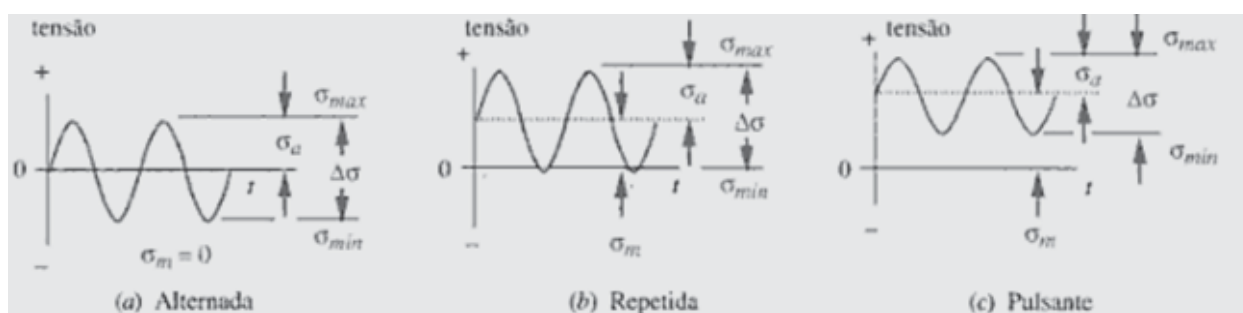


Figura 3 - Tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes - (Fonte: Norton., 2006, p. 305).

O limite de tensão é definido pela equação 2.1:

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\grave{a}x} - \sigma_{m\grave{i}n} \quad (2.1)$$

A componente alternada é encontrada da equação 2.2:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\grave{a}x} - \sigma_{m\grave{i}n}}{2} \quad (2.2)$$

E a componente média é definida pela equação 2.3:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\grave{a}x} + \sigma_{m\grave{i}n}}{2} \quad (2.3)$$

Duas razões podem ser formadas de acordo com a equação 2.4:

$$R = \frac{\sigma_{m\grave{i}n}}{\sigma_{m\grave{a}x}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.4)$$

Quando a tensão é totalmente reversa, $R = -1$ e $A = \infty$. Quando a tensão é repetida, $R = 0$ e $A = 1$. Quando as tensões máximas e mínimas têm o mesmo sinal, ambos R e A são positivos e $0 \leq R \leq 1$. Estes modelos de carregamentos podem resultar de tensões de flexão, axial, torção, ou uma combinação desses tipos de tensões (Norton, 2006).

Na utilização da curva S-N de qualquer material, o valor da amplitude de tensão (σ_a) pode ser utilizado diretamente somente se a tensão média for igual a zero. Sempre que a tensão média for diferente de zero, é necessário encontrar um valor de amplitude de tensão alternada equivalente (σ_{aeq}) para utilização na curva S-N, isto é, um valor onde a tensão média fosse igual a zero. As quatro formulações mais utilizadas para a obtenção da amplitude da tensão alternada equivalente são apresentadas pelas equações 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.

$$\text{Soderberg (EUA, 1930):} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \quad (2.5)$$

Goodman (Inglaterra, 1889):
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (2.6)$$

Gerber (Alemanha, 1874):
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^2 = 1 \quad (2.7)$$

Morrow (EUA, 1960):
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{awq}} + \frac{\sigma_m}{S_r} = 1 \quad (2.8)$$

Onde: S_y corresponde ao limite de resistência ao escoamento.

S_u Corresponde ao limite de resistência a tração.

S_r Corresponde ao limite de resistência a ruptura.

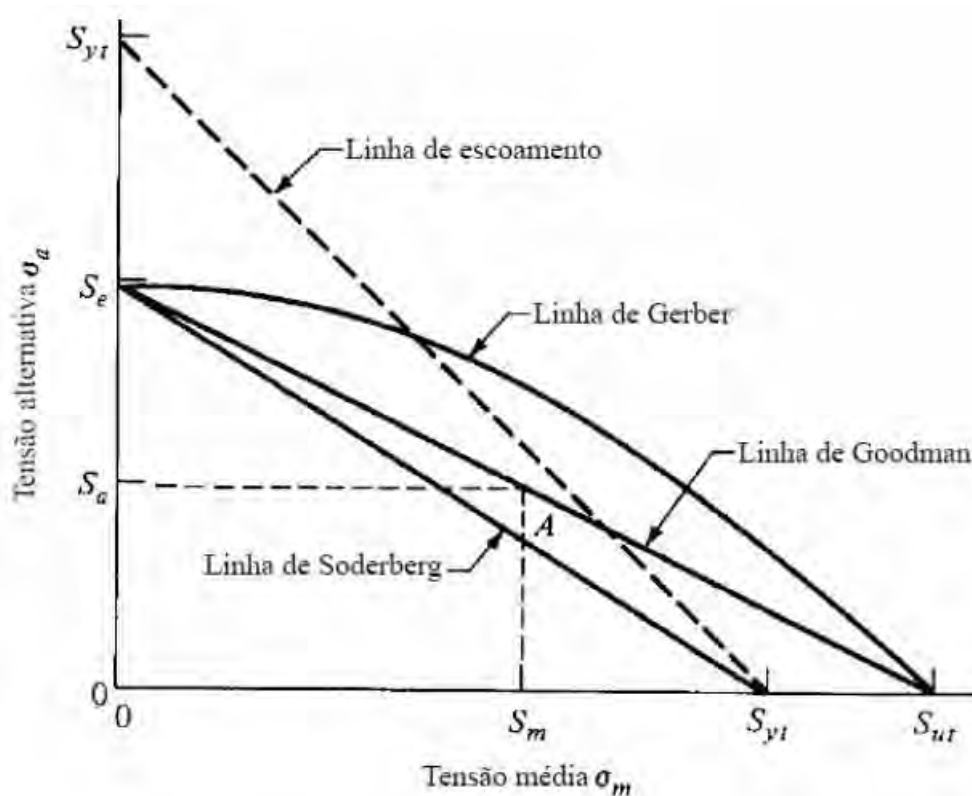


Figura 4 – Correção da tensão média – (Fonte: Santos, 2011, p.23).

Como observado na figura 4, o método de Soderberg é muito conservador, não apresentando resultados compatíveis para usos práticos, já os métodos de Goodman e Gerber apresentam resultados mais satisfatórios.

2.2.4 Teste em viga rotativa.

Dados de resistência à fadiga sob carregamento completamente reversíveis vem de testes de vigas sob rotação realizados por R. R. Moore, no qual um corpo de prova altamente polido de aproximadamente 0.3 polegadas de diâmetro é montado em uma fixação que permite um momento puramente de flexão em magnitude constante ser aplicado enquanto o corpo de prova é rotacionado a 1725 [rpm]. Isto cria uma tensão de flexão completamente reversível sobre algum ponto da circunferência do corpo de prova. Ele rotaciona em um nível de tensão particular até que falha, tendo o número de ciclos para a falha e o nível de tensão aplicado gravados. Leva aproximadamente um dia e meio para alcançar 10^6 ciclos e aproximadamente 40 dias para alcançar 10^8 ciclos em um corpo de prova. Este teste é repetido para vários corpos de prova do mesmo material carregados em diferentes níveis de tensão. Os dados coletados são então plotados como resistência a falha normalizada, $\frac{S_f}{S_{ut}}$ contra o número de ciclos, N , (tipicamente em coordenadas log-log) para obter um diagrama S-N.

2.3 Método dos Elementos Finitos

Muitos engenheiros deparam ao longo da carreira com problemas complexos em cálculos de projetos que necessitam de alto grau de acuracidade, uma vez que esses problemas só podem ter uma solução completa através de resolução de equações diferenciais parciais. A dificuldade maior é que para solucionar essas equações por meio de métodos analíticos clássicos para geometrias arbitrárias é quase impossível. Assim a utilização do método dos elementos finitos (MEF), que é uma aproximação numérica com a qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado, tornou uma valiosa solução.

O MEF pode ser aplicado a um grande número de problemas físicos, tais como análise de tensões e deformações em corpos bi e tridimensionais, placas e cascas, análise linear e não-linear, estática e dinâmica, mecânica dos sólidos, problemas relacionados a fluxo de fluidos, distribuição de temperaturas, eletromagnetismo, energia nuclear e etc. (Alves Filho, 2000).

Hoje, milhões de engenheiros em todo o mundo usam o MEF para prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico de sistemas, tanto na etapa de projeto quanto na análise de desempenho. Sua popularidade pode ser atribuída ao fato de

que mais de US\$ 1 bilhão é gasto por ano nos Estados Unidos em programas de computador sobre MEF e em tempo computacional (Fish, 2009).

O método é um pouco complexo matematicamente e é computacionalmente intensivo, requerendo a solução de grandes matrizes. Seu conceito básico consiste na discretização de um sistema contínuo em partes separadas distintas, conectadas entre si por pontos discretos. A solução aproximada simula a estrutura como uma montagem de elementos com um comprimento finito. Dessa forma a estrutura é dividida em um número finito de partes ou elementos “simples” que descrevem o comportamento do sistema. Os pontos onde existe a conexão dos elementos são chamados de nós do modelo. O número de pontos discretos escolhidos e de elementos deve ser tal que possam descrever o comportamento da estrutura dentro da acuracidade desejada (Alves Filho, 2000).

2.3.1 Modelagem Matemática

A figura 5 mostra um diagrama de corpo livre de um modelo de elemento finito estrutural mais simples possível, uma mola linear em uma dimensão. Possui uma rigidez característica (constante elástica) $k_h = \frac{f}{\Delta u}$, então o deslocamento cria uma força nodal. Assumem-se como positivos deslocamentos u_i e u_j e somatória de forças em cada nó, equação 2.9.

$$\begin{aligned} f_{ih} &= k_h u_i - k_h u_j \\ f_{jh} &= -k_h u_i + k_h u_j \end{aligned} \quad (2.9)$$

Coloca este sistema na forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{ih} \\ f_{jh} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

A equação 2.11 mostra os sistemas escritos em notação matricial.

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (2.11)$$

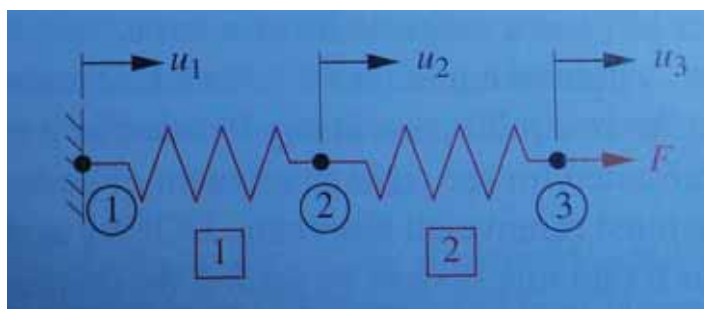


Figura 5 - Diagrama de corpo livre – (Fonte: Norton., 2006, p. 907).

Onde k é a matriz rigidez, d é o vetor deslocamento nodal do elemento, e f é o vetor de forças internas do elemento.

2.3.2 Tipos de Elementos

Os elementos podem ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional, que também são chamados de linhas, superfícies e volumes respectivamente. Eles também podem ser de diferentes ordens, onde este termo refere à ordem da função (geralmente um polinômio) que define a distribuição de deslocamento através do elemento. Em análise computacional é preferível usar elementos unidimensionais, pois elementos de maior dimensão necessitam mais tempo de processamento computacional.

Os nós dos elementos apresentam graus de liberdades que permitem os elementos suportarem os carregamentos, momentos e torques, o que diferencia em grande parte os elementos quanto ao tipo de análise. Assim, elemento unidimensional ou 1-D apresentam 2 graus de liberdade total, um em cada nó, ou seja, apenas transmite força ao longo do seu comprimento (unidirecional) e não suportam momento. Elementos 2-D têm 3 graus de liberdade por nó e podem suportar momentos nos seus nós assim como forças lineares em duas direções. Elemento 3-D tem 6 graus de liberdade por nó que podem suportar momentos e torques em cada nó em adição a forças lineares em três direções.

2.3.3 Malha de Elementos Finitos

A malha representa o conjunto de elementos unidos através de seus nós discretizando o modelo, a qual pode ser desenvolvida manualmente ou por processos automáticos. Em alguns casos é necessário utilizar malhas manuais que possibilitam maior acuracidade dos resultados, porem necessita maior habilidade do projetista e maior tempo.

A densidade de malha no modelo influencia no tempo de processamento e convergência dos resultados, podendo-se assim utilizar elementos maiores onde o gradiente de tensão não é crítico no modelo e elementos menores ou refinamento da malha onde se encontra alto gradiente de tensão como regiões de concentração de tensão em locais de aplicação das condições de contorno, aplicação da carga e cantos.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Com o objetivo de estudar o comportamento de eixos de transmissão em condições de trabalhos são desenvolvidos dois estudos de casos.

O primeiro estudo de caso consiste na análise de tensão de flexão em um eixo de transmissão sob uma condição de trabalho suportando uma carga de 40[kgf] e o segundo estudo de caso consiste na análise da vida em fadiga de um eixo de transmissão sob condição de flexão rotativa suportando uma carga de 8 [kgf].

A análise estrutural através do software comercial *ANSYS Workbench* Consiste em três fases: Pré-processamento, processamento e pós-processamento. A figura 6 apresenta o fluxograma para análise estrutural.

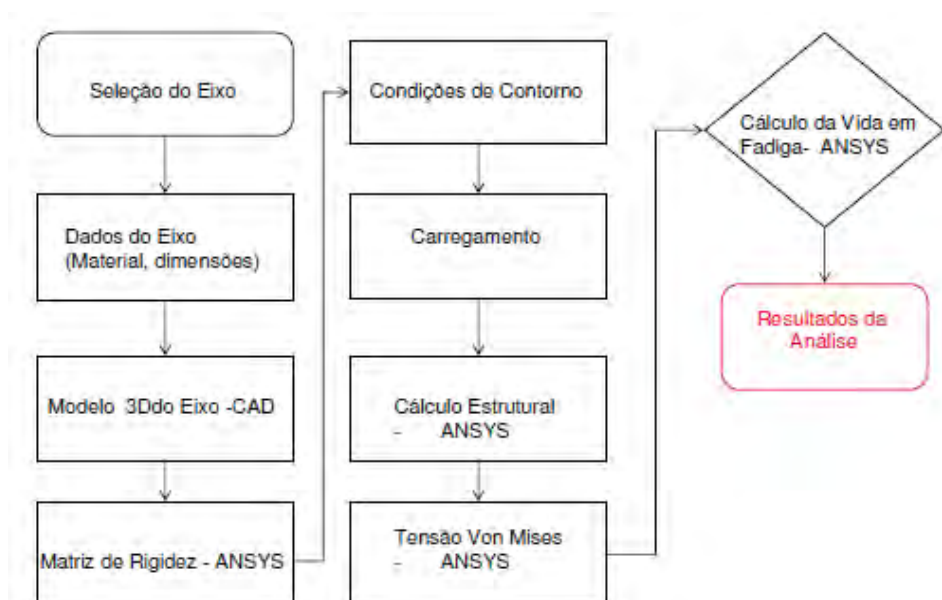


Figura 6 - Fluxograma para análise estrutural.

3.1 1º Estudo de caso – Análise de tensão flexão:

A análise no *ANSYS* inicia com a discretização do eixo desenvolvendo no sistema de CAD do software um modelo com dimensões reais como é mostrado na figura 7.

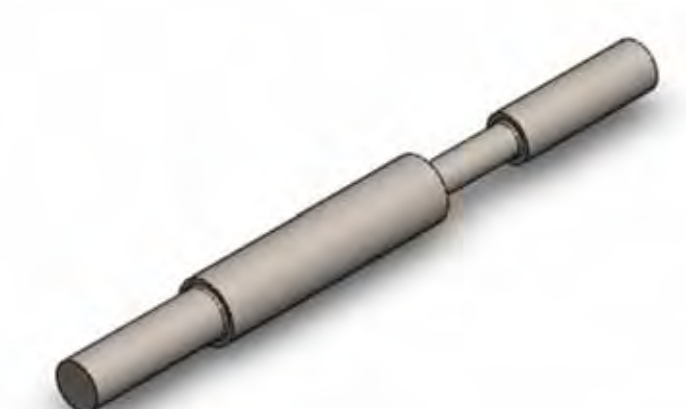


Figura 7 - Modelo de eixo de transmissão – *ANSYS Workbench*

A figura 8 apresenta as dimensões do modelo.

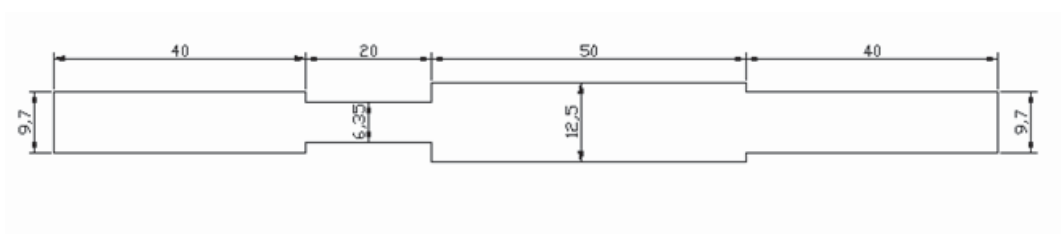


Figura 8 - Configuração do eixo de transmissão para o 1º estudo de caso.

3.1.1 Propriedades mecânicas do material

O material utilizado neste trabalho é o aço ABNT 1045 temperado que apresenta as seguintes propriedades mecânicas cujas serão inseridas no *ANSYS*:

Módulo de elasticidade: 200 [GPa]

Coeficiente de Poisson: 0.3

3.1.2 Pré-processamento

Com o modelo definido, parte-se para o desenvolvimento da malha de elementos finitos. É utilizado nesta fase elementos tetraédricos com 10 nós, tendo cada um 3 graus de liberdade (translação nas direções X, Y e Z), apresentando plasticidade, tensão de enrijecimento, grande deflexão e alta capacidade de deformação. O elemento tetraédrico é mostrado na figura 9.

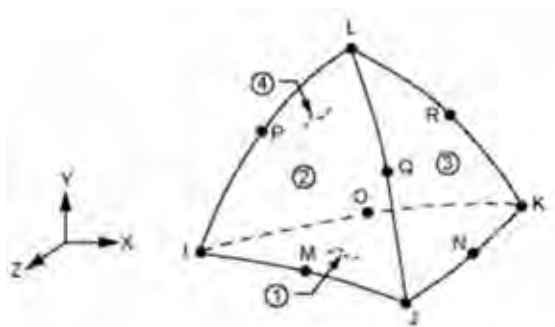


Figura 9 - Elemento tetraédrico com 10 nós – (Fonte ANSYS 12.0).

Os modelos com malhas de elementos finitos são mostrados nas figuras 10 e 11.

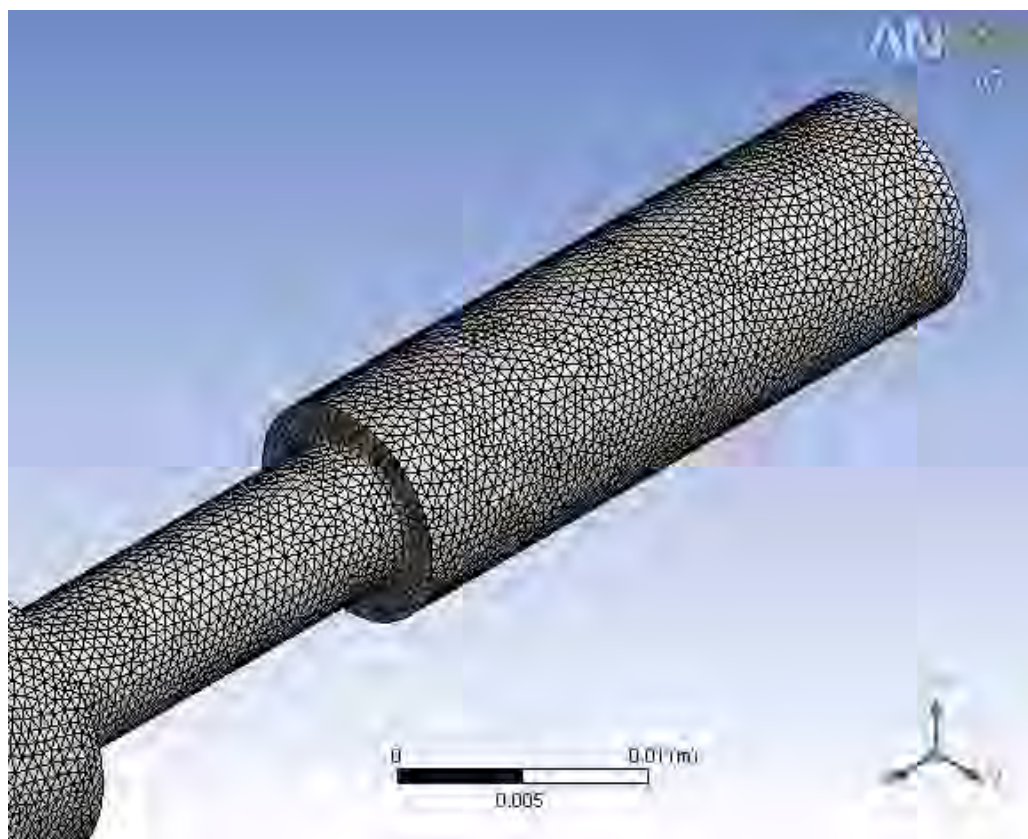


Figura 10 -Modelo de elementos finitos.

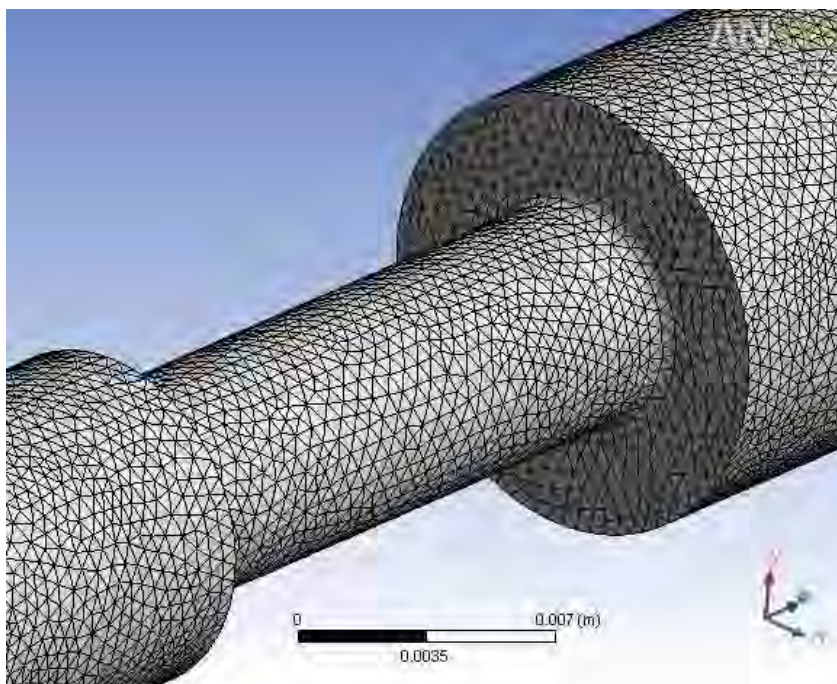


Figura 11 - Modelo de elementos finitos – Região de entalhe.

A tabela 1 apresenta os números de nós e elementos utilizados no modelo de elementos finitos para análise de tensão de flexão.

Tabela 1 - Dados do modelo de elementos finitos

Dados	Número
Elementos	29.367
Nós	44.011

3.1.3 Processamento

Após o desenvolvimento da malha de elementos finitos, definem-se as condições de contorno e carregamento aplicado de acordo com a configuração de trabalho do eixo de transmissão mostrada na figura 12.

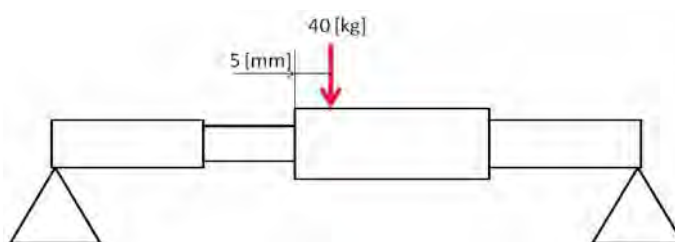


Figura 12 - Configuração da condição de trabalho do eixo de transmissão.

Considerando o eixo de transmissão trabalhando sob rotação e apoiado sobre mancais de rolamentos, as condições de contorno utilizadas para representar os apoios são travamento das extremidades nas direções X, Y e Z, evitando dessa forma o deslocamento do eixo em qualquer direção, assim como acontece nos mancais de rolamento, e uma carga de 40 [kgf] sobre o eixo representado por um carregamento na direção Y com sentido para baixo, como mostrado na figura 13.

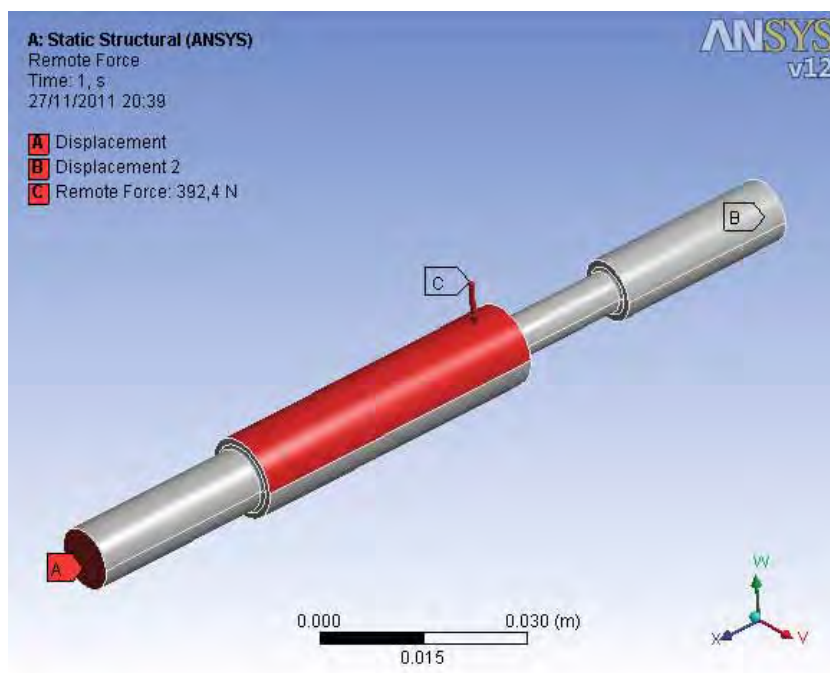


Figura 13 - Carregamento e condições de contorno.

3.2 2º Estudo de caso - Análise de fadiga:

Para o desenvolvimento da análise de fadiga no software de elementos finitos *ANSYS Workbench*, foi necessário uma representação fiel do modelo e sua maneira de acoplamento na máquina *R. R. Moore*, sendo, portanto, modelado além do eixo os suportes e a bucha onde serão acoplados o eixo e aplicadas as cargas. O modelo para o desenvolvimento da análise de fadiga é mostrada na figura 14.

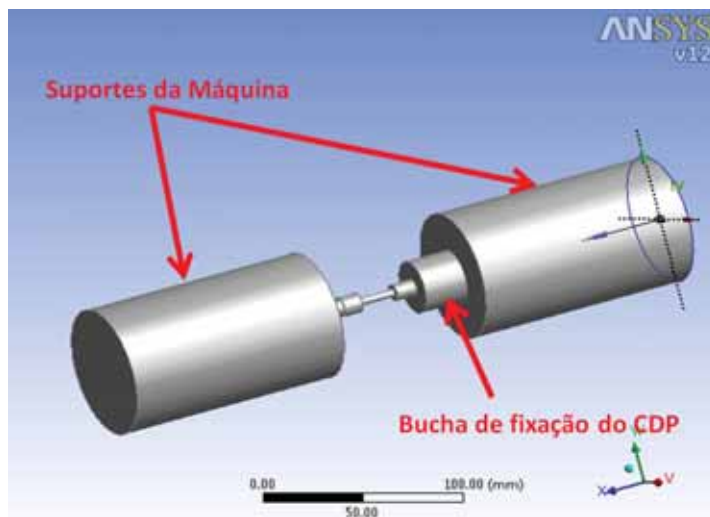


Figura 14 - Configuração do eixo de transmissão para análise de fadiga.

As dimensões do eixo de transmissão para análise de fadiga são mostradas na figura 15.

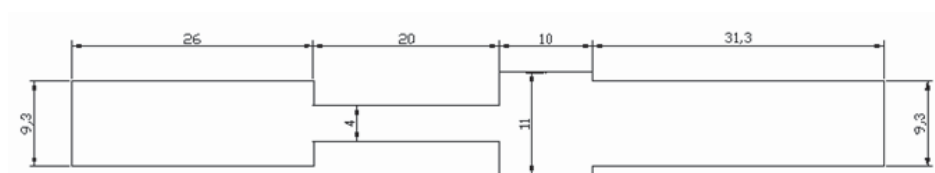


Figura 15 - Configuração do eixo de transmissão para o 2º estudo de caso.

As figuras 16 e 17 mostram o modelo com malha de elementos finitos.

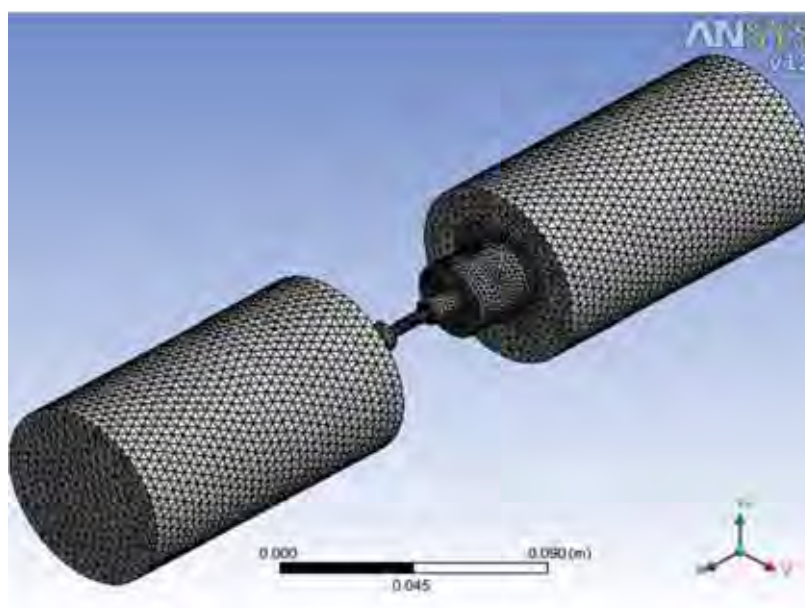


Figura 16 - Modelo com malha de elementos finitos.

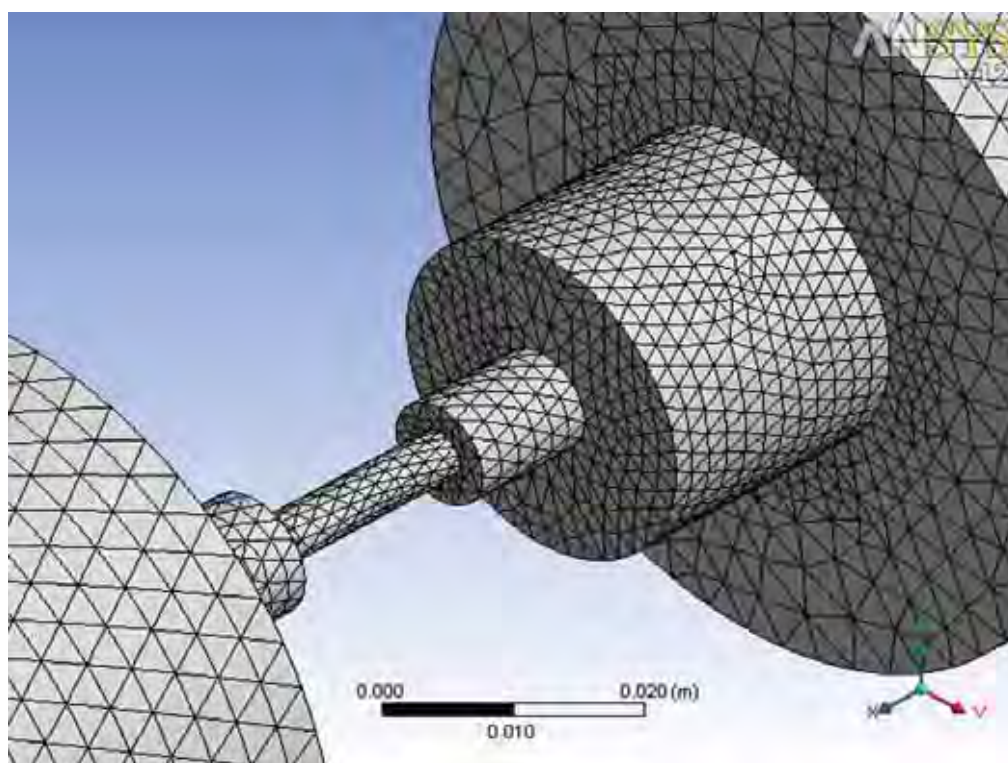


Figura 17 - Modelo com malha de elementos finitos – Região com refinamento.

Os números de nós e elementos utilizados neste modelo são listados na tabela 2.

Tabela 2 - Dados do modelo de elementos finitos – Análise de fadiga.

Dados	Número
Elementos	151.740
Nós	215.631

A forma de carregamento e condições de contorno aplicadas é mostrada na figura 18. Para as condições de contorno, considerou-se as faces das extremidades do suporte da máquina fixas com movimento de rotação no eixo V livre de acordo com o funcionamento da máquina *R. R. Moore*.

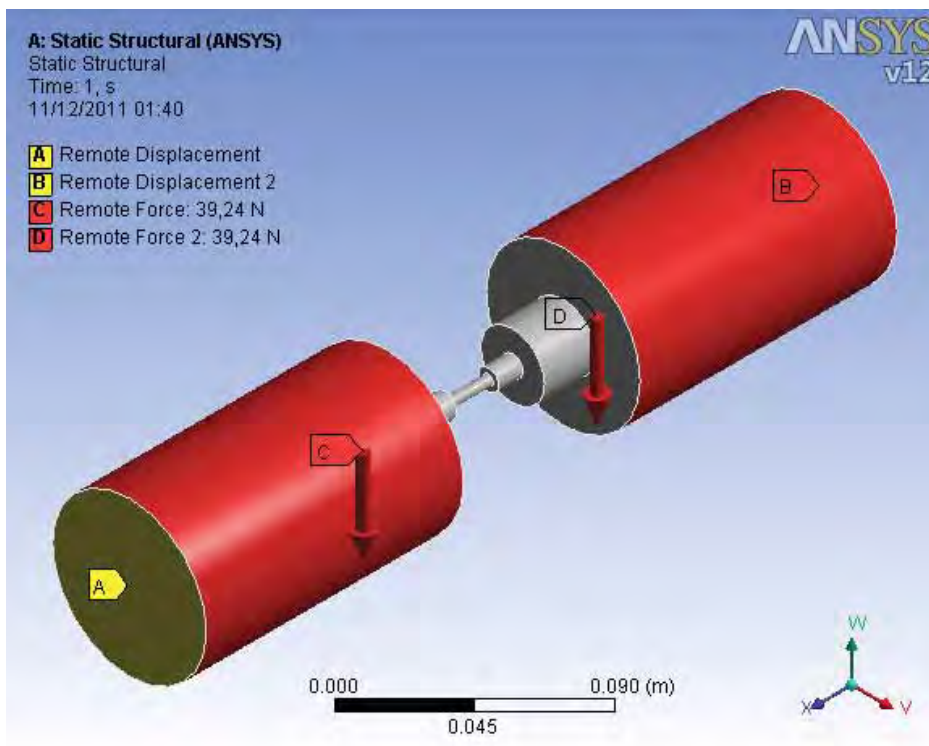


Figura 18 - Carregamento e condições de contorno aplicadas.

Para o desenvolvimento da análise de fadiga no ANSYS, é necessário inserir a curva S-N do aço ABNT 1045

Os dados de resistência à fadiga do aço ABNT 1045 temperado são obtidos da referência (Baxter and Wang, 1991) e são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Dados de fadiga do aço ABNT 1045 temperado.

Número de ciclos	Tensão σ [MPa]
6.000	740
20.000	680
100.000	640
400.000	620
1.000.000	607
2.100.000	600
10.000.000	600

Como dados de alimentação do software, entra-se com a curva S-N do material (figura 19) e com o fator de concentração de tensão (k_t) que é obtido através dos fatores modificadores de resistência à fadiga.

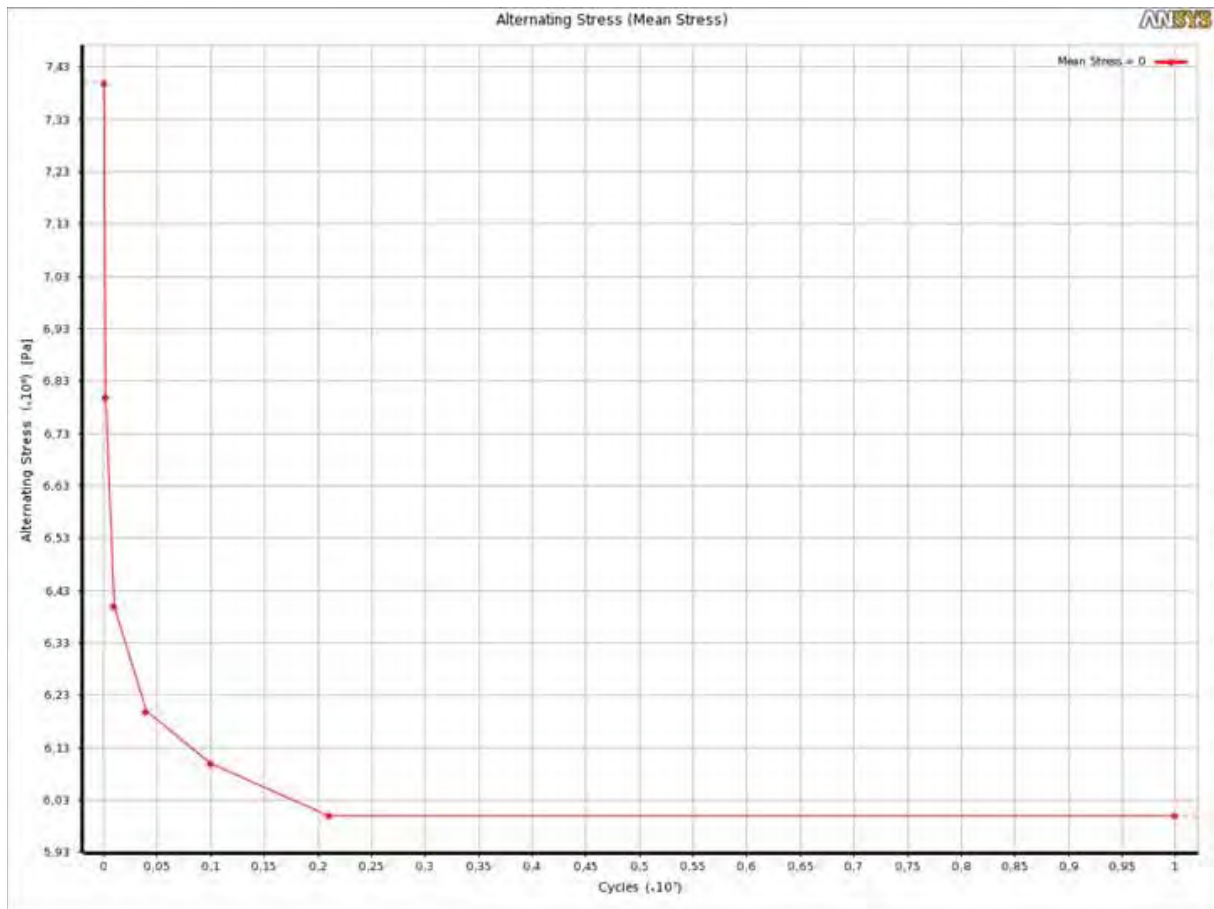


Figura 19 - Curva S-N do aço ABNT 1045 – (Fonte: Baxter and Wang, 1991, p. 1679).

O limite de resistência à fadiga S_n de um elemento de máquina pode ser consideravelmente menor do que o limite de fadiga S'_n de um corpo de prova do teste de flexão rotativa (Shigley). Essa diferença se dá pelos fatores de correção, sendo que, cada um corresponde por um efeito separado.

Podendo corrigir a tensão pela equação 3.1

$$S_n = k_a k_b k_c k_d k_e S'_n \quad (3.1)$$

Onde:

S_n : Limite de resistência à fadiga da peça

S'_n : Limite de resistência à fadiga do corpo de prova do teste de flexão rotativa

k_a : Fator de superfície

k_b : Fator de tamanho

k_c : Fator de confiabilidade

k_d : Fator de temperatura

Para este estudo são considerados os seguintes fatores de correção de tensão:

$k_a = 0,75$ Eixo usinado e limite de ruptura a tração 0,96 [GPa], figura 20.

$k_b = 1$ Diâmetro da região de análise do eixo menor que 7,6 (mm)

$k_c = 1$ Considerando-se confiabilidade de 50%, figura 21.

$k_d = 1$ Temperatura menor que 71° [C]

Assim temos o fator concentrador de tensões:

$$k_t = 0,75 \times 1 \times 1 \times 1 \quad \rightarrow \quad k_t = 0,75$$

Esse é o fator de concentração de tensão entrado no *ANSYS WorkBench*, assim como é definido o critério de *Goodman* (eq. 2.6) para se trabalhar, uma vez que esse critério apresenta resultados satisfatórios o qual considera a influência das tensões alternadas e média.

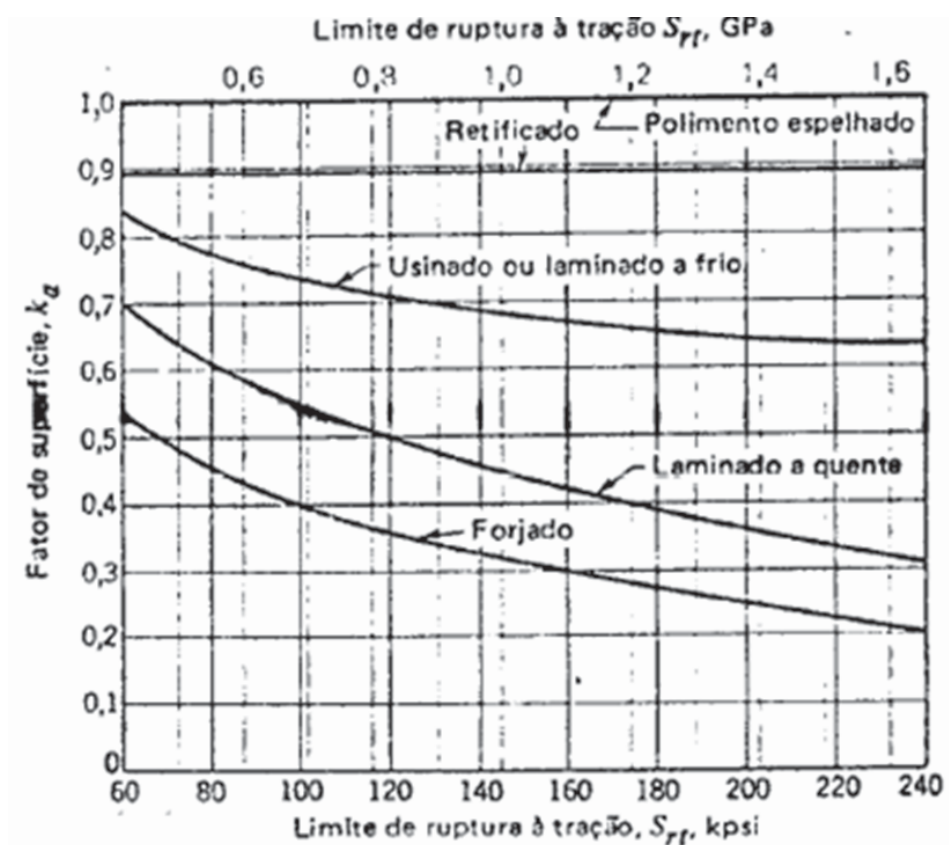


Figura 20 – Fator de superfície. (Fonte: Shigley, 1984, p. 176).

<i>Confiabilidade (R)</i>	<i>Varíavel Padronizada (z_R)</i>	<i>Fator de Confiabilidade (k_c)</i>
0,50	0	1,000
0,90	1,288	0,897
0,95	1,645	0,868
0,99	2,326	0,814
0,999	3,091	0,753
0,999 9	3,719	0,702
0,999 99	4,265	0,659
0,999 999	4,753	0,620
0,999 999 9	5,199	0,584
0,999 999 99	5,612	0,551
0,999 999 999	5,997	0,520

Figura 21 - Fator de confiabilidade. (Fonte: Shigley, 1984, p. 179).

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Com o objetivo de validar os resultados obtidos através das análises computacionais dos ensaios de flexão e fadiga dos eixos de transmissão estudados, são usinados os corpos de prova para os ensaios de cada estudo de caso.

Antes de realizar os ensaios de fadiga e flexão são verificadas as propriedades mecânicas do aço ABNT 1045 através de ensaios de tração e dureza.

A figura 22 mostra o fluxograma para análise experimental com a finalidade de obtenção da tensão de flexão e a vida em fadiga.

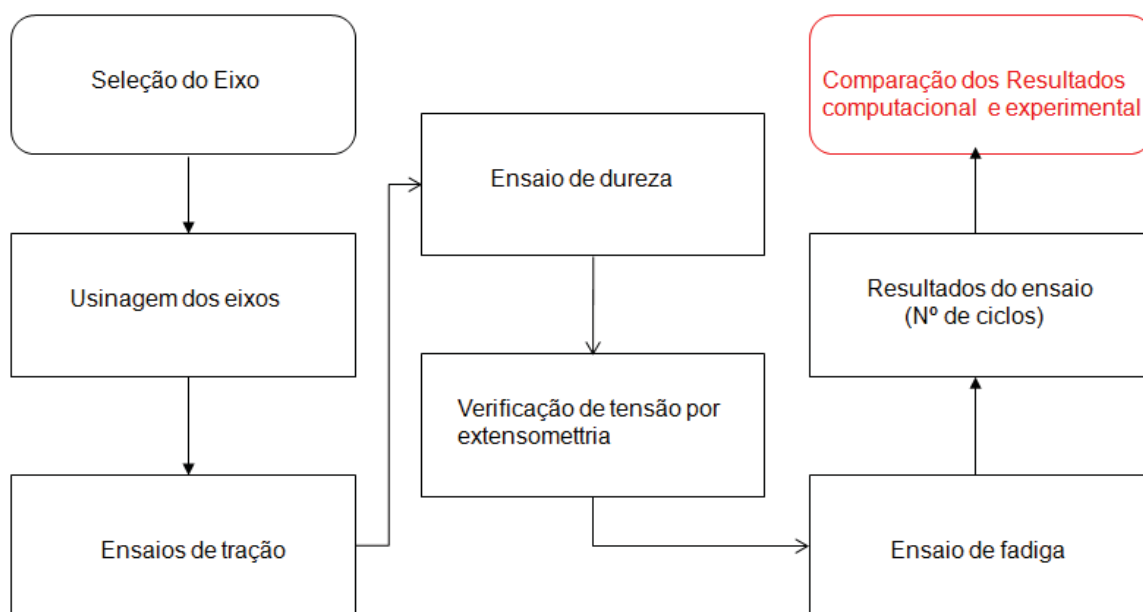


Figura 22 - Fluxograma para análise experimental.

4.1 Usinagem do eixo de transmissão:

A usinagem dos eixos de transmissão foi realizada na oficina do Departamento de Engenharia de Materiais DMT/FEG/UNESP.

Foi desenvolvido um programa (CNC) para inserir na máquina ferramenta, realizando-se a primeira fase da usinagem, dando a forma do eixo sem entalhe. A usinagem do entalhe foi realizada no torno mecânico localizado na mesma oficina.

É mostrado na figura 23 mostra o processo da usinagem dos eixos para a realização dos ensaios.



Figura 23 - Processo de usinagem dos eixos de transmissão.

4.2 Ensaio de tração:

Com a finalidade de verificar as propriedades mecânicas do aço ABNT 1045, é realizado o ensaio de tração em 3 corpos de provas padronizados de acordo com a norma ASTM E8, obtendo-se assim o limite de escoamento do material σ_{esc} , a tensão de ruptura σ_{rup} e o módulo de elasticidade E . A figura 234 mostra o dimensionamento padrão dos corpos de prova usados no ensaio de tração.

O ensaio de tração é realizado no Laboratório de Fadiga dos Materiais – (DMT/FEG/UNESP) utilizando o equipamento para ensaio de tração *Instron*.

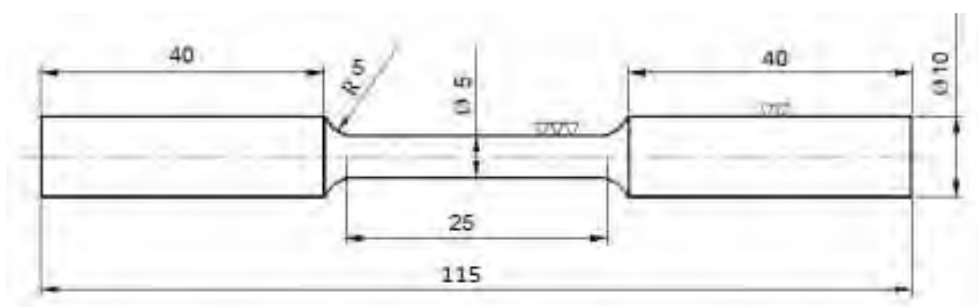


Figura 24 - Corpo de prova para ensaio de tração – ASTM E8.

O ensaio de tração é realizado com controle de deslocamento à taxa de 2mm/min até que ocorra a fratura do corpo de prova. A figura 25 mostra o equipamento para ensaio de tração, máquina com funcionamento através de sistema hidráulico *Instron 2801*.

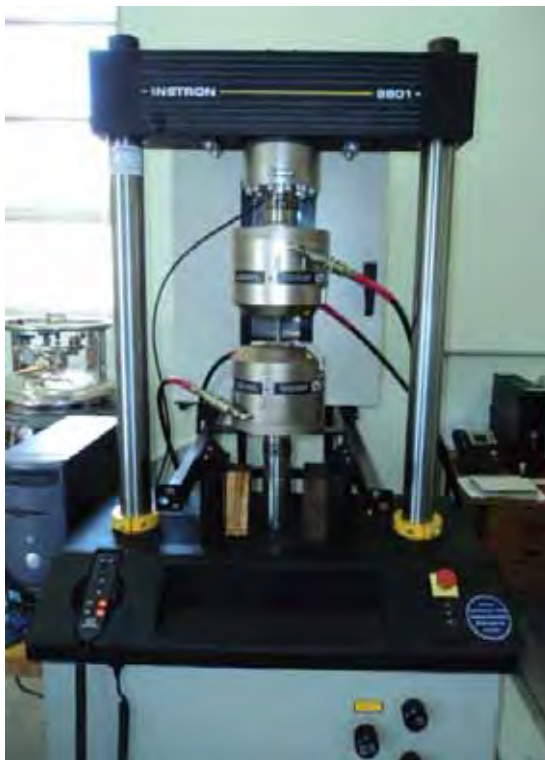


Figura 25 - Equipamento utilizado no ensaio de tração.

A figura 26 mostra um corpo de prova sendo ensaio. É notável o início de estrição.

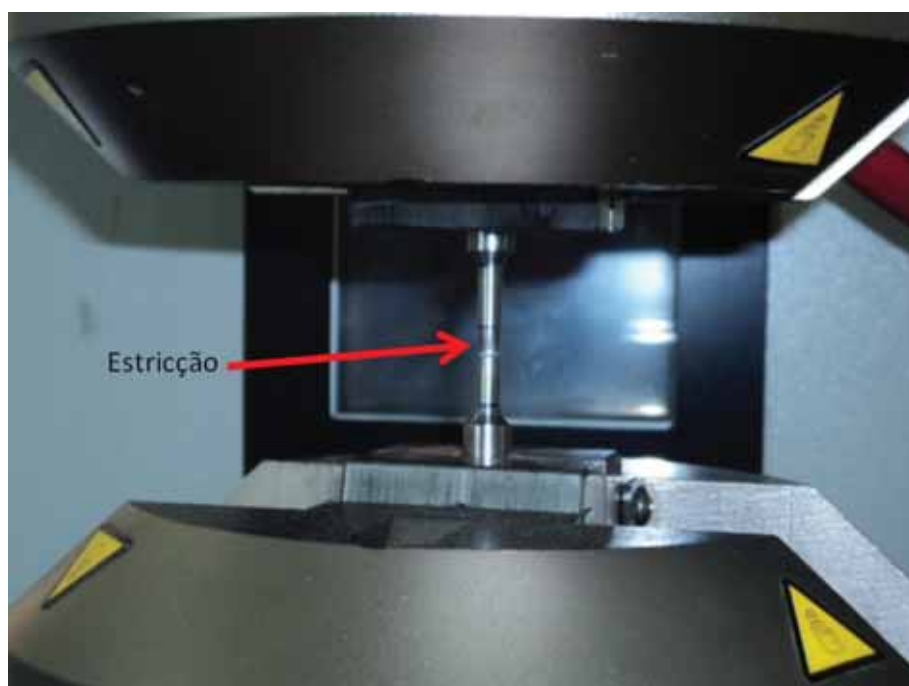


Figura 26 - Início da estrição no ensaio de fadiga.

O ensaio de tração forneceu resultados de deformação do material em função das cargas aplicadas como são mostrados no ANEXO A.

4.3 Ensaio de dureza:

Para se determinar a dureza do material estudado, a fim de obter um conjunto amplo das propriedades mecânicas, foi realizado o ensaio de dureza *Rockwell*.

O ensaio é realizado da seguinte maneira:

A carga é aplicada em etapas. Aplicando-se primeiro uma pré-carga para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado e depois se aplica a carga do ensaio.

A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio de acordo com uma escala predeterminada, adequada a faixa de dureza do material.

O ensaio de dureza *Rockwell* é realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos no DMT/FEG/UNESP.

Tipo de penetrador:

Para o ensaio é utilizado penetrador do tipo cônico (cone de diamante com 120 graus de conicidade), mostrado na figura 27.

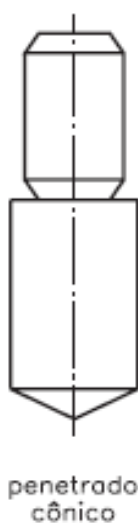


Figura 27 - Penetrador cônico.

Equipamento utilizado:

O ensaio de dureza é realizado na máquina *Rockwell* normal (figura 28) que avalia a dureza em geral. Essa máquina possui cada divisão da escala equivalente a 0,02 mm. A divisão de escala é determinada em função do tipo de penetrador e do valor da carga maior.

Para a determinação da dureza *Rockwell* são utilizadas uma pré-carga de 10 kgf, uma carga maior de 60 kgf para verificar o grau de ductilidade do aço correspondente a escala A sendo que acima de 60 HRA é caracterizado aço de alta resistência e, em seguida, aplica-se uma carga maior de 150 kgf para determinar a dureza *Rockwell* na escala C. Neste ensaio são realizadas 5 medidas em pontos diferentes na face plana do corpo de prova.



Figura 28 - Máquina de ensaio de dureza *Rockwell*.

4.4 Ensaio de flexão:

Com a finalidade de validar os resultados de tensões obtidos através da simulação computacional utilizando o software comercial *ANSYS Workbench* é realizado ensaio de flexão, simulando uma condição de trabalho no eixo de transmissão o qual utiliza extensômetros para verificar a deformação na região do entalhe do eixo e assim determinar a tensão.

O corpo de prova utilizado para realizar o ensaio de flexão é mostrado na figura 29.



Figura 29 - Corpo de prova para o ensaio de flexão.

O ensaio é realizado no Laboratório de Vibrações Mecânicas do DME/FEG/UNESP. Configuração do dispositivo para o ensaio de flexão (figura 30).



Figura 30 - Configuração para o ensaio de flexão.

São utilizados 2 extensômetros da marca *KYOWA* com fator de *GAUGE* 2.09, comprimento 3 [mm] e resistência elétrica $119 \pm 0,2 \, \Omega$. Os extensômetros são colados na região de entalhe do eixo com cola especial e resina a fim de determinar as tensões devido a compressão e tração, estão dispostos de acordo com a figura 31.

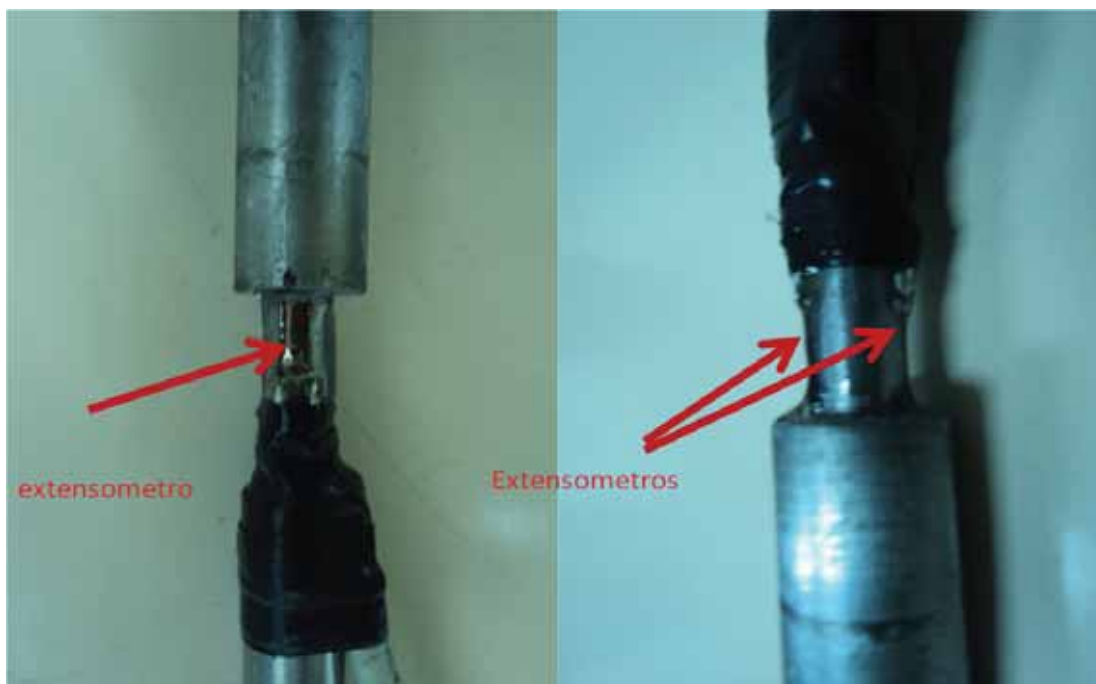


Figura 31 - Disposição dos extensômetros na região de entalhe do eixo.

O princípio de funcionamento dos extensômetros baseia-se na variação da resistência ôhmica quando submetidos a uma deformação. Os extensômetros são ligados num circuito de ponte de *Weatstone*, como mostrada na figura 32, sendo utilizada a configuração de meia ponte onde os extensômetros podem ocupar os lugares dos resistores R_1 e R_4 ou R_2 e R_3 . Os quatros resistores estão ligados de modo a formar os lados de um circuito onde é aplicada uma tensão V em dois vértices opostos (A e C) gerando uma corrente I no circuito. Nos outros dois vértices B e D é instalado um galvanômetro que acusa a passagem da corrente.

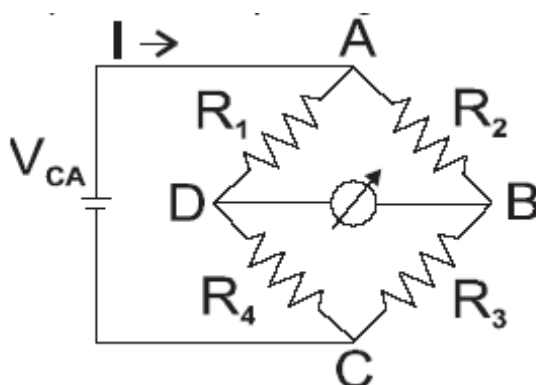


Figura 32- Ponte de *Weatstone*.

Para as medidas de deformação é utilizado um carregamento de 40 [kg] sobre o eixo que está bi-apoiado nas extremidades de acordo com a figura 33. A força age sobre o eixo e

sua deformação é transmitida aos extensômetros que, por sua vez, medem a sua intensidade.



Figura 33 - Aplicação de carregamento para ensaio de flexão

Para aquisição dos dados fornecidos pelo ensaio foram utilizados um computador e o equipamento HBM *Spider 8* (figura 34). Este equipamento eletrônico é utilizado para medir sinais elétricos e variáveis mecânicas como resistência, força, pressão, aceleração, temperatura e deslocamento linear. Os dados obtidos são armazenados em bancos de dados de um computador. Para fazer a comunicação, a aquisição e o tratamento dos dados do HBM *Spider 8* é utilizado o *software CATMAN*, nele os dados adquiridos são visualizados e analisados em tempo real e também estabelecidos as configurações dos projetos ou ensaios.



Figura 34 - Equipamentos de aquisição de dados.

4.5 Ensaio de fadiga:

Com a finalidade de verificar o número de ciclos que o eixo de transmissão suporta para uma determinada condição de trabalho, realiza-se no Laboratório I de Fadiga no DMT / FEG / UNESP o ensaio de fadiga por flexão rotativa de 2 corpos de provas. A figura 35 mostra o corpo de prova para a realização do ensaio.



Figura 35 - Corpo de prova para ensaio de fadiga.

O equipamento usado é a máquina de flexão rotativa *Instron R.R. MOORE*, mostrada na figura 36.



Figura 36 - *Instron R. R. Moore* para ensaio de fadiga por flexão rotativa – (Fonte: *Instron*).

A tabela 4 mostra as especificações da máquina *Instron R. R. Moore*.

Tabela 4 - *Instron R. R. Moore* – (Fonte: *Instron*).

Máquina R.R.Moore INSTRON	
<i>Capacidade de momento fletor (Kg.m)</i>	0.25-2.3
<i>Incrementos de capacidade (Kg.m)</i>	0.00254
<i>Velocidade de rotação (rpm)</i>	500- 10.000
<i>Conjunto de pesos para carga (Kg)</i>	(7) 5, (2) 2, (1) 1, (1) 0.5, (1) 0.2, (2) 0.1, (2) 0.05
<i>Peso mínimo efetivo (Kg)</i>	5
<i>Peso da máquina (Kg)</i>	41
<i>Dimensões totais (mm)</i>	990 × 330 × 510
<i>Alimentação de energia</i>	100 – 120 V 50/60 Hz

O ensaio consiste em acoplar pelas extremidades o corpo de prova nos suportes da máquina (figura 37).

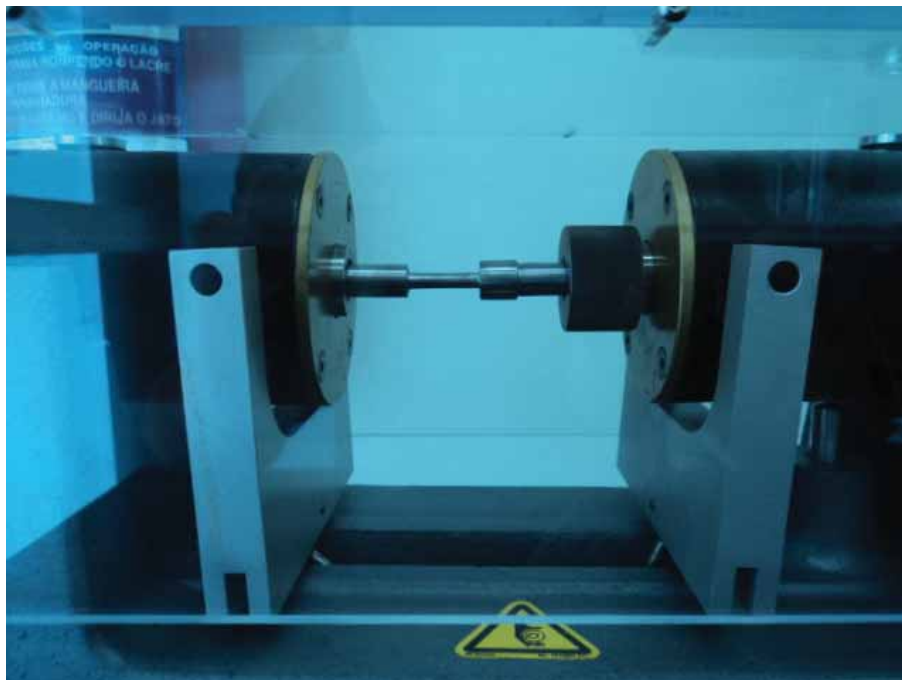


Figura 37 - Acoplamento do corpo de prova na máquina Instron R. R. Moore.

As cargas são aplicadas em formas de discos num total de 8 [kgf]. Essas cargas são distribuídas de forma simétricas através dos acoplamentos nos suportes de acordo com a figura 38.

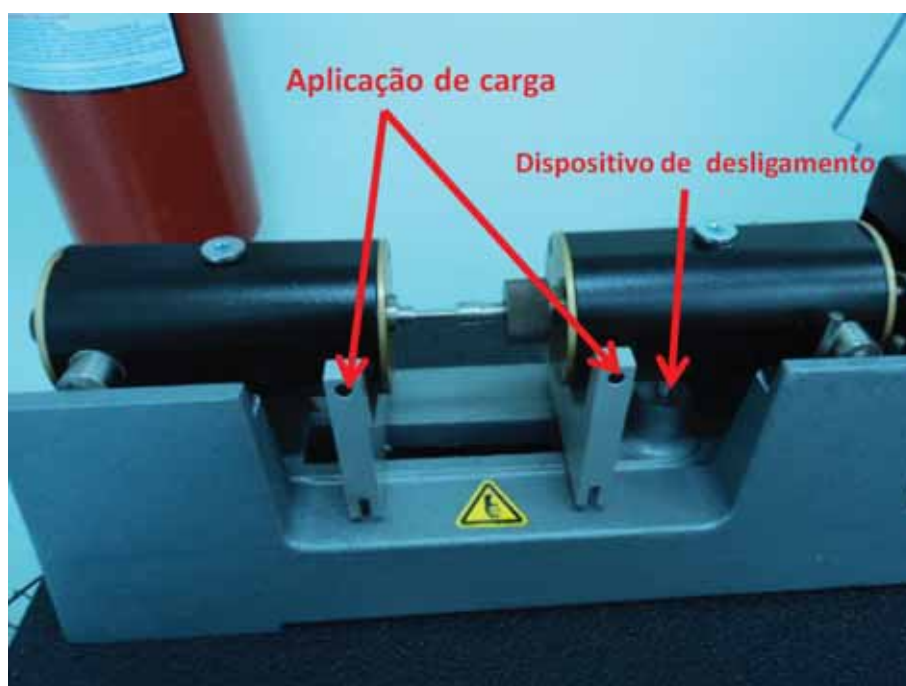


Figura 38 - Sistema de aplicação da carga.

Após alocar o corpo de prova na máquina, é estabelecida uma frequência de tal modo que a máquina não trabalhe em alta vibração. Para esse trabalho foi utilizada a frequência de 6 [Hz], devido a limitações de vibração da máquina, desenvolvendo uma rotação de 360 [rpm].

A máquina possui uma conta giros digital que contabiliza o número de ciclos que o corpo de prova desenvolve, parando somente quando este se rompe, acionando um dispositivo localizado abaixo do suporte cuja função é desligar a máquina.

5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da análise de tensão para o primeiro estudo de caso de eixo de transmissão, resultado de fadiga para o segundo estudo de caso de eixo de transmissão e os resultados dos ensaios mecânicos de tração, dureza, tensão utilizando extensômetros e fadiga.

5.1 Resultado das análises pelo método dos elementos finitos.

Neste tópico são apresentados os resultados fornecidos pelo *ANSYS Workbench* de tensões e deformações para o 1º estudo de caso de eixo de transmissão, assim como o resultado do número de ciclos que o eixo de transmissão suporta no segundo estudo de caso.

5.1.1 Resultado do 1º estudo de caso (Análise de tensão)

Os resultados das tensões no eixo de transmissão obtidos através do software *ANSYS Workbench* estão de acordo com o esperado apresentando as maiores tensões e deformações na região de menor diâmetro (figuras 39, 40 e 41). São plotados os valores de tensões *Von-Mises* obtendo-se valor máximo de tensão igual 235,29 [MPa] e valor máximo de deformação igual a 11,204e-4 [m/m].

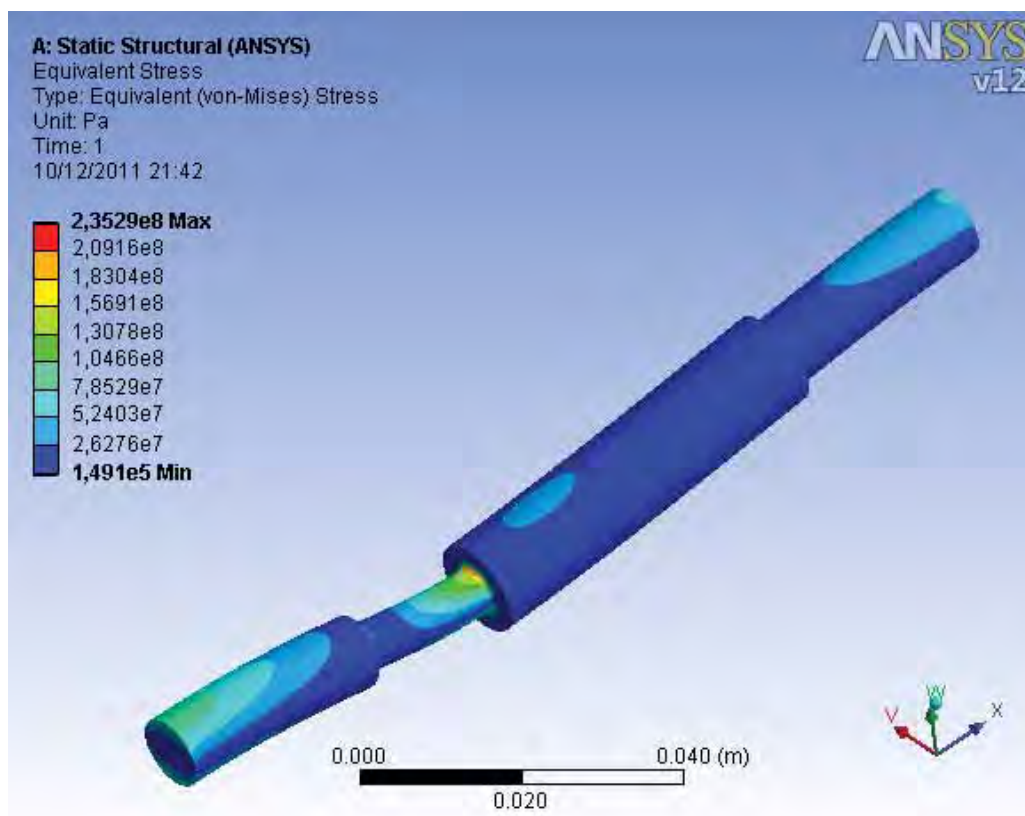


Figura 39 - Distribuição de tensão *Von-Mises*.

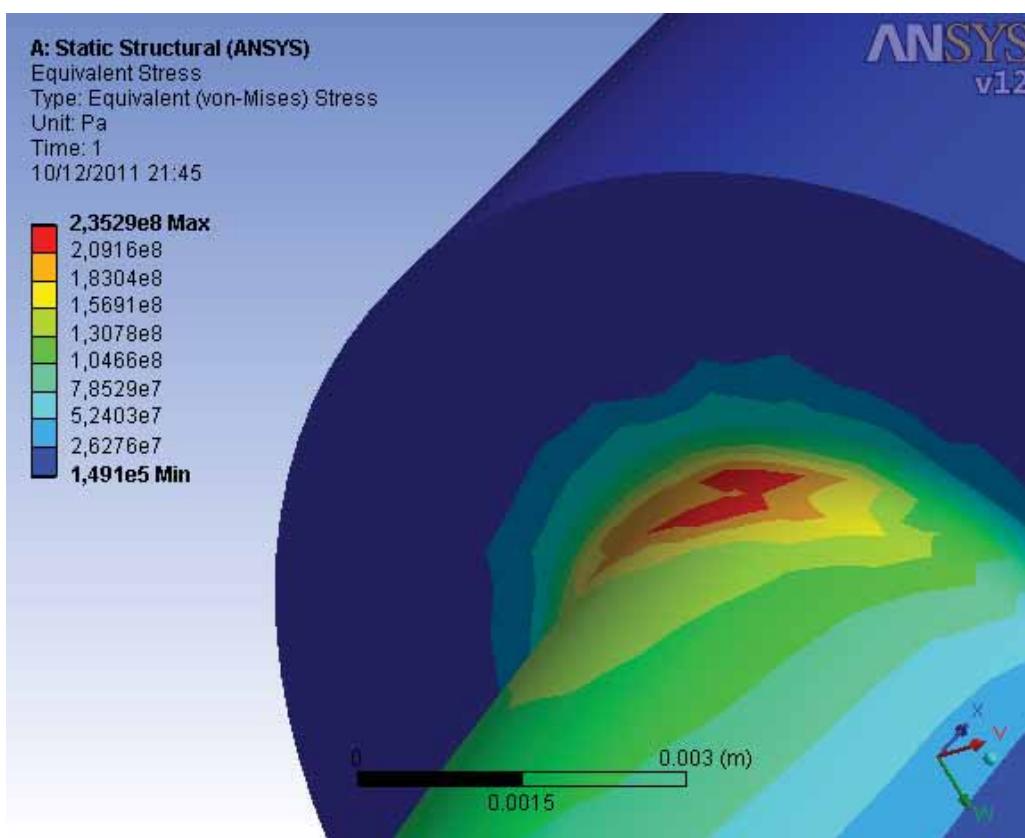


Figura 40 - Máxima tensão *Von-Mises* no eixo.

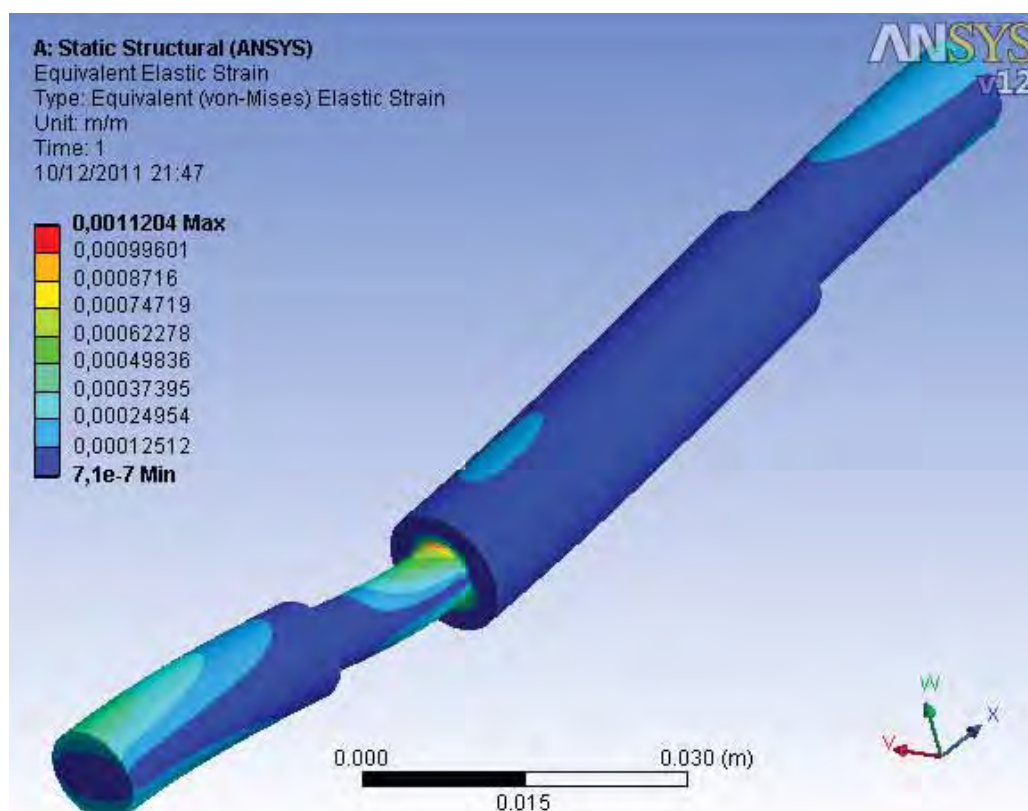


Figura 41 - Máxima deformação no eixo.

As reações nos apoios fornecidas são mostradas na tabela 5.

Tabela 5 - Reações nos apoios.

Apoio direito *	138,12 [N]
Apoio esquerdo*	254,28 [N]

- As posições dos apoios estão de acordo com a configuração de aplicação de carga da figura 11.

5.1.2 Resultado do 2º estudo de caso (Análise de fadiga)

Para a obtenção dos resultados da análise de fadiga, primeiramente é desenvolvida a análise estática obtendo-se a máxima tensão, a qual provoca a falha no componente. A figura 42 mostra as tensões *Von-Mises* encontradas na análise pela análise estática. Observa-se que a máxima tensão *Von-Mises* encontrada é de 506,16 [MPa] que se encontra abaixo da tensão de escoamento do material ($\sigma_{esc} = 790$ [MPa]).

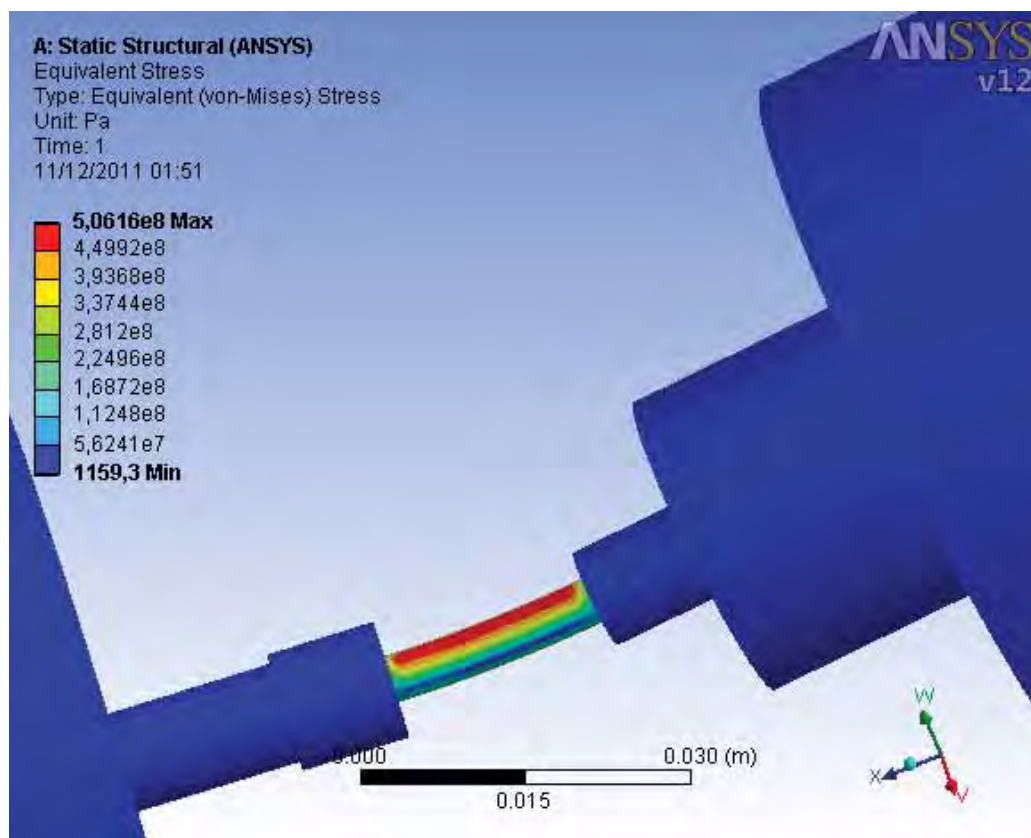


Figura 42 - Tensões *Von-Mises*.

Após obter o resultado de tensão, é utilizado o módulo de fadiga do *ANSYS Workbench* para obtenção do número de ciclos suportados pelo eixo de transmissão na condição de trabalho determinada. Faz-se uso do critério de *Goodman* para correção da tensão média. O resultado do número de ciclos pode ser observado na figura 43.

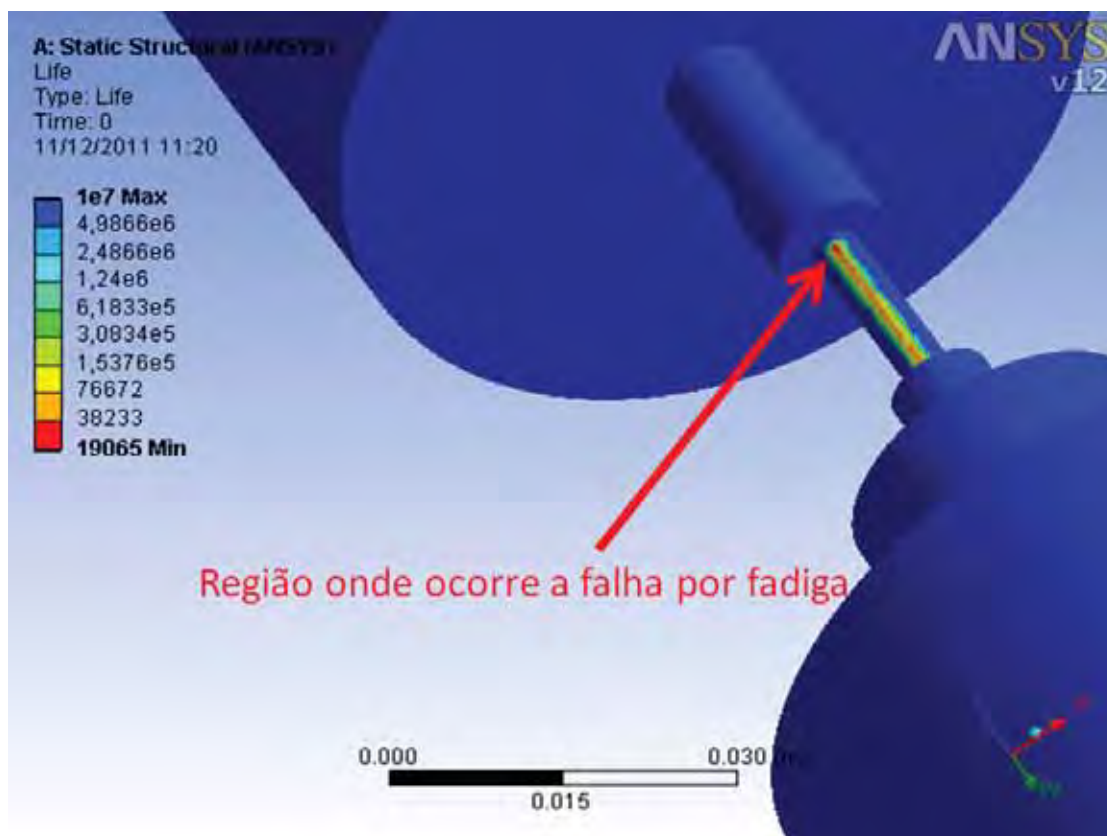


Figura 43 - Região de falha do eixo e número de ciclos em sob condições específicas de trabalho.

5.2 Resultados das análises experimentais

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de dureza e tração realizados nos laboratórios para identificar as propriedades mecânicas do aço ABNT 1045, também são mostrados os resultados de deformação e tensão obtidos por extensometria e o número de ciclos obtido através do ensaio de fadiga por flexão rotativa.

5.2.1 Resultado do ensaio de tração

O ensaio de tração fornece os resultados de alongamento do corpo de prova em função da carga aplicada. A figura 44 mostra a curva tensão x deformação obtida através dos resultados do ensaio.

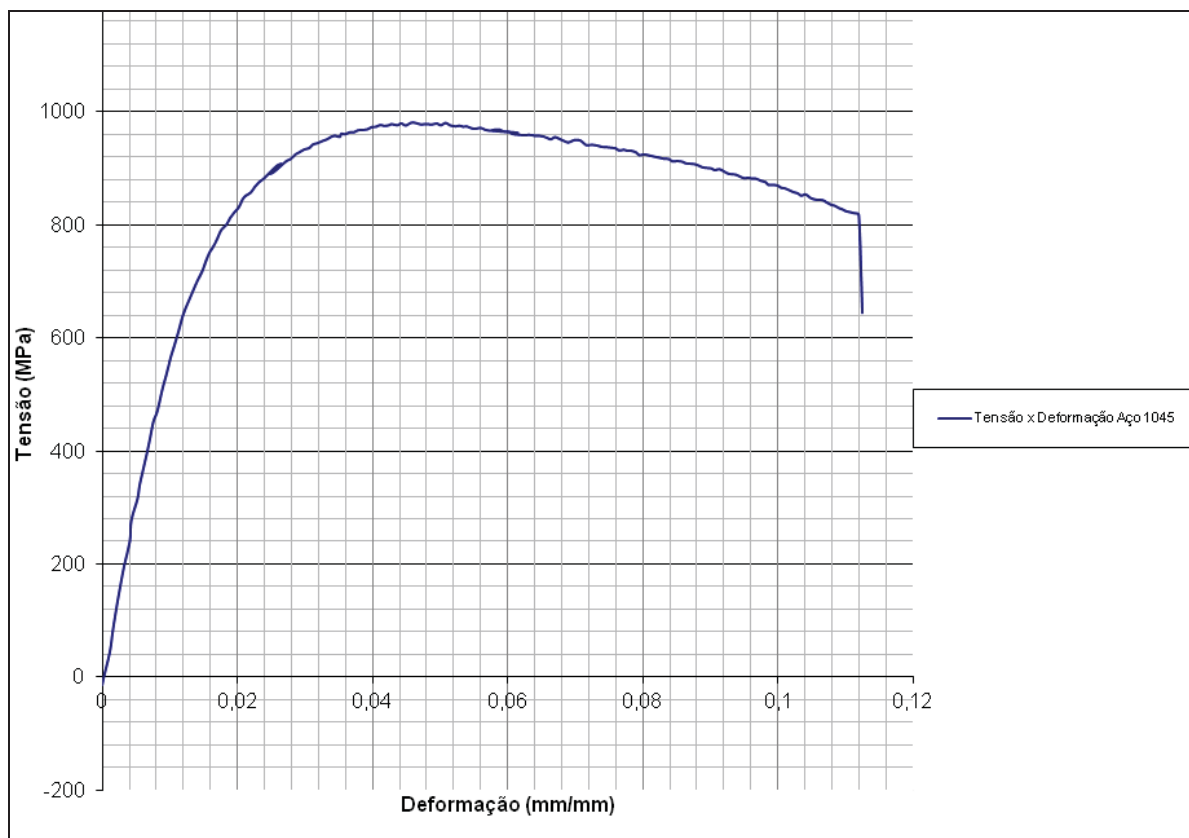


Figura 44 - Curva tensão [MPa] versus deformação [mm/mm] do aço 1045.

Através da curva tensão x deformação é possível determinar as propriedades mecânicas do material, como a tensão de escoamento do aço ABNT 1045, o limite de resistência a tração e seu módulo de elasticidade.

A tabela 6 mostra os valores das propriedades mecânicas encontradas experimentalmente.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045

Propriedade mecânica	Valor
Tensão de escoamento [MPa]	790
Limite de resistência a tração [MPa]	960
Módulo de elasticidade [GPa]	200

5.2.2 Resultado do ensaio de dureza

Neste ensaio foram realizadas 5 medidas de durezas em pontos diferentes do corpo de prova com a finalidade de obter uma média dos resultados.

Os resultados do ensaio de dureza *Rockwell* são mostrados na tabela 7

Tabela 7 - Dureza *Rockwell* para o Aço ABNT 1045.

Medida	HRA	HRC
1	64	20
2		25
3		22
4		25
5		21
Dureza Média		22,6

5.2.3 Resultado do ensaio de tensão de flexão por extensometria (1º estudo de caso)

No ensaio de flexão a carga foi aplicada gradativamente até completarem os 39,876 [kgf], carga máxima disponível e, conseqüentemente, as deformações foram variando, como mostrado na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de deformação.

Carga [kgf]	Carga [N]	Deformação [$\mu\text{m}/\text{m}$]
1,756	17,23	46,13
9,386	92,08	229,68
17,016	166,93	416,94
24,626	241,58	667,52
32,246	316,16	1.050,91
39,876	391,18	1.202,72

Os resultados foram plotados no gráfico de carga [N] *versus* Deformação [$\mu\text{m}/\text{m}$] apresentando uma curva na forma de um polinômio do 4º grau de acordo com a figura 45.

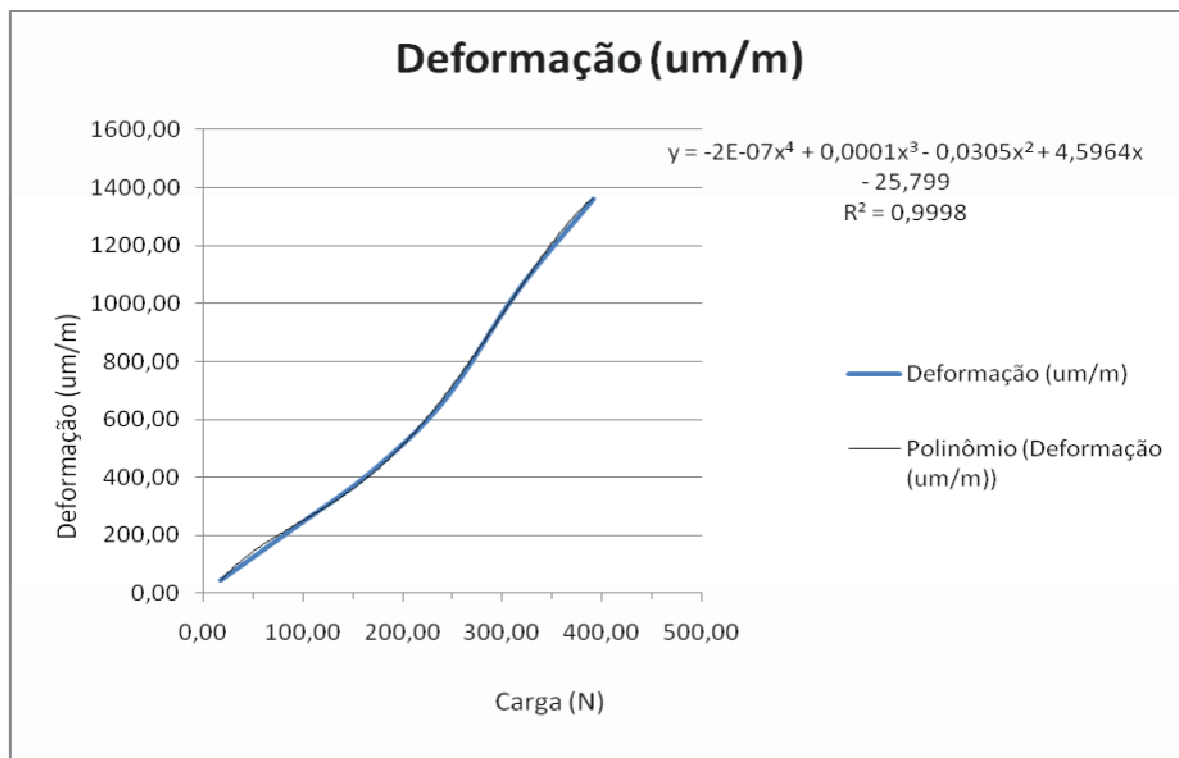


Figura 45 - Curva carga [N] versus deformação [$\mu\text{m/m}$].

Através do resultado de deformação máxima obtida, calcula-se o valor de tensão de flexão máxima pela equação 5.1:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = E \times \varepsilon \quad 5.1$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x} \rightarrow$ Tensão de flexão máxima

$E \rightarrow$ Módulo de elasticidade do aço ABNT 1045

$\varepsilon \rightarrow$ Deformação máxima experimental

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 200 \times 10^9 \times 1202,72 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 240,544 [MPa]$$

5.2.4 Resultado do ensaio de fadiga (2º estudo de caso)

Os resultados de fadiga fornecidos pela máquina *R. R. Moore* são apenas os números de ciclos suportados pelo corpo de prova até sua ruptura para o carregamento de 8 [kgf] aplicado. A tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de fadiga.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de fadiga

Corpo de prova	Número de ciclos
1	19.348
2	17.640

A figura 46 apresenta os resultados dos números de ciclos visualizados no conta-giros.



Figura 46 - Números de ciclos visualizados no conta-giros.

A figura 47 apresenta o corpo de prova rompido.



Figura 47 - Corpo de prova fraturado.

A figura 48 mostra o corpo de prova fraturado, comprovando uma típica fratura por fadiga em flexão rotativa.

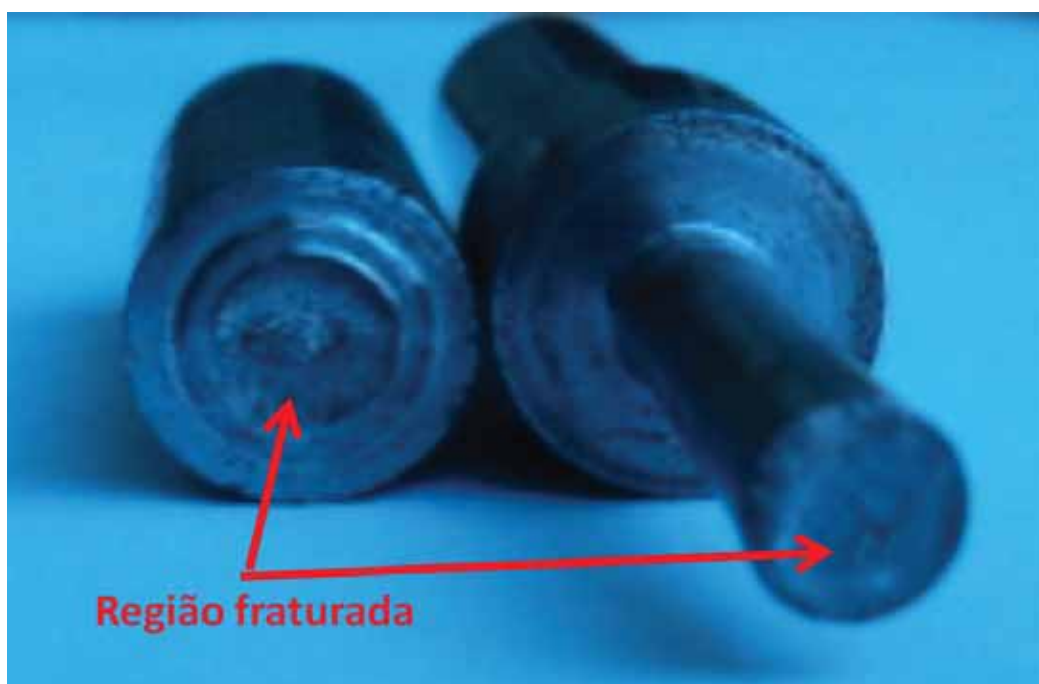


Figura 48 - Fratura do corpo de prova.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo possibilita uma visão geral de análise estrutural pelo método dos elementos finitos, projeto de eixo de transmissão, ensaios mecânicos e uma maior compreensão do fenômeno de fadiga em materiais metálicos.

Os resultados obtidos ao longo do trabalho fornecem além das possibilidades de falhas do eixo de transmissão, informações sobre o material de fabricação.

Através dos ensaios mecânicos de tração e dureza verificou-se que o aço ABNT 1045 utilizado no eixo de transmissão possui significativa resistência mecânica, constatando-se que é um material tratado termicamente, o que tornou necessário a busca por uma curva S-N compatível.

Os resultados de tensões obtidos na análise computacional encontram-se de acordo com os resultados experimentais, tendo um valor de tensão máxima de flexão na análise computacional (235,28 [MPa]) correspondente a 97,81 % do valor de tensão obtido na análise experimental (240, 54 [MPa]). Já para análise de fadiga o valor do número de ciclos suportado pelo eixo na análise computacional (19.065 ciclos) se encontra entre os valores dos números de ciclos obtidos na análise experimental (19.348 ciclos para o cdp 1 e 17.640 ciclos para o cdp 2). Como há concordância entre os resultados computacionais e experimentais pode-se validar as análises através do *software* de elementos finitos *ANSYS Workbench*, com alto grau de confiabilidade, assim tornando-se uma possibilidade o uso do *software* para desenvolvimento de análises de fadiga em projetos de eixos de transmissão mais complexos e em componentes mecânicos em geral.

7. REFERÊNCIAS

Alves Filho, A. Elementos Finitos: **A Base da Tecnologia CAE**. 5 ed. São Paulo: Érica, 2000. 292p.

Alves Filho, A. Elementos Finitos: **A base da Tecnologia CAE, Análise Dinâmica**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2005. 302p.

ANSYS (12.0) User`s Manual.

Baxter J. . Willian and Wang Pei-Chung, **Metallurgical Transactions**. 1991, Volume 22A.

Fish J.. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 2009. 241p.

Instron - **R. R. Moore, Rotating Beam Fatigue Testing System**. Disponível on line: www.instron.com Acesso em 05/12/2011.

Metals Handbook. **Fatigue Analysis and Prevention**. 9 th edition. ASM, 1966.

Neto. P. S.. **Fundamentos Para o Projeto de Componentes de Máquinas**. Belo Horizonte: PUC MG, 2005.

Norton. L. Robert. **Machine Design**. 3 ed. New Jersey: Pearson Education, 2006. 984p.

Santos. J. B. **Modelagem matemática do dano em fadiga do aço 4140 utilizando o método de elementos finitos**. 2011. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

Shigley. J.E. **Elementos de Máquinas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1984. Volume 1, 353p.

ANEXO A – Dados do ensaio de tração

Tensão Teórica [MPa]	Tensão Real [MPa]	Deformação Real [mm/mm]	Força [kN]	Deslocamento [mm]
-14,6366905	-14,63669046	0	-0,30252934	0,000000
-2,47568734	-2,476188518	0,00020242	-0,051170588	0,005061
44,12289046	44,17293818	0,001133637	0,91198683	0,028357
81,6276069	81,75618997	0,001574001	1,687181	0,039381
135,3787141	135,6916122	0,002308613	2,7981758	0,057782
195,5040309	196,1406859	0,003251189	4,0409207	0,081412
239,0432557	240,0236581	0,004092972	4,9408436	0,102534
275,5853791	276,7746292	0,004306076	5,6961417	0,107884
313,2469726	314,8875848	0,005223772	6,4745784	0,130936
338,2403094	340,1252009	0,00555717	6,9911718	0,139316
376,8120087	379,1934003	0,006299954	7,7884197	0,157996
411,9399489	414,8169045	0,006959645	8,5144877	0,174598
447,3545372	450,7481687	0,007557371	9,2464805	0,189650
466,357781	470,1763744	0,008154779	9,6392632	0,204703
504,4184747	508,9317287	0,008907649	10,425949	0,223686
529,7180926	534,7700141	0,00949181	10,948873	0,238425
560,6069326	566,3343621	0,010164645	11,587322	0,255412
579,084192	585,2861606	0,010653015	11,969233	0,267749
602,9366841	609,7612761	0,01125534	12,462246	0,282973
631,0911717	638,6588131	0,011920033	13,044178	0,299784
651,4111689	659,6698639	0,012598465	13,464177	0,316954
674,9147367	684,0718449	0,013476582	13,949978	0,339195
691,1819009	700,9911544	0,014092236	14,286208	0,354800
706,4570597	716,9711471	0,014773177	14,601934	0,372071
726,5174926	737,8042324	0,015415961	15,016568	0,388385
738,9175585	750,7470375	0,015882404	15,272868	0,400230
747,1425324	759,4546643	0,016344655	15,442872	0,411974
761,6857826	774,7579254	0,017016514	15,74347	0,429053
776,4493601	790,2195342	0,017579373	16,048622	0,443370
785,587333	800,1657914	0,018387312	16,237497	0,463935
796,871393	812,1104428	0,018943042	16,47073	0,478090
806,3560162	822,2897401	0,019567462	16,66677	0,494004
814,9997282	831,6851198	0,020266128	16,845429	0,511822

825,9878896	843,2628316	0,020698579	17,072546	0,522857
832,8379222	850,6427976	0,021153244	17,214131	0,534464
838,6210071	857,2893146	0,022016567	17,333663	0,556518
847,4630815	866,800189	0,022561211	17,516422	0,570441
855,3501137	875,4326053	0,023207295	17,679441	0,586967
861,6216538	882,5330735	0,023980008	17,809069	0,606746
880,8077441	903,8102498	0,02578006	18,205631	0,652881
883,6020891	907,3216803	0,026490215	18,263388	0,671105
869,0051843	890,7333381	0,024696008	17,961681	0,625087
870,2013577	892,4987011	0,025300428	17,986405	0,640580
888,0153611	912,5397879	0,027242646	18,354607	0,690428
891,2082208	916,4134074	0,027889487	18,420601	0,707051
898,5923319	924,6797613	0,02861801	18,573225	0,725786
901,2465169	927,877306	0,029120687	18,628085	0,738721
906,0138899	933,5477245	0,029937449	18,726623	0,759752
907,4817229	935,7323186	0,030656025	18,756962	0,778269
913,1805765	942,1069592	0,031185168	18,874753	0,791913
914,7141109	944,2665115	0,031796878	18,90645	0,807695
918,1999664	948,6820383	0,032658498	18,9785	0,829941
920,2289713	951,3712497	0,033281844	19,020438	0,846047
924,341168	956,2992286	0,033989632	19,105434	0,864347
924,8175763	957,3243962	0,034545803	19,115281	0,878736
922,4834804	955,5175031	0,035183613	19,067037	0,895247
927,8305069	961,2448009	0,03538004	19,177556	0,900334
926,403072	960,2848563	0,035920543	19,148052	0,914337
928,951109	963,6026946	0,036622957	19,200718	0,932546
928,4787647	963,7041349	0,037236823	19,190955	0,948470
931,380951	967,3287165	0,037869994	19,250941	0,964905
931,3769354	967,9383605	0,038504341	19,250858	0,981381
931,6935411	968,9918795	0,03925229	19,257402	1,000821
934,8431965	972,8941191	0,039896446	19,322503	1,017575
934,8552918	973,526628	0,040533428	19,322753	1,034153
937,4339056	976,8086044	0,041144477	19,376051	1,050066
935,162705	975,0319829	0,041749743	19,329107	1,065838
935,7832889	976,3772685	0,042465137	19,341934	1,084492
937,0624842	978,0868173	0,042848471	19,368374	1,094493
934,425039	976,1614324	0,043696566	19,31386	1,116633
937,0630647	979,4674549	0,044258426	19,368386	1,131311
932,8891822	975,7582388	0,044928432	19,282115	1,148825

936,5832214	980,331136	0,045652026	19,358468	1,167753
936,5342114	980,7807327	0,046162868	19,357455	1,181124
932,8747163	977,8463301	0,04708162	19,281816	1,205189
932,4750403	977,8558031	0,047519834	19,273555	1,216675
932,2258779	978,2986062	0,048239803	19,268405	1,235557
930,7996042	977,2443822	0,04869275	19,238925	1,247443
931,9628784	979,2749805	0,049519498	19,262969	1,269152
928,4585898	976,1647976	0,050105641	19,190538	1,284554
931,6335969	980,2153078	0,050832648	19,256163	1,303670
927,1557362	976,1341102	0,051478433	19,163609	1,320662
924,6145694	974,2814984	0,052323306	19,111085	1,342909
925,2870661	975,4958442	0,052841869	19,124985	1,356573
923,0694718	973,7346505	0,053434335	19,079149	1,372193
922,7101457	973,9071979	0,05400087	19,071722	1,387138
919,1377849	970,8068213	0,05469146	18,997884	1,405367
917,9433532	970,1016656	0,055265194	18,973196	1,420521
918,5160399	971,4620599	0,056042847	18,985033	1,441075
915,1132547	968,4380388	0,056636671	18,9147	1,456781
913,3005131	967,0253062	0,057159689	18,877232	1,470622
905,4048691	962,8675842	0,061533686	18,714035	1,586658
913,2094116	967,5899362	0,057843157	18,875349	1,488720
913,2503419	968,3293468	0,058562224	18,876195	1,507774
912,8904352	968,2668802	0,058891884	18,86876	1,516514
909,1439026	964,8715873	0,059491632	18,791318	1,532422
908,3162478	964,6827572	0,06020669	18,774211	1,551401
903,9843044	960,6435094	0,060791384	18,684673	1,566930
901,4379608	959,047707	0,061949598	18,632042	1,597718
900,2256765	958,4557661	0,062677929	18,606985	1,617097
900,7118578	959,4291917	0,063153112	18,617034	1,629748
898,4573487	957,821193	0,063981879	18,570435	1,651827
897,7450827	957,6724398	0,064619643	18,555713	1,668830
896,0770973	956,519433	0,06527465	18,521237	1,686304
892,7977322	953,610864	0,065895637	18,453455	1,702881
890,2237146	951,3257149	0,066383705	18,400252	1,715917
893,2798979	955,213673	0,06703509	18,463421	1,733325
889,7663685	952,0503346	0,067658985	18,390799	1,750009
885,7446928	948,4127241	0,068361019	18,307674	1,768795
882,6239208	945,6467639	0,068969901	18,24317	1,785099
885,023186	948,830738	0,069616581	18,292761	1,802426

885,9811794	950,3470742	0,070131551	18,312562	1,816232
884,0110058	948,8926753	0,070826187	18,27184	1,834866
876,2797123	941,316176	0,071593737	18,11204	1,855471
875,7012199	941,1936181	0,072123917	18,100083	1,869713
875,3701483	941,3878688	0,072708419	18,09324	1,885423
873,0302951	939,5831405	0,073466052	18,044877	1,905800
871,0733779	937,9565173	0,073977372	18,004429	1,919561
870,0300403	937,4563592	0,074642466	17,982864	1,937471
868,7514256	936,6450098	0,075247314	17,956436	1,953769
866,7743336	935,2390353	0,076023491	17,915571	1,974698
862,862241	931,4537146	0,076491449	17,834711	1,987324
863,582006	932,8605581	0,077166872	17,849588	2,005558
861,706998	931,3085544	0,077675342	17,810833	2,019293
860,8984053	931,023126	0,078307616	17,79412	2,036382
857,8180316	928,3454626	0,079011937	17,730451	2,055431
852,7835951	923,3243532	0,079474768	17,626393	2,067956
853,2536171	924,4687238	0,080162393	17,636108	2,086575
851,8071686	923,4290574	0,080733804	17,606211	2,102057
849,5365002	921,5802198	0,08139892	17,559278	2,120089
847,6897467	920,0941153	0,08196126	17,521107	2,135344
845,6117318	918,4168048	0,082591015	17,478156	2,152438
843,5435382	916,7596082	0,083233771	17,435408	2,169896
842,554968	916,309163	0,083914918	17,414975	2,188409
838,3631845	912,1921963	0,084399309	17,328334	2,201582
838,4675908	912,9655704	0,08512224	17,330492	2,221254
836,8659358	911,8764389	0,085840612	17,297387	2,240816
833,6545945	908,8516394	0,086362707	17,231011	2,255042
832,4728387	908,1024633	0,086956622	17,206585	2,271234
831,1434723	907,3245536	0,087697788	17,179108	2,291454
827,981141	904,4647066	0,088352907	17,113745	2,309339
825,1591221	901,8271646	0,088846645	17,055416	2,322826
823,3896815	900,561583	0,089588972	17,018843	2,343116
822,160609	899,7671772	0,090200274	16,993439	2,359836
819,0133243	896,7015539	0,090622738	16,928387	2,371397
820,0145219	898,440514	0,091338448	16,949081	2,390994
816,4029725	895,0409641	0,091961415	16,874433	2,408063
812,1546315	890,9253793	0,09256992	16,786623	2,424746
810,3511307	889,4774131	0,093166466	16,749346	2,441111
809,278958	888,8379746	0,093771287	16,727185	2,457713

805,1500215	884,9344305	0,09448493	16,641843	2,477315
802,2172584	882,2257548	0,095068514	16,581225	2,493355
802,8263275	883,362525	0,095597266	16,593814	2,507896
801,1462468	881,9551769	0,096097724	16,559088	2,521666
800,5729796	881,8917885	0,096741664	16,547239	2,539394
796,4492199	877,9918574	0,097473946	16,462004	2,559568
793,9282763	875,819882	0,098167331	16,409898	2,578684
788,8932593	870,6284072	0,098584232	16,305828	2,590184
788,4128354	870,5666827	0,099122504	16,295898	2,605039
786,9450023	869,6718403	0,099957582	16,265559	2,628101
782,8737361	865,6179472	0,100472215	16,181409	2,642323
781,6423897	864,7191573	0,101007447	16,155958	2,657122
777,9685254	861,2499627	0,101698711	16,080022	2,676247
774,5616763	857,9881033	0,102292943	16,009605	2,692698
772,200487	855,9090275	0,10291988	15,960801	2,710065
767,991383	851,70527	0,103462027	15,873802	2,725092
769,2659821	853,6906466	0,104132097	15,900147	2,743676
763,349704	847,7056478	0,104817208	15,777862	2,762690
760,459613	845,011528	0,105427265	15,718126	2,779632
759,0552559	843,9182104	0,105981007	15,689099	2,795019
758,4375749	843,7832507	0,106635155	15,676332	2,813207
754,5894905	839,9654961	0,107186935	15,596795	2,828558
749,8272942	835,2771928	0,107920732	15,498364	2,848986
748,3571873	834,016875	0,108373249	15,467978	2,861591
743,7680018	829,4795288	0,10906927	15,373123	2,880990
741,6357517	827,4879809	0,109536361	15,329051	2,894016
738,3684819	824,261765	0,110045158	15,261519	2,908212
735,7137163	821,9668795	0,110859031	15,206647	2,930935
733,9263747	820,3733606	0,111350838	15,169704	2,944675
730,7311927	817,3270773	0,111993687	15,103662	2,962645
575,5815967	644,1309244	0,112521002	11,896837	2,977394