

FERNANDO LUIZ MONTEIRO

**ANÁLISES DE FALHAS EM EIXO DE LAMINADORA**

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

Orientador: **Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva**

Guaratinguetá

2004

Monteiro, Fernando Luiz

----  
Análises de falhas em eixo de laminadora / Fernando Luiz  
Monteiro – Guaratinguetá : [s.n.], 2004  
152f.: il.

Bibliografia: f.145-149

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2004.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Falha em eixo I. Título

CDU ----. --

**ANÁLISES DE FALHAS EM EIXO DE LAMINADORA**

***FERNANDO LUIZ MONTEIRO***

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE

**“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO

Prof. Dr.

Coordenador

***BANCA EXAMINADORA:***

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

Prof. Dr. GUSTAVO ARISTIDES SANTANA MARTINEZ

Prof. Dr. JOÃO ALBERTO DE OLIVEIRA

DEZEMBRO DE 2004

## **DADOS CURRICULARES**

### **FERNANDO LUIZ MONTEIRO**

|            |   |
|------------|---|
| NASCIMENTO | 01/06/1959, SÃO PAULO / SP  |
| FILIAÇÃO   | Benedicto Ourives Monteiro<br>Maria Aparecida Bicudo Monteiro   |
| 1977/1981  | UNITAU – Universidade de Taubaté<br>Taubaté / SP<br>Graduação em Engenharia Civil   |
| 1988/1991  | UNITAU – Universidade de Taubaté<br>Taubaté / SP<br>Graduação em Engenharia Mecânica  |
| 2002/2004  | DME/FEG/UNESP<br>Aluno regular do Programa de Mestrado em Engenharia<br>Mecânica - Área de Concentração: Projetos e Materiais |

Dedico este trabalho a minha esposa Rita de Cássia e meu filho Diego pela paciência, apoio e dedicação neste período.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva*, que sempre me incentivou a desenvolver este trabalho e com paciência me apoiou, mostrando metas, procedimentos acadêmicos e dividindo sua sabedoria com todos nós.

Aos meus pais *Benedicto e Maria Aparecida*, que sempre me apoiaram em minhas decisões e me deram suporte em minha formação como pessoa.

Ao colega *Eng<sup>o</sup> Célio Pacheco de Siqueira* pela idéia lançada que se transformou neste trabalho.

A todos os colegas de trabalho da Maxion Sistemas Automotivos S/A pela ajuda e compreensão e em especial ao *Sr. Carlos Antonio Vilas Boas* pela montagem de nosso experimento de campo.

À Maxion Sistemas Automotivos S/A através da pessoa do *Eng. Francisco Antônio de Souza Manso* pela autorização do desenvolvimento do tema sobre máquina de sua responsabilidade.

Aos Professores do Departamento de Mecânica – Unesp/FEG pelos ensinamentos transmitidos, em especial aos professores *Dr. Celso Pinto Moraes Pereira e Dr. José Elias Tomazini* que de forma técnica e objetiva auxiliaram na abordagem do assunto.

"O melhor dos mestres é o estudo. E a  
melhor das disciplinas é o trabalho"

Machado de Assis

MONTEIRO, F.L. **Análise de falhas em eixo de laminadora**. 2004. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

## **RESUMO**

Estudo de falha por fratura em eixo da laminadora de aros Leifeld, fabricado em aço de baixa liga e alta resistência, ABNT 4340, forjado, temperado e revenido, com dureza de 39 HRC, abordando aspectos de modelagem pelo método de elementos finitos, utilizando o programa Ansys e critérios de fadiga utilizando o diagrama de Goodman modificado como ferramenta de definição do limite de tensão alternada para fadiga e propostas de mudanças geométricas no eixo a fim de minimizar as tensões sobre a aba da árvore bem como eliminar a possibilidade de fratura por fadiga da mesma. O estudo procura mostrar de forma clara a montagem de um modelo sólido através de um software comercial e a interação com a realidade vivida na manutenção de fábrica, sendo que o estudo surgiu devido a falhas freqüentes e prematuras de árvores em máquinas de repuxamento de aros, de procedência alemã, usada para a fabricação de aros para pneu com câmara utilizados em caminhões e ônibus, máquina esta de propriedade da empresa Maxion Sistemas Automotivos S/A.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de falhas, elementos finitos, eixos e árvores, análise de tensões, Ansys.



MONTEIRO, F.L. **Failures analysis of flow forming machine spindle**. 2004. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

## **ABSTRACT**

This is a fracture failure analysis of a Leifeld flow forming machine spindle, manufactured in a low alloy and high resistance, ABNT 4340 steel, forged, quenched and tempered with hardness of 39 HRC, approaching modeling aspects in finite elements method using the program Ansys and also approaching fatigue criteria using the diagram of Goodman modified as a tool for definition criterion of fatigue alternate stress limit and proposed of geometric changes in the spindle in order to minimize the tensions on the brim of it as well as to eliminate the fracture possibility for fatigue of the same. The study tries to show the assembly of a solid model in a clear way through a commercial software and the interaction with the reality lived in the factory maintenance, the study was proposed due the frequent and premature spindles failures in the flow forming machine, made in Germany, used for the production of rim for tire with tube used in trucks and buses, this machine is property of Maxion Sistemas Automotivos S/A company.

**KEYWORDS:** Failure analysis, finit elements, spindles and shafts, stress analysis, Ansys.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                           | 21 |
| 1.1          | CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                        | 21 |
| 1.2          | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                       | 24 |
| 1.3          | OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS .....                  | 25 |
| 1.4          | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....                    | 26 |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....                 | 28 |
| 2.1          | LAMINADORA .....                                  | 28 |
| 2.2          | ÁRVORES E EIXOS .....                             | 37 |
| <b>2.2.1</b> | <b>Dinâmica de eixos rotativos</b> .....          | 38 |
| <b>2.2.2</b> | <b>Visão geral de projeto de eixos</b> .....      | 39 |
| 2.3          | CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHAS .....               | 40 |
| 2.4          | MECANISMOS DE FALHA .....                         | 42 |
| <b>2.4.1</b> | <b>Fratura dúctil</b> .....                       | 47 |
| <b>2.4.2</b> | <b>Fratura frágil</b> .....                       | 51 |
| 2.5          | ANÁLISE DE FALHAS EM EIXOS .....                  | 52 |
| <b>2.5.1</b> | <b>Introdução</b> .....                           | 52 |
| <b>2.5.2</b> | <b>Sistemas de tensão atuantes em eixos</b> ..... | 53 |
| <b>2.5.3</b> | <b>Falhas por fadiga</b> .....                    | 56 |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODO AQUISITIVO</b> .....         | 66 |
| 3.1          | COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL .....              | 66 |
| <b>3.1.1</b> | <b>Metalografia</b> .....                         | 66 |
| <b>3.1.2</b> | <b>Propriedades mecânicas</b> .....               | 66 |
| 3.2          | EXPERIMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....           | 68 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| <b>3.2.1</b> | <b>Descrição do aparato experimental</b> .....                      | 68  |
| <b>3.2.2</b> | <b>Dados aquisitados</b> .....                                      | 72  |
| <b>4</b>     | <b>MODELAGEM DA ÁRVORE</b> .....                                    | 80  |
| <b>4.1</b>   | <b>SOFTWARE ANSYS</b> .....   | 81  |
| <b>4.1.1</b> | <b>Características do ANSYS</b> .....                               | 80  |
| <b>4.1.2</b> | <b>Obtendo o modelo de ANSYS</b> .....                              | 81  |
| <b>4.2</b>   | <b>CONSTRUÇÃO DO MODELO</b> .....                                   | 85  |
| <b>4.2.1</b> | <b>Construção do modelo do mandril ou pré-processamento</b> ...     | 85  |
| <b>4.2.2</b> | <b>Solução do modelo</b> .....                                      | 111 |
| <b>4.2.3</b> | <b>Pós-processamento</b> .....                                      | 123 |
| <b>5</b>     | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....                   | 129 |
| <b>5.1</b>   | <b>APRESENTAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CAMPO</b> ..... | 129 |
| <b>5.2</b>   | <b>PROPOSTA DE MODIFICAÇÃO</b> .....                                | 134 |
| <b>6</b>     | <b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....                         | 142 |
| <b>6.1</b>   | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | 142 |
| <b>6.2</b>   | <b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....                        | 144 |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 145 |
|              | <b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b> .....                                | 148 |
|              | <b>ANEXOS</b> .....   | 150 |

## LISTA DE FIGURAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| FIGURA 2.1  | - Laminadora LEIFELD .....  | 28 |
| FIGURA 2.2  | - Aro laminado pela laminadora LEIFELD .....  | 29 |
| FIGURA 2.3  | - Caixa de engrenagem com nariz da árvore em primeiro plano .   | 29 |
| FIGURA 2.4  | - Detalhe do nariz da árvore .....  | 30 |
| FIGURA 2.5  | - Montagem em corte da árvore num cabeçote .....  | 31 |
| FIGURA 2.6  | - Mandril e sua fixação ao nariz da árvore .....  | 32 |
| FIGURA 2.7  | - Mandril de conformação .....  | 32 |
| FIGURA 2.8  | - Rolos de conformação .....  | 33 |
| FIGURA 2.9  | - Vista em corte do cabeçote montado (LEIFELD) .....  | 34 |
| FIGURA 2.10 | - <i>Gutter</i> ou perfil já conformado .....   | 35 |
| FIGURA 2.11 | - Vista superior do cabeçote, rolos e mandril .....   | 36 |
| FIGURA 2.12 | - Formação de <i>Dimples</i> na fratura por tração quase-estática da liga Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (MEV, 4000X) .....                                 | 47 |
| FIGURA 2.13 | - Formação de <i>Dimples</i> na liga Al-2024 T3, na região de ruptura final de uma peça rompida por fadiga .....                                | 48 |
| FIGURA 2.14 | - Aspectos macroscópicos da fratura dúctil por sobrecarga longitudinal em parafuso de aço ligado .....  | 49 |
| FIGURA 2.15 | - Localização esquemática das zonas características da fratura de um corpo de prova de tração cilíndrico .....                                  | 50 |
| FIGURA 2.16 | - (a) Fratura em forma de taça e cone em alumínio, (b) Fratura frágil em aço temperado .....  | 50 |
| FIGURA 2.17 | - Parafuso da tampa de uma válvula de turbina .....   | 51 |
| FIGURA 2.18 | - Diagrama de corpo livre mostrando a orientação das tensões em um eixo e o comportamento dúctil e frágil de materiais em fratura .....         | 54 |
| FIGURA 2.19 | - Representações esquemáticas de superfícies de fratura em eixos cilíndricos de acordo com a intensidade e o tipo de carregamento imposto ..... | 57 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| FIGURA 2.20 | - Marcas de fadiga produzidas a partir de uma única origem e múltiplas origens com tensões nominais baixas e altas .....  | 59 |
| FIGURA 2.21 | - Parafuso com marcas de praia .....  | 59 |
| FIGURA 2.22 | - Marcas de catraca nas bordas de eixo de aço fraturado por fadiga .....  | 60 |
| FIGURA 2.23 | - Marcas típicas de fadiga sobre superfície de um eixo não rotativo carregado uniformemente sujeito a tensões de flexões reversas .....   | 60 |
| FIGURA 2.24 | - Marcas típicas de fadiga sobre superfície de eixo rotativo com carga uniformemente distribuída .....  | 62 |
| FIGURA 2.25 | - Efeito do tamanho de raio de filetes sobre a concentração de tensão em mudanças de diâmetro do eixo .....   | 64 |
| FIGURA 3.1  | - Curva de fadiga do aço 4340, sendo o material base = $\triangle$ , material base mais tratamento com “ <i>Shot Pinning</i> ” = $\bullet$ , material base com tratamento de nitretação = $\blacktriangledown$ , material base com concentrador e nitretação = $\nabla$ ..... | 67 |
| FIGURA 3.2  | - Coletor de dados marca JUMO tipo Logoscreen 500 e sua fonte .....   | 68 |
| FIGURA 3.3  | - Portas para entrada de sinal analógico e fonte de alimentação .   | 69 |
| FIGURA 3.4  | - Transdutor de pressão zero a 600 bar operado por corrente, marca JUMO modelo B 40.4300 .....  | 70 |
| FIGURA 3.5  | - Transdutores de pressão acoplados no cilindro hidráulico da mesa .....  | 70 |
| FIGURA 3.6  | - Painel hidráulico e mangueiras de alta pressão que alimentam o cilindro de avanço .....   | 71 |
| FIGURA 3.7  | - Esquema de ligação elétrica do sistema JUMO .....   | 72 |
| FIGURA 3.8  | - Corte típico do cilindro de avanço do eixo Z .....  | 73 |
| FIGURA 3.9  | - Corte típico do cilindro lateral .....  | 74 |
| FIGURA 3.10 | - Força de avanço e retorno do cilindro de conformação eixo Z.  | 76 |
| FIGURA 3.11 | - Esquema de aferição de transdutores de pressão com saída de sinal de corrente .....   | 77 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| FIGURA 3.12 | - Esquema de aferição de transdutores de pressão com saída de sinal por tensão ..... | 79 |
| FIGURA 4.1  | - Barra de Menu .....  | 80 |
| FIGURA 4.2  | - Menu Principal .....   | 81 |
| FIGURA 4.3  | - Menu Pré-processador .....   | 82 |
| FIGURA 4.4  | - Tipos de carregamento .....  | 83 |
| FIGURA 4.5  | - Quadro indicativo de término do processamento principal .....                      | 84 |
| FIGURA 4.6  | - Solução de dados no ANSYS .....  | 84 |
| FIGURA 4.7  | - Uma das caixas de diálogo do pós-processador .....                                 | 84 |
| FIGURA 4.8  | - Mandril típico da máquina de laminar LEIFELD .....                                 | 85 |
| FIGURA 4.9  | - Desenho 3D e perfil esquemático do mandril .....                                   | 86 |
| FIGURA 4.10 | - Menu principal do ANSYS .....  | 87 |
| FIGURA 4.11 | - Menu de preferência do ANSYS .....   | 87 |
| FIGURA 4.12 | - Menu principal da ANSYS .....  | 88 |
| FIGURA 4.13 | - Menu do pré- processador - “ <i>Element Type</i> ” .....                           | 88 |
| FIGURA 4.14 | - Menu de acesso a tipo de elementos .....   | 89 |
| FIGURA 4.15 | - Menu para adição de tipos de elementos .....                                       | 89 |
| FIGURA 4.16 | - Menu de biblioteca de tipos de elementos .....                                     | 89 |
| FIGURA 4.17 | - Menu de tipos de elementos com opção de elementos planos e sólidos .....           | 90 |
| FIGURA 4.18 | - Representação gráfica do elemento “ <i>Plane 42</i> ” .....                        | 90 |
| FIGURA 4.19 | - Menu de definição de tipos de elementos .....                                      | 91 |
| FIGURA 4.20 | - Menu biblioteca de tipos de elementos .....  | 91 |
| FIGURA 4.21 | - Caixa de diálogo que mostra os tipos de elementos escolhidos                       | 92 |
| FIGURA 4.22 | - Representação gráfica do elemento “ <i>Solid 95</i> ” .....                        | 93 |
| FIGURA 4.23 | - Menu do “ <i>Preprocessor</i> ” com material “ <i>Properties</i> ” .....           | 93 |
| FIGURA 4.24 | - Menu “ <i>Material Properties</i> ” com opção “ <i>Isotropic</i> ” .....           | 94 |
| FIGURA 4.25 | - Menu de atribuição de propriedades isotrópicas do material ...                     | 94 |
| FIGURA 4.26 | - Menu para entrada de propriedades isotrópicas do material 1 .                      | 95 |
| FIGURA 4.27 | - Menu de criação de entidades geométricas .....                                     | 96 |
| FIGURA 4.28 | - Menu para criação de “ <i>Keypoints</i> ” .....                                    | 96 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 4.29 | - “ <i>Keypoints</i> ” alocados no modelo .....                                      | 98  |
| FIGURA 4.30 | - Menu de criação de entidades .....   | 98  |
| FIGURA 4.31 | - Menu de opções de linhas .....   | 99  |
| FIGURA 4.32 | - Caixa de ação para criação de linhas retas .....                                   | 99  |
| FIGURA 4.33 | - Traçado de linhas unindo os “ <i>Keypoints</i> ” .....                             | 100 |
| FIGURA 4.34 | - Detalhe dos “ <i>Keypoints</i> ” e linhas que compõem o rebaixo da<br>árvore ..... | 100 |
| FIGURA 4.35 | - Menu de opções de entidades .....  | 101 |
| FIGURA 4.36 | - Menu de opções para criação de áreas .....   | 101 |
| FIGURA 4.37 | - Criação de áreas básicas para futura revolução .....                               | 102 |
| FIGURA 4.38 | - Áreas e linha de revolução entre “ <i>Keypoints</i> ” 1 e 17 .....                 | 102 |
| FIGURA 4.39 | - Menu do pré-processador - “ <i>Mesh Tools</i> ” .....                              | 103 |
| FIGURA 4.40 | - Caixa de ferramentas para criação de malhas .....                                  | 104 |
| FIGURA 4.41 | - Menu “ <i>Mesh Areas</i> ” .....   | 105 |
| FIGURA 4.42 | - Malha sobre as áreas 1, 2, 3 e 4 .....   | 106 |
| FIGURA 4.43 | - Menu “ <i>Operate</i> ” com opção “ <i>Extrude/Sweep</i> ” .....                   | 106 |
| FIGURA 4.44 | - Menu de extrusão .....   | 107 |
| FIGURA 4.45 | - Caixa de opção de extrusão .....   | 107 |
| FIGURA 4.46 | - Detalhe de um quadrante da árvore .....  | 108 |
| FIGURA 4.47 | - Menu “ <i>Extrude/Sweep</i> ” com opção “ <i>About Axis</i> ” .....                | 108 |
| FIGURA 4.48 | - Menu de cursor ativo para extrusão .....   | 109 |
| FIGURA 4.49 | - Menu de extrusão para definição de números de segmentos ....                       | 109 |
| FIGURA 4.50 | - Parâmetros escalares do modelo .....   | 110 |
| FIGURA 4.51 | - Modelo extrudado através do comando de revolução .....                             | 110 |
| FIGURA 4.52 | - Forças aplicadas e indicação do nó 29 .....  | 112 |
| FIGURA 4.53 | - Coordenadas do nó 29 .....   | 112 |
| FIGURA 4.54 | - Aplicação de forças no nó 29 .....   | 113 |
| FIGURA 4.55 | - Menu principal do ANSYS .....  | 113 |
| FIGURA 4.56 | - Menu “ <i>Solution</i> ” .....   | 114 |
| FIGURA 4.57 | - Menu de opções de análises de processamento .....                                  | 115 |
| FIGURA 4.58 | - Menu “ <i>Solution</i> ” com opção “ <i>Load Apply</i> ” .....                     | 115 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 4.59 | - Menu de aplicação de cargas .....  | 116 |
| FIGURA 4.60 | - Menu de aplicação de cargas por entidade .....                             | 116 |
| FIGURA 4.61 | - Menu dinâmico de aplicação de forças .....                                 | 117 |
| FIGURA 4.62 | - Caixa de introdução de intensidade de forças na direção X .....            | 117 |
| FIGURA 4.63 | - Caixa de introdução de intensidade de forças na direção Y .....            | 118 |
| FIGURA 4.64 | - Vista total das áreas do modelo com engastamento .....                     | 118 |
| FIGURA 4.65 | - Detalhe das áreas de engastamento números 41 e 79 .....                    | 119 |
| FIGURA 4.66 | - Detalhe das áreas de engastamento números 117 e 152 .....                  | 119 |
| FIGURA 4.67 | - Menu “ <i>Displacement</i> ” .....   | 120 |
| FIGURA 4.68 | - Menu dinâmico para indicação de graus de liberdade em entidades .....      | 120 |
| FIGURA 4.69 | - Caixa de definição de tipo de grau de liberdade da área .....              | 121 |
| FIGURA 4.70 | - Modelo mostrando o engastamento e as forças aplicadas .....                | 121 |
| FIGURA 4.71 | - Menu “ <i>Solution</i> ” com opção “ <i>Current LS</i> ” .....             | 122 |
| FIGURA 4.72 | - Caixa de diálogo para início de processamento .....                        | 122 |
| FIGURA 4.73 | - Menu de barras para acesso do comando “ <i>Select</i> ” .....              | 123 |
| FIGURA 4.74 | - Menu de escolha de entidades .....   | 123 |
| FIGURA 4.75 | - Volumes , V2, V6, V10 e V14, escolhidos onde a trinca é iniciada .....     | 124 |
| FIGURA 4.76 | - Menu de plotagens gerais .....   | 124 |
| FIGURA 4.77 | - Menu de dados da solução nodal para construção gráfica .....               | 125 |
| FIGURA 4.78 | - Modelo gráfico apresentando as tensões de <i>Von Mises</i> nos nós .....   | 125 |
| FIGURA 4.79 | - Menu geral de pós-processamento com a opção “ <i>Element Table</i> ” ..... | 126 |
| FIGURA 4.80 | - Menu “ <i>Element Table</i> ” que define a tabela a ser criada .....       | 127 |
| FIGURA 4.81 | - Tabela de dados de elementos .....   | 127 |
| FIGURA 4.82 | - Caixa de diálogo onde se definiu o tipo de informação a ser plotada .....  | 127 |
| FIGURA 4.83 | - Tensões de <i>Von Mises</i> na região afetada .....                        | 128 |
| FIGURA 5.1  | - Tensões de <i>Von Mises</i> em MPa .....                                   | 129 |



|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 5.2  | - Detalhe de 2 quadrantes com tensões de <i>Von Mises</i> .....     | 130 |
| FIGURA 5.3  | - Tensão máxima principal .....                                     | 130 |
| FIGURA 5.4  | - Diagrama de Goodman modificado .....                              | 131 |
| FIGURA 5.5  | - Detalhe da árvore em perfil fraturado .....                       | 132 |
| FIGURA 5.6  | - Fratura entre a aba e o nariz da árvore .....                     | 132 |
| FIGURA 5.7  | - Parte fraturada onde se apresentam marcas de praia .....          | 133 |
| FIGURA 5.8  | - Árvore nova a ser instalada na máquina de laminação LEIFELD ...   | 133 |
| FIGURA 5.9  | - Detalhe da posição da trinca entre o nariz e a aba da árvore .... | 134 |
| FIGURA 5.10 | - Proposta de aumento da aba em 10 mm .....                         | 135 |
| FIGURA 5.11 | - Perfil original (desenho LEIFELD) .....                           | 135 |
| FIGURA 5.12 | - Posição dos “ <i>Keypoints</i> ” da proposta de modificação ..... | 137 |
| FIGURA 5.13 | - Novo perfil proposto da árvore .....                              | 137 |
| FIGURA 5.14 | - Tensões de <i>Von Mises</i> para modelo proposto .....            | 138 |
| FIGURA 5.15 | - Diagrama de Goodman modificado para modelo proposto .....         | 139 |
| FIGURA 5.16 | - Proposta de eliminação do raio de saída de ferramenta .....       | 140 |
| FIGURA 5.17 | - Resultado de tensões em modelo sem rebaixo .....                  | 141 |

## LISTA DE TABELAS

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| TABELA 3.1 | - Composição química .....  | 66  |
| TABELA 3.2 | - Composição química – fabricação Gerdau .....                                      | 66  |
| TABELA 3.3 | - Dados brutos coletados via transdutor e aquisitor JUMO 500 ..                     | 75  |
| TABELA 3.4 | - Forças atuantes no roda 24 x 8 – cilindro frontal .....                           | 75  |
| TABELA 4.1 | - Famílias de mandris .....   | 86  |
| TABELA 4.2 | - Planilha dos pontos coordenados do perímetro mandril e<br>árvore .....            | 97  |
| TABELA 5.1 | - Conjunto de tensões obtidas do modelo e literatura .....                          | 131 |
| TABELA 5.2 | - Coordenada dos “ <i>Keypoints</i> ” da proposta de modificação da<br>árvore ..... | 136 |
| TABELA 5.3 | - Tensões máximas e de ruptura para modelo proposto .....                           | 138 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |   |
|-----------|---|
| ABNT      | - Associação Brasileira de Normas Técnicas              |
| ANSYS®    | - Análise de Systems                                    |
| ASM       | - American Society of Metals                            |
| BSP       | - British Standart Pattern                              |
| DIN       | - Deutscher Normenausschuss                             |
| GUI       | - Graphic user interface                                |
| ISO       | - International Standard Organization                   |
| MEF       | - Metodos dos Elementos Finitos                         |
| PCG       | - Preconditioned Conjugate Gradient Solve – Out of Core |
| SEQV      | - Stress Equivalence                                    |
| VON MISES | - Critério de Análise de Tensões                        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |   |  |
|------------------|---|--|
| $\sigma_3$       | - | tensão de compressão                           |
| $\sigma_1$       | - | tensão de tração                               |
| $\tau_{\max}$    | - | tensão máxima de cisalhamento                  |
| $\varepsilon \%$ | - | alongamento específico percentual              |
| $\phi_1$         | - | diâmetro externo do mandril                    |
| $\phi_2$         | - | diâmetro interno do mandril                    |
| $\sigma_e$       | - | limite de escoamento                           |
| $\sigma_t$       | - | limite de resistência à tração                 |
| A                | - | comprimento total do mandril                   |
| bar              | - | unidade de pressão                             |
| C                | - | carbono  |
| Cr               | - | cromo  |
| CV               | - | cavalo a vapor                                 |
| DCA              | - | diâmetro do cilindro de avanço do eixo z       |
| DCL              | - | diâmetro do cilindro de avanço lateral         |
| DEC              | - | diâmetro do eixo z do cilindro de avanço       |
| DEL              | - | diâmetro do eixo do cilindro de avanço lateral |
| DMx              | - | incremento de pressão                          |
| Ex               | - | módulo de Young ou módulo de elasticidade      |
| F                | - | fibroso  |
| h                | - | profundidade da aba do mandril                 |
| H <sub>2</sub> S | - | sulfeto de hidrogênio                          |
| I                | - | nó I do elemento “Plane 42” e “solid 95”       |
| J                | - | nó J do elemento “Plane 42” e “solid 95”       |
| K                | - | nó K do elemento “Plane 42” e “solid 95”       |
| L                | - | nó L do elemento “plane 42” e “Solid 95”       |
| m/s              | - | metro por segundo                              |

|                |   |                               |
|----------------|---|-------------------------------|
| m <sup>2</sup> | - | metro quadrado                |
| mA             | - | miliampere                    |
| máx.           | - | máximo                        |
| mm             | - | milímetro                     |
| Mn             | - | manganês                      |
| Mo             | - | molibdenio                    |
| Mohm           | - | miliohms                      |
| N              | - | Newton                        |
| Ni             | - | níquel                        |
| Nuelem-        | - | número de elementos           |
| Nuno           | - | número de nós                 |
| °C             | - | graus celsius                 |
| R              | - | radial                        |
| S              | - | enxofre                       |
| S <sup>-</sup> | - | sinal analógico negativo      |
| S <sup>+</sup> | - | sinal analógico positivo      |
| SFE            | - | sinal de fundo de escala      |
| SMn            | - | tensão mínima                 |
| SMx            | - | tensão máxima                 |
| V <sup>-</sup> | - | tensão elétrica pólo negativo |
| V <sup>+</sup> | - | tensão elétrica pólo positivo |
| Vcc            | - | tensão em corrente contínua   |
| V2             | - | volume 2 - figura 4.75        |
| V6             | - | volume 6 - figura 4.75        |
| V10            | - | volume 10 - figura 4.75       |
| V14            | - | volume 14 - figura 4.75       |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Elementos de máquinas falham por causas diversas e relativamente conhecidas, porém, a busca da longevidade dos componentes sempre foi procurada pelos projetistas, construtores e manutentores. Não obstante essa busca incessante, ainda hoje ocorrem falhas em equipamentos que levam a prejuízos de toda ordem, para os quais fazem-se necessários estudos específicos de componentes mecânicos e suas atuações no conjunto do equipamento.

Para análises mais acuradas sobre estes mecanismos dispõe-se, atualmente, de ferramentas matemáticas, tais como o método dos elementos finitos, que proporciona uma precisão em se localizar as seções no qual o elemento possui características peculiares, onde podem ocorrer grandes concentrações de tensão, bem como falhas ou deformações excessivas.

Este trabalho concentra-se em modelar parte de uma árvore de uma caixa de engrenagem de uma laminadora LEIFELD. Essa árvore, fabricada com material base o aço ABNT 4340 e tratada por nitretação, é o elemento de transmissão de energia mecânica para o mandril e, conseqüentemente, para o “*Blank*” metálico onde será conformado um aro de uma futura roda. É importante salientar que este trabalho foi desenvolvido devido ao equipamento em estudo apresentar as seguintes características:

- a) ser uma máquina chave no processo de fabricação de rodas com câmara;
- b) o valor de fabricação da árvore se elevado;
- c) a substituição é trabalhosa e demorada;
- d) impacta em custo cessante de produção de uma linha contínua;
- e) possui histórico de quebras freqüentes.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho fornece oportunidade de se desenvolver um estudo sobre o método dos elementos finitos e do programa comercial de elementos finitos ANSYS® versão 7.0 como ferramenta de análise de tensões em

peças modeladas em 3-D, dando oportunidade de se analisar resultados de processamento e comparando-os com os conhecimentos teóricos de resistência de materiais, no que tange a concentradores de tensão e pontos críticos na análise da peça.

A contribuição acadêmica esperada advém da análise de tempos de processamento, bem como das dificuldades de modelamento que surgiram no decorrer do trabalho, como também as opções de carregamento adotadas, escolha do elemento e decisão do que modelar na peça.

As dificuldades se fazem sentir desde a coleta de dados de carregamento da máquina, pois, sendo um elemento rotativo, não permite a instalação de “*Strain-Gauge*” devido às impossibilidades físicas apresentadas pelo caráter construtivo bem como à dinâmica do eixo, o que torna muito difícil a instalação de itens convencionais diretamente ligados à peça. A opção estudada foi a instalação de transdutores de pressão nos cilindros de avanço e de laminação, tal que as forças envolvidas na operação fossem medidas através da relação da pressão com a áreas dos respectivos cilindros, o que nos resultou em uma valiosa fonte de dados. Os valores obtidos corroboram, inclusive, a referência técnica da manutenção mecânica da MAXION SISTEMAS AUTOMOTIVOS S/A - Cruzeiro - SP, sobre as cargas aplicadas, visto que essa medição, até o presente momento, nunca foi realizada por meio desse método utilizado.

Os transdutores apresentaram problemas na instalação, ou seja, sendo dispositivos importados foi necessária a confecção de conexões especiais para seu tipo de rosca, e embora as pressões envolvidas estivessem na ordem de 0 a 200 bar, dois transdutores que foram especificados para suportar pressões até 600 bar não funcionaram adequadamente. Os mesmos foram enviados para seu fabricante, o qual alegou prováveis picos de pressão no sistema, o que poderia ocasionar dano ao transdutor. Em seguida foram revisados e providos de amortecedores hidráulicos e reinstalados vindo a funcionar perfeitamente.

Na classificação dos mandris a serem estudados, os desafios a serem superados foram devido à enorme variedade de modelos de rodas, sendo que finalmente pode-se definir as mesmas por famílias, através dos mandris.

Outra dificuldade surgida refere-se à decisão do carregamento e também do processamento do modelo, pois, como idéia inicial, imaginava-se trabalhar com a transferência de forças originárias no mandril através de uma equação de carregamento a ser aplicado na face de contato entre o mandril e a árvore. Com isso, modelar-se apenas a árvore, porém, a distribuição de carga ao longo da área de contato se mostrou tão complexa, e, talvez, com pouca precisão, decidindo-se, então, modelar o mandril anexado à árvore e aplicar as cargas reais que resultaram da aplicação do esforço das ferramentas de laminação ligadas aos cilindros monitorados pelos transdutores, propiciando uma solução mais direta, objetiva e prática. Porém, esta decisão gerou um custo de processamento muito maior exigindo-se a aplicação de malhas em ambas as peças, na árvore e no mandril.

A expectativa deste trabalho é contribuir para a análise de tensões na área de fratura da árvore indicando os pontos de maior concentração de tensões, analisar o conceito do projeto da máquina em torno da árvore verificando possíveis sugestões de modificações e propondo uma ou mais soluções plausíveis dentro da realidade do processo produtivo, sugerindo trabalhos futuros para análise da falha desse eixo.

Da análise do eixo em questão, pode-se extrapolar soluções viáveis para outros tipos de eixos com as características semelhantes ao estudado e poderá mostrar caminhos para a melhoria contínua dos elementos de máquinas no cotidiano das indústrias.

Dentro ainda da expectativa deste trabalho, deve-se ressaltar que a busca de motivos de falhas sempre conduzirá ao desenvolvimento de tipos de análises de falhas voltadas para as necessidades que se apresentam no dia-a-dia das empresas. Esse desenvolvimento é de suma importância, principalmente na mecânica, devendo-se utilizar as tecnologias mais avançadas disponíveis no mercado resultando em ferramentas modernas de engenharia, com apoio computacional.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ramamurti e Karthkeyan (1997) apresentaram estudo de análise de tensão de eixos com juntas de ligação de transportadores utilizando elementos finitos onde



propõem a utilização de uso do elemento “*Brick*” com oito nós devido a boa adaptação a superfícies curvas e a matriz rigidez ser calculada de forma global.

Tait (1998) apresenta uma análise de falha e análise experimental de tensão sobre um eixo atuador de válvula de abertura de um sistema de refrigeração da usina nuclear de Koeberg, através da adaptação de “*Strain Gauge*” ao centro do eixo propiciando a leitura de sua deflexão durante seu trabalho rotativo vindo a detectar a falha em uma porca de trava que apresentava pequeno comprimento, sendo a mesma substituída por uma peça de comprimento mais longo eliminando-se o problema.

Metzger (1995) apresenta um estudo sobre a formulação explícita de elementos finitos para um modelo geral de escoamento em tiras metálicas onde demonstra que uma das características da zona de processo e que pode ser aplicada a geometria que não são prováveis a trincas, de forma a considerar a potencial iniciação da fratura devido a concentradores de tensão.

Savaids *et all* (2001) apresenta um estudo de análise de elementos finitos de um eixo com entalhe sujeito a carregamento multiaxial síncrono não proporcional. Uma combinação de tensão e torção é considerada e para efeito de simplificação uma componente de carga é mantida constante enquanto a outra é cíclica. Um estudo paramétrico é levado adiante e resultados numéricos são apresentados a fim de mostrar os efeitos da relação de magnitude versus amplitude e a situação inicial sobre a falha de uma propriedade que foi mudada por um agente externo ao retornar ao seu valor original quando a causa da mudança é removida, definida como histerese. Concluindo que a estabilização da histerese de uma componente cíclica pode ser obtida ignorando-se a componente de carregamento constante. Outrossim, que o comportamento de memória da massa é notado em todos os casos estudados.

Tjernberg (2002) apresenta estudo sobre a vida de fadiga para eixos endurecidos, com a iniciação da trinca sob a superfície tratada quando submetido a cargas de torção com variação no espectro de torque e também com o mesmo constante, concluindo que é difícil se alcançar baixas tensões de tração no núcleo e ao mesmo tempo altas tensões de compressão na superfície do eixo. Entretanto os testes de fadiga mostram que a iniciação da trinca sob a superfície pode ser evitada na

maioria dos casos aplicando-se processos adequados no tratamento de endurecimento de superfície.

Sattari-Far (2003) apresenta trabalho sobre o estudo de falhas de eixos de ligação de um transportador tipo helicoidal de uma fábrica de papel onde desenvolve investigação no âmbito de teste de impacto, dureza, metalográfico e fractográfico, concluindo que o brusco rebaixo em trechos de transição de diâmetros em eixos propicia uma alta concentração de tensão localizada tornando-se como uma condição crítica no eixo, sendo que esta característica local atua como ponto de inicialização de trinca na seção transversal do eixo e que a melhora no raio de rebaixo reduzem substancialmente o risco de falhas do eixo.

### 1.3 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Um dos objetivos deste trabalho é estudar as causas fundamentais das falhas e mecanismos com ênfase nas falhas por fraturas dúcteis, frágeis e por fadiga. Além dos mecanismos de falhas em eixos rotativos com similaridade aos encontrados na laminadora de aros, como as aqui estudadas.

O conhecimento das forças atuantes é de fundamental importância para o desenvolvimento do trabalho, visto que além das características geométricas as condições de cargas são fundamentais para uma análise adequada que gere resultados confiáveis.

Com o levantamento em campo das características da peça são construídos modelos virtuais do eixo e através do Método dos Elementos Finitos (MEF) são estudadas as áreas críticas de tensão e deflexão, onde ocorrem as rupturas, e a conseqüente modificação do projeto.

O modelamento utilizando o método dos elementos finitos foi realizado através do programa comercial ANSYS® versão 7.0, disponível na Unesp – Campus de Guaratinguetá.

Este estudo justifica-se pelo fato de estarem acontecendo falhas freqüentes na árvore em questão, somente no ano de 2003 ocorreram quatro falhas, resultando em

perdas de grande monta não apenas devido ao custo da árvore, como também, pela parada do equipamento por vários dias, ocasionando relevantes prejuízos à empresa.

O eixo analisado é de propriedade da MAXION SISTEMAS AUTOMOTIVOS S/A – Cruzeiro – SP, e é utilizado em uma laminadora marca LEIFELD, de procedência Alemã, que é empregada na fabricação de aros de pneus com câmara para caminhões e ônibus.

O estudo é grande interesse para a empresa, pois poderá propiciar ações a serem tomadas visando minimizar a frequência de quebra da árvore.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO. Apresenta uma visão sobre tema e uma pesquisa bibliográfica, onde se observa o estado da arte em referência ao método de elementos finitos, como também, aborda projetos de eixos rotativos.

Capítulo 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS. Apresenta fundamentos teóricos de árvores e eixos e aborda características do equipamento em estudo. São discutidas causas fundamentais das falhas e mecanismos dando ênfase às fraturas dúcteis, frágeis e por fadiga; e fundamentos sobre o método dos elementos finitos.

Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODO AQUISITIVO. Aborda o material da árvore, sua composição química, metalografia, propriedades mecânicas, o experimento de aquisição de dados e a avaliação prática de falhas no eixo da laminadora.

Capítulo 4 - MODELAGEM DA ÁRVORE. Discute a simulação da árvore através da exposição sucinta do programa ANSYS, a construção do modelo onde é abordado o mandril como item de apoio à contribuição de cargas a árvore, bem como o modelamento da própria árvore objeto deste estudo. O pré-processamento onde são definidas as condições geométricas do modelo e elementos utilizados, as propriedades do material e a geração de malhas. Seguindo-se a etapa de solução considerando as condições de contorno e o carregamento. Durante o processamento são coletadas informações obtidas através dos avisos fornecidos pelo programa e com o pós-processador são gerados dados para a análise de tensões.

Capítulo 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS. São apresentados e analisados os resultados, tanto na esfera da simulação como na análise local macrográfica.

Capítulo 6 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS. É destinado às conclusões e propostas para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 LAMINADORA

A máquina à qual pertence o eixo em estudo, Figura 2.1, é uma laminadora de origem alemã, fabricada pela indústria LEIFELD, que trabalha em um processo de deformação a frio, repuxando “*Blanks*” de metal a fim de conformá-los em uma geometria apropriada ao objetivo de se obter aros de rodas (ônibus e caminhões) para pneus com câmara, de diâmetros entre 406,40 mm a 609,60 mm.



Figura 2.1 - Laminadora LEIFELD

Os aros produzidos possuem diversas geometrias em relação às bordas de acabamento e futuros discos a serem soldados a elas. A Figura 2.2 mostra um exemplo de aro laminado pela laminadora LEIFELD.



Figura 2.2 - Aro laminado pela laminadora LEIFELD

A laminadora é composta de uma caixa de engrenagens, Figura 2.3, uma unidade hidráulica, motor elétrico com 100 CV, uma mesa de comando e ferramentas de fabricação dos diversos aros.



Figura 2.3 - Caixa de engrenagem com “nariz da árvore” em primeiro plano

Um componente mecânico de grande importância numa caixa de redução de uma máquina de repuxamento é a árvore. Ela é o último elemento de saída da caixa de

redução. Depois da árvore, vem as ferramentas que se denominam mandris ou rolos, que são fixados na sua extremidade. Denomina-se “nariz da árvore”, Figura 2.4, a extremidade da árvore onde é fixado o mandril. Toda a árvore é apoiada em dois ou mais mancais radiais de rolamentos, juntamente com um mancal axial de rolamento.



Figura 2.4 - Detalhe do “nariz da árvore”

O “nariz da árvore” é a parte da mesma que permite a troca rápida de mandris, sendo constituído de cone para centragem, flange com furos para fixação do mandril, pinos de locação, disco baioneta, etc.

A geometria dimensional do “nariz da árvore” é normalizada pela Deutsche Normen (DIN) ou International Standard Organization (ISO), e a norma que rege a árvore em apreço é a DIN 55027 (1980) ou ISO 702/III (1975), com o título: "*Spindle noses with Centering Taper, Face Plate and Bayonet Type Fastening, Accessories Dimensions*", sendo 15, o tamanho da árvore que está sendo pesquisada.

A Figura 2.5, segundo a norma DIN 55027 (1980) ilustra a montagem em corte da árvore em um cabeçote, com o “nariz da árvore” recebendo a montagem dos componentes: disco baioneta, pino de guia, estojo, porca com colar, flange com furos para fixação do mandril.

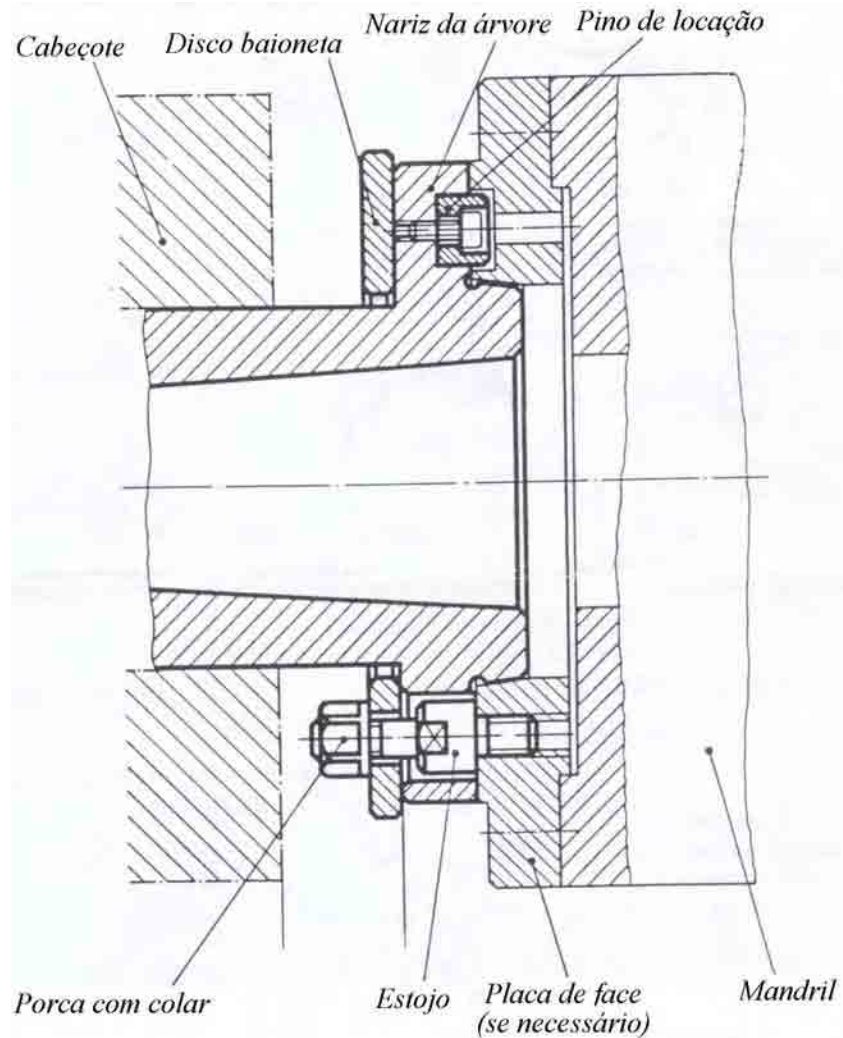


Figura 2.5 - Montagem em corte da árvore num cabeçote

Em uma máquina de repuxamento, com movimento dos rolos por servos cilindros e/ou cilindros hidráulicos e/ou servos motores e fusos de esferas ou planetárias, a árvore é um elemento vital para a transmissão de potência e, como tal nunca deveria se quebrar, ainda que normalmente é bem dimensionada, para garantir precisão e rigidez estrutural ao conjunto do cabeçote na fabricação das peças.

O mandril e suas fixações podem ser vistos na Figura 2.6 .





Figura 2.6 – Mandril e sua fixação ao “nariz da árvore”

As ferramentas utilizadas são compostas de mandris e rolos, Figuras 2.7 e 2.8, que são as responsáveis pela conformação propriamente dita das peças.



Figura 2.7 - Mandril de conformação

Os rolos são responsáveis pela transmissão da força de repuxamento e os mandris são os receptores que darão formato ao modelo da roda em conjunto com os rolos.



Figura 2.8 - Rolos de conformação

A árvore estudada pertence a uma máquina de repuxamento, de uma série de máquinas em linha utilizadas na fabricação de aros para serem montados em rodas para caminhões, médios e pesados, para uso em pneus com câmara, com produção horária atual de 120 peças a 100%.

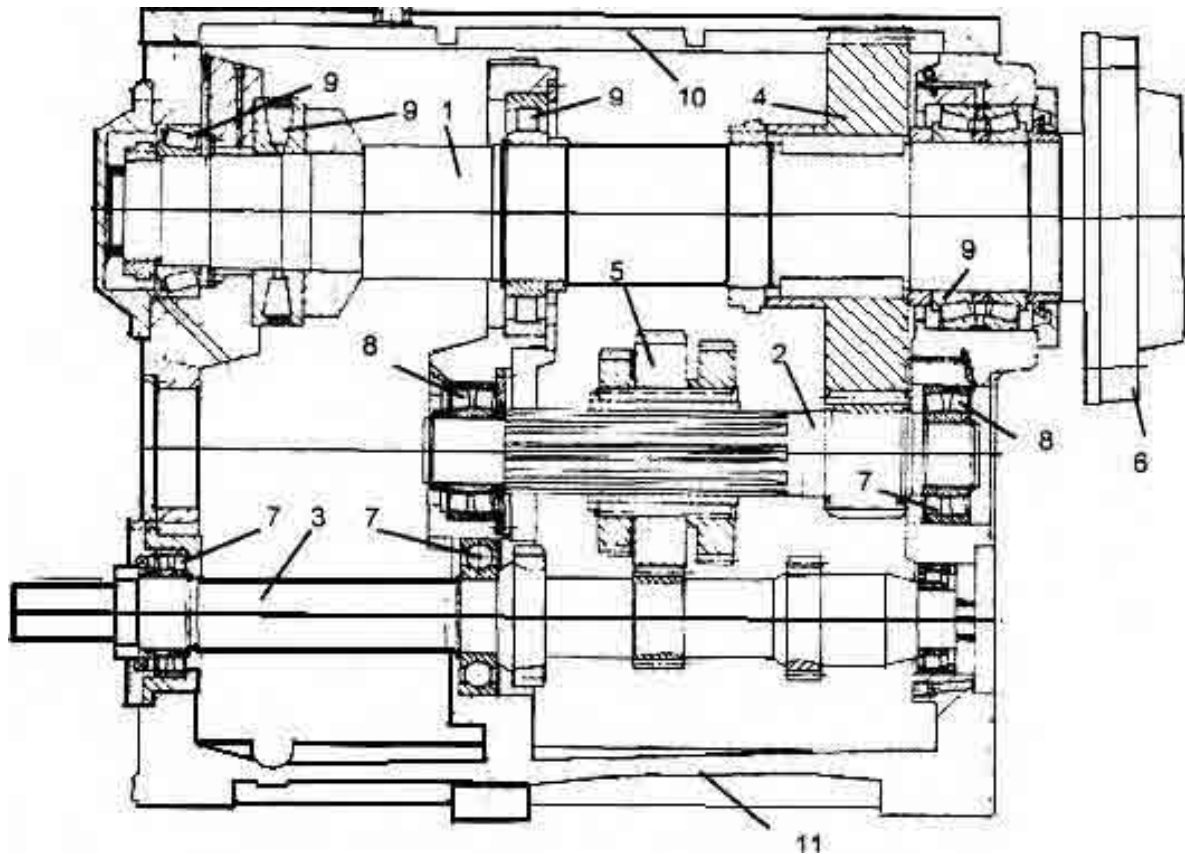


Figura 2.9 - Vista em corte do cabeçote montado (LEIFELD)

A Figura 2.9 mostra os itens que compõem a caixa de transmissão da máquina repuxadeira LEIFELD:

- 1 - Árvore;
- 2 - Eixo pinhão intermediário;
- 3 - Eixo pinhão de entrada;
- 4 - Coroa de saída;
- 5 - Carretel de engrenagens (mudança de marchas);
- 6 - “Nariz da árvore”;
- 7 - Mancais de rolamentos do eixo pinhão de entrada;
- 8 - Mancais de rolamentos do eixo pinhão intermediário;
- 9 - Mancais de rolamentos da árvore;
- 10 - Tampa do cabeçote e
- 11 - Carcaça do cabeçote.

O processo de conformação é composto de três operações básicas de repuxamento executadas em três máquinas distintas da marca "LEIFELD".

São elas:

1<sup>a</sup> Operação: Formação do *Gutter*. *Gutter* é denominado o formato da aba oposta ao repuxamento, muito similar a um rebaixamento em forma curva, Figura 2.10;

2<sup>a</sup> Operação: Estiramento do aro;

3<sup>a</sup> Operação: Levantamento da aba.

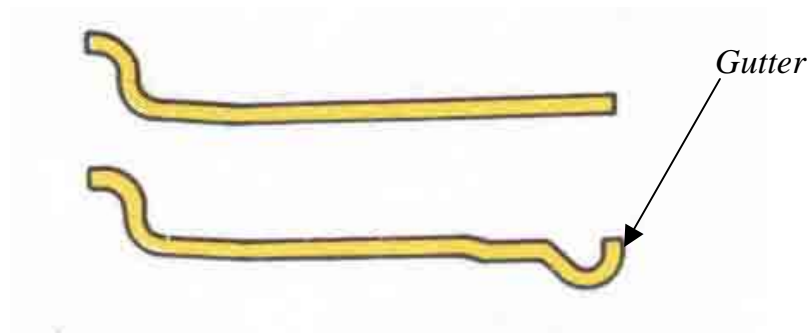


Figura 2.10 - *Gutter* ou perfil já conformado

A peça inicial é uma tira enrolada, soldada e expandida, que servirá para a continuação das operações citadas. Na primeira e segunda operação, o esforço na árvore é de leve flexão e moderada torção; já na terceira operação, a flexão e a torção são altas, apesar da torção ter um pico de cerca de três segundos, sendo a flexão o esforço predominante. Este esforço de flexão alto, associado ao movimento de giro do mandril causa uma flexão rotativa alternada na árvore. O esforço de flexão é alto porque atuam na deformação das peças dois rolos horizontais, montados sobre um carro guiado em prismas, acionados por cilindros hidráulicos, com batentes mecânicos reguláveis. Este carro movimenta-se longitudinalmente também acionado por outro cilindro hidráulico, com batente mecânico que avança e retoma o carro sobre a peça a ser deformada, Figura 2.11. A combinação desses movimentos deforma plasticamente o perfil da peça. Uma combinação dos movimentos de avanço e retomo dos rolos, juntamente com o movimento de avanço e retomo do carro e mais giro do mandril com a peça presa, geram a deformação plástica na peça (SIQUEIRA, 2002).

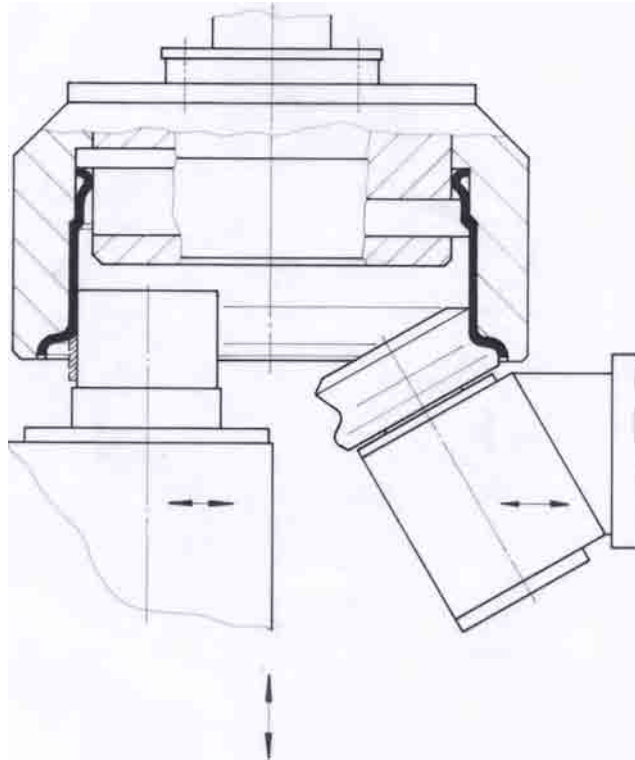


Figura 2.11 - Vista superior do cabeçote, rolos e mandril

Como referência a registros, foi pesquisado o histórico de quebras da máquina, onde se constatou por relatos de funcionários que anterior a 1985 existiram quebras, porém não foram registradas, após esta data as árvores vieram a fraturar-se:

- Em 1985 ocorreram duas quebras (porém exames de laboratório constataram que a primeira árvore era de material ABNT 5120, quando o especificado era ABNT 4340 e os níveis de produção eram de cerca de 14.000 peças/mês).
- Em 1990 ocorreu nova quebra, esta árvore sofreu apenas uma mudança em relação a sua dureza, após sua quebra, sua geometria foi também modificada.
- Em fevereiro e julho de 2000 ocorreram novas quebras.
- Nos meses de fevereiro, março, agosto e setembro de 2003 após tratamentos superficiais como “*Shot Peening*” a árvore voltou a apresentar quebras.

## 2.2 ÁRVORES E EIXOS

Um eixo é um elemento de máquina que possui movimento rotacional e é suportado por mancais e/ou rolamentos. Estes possuem a propriedade de transmitir energia cinética que geram torque.

Os eixos usualmente são cilíndricos e podem ser sólidos ou vazados.

Denominamos de árvores os eixos que possuem a propriedade de transmitir a energia de torção a outros eixos do equipamento, não obstante é possível encontrar-se eixos de outros formatos (i.e. quadrados, sextavados, etc.).

Os eixos são dimensionados através do critério de tensão ou deformação (DOUGHTIE, 1964).

Tipicamente um eixo de transmissão está sujeito a um torque constante gerando uma tensão torcional média em conjunto com uma carga de flexão reversa produzindo uma tensão de flexão alternada.

Os eixos devem ser projetados tais que as deflexões estejam dentro de limites aceitáveis, além de satisfazer as tensões de dimensionamento, como limite de elasticidade, escoamento, ou outro critério específico; deflexões laterais excessivas podem prejudicar engrenamentos e produzirem ruídos (inconvenientes).

Em eixos rotativos apoiados em engrenagens é interessante, sempre que possível, que o eixo seja suportado por dois rolamentos provendo suportes radiais, suficientes aos limites de flexão e flambagem dentro de valores aceitáveis; condição esta muito desejável a qual simplifica a fabricação dos componentes. Caso três ou mais rolamentos precisem ser usados a fim de fornecer um maior suporte e rigidez, o eixo deverá possuir então alinhamento muito preciso a fim de se alcançar um suporte adequado à estrutura a ser mantida.

Os cubos são anexados aos eixos de diversas maneiras, tais como através de chavetas ou pinos. Os pinos podem ser usados para transmitir cargas axiais e circunferências, pois são de baixo custo atingindo os objetivos adequados para cargas de baixa intensidade.

### 2.2.1 Dinâmica de eixos rotativos

Os eixos devem ser projetados para evitar operações em velocidades críticas, isto usualmente significa fornecer rigidez lateral suficiente para colocar a mais baixa velocidade crítica significativamente acima da faixa de operação.

Quando flutuações torcionais são encontradas, um esforço dinâmico adicional é imposto. As frequências naturais do eixo devem estar bem distanciadas da frequência de operação. Isto usualmente significa fornecer rigidez suficiente a fim de fazer com que as mais baixas frequências naturais fiquem acima das frequências de trabalho, tentando deixar as frequências perturbadoras sempre que possível mais altas.

Com respeito às vibrações laterais e velocidades críticas, na prática da fabricação e operação de eixos procura-se sempre a não coincidência do centro de massa com o centro de rotação, portanto à medida que a velocidade do eixo aumenta, a força centrífuga atuando no centro de massa tende a aumentar, fletindo o eixo, sendo que tanto maior será a curvatura do eixo quanto maior a excentricidade e a força centrífuga.

Abaixo da mais baixa velocidade crítica de rotação, as forças elásticas do eixo com a força centrífuga se equilibram em uma deflexão finita do mesmo.

Já na velocidade crítica, teoricamente o equilíbrio requer um deslocamento infinito do centro de massa.

O amortecimento advindo de rolamentos de compensações (na massa) e histereses dentro do membro rotacional leva o equilíbrio a ocorrer em um deslocamento finito (JUVINALL, 1991).

Entretanto este deslocamento é freqüentemente grande suficiente para quebrar o eixo ou causar forças de rotação no rolamento em uma magnitude se não destrutiva, são altamente questionáveis.

Rotações suficientemente acima das velocidades críticas resultam em uma posição de equilíbrio satisfatório, através da movimentação do centro de massa em direção ao centro de rotação. Em situações não usuais, como em algumas turbinas de alta velocidade, a operação satisfatória é alcançada pela rápida passagem pela velocidade crítica, sem dar tempo suficiente para um equilíbrio de deflexão ser

alcançado e então rodar bem acima da velocidade crítica. A velocidade crítica de rotação é numericamente a mesma da frequência natural de vibração lateral, a qual é induzida quando a rotação é interrompida (parada) e o centro do eixo deslocado lateralmente, e então respectivamente liberado.

### 2.2.2 Visão geral de projeto de eixos

Os princípios gerais seguintes devem ser mantidos em mente.

1. Manter os eixos tão curtos quanto possível, com os rolamentos mais próximos possível de onde as cargas serão aplicadas. Isto reduz deflexões e os momentos fletores e aumenta as velocidades críticas;
2. Se possível, posicionar concentradores de tensão longe de regiões com altas tensões no eixo. Se não for possível, use grandes raios e bom acabamento superficial;
3. Use aços de baixo custo para eixos com deflexão crítica, pois todos os aços têm essencialmente o mesmo módulo de elasticidade;
4. Quando o peso for crítico, considere eixos ocos, por exemplo, eixo de hélices ou eixos traseiros de carros são feitos de tubos a fim de obter a relação rigidez – baixo peso, necessário para manter velocidades críticas acima da faixa de operação.

As máximas deflexões permissíveis de um eixo são normalmente determinadas pela velocidade crítica, engrenamentos ou exigências de rolamento. Exigências de velocidade crítica variam grandemente com a aplicação específica. Deflexões permissíveis de eixos para satisfatório desempenho de engrenagens e rolamentos variam com projeto e com a aplicação, mas os itens a seguir podem ser usados como um guia geral.

1. Deflexão não deveria causar a separação de dentes casados de engrenagem mais do que aproximadamente 0,13 mm, nem deveriam causar a inclinação relativa do dente da engrenagem mudando-a mais que cerca de 0,03°;



2. A deflexão do eixo em um plano de rolamento deve ser pequena comparada à espessura do filme de óleo. Se a deflexão angular do eixo no rolamento for excessiva, o eixo travará a menos que o rolamento seja fixo firmemente;
3. A deflexão angular em um rolamento de esferas ou rolos não deve exceder a  $0,04^\circ$  a menos que o rolamento seja autocompensador.

Adicionalmente, deflexões torsionais devem ser consideradas devido a requisitos de frequências naturais e limitações necessárias sobre deflexões torsionais.

Em princípio, uma estimativa é feita em qualquer projeto de um eixo se o fator crítico será a tensão ou a deflexão. Um projeto preliminar é baseado sobre estes critérios, então o critério remanescente ou tensão ou deflexão é verificada. (JUVINALL, 1991).

### 2.3 CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHAS

A análise de falhas de componentes mecânicos é um dos aspectos mais importantes da engenharia, estabelecendo-se as causas de falhas fornece-se informações para melhoria no projeto, procedimentos de operação e uso de novos componentes.

As causas fundamentais de falhas são classificadas como:

- Falhas de projeto;
- Falhas na seleção de materiais;
- Imperfeições no material;
- Deficiência de fabricação;
- Erros de montagem ou instalação;
- Erros de operação ou manutenção inadequada.

As falhas de projeto são muito comuns, neste item devem ser abordados pontos fundamentais do projeto, como o tamanho e formato da peça, materiais utilizados e suas propriedades, sejam elas mecânicas ou físico-químicas, estas características são usualmente determinadas pela análise de tensões e restrições geométricas da peça; já

quanto ao material se refere, à composição química e ao tratamento necessário para alcançar as propriedades desejadas estão relacionadas, não só a análise de tensões, mas também a outras propriedades como resistência a corrosão, resistência à abrasão etc.

As falhas na seleção do material são latentes, pois o material é a base de toda estrutura, podendo-se considerar como erros básicos utilizar materiais dúcteis em lugar de frágeis ou mesmo materiais não resistentes à corrosão em ambientes quimicamente agressivos, por exemplo, alumínio para revestimentos, tanques de ácido clorídrico em lugar de aços inox ou outro tipo de material alternativo, ou seja o meio ambiente deve ser levado em consideração para evitarmos a escolha de materiais inadequados.

Brooks (2002) cita que em investigações industriais a maior frequência de causas de falhas é a seleção inadequada de materiais, perfazendo um total de 38% do total das causas pesquisadas.

Imperfeições dos materiais geram falhas internas e externas reduzindo a resistência mecânica, servindo como caminhos preferenciais para propagação de trincas ou proporcionam locais para início de corrosões localizadas. As imperfeições no material estão intimamente ligadas a falhas de processamento durante a fabricação da matéria prima para construção dos componentes. Algumas causas podem ser relacionadas como:

- Falhas devidas a inclusões e impurezas, imperfeições na composição metalúrgica do material;
- Defeitos originários devido às caixas de vazamento e ao próprio vazamento do metal como porosidades, inclusões não metálicas e capilaridades;
- Defeitos devido a trabalhos posteriores à fundição como deformação plástica local, laminações excessivas do metal;
- Defeitos por soldas como porosidade, trincas, falta de penetrações, mudança das características necessárias devido a zona afetada pelo calor;
- Anormalidade devido a tratamentos térmicos como sobre-aquecimento, crescimento de grãos excessiva retenção de austenita;
- Trincas devido a endurecimentos como ciclos de aquecimento inadequados.

Deficiências de fabricação são falhas que ocorrem no processamento do material durante a fabricação do componente, como por exemplo, a conformação a frio produz altas tensões residuais que podem comprometer o comportamento da peça quando sujeita a carregamentos cíclicos, marcações para identificações através de endentações são fontes potenciais de falhas se realizadas em região altamente tensionada, decapagens ácidas e deposição eletrolítica são reconhecidas como uma fonte de hidrogênio e da subsequente fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência.

Erros de montagem e instalação envolvem fatores como não colocação de rebites ou pinos, ou utilizar lubrificantes incorretos, são ocorrências frequentes muitas vezes ligadas a erros humanos, que podem ser evitados através de adoção de procedimentos, treinamentos e auditorias.

Erros de operação e manutenção inadequadas são também frequentes, pois as manutenções vão desde uma pintura superficial até a limpeza e lubrificação, e sua negligência pode levar ocasionar falha.

Existe a possibilidade da falha ocorrer por mau funcionamento de alguma outra parte do sistema devido a substituição do componente que falhou por outro que atuará sob condições para as quais não foi projetado.

A operação do equipamento sob condições severas como carga e velocidade excessivas, temperatura inadequada e meio ambiente agressivo contribui para falhas, muitas vezes o equipamento é projetado para utilizar uma espessura de chapa e sua operação é feita com espessuras maiores que as projetadas levando a uma sobrecarga, isto é muito comum em prensas, laminadoras e similares.

A análise de uma falha deve consistir em percorrer a história do equipamento ou componente em sentido inverso até atingir um ponto onde será possível implementar ações preventivas que evitarão sua repetição.

## 2.4 MECANISMOS DE FALHA

Os mecanismos de falhas são abordados na literatura especializada de vários modos. Neste trabalho a ênfase é dada aos mecanismos envolvendo fraturas dúcteis, frágeis, e fraturas por fadiga. São também comentadas as falhas por deformações,

desgastes, corrosões, incrustações, deteriorizações de elastômeros, sendo que não se pode deixar de mencionar os critérios de Dieter.

Dieter (1991) identifica os seguintes modos de falhas em componentes mecânicos:

1. Deformação elástica
2. Escoamento
3. Endurecimento ou amolecimento
4. Fratura dúctil
5. Fratura frágil
6. Fadiga
  - a. Fadiga de alto ciclo
  - b. Fadiga de baixo ciclo
  - c. Fadiga térmica
  - d. Fadiga superficial
  - e. Fadiga por impacto
  - f. Corrosão-fadiga
  - g. Fadiga por fricção
7. Corrosão
  - a. Ataque químico direto
  - b. Corrosão galvânica
  - c. Corrosão sob contato
  - d. Corrosão puntiforme
  - e. Corrosão intergranular
  - f. Corrosão seletiva
  - g. Corrosão sob erosão
  - h. Cavitação
  - i. Fragilização por hidrogênio
  - j. Corrosão biológica
  - k. Corrosão sob tensão
8. Desgaste
  - a. Desgaste por adesão

- b. Desgaste por abrasão
  - c. Desgaste por corrosão
  - d. Desgaste por fadiga superficial
  - e. Desgaste por deformação
  - f. Desgaste por impacto
  - g. Desgaste por fricção
9. Impacto
- a. Fratura por impacto
  - b. Deformação por impacto
  - c. Desgaste por impacto
  - d. Fricção com impacto
  - e. Fadiga sob impacto
10. Fricção
- a. Fadiga por fricção
  - b. Desgaste por fricção
  - c. Corrosão sob fricção
11. Engripamento e atrito mútuo
12. Formação de escória
13. Fluência
14. Sobrecarga (ultrapassagem da tensão de ruptura)
15. Choque térmico
16. Relaxação térmica
17. Efeito combinado de fadiga e fluência
18. Flambagem
19. Flambagem por fluência
20. Oxidação
21. Fragilização por radiação
22. Falha na colagem
23. Esfoliação
24. Erosão

Percebe-se que muitos modos de falha descritos por Dieter (1991) são combinações de dois ou mais eventos como corrosão-fadiga, por exemplo. As origens destes fenômenos já foram bem estudadas e são conhecidas ações preventivas para minimizar a ocorrência de falhas em componentes mecânicos.

Ross (1995) propõe outro critério, o qual indica que existem seis grandes mecanismos a serem considerados em uma investigação sobre falhas.

São eles:

- Tensão de tração, que abrange fadiga, flexão, fraturas frágeis e dúcteis, e é considerado o mais comum mecanismo de falha;
- Compressão a qual raramente resulta em fratura, mas pode causar distorção;
- Cisalhamento a qual inclui a ação tipo guilhotina. A face da fratura identificará o detalhe característico do mecanismo de falha;
- Corrosão, contaminação e degradação. A corrosão pode resultar na retirada de atividade do componente, pois ele pode não ser mais adequado ao propósito de uso. A corrosão propriamente dita pode iniciar um processo de fadiga ou tornar-se um amplificador de tensões para a fratura frágil;  
Já as contaminações podem afetar os produtos em contato com a superfície causando a corrosão no metal e ataque superficial nos não metais. Pode gerar abrasões quando a contaminação é intensa. A degradação é o resultado de uma mudança química influenciada pelo calor ou luz;
- Abrasão, desgaste e erosão. Isto ocorre onde excessivos movimentos, contaminações, aquecimentos são identificados resultando em fraturas, separações ou desempenhos pobres;
- Mecanismos térmicos de falhas onde componentes são sujeitos a temperaturas acima ou abaixo das especificadas podendo modificar a estrutura do material e suas dimensões.

Identificação de tipos de fratura.

Podem-se classificar as fraturas segundo:

a) Condições de carregamento

a.1) Fratura por sobrecarga que é a resultante de um aumento de carga em uma taxa baixa ou moderada até sua ruptura;

a.2) Fratura por impacto que é quando a carga é elevada rapidamente;

a.3) Fratura por tensão ruptura que é produzida por cargas estáticas aplicadas;

a.4) Fratura por fadiga que é produzida por cargas cíclicas aplicadas. Os sistemas de tensões atuantes sobre o material são discutidos como compressão, flambagem, torção e cisalhamento direto e em caso de elementos de máquinas tensão por contato. Termos adicionais como taxa de tensão, tensões médias são utilizadas para descrever sistemas de tensão associados a cargas cíclicas (fadiga);

b) Taxa de crescimento de trincas

Trincas que crescem a uma taxa baixa de propagação, geralmente menos que 6m/s são conhecidas como trincas lentas e de crescimento estável, que se desenvolvem somente enquanto uma carga externa é aplicada. Já trincas instáveis propagam-se a uma taxa de crescimento igual ou superior a 300m/s. Esta trinca rápida tem continuidade sob tensão interna elástica sem a necessidade de uma carga externa aplicada contínua e pode levar a uma falha frágil catastrófica da estrutura;

c) No exame macroscópico a aparência macroscópica de uma superfície fraturada é descrita em termos de reflexão de luz (brilhante e cinza) e em termos de textura (suave, rugosa, cristalina ou opaca, granular ou fibrosa). O modo da fratura depende do sistema de tensão, como por exemplo, a fratura de face cisalhada promovida através de um plano de tensão de cisalhamento;

d) Exame microscópico mostra que a topografia de uma fratura dúctil é caracterizada por inúmeros vales (*Dimples*) que se originam pela nucleação e crescimento de microvazios em um segundo nível de partículas na microestrutura do material. A fratura frágil em níveis microscópicos é caracterizada por facetas de clivagem as quais são limitadas pelos tamanhos

dos grãos do material. Em ambos os casos, o caminho da fratura é transgranular. Fraturas por fadiga também seguem um caminhamento transgranular, a superfície fraturada é distinguida pela presença de estrias.

#### 2.4.1 Fratura dúctil

É aquela em que a seção resistente se reduz, por deformação plástica, a um ponto ou linha na forma de um gume de faca (*Chisel Edge*). Não se trata, portanto, de um caso de fratura propriamente dita, mas de deformação plástica contínua levada até às últimas conseqüências. Esta ruptura se observa em corpos de prova de espessura ou diâmetro reduzido de metais de elevada pureza.

A fratura dúctil propriamente dita ocorre com apreciável deformação plástica macroscópica, ainda que a redução de área não atinja sua totalidade, formando-se uma superfície de fratura com características próprias.

Ruptura dúctil é o modo de fratura associada à deformação plástica extensiva e se caracteriza microscopicamente pela presença de alvéolos (*Dimples*), que são microcavidades formadas a partir de vazios, inclusões ou partículas de segunda fase, dando à fratura um aspecto macroscópico rugoso e opaco. Aspectos microscópicos da ruptura dúctil são apresentados nas Figuras 2.12 e 2.13 (HEIN, 2003).

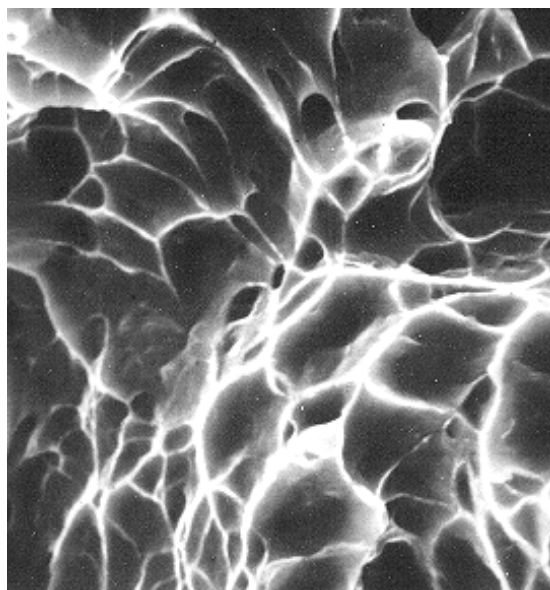


Figura 2.12 - Formação de “*Dimples*” na fratura por tração quase-estática da liga Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (MEV, 4000X) (HEIN, 2003)



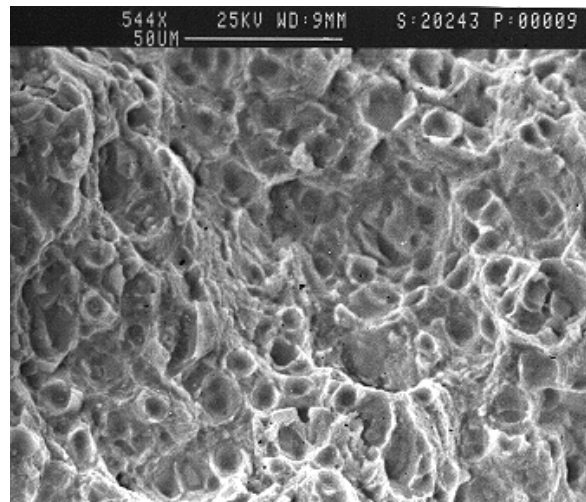


Figura 2.13 - Formação de “*Dimples*” na liga Al-2024 T3, na região de ruptura final de uma peça rompida por fadiga (HEIN, 2003)

Quando não se percebe deformação plástica anterior à fratura, induz-se a concluir que a quantidade de energia necessária ao rompimento das ligações metálicas é relativamente baixa. Entretanto quando existe a deformação plástica anterior à fratura, conclui-se que uma maior quantidade de energia foi empregada para a fratura.

Autores, como Atkins e Mai (1980) tentam relacionar este princípio ao comportamento da tenacidade do material medida por ensaios de tração. Neste conceito, materiais com alta tenacidade (que se deformam plasticamente antes de fraturar) apresentam fratura dúctil, enquanto que materiais com baixa tenacidade sofrem fratura frágil, Figura 2.14, uma vez que não se verifica, macroscopicamente, a estricção do corpo de prova. Na prática, segundo estes autores, um processo de fratura frágil seria reconhecido quando conseguíssemos montar novamente duas partes fraturadas (como no caso de um vaso de cerâmica quebrado), enquanto que não faríamos o mesmo na fratura dúctil (como no caso de uma lata de sardinhas aberta), (HEIN, 2003).

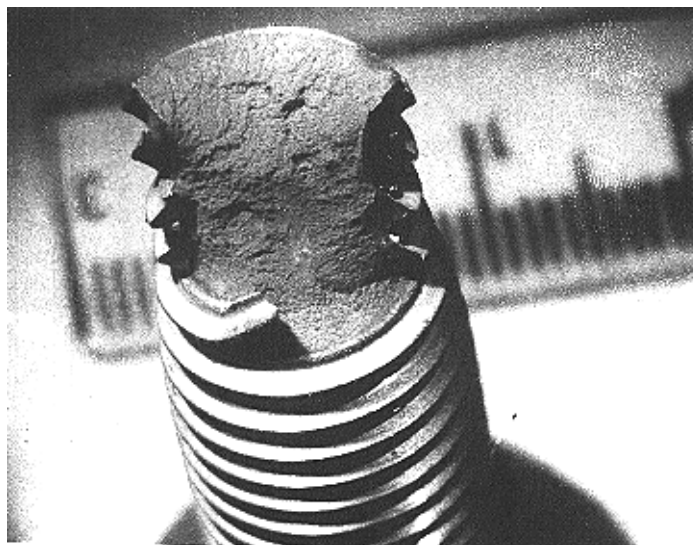


Figura 2.14 - Aspectos macroscópicos da fratura dúctil por sobrecarga longitudinal em parafuso de aço ligado (HEIN, 2003)

Falhas em serviço de componentes metálicos raramente ocorrem por este processo, entretanto, as grandes deformações a que são submetidos metais e ligas durante os processos da conformação, tais como, laminação, extrusão, trefilação, estampagem, etc. podem provocar este tipo de fratura. Além disso, componentes que apresentam fratura dúctil numa falha múltipla ocorrida em serviço sem que se constate erro grosseiro na seleção do material é, freqüentemente, indicação que o componente não foi o primeiro a fraturar, tendo sofrido sobrecarga em consequência da falha de outros componentes do sistema.

Portanto a fratura dúctil caracteriza-se pela aplicação de carga excessiva a um metal que tem a propriedade de se deformar permanentemente, ou seja, plasticamente antes de se fraturar. Esta característica de absorver energia é uma propriedade valiosa do metal dúctil.

Observando-se corpos de prova a tração, pode-se distinguir as principais características das superfícies da fratura dúctil. A zona fibrosa, a zona radial e a zona de cisalhamento, Figura 2.15 (CETLIN,1998).

O início da fratura dúctil ocorre na zona fibrosa, correspondente a propagação estável da fissura, a denominação fibrosa é devido ao aspecto fibroso não orientado ou apresentar uma série de linhas circunferenciais.

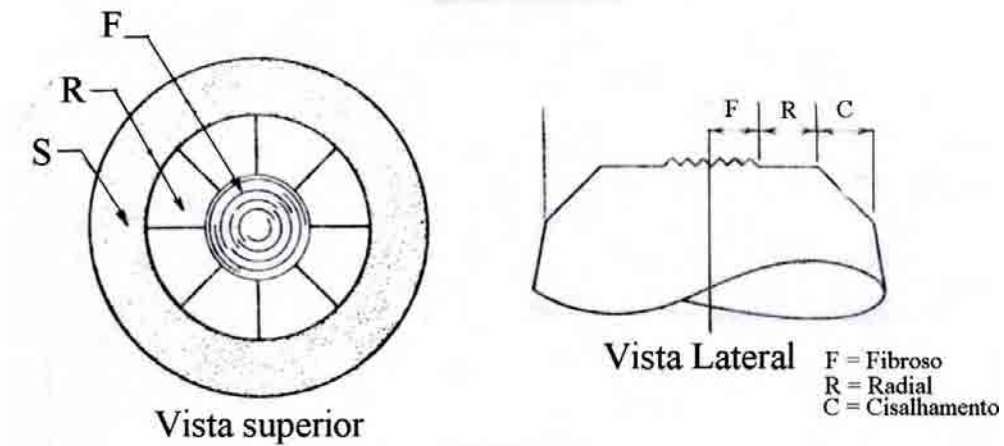


Figura 2.15 - Localização esquemática das zonas características da fratura de um corpo de prova de tração cilíndrico (CETLIN, 1998)

A zona radial corresponde à propagação instável da fratura. As marcas radiais se iniciam na periferia da zona fibrosa ou no ponto de nucleação das trincas, e podem apresentar aspectos grosseiros, em geral quanto mais grosseiro as marcas radiais maior a tenacidade do material.

A zona de cisalhamento se forma em consequência do alívio de tensões triaxiais com a proximidade da superfície e caracteriza-se pela inclinação de aproximadamente 45°, Figura 2.16 (a), em relação ao eixo de tração.

Como fator relevante, as forças de tração desenvolvem inicialmente microvazios nas proximidades do centro do corpo de prova e então se espalham na proximidade do mesmo, impondo um maior carregamento de tensões às áreas contíguas, pois a seção transversal sofre uma redução de área (WULPI, 1991).

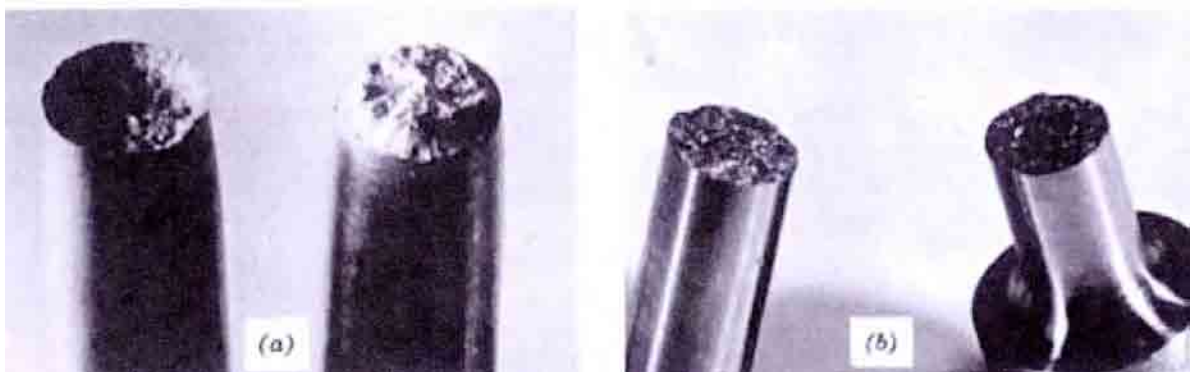


Figura 2.16 - (a) Fratura em forma de taça e cone em alumínio, (b) Fratura frágil em aço temperado (CALLISTER, 1994)

### 2.4.2 Fratura Frágil

É aquela que apresenta pouca ou nenhuma deformação plástica em relação à análise macroscópica. Materiais como giz, gesso, tijolo cerâmico e rochas são exemplos clássicos de materiais frágeis, porém deve-se ressaltar que o vidro é um material frágil à temperatura ambiente, entretanto considerando-se o vidro em temperaturas elevadas pode-se notar que a ductilidade faz-se presente, tornando-o facilmente moldável.

Em geral os metais com alta dureza são frágeis, Figura 2.17. As literaturas especializadas relatam casos de acidentes nos quais a fragilidade do metal foi a causa de várias catástrofes, tais como o desastre do grande tanque de melaço de Boston, em 15 de janeiro de 1915. HERTZBERG (1996) relata que um enorme tanque de melaço de 27 metros de diâmetro por 15 metros de altura rompeu-se catastróficamente despejando 7,2 milhões de litros sobre as ruas de Boston – Estado de Massachusetts - EUA. Relatos da época informam que em um instante, sem avisos prévios ou deformações notáveis a tampa superior foi lançada ao ar e sua lateral foi partida em duas partes, uma das partes do tanque chocou-se contra uma edificação soterrando vários trabalhadores, outra parte chocou-se contra uma corporação de bombeiros matando e ferindo um grande número de bombeiros e ao cair uma das partes se projetou contra a coluna de sustentação do elevado ferroviário da Boston Elevated Railway Co., esta coluna foi destruída e os trilhos desalinham-se quando a superestrutura desabou vários metros. Doze pessoas perderam a vida afogadas em melaço ou atingidas pelos destroços.



Figura 2.17 - Parafuso da tampa de uma válvula de turbina (HEIN, 2003)

Outro caso mais recente de fratura frágil foi o do colapso da ponte Silver Bridge em Point Pleasant, no Estado de West Virginia – EUA em 1967, resultando a perda de 46 pessoas que estavam em carros que foram lançados nas águas do rio Ohio, este desastre foi atribuído a trincas por corrosão resultados da exposição a sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), pois quantidades anormais de enxofre foram encontradas sobre a superfície primária da fratura.

As ocorrências de fatores simultâneos em metais normalmente dúcteis podem causar falhas frágeis, ou seja, quando estão presentes concentradores de tensão, tensões no limite elástico e baixa temperatura no que tange ao aço. A ausência de uma destas condições evita que a fratura frágil ocorra, entretanto, na realidade é extremamente difícil que não ocorra um destes fatores, os concentradores de tensão estão presentes na maioria dos projetos e peças, tais como furos, entalhes, etc. Tensões no limite elástico podem ocorrer durante o carregamento da peça ou estrutura e a temperatura pode ser controlada em algumas aplicações, porém, em muitas delas é uma variável externa ao sistema.

As características que compõe as fraturas frágeis são:

- ▶ Não existe deformação plástica ou permanente na região da fratura, as partes fraturadas podem ser encaixadas com facilidade após a fratura;
- ▶ A superfície da fratura é perpendicular à tensão principal de ruptura;
- ▶ Marcas características se fazem presentes na superfície da fratura, muitas vezes indicando a origem da fatura.

## 2.5 ANÁLISE DE FALHAS EM EIXOS

### 2.5.1 Introdução

De maneira bem genérica um eixo é uma barra de metal usualmente cilíndrica, muitas vezes sólida, utilizada para suportar elementos rotativos e transmitir potência ou movimento por rotação ou movimentos axiais. Os eixos podem ser submetidos a trabalhos em ambientes agressivos como ambientes corrosivos, baixas temperaturas ou mesmos como em turbinas a gás sujeito a altíssimas temperaturas.

A literatura de modo geral indica que o problema mais freqüente em falhas de eixos é devido à fadiga.

A fadiga se inicia no ponto mais vulnerável em uma área de tensão, tipicamente em um concentrador de tensões, que pode ser mecânico, metalúrgico ou ambos.

Os concentradores de tensão mecânicos são os furos, chavetas, rebaixos, e demais características geométricas que a peça possa ter onde propicie um acúmulo de tensões. Os eixos geralmente quebram em bordas tensionadas ou pré-tensionadas. Já os concentradores de tensão metalúrgicos podem ser os pontos de corrosão localizadas chamadas de “*Pits*”, inclusões não metálicas nos grãos e outros.

Fraturas frágeis são particularmente encontradas em ambientes de temperatura baixa ou como resultado de impactos ou de rápida aplicação de cargas excessivas. Fraturas frágeis podem ser atribuídas à escolha inapropriada do material devido ao desconhecimento das condições de operação e meio ambiente ou mesmo abuso ou mau uso de produtos sobre condições de serviço para o qual ele não foi projetado.

Fratura dúctil de eixos é geralmente causada por sobrecarga acidental, e é relativamente rara em condições normais de operação. O escorregamento, uma forma de distorção em elevadas temperaturas, pode levar a ruptura e pode também causar aos eixos uma menor tolerância a falhas devido a mudanças excessivas em dimensões críticas.

A origem das fraturas em eixos origina-se em pontos de concentração de tensão ou inerentes ao projeto ou introduzidos durante a fabricação ou operação. O mau posicionamento de eixos, denominado desalinhamento é uma causa muito freqüente de quebras, pois sujeita o eixo a tensões não previstas em projeto.

### **2.5.2 Sistemas de tensão atuantes em eixos**

Os sistemas de tensão atuantes sobre um eixo devem ser entendidos claramente antes da causa de uma fratura ser entendida e determinada. Ambos os comportamentos, dúctil e frágil, sob condições estáticas ou simples sobrecarga, como também as características da superfície de fratura, produzidas por este tipo de comportamento devem ser propriamente entendido para uma análise adequada. A Figura 2.18 mostra de forma simplificada um diagrama bidimensional de corpo livre ilustrando as

orientações da tensão normal e tensão de cisalhamento em um ponto de um eixo sob carregamento puro de tensão, compressão e torção. Também o comportamento de uma fratura de sobrecarga para matérias dúcteis e frágeis é apresentado.

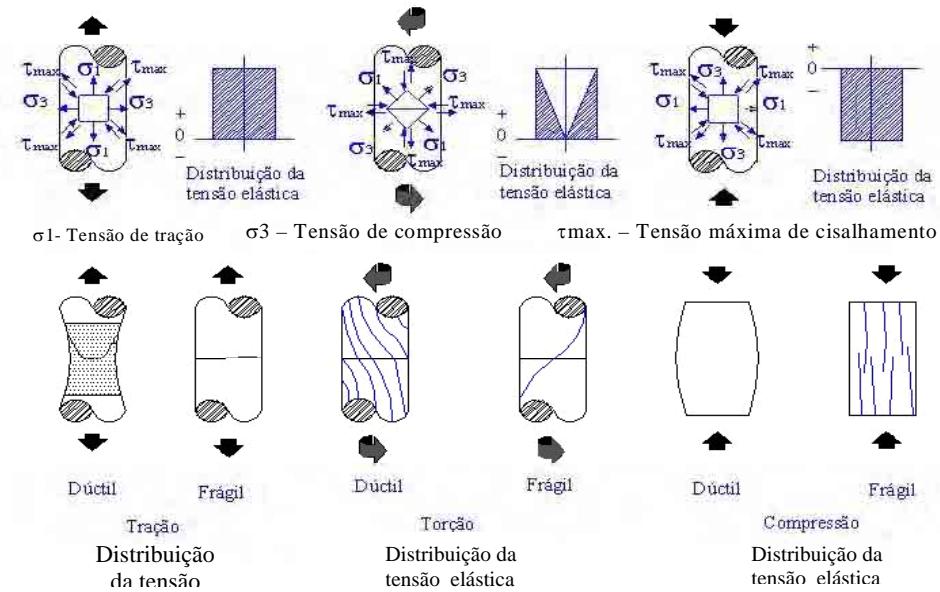


Figura 2.18 - Diagrama de corpo livre mostrando a orientação das tensões em um eixo e o comportamento dúctil e frágil de materiais em fratura (WULPI, 1991)

Um sistema de tensão de um corpo livre pode ser considerado como um quadrado de dimensões infinitesimais. As tensões de tração e compressão atuam perpendiculares entre si a fim de comprimir e tracionar os lados, respectivamente. A tensão de cisalhamento age nas diagonais do quadrado, a 45° da tensão normal.

Sob o carregamento, a tensão de tração  $\sigma_1$  é longitudinal, enquanto que a componente de compressão,  $\sigma_3$ , é transversal à linha de eixo. A componente de tensão máxima de cisalhamento,  $\tau_{max}$ , está a 45° da linha do eixo.

Em materiais dúcteis as tensões de cisalhamento desenvolvidas por tensões de tração causam consideráveis deformações, alongamentos e estreitamentos chamados de "pescoço", antes da fratura, a qual origina-se perto do centro do eixo e se propaga através da superfície terminando em forma cônica com planos laterais usualmente com cerca de 45° em relação à linha de eixo. Já em materiais frágeis uma fratura por tração é grosseiramente perpendicular à direção da tensão de tração, porém envolve pouca ou

nenhuma deformação permanente. A superfície da fratura é usualmente rugosa e de aparência cristalina.

Na torção o sistema de tensão roda a  $45^\circ$  quando o eixo é carregado, Figura 2.18, ambas as tensões de compressão e tração são a  $45^\circ$  da linha de eixo longitudinal e permanecem mutuamente perpendiculares. As componentes de cisalhamento são paralelas à linha de eixo longitudinal e perpendicular ao mesmo.

Em materiais dúcteis que falham por torção processa-se uma considerável deformação antes da ruptura devido às tensões de cisalhamento embora esta deformação não seja muito óbvia devido a forma do eixo não se alterar, ela se torna mais visível quando o eixo possui encaixes ou entalhes. Em torções puras o final da fratura do eixo se localiza em seu centro.

Em materiais frágeis a ruptura se dá perpendicular a componente de tração, ou seja, a  $45^\circ$  da linha de eixo longitudinal, resultando em sua superfície em um formato de uma espiral. Na distribuição de tensão elástica em torção pura a distribuição de tensão ao longo da superfície transversal do eixo apresenta o maior valor próximo à superfície externa e valor nulo na linha de centro longitudinal do eixo.

Em carregamentos a compressão, o sistema de tensão roda tal que a tensão de compressão,  $\sigma_3$ , é axial e a tensão de tração,  $\sigma_1$ , é transversal. A tensão de cisalhamento,  $\tau_{\max}$ , está a  $45^\circ$  do eixo longitudinal, como no carregamento de tensão axial.

Em materiais dúcteis a sobrecarga causa uma considerável deformação, porém usualmente não resulta em fratura, o eixo se encurta e se estufa lateralmente, Figura 2.18, devido a influencia das tensões de cisalhamento. Já em materiais frágeis se ele não estufar lateralmente irá então fraturar perpendicular à máxima tensão de tração, devido a componente de tração ser transversal à direção da fratura será paralela ao eixo longitudinal.

Quando um eixo é submetido a flexão, a superfície convexa é tracionada e a superfície côncava é comprimida, entre as duas superfícies, côncava e convexa está a linha neutra onde todas as tensões são zero.



### 2.5.3 Falhas por fadiga

A fadiga em eixos pode ser classificada em 3 subdivisões básicas:

- Fadiga por flexão;
- Fadiga por torção;
- Fadiga axial.

A fadiga por flexão pode resultar de carregamentos unidirecionais, carregamentos reversos, e rotação. Na flexão unidirecional, a tensão em qualquer ponto é flutuante, ou seja, a flutuação de tensão é referente à mudança da magnitude sem, entretanto, haver mudança algébrica de sinal, já na flexão alternada e na rotação a tensão em qualquer ponto se alterna, esta alternância se refere à mudança de sinal algébrico ciclicamente, ou seja, tensão (+) para compressão (-) ou vice versa. A fadiga torcional pode resultar da aplicação da alternância ou flutuação de um torque. A fadiga axial resulta da aplicação de carregamentos alternados (tensão e compressão).

A fadiga a flexão pode ser determinada por características peculiares, tais como marcas de praia também chamadas de “*Clamshells*”, são indicativos de uma trinca de fadiga originária de tensões nominais elevadas ou não, conforme indicadas na Figura 2.19.

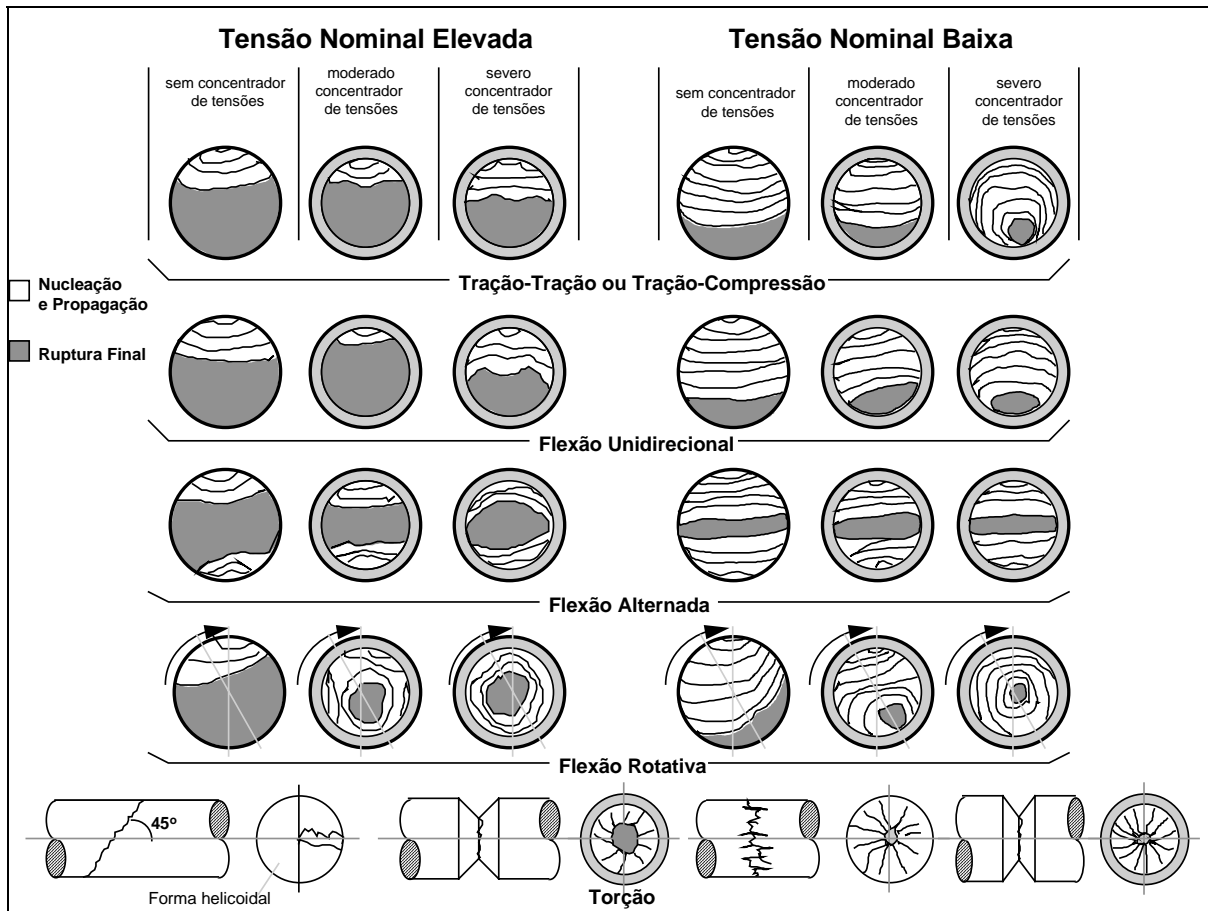


Figura 2.19 - Representações esquemáticas de superfícies de fratura em eixos cilíndricos de acordo com a intensidade e o tipo de carregamento imposto (HEIN, 2003)

A Figura 2.20 (a) e (b) são indicativos de trincas de fadiga tendo origem única no ponto indicado pela seta.

A frente da trinca, a qual forma as marcas de praia vistas na Figura 2.21, é simétrica em relação à origem e possui uma forma côncava. Ambos, a origem única e a reduzida zona de fratura final na Figura 2.20 (a) sugerem que a tensão nominal era baixa. A zona de fratura final maior na Figura 2.20 (b) sugere uma tensão nominal maior. A Figura 2.20 (c) mostra uma trinca típica originando várias trincas individuais que no final das contas fundiram-se de modo a formar uma única frente de trincas. Tais origens múltiplas são geralmente indicativas de alta tensão nominal. Passos radiais, Figura 2.22, (marcas de catraca) estão presentes entre as trincas de origem.

As Figuras 2.20 (d), (e) e (f) mostram marcas de praia típicas quando a mudança na seção em um eixo uniformemente carregado fornecendo uma concentração de tensão moderada. Com uma tensão nominal baixa a frente de trincas muda de côncavo

para convexo, antes da ruptura, Figura 2.20 (d). Em tensões nominais mais altas a frente de trincas se abranda no formato côncavo quase se tornando um segmento de reta, podendo até mesmo não se tornar convexo antes da ruptura, Figuras 2.20 (e) e (f).

Uma mudança de seção em um eixo uniformemente carregado que produz uma concentração severa levará a um padrão de marcas de praia tais como o da Figura 2.20 (g), (h) ou (j). Um exemplo de concentração severa é um filete de pequeno raio na junção de uma aba, ou também um rasgo de chaveta, tal filete usualmente resulta em um contorno de superfície de fratura convexa em relação ao lado de menor seção.

O padrão de trincas de frente mostrada na Figura 2.20 (g) foi produzido por uma tensão nominal baixa.

As trincas de frente da Figura 2.20 (h) se desenvolveram mais rapidamente devido a uma maior tensão na zona periférica.

As origens de trincas múltiplas de tensão nominal alta e flexões unidirecionais usualmente produzem padrões de marcas de praias mostrados na Figura 2.20 (j).

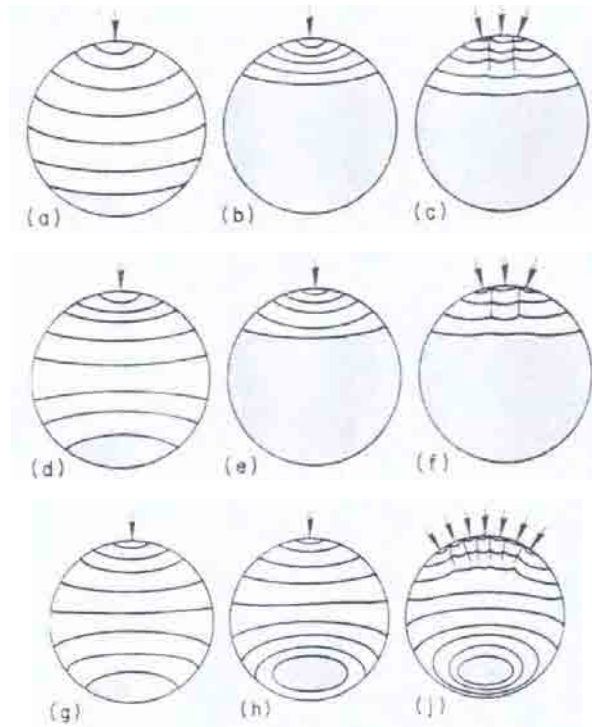


Figura 2.20 - Marcas de fadiga produzidas a partir de uma única origem e múltiplas origens com tensões nominais baixas e altas, (a) e (b) origem única, (c) origem múltiplas, (d) ,(e) e (f) mostram marcas de praia, (g), (h) e (j) mostram marcas de praia com concentração severas (WULPI , 1991)



Figura 2.21 - Parafuso com marcas de praia ( HEIN , 2003 )



Figura 2.22 - Marcas de catraca nas bordas de eixo de aço fraturado por fadiga ( HEIN , 2003)

É chamada fadiga por flexão reversa, quando a flexão aplicada é alternada, e todos os pontos do eixo estão sujeitos alternadamente a tensões de tração e compressão, ou seja, enquanto os pontos de um lado do eixo estão sendo comprimidos os pontos do lado oposto estão sendo tracionados. Se a flexão é de mesma magnitude geralmente duas trincas de aproximadamente o mesmo comprimento surgirão de origem opostas, porém, no mesmo plano transversal. Caso a flexão seja maior em uma das direções as mesmas terão comprimentos diferentes.

A Figura 2.23 mostra marcas de fadiga sobre uma superfície fraturada de um eixo estacionário sujeito a momentos fletores reversos uniformemente distribuídos ao longo de seu comprimento.

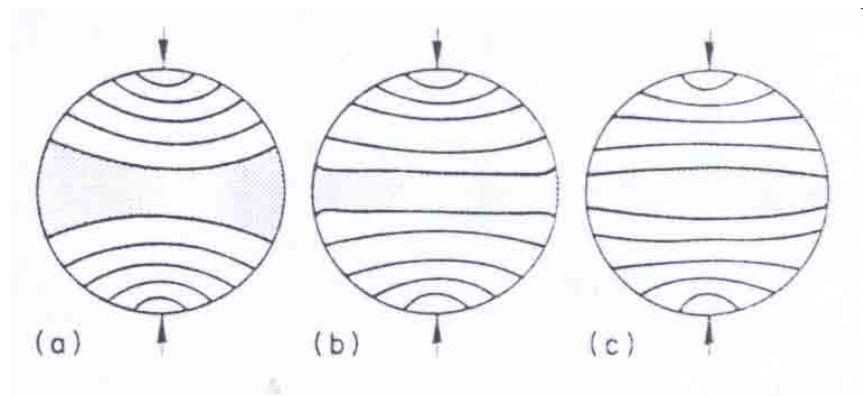


Figura 2.23 - Marcas típicas de fadiga sobre superfície de um eixo não rotativo carregado uniformemente sujeito a tensões de flexões reversas, a) sem concentrador de tensão, b) concentrador de tensão moderado e c) concentrador de tensão severo (WULPI , 1991)

As setas indicam a origem da trinca, e são diametralmente opostas, porém algumas vezes elas são levemente deslocadas devido a concentradores de tensão. O padrão mostrado na Figura 2.23 (a) é típico de um eixo com diâmetro único sem concentradores de tensão. O momento fletor é igual para as duas direções. Um filete de raio longo de mudança de diâmetro em um eixo impõe uma concentração de tensão moderada. A Figura 2.23 (b) mostra o padrão sobre a superfície de uma fratura com tal filete. Já um filete de raio curto em uma mudança de diâmetro resulta em uma concentração de tensão mais severa. A Figura 2.23 (c) mostra o padrão típico sobre a superfície da fratura.

A fadiga em flexão rotativa tem como diferença essencial da estacionária a localização constante que a flexão de eixo estacionário recebe em um determinado local, ou seja, ela se mantém confinada em uma específica localização da periferia do eixo somente. Em um eixo rotativo todos os pontos da periferia estão sujeitos a uma tensão de tração e a uma de compressão a cada revolução. A magnitude relativa da tensão em diferentes localizações é determinada pela condição de balanço ou desbalanço impostos ao eixo.

Uma outra importante diferença introduzida pela rotação é o desenvolvimento assimétrico de frente de trincas a partir de uma única origem. Existe uma marcada tendência da frente de trincas se estender preferencialmente na direção oposta àquela da rotação. A frente de trincas usualmente varia em cerca de  $15^\circ$  ou mais, conforme a Figura 2.24 (a) e (c).

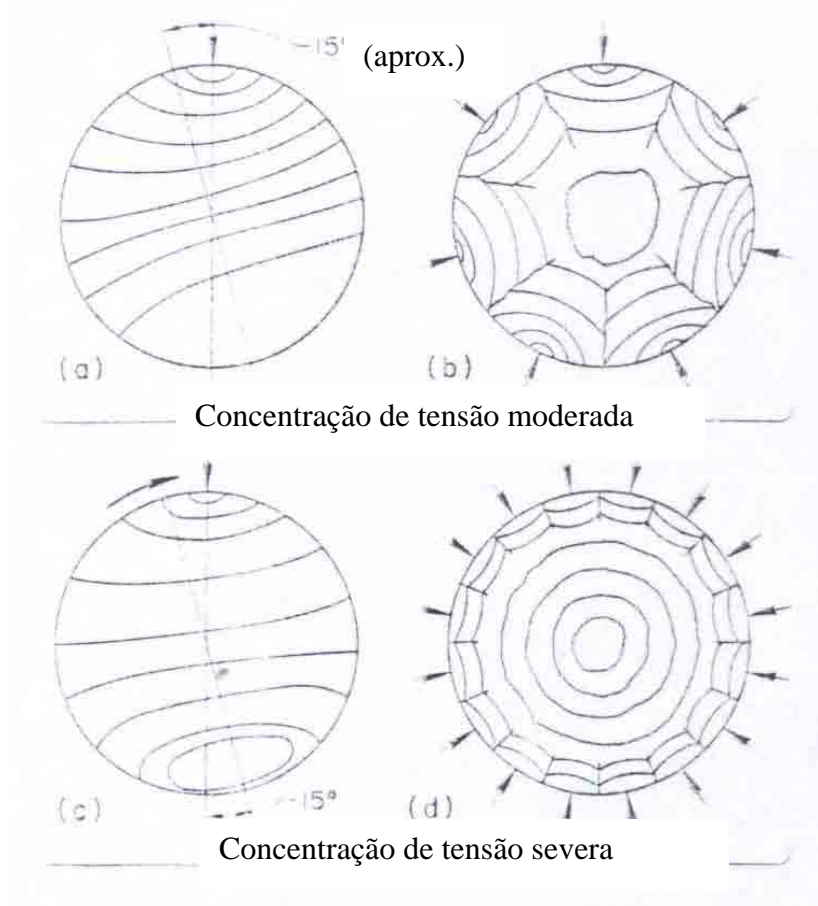


Figura 2.24 - Marcas típicas de fadiga sobre superfície de eixo rotativo com carga uniformemente distribuída; a e b) moderado concentrador de tensão, c e d) severo concentrador de tensão (WULPI, 1991)

Em flexão rotativa todos os pontos da periferia do eixo estão sujeitos a tração a cada revolução, portanto uma trinca pode iniciar-se em qualquer destes pontos periféricos, Figura 2.24 (b) e (d). As superfícies das trincas são pressionadas entre si durante o ciclo de compressão e um atrito mútuo ocorre. Um resultado comum na fratura final é que movimentos relativos de um lado para o outro causam severos danos às superfícies da fratura e tendem a mascarar muitas marcas, porém, as marcas nas depressões se mantêm, e se se imaginar que estes pontos de depressão são como uma imagem em negativo da outra superfície esta característica fornece valiosas evidências, portanto é boa prática examinar os dois lados da peça fraturada.

As trincas por fadiga torcional também apresentam marcas de praia e cumes. Concentradores de tensão longitudinal são comparativamente inofensivos sob tensão de flexão, porém são tão importantes como os concentradores de tensão

circunferenciais sob carregamento torcional. Esta sensibilidade de cargas em eixos sob torção com concentradores de tensão longitudinais é de importância prática considerável devido as inclusões no material do eixo serem sempre paralelas ao eixo de rotação. Não é raro para uma trinca de fadiga torcional estar originada em uma inclusão longitudinal, em uma marca de superfície, ou em um canto de chaveta e então avançar em ângulo de 45°.

Quando um concentrador de tensão tal como um rebaixo circunferencial está presente, diferentes estados de tensão existem em suas vizinhanças, e a tensão de tração é aumentada em até 4 vezes a tensão de cisalhamento (ASM Handbook). Portanto a tensão de tração sob um plano de 45° poderá muito bem exceder a tensão de escoamento do metal antes que a tensão de cisalhamento alcance o limite de cisalhamento do mesmo. A fratura ocorre normal ao plano de tensão inclinado de 45° produzindo uma superfície em forma cônica ou em forma de estrela.

A fadiga por contato ocorre quando um componente desliza ou rola sobre o outro sob alta pressão de contato e carga cíclica, podendo esse movimento provocar furos ou cavidades nas superfícies de contato.

Fraturas frágeis em eixos são associadas a inabilidade de certos materiais de não se deformar plasticamente na presença de tensão na raiz de um entalhe estreito, particularmente a baixas temperaturas. Fraturas frágeis são caracterizadas fraturas súbitas a taxas extremamente altas de propagação de trincas, talvez 1830 m/s ou mais. Com pequena ou nenhuma evidência de distorção na região de iniciação de fratura. Este tipo de fratura freqüentemente é caracterizado por marcas conhecidas como “*Herringbone*” ou padrões de “*Chevrons*” na superfície de fratura. Os pontos de “*Chevrons*” apontam para a origem da fratura.

Fraturas flexíveis de eixos que resultam de coalescência de microvazios exibem evidencias de distorção (fluxo plástico) à superfície de fratura semelhante ao observado em testes de ruptura por tração ou corpos de prova de teste de torção.

Quando um eixo é fraturado por uma única aplicação de uma carga maior que a tensão de escoamento do eixo, há deformação plástica normalmente considerável antes de fratura. Esta deformação é freqüentemente aparente em inspeção visual de um eixo que fraturou sob tensão, mas não é freqüentemente óbvio quando o eixo fraturou em



torção. Esta habilidade de um material deformar-se plasticamente é uma propriedade denominada de ductilidade. A aparência da superfície de fratura de um eixo que falhou de uma maneira dúctil também é uma função da forma de eixo, do tipo de tensão para a qual o eixo foi submetido, da taxa de carregamento e para muitas ligas, da temperatura. Em geral, a ductilidade é diminuída aumentando-se a dureza do metal através de trabalho a frio ou tratamento térmico, pela presença de entalhes, filetes, furos, arranhões, inclusões, porosidade e em material sensível a entalhe, aumentando a taxa de carregamento, e para muitas ligas, diminuindo a temperatura.

Fratura dúctil de eixos acontece raramente em serviço normal. Porém, fraturas dúcteis podem acontecer quando são subestimadas as exigências de serviço, se os materiais usados não forem tão resistentes quanto fora assumido em projeto, ou se o eixo é sujeitado a uma sobrecarga massiva, como em um acidente.

Erros de fabricação, como usar o material errado ou material sendo tratado em condição de temperatura errada (por exemplo, recozimento em vez de revenimento e têmpera), pode resultar em fraturas dúcteis.

A influência da mudança de diâmetro nos eixos é relevante, pois concentra tensões a cada variação de diâmetro na porção de menor diâmetro. Os efeitos de uma mudança abrupta e suas linhas de tensão são mostradas esquematicamente na Figura 2.25.

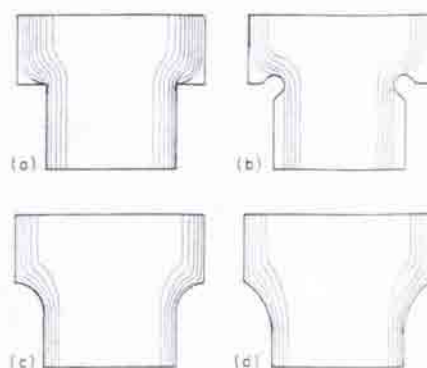


Figura 2.25 - Efeito do tamanho de raio de filetes sobre a concentração de tensão em mudanças de diâmetro do eixo; a e b) concentração severa de tensão; c e d) baixa concentração de tensão (WULPI, 1991).

A intersecção entre o corpo do eixo e a aba em 90 graus, na Figura 2.25 (a) concentra a tensão quando da transição do diâmetro maior para o diâmetro menor. O adoçamento do canto vivo através do filete de raio longo como mostrado na Figura 2.25 (d), permite que a tensão flua com um mínimo de restrição. Entretanto o filete deve tangenciar a seção de diâmetro menor ou então resultará em uma transição com canto vivo novamente, sobrepujando o efeito benéfico do filete aplicado.

Como método estatístico o diagrama de Goodman modificado pode nos fornecer informações de grande importância, para tal marca-se a tensão média no eixo das abscissas e todos os outros componentes de tensões no eixo das ordenadas, com a tração no sentido positivo. O limite de resistência à fadiga é marcado no eixo das ordenadas, acima e abaixo da origem. A linha de tensão média está inclinada a  $45^\circ$ , e vai da origem até a intersecção das linhas de tensão máxima e tensão mínima, representando a resistência da peça à tração. O diagrama modificado de Goodman consiste das linhas construídas unindo-se o ponto de intersecção entre as linhas de tensão máxima e mínima e os pontos das tensões de fadiga no eixo das ordenadas acima e abaixo da origem (SHIGLEY, 1984).

### 3 MATERIAL E MÉTODO AQUISITIVO

#### 3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

##### 3.1.1 Metalografia

A composição química do aço utilizado na árvore foi examinada em corpos de prova conforme a Tabela 3.1, a qual compara os valores especificados pela Villares.

Tabela 3.1 – Composição química

| % Peso       | Carbono   | Enxofre   | Manganês  | Cromo     | Níquel    | Molibdenio |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Especificado | 0,38/0,43 | 0,25 máx. | 0,60/0,80 | 0,70/0,90 | 1,65/2,00 | 0,20/0,30  |
| Encontrado   | 0,385     | <0,014    | 0,64      | 0,78      | 1,0837    | 0,225      |

Quando da aquisição de outro lote que foi de fabricação Gerdau foram encontrados os dados conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química – fabricação Gerdau (ANEXO 1)

| % Peso               | Carbono | Enxofre | Manganês | Cromo | Níquel | Molibdênio |
|----------------------|---------|---------|----------|-------|--------|------------|
| Certificado “Gerdau” | 0,41    | 0,015   | 0,65     | 0,78  | 1,78   | 0,23       |
| Encontrado           | 0,406   | 0,0156  | 0,683    | 0,786 | 1,906  | 0,226      |

##### 3.1.2 Propriedades mecânicas

O aço 4340 é uma liga que possui características adequadas à utilização em árvores.

A literatura fornece os seguintes valores para o aço ABNT 4340 (NASCIMENTO, 1999):

|                                   |                               |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Limite de escoamento              | $\sigma_e = 1118 \text{ MPa}$ |
| Limite de resistência à tração    | $\sigma_t = 1240 \text{ MPa}$ |
| Alongamento específico percentual | $\varepsilon\% = 14,9\%$      |
| Dureza                            | 39 HRc (ANEXO 2)              |

Foram realizados ensaios de flexão rotativa no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Materiais da UNESP/Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, utilizando-se uma máquina de fadiga marca “VEB WERKSTOFFPRÜFMACHINEN LUIPZIG” modelo UBM, nº de série 520/86/10, ano 1988.

As curvas de fadiga obtidas, para os respectivos tipos de corpos de prova e seus tratamentos, são mostradas na Figura 3.1.

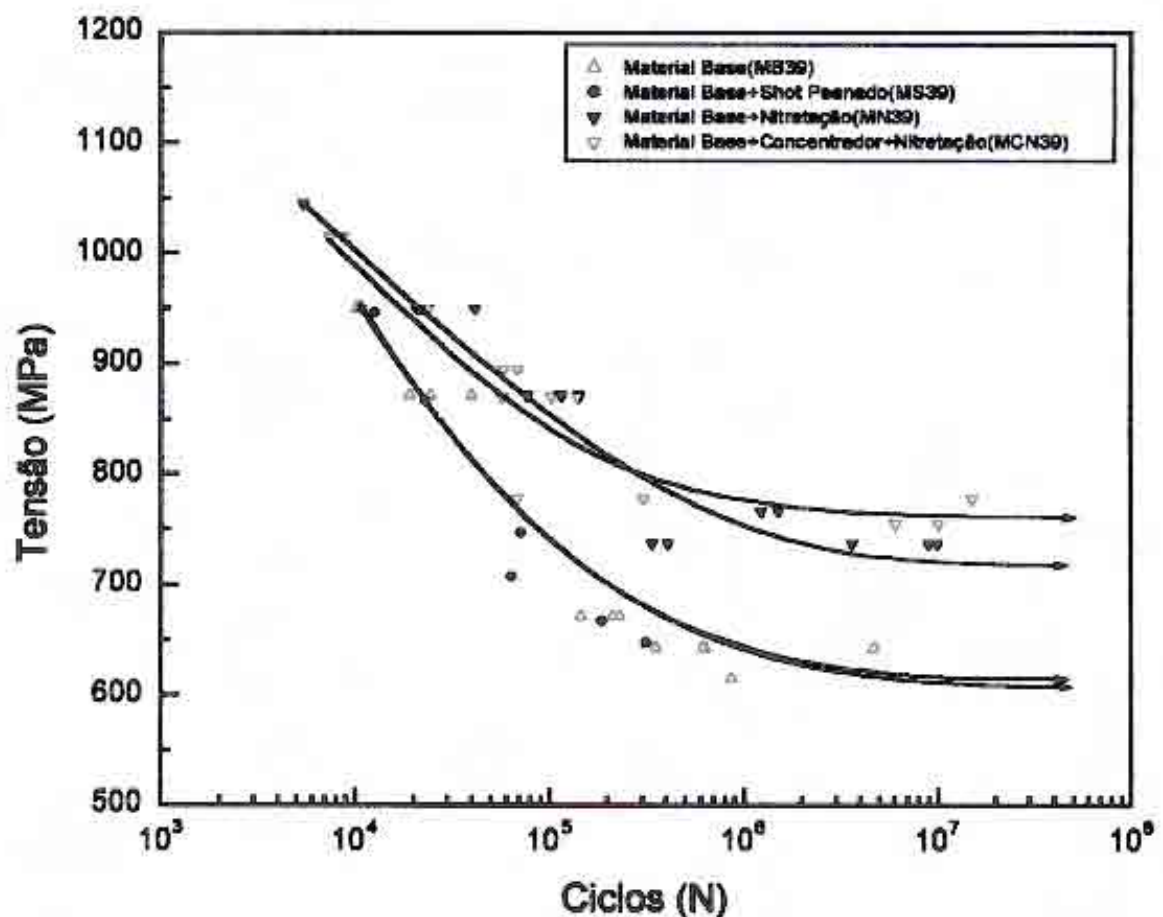


Figura 3.1 - Curva de fadiga do aço 4340, sendo  $\triangle$  - material base;  $\bullet$  - material base mais tratamento com “Shot Pining”,  $\blacktriangledown$  - material base com tratamento de nitretação,  $\nabla$  - material base com concentrador e nitretação (SIQUEIRA, 2002)

## 3.2 EXPERIMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

### 3.2.1 Descrição do aparato experimental

A fim de se determinar um perfil de forças atuantes junto à ferramenta da máquina de laminação de aros LEIFELD, instalou-se um aquisitor de dados, marca JUMO, tipo Logoscreen 500, Figura 3.2.



Figura 3.2 - Coletor de dados marca JUMO tipo Logoscreen 500 e sua fonte

O coletor possui 6 portas de aquisição onde se podem ligar transdutores para aquisitar dados variados como tensão, vazão, pressão e outras grandezas físicas desejadas.

Conectam-se transdutores de pressão para medir a pressão no cilindro hidráulico de trabalho em sua parte traseira, Figura 3.3, para tal os transdutores de pressão acoplados devem estar dentro de faixas de corrente ou tensão que forneçam sinais compatíveis com o aquisitor.

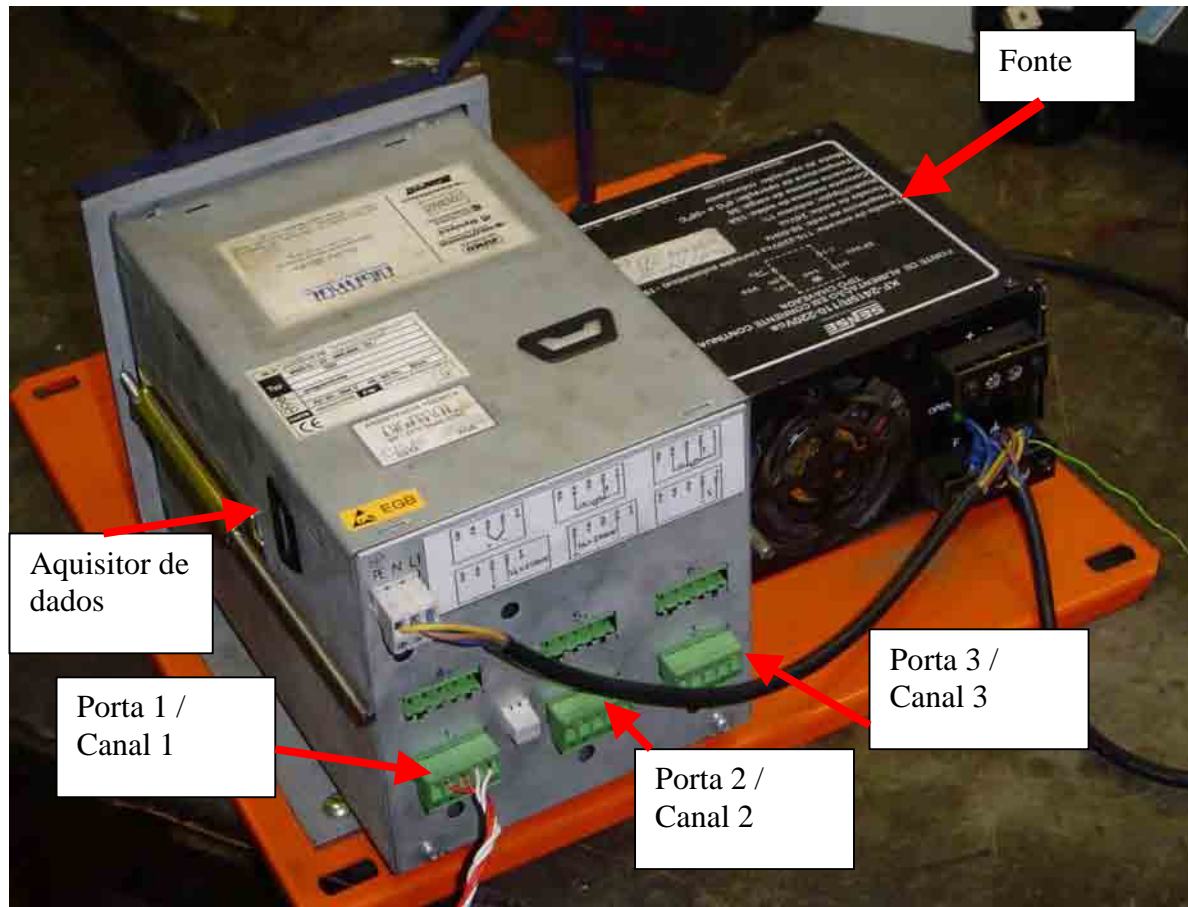


Figura 3.3 - Portas para entrada de sinal analógico e fonte de alimentação

Ao aquisitor de dados são acoplados transdutores de pressão, mostrado na Figura 3.4, com as seguintes características:

- Canal 1 - transdutor de pressão analógico com faixa variando de zero a 600 bar, fornecendo ao aparelho uma corrente que varia de zero a 20mA, marca JUMO modelo B 40.4300;
- Canal 2 - transdutor de pressão de faixa variando de zero a 300 bar, fornecendo ao aparelho uma tensão variando de zero a 10 milivolts, marca SODMEX, tipo HP – 212;
- Canal 3 - contato seco, onde se monitora o início de ciclo e retorno do pistão.

O ajuste do aparelho foi realizado para a capacidade máxima de aquisição, sendo o período de 1 segundo para cada entrada de sinal.



Figura 3.4 - Transdutor de pressão zero a 600 bar operado por corrente, marca JUMO modelo B 40.4300

Para a primeira série de coleta de dados foram instalados os transdutores de pressão no sistema hidráulico de avanço da mesa como pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Transdutores de pressão acoplados no cilindro hidráulico da mesa



A instalação é feita em dois pontos do cilindro hidráulico da mesa, denominado Z7, ou seja, na linha de avanço, que é alimentada por mangueiras de alta pressão, Figura 3.6, a qual se considera como de entrada de pressão, e na linha de retorno, onde se controla a vazão de saída para manter-se constante a velocidade de avanço do cilindro hidráulico da mesa.



Figura 3.6 - Painel hidráulico e mangueiras de alta pressão que alimentam o cilindro de avanço

O esquema de ligação do sistema está contido na Figura 3.7, onde se ressalta que o aparelho trabalha em tensão de 24 volts que é obtida através de um transformador e fonte que rebaixa de 127 volts para os 24 volts necessários.



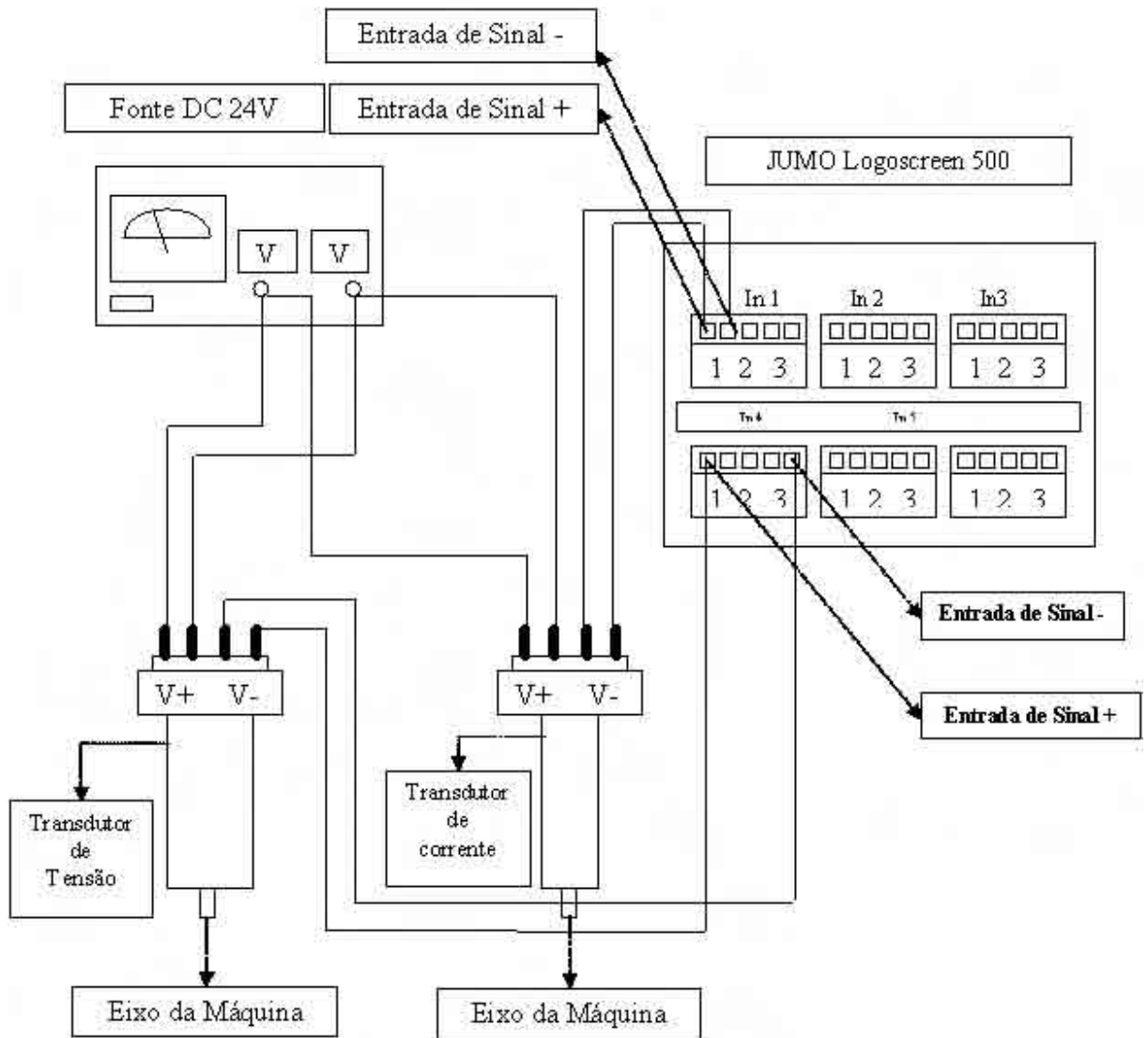


Figura 3.7 - Esquema de ligação elétrica do sistema JUMO

### 3.2.2 Dados aqisitados

Os dados aqisitados são registrados em mídia eletrônica. São usados as memórias do próprio aparelho e transferidos para disquetes de 3,5" após o período de leitura que pode durar até cerca de 24 horas.

Todos os dados coletados devem receber tratamento para se obter a força atuante na ferramenta, pois os mesmos são coletados conforme a Tabela 3.3, e necessitam de cálculos que envolvem a área de cilindro.

As áreas úteis do cilindro de avanço são:

a) quando avançando em direção a peça:

$$\text{Area transversal do cilindro de avanço} = \pi \frac{(DCA)^2}{4} = \pi \frac{(0,20)^2}{4} = 0,031416 \text{ m}^2$$

$$\text{Área transversal do eixo do cilindro de avanço} = \pi \frac{(DEC)^2}{4} = \pi \frac{(0,110)^2}{4} = 0,009503 \text{ m}^2$$

$$\text{Área do cilindro de relação eixo z} = 0,021913 \text{ m}^2$$

conforme a Figura 3.8.

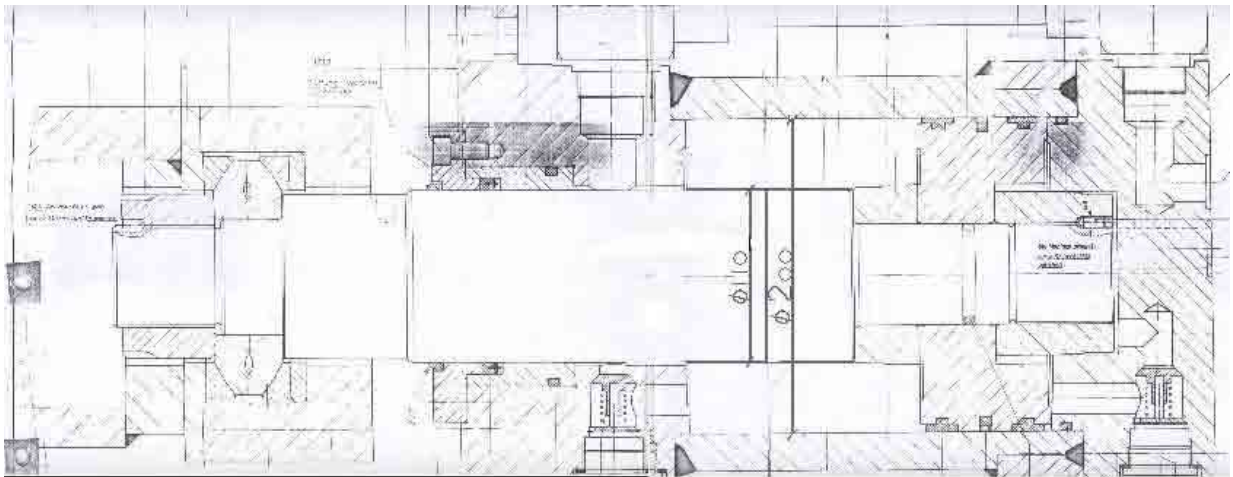


Figura 3.8 - Corte típico do cilindro de avanço do eixo Z

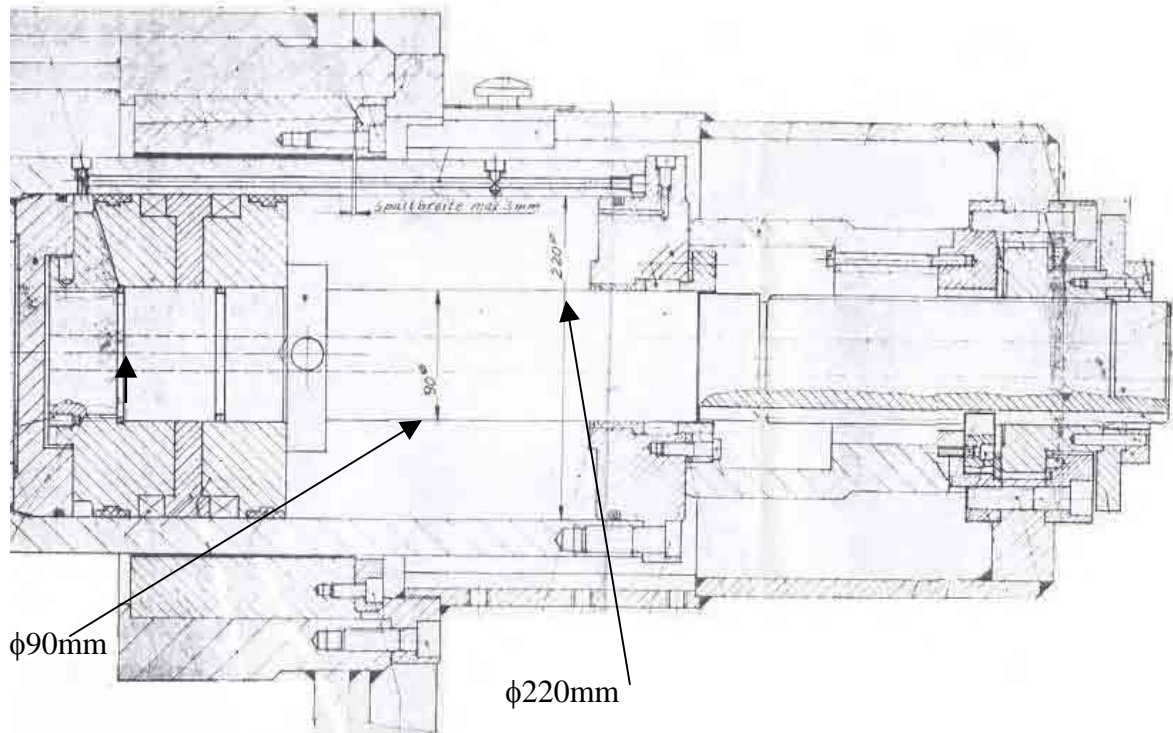


Figura 3.9 - Corte típico do cilindro lateral

$$\text{Área transversal do cilindro lateral de avanço} = \pi \frac{DCL}{4} = \pi \frac{(0,22)^2}{4} = 0,038013 \text{ m}^2$$

$$\text{Área transversal do eixo do cilindro lateral de avanço} = \pi \frac{DEL}{4} = \pi \frac{(0,09)^2}{4} = 0,006263 \text{ m}^2$$

$$\text{Área transversal do cilindro lateral para retorno} = 0,038013 - 0,006263 = 0,031652 \text{ m}^2$$

conforme Figura 3.9.

Tabela 3.3 – Dados brutos coletados via transdutor e aquisitor JUMO 500.

| F1                                | F2                 | F3               | F4                | F5               | F6                | F7                | F8 |
|-----------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|----|
| Analog:                           |                    |                  |                   |                  |                   |                   |    |
| Instrument name LOGOSCREEN 500[], |                    |                  |                   |                  |                   |                   |    |
| from: 11/8/2003 23:35:10          |                    |                  |                   |                  |                   |                   |    |
| to: 26/8/2003 23:39:22            |                    |                  |                   |                  |                   |                   |    |
| Date                              | Time               | LOW: Meßst.1/BAR | HIGH: Meßst.1/BAR | LOW: Meßst.2/BAR | HIGH: Meßst.2/BAR | LOW: Meßst.3/1ou0 |    |
| 39248                             | 26/8/2003 14:06:37 | 55,54            | -----             | 118,70           | -----             | 12,29             |    |
| 39249                             | 26/8/2003 14:06:38 | 36,23            | -----             | 124,31           | -----             | 10,99             |    |
| 39250                             | 26/8/2003 14:06:39 | 8,47             | -----             | 110,23           | -----             | 11,00             |    |
| 39251                             | 26/8/2003 14:06:40 | 8,48             | -----             | 123,23           | -----             | 12,31             |    |
| 39252                             | 26/8/2003 14:06:41 | 4,60             | -----             | 126,56           | -----             | 12,32             |    |
| 39253                             | 26/8/2003 14:06:42 | 4,15             | -----             | 126,44           | -----             | 12,32             |    |
| 39254                             | 26/8/2003 14:06:43 | 3,81             | -----             | 126,37           | -----             | 12,33             |    |
| 39255                             | 26/8/2003 14:06:44 | 4,06             | -----             | 126,30           | -----             | 12,33             |    |
| 39256                             | 26/8/2003 14:06:45 | 3,88             | -----             | 126,48           | -----             | 12,33             |    |
| 39257                             | 26/8/2003 14:06:46 | 3,50             | -----             | 111,62           | -----             | 9,25              |    |
| 39258                             | 26/8/2003 14:06:47 | 7,13             | -----             | 23,57            | -----             | 0,00              |    |

Após os cálculos, os dados são tabelados conforme a Tabela 3.4 para que sejam analisados e, a partir dos quais, determina-se a maior força atuante no aro a ser conformado.

Tabela 3.4 – Forças atuantes no roda 24 x 8 – cilindro frontal

| Data da leitura 28/08/03 |          |                          |                         |                                 |                                |                              |                     |   |
|--------------------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------|---|
|                          |          |                          |                         |                                 |                                | Diarn. (1)                   | 0,20                | m   |
|                          |          |                          |                         |                                 |                                | Diarn. (2)                   | 0,11                | m   |
|                          |          |                          |                         |                                 |                                | <b>Valor máximo aplicado</b> | 395.783,65          | N   |
| Tempo(s)                 | Hora     | Pressão do retorno (bar) | Pressão do avanço (bar) | Área de pressão do retorno (m2) | Área de pressão do avanço (m2) | Força de retorno (N)         | Força de avanço (N) | Força de avanço ou retorno sobre o rolo (N) |
| 310                      | 16:11:46 | 13,52                    | 18,86                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 29.625,85                    | 59.250,44           | 29.624,59                                   |
| 311                      | 16:11:47 | 11,28                    | 21,66                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 24.717,42                    | 68.046,90           | 43.329,47                                   |
| 312                      | 16:11:48 | 11,34                    | 21,57                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 24.848,90                    | 67.764,15           | 42.915,26                                   |
| 313                      | 16:11:49 | 8,69                     | 17,44                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 19.042,06                    | 54.789,38           | 35.747,32                                   |
| 314                      | 16:11:50 | 0,42                     | 14,12                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 920,33                       | 44.359,29           | 43.438,96                                   |
| 315                      | 16:11:51 | (0,42)                   | 25,94                   | 0,021913                        | 0,031416                       | (920,33)                     | 81.492,91           | 82.413,24                                   |
| 316                      | 16:11:52 | (0,46)                   | 31,81                   | 0,021913                        | 0,031416                       | (1.007,98)                   | 99.934,06           | 100.942,04                                  |
| 317                      | 16:11:53 | 1,64                     | 43,27                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 3.593,67                     | 135.936,71          | 132.343,05                                  |
| 318                      | 16:11:54 | 29,03                    | 76,57                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 63.612,30                    | 240.551,75          | 176.939,45                                  |
| 319                      | 16:11:55 | 56,61                    | 121,34                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 124.047,28                   | 381.200,85          | 257.153,57                                  |
| 320                      | 16:11:56 | 28,33                    | 126,14                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 62.078,42                    | 396.280,50          | 334.202,08                                  |
| 321                      | 16:11:57 | 8,54                     | 111,68                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 18.713,37                    | 350.853,07          | 332.139,70                                  |
| 322                      | 16:11:58 | 4,73                     | 108,06                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 10.364,66                    | 339.480,50          | 329.115,84                                  |
| 323                      | 16:11:59 | 4,35                     | 126,73                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 9.531,98                     | 398.134,04          | 388.602,05                                  |
| 324                      | 16:12:00 | 4,13                     | 127,76                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 9.049,91                     | 401.369,88          | 392.319,97                                  |
| 325                      | 16:12:01 | 4,10                     | 128,13                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 8.984,17                     | 402.532,27          | 393.548,10                                  |
| 326                      | 16:12:02 | 3,82                     | 128,42                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 8.370,62                     | 403.443,33          | 395.072,71                                  |
| 327                      | 16:12:03 | 3,94                     | 128,73                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 8.633,57                     | 404.417,22          | 395.783,65                                  |
| 328                      | 16:12:04 | 3,83                     | 128,60                  | 0,021913                        | 0,031416                       | 8.392,53                     | 404.008,82          | 395.616,29                                  |
| 329                      | 16:12:05 | 6,80                     | 72,07                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 14.900,57                    | 226.414,58          | 211.514,01                                  |
| 330                      | 16:12:06 | 12,38                    | 20,68                   | 0,021913                        | 0,031416                       | 27.127,81                    | 64.968,14           | 37.840,33                                   |

As forças atuantes têm caráter cíclico, como se pode verificar por meio da Figura 3.10, sendo que a parte ascendente do gráfico representa a força atuante no cilindro de avanço e a descendente representa a força atuante no retorno do cilindro.

Este gráfico é típico em todas as leituras realizadas .

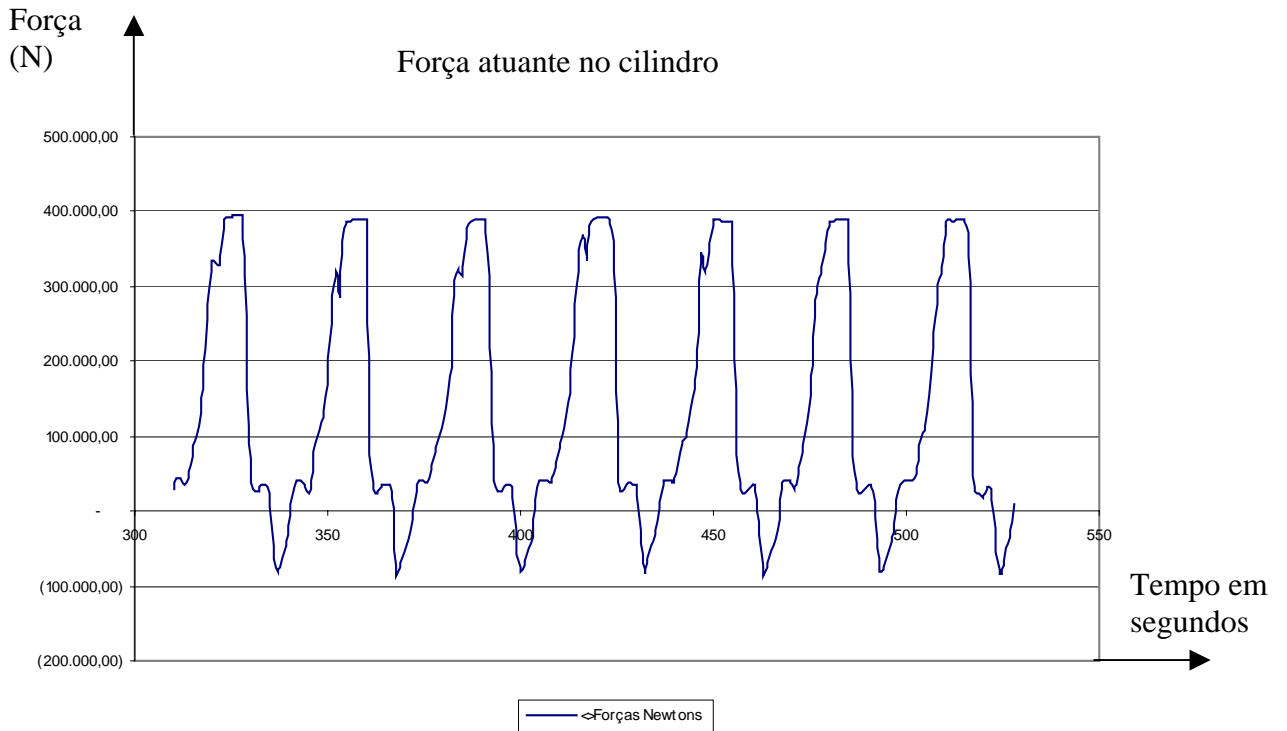


Figura 3.10 - Força de avanço e retorno do cilindro de conformação eixo Z

A aferição do instrumento foi realizada no laboratório da própria MAXION através de aparato comparativo, conforme mostrado nas Figuras 3.11 e 3.12 e acompanhada por técnicos especializados, e apresentam as seguintes características:

Transdutor de pressão por corrente

Características básicas

Escala de medição.....0 a 600 bar

Temperatura admissível.....0 a 70°C

Conexão hidráulica.....1/2" BSP

### Características elétricas

Alimentação.....10 a 30Vcc

Isolamento.....>500Mohm

### Ligações elétricas

Alimentação +.....Vermelho.....Pino1

Comum -.....Preto.....Pino2

Sinal +.....Verde ou Azul.....Pino3

Blindagem.....Malha.....Pino Terra

### Características metrológicas

Sinal de saída:

(zero) - 4 mA

(SFE) - 20mA

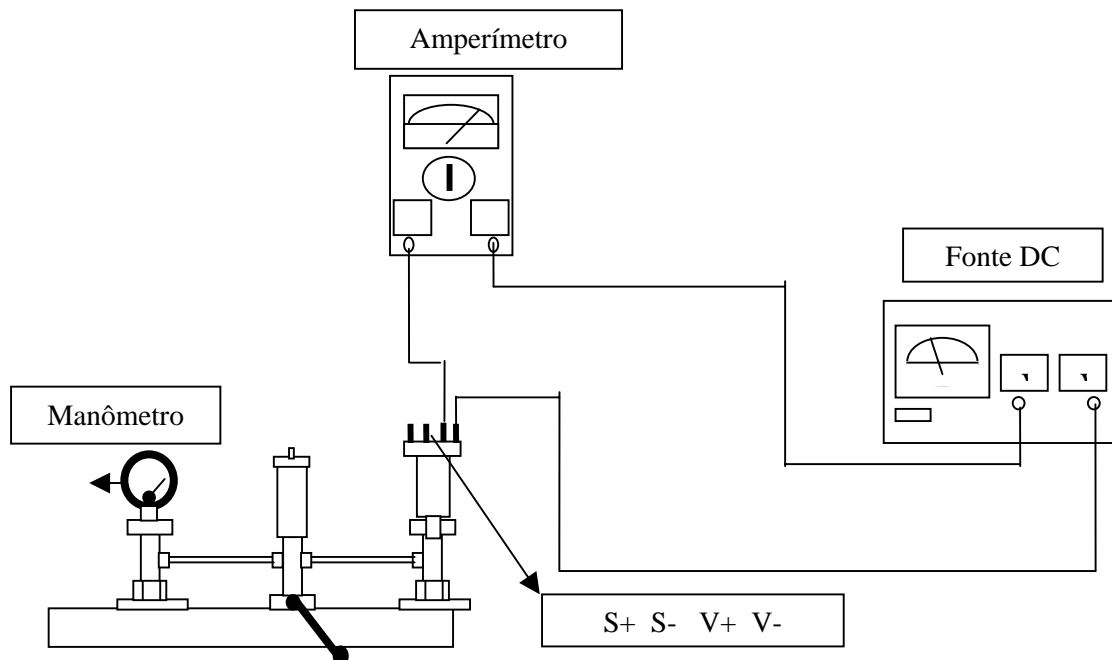


Figura 3.11 - Esquema de aferição de transdutores de pressão com saída de sinal de corrente

As características do transdutor que utiliza a tensão elétrica são:

Transdutor de pressão por tensão elétrica

Características básicas

Escala de medição.....0 a 300 bar

Temperatura admissível.....0 a 70°C

Conexão hidráulica.....1/4" BSP

Características elétricas

Alimentação.....18 a 30Vcc

Isolamento.....>500Mohm

Ligações elétricas

Alimentação +.....Vermelho.....Pino1

Comum -.....Preto.....Pino2

Sinal +.....Verde ou Azul.....Pino3

Blindagem.....Malha.....Pino Terra

Características metrológicas

Sinal de saída:

(zero) - 0.10 Vcc

(SFE) - 5.10 Vcc

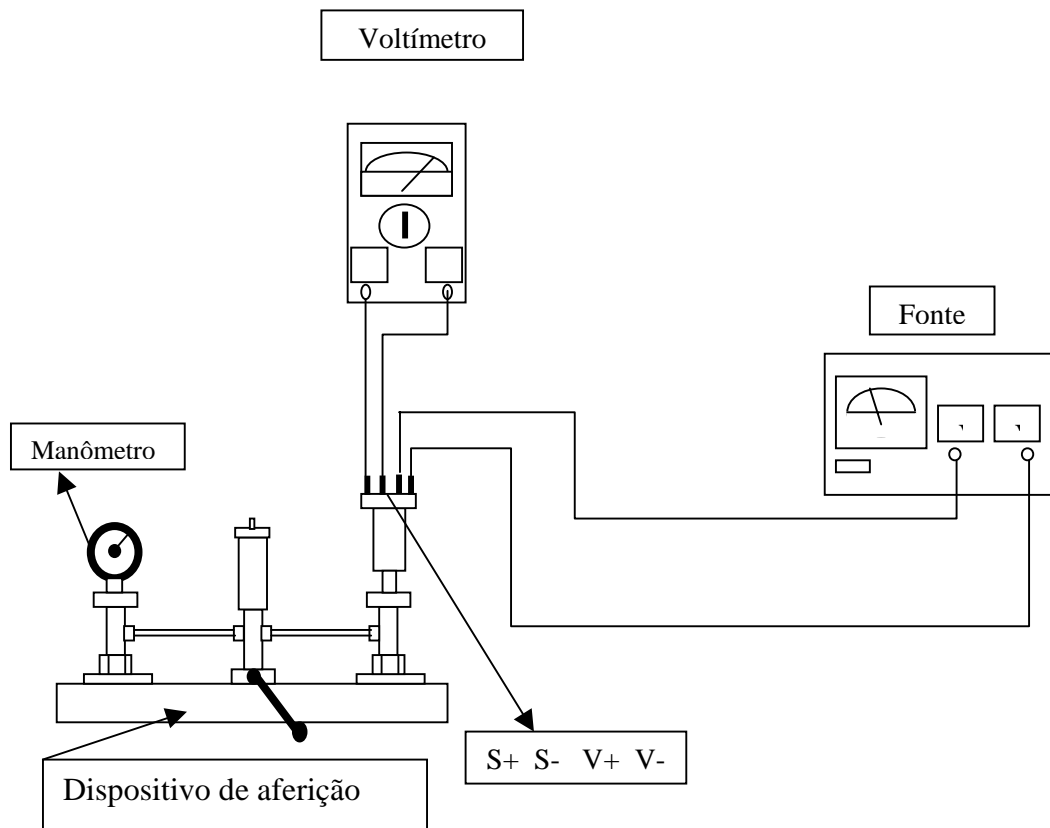


Figura 3.12 - Esquema de aferição de transdutores de pressão com saída de sinal por tensão elétrica

A aferição dos transdutores se faz por meio da comparação entre um manômetro analógico de escala apropriada e o transdutor a ser conferido, que é acoplado a um dispositivo de vasos comunicantes e, através de uma alavanca, é aplicada uma pressão em sua linha. O transdutor é ligado, conforme as Figuras 3.11 e 3.12, ao aquisitor de dados que é alimentado por uma fonte de 24 volts. A pressão da linha é então registrada pelos dois equipamentos, manômetro e transdutor, e ambos devem indicar a mesma pressão, ou seja processo linear de comparação.



## 4 MODELAGEM DA ÁRVORE

A modelagem da árvore foi realizada pelo método dos elementos finitos, com auxílio do software ANSYS. Esse software é utilizado nas fases de construção do modelo e, posteriormente, como ferramenta para realização dos cálculos em função do modelo utilizado e dos dados a ele fornecidos.

### 4.1 SOFTWARE ANSYS

O software ANSYS trabalha em três níveis distintos, que são:

- Pré-processamento;
- Processamento que se denomina “Solução”;
- Pós-processamento.

O pré-processador é onde se constrói o modelo; o processador de soluções é onde são aplicadas as cargas e obtidos os dados numéricos das soluções, o pós-processador possibilita visualizar os resultados da solução em pontos específicos no modelo, inclusive em função de tempo, se necessário.

#### 4.1.1 Características do ANSYS

O software ANSYS trabalha no ambiente windows e com menus em cascatas, sendo que o modo de entrada de dados mais amigável é através da interface gráfica do usuário (GUI – graphic user interface). Para entrar no processador inicial escolhe-se na **Barra de Menu** o arquivo a ser aberto ou criado. Para iniciar o trabalho é necessária a abertura do **Menu Principal** como será mostrado nas Figuras 4.1 e 4.2.



Figura 4.1 - Barra de Menu

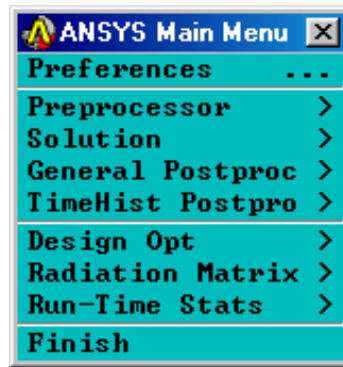


Figura 4.2 - Menu Principal

- Banco de Dados do ANSYS

Como em qualquer grande **Banco de Dados** o ANSYS armazena todos os dados de entrada como: dimensões do modelo, propriedades do material, dados de carga, etc., e os dados resultantes como: deslocamento, tensão, temperatura, etc., de uma maneira organizada. A principal vantagem do banco de dados é que se pode imprimir ou mostrar na tela, modificar ou apagar qualquer dado específico rápida e facilmente. Não importa qual processador esteja sendo usado, isto dá acesso básico a qualquer ponto nos modelos e acesso em qualquer parte do programa. Acesso básico significa a habilidade de mostrar na tela, selecionar ou listar um item específico.

- Mensagens de erro

O programa produz mensagens de erros, avisos e outras mensagens informativas, sendo que as mesmas são mostradas em caixas de mensagens e também ficam em arquivos denominados “*Logs*” de Erros.

#### 4.1.2 Obtendo o modelo no ANSYS

Uma análise típica tem três pontos distintos:

- Construção do modelo;
- Aplicação de carregamento no modelo e obtenção dos resultados, arquivando-os na memória;
- Visualização dos resultados através de telas, gráficos, listagens ou relatórios.

- Construindo o modelo

A construção de modelos pelo método dos elementos finitos requer uma visão multidisciplinar, pois nesta fase são envolvidas as habilidades de visão espacial e desenho técnico, conhecimentos sobre as características do projeto do elemento de máquina analisado e sobre as particularidades do material utilizado para confecção dessa peça, bem como de comandos peculiares ao programa. Pode-se considerar que esta fase é a que mais demanda horas de interação entre o usuário e a computador. No pré-processador, como mostra a Figura 4.3 são definidos: os tipos de elementos, as constantes, propriedades e o modelo geométrico do material.

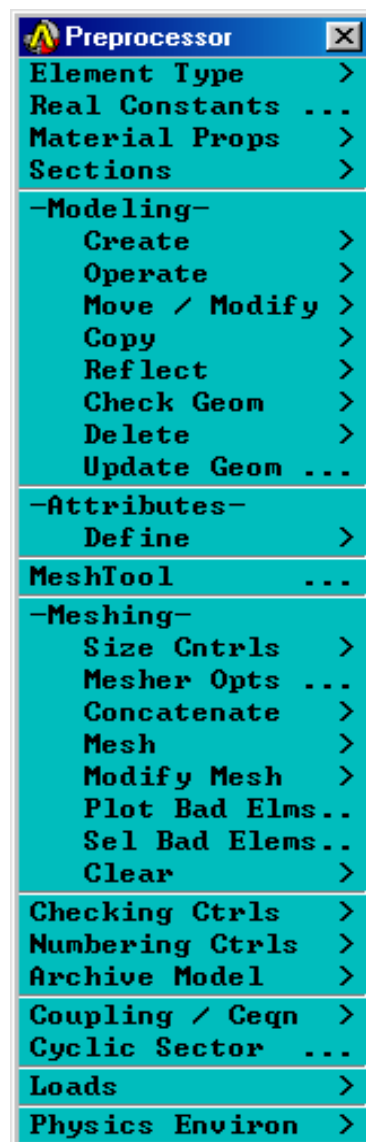


Figura 4.3 - Menu Pré-processador

Através do comando “*Modeling*”, cria-se o modelo conforme a necessidade do usuário, utilizando-se “*Keypoints*”, linhas ou áreas. Após este processo, será executado o carregamento da peça bem como o número de vínculos existentes na mesma. A Figura 4.4. mostra o menu de comandos dos diversos tipos de carregamentos.

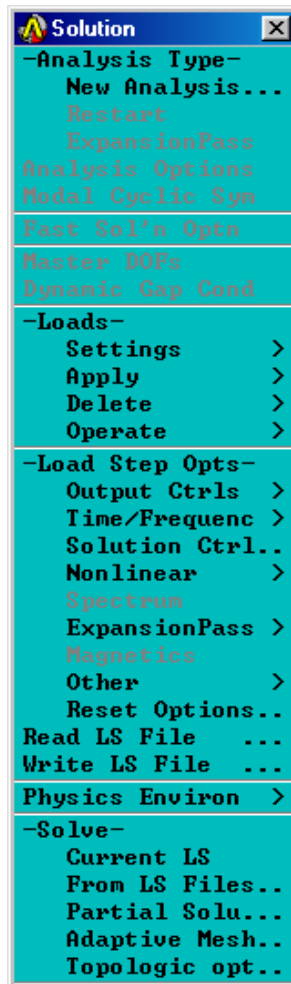


Figura 4.4 - Menu dos tipos de carregamento

Utiliza-se o processador adequado e através do menu da Figura 4.4, seleciona-se o comando “*Solve*” para o cálculo de todos os nós da malha.

Após a execução dos cálculos, o software retorna uma mensagem de resolução do problema, como se vê nas Figuras 4.5 e 4.6.

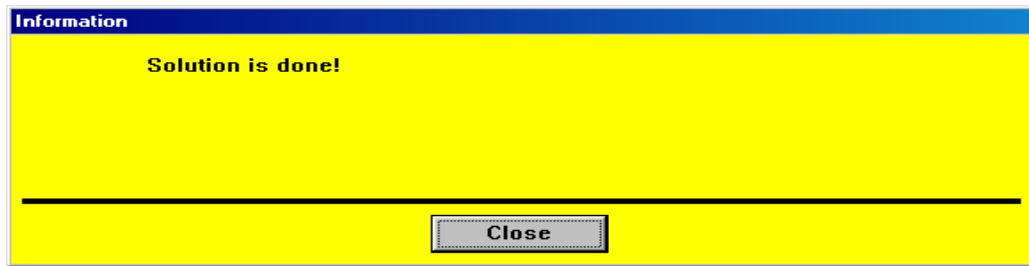


Figura 4.5 - Quadro indicativo de término do processamento principal

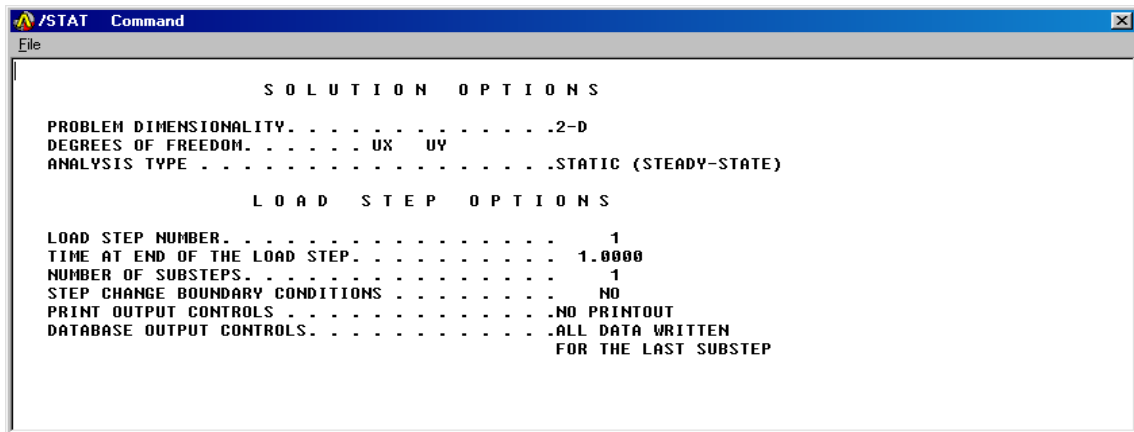


Figura 4.6 - Solução de dados no ANSYS

O usuário define os tipos de saída de resultados através do pós-processador utilizando-se de caixas de diálogo, como as contidas na Figura 4.7.

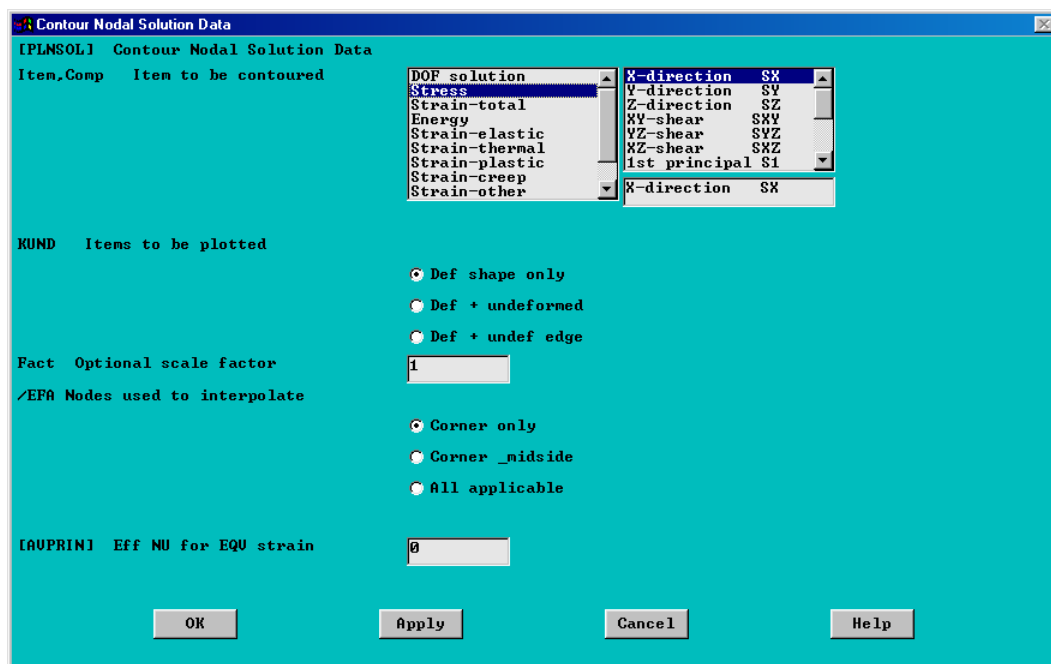


Figura 4.7 - Uma das caixas de diálogo do pós-processador

O ANSYS possui dois pós-processadores que são o “*Post1*” e o “*Post26*”. O “*Post1*” é o processador geral, é com ele que são gerados resultados de tensão deformação dos modelos, já o pós-processador “*Post26*” também conhecido como “*Time History Postprocessor*” tem a capacidade de relacionar tempo, frequências e processa análises mais complexas.

## 4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

### 4.2.1 Construção do modelo do mandril ou pré-processamento

O estudo tem como foco principal a árvore onde se acopla o mandril, conforme exposto no Capítulo 1, e como se pode ver na Figura 4.8. Porém por uma condição de análise, deve-se determinar os esforços que atuam nesta árvore através da força imposta ao perfil a ser conformado que, por sua vez, aplica uma força ao mandril que retransmite essa força sobre a área de assentamento da árvore.

Considerando esta situação relacional, desenvolve-se um modelo simplificado do mandril utilizado visto que a análise não contempla o estudo das tensões no mandril.



Figura 4.8 - Mandril típico da máquina de laminar LEIFELD

a) Tipos de mandris:

Os mandris podem ser divididos em famílias, conforme exposto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Famílias de mandris

| Aros | $\phi 1$ (mm) | $\phi 2$ (mm) | h (mm) | A (mm) |
|------|---------------|---------------|--------|--------|
| 16"  | 541           | 396           | 29     | 682    |
| 20"  | 683           | 508           | 36     | 640    |
| 22"  | 737           | 555           | 36     | 633    |
| 24"  | 773           | 615           | 36     | 670    |

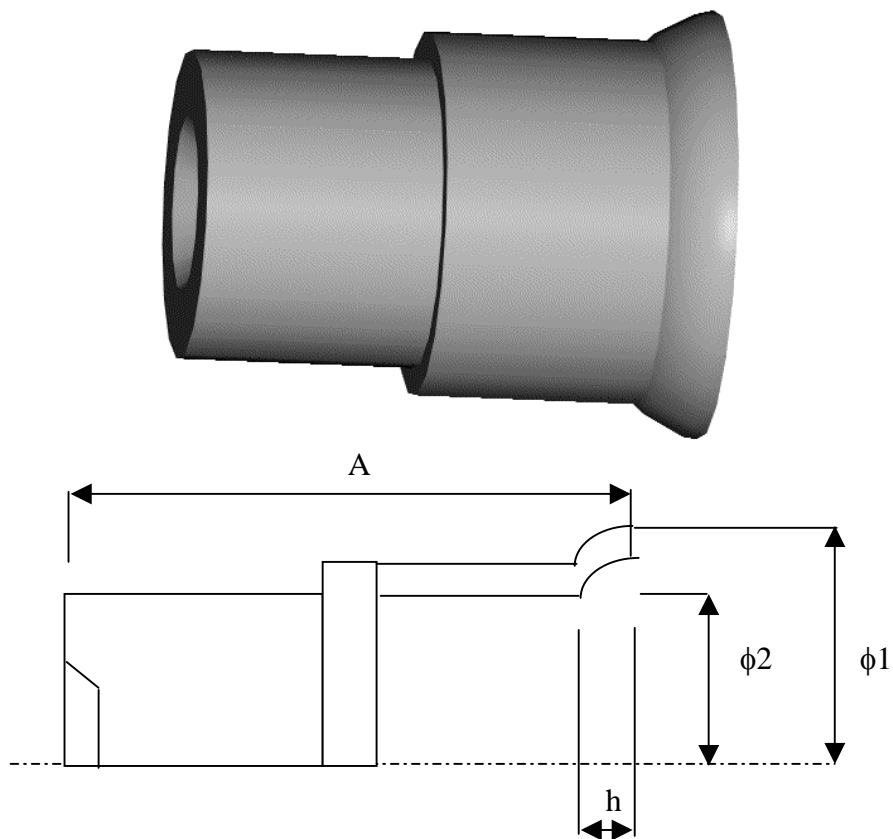


Figura 4.9 - Desenho 3D e perfil esquemático do mandril

a) Modelo plano da simplificação

No modelo, as áreas foram separadas de forma a se destacar o local onde a trinca vem ocorrendo bem como o ponto de aplicação de carga, sempre obedecendo as medidas principais da Tabela 4.1 do mandril do aro 24”.

A Figura 4.9 descreve o perfil geométrico plano a ser seguido na modelagem, bem como um modelo em 3 dimensões feito no Autocad ®.

b) Iniciando o modelamento

Utilizando o programa ANSYS desenvolve-se a seguinte seqüência:

No menu principal, Figura 4.10, adota-se o item “*Preferences*” e na próxima caixa de diálogo a opção “*Structural*”, Figura 4.11.

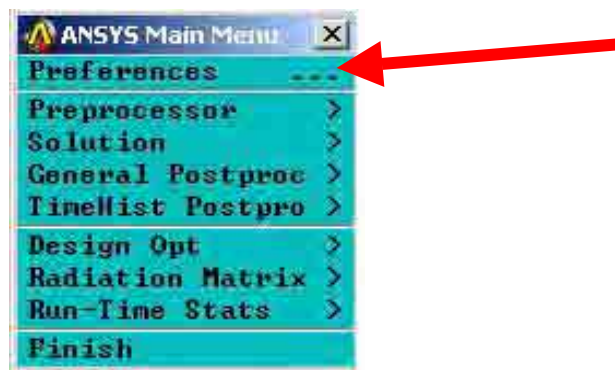


Figura 4.10 - Menu principal do ANSYS

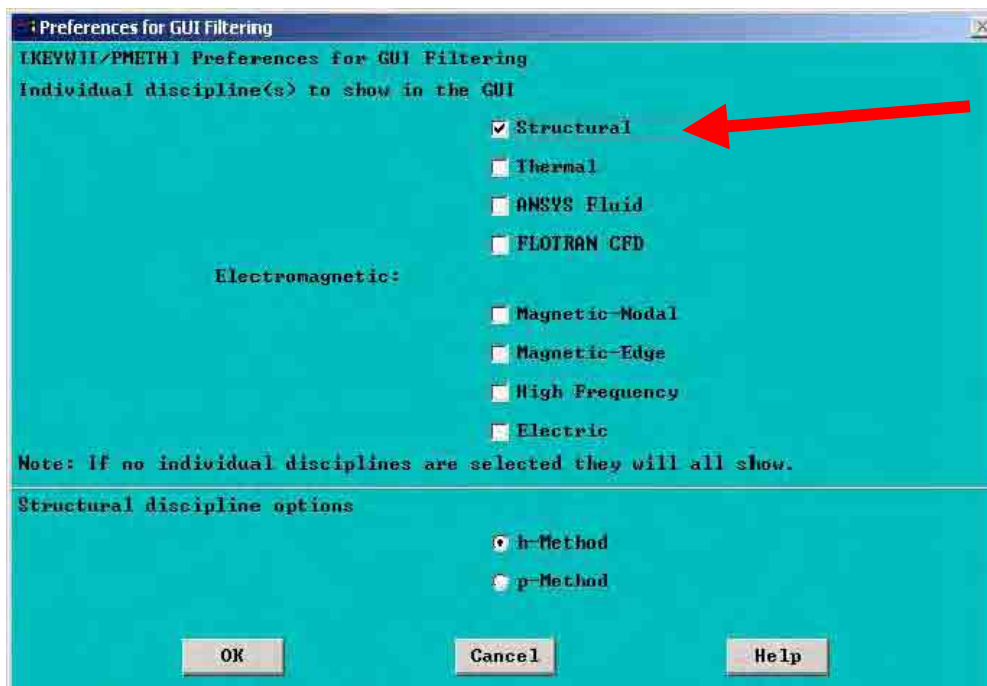


Figura 4.11 - Menu de preferência do ANSYS



Após isto se inicia a fase de pré-processamento, definindo o elemento adotado. Novamente no menu principal, Figura 4.12, adota-se o item “*Preprocessor*”.



Figura 4.12 - Menu principal da ANSYS

Ao escolher a opção “*Preprocessor*” uma nova caixa de diálogo aparece, Figura 4.13.

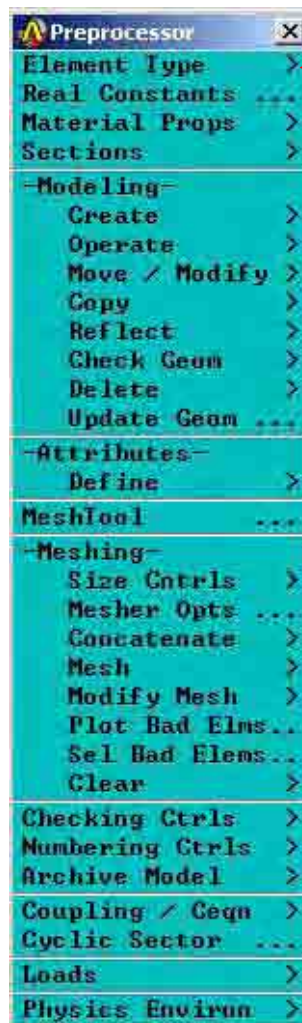


Figura 4.13 - Menu do pré-processador - *element type*

É escolhido o item “*Element Type*”, o qual abre uma caixa de diálogo com as seguintes opções mostradas na Figura 4.14.



Figura 4.14 - Menu de acesso a tipo de elemento

Estando na caixa “*Element Type*”, é utilizada a opção “*Add*”, a qual nos leva a outra caixa de diálogo.

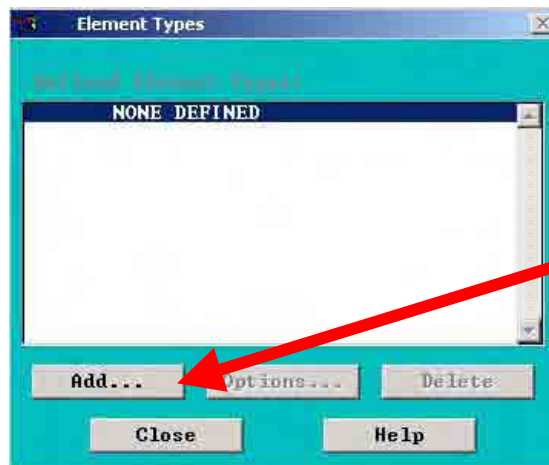


Figura 4.15 - Menu para adição de tipos de elementos

Nesta caixa de diálogo mostrada na Figura 4.15, adota-se a opção “*Add*” e resulta em outra caixa de diálogo denominada de biblioteca de tipos de elementos, Figura 4.16.



Figura 4.16 - Menu de biblioteca de tipos de elementos

Dentro desta caixa de diálogo tem-se a opção “*Strutural Solid*”, Figura 4.17, o qual dará opções de elementos planos e sólidos.

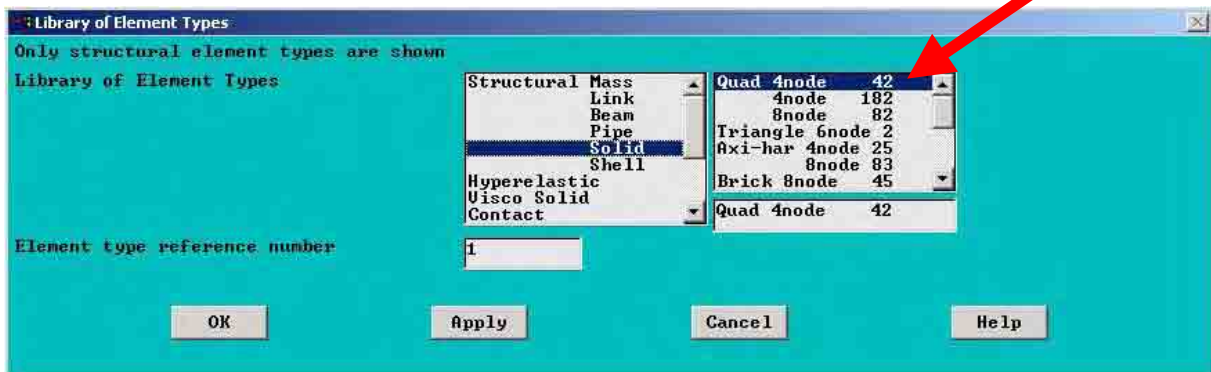


Figura 4.17 - Menu de tipos de elementos com opção de elementos planos e sólidos

Na modelagem serão estudadas as áreas ao redor de um eixo e adotados dois elementos, *Plane 42* e *Solid 95*.

O primeiro elemento, “*Plane 42*”, visto na Figura 4.18, é utilizado para modelagem em 2D em estruturas sólidas, que pode ser usado como um elemento plano (tensão plana ou deformação plana) ou como um elemento em eixos de simetria.

O elemento é definido por quatro nós com dois graus de liberdade em cada um: translação nas direções nodais x e y. Este elemento ainda possui capacidades plásticas, escorregamento, dilatação, rigidez, grandes deflexões e grandes deformações.

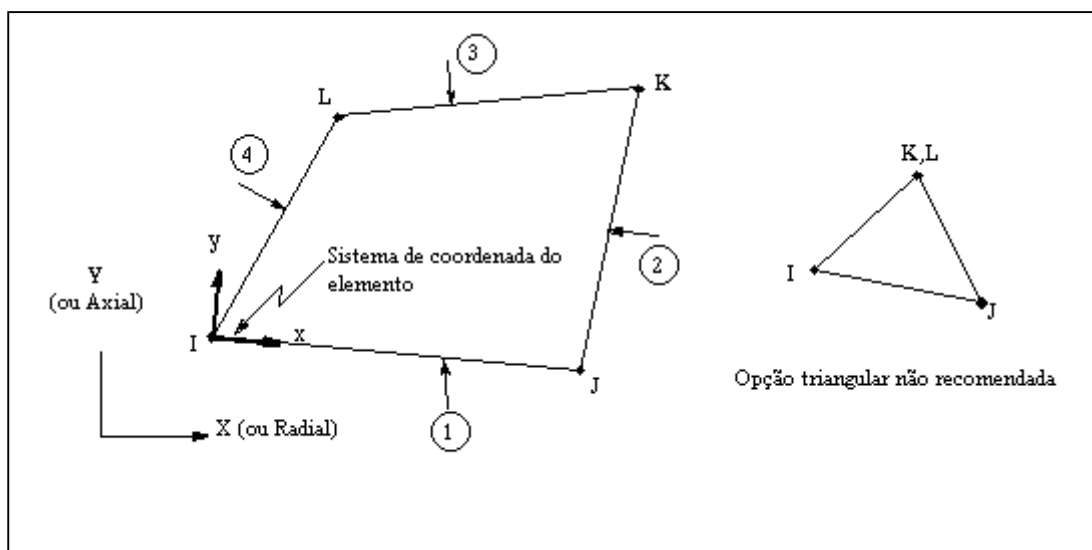


Figura 4.18 - Representação gráfica do elemento “*Plane 42*”

Após o botão de “OK”, a caixa de diálogo “*Element Type*” da Figura 4.17 registra a escolha “*Type 1 Plane 42*”. É acionado novamente o botão “*Add*”, Figura 4.19, onde se escolhe o segundo elemento.

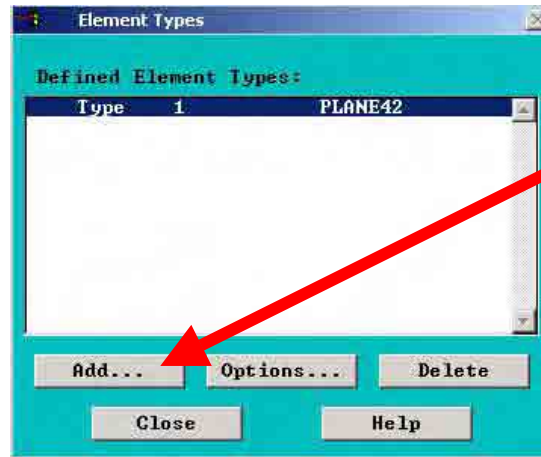


Figura 4.19 - Menu de definição de tipos de elementos

A criação do segundo elemento, “*Solid 95*”, Figura 4.22, se dá a partir do menu de biblioteca, acessando o elemento “*Solid – 20node 95*”, aceitando-se a seleção por meio do botão “*OK*”, Figura 4.20.

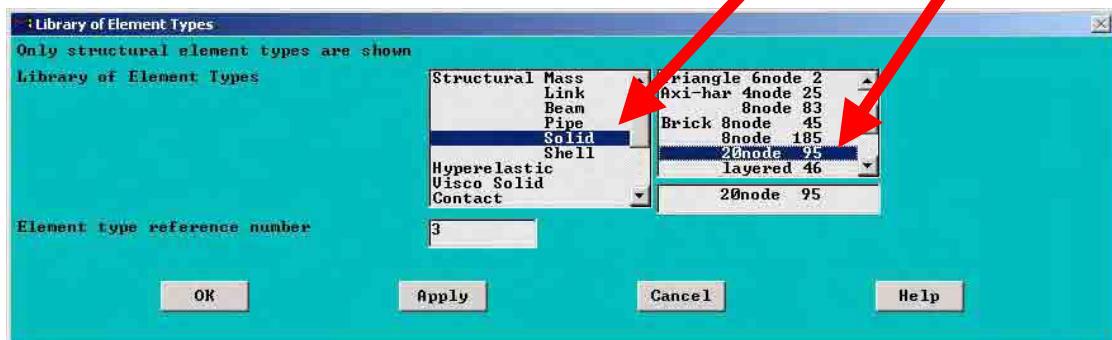


Figura 4.20 - Menu biblioteca de tipos de elementos

Isto deve levar à próxima caixa de diálogos, onde é acionado o botão “*Close*”, Figura 4.21.

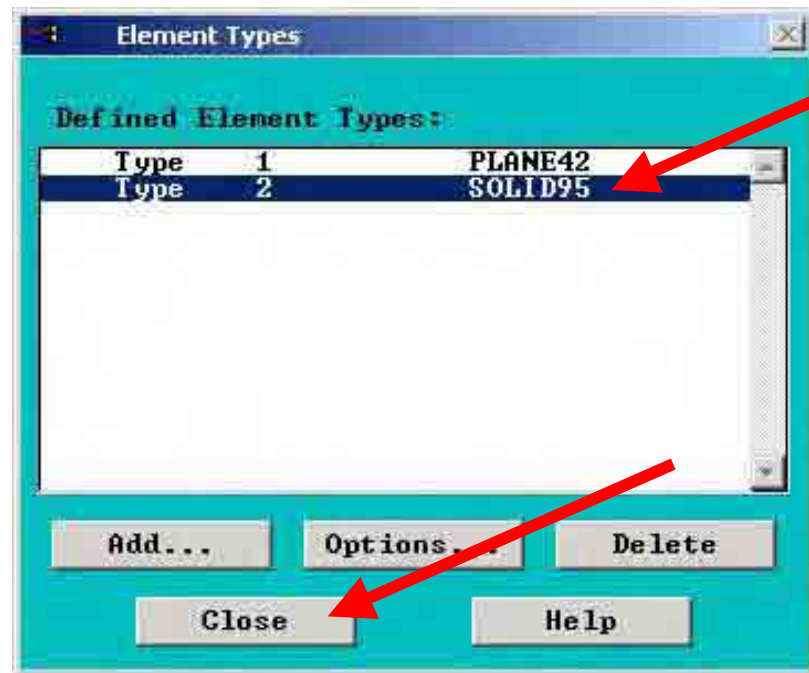


Figura 4.21 - Caixa de diálogo que mostra os tipos de elementos escolhidos

O elemento “*Solid 95*”, também chamado de “*Brick 95*”, é utilizado para modelagem tridimensional em estruturas sólidas. O elemento é definido por 20 nós tendo três graus de liberdade cada nó, ou seja, translação nas direções nodais  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

O elemento tem capacidade plástica, escorregamento, dilatação, rigidez, grandes deflexões e grandes deformações.

Ele pode tolerar formas irregulares sem muita perda de precisão, na Figura 4.22 têm-se opções de formas de aplicação.

Após a escolha dos elementos será a fase de definição dos materiais a serem utilizados.

O material isotrópico é aquele que possui as mesmas propriedades em todos os pontos e direções de seu corpo, o qual será a característica do material utilizado na árvore analisada.

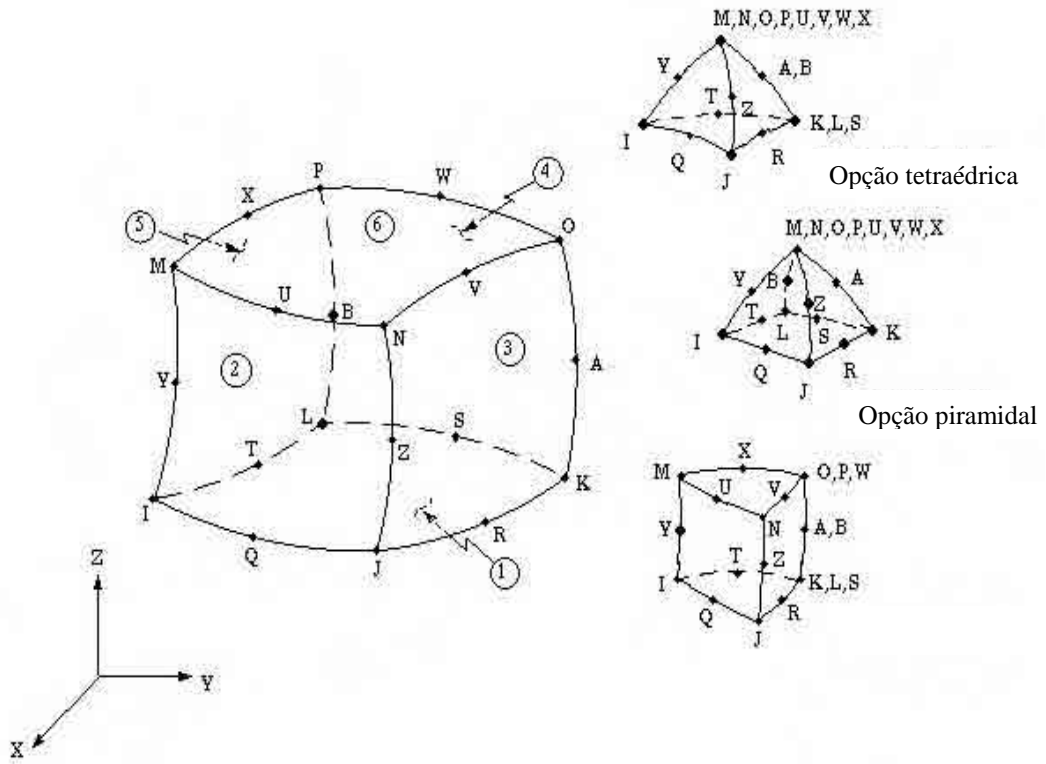


Figura 4.22 - Representação gráfica do elemento “Solid 95”

Ainda no menu “Preprocessor”, Figura 4.23, aciona-se o item “Material Props”, que fornece uma caixa de diálogo, com opções para materiais isotrópicos, ortotrópicos e listagens, Figura 4.24.



Figura 4.23 - Menu do “Preprocessor” com material “Properties”





Figura 4.24 - Menu “*Material Properties*” com opção “*Isotropic*”

Como o material é um aço ferramenta isotrópico, a próxima opção define as propriedades do material utilizado. Na caixa de diálogo “*Isotropic Material Properties*” digita-se o número de referência do material, como se vê na Figura 4.25. Como é utilizado apenas um tipo de material o número especificado será 1, caso existam outros materiais, o segundo material é o de número dois, o terceiro três e assim sucessivamente.

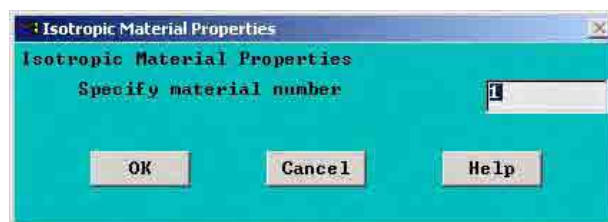


Figura 4.25 - Menu de atribuição de propriedades isotrópicas do material

Acionando o botão “*OK*”, passa-se à próxima caixa de diálogo, Figura 4.26, onde são definidas as constantes do material.

Adota-se o módulo de Young ou módulo de elasticidade, EX, em 209 GPa e taxa de Poisson em 0,3.

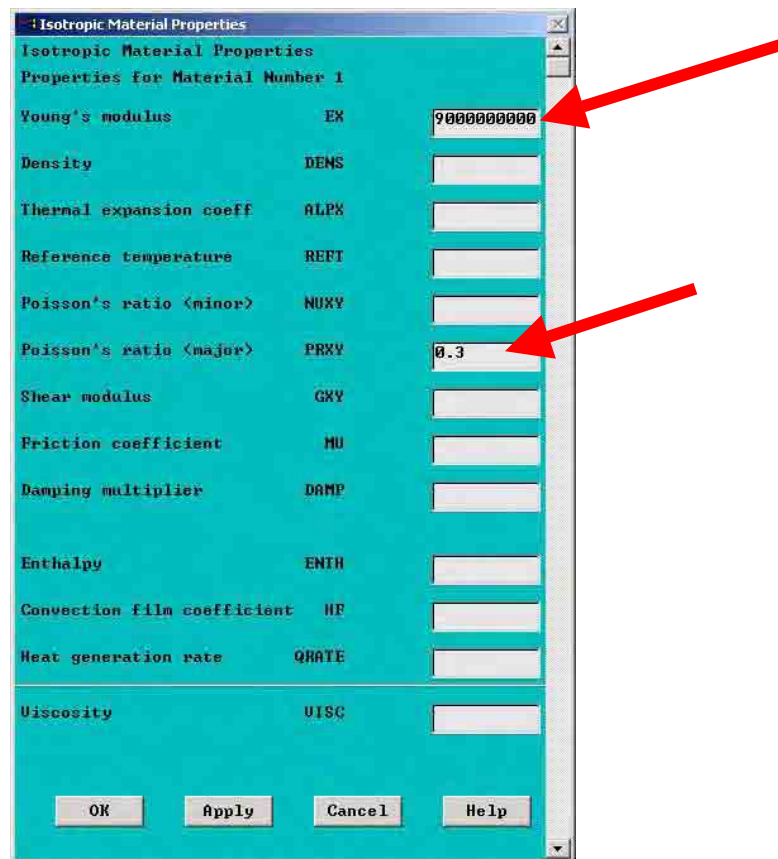


Figura 4.26 - Menu para entrada de propriedades isotrópicas do material 1

Após a entrada de dados inicia-se a criação da geometria plana através do menu “Create”, Figura 4.27.

O próximo passo é criação de “Keypoints” (pontos chaves). Acionando o item “Keypoints” será aberta uma caixa de diálogo, Figura 4.28, onde se indica os pontos chaves da geometria da figura plana.



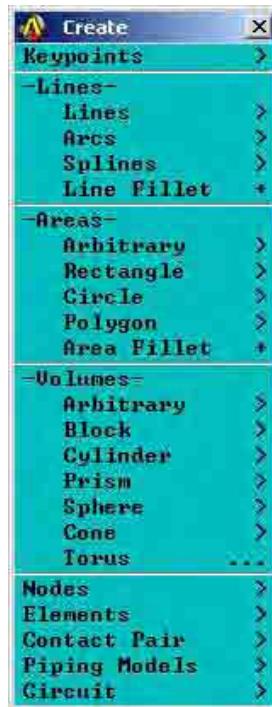


Figura 4.27 - Menu de criação de entidades geométricas

A caixa de diálogo “*Create Keypoints in Archive Coordinate System*” é o principal meio de entrada de dados nesta etapa.

A sistemática de introdução de dados demanda que se escreva o número do “*Keypoint*” e em seguida sua localização no sistema de coordenada vigente.

O modelo é iniciado com os “*Keypoints*” 1 e 17, onde a coordenada do “*Keypoint*” 1 é a origem do sistema e o “*Keypoint*” 17 definirá junto com o “*Keypoint*” 1 o eixo de revolução.

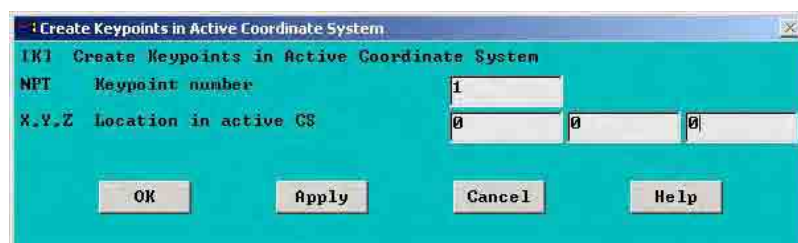


Figura 4.28 - Menu para criação de “*Keypoints*”

São indicadas as coordenadas dos “*Keypoints*” referente ao mandril 24” e a árvore.

Introduzindo-se os pontos da Tabela 4.2 resulta em uma distribuição conforme a Figura 4.29.

Tabela 4.2- Planilha dos pontos coordenados do perímetro mandril e árvore

| <b>Nº do KP</b> | <b>Coordenada X</b> | <b>Coordenada Y</b> |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| 1               | 0,0000              | 0,0000              |
| 2               | 0,0000              | 27,5000             |
| 3               | 0,0000              | 136,5975            |
| 5               | 50,3000             | 142,8850            |
| 6               | 51,9000             | 144,8446            |
| 7               | 51,9000             | 146,9254            |
| 8               | 50,3000             | 148,8850            |
| 10              | 50,3000             | 199,7000            |
| 11              | 97,3000             | 199,7000            |
| 15              | 97,3000             | 107,0000            |
| 17              | 97,3000             | 0,0000              |
| 19              | 121,3000            | 82,0000             |
| 24              | 121,3000            | 27,5000             |
| 25              | -608,2000           | 351,0500            |
| 26              | -608,2000           | 387,5000            |
| 27              | -513,2000           | 387,5000            |
| 28              | -480,7000           | 355,0000            |
| 29              | -213,7000           | 355,0000            |
| 30              | -213,7000           | 223,1300            |
| 31              | 50,3000             | 223,1300            |
| 32              | -288,7000           | 175,0000            |
| 33              | -288,7000           | 304,3500            |
| 34              | -572,7000           | 304,3500            |
| 35              | -572,7000           | 351,0500            |
| 36              | 40,2400             | 141,6275            |
| 40              | 157,3000            | 27,5000             |
| 41              | 257,3000            | 27,5000             |
| 42              | 257,3000            | 82,0000             |
| 43              | 157,3000            | 82,0000             |
| 50              | 50,3000             | 151,8850            |
| 51              | 70,3000             | 151,8850            |
| 52              | 70,3000             | 121,6275            |
| 53              | 40,2400             | 121,6275            |

As principais dimensões do eixo estão no anexo 3.

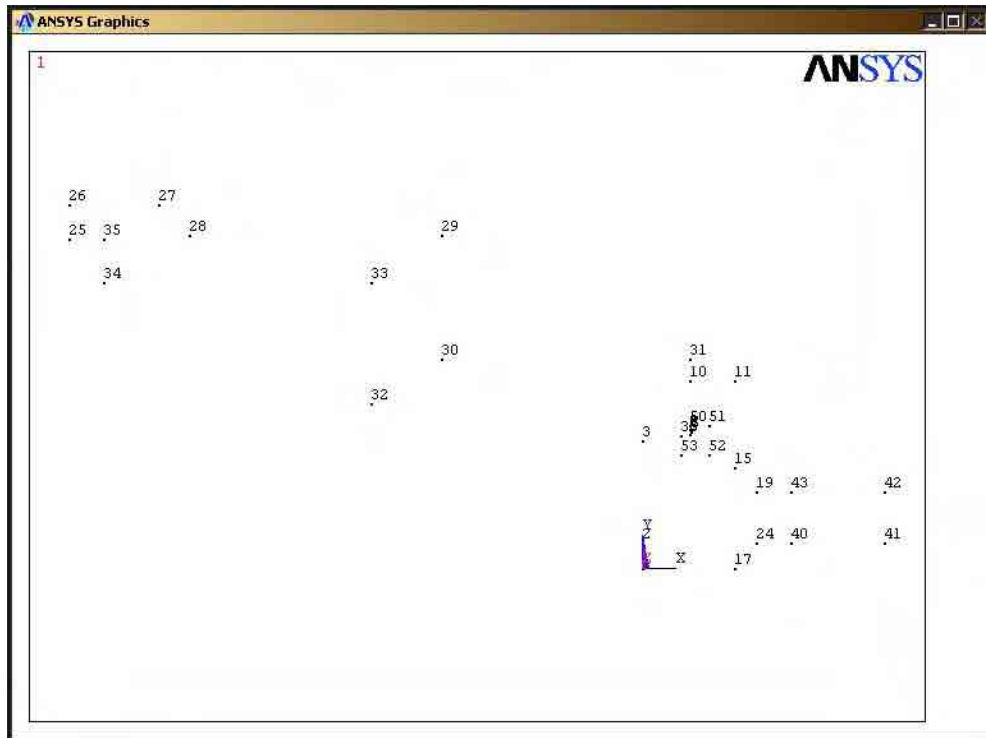


Figura 4.29 - “Keypoints” alocados no modelo

A seguir são unidos os “Keypoints” através de linhas a fim de se delimitar a futura área a ser extrudada.

No menu “Create”, Figura 4.30, é adotada a opção “Lines”, o qual fornece a caixa de diálogo “Lines”.



Figura 4.30 - Menu de criação de entidades

É acionada a opção “*Straight Line*”, Figura 4.31.

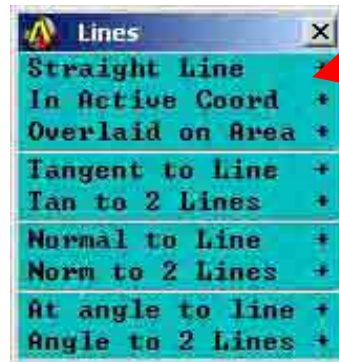


Figura 4.31 - Menu de opções de linhas

A ação anterior conduz a uma caixa de ação dinâmica.

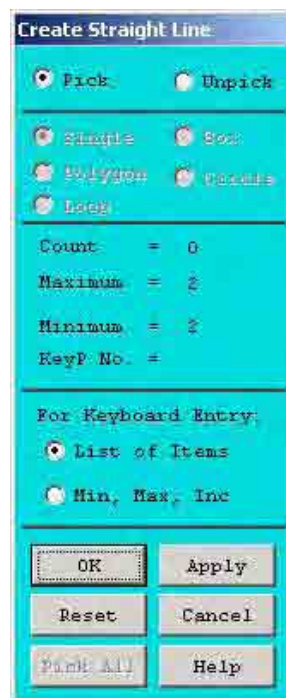


Figura 4.32 - Caixa de ação para criação de linhas retas

A caixa da Figura 4.32 possui uma característica dinâmica, o cursor está ativo na área de modelagem, neste caso um cursor em forma de seta marca o “*Keypoint*” desejado ao acionar o botão esquerdo do mouse. Marca-se primeiramente o ponto inicial da linha, ao se clicar o botão do mouse no primeiro ponto, já se visualizará a linha a ser criada, escolhendo-se o segundo ponto se efetiva a criação da linha e o comando espera para a entrada dos próximos dois pontos onde se indica a próxima

linha desejada, e assim sucessivamente, ao se encerrar a criação de todas as linhas acionar o botão “OK” para finalizar.

O resultado deve ser similar a Figura 4.33.

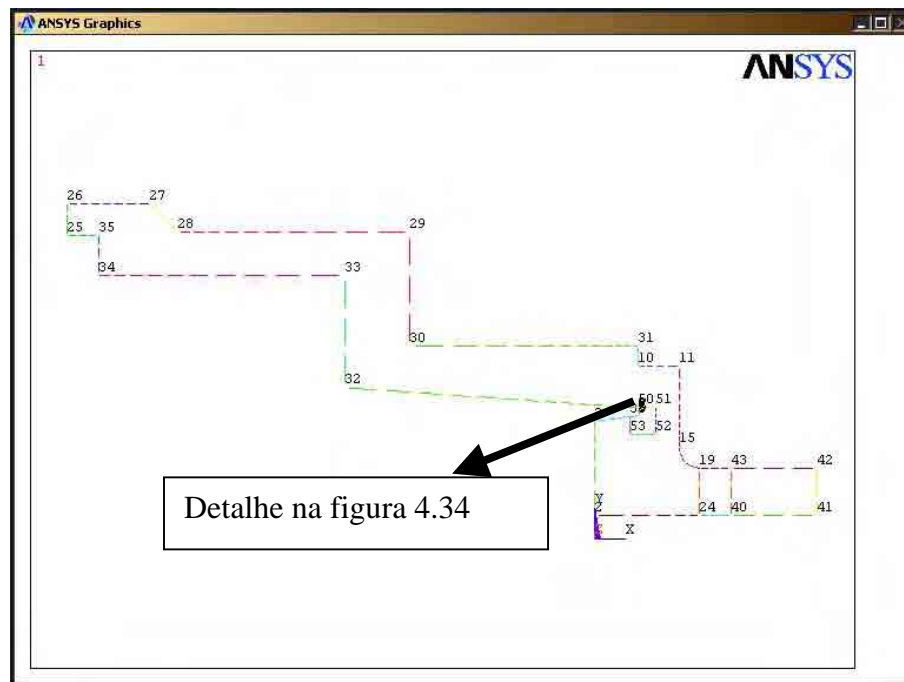


Figura 4.33 - Traçado de linhas unindo os “Keypoints”

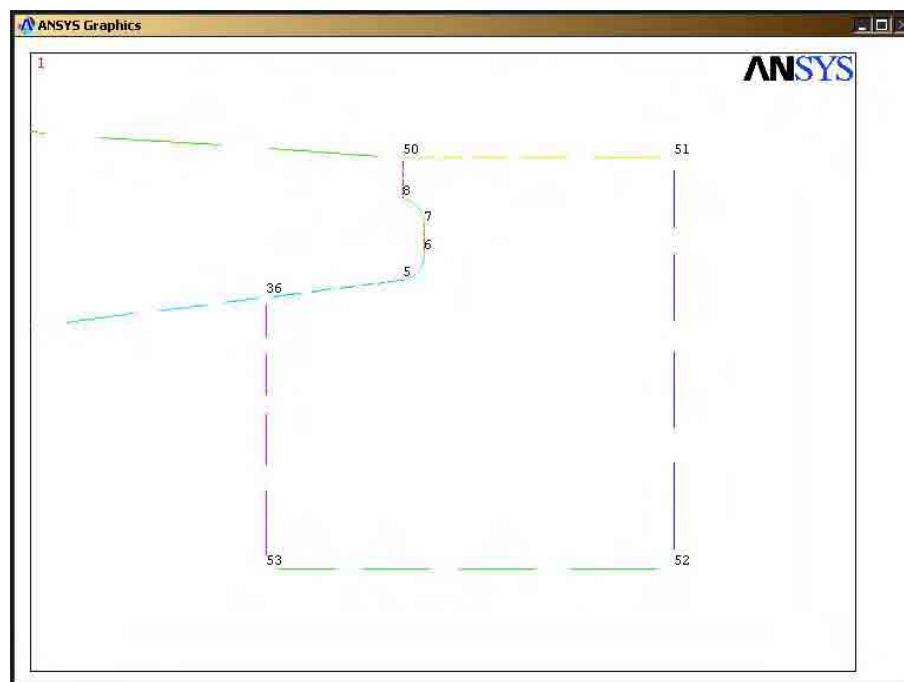


Figura 4.34 - Detalhe dos “Keypoints” e linhas que compõem o rebaixo da árvore

Inicia-se a criação das áreas a serem utilizadas para a criação de malhas com o elemento Plane 42.

No menu “Create”, adota-se a opção “Área - Arbitrary”, Figura 4.35.



Figura 4.35 - Menu de opções de entidades

Esta opção leva à próxima caixa de diálogo, Figura 4.36.

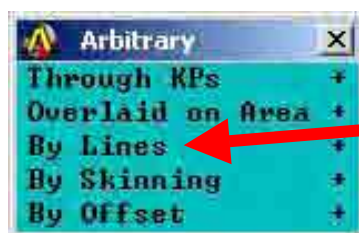


Figura 4.36 - Menu de opções para criação de áreas

Será adotada a opção “By Lines”, pois as linhas já foram traçadas anteriormente.

Esta caixa também possui característica dinâmica, o cursor está ativo na área de modelagem, no caso um cursor em forma de seta irá marcar a linha desejada, aciona-se o botão esquerdo do mouse e marca-se a linha; ao se clicar o botão do mouse na primeira linha já será visualizada a linha destacada, escolhendo-se uma seqüência de linhas que resulte em um perímetro fechado se dará a efetivação da criação da área,

repetindo o processo cria-se outra área sucessivamente, ao se encerrar a criação de todas as áreas aciona-se o botão “OK”. O resultado deve ser similar a Figura 4.37.

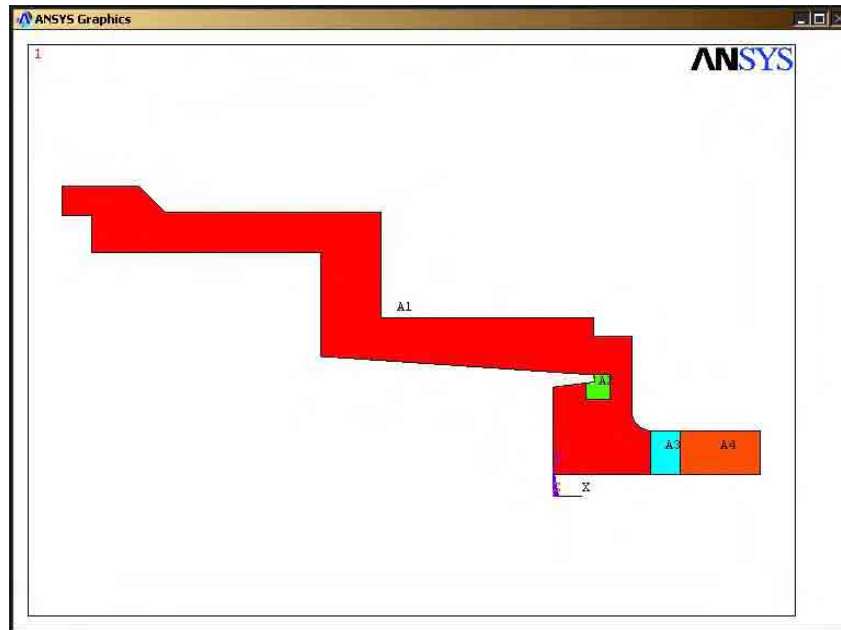


Figura 4.37 - Criação de áreas básicas para futura revolução

Com o objetivo de executar uma revolução de 360 graus das áreas e futura malha em torno de um eixo, defini-se o eixo de rotação entre os “Keypoints” 1 e 17, Figura 4.38.

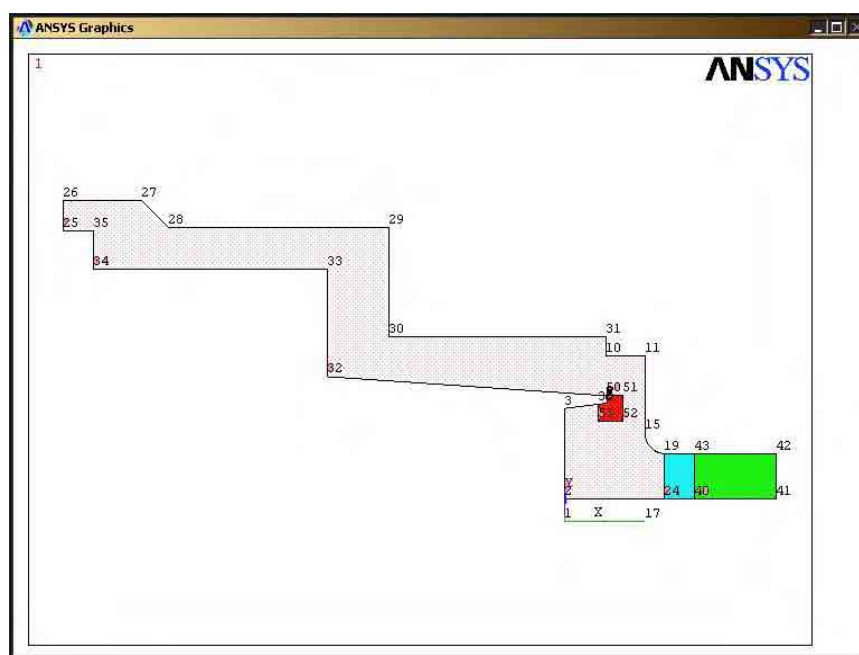


Figura 4.38 - Áreas e linha de revolução entre “Keypoints” 1 e 17

Antes, porém, de se efetuar a revolução deve-se proceder na construção da malha plana nas áreas citadas. Para tal através do menu “*Preprocessor*” aciona-se a opção “*Meshtool*”, Figura 4.39.

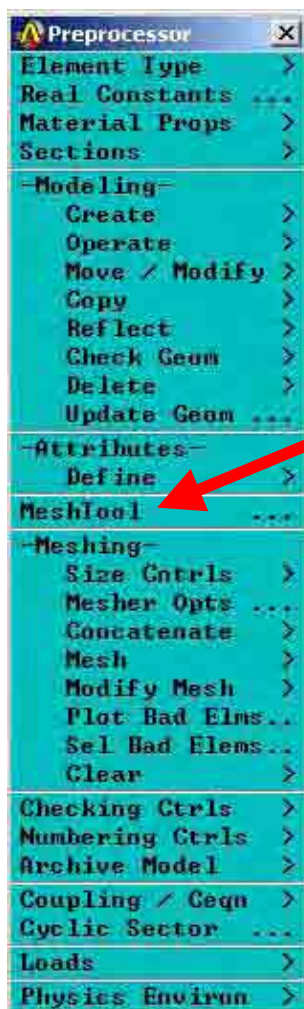


Figura 4.39 - Menu do pré-processador

A próxima caixa de diálogo, Figura 4.40, fornecerá a ferramenta para se criar as malhas planas.





Figura 4.40 - Caixa de ferramentas para criação de malhas

Com a opção “*Mesh Areas*”, tipo “*Free*” e “*Quad*” e com o grau de refinamento de 4 aciona-se o botão “*Mesh*” o qual leva ao cursor dinâmico a fim de se indicar as áreas onde se deseja criar malhas.

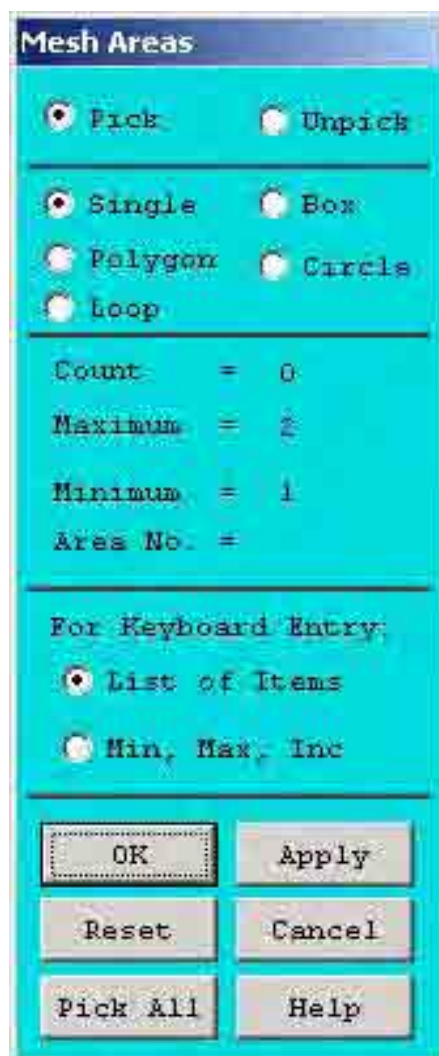


Figura 4.41 - Menu “*Mesh Areas*”

Através do cursor dinâmico escolhem-se as áreas uma a uma ou com a opção “*Pick All*” conforme Figura 4.41.

Após acionar o botão “*Apply*” ou “*OK*” a malha é criada conforme a Figura 4.42.

A divisão em diversas áreas se dá propositalmente a fim de se criar malhas mais refinadas nas imediações da trinca como também a minimização de processamentos em áreas onde a influência sobre a trinca é pequena ou mesmo nenhuma. A área 2 onde a trinca se apresenta é onde devemos refinar as malhas, já as áreas 1, 3 e 4 não necessitam de um grande refinamento.

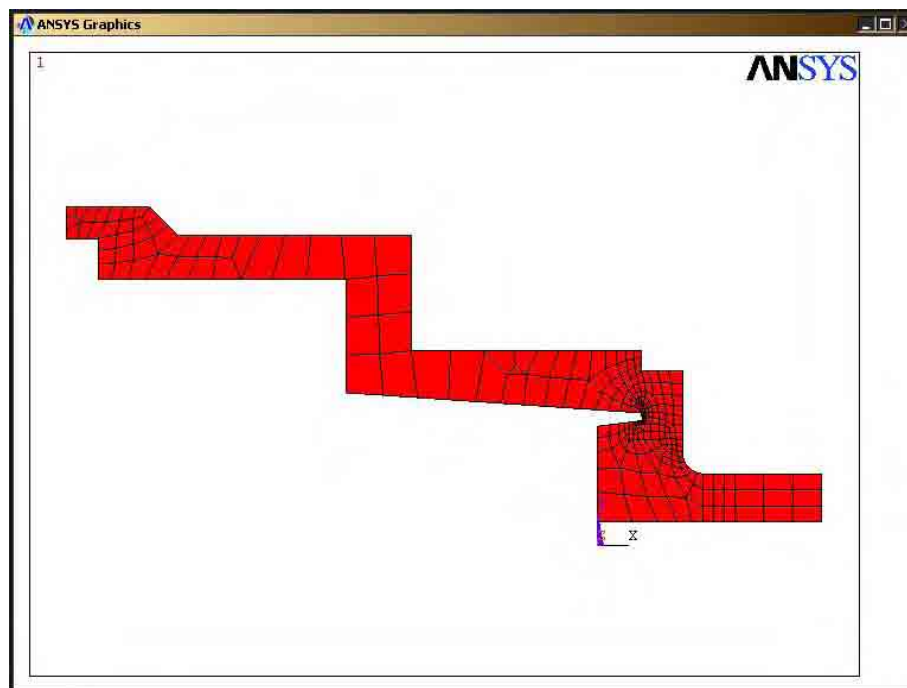


Figura 4.42 - Malha sobre as áreas 1, 2, 3 e 4

Após a criação da malha com elemento “Plane 42” procede-se na revolução das áreas e elementos através do menu “Operate”, opção “Extrude/Sweep” Figura 4.43.



Figura 4.43 - Menu “Operate” com opção “Extrude/Sweep”

Este menu leva a uma caixa de diálogo que é a de extrusão, Figura 4.44.

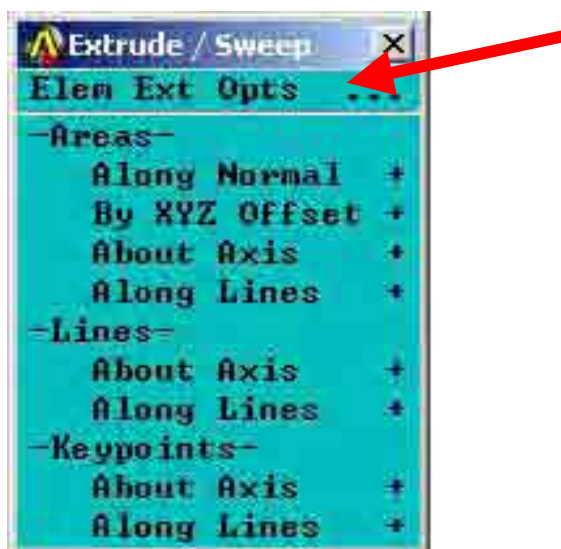


Figura 4.44 - Menu de extrusão

No menu de extrusão escolhe-se a opção “*Elem Ext Opts*” para configurar a caixa de opções conforme a Figura 4.45.

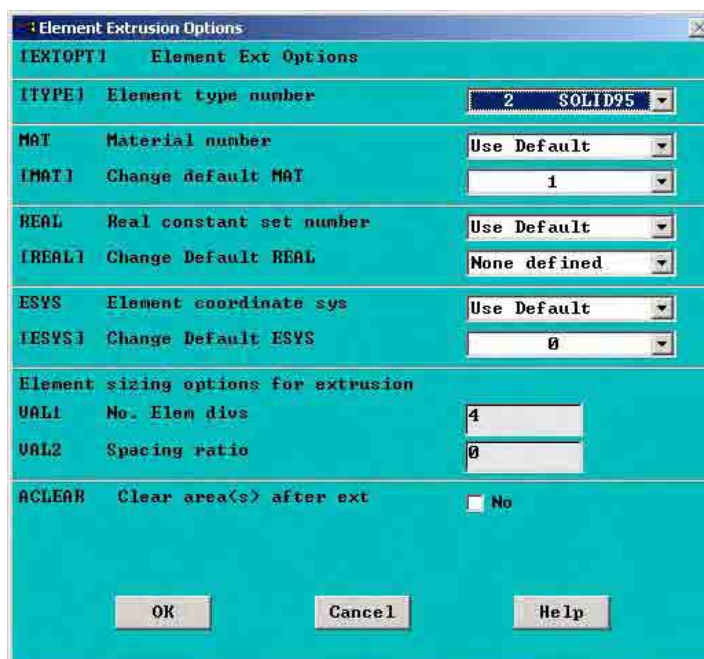


Figura 4.45 - Caixa de opção de extrusão

Na opção do número do elemento ao abrir a caixa estará marcado número 1 que é o “*Plane 42*” deve-se trocar pelo 2 “*Solid 95*” e no número de divisões de elementos para a revolução em quatro partes, ou seja, o modelo será dividido em quatro quadrantes, como exemplo da Figura 4.46.

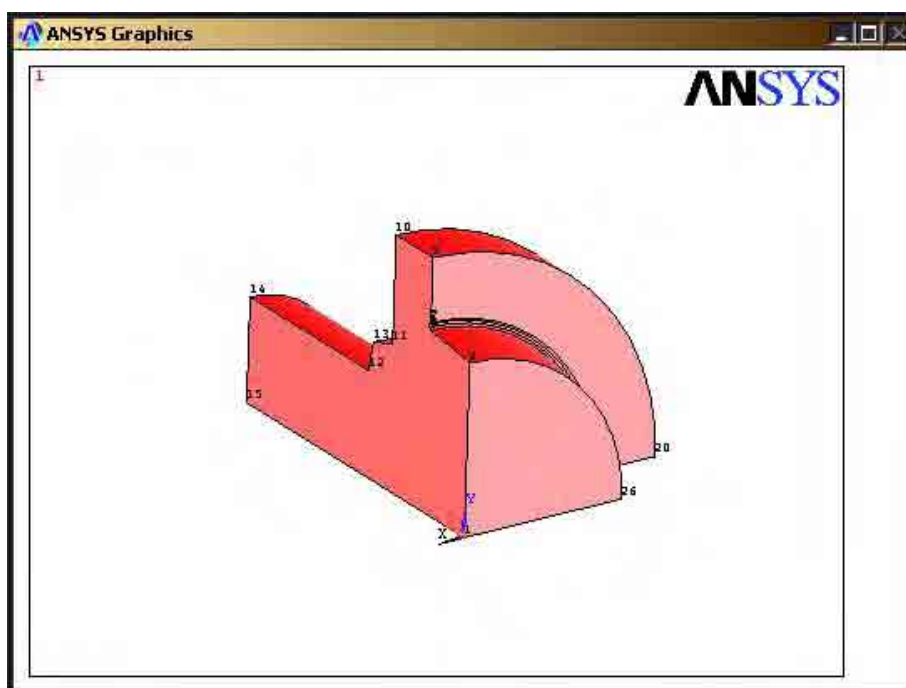


Figura 4.46 - Detalhe de um quadrante da árvore

Para se efetuar a revolução após ter-se dado “OK” no botão do menu da Figura 4.45, aciona-se o menu “*Extrude/Sweep*” com opção “*About Axis*”, Figura 4.47 o qual fornece um menu com cursor ativo onde primeiro se escolhem as áreas que serão extrudadas, Figura 4.48, escolhidas as áreas será acionado o botão “*Apply*” e então se deve entrar com os 2 “*Keypoints*” que irão referenciar o eixo de extrusão, que são o “*Keypoints*” 1 e 17.

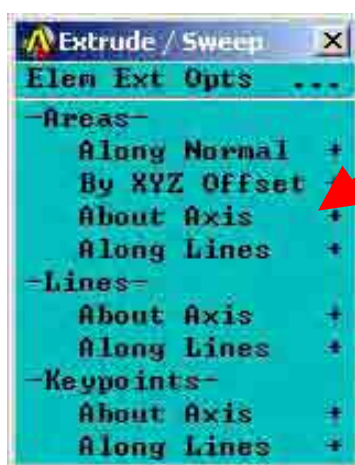


Figura 4.47 - Menu “*Extrude/Sweep*” com opção “*About Axis*”

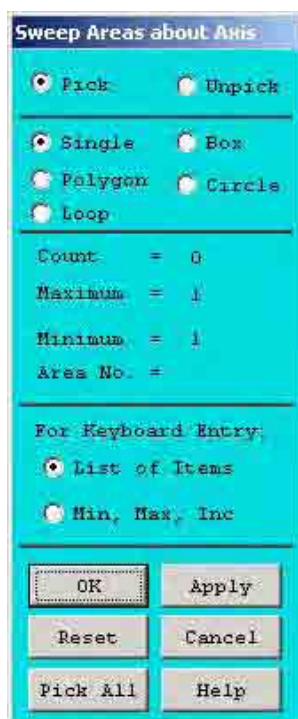


Figura 4.48 - Menu de cursor ativo para extrusão

Após a indicação das áreas e eixo de revolução o menu que define os números de segmentos de cada quadrante deverá ser alimentado com o número de segmentos que se deseja dividir seu quadrante, adota-se 16, e o ângulo de revolução, para o qual adota-se 360 graus, conforme Figura 4.49.

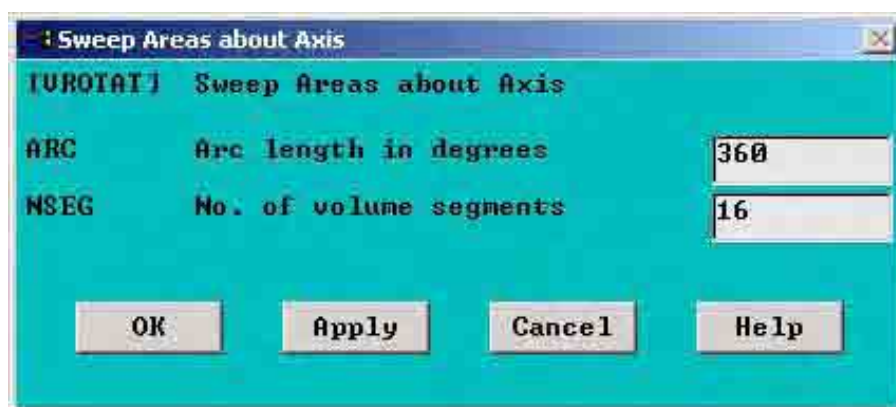


Figura 4.49 - Menu de extrusão para definição de números de segmentos

Ao se executar o comando através do acionamento do botão “OK” a revolução forma um modelo com 53.466 elementos e 129.624 nós, conforme quadro informativo da Figura 4.50.

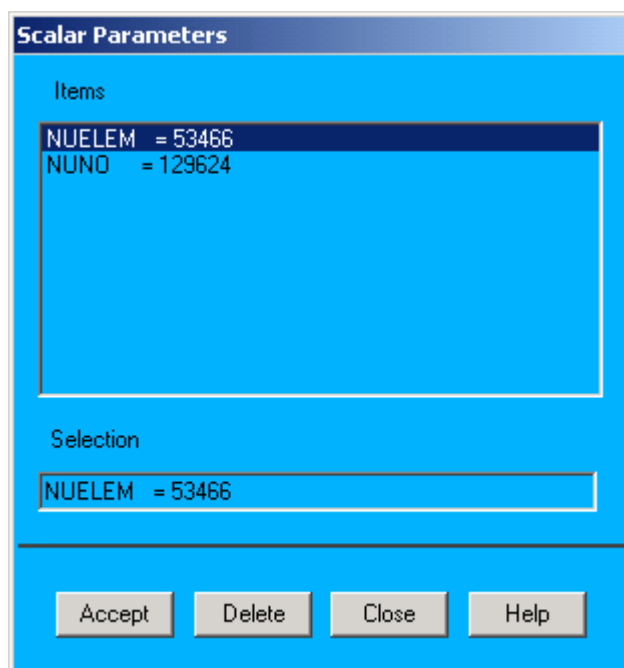


Figura 4.50 - Parâmetros escalares do modelo

O modelo obtido é composto de 16 volumes, ou seja, 4 volumes por quadrante, a árvore é extrudada conjuntamente com o mandril, Figura 4.51, para possibilitar a aplicação de forças no ponto real de carregamento.

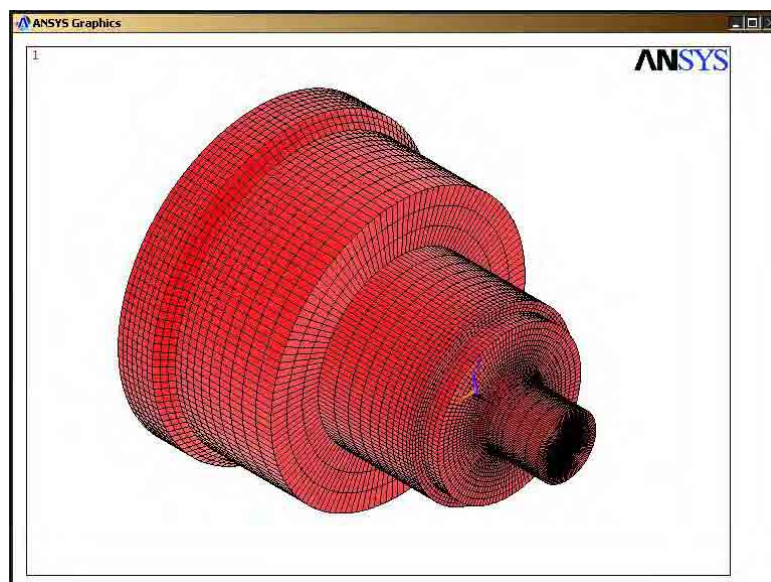


Figura 4.51 - Modelo extrudado através do comando de revolução

Neste ponto considera-se que o pré-processamento se encerra e inicia-se a solução do problema.



### 4.2.2 Solução do modelo

A segunda parte de um processamento em elementos finitos utilizando o programa ANSYS é denominada de solução e está baseada no modelo construído no pré-processamento.

Neste ponto, são fornecidos os dados sobre o carregamento a ser aplicado, condições de apoio, condições de contorno e ponto de aplicação das forças envolvidas.

Para tal, utiliza-se os dados obtidos no capítulo 3.2 em termos de forças atuantes, bem como baseados em desenhos de conjunto que indicarão os pontos de atuação das forças.

Nesta fase o computador assume a tarefa de resolver os sistemas de equação que o método gera, sendo que os resultados dessas soluções são:

- Valores nodais de deslocamentos os quais são os resultados primários.
- Valores derivados dos acima, que forma a solução para cada elemento.

Vários métodos de resolução do sistema de equações estão disponíveis no programa ANSYS, como a solução de onda frontal, solução do gradiente conjugado Jacobiano (JCG) e gradiente conjugado pré-condicionado (PCG) e outros.

No modelo usa-se o PCG, iniciando-se pela formulação da matriz. Monta-se a matriz global e processa a solução dos graus de liberdade através da interação dos mesmos para a convergência, assumindo como início um valor zero para todos os graus de liberdade. A escolha do processador PCG é feita devido ao mesmo ser de 4 a 10 vezes mais rápido que o processador JCG para elementos estruturais sólidos. O PCG requer cerca de  $\frac{1}{4}$  de memória em espaço de disco do que o “*Frontal Solver*”, sendo mais indicado para análises estruturais, trabalha com modelos entre 50.000 a 1.000.000 de graus de liberdade.

a) Definição das forças que atuam no modelo.

Baseadas na tabela 3.2 do capítulo 3 as forças a serem empregadas são as máximas obtidas do experimento de aquisição de dados, ou seja, a força axial é de 395.783 N e a força lateral é de 257.789 N, conforme Figura 4.52.



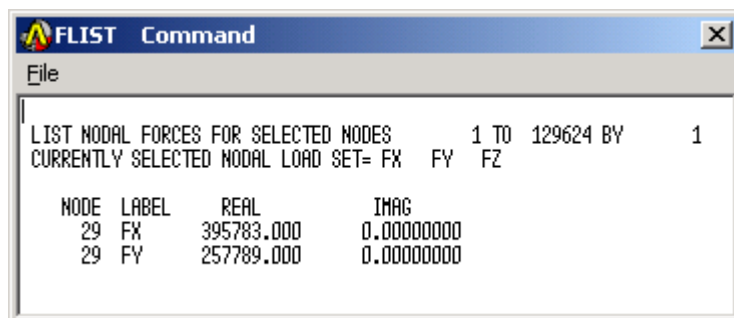


Figura 4.52 - Forças aplicadas e indicação do nó 29

b) Local de aplicação das forças

As forças devem ser sempre aplicadas em nós, no modelo desenvolvido o nó número 29 é o ponto de aplicação das forças e suas coordenadas de aplicação são - 608.20, 351.05, 0, respectivamente x, y, z, conforme Figura 4.53

| NODE | X              | Y             | Z           |
|------|----------------|---------------|-------------|
| 21   | 145.300000000  | 27.500000000  | 0.000000000 |
| 22   | 133.300000000  | 27.500000000  | 0.000000000 |
| 23   | 145.300000000  | 82.000000000  | 0.000000000 |
| 24   | 133.300000000  | 82.000000000  | 0.000000000 |
| 25   | 133.300000000  | 63.833333333  | 0.000000000 |
| 26   | 145.300000000  | 63.833333333  | 0.000000000 |
| 27   | 133.300000000  | 45.666666667  | 0.000000000 |
| 28   | 145.300000000  | 45.666666667  | 0.000000000 |
| 29   | -608.200000000 | 351.050000000 | 0.000000000 |
| 30   | -608.200000000 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 31   | -608.200000000 | 363.039924488 | 0.000000000 |
| 32   | -608.200000000 | 375.189218378 | 0.000000000 |
| 33   | -513.200000000 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 34   | -596.150230161 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 35   | -583.625677516 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 36   | -570.607634758 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 37   | -557.076657483 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 38   | -543.012535139 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 39   | -528.394260842 | 387.500000000 | 0.000000000 |
| 40   | -480.700000000 | 355.000000000 | 0.000000000 |

Figura 4.53 - Coordenadas do nó 29

No modelo gráfico o nó 29 pertence ao plano x – y, conforme Figura 4.54.

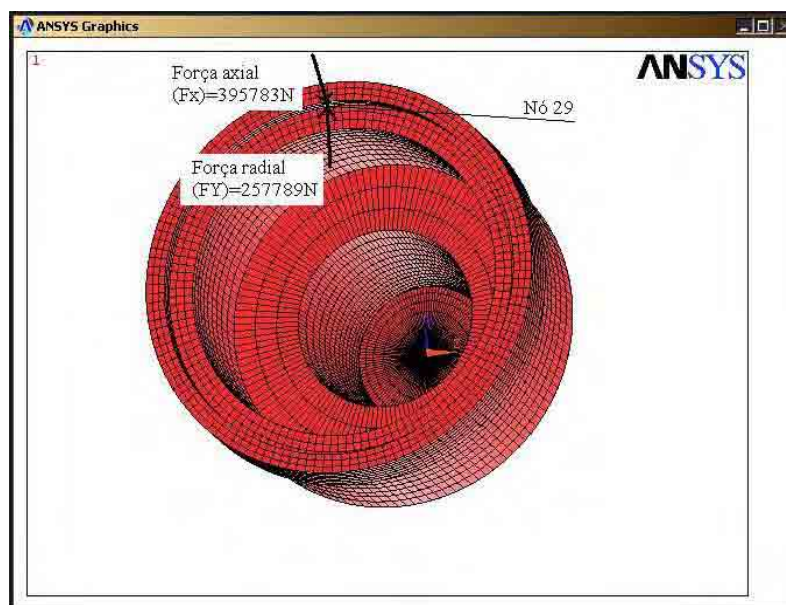


Figura 4.54 - Aplicação de forças no nó 29

c) Aplicação do programa ANSYS

No programa ANSYS desenvolve-se a seguinte seqüência para a solução:

No menu principal, Figura 4.55, escolhe-se a opção “*Solution*”.

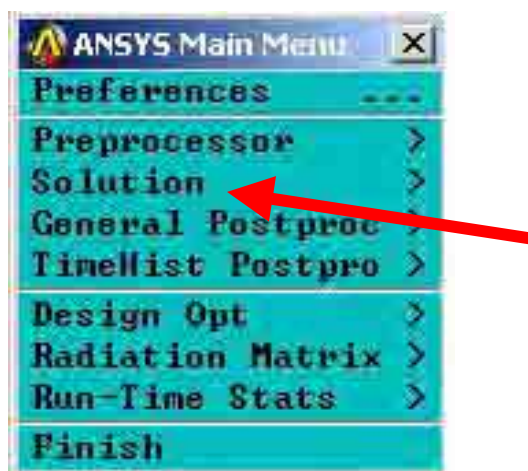


Figura 4.55 - Menu principal do ANSYS

Do menu principal acessa-se ao menu “*Solution*”, Figura 4.56.

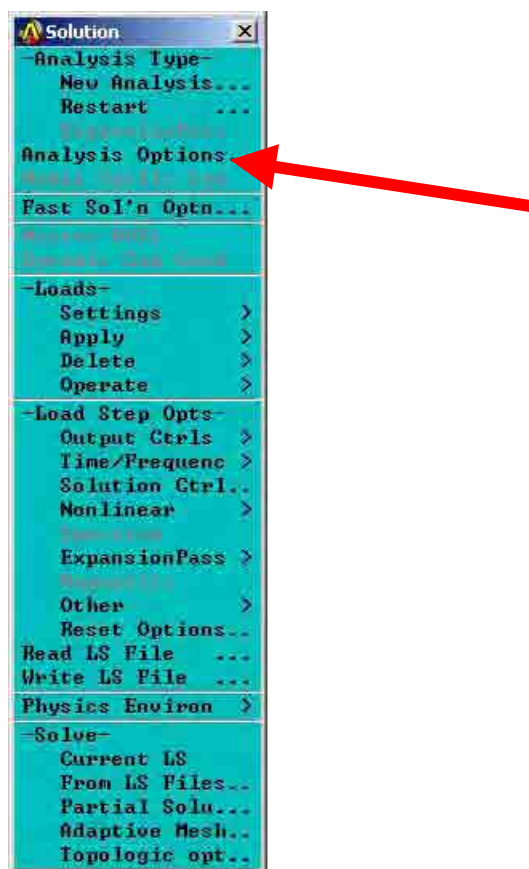


Figura 4.56 - Menu “*Solution*”

No menu “*Solution*” deve-se acionar a opção “*Analysis Options*”, o qual abrirá um quadro com opções de processadores e tolerâncias entre outros itens. As opções escolhidas neste quadro são:

- Processador PCG – “*Preconditioned Conjugate Gradient Solve – Out of Core*”, a opção “*Out of Core*” é utilizada quando o computador não dispõe de muita memória para processamento.
- Tolerância de 0.00000001

Conforme Figura 4.57, sendo que após escolher o processador e introduzir a tolerância desejada aciona-se o botão “*OK*”.

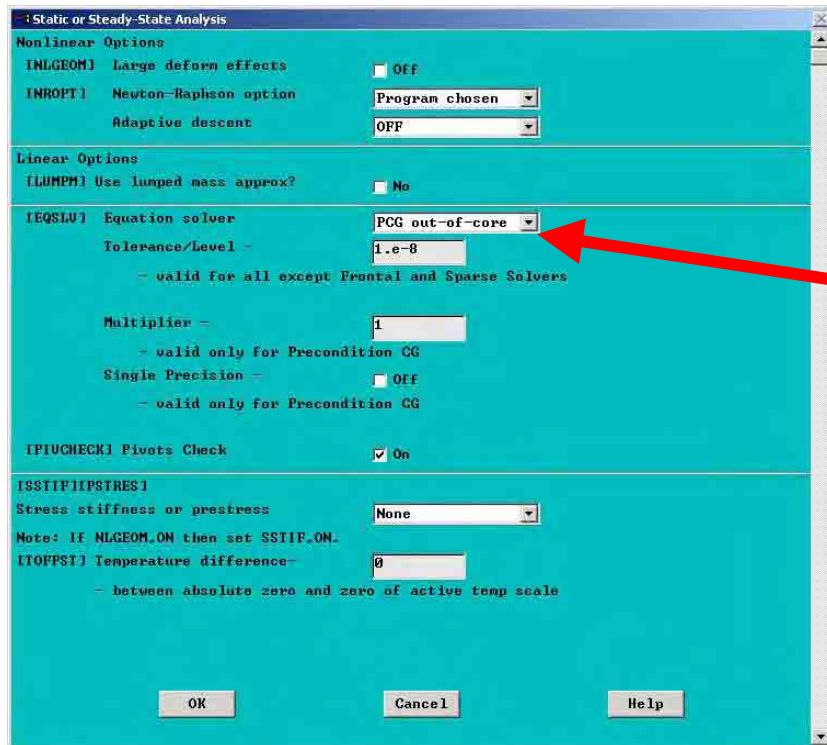


Figura 4.57 - Menu de opções de análises de processamento

A seguir escolhe-se no menu “*Solution*” a opção “*Load Apply*”, Figura 4.58.

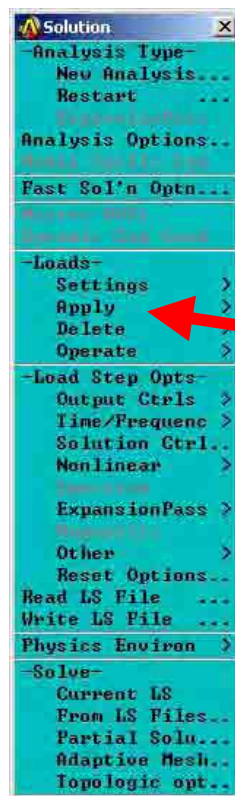


Figura 4.58 - Menu “*Solution*” com opção “*Load Apply*”

A opção “*Load Apply*” fornece um menu, Figura 4.59, onde utilizaremos a opção “*Force/Moment*” que por sua vez fornece um menu onde se indica através de qual entidade se introduz a força aplicada.



Figura 4.59 - Menu de aplicação de cargas

Como a força é aplicada através de nós escolhe-se a opção “*Nodes*” no menu mostrado na Figura 4.60.

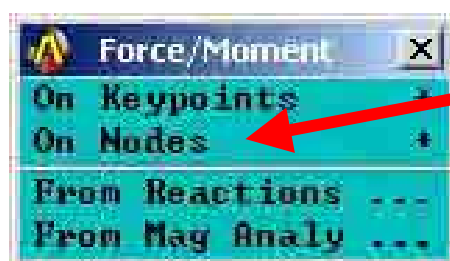


Figura 4.60 - menu de aplicação de cargas por entidade

Esta opção leva ao menu dinâmico de aplicação de forças sobre nós, conforme a Figura 4.61.



Figura 4.61 - menu dinâmico de aplicação de forças

Após marcar o nó 29 como ponto de aplicação de forças a caixa de diálogo seguinte irá solicitar a direção da força e a intensidade da força aplicada no nó na direção x, conforme a Figura 4.62.

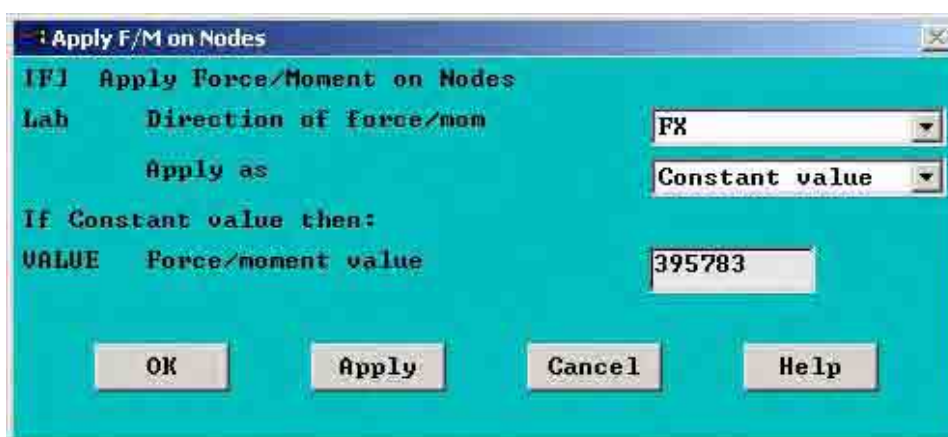


Figura 4.62 - Caixa de introdução de intensidade de forças na direção X



Para tal, entra-se com a força de 395783 N na direção e sentido positivo ao eixo X.

Repete-se a operação para a força aplicada na direção e sentido do eixo Y, conforme a Figura 4.63.

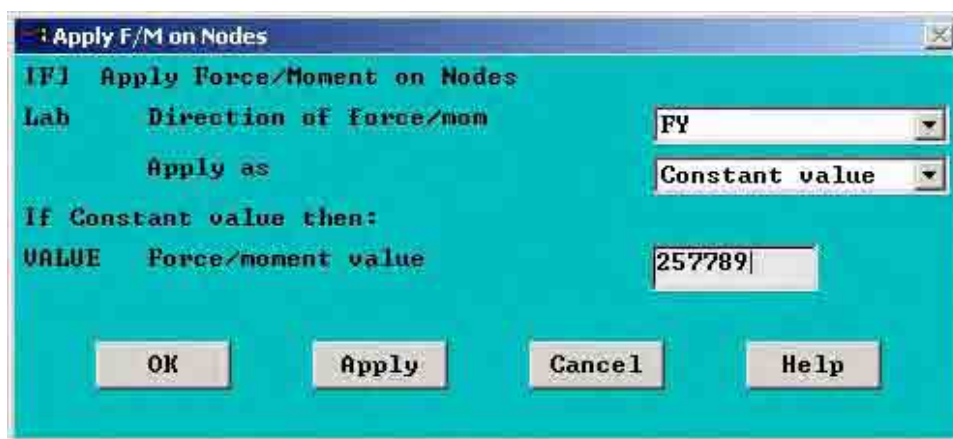


Figura 4.63 - Caixa de introdução de intensidade de forças na direção Y

Desta maneira encerra-se a aplicação das cargas no modelo, porém é necessária a aplicação das condições de contorno.

As condições de contorno serão as de engastamento da árvore, pois a fim de se reduzir a complexidade e o tempo de processamento optou-se por modelar a parte frontal do eixo logo após a saída do mancal de fixação da eixo.

Para efeito de análise consideramos o mesmo engastado na face do cilindro nas áreas de números 41, 79, 117, 152 conforme as Figura 4.64 , 4.65 e 4.66.

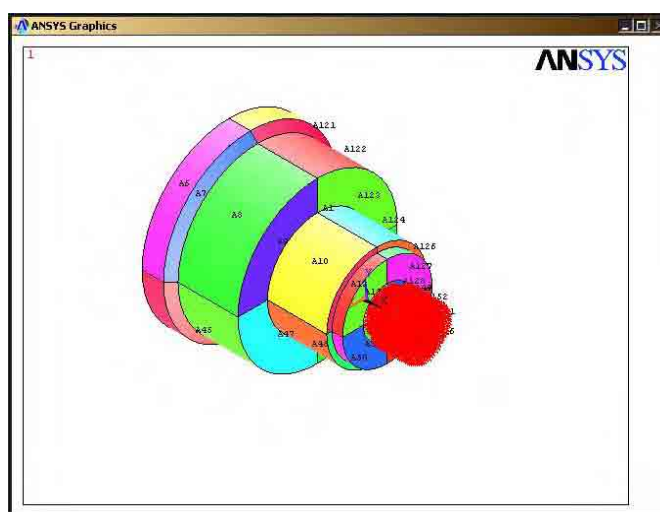


Figura 4.64 - Vista total das áreas do modelo com engastamento

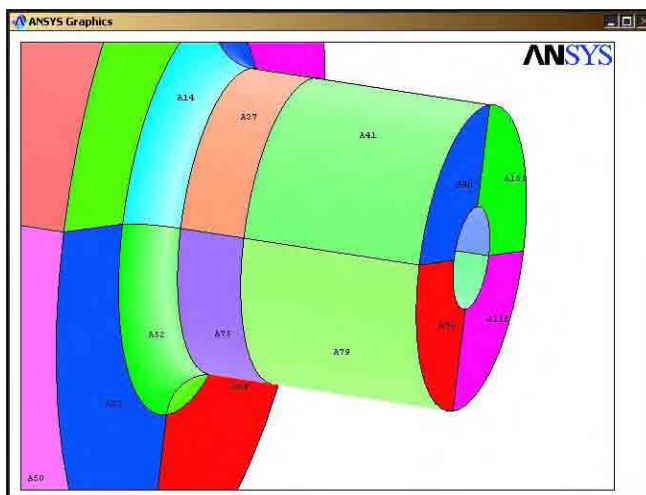


Figura 4.65 - Detalhe das áreas de engastamento números 41 e 79

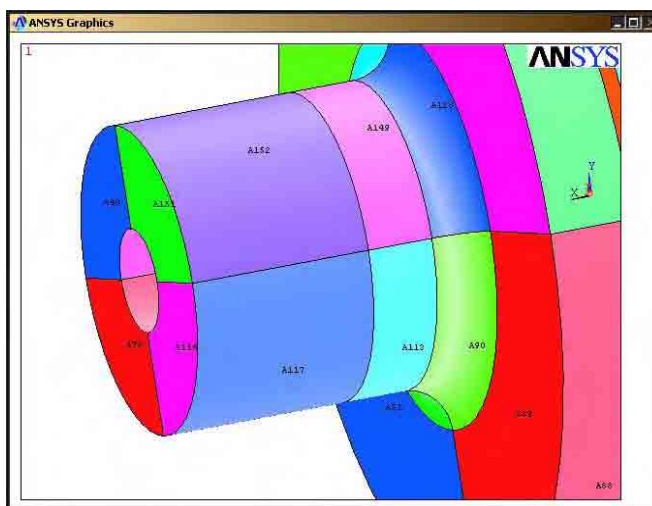


Figura 4.66 - Detalhe das áreas de engastamento números 117 e 152

Para se proceder na aplicação das condições de contorno aciona-se o menu “Apply” e através da opção “Displacement” acessa-se ao menu da Figura 4.67.



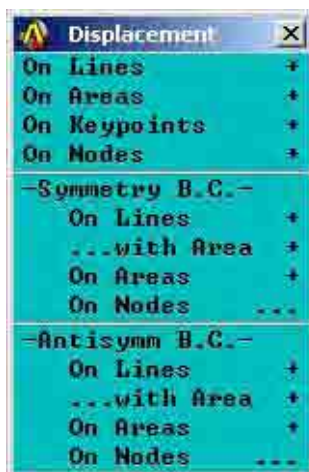


Figura 4.67 - Menu “Displacement”

Neste menu “Displacement” é escolhido a opção “On Areas” a qual propicia um menu dinâmico, conforme a Figura 4.68, o qual se indica no modelo as áreas a serem engastadas no menu da Figura 4.69, o tipo de grau de liberdade.

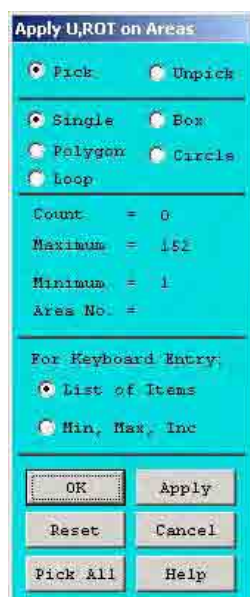


Figura 4.68 - Menu dinâmico para indicação de graus de liberdade em entidades



Figura 4.69 - Caixa de definição de tipo de grau de liberdade da área

Sendo que as áreas são as mencionadas nas Figuras 4.65 e 4.66. Após acionarmos o botão “OK” o modelo assume o engastamento com todos os graus de liberdade restringidos, vindo o modelo a ter a configuração da Figura 4.70.

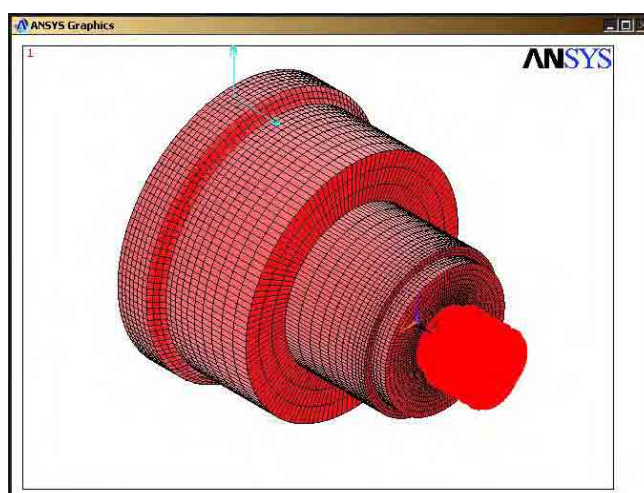


Figura 4.70 - Modelo mostrando o engastamento e as forças aplicadas

A partir deste ponto acessa-se o menu “Solution” com a opção “Current LS” que leva a caixa de diálogo “Solve Current Load Step”, Figura 4.72.

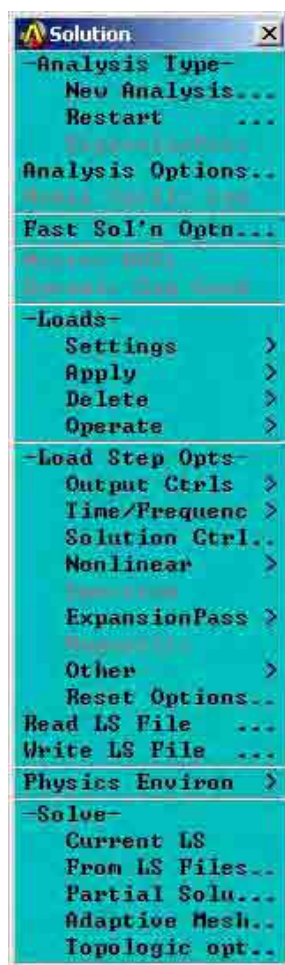


Figura 4.71 - Menu “*Solution*” com opção “*Current LS*”

Esta caixa de diálogo indica que o processamento pode ser iniciado, e que a solução presente é baseada no tipo de opções e análise corrente.



Figura 4.72 - Caixa de diálogo para início de processamento

O processamento do modelo é realizado tendo como resultado a geração de um banco de dados que pode ser lido através do pós-processador do programa ANSYS, e que contém os deslocamentos e tensões a que os nós e elementos estão submetidos quando aplicadas as cargas.

### 4.2.3 Pós-processamento

O pós-processamento é a fase onde os resultados do processamento são apresentados através de tabelas e gráficos.

É muito importante ressaltar que os resultados devem ser avaliados a luz das informações disponíveis sobre o material e características e históricos da peça analisada.

Para acessar o pós-processador é necessário acessar o menu principal do programa ANSYS e através da opção “*General Postproc*”.

Como o interesse na região onde existe a trinca está contido no volume 2, 6, 10 e 14 selecionam-se tais volumes para que os demais volumes não interfiram na visualização e na montagem das tabelas de tensões a serem geradas. Para tal, através do menu de barras, Figura 4.73, se acessa a opção selecionar.

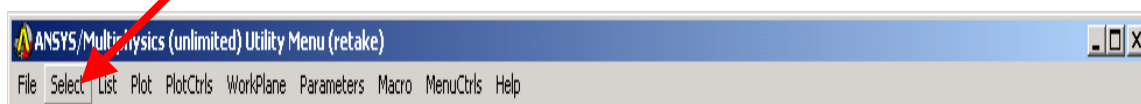


Figura 4.73 - Menu de barras para acesso do comando “*Select*”

Na opção selecionar, Figura 4.74, escolhe-se a opção volume na primeira janela e mantém-se a opção “*By Num/Pick*” a fim de se acessar o próximo menu dinâmico onde entraremos com os volumes 2, 6, 10 e 14.

No programa ANSYS existe a opção de Zoom e rotação de visualização de tal modo que se possa procurar melhores ângulos de visualização dos elementos e nós críticos.



Figura 4.74 - Menu de escolha de entidades

Outra característica importante, é que os volumes estão formados de acordo com o quadrante determinado quando da revolução, Figura 4.75.

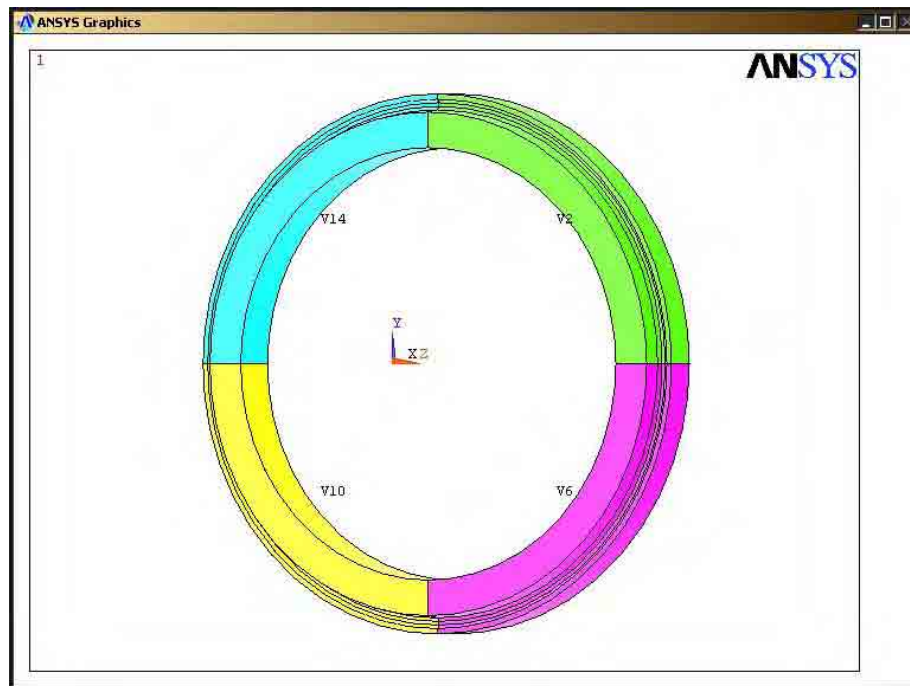


Figura 4.75 – Volumes, V2, V6, V10 e V14, escolhidos onde a trinca é iniciada

A fim de se visualizar as tensões atuantes na região de interesse acessa-se o menu “Plot Results” com a opção “Nodal Solution”, Figura 4.76.

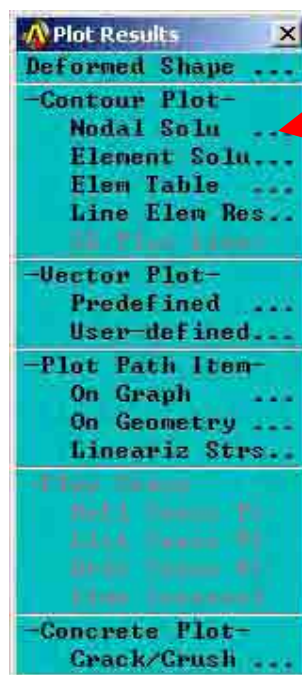


Figura 4.76 - Menu de plotagens gerais

O próximo menu fornece uma caixa de diálogo onde se define que o modelo gráfico mostre as tensões de *Von Mises*, considerando apenas o formato deformado.

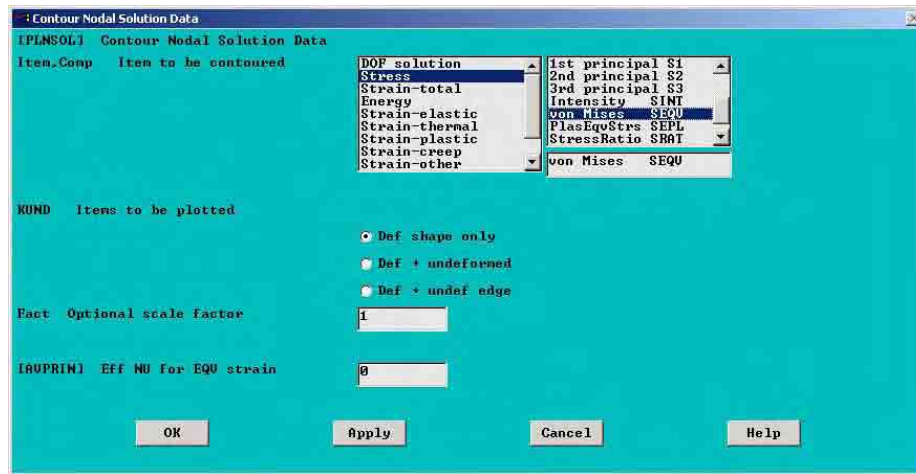


Figura 4.77 - Menu de dados da solução nodal para construção gráfica

Os resultados dos comandos dados na caixa de diálogo, Figura 4.77, são vistos no gráfico específico da região afetada, conforme a Figura 4.78.

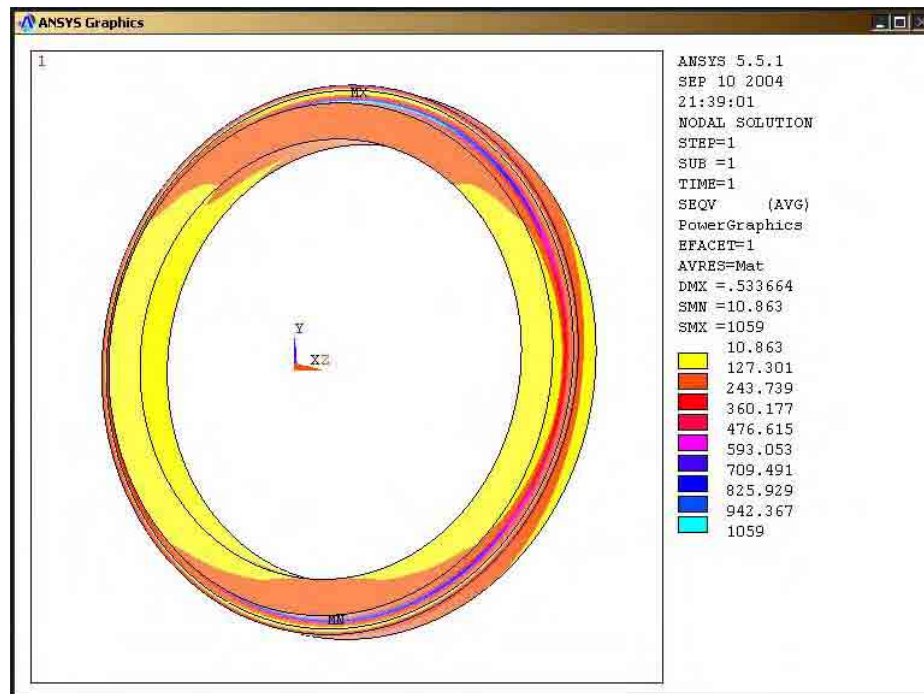


Figura 4.78 - Modelo gráfico apresentando as tensões de *Von Mises* nos nós em MPa

Já a tensão nos elementos é composta pela interpolação linear dentro de cada elemento. Para visualizar as tensões nos elementos cria-se uma tabela de elementos e exibe-se através de um gráfico que contém as intensidades das tensões.

Dentro do menu geral de pós-processamento, “*General Pos Proc*” da Figura 4.79 acessa-se a opção “*Element Table*”.

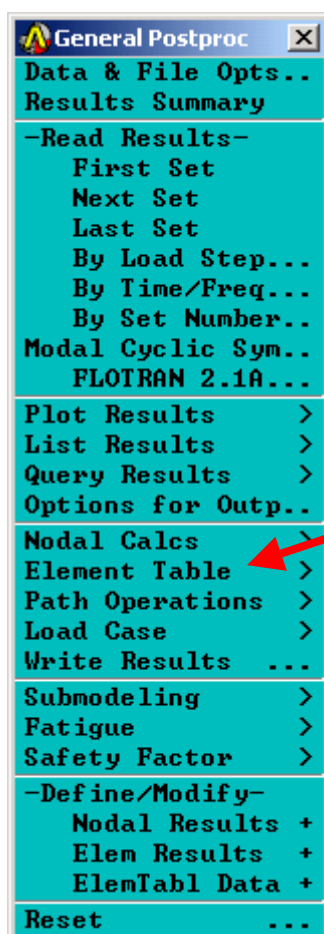


Figura 4.79 - Menu Geral de pós-processamento com a opção “*Element Table*”

No menu “*Element Table*” define-se a tabela a ser criada com a opção “*Define Table*”, Figura 4.80.





Figura 4.80 - Menu “*Element Table*” que define a tabela a ser criada

A caixa de diálogo “*Element Table Data*”, Figura 4.81 é aberta e com a opção “*Add*” escolhemos o comando “*SEQV*”, que significa “*Stress Equivalence*” que fornece a tensão de *Von Mises* nos elementos.



Figura 4.81 - Tabela de dados de elementos

Com o comando “*Close*” deixa-se o menu “*Element Table Data*” e acessa-se o menu “*Contour Plot Element Data Table*” e na opção item a ser plotado escolhe-se a opção “*SEQV*” e aciona-se o comando “*OK*”, Figura 4.82.

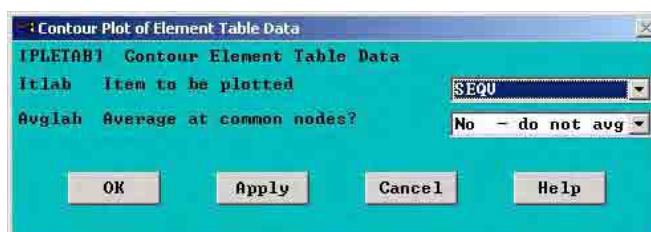


Figura 4.82 - Caixa de diálogo onde se definiu o tipo de informação a ser plotada



O gráfico de tensões de *Von Mises* nos elementos torna-se visível, Figura 4.83, indicando os níveis de tensões que os elementos estão submetidos.

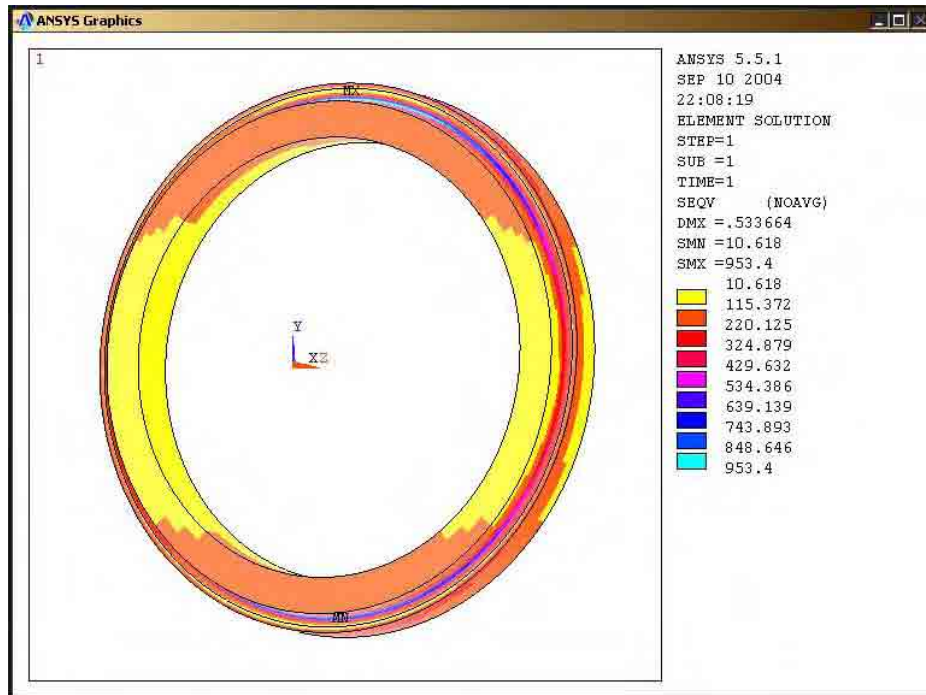


Figura 4.83 - Tensões de *Von Mises* na região afetada em MPa

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CAMPO

A análise de resultados demanda que se relacione os itens notáveis do material com suas características físicas, concomitantemente, com os resultados achados no processamento da solução do modelo.

Sendo que como critério de ruptura é utilizado o critério de *Von Mises*, Figura 5.1 e 5.2.

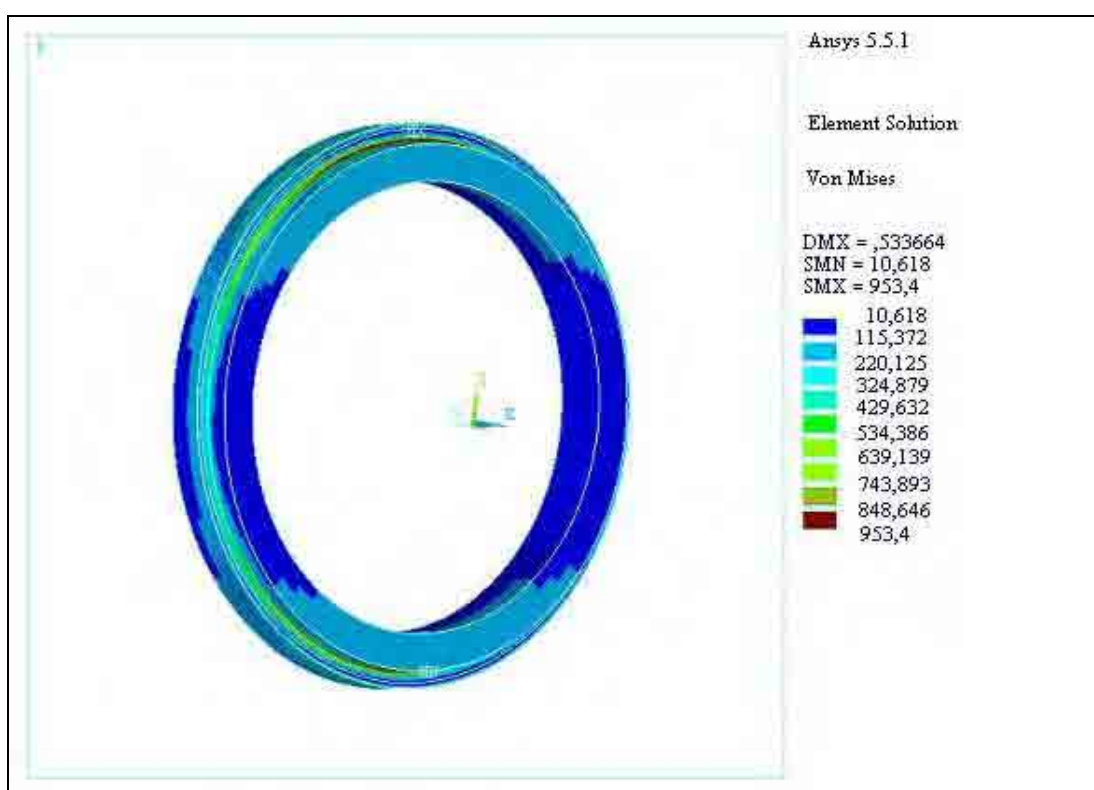


Figura 5.1 - Tensões de *Von Mises* em MPa.

Observa-se que a tensão encontrada de 953 MPa está abaixo da tensão de ruptura que é de 1240 MPa.

Na Tabela 5.1 demonstra-se um comparativo entre as tensões obtidas no cálculo, as disponíveis na literatura e a Figura 5.3 apresenta a tensão máxima calculada a fim de se comparar através do diagrama de Goodman modificado os limites de fadiga.

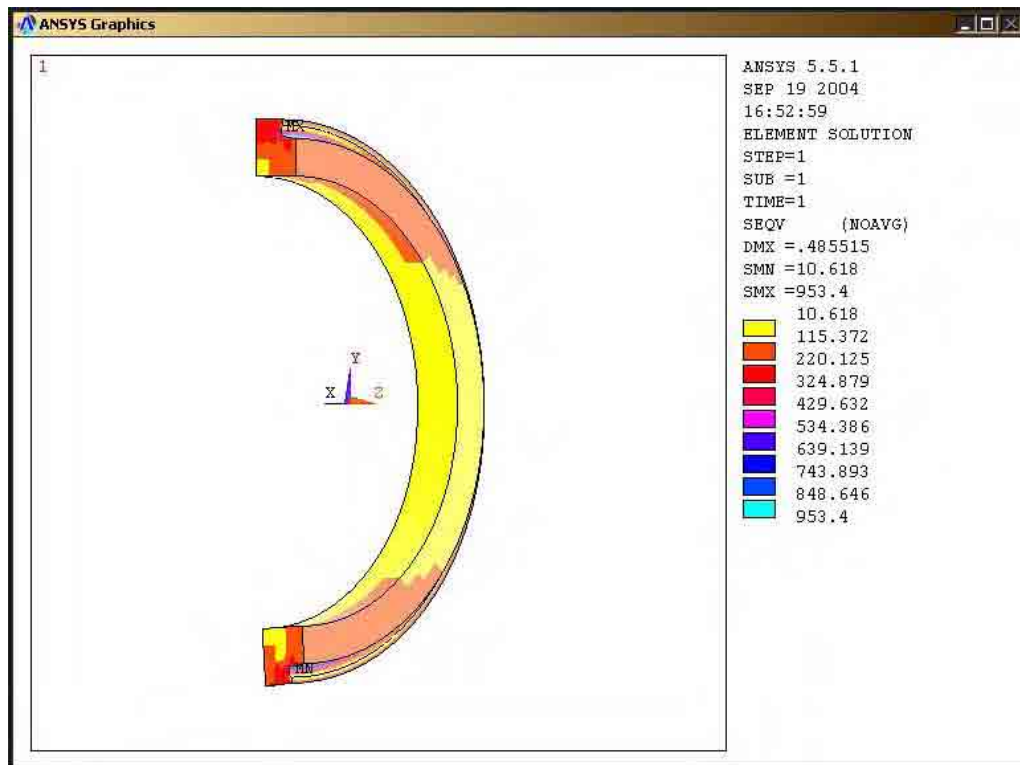


Figura 5.2 – Detalhe de dois quadrantes com tensões de *Von Mises*

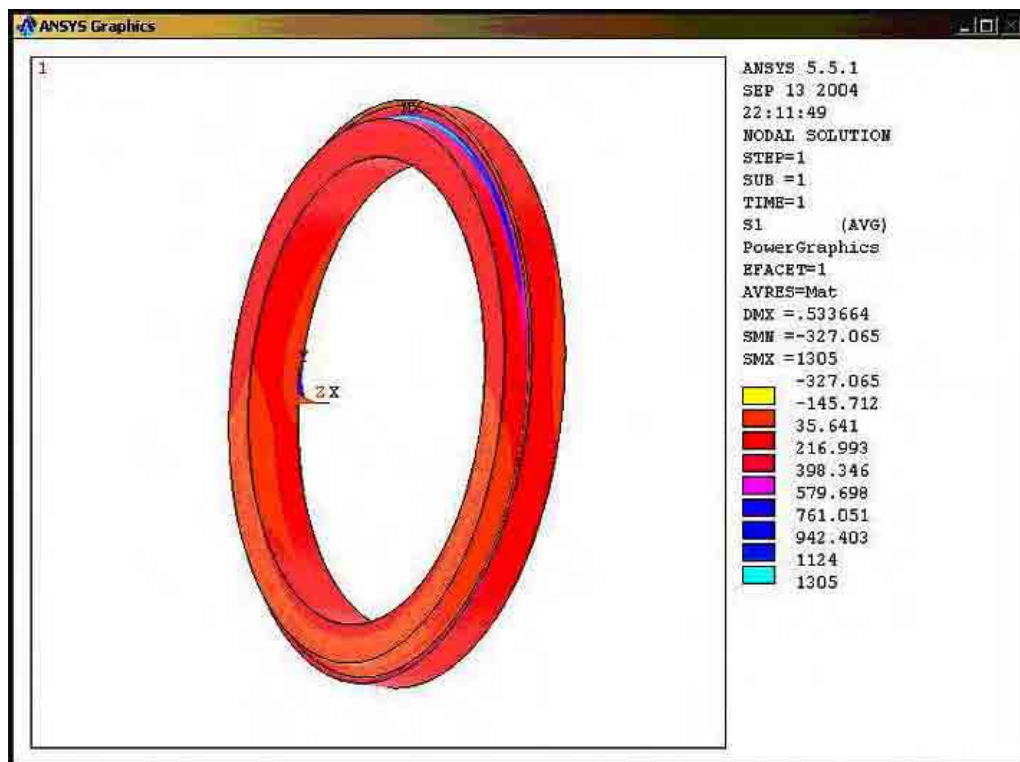


Figura 5.3 – Tensão principal máxima

Tabela 5.1 - Conjunto de tensões obtidas do modelo e literatura

|                        |      |     |
|------------------------|------|-----|
| Tensão de ruptura      | 1240 | MPa |
| Tensão máxima superior | 1305 | MPa |
| Tensão máxima inferior | -327 | MPa |
| Tensão média (módulo)  | 816  | MPa |
| Tensão alternada       | 489  | MPa |
| Tensão de fadiga       | 620  | MPa |

A Figura 5.4 mostra que pelo critério de Goodman modificado, a tensão alternada de 489 MPa ultrapassa o limite estabelecido pelo diagrama de Goodman que é de 424 MPa, indicando a ruptura por fadiga.

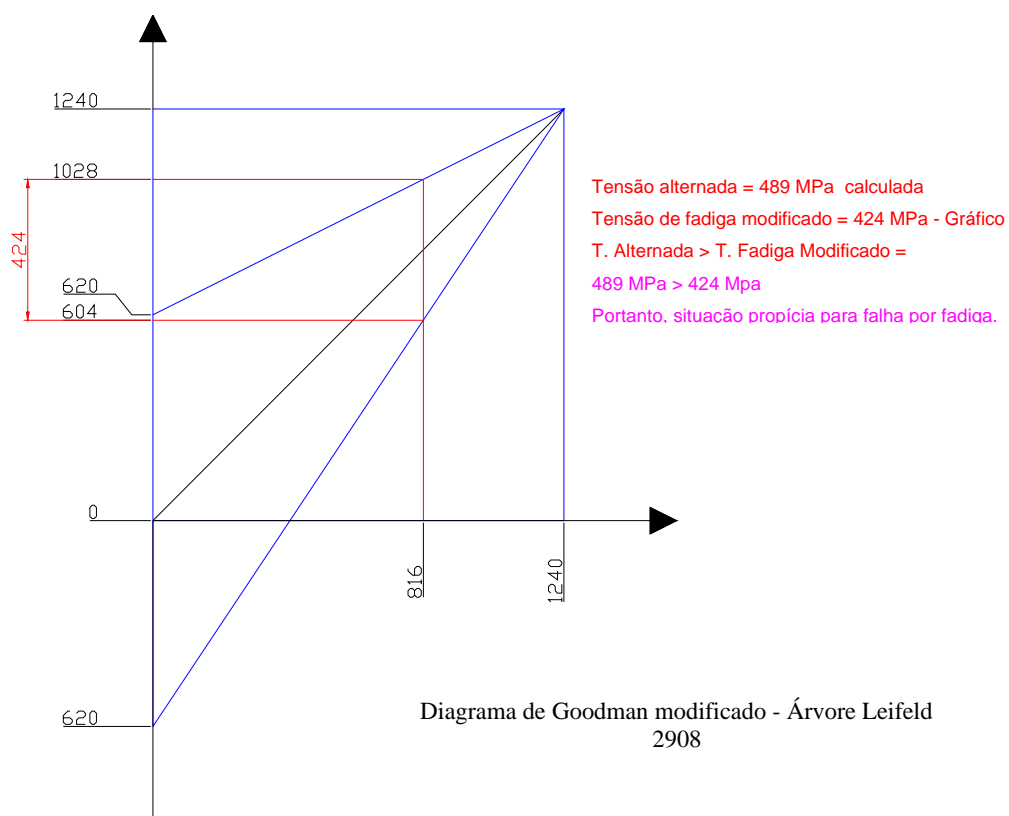


Figura 5.4 – Diagrama de Goodman modificado

Em análise de campo, Figura 5.5, observa-se a fatia da árvore fraturada onde a trinca localiza-se na região do rebaixo e existe uma concentração de tensão, parte em que o modelo foi detalhado, Figura 5.1.



Figura 5.5 – Detalhe da árvore em perfil fraturado

A Figura 5.6 mostra a fratura entre a aba e o nariz da árvore em  $\frac{1}{3}$  do perímetro sendo que a Figura 5.7 mostra marcas de praia típicas de fraturas por fadiga.



Figura 5.6 - Fratura entre a aba e o nariz da árvore



Figura 5.7 - Parte fraturada onde se apresentam marcas de praia

A Figura 5.8 mostra a árvore em sua totalidade sendo que neste caso a mesma é uma peça íntegra, momentos antes de ser instalada na máquina.



Figura 5.8 - Árvore nova a ser instalada na máquina de laminação LEIFELD



Figura 5.9 - Detalhe da posição da trinca entre o nariz e a aba da árvore

Na Figura 5.9 pode-se observar o detalhe da trinca no rebaixo de saída de ferramenta de usinagem, local característico das quebras.

Conclui-se que pelas características macroscópicas encontradas e pelo modelo produzido que o eixo sofre um processo de fadiga característica de flexões alternadas onde as concentrações de tensão atingem maiores níveis no rebaixo, mostrado tanto no modelo quanto na observação prática seu efeito nocivo.

## 5.2 PROPOSTA DE MODIFICAÇÃO

A fim de se prevenir que valores de tensão acima dos recomendáveis, como também tensões alternadas de fadiga, sejam atingidos, são propostas modificações na aba com o objetivo de aumentar a rigidez da mesma, Figura 5.10, porém mantendo-se o rebaixo, Figura 5.11, pois o mesmo é permite a saída da ferramenta de usinagem, ou seja, a saída da retífica.

Essas modificações são apresentadas a seguir.

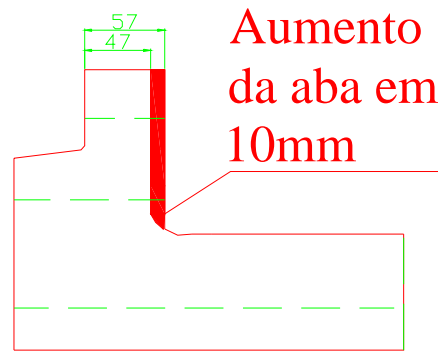


Figura 5.10 - Proposta de aumento da aba em 10 mm



Figura 5.11- Perfil original (desenho LEIFELD)

Seguindo os mesmos passos do capítulo 4.2.1, utilizando-se os “*Keypoints*” da Tabela 5.2, obtém-se a Figura 5.12, que mostra o “*Keypoints*” do perfil proposto.



Tabela 5.2 – Coordenada dos “*Keypoints*” da proposta de modificação da árvore

| Nº do<br><i>Keypoint</i> | Coordenadas |          |   |
|--------------------------|-------------|----------|---|
|                          | X           | Y        | Z |
| 2                        | 0           | 27,5000  | 0 |
| 3                        | 0           | 136,5975 | 0 |
| 5                        | 50,3000     | 142,8850 | 0 |
| 6                        | 51,9000     | 144,8446 | 0 |
| 7                        | 51,9000     | 146,9254 | 0 |
| 8                        | 50,3000     | 148,8850 | 0 |
| 10                       | 50,3000     | 199,7000 | 0 |
| 25                       | -608,2000   | 351,0500 | 0 |
| 26                       | -608,2000   | 387,5000 | 0 |
| 27                       | -513,2000   | 387,5000 | 0 |
| 28                       | -480,7000   | 355,0000 | 0 |
| 29                       | -213,7000   | 355,0000 | 0 |
| 30                       | -213,7000   | 223,1300 | 0 |
| 31                       | 50,3000     | 223,1300 | 0 |
| 32                       | -288,7000   | 175,0000 | 0 |
| 33                       | -288,7000   | 304,3500 | 0 |
| 34                       | -572,7000   | 304,3500 | 0 |
| 35                       | -572,7000   | 351,0500 | 0 |
| 36                       | 40,2400     | 141,6275 | 0 |
| 40                       | 157,3000    | 27,5000  | 0 |
| 43                       | 157,3000    | 82,0000  | 0 |
| 50                       | 50,3000     | 151,8850 | 0 |
| 51                       | 70,3000     | 151,8850 | 0 |
| 52                       | 70,3000     | 121,6275 | 0 |
| 53                       | 40,2400     | 121,6275 | 0 |
| 60                       | 107,3000    | 199,7000 | 0 |
| 61                       | 107,3000    | 132,7000 | 0 |
| 62                       | 115,5000    | 132,7000 | 0 |

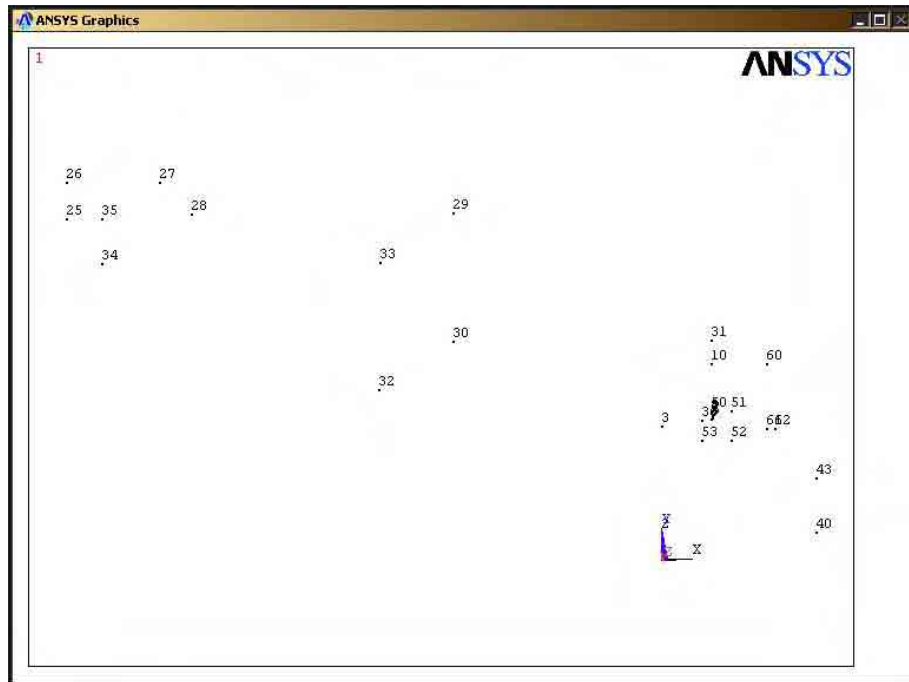


Figura 5.12 - Posição dos “Keypoints” da proposta de modificação

Unindo-se os “Keypoints” temos a Figura 5.13 que mostra o novo perfil com a aba aumentada em 10 mm.

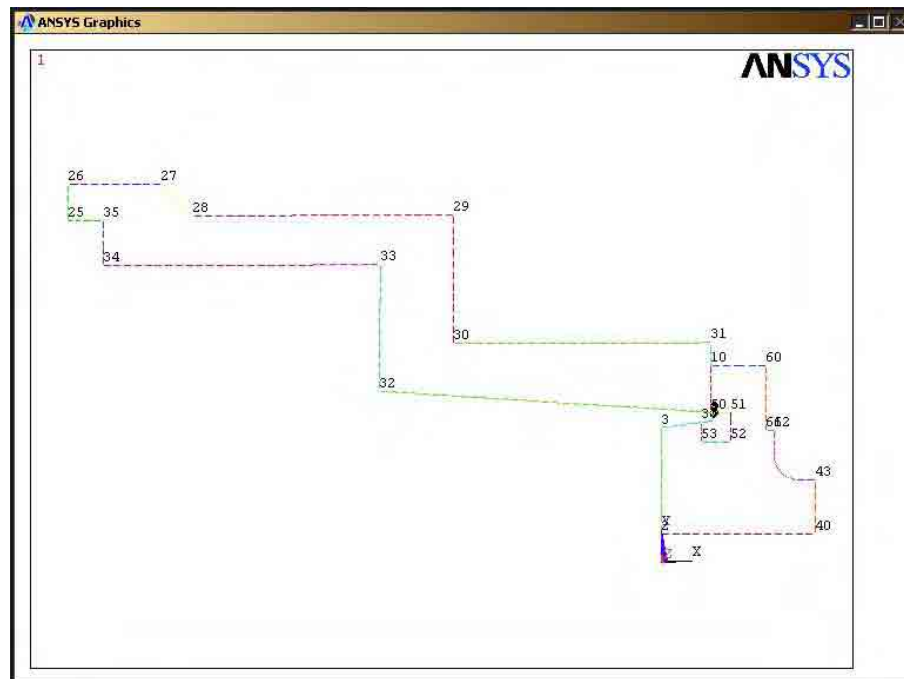


Figura 5.13 - Novo perfil proposto da árvore

Procedendo-se similarmente às construções do modelo anterior, tem-se o modelo final modificado que apresenta as seguintes características:

- Tensão de *Von Mises* de 856,365 MPa estando abaixo da tensão de ruptura que é de 1240 MPa, conforme a Figura 5.14.

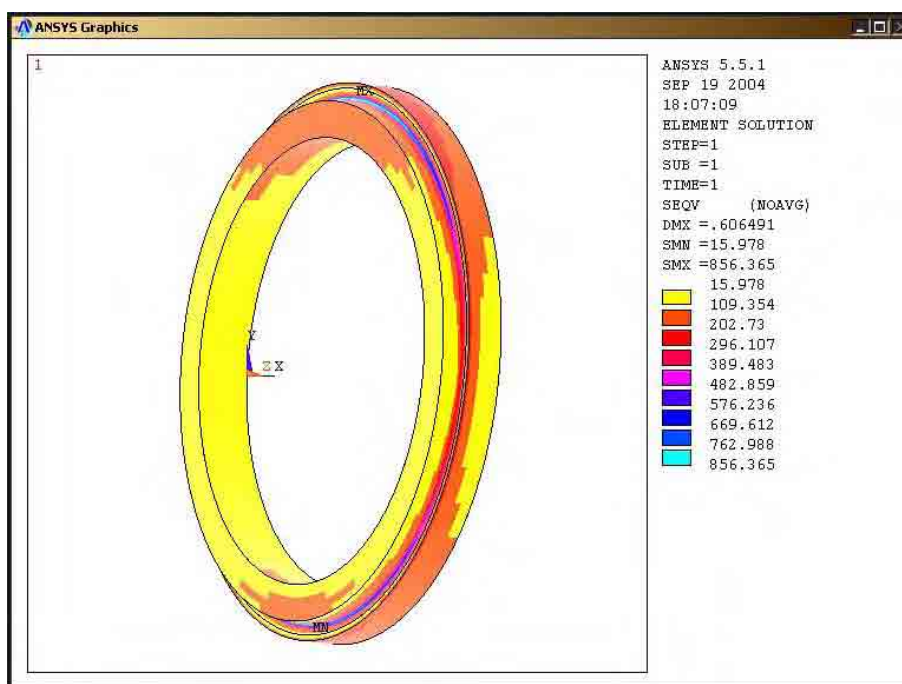


Figura 5.14 - Tensões de *Von Mises* para modelo proposto

As novas tensões máximas segundo a Tabela 5.3 são:

Tabela 5.3 - Tensões máximas e de ruptura para modelo proposto

|                        |       |     |
|------------------------|-------|-----|
| Tensão de ruptura      | 1.240 | MPa |
| Tensão máxima superior | 457   | MPa |
| Tensão máxima inferior | 42    | MPa |
| Tensão média (módulo)  | 249,5 | MPa |
| Tensão alternada       | 207,5 | MPa |
| Tensão de fadiga       | 620   | MPa |

O que resulta no diagrama de Goodman modificado para a nova condição, Figura 5.15.

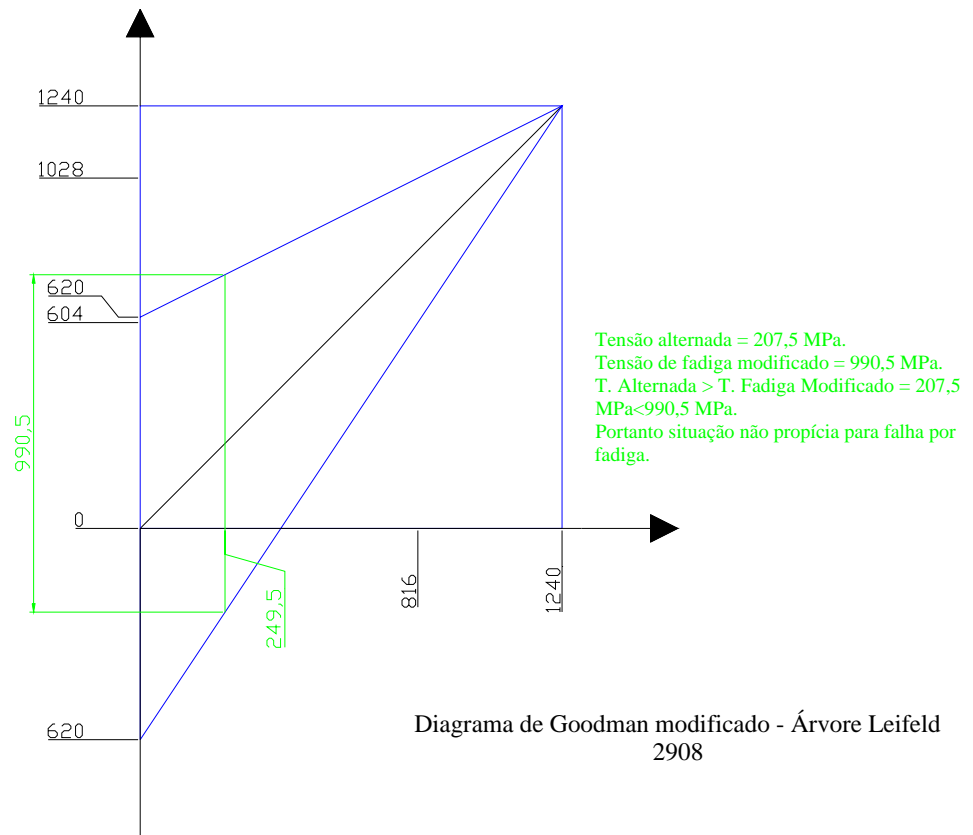


Figura 5.15 - Diagrama de Goodman modificado para modelo proposto

Onde constata-se que a tensão alternada segundo a Tabela 5.3 é de 249 MPa e a tensão de fadiga modificada é de 990,5 MPa, ou seja apresenta uma situação não favorável a falha por fadiga.

Outra proposição lançada é da eliminação do rebaixo de saída de ferramenta de usinagem propiciando uma redução abrupta dos níveis de tensão localizada, Figura 5.16.



Figura 5.16 – Proposta de eliminação do raio de saída de ferramenta

Processando o modelo resultam em tensões da ordem de 450 MPa conforme a Figura 5.17.

Entretanto a usinagem se mostra difícil devido à falta de uma área de saída da retífica, uma opção para isto será o lixamento manual da face de contato do eixo.

Neste modelo fica patente que o rebaixo em eixos e peças que sofrem esforços cíclicos mesmo que dentro dos critérios tradicionais de projeto baseados na verificação de tensões estáticas apresentam forte concentração de tensão.

Na revisão bibliográfica, Sattari-Far (2002) menciona que o rebaixo no eixo é um dos fatores preponderantes de concentração de tensões e resultante de falha em seu eixo, o mesmo sugere que o adoçamento do rebaixo com raios maiores, a fim de que a redução das tensões localizadas seja alcançada. Isto fica comprovado ao se excluir o rebaixo no modelo analisado, este sofre redução abrupta nas tensões na área onde ocorrem as fraturas, chegando uma redução da ordem de 50% nos valores dessas tensões.

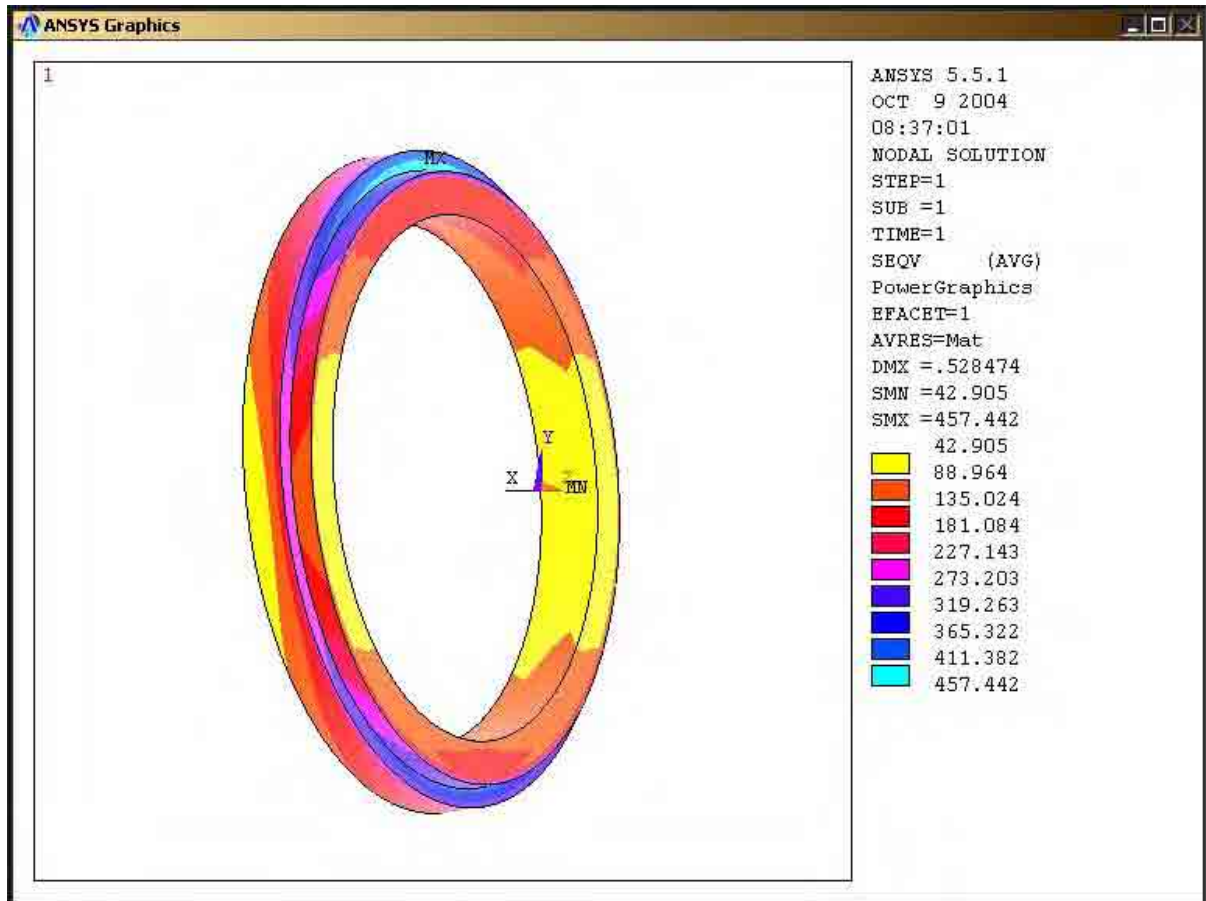


Figura 5.17 – Resultado de tensões em modelo sem rebaixo

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÃO

Os resultados da modelagem, bem como as observações de campo, demonstram claramente que rebaixos e chavetas, ou sejam, descontinuidades e heterogeneidades geométricas, provocam efeitos prejudiciais à árvore por causarem tensões localizadas que levam à fadiga do material nesses pontos. Mesmo aços com tratamento superficial, onde existe elevada dureza, sofrem com estes detalhes construtivos e de projeto. Essa demonstração coincide com a literatura consultada.

Concluí-se, portanto, que o eixo está sujeito a esforços que o levam à fadiga e, conseqüentemente, à fratura, o que se comprova pelas marcas de praia na superfície onde ocorreu a fratura e aos elevados valores de tensões, como os obtidos nos cálculos utilizados na modelagem.

O modelo foi desenvolvido com o objetivo de se visualizar os pontos críticos onde se existem concentradores de tensões e que, portanto, são indicados para que neles sejam aplicadas técnicas com vistas à redução, ou mesmo eliminações, dessas tensões, entre as quais se sugere alterações geométricas que possam minimizar os efeitos dos concentradores de tensões. Contudo, essas alterações devem tornar viável a construção mecânica da árvore, bem como sua adequação aos mandris existentes.

A análise demonstra claramente que ao se utilizar critérios já conhecidos, como o diagrama de Goodman, conclui-se que as tensões de trabalho às quais a árvore é submetida estão sem dúvida ultrapassando os níveis aceitáveis de resistência à fadiga.

A construção de curvas de tensão e números de ciclos em alguns materiais, notadamente os ferrosos, apresenta uma certa tendência tal que bem abaixo do limite de resistência as curvas estatísticas mostram que não ocorrem falhas, não importando o quanto as cargas cíclicas são aplicadas.

Pode-se considerar que se mantendo os níveis de tensão abaixo deste patamar é assegurada a integridade da peça.

Como visto na Figura 3.1 - curva de fadiga do aço 4340 - especificamente os aços tratados com nitretação, nota-se que os valores da tensão onde existe tendência

assintótica estão abaixo de 750MPa, entretanto por razões construtivas a primeira sugestão de modificação ainda mantém tensões da ordem de 850MPa, porém conforme o diagrama de Goodman modificado esta tensão é adequada ao processo atual.

Já com a eliminação do rebaixo, houve uma redução da tensão aos níveis de 450MPa o que, sem dúvida, é uma condição bem mais propícia para manter-se a integridade da árvore. Porém, para essa solução, é necessário um desenvolvimento do processo construtivo a fim de se possibilitar a usinagem da peça.

Como se percebe, em estudos do tipo ora apresentado há a produção de grande quantidade de dados gerados nas simulações realizadas, que devem ser cuidadosamente avaliados de modo a se verificar quais os mais adequados ao trabalho proposto e que podem, ou não, participar das simulações e das respostas convenientes ao problema analisado.

Este trabalho apresenta contribuições em termos de aplicação prática do MEF como ferramenta de simulação, aliado a um conhecimento mais aprofundado da teoria de falhas de eixos e árvores. A contribuição acadêmica esperada deste trabalho refere-se à introdução da construção de modelos sólidos em três dimensões por meio do método de elementos finitos com a utilização do programa ANSYS, de modo que outros interessados possam consultá-lo como fonte de aprendizagem e vivenciar as características, facilidades e dificuldades da construção de modelos. Nesse aspecto deve-se ressaltar que o ANSYS apresenta características de ser um programa extremamente confiável, apresentando críticas como mensagens de erros ou solicitações de entrada de dados faltantes sem os quais os resultados seriam inadequados. Sua interface gráfica, bem como a interação com o usuário, é relativamente amigável, visualizando-se o modelo e as tensões aplicadas por meio de cores que representam a transição dos níveis de tensão obtidos nos cálculos.

Além dessas características operacionais citadas, o programa comercial ANSYS, baseado no Método dos Elementos Finitos, demonstrou capacidade efetiva para simular o comportamento real do eixo da laminadora, apresentando ferramentas com recursos que atendem perfeitamente a modelagem de formas complexas em 3D.



## 6.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os tópicos abordados e a conclusão deste trabalho sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Estudos para redução de concentradores de tensão na árvore;
- Variação de materiais para construção da árvore considerando aspectos de custo x benefício;
- Estudo de outros processos de nitretação, aplicados ao aço SAE 4340 e sua influência na resistência à fadiga por flexão rotativa;
- Aspectos construtivos em usinagem de eixos rotativos.

## REFERÊNCIAS

ANSYS®. versão 7.0. Programa comercial disponível na Unesp. Campus de Guaratinguetá, 2003.

ATKINS, M. Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steel. Metals Park: **American Society for Metals**. 1980. 260p.

BROOKS, C. R.; CHOUDHURY, A. **Failure analysis of engineering materials**. New York: McGraw-Hill, 2002. 602p.

CALLISTER Jr., W. D. **Material science and engineering - An introduction**. 3<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

CETLIN, P. R.; SILVA, P. S. P. Análise de fraturas. São Paulo: **Associação Brasileira de Metais**. 1998. p.248.

DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS. **EN. 55027**: Spindle noses with centering taper, face plate and bayonet type fastening, accessories dimensions. Alemanha, 1980.

DIETER, G.E. **Engineering Design** – a materials and processing approach. 2<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 721p.

DOUGHTIE, V. L.; VALLANCE, A. **Design of machine member**. 4<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1964. 520p.

HEIN, R. **Notas de aula**. Guaratinguetá, Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP/FEG, 2003.

HERTZBERG, R. W., **Deformation and fracture mechanicals of engineering materials**. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of machine component design**. 2 ed. New York: John Wiley , 1991. 804p.

KITAT, E.; KAMIYA, N. Adaptive boundary element method for plane quasi-harmonic equation: application to stress analysis of shaft. Grã-Bretanha. **Computers & Structures**, v. 58, n. 4. p.751-163, 1996.

LEIFELD Co.. Spindlekasten 600SN, Nr 100600090000-1. Ahlen,1970.

METALS HANDBOOK. **ASTM**: failure analysis and prevention. United States of America. 1992. v. 11, 843p.

NASCIMENTO, M. P. **Determinação de vida em fadiga do aço ABNT4340 revestido com cromo duro sobre níquel químico**. 1999. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projeto e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

PASTOUKHOV, V; MONTEIRO, R. C. R.; BAPTISTA, C. A. R. P. Investigação numérica de tensões na trajetória de trinca central em chapas de largura finita. In: Encontro regional de matemática aplicada e computacional, 2000, São José dos Campos. **Encontro regional de matemática aplicada e computacional**. São José dos Campos: ITA, 2000.

RAMAMURTI, V.; KARTHIKEYAN, R. Stress analysis of taper locks. **Computers & Structures**, Grã-Bretanha, v.62, n.4, p.721-736, 1997.

ROSS, B. **Investigating mechanical failures: the metallurgist's approach**. 1<sup>st</sup> ed. London: Chapman & Hall, 1995. 345p.

SATTARI-FAR, I. Failure study of connecting shafts of a plug screw feeder in a paper production plant. **Engineering Failure Analysis**. Irã, n.10, p.341-349, 2003.

SAUVÉ, R.G., METZGER, D.R. Advances in dynamic relaxation techniques for nonlinear finite element analysis. **Journal of Pressure Vessels and Piping**, ASME, v.117, p.170-176, 1995.

SAVAIDIS, A. G.; SAVAIDIS, C.; ZHANG, Ch. FE fatigue analysis of notched elastic-plastic shaft under multiaxial loading consisting of constant and cyclic components. **Internation Journal of Fatigue**, Alemanha, n.23, p.303-315, 2001.

SIQUEIRA, C. P. **Influência da Nitretação na Resistência à Fadiga do aço ABNT 4340**. 2002. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas**, Rio de Janeiro: LTC Editora, 1984, 347 p.

TAIT, R. B. Failure analysis and experimental stress analysis of a threaded rotating shaft. **Engeneering Failure Analysis**, Grã-Bretanha, v.5, n.2, p.79-89, 1998.

TJERNBERG, A. Fatigue lives for induction hardened shafts with subsurface crack initiation. **Engineering Failure Analysis**, Suécia, n.9, p.45-61, 2002.

WANG, G. C. et al. Analysis and design of a new manufacturing process for a support shaft using the finite element method. **Journal of Materials Processing Technology**. p.259-264. 2002.

WULPI, D. J. Understanding how components fail. United States: **ASM - American Society for metals - Metals Park**, Ohio, 1991. p.262.

## **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

BEER, F.; JOHNSTON JR, R. **Resistência dos materiais**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. p. 43.

CHARLIE R.; CHOUDHURY, A. **Failure analysis of engineering materials**. New York: McGraw-Hill, 2002. 602 p.

CORY, J. F., GORDON, J. L.; NARITA, Y. **Finite element applications: linear, non-linear, optimization and fatigue and fracture**, **A.S.M.E.**, 1998.

DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 773 p.

HARTLEY, Jr., G. **Fundamentals of the finite element method**. London: Macmillan Publishing Company, 1986. 528 p.

MEGUID, S. A. **Engineering fracture mechanics**. London: Elsevier Applied Science, 1989. 397p.

MOAVENI, S. **Finite element analysis theory and application with Ansys**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 524p.

NASH, W. A. **Resistência dos materiais**. Universidade da Flórida: McGraw Hill, 1970. 384p.

OGATA, K. **Solving control engineering problems with MATLAB®**. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 359 p.


PASTOUKHOV, V. A.; VOORWALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. São Paulo: UNESP, 1995. 185 p.

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method.** 2<sup>a</sup> ed. College Station, Texas: McGraw Hill, 1993. 683p.

ROYLANCE, D. **Fatigue.** Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts, 2001, may 1.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The finite element method in engineering science.** 2<sup>a</sup> ed. London: McGraw-Hill, 1971. 253 p.

ANEXO 1 - Certificado de Gerdau


 GERDAU  
 ACOSILMINOS PERATIN  
 S.A. PERALTA DE LOS ANDES S.A.  
 CERRILLO 2010, 15<sup>to</sup> piso - Montevideo, Uruguay

QUALITY CERTIFICATE  
 MILITARY CERTIFICATE  
 CEMENTO, ALMOXARIFE, CALIDAD

Nº 98578

BARRA LAMINADA ESFONDA  
 SASMUTRAMENDE  
 SEM/ACABAMENTO

CREA 2003

Q.S. 9009 / ISO 9002  
 Certificado de Calidad  
 S.E.S.P.A. - 8100617  
 B.S.1401

TIPO DE OBTENCION  
 S.A.S. 4229  
 ART. 4229-21


VALOR DE CALIDAD  
 15,88

PRODUCTO  
 PABRACO

| ITEM | Si   | Min  | P     | S     | C2   | N2   | Mn   | Al    | C2b  |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|
| 1    | 0,31 | 0,28 | 0,018 | 0,013 | 0,78 | 1,18 | 0,23 | 0,014 | 0,26 |

DIRECCION: (1588) 4500111 / FAX: (1588) 4500112

DEPARTAMENTO DE OPERACIONES CALIDAD GERDAU PERATIN  
 CHARCABADAS, 17.04.2001  
 Sólidos de T. Uruguay  
 CREA 2003

**INDUSTEEL Com. de Productos Siderurgicos Ltda.**  


## ANEXO 2 - Controle de qualidade Brasimet para aço 4340

| <b>BRASIMET</b>  |       |          |                | <b>CONTROLE DE QUALIDADE</b> |  |
|--|-------|----------|----------------|------------------------------|--|
| <b>Resultados de ensaios Nº</b>  | 48108 | 28/08/01 | ANEXO E        |                              |  |
| <b>DADOS DA REMESSA</b>  |       |          |                |                              |  |
| Empresa: MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA   |       |          |                |                              |  |
| Nota Fiscal Nº: 261013   |       |          | Data: 13/08/01 |                              |  |
| Peso: 9.880  |       |          | Quantidade: 37 |                              |  |
| Descrição das Peças: BARRA REDONDA DIAM. 5/8"X160MM +02C.P   |       |          |                |                              |  |
| <b>ESPECIFICAÇÕES</b>  |       |          |                |                              |  |
| Material: 4340   |       |          |                |                              |  |
| Tratamento Térmico: ACBLS10A - TEMPERA E REVENIMENTO   |       |          |                |                              |  |
| Dureza Superficial: 38 a 40 HRC  |       |          |                |                              |  |
| Dureza de Núcleo:  |       |          |                |                              |  |
| Profundidade da Camada: mm   |       |          |                |                              |  |
| Outras:  |       |          |                |                              |  |
| <b>RESULTADOS</b>  |       |          |                |                              |  |
| Ordem de Serviço: 128392 Lote : 1  |       |          |                |                              |  |
| Dureza Superficial: 39 a 40 HRC  |       |          |                |                              |  |
| Dureza de Núcleo:  |       |          |                |                              |  |
| Profundidade da Camada:  |       |          |                |                              |  |
| Outros:  |       |          |                |                              |  |
| <b>CONCLUSÃO</b>   |       |          |                |                              |  |
| Foram atingidas suas especificações, conforme solicitado no documento de remessa.  |       |          |                |                              |  |
| <b>ENSAIOS EXECUTADOS ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS E INSTRUÇÕES DE TRABALHO DO SISTEMA DE GARANTIA DA QUALIDADE CONFORME NORMA SÉRIE ISO-9002.</b> |       |          |                |                              |  |
| BRASIMET COMÉRCIO E INDÚSTRIA S.A.<br>CAMPINAS 28 de Agosto de 2001  |       |          |                |                              |  |
|    |       |          |                |                              |  |

<http://www.brasimet.com.br>

SÃO PAULO (SP) Av. das Nações Unidas, 21.478

QUADRA (SP) Rua Zé de Marco, 31

QUARULOS (SP) Rua Inocente, 118 - Jardim Cambiá

CAMPINAS (SP) R. Pedro Gianfrancini, 806

CONTAGEM (MG) Via Sócrates M. Biffencourt, 1.300 - Cinqs

SÃO LEOPOLDO (RS) Estrada do Socorro, 346 - Campinas

JOINVILLE (SC) Rua Turui, 3.575 - Aventureiro

CEP 04795-817

CEP 09041-800

CEP 01170-800

CEP 13066-105

CEP 32010-010

CEP 30155-890

CEP 88226-900

C.P. 22.531

C.P. 118

C.P. 251

C.P. 251

C.P. 173

CEP 04795-817

CEP 09041-800

CEP 01170-800

CEP 13001-870

CEP 30155-890

CEP 88226-900

TEL. (11) 5825-8800

TEL. (11) 4070-7222

TEL. (11) 8452-5439

TEL. (19) 249-1011

TEL. (31) 851-8956

TEL. (51) 588-1177

TEL. (47) 467-1153

FAX (11) 5825-8800

FAX (11) 4071-1813

FAX (11) 8432-9030

FAX (19) 249-1034

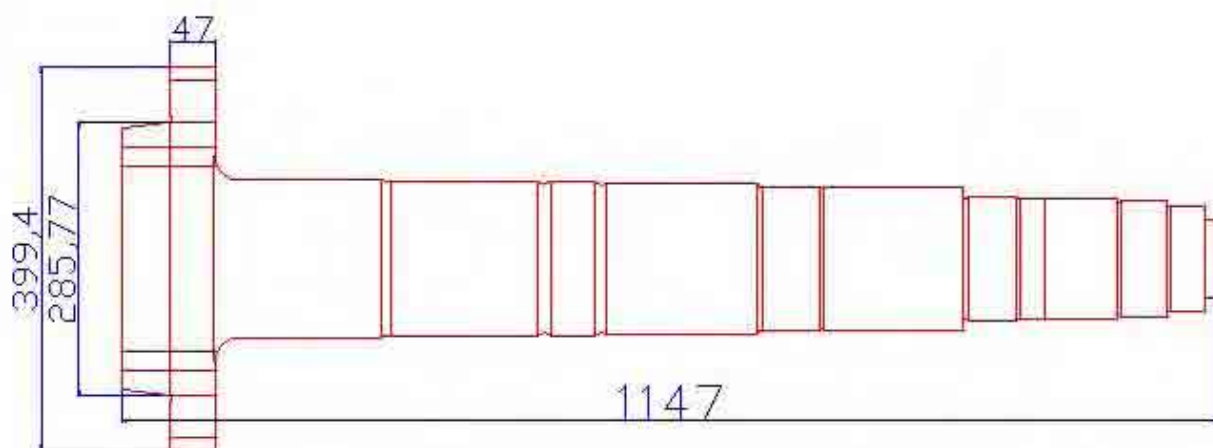
FAX (31) 851-7934

FAX (51) 588-1277

FAX (47) 467-1264

BR-402 | 480 | 0401 - Cópia



**ANEXO 3 – Principais dimensões do eixo da laminadora Leifeld**

Principais dimensões  
do eixo da laminadora  
Leifeld