

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

JULIO CESAR KLEIN DAS NEVES

**Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato  
esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de  
ferros fundidos com matrizes de elevada dureza**

São Paulo  
2006

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

JULIO CESAR KLEIN DAS NEVES

**Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato  
esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de  
ferros fundidos com matrizes de elevada dureza**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Projeto e fabricação.  
Orientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora.

São Paulo  
2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de outubro de 2006.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

**Neves, Julio Cesar Klein das**

**Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre o plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza / J.C.K. das Neves. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006.**

**138p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Tribologia 2.Fadiga de contato 3.Contato de rolamento  
4.Fadiga em ferros fundidos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Ritta e Nery, pela importância que sempre deram a educação e por nunca terem dito que há limites para as conquistas.*

*E ao meu irmão Nery, por um dia ter me contado, das suas primeiras aulas de física, que toda matéria é feita de “uma coisa indivisível” chamada átomo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Amilton Sinatora pela orientação neste trabalho, mas principalmente por ter sempre compartilhado sua forma de enxergar o mundo e as criaturas que nele vivem.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná que entre os anos 2003 e 2006 me liberou das atividades de docente para realizar este trabalho.

À Brasimet S.A. divisão de Santo Amaro, na pessoa do Eng. Carlos Sartori, agradeço pela realização dos tratamentos térmicos.

À Fundação Tupy, nas pessoas do Dr. Wilson Guesser e do Eng. Luciano Kluge, pela doação do material utilizado nesse trabalho.

Agradeço ao colega e amigo Paulo Borges, por ter escrito o projeto que me possibilitou fazer doutorado na Universidade de São Paulo, experiência gratificante não só pelo doutorado, mas sobretudo pela grande aventura humana que foram os últimos cinco anos.

Agradeço à Grazielle por ter irrestritamente me incentivado a dar o primeiro passo em direção a São Paulo.

Agradeço à Villares e ao Eng. Claudio Eduardo Rocha dos Santos por acreditarem no trabalho que eu fazia, mesmo depois de quase um ano sem resultados aproveitáveis.

Agradeço ao Mario Vitor Leite pelas inúmeras discussões e colaborações, sem as quais esse trabalho jamais chegaria aonde chegou.

Ao Felipe Carneiro por ter sido incansável no dia-a-dia do laboratório.

Ao Wanderson, por falar muito e ajudar mais ainda.

A Cristiane Ângelo e ao Newton Fukumasu, pela ajuda com as simulações.

Ao Cristiano Brunetti, pelo auxílio expresso.

Ao Walter Mikos pela boa vontade e pela aula particular de metrologia.

Agradeço aos colegas Aloísio, Ossimar e Hioki pelo companheirismo que sempre demonstraram.

Agradeço aos técnicos do LFS, Leandro, Raquel, Jovânio e Francisco, pela constante disposição em ajudar.

Ao Sidney, Ricardo e Silene, por se preocuparem com tudo aquilo que eu não gosto de me preocupar.

Ao Marcos Ara, Albertin e Mário Boccalini, por tornarem tudo mais simples quando foi preciso.

À Clarice pela paciência e inabalável boa vontade.

À Márcia Maru e ao Vanderlei, por me ouvirem.

Ao Marcio Mafra e ao Giuseppe pelos cafés nas visitas a Curitiba.

Agradeço ao Tanaka e ao Roberto Martins pela constante disponibilidade para ajudar e pelos impagáveis horários de almoço regados a todo e qualquer assunto, útil ou não.

Agradeço à Diana, ao Hector, à Viviane e à Claudia Bastos, por terem sido em São Paulo muito mais que uma família.

Agradeço a minha mãe, Ritta Klein das Neves, por me dar muito mais do que apoio, por torcer, por rezar, por participar.

Aos que eventualmente contribuíram para este trabalho e não foram citados, envergonhado eu peço desculpas e lhes digo muito obrigado.

Finalmente, agradeço a todos os brasileiros que, mesmo sem saber, contribuíram para que eu recebesse, através da Capes, uma bolsa de doutorado e pudesse me manter nos últimos cinco anos.

## RESUMO

NEVES, J. C. K. **Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza.** 2006. 138f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Esse trabalho descreve o projeto e construção de um equipamento destinado ao estudo de fadiga de contato de rolamento e sua posterior aplicação na caracterização de ferros fundidos. O trabalho foi iniciado com a utilização de um equipamento previamente existente no Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP, a máquina I. Esse equipamento era baseado na substituição das pistas externas de um rolamento axial de esferas por corpos-de-prova na forma de arruelas. Ensaios preliminares mostraram que a máquina I apresentava limitações, a principal delas era não ser capaz de reproduzir integralmente o movimento de rolamento, havendo uma relação desconhecida rolamento/deslizamento no decorrer do ensaio. Com base nas dificuldades operacionais da máquina I, uma segunda máquina, também baseada em um rolamento axial, foi projetada e construída. Ensaios preliminares mostraram que o novo equipamento reproduzia mecanismos de falha por fadiga de contato de rolamento. A etapa seguinte então foi utilizar a máquina II no estudo de fadiga de contato de rolamento de dois tipos de ferro fundido com matrizes de levada dureza, um cinzento e um nodular, os quais foram testados em duas condições: com e sem pré-tensionamento e analisados segundo a estatística de Weibull. Um aço também foi ensaiado como referência. A pré-tensão foi aplicada com uma ferramenta bi-partida e modelada por elementos finitos. Foram realizados ensaios lubrificadas, com a aplicação de uma pressão máxima de contato de 3,6 GPa e conduzidos até a falha dos materiais por lascamento da superfície de rolamento. Em todas as condições de ensaio o ferro fundido nodular se mostrou muito superior ao ferro cinzento. Enquanto esse último que apresentou resultados similares na condição com e sem pré-tensão, o ferro fundido nodular teve a sua curva de distribuição de falhas significativamente alterada pela aplicação de tensão externa. Uma heterogeneidade na distribuição do tamanho de nódulos de grafita fez com que as falhas ocorressem sempre na mesma região do corpo-de-prova evidenciando a sensibilidade do ensaio a variáveis microestruturais.

Palavras-chave: Tribologia, fadiga de contato, contato de rolamento, fadiga em ferros fundidos.



## ABSTRACT

NEVES, J. C. K. **Development of a rolling contact fatigue test rig and its use for characterization of cast irons with high hardness matrix.** 2006. 138f. Thesis (Doctorate) – Polytechnic School, Sao Paulo University, Sao Paulo, 2006.

This work presents design and construction of an equipment for rolling contact fatigue studying and its use to cast irons analysis. Firstly it was used an equipment available at Surface Phenomena Laboratory, in São Paulo University, which was called machine I. The design of the system followed the well-known architecture where races of a thrust ball bearing are substituted by washers made with the material under investigation. Preliminary tests have shown that the first machine had severe limitations, but the most important was lack of ability to reproduce rolling contact fatigue mechanisms. An unknown sliding/rolling ratio always took place in its work. Then a second machine was designed and assembled. Sets up tests have shown typical mechanisms of rolling contact fatigue. The next step was to use the new machine to study two types of cast irons, a gray iron and a ductile iron, under two test conditions: with and without pre-stress. Also a steel specimen was tested as a reference. Results were subjected to Weibull analysis. A device was developed for pre-stress application, and the specimen/device system was modeled by finite elements analysis. Tests were carried out till failure, under lubrication, and with maximum contact pressure of 3.6 GPa. Ductile cast iron behavior was superior to gray iron in all tests. Gray iron specimens with and without pre-stress presented very similar results. On the other hand, ductile iron probability failure curve was strongly affected by pre-stress. An unexpected heterogeneity on graphite nodules size distribution promoted failures on just one region, which is an evidence of test sensitivity to micro structural changes.

Key words: Tribology, contact fatigue, rolling contact, fatigue in cast iron.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Contatos conformes (a) e não-conformes (b) (HUTCHINGS, 1992).....	21
Figura 2.2 - Contato elástico entre dois corpos elípticos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).....	22
Figura 2.3 - Distribuição esquemática de pressão num contato elasto-hidrodinâmico (a); perfil de deformação mostrando a espessura de filme central e a espessura mínima de filme (b) (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).....	26
Figura 2.4 - Fatores que afetam a vida em fadiga de contato (ASM, 1996).....	29
Figura 2.5 - Representação esquemática da distribuição de tensões de cisalhamento abaixo do contato nas situações de rolamento puro, deslizamento e rolamento com deslizamento (ASM, 1996).....	30
Figura 2.6 - Distribuições de Weibull para diferentes do parâmetro de escala, $\theta$ ; $\beta=2$ ; $\gamma=0$ (AMSTADTER, 1977).....	39
Figura 2.7 - Distribuições de Weibull para diferentes do parâmetro de forma, $\beta$ ; $\theta=1$ ; $\gamma=0$ (AMSTADTER, 1977).....	39
Figura 2.8 - Distribuições de Weibull para diferentes do parâmetro de escala, $\gamma$ ; $\theta=1$ ; $\beta=2$ (AMSTADTER, 1977).....	40
Figura 3.1 - Esquema da unidade de ensaio da máquina de fadiga de contato. ....	44
Figura 3.2 - Esquema mostrando os elementos envolvidos no ensaio de fadiga de contato de rolamento e seus respectivos movimentos. A gaiola foi omitida para tornar a figura mais clara.....	45
Figura 3.3 - Corpo-de-prova.....	46
Figura 3.4 - Montagem da bucha no eixo da máquina. ....	46
Figura 3.5 - Principais componentes da primeira versão da máquina de fadiga de contato....	47
Figura 3.6 - Unidade de ensaio aberta. ....	48
Figura 3.7 - Unidade de ensaio fechada. ....	49
Figura 3.8 - Seqüência de montagem. ....	50
Figura 3.9 - Superfície de rolamento do aço ABNT 1045, condição Nor-230-73, da primeira série de ensaios. MO.....	55
Figura 3.10 - Detalhe da deformação da ferrita na borda da trilha de rolamento. MEV.....	56
Figura 3.11 - Superfície de rolamento do aço ABNT 1045 na condição TR-450-73. MEV....	56
Figura 3.12 - Superfície de rolamento do aço ABNT 1045 na condição TR-450-54. MEV....	57

Figura 3.13 - Detalhe da camada de óxidos formada na amostra ensaiada na condição de maior umidade. ....	58
Figura 3.14 – Detalhe do conjunto superior da máquina I. A região indicada aprisiona ar que em contato com as paredes frias da zona de refrigeração pode condensar água. ....	59
Figura 3.15 - Trilha de rolamento produzida na condição a seco. MO. ....	62
Figura 3.16 - Imagem de MEV da trilha de rolamento na amostra ensaiada a seco. ....	62
Figura 3.17 - Imagem de MEV mostrando zonas intensamente deformadas, próximas ao centro da trilha de rolamento, na amostra ensaiada sem lubrificação. ....	63
Figura 3.18 - Partículas aderidas a trilha de rolamento MEV (a) e partícula despreendida da trilha MO (b). Ambas oriundas da amostra ensaiada sem lubrificação. ....	63
Figura 3.19 - Espectro EDX de partícula aderida à trilha de rolamento. ....	64
Figura 3.20 - Imagem de MO mostrando parte da trilha de rolamento da amostra ensaiada com lubrificação. Indentação (triângulo); inclusão exposta (seta). ....	65
Figura 3.21 - Imagem de MEV mostrando inclusão exposta à superfície na amostra ensaiada com lubrificação e indentações adjacentes. Inclusão exposta (seta) e indentação(triângulo).....	66
Figura 3.22 - Espectro EDX de inclusão exposta à trilha de rolamento.....	66
Figura 3.23 - Imagem de MO evidenciando a ocorrência de riscamento na trilha de rolamento-deslizamento.....	67
Figura 3.24 - Detalhe obtido por MEV mostrando o aspecto do dano produzido na região da amostra onde houve deslizamento.....	67
Figura 3.25 - Perfis das trilhas de rolamento, (a) sem lubrificação e (b) com lubrificação. ....	69
Figura 3.26 - Ilustração de que o nível do óleo na câmara de ensaio não pode atingir a superfície do corpo-de-prova superior sem que os dois conjuntos estejam encaixados e indicação de pontos de vazamento de fluido refrigerante. ....	71
Figura 3.27 - Principais componentes da segunda versão da máquina de fadiga de contato...	77
Figura 3.28 - Perspectiva do conjunto do segundo equipamento. ....	77
Figura 3.29 - Imagem da segunda máquina de fadiga de contato montada.....	78
Figura 3.30 - Seqüência de montagem da nova máquina fadiga de contato. ....	80
Figura 3.31 - Braço de carga apoiado sobre a tampa da máquina nova. ....	82
Figura 3.32 - Diagrama de corpo livre sistema de aplicação de carga da máquina nova. Na origem da barra da figura existe uma articulação que a permite girar. ....	83

Figura 3.33 - Aspecto geral de um corpo-de-prova ensaiado na nova máquina. A seta indica o local onde ocorreu um lascamento. ....	85
Figura 3.34 - Lascamento visto de topo; MO. ....	86
Figura 3.35 - Secção transversal longitudinal do lascamento da figura anterior. ....	86
Figura 3.36 - Carboneto que sofreu cisalhamento, próximo à superfície de fratura, no fundo da cavidade deixada pela partícula desprendida. ....	87
Figura 3.37 - Imagens de MEV mostrando lascamento na triha de rolamento (a) e a respectiva lasca coletada e colada sobre fita de carbono (b); o retângulo preto indica a região onde foi encontrada a inclusão não-metálica apresentada na próxima figura. ....	88
Figura 3.38 - Inclusão na partícula destacada da superfície (a) e o espectro EDX da inclusão (b). ....	89
Figura 4.1- Microestruturas do ferro fundido nodular (a) e cinzento (b). Sem ataque.MO. ....	92
Figura 4.2 - Microestruturas dos ferro fundidos após a têmpera. Ferro fundido nodular (a) e ferro fundido cinzento (b). Ataque com nital 3%. ....	93
Figura 4.3 - Desenho do corpo-de-prova destinado para aplicação de pré-tensão com as dimensões pós-torneamento (a) e pós-retificação (b). ....	95
Figura 4.4 - Corpos de prova tipo anel em duas etapas do processo de fabricação: após tratamento térmico (a) e após retífica (b). ....	96
Figura 4.6 - Vista explodida do dispositivo de compressão dos corpos-de-prova de fadiga de contato. ....	96
Figura 4.7 - Gráfico temperatura <i>versus</i> viscosidade do óleo utilizado. ....	99
Figura 4.8 - Esquema de cálculo da espessura mínima do filme lubrificante, $h_o$ . O valor de $\alpha$ foi retirado de Williams (1994). ....	101
Figura 4.9 - Etapas de aperto do corpo-de-prova na ferramenta de aplicação de tensão. ....	104
Figura 4.10 - Locais de medição da aproximação entre as duas metades do tensionador. ....	105
Figura 4.12 - Etapas da montagem do corpo-de-prova com tensionador: pista inferior (a); pista e bucha de acoplamento (b); conjunto corpo-de-prova/bucha/pista montado (c). ....	106
Figura 4.13 - Modelo 2D da ferramenta com o corpo-de-prova. ....	107
Figura 5.1 - Curvas de probabilidade de falha para os corpos-de-prova de ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e aço ensaiados sem pré-tensionamento. ....	109
Figura 5.2 - Trilha de rolamento do corpo-de-prova <b>AcoAr-01</b> com presença de vazios originados na solidificação da liga. ....	110
Figura 5.3 – Distribuição de tensões de von Mises no corpo-de-prova tipo anel. ....	112

Figura 5.4 - Detalhe das tensões de von Mises na região central do corpo-de-prova. ....	112
Figura 5.5 – Detalhe das tensões de von Mises na região próxima a bi-partição do tensionador. ....	113
Figura 5.6 - Tensões principais máximas (a) e mínimas (b) no anel comprimido. ....	114
Figura 5.7 - Detalhe das tensões principais máximas (a) e mínimas (b) no anel comprimido, próximo a região central do tensionador. ....	115
Figura 5.8 - Detalhe das tensões principais máximas (a) e mínimas (b) no anel comprimido, próximo a região de bi-partição do tensionador. ....	116
Figura 5.9 - Curvas de probabilidade de falha para as amostras de ferro fundido cinzento com (anel) e sem pré-tensionamento (arruela). ....	118
Figura 5.10 - Curvas de probabilidade de falha para as amostras de ferro fundido nodular com (anel) e sem pré-tensionamento (arruela). ....	118
Figura 5.11 -Vista de topo do lascamento ocorrido no corpo-de-prova <b>CznAn-2</b> . O movimento da esfera foi de cima para baixo. ....	120
Figura 5.12 - Secção transversal, longitudinal a trilha de rolamento no local de lascamento do corpo-de-prova <b>CznAn-2</b> . O movimento da esfera foi da esquerda para a direita. ..	120
Figura 5.13 - Secção transversal, longitudinal a trilha de rolamento no local de lascamento do corpo-de-prova <b>CznAn-2</b> , com maior aumento que imagem anterior. Percebe-se a formação de múltiplas trincas a frente do defeito (setas). O movimento da esfera foi da esquerda para a direita. ....	121
Figura 5.14 - Detalhe da remoção de grafita na trilha de rolamento. Amostra <b>CznAn-2</b> . ....	121
Figura 5.15 - Secção transversal, ortogonal a trilha de rolamento, da amostra <b>CznAr-2</b> , mostrando trinca subsuperficial (seta). A esfera está rolando para dentro da página e o centro da trilha corresponde ao centro da figura. ....	123
Figura 5.16 - Vista de topo do lascamento ocorrido no corpo-de-prova <b>NodAr-2</b> . As setas indicam locais onde houve arrancamento de grafita da trilha de rolamento. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita. ....	124
Figura 5.17 - Vista de topo do lascamento ocorrido no corpo-de-prova <b>NodAn-2</b> . As setas indicam locais onde houve arrancamento de grafita da trilha de rolamento. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita. ....	124
Figura 5.18 - Diferença entre os tamanhos das grafitas nas regiões próximas a falha por fadiga de contato (fotos da esquerda) e nas regiões diametralmente opostas (fotos da direita) nos corpos-de-prova NodAr-3 (a) NodAr-5 (b) e NodAn-1 (c). ....	125

Figura 5.19 - Vista de topo de remoção de grafita em uma região próxima ao local de falha do corpo-de-prova <b>NodAr-2</b> (a) e detalhe da cavidade deixada pela grafita (b). As setas indicam locais onde houve arrancamento de grafita da trilha de rolamento. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita. ....	128
Figura 5.20 - Secção transversal longitudinal da trilha de rolamento da figura anterior. A seta maior indica a direção de rolamento da esfera sobre a superfície do corpo-de-prova e a menor a posição onde havia uma grafita.....	129
Figura 5.21 - Sistema de referência para localização da superfície do corpo-de-prova montado no tensionador. ....	130
Figura 5.22 - Posições das falhas nos corpos-prova <b>NodAn-1</b> (a) e <b>NodAn-5</b> (b).....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores críticos da relação $\beta_{e-max}/\beta_{e-min}$ para testar a homogeneidade da estimativa de $\kappa$ parâmetros de forma de Weibull.....	42
Tabela 3.1 –Condições variáveis dos ensaios.....	53
Tabela 3.2 - Condições de ensaio comuns a todos corpos-de-prova.....	54
Tabela 3.3 - Condição das amostras e variáveis de ensaio.....	60
Tabela 3.4 – Condições de ensaio.....	61
Tabela 3.5 - Condições de ensaio.....	84
Tabela 4.1 - Composições dos ferros fundidos utilizados nos ensaios de fadiga de contato. ..	91
Tabela 4.2 - Durezas das matrizes dos ferros fundidos após têmpera e revenido.....	91
Tabela 4.3 – Dureza dos materiais ensaia.....	94
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas típicas de barras padrão de ferro fundido cinzento no estado bruto de fundição.....	98
Tabela 4.5 - Condições de ensaio.....	98
Tabela 4.6 - Viscosidade do lubrificante.....	99
Tabela 4.7 - Valores médios da rugosidade quadrática média, $R_q$ , antes do ensaio, dos corpos-de-prova de ferro fundido e da esfera de aço ABNT 52100.....	100
Tabela 4.8 – Significado dos códigos do sistema de identificação de amostras.....	102
Tabela 4.9 - Medidas dos anéis antes do tensionamento, quando tensionados e após remoção da carga.....	105
Tabela 5.1 - Vidas, em ciclos de carregamento, dos corpos-de-prova nos ensaios de fadiga de contato e parâmetros de Weibull para os ensaios sem pré-tensão.....	108
Tabela 5.2 - Vidas, em ciclos de carregamento, dos corpos-de-prova nos ensaios de fadiga de contato e parâmetros de Weibull para os ensaios com pré-tensão.....	117
Tabela 5.3 - Posições das falhas dentro do tensionador e vida associada a cada posição.....	131

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>R'</b>	raio reduzido
<b>R<sub>x</sub></b>	raio de curvatura reduzido na direção $x$
<b>R<sub>y</sub></b>	raio de curvatura reduzido na direção $y$
<b>R<sub>ax</sub></b>	raio de curvatura do corpo A na direção $x$
<b>R<sub>ay</sub></b>	raio de curvatura do corpo A na direção $y$
<b>R<sub>bx</sub></b>	raio de curvatura do corpo B na direção $x$
<b>R<sub>by</sub></b>	raio de curvatura do corpo B na direção $y$
<b>E*</b>	módulo de elasticidade combinado
<b>E'</b>	módulo de elasticidade reduzido
<b>v<sub>a</sub></b>	coeficiente de Poisson do material do corpo A
<b>v<sub>b</sub></b>	coeficiente de Poisson do material do corpo B
<b>a</b>	raio da circunferência de contato de uma esfera sobre um plano
<b>δ</b>	aproximação entre os centros de dois corpos postos em contato
<b>p<sub>o</sub></b>	pressão normal máxima de contato
<b>p</b>	pressão (variável) dentro da circunferência de contato
<b>W</b>	carga aplicada no contato
<b>R</b>	raio da esfera
<b>r</b>	variável raio de contato
<b>τ<sub>máx</sub></b>	tensão máxima de cisalhamento
<b>σ<sub>r</sub></b>	tensão trativa na borda do contato
<b>h<sub>c</sub></b>	espessura central do filme de lubrificante
<b>h<sub>o</sub></b>	espessura mínima do filme de lubrificante
<b>U</b>	velocidade de entrada da superfície
<b>U<sub>A</sub></b>	velocidade tangencial do corpo A
<b>U<sub>B</sub></b>	velocidade tangencial do corpo B



$\eta_0$	viscosidade do lubrificante à pressão atmosférica.
$\alpha$	coeficiente de variação da viscosidade com a pressão
<b>k</b>	fator de elipsidade
$\lambda$	parâmetro de filme
<b>R<sub>q</sub></b>	rugosidade quadrática média
<b>R<sub>qA</sub></b>	rugosidade quadrática média do corpo A
<b>R<sub>qB</sub></b>	rugosidade quadrática média do corpo B
$\theta$	parâmetro de escala da distribuição de Weibull
$\beta$	parâmetro de forma da distribuição de Weibull
$\gamma$	parâmetro de posição da distribuição de Weibull
<b>f(x)</b>	função densidade probabilidade de Weibull
<b>C(x)</b>	função confiabilidade de Weibull
<b>F(x)</b>	função probabilidade de Weibull
$\beta_e$	estimativa do valor de $\beta$
$\theta_e$	estimativa do valor de $\theta$
<b>n</b>	tamanho da amostra
$\kappa$	número referente à quantidade de variáveis sendo comparadas na análise de Weibull
<b>N<sub>t</sub></b>	número total de ciclos de carregamento
<b>N<sub>c</sub></b>	número de rotações registrado no contador
<b>N<sub>e</sub></b>	número total esferas usadas no ensaio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Tensões de Contato .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Lubrificação em contatos de rolamento .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 Fundamentos da fadiga de contato de rolamento .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4 Equipamentos para reproduzir a sollicitação de fadiga de contato .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 Componentes e materiais submetidos à fadiga de contato .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6 Distribuição de Weibull e a durabilidade sob fadiga .....</b>	<b>38</b>
<b>3 O DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Máquina I .....</b>	<b>44</b>
3.1.1 Projeto e construção .....	44
3.1.1.1 <i>Corpo-de-prova</i> .....	51
3.1.2 Primeira série de ensaios preliminares .....	52
3.1.2.1 <i>Materiais e métodos</i> .....	52
3.1.2.2 <i>Resultados e discussão</i> .....	54
3.1.2.3 <i>Conclusão</i> .....	59
3.1.3 Segunda série de ensaios preliminares .....	59
3.1.3.1 <i>Materiais e métodos</i> .....	59
3.1.3.2 <i>Resultados e discussão</i> .....	61
3.1.3.3 <i>Conclusões</i> .....	69
3.1.4 Análise do desempenho do equipamento .....	70
3.1.4.1 <i>Método</i> .....	70
3.1.4.2 <i>Resultados e discussão</i> .....	70
3.1.4.3 <i>Conclusões</i> .....	74
<b>3.2 Máquina II .....</b>	<b>75</b>
3.2.1 Projeto e construção .....	75
3.2.1.1 <i>Características e concepção do equipamento</i> .....	75
3.2.1.2 <i>Corpo-de-prova</i> .....	79
3.2.2 Montagem e utilização do novo equipamento .....	79
<b>3.3 Ensaios de validação do equipamento .....</b>	<b>83</b>
3.3.1 Materiais e métodos .....	83
3.3.2 Resultados e discussão .....	84
3.3.3 Conclusão .....	89
<b>4 ESTUDO DE FERROS FUNDIDOS: MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>90</b>
<b>4.1 Caracterização dos materiais ensaiados .....</b>	<b>91</b>
<b>4.2 Desenvolvimento do sistema de aplicação de pré-tensão .....</b>	<b>94</b>
<b>4.3 Condições gerais de ensaio .....</b>	<b>97</b>
<b>4.4 Sistema de identificação dos corpos-de-prova .....</b>	<b>102</b>
<b>4.5 Montagem do ensaio com aplicação de pré-tensão .....</b>	<b>103</b>

4.6	Simulação das tensões desenvolvidas nos corpos-de-prova tipo anel usando modelagem por elementos finitos .....	106
<b>5</b>	<b>ESTUDO DOS FERROS FUNDIDOS: RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>108</b>
5.1	Ensaio de fadiga de contato de rolamento: análise do material .....	108
5.2	Ensaio de fadiga de contato: efeito da pré-tensão.....	111
5.2.1	As tensões no modelo de elementos finitos.....	111
5.2.2	Durabilidade dos materiais ensaiados .....	116
5.3	Observação do dano e aspectos microestruturais.....	119
5.4	A posição dos defeitos nos ensaios com pré-tensão.....	129
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>135</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>136</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fadiga de contato de rolamento vem sendo estudada desde as primeiras décadas do século XX. Nesse período o principal foco sempre foi a indústria de rolamentos. Os fabricantes desses componentes, ou os fornecedores de aço para essas indústrias, sempre promoveram a pesquisa e o desenvolvimento na área. O avanço foi notável, analisando o passado é possível identificar que os temas de estudo foram sendo modificados na medida em que a qualidade dos materiais foi sendo melhorada. Pesquisadores de companhias de rolamentos, como McColl e Tallian da SKF, chegaram a fazer contribuições que posteriormente serviram a diversos outros propósitos dentro do universo da tribologia.

É verdade também que países como o Brasil, apesar de sua importância no mercado global de aço, estão à margem dos desenvolvimentos no setor, embora não esteja à margem de um mercado que em 2000 movimentou valores da ordem de 20 bilhões de dólares (BESWICK, 2002).

A fadiga de contato não está, no entanto, restrita ao universo dos rolamentos. Esse é um fenômeno que preocupa o setor ferroviário, os fabricantes de cilindros de laminação (NEVES et al., 2005) e também a indústria de fundição. Essa última movida, em geral, pela substituição do aço pelo ferro fundido nodular na fabricação de alguns componentes. Esse material une muitas vezes excelentes propriedades mecânicas à facilidade de fabricação e, ainda, elevada resistência ao desgaste (MAGALHÃES et al, 2000).

Nesse contexto, insere-se este trabalho, o qual teve por objetivo:

- Desenvolver um equipamento de ensaio de fadiga de contato que utilize a geometria esfera contra plano. O equipamento deve ser capaz de reproduzir mecanismos de fadiga de contato e apresentar repetibilidade de resultados.
- Estudar ferros fundidos com matriz de elevada dureza, um cinzento e outro nodular, quanto a sua resistência a fadiga de contato. Esse estudo se divide em duas partes:
  - A primeira, mais fundamental, visa caracterizar as diferenças básicas entre os comportamentos dos dois materiais e sobre a capacidade do equipamento em diferenciá-los;
  - Na segunda parte, procura-se avaliar o efeito nesses materiais da imposição de uma tensão externa, onde o corpo-de-prova fica sujeito a compressão.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Tensões de Contato

Para analisar as tensões geradas quando dois sólidos são postos em contato é primeiramente necessário definir a diferença entre contato conforme e não-conforme. Contato conforme é aquele que ocorre quando as superfícies dos dois corpos ajustam-se perfeitamente – em termos macroscópicos. Quando os perfis são dissimilares, então o contato entre as superfícies é dito não-conforme (JOHNSON, 1985). Na Figura 2.1 são ilustradas essas duas situações (HUTCHINGS, 1992). Quando dois sólidos de geometria não-conforme são colocados em contato eles se tocam inicialmente em um único ponto, ou ao longo de uma linha. Na medida em que pequenas forças são aplicadas, pressionando uma superfície contra a outra, as deformações elásticas resultantes levam a formação de uma pequena área de contato (JOHNSON, 1985).

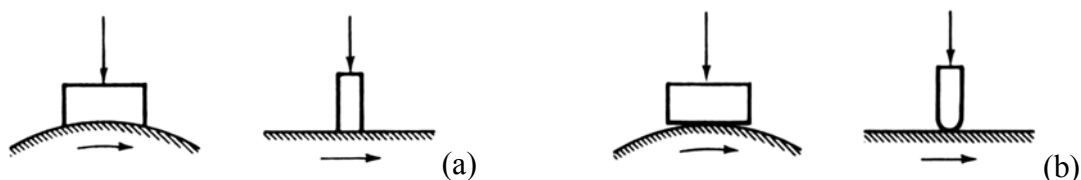


Figura 2.1 - Contatos conformes (a) e não-conformes (b) (HUTCHINGS, 1992).

A primeira análise satisfatória das tensões de contato de dois sólidos elásticos foi apresentada por Hertz em 1882. Essa teoria foi desenvolvida no ano de 1880, quando Heinrich Hertz tinha vinte e três anos de idade (JOHNSON, 1985) e foi motivada por sua preocupação, enquanto estudava óptica, a respeito da possível influência da deformação elástica de lentes pressionadas umas contra as outras na formação de franjas de interferência. O modelo desenvolvido por Hertz pressupõe superfícies lisas e que o contato entre elas é isento de atrito, além das considerações apresentadas a seguir.

Sua primeira hipótese foi que a área de contato é em geral elíptica, suposição oriunda de suas observações de franjas de interferência produzidas pelo contato entre as lentes. Foi agregada a simplificação, para o cálculo das tensões localizadas do contato, que cada corpo pode ser considerado como um semi-espaco elástico carregado em uma pequena área de sua superfície plana. Essa simplificação, geralmente seguida na teoria de tensões de contato, significa que as tensões de contato – altamente concentradas – são tratadas a parte da distribuição geral de tensões nos corpos em análise. Para que essa simplificação seja válida, duas condições devem ser satisfeitas: as dimensões da área de contato devem ser significativamente pequenas quando comparadas: (a) com as dimensões de cada corpo e (b) com o raio relativo de curvatura das duas superfícies.

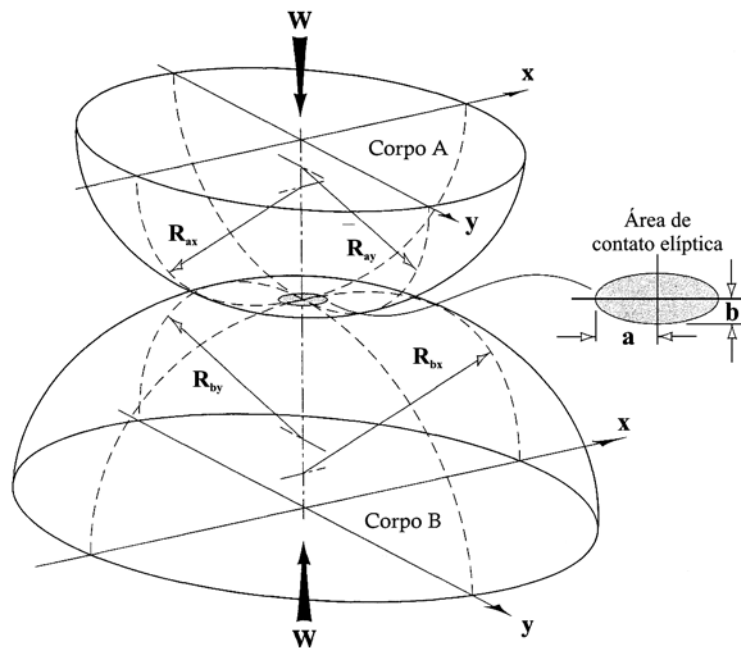


Figura 2.2 - Contato elástico entre dois corpos elípticos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

A análise aplica-se a corpos elípticos elásticos que são postos em contato, e os cálculos começam pela determinação do raio reduzido,  $R'$ , das duas superfícies, o qual é baseado nos raios principais de curvatura das duas superfícies. Essa descrição pode ser melhor compreendida observando o desenho esquemático apresentado na Figura 2.2, onde  $x$  e  $y$  são

tomados, respectivamente, segundo as direções do menor e o do maior semi-eixos dos sólidos A e B. Nesse caso, o raio reduzido de curvatura é dado pela equação 2.1 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{bx}} + \frac{1}{R_{by}} \quad (2.1)$$

onde,  $R_x$  é o raio de curvatura reduzido na direção  $x$ ,  $R_y$  é o raio de curvatura reduzido na direção  $y$ ,  $R_{ax}$  é o raio de curvatura do corpo A na direção  $x$ ,  $R_{ay}$  é o raio de curvatura do corpo A na direção  $y$ ,  $R_{bx}$  é o raio de curvatura do corpo B na direção  $x$  e  $R_{by}$  é o raio de curvatura do corpo B na direção  $y$ .

No cálculo das tensões e deformações elásticas há também que calcular um módulo de elasticidade composto pelos valores dessa propriedade no dois materiais. Alguns autores designam esse módulo composto por “módulo combinado”,  $E^*$  na equação 2.2 (JOHNSON, 1985), enquanto outros o tratam por “módulo reduzido”,  $E'$  na equação 2.3 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001). Neste trabalho adotou-se o módulo combinado para cálculo das tensões de contato e de quaisquer outros parâmetros dependentes dessa propriedade.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - \nu_b^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right] \quad (2.3)$$

onde,  $\nu_a$  e  $\nu_b$  são os coeficientes de Poisson dos materiais do corpo A e do corpo B e  $E_a$  e  $E_b$  são os módulos elásticos, igualmente, dos materiais do corpo A e do corpo B.



Como, no entanto, essa observação não costuma estar expressa nas fontes de consulta, é importante que o leitor tenha muita atenção ao transpor resultados, ou combinar equações de autores diferentes.

Para o caso particular de uma esfera pressionada contra um plano, o raio da circunferência de contato,  $\mathbf{a}$ , a aproximação dos centros dos dois corpos,  $\delta$ , a pressão máxima de contato,  $\mathbf{p}_o$ , e a distribuição de pressão com a posição dentro da região de contato,  $\mathbf{p}$ , são dados pelas equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente (JOHNSON, 1985).

$$\mathbf{a} = \left( \frac{3WR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

onde,  $\mathbf{W}$  é a carga aplicada,  $\mathbf{R}$  é o raio da esfera e  $\mathbf{E}^*$  é módulo elástico combinado dos materiais da esfera e do plano.

$$\delta = \frac{\mathbf{a}^2}{R} = \left( \frac{9W^2}{16RE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{p}_o = \frac{3}{2} \left( \frac{W}{\pi \mathbf{a}^2} \right) = \left( \frac{6WE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_o \left[ 1 - (r/\mathbf{a})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

onde  $\mathbf{r}$  é a variável raio de contato, que vai desde zero até  $\mathbf{a}$ , com origem no centro do contato.

A máxima tensão de cisalhamento,  $\tau_{\text{máx}}$ , dada pela equação 2.7, ocorre a na posição central do contato a uma profundidade de  $\mathbf{0,48a}$  e a máxima tensão trativa ocorre na superfície, na borda da região de contato e á dada pela equação 2.8 (JOHNSON, 1985).

$$\tau_{\text{máx}} = \mathbf{0,31p}_o \quad (2.7)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{3}(1 - 2\nu)\mathbf{p}_o \quad (2.8)$$

## 2.2 Lubrificação em contatos de rolamento

Lubrificação elasto-hidrodinâmica é o regime de lubrificação no qual, devido à espessura do filme lubrificante, as asperezas das superfícies dos corpos pressionados deformam-se apenas elasticamente. Esse regime de lubrificação é típico de contatos não conformes submetidos a altas pressões de carregamento. As espessuras de películas de lubrificante encontradas nesses sistemas, da ordem de centenas de nm, não podiam ser explicadas até o final da década de 40 do século XX. Em 1949 Grubin e Vinogradova (1949 apud DOWSON; HIGGINSON, 1977, p.53) introduziram em sua análise um importante fator até então negligenciado na teoria hidrodinâmica: a variação da viscosidade do lubrificante com o aumento da pressão a que ele está submetido. Em seu modelo, os autores imaginaram um cilindro – com módulo elástico equivalente ao das duas superfícies em contato – sendo pressionado contra um plano rígido. Devido às altas pressões de contato, o lubrificante aumenta drasticamente sua viscosidade e assume um caráter sólido, isso ocasiona a deformação da superfície cilíndrica, aumentando sua curvatura e permitindo que o filme formado mantenha as superfícies separadas. Com isso Grubin consegue chegar a valores de espessura de filme de lubrificante muito próximos dos que seriam mais tarde confirmados em medições experimentais (DOWSON; HIGGINSON, 1977).

A evolução do modelo de Grubin, fazendo uso também da facilidade representada pela computação numérica mais recente, resultou numa melhor descrição tanto da distribuição de tensões ao redor da região de contato, como da variação da espessura do filme lubrificante, o que é apresentada esquematicamente na Figura 2.3 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

---

GRUBIN, A. N., VINOGRADOVA, I. E. Central scientific research institute for technology and mechanical engineering. Book nº30, Moscow, 1949. (D.S.I.R Translation nº337).

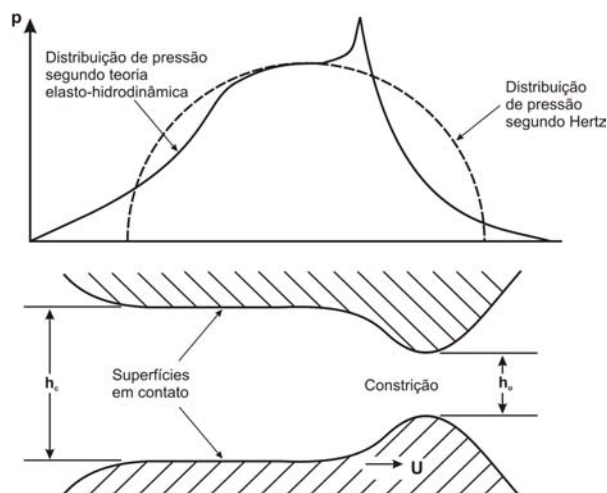


Figura 2.3 - Distribuição esquemática de pressão num contato elasto-hidrodinâmico (a); perfil de deformação mostrando a espessura de filme central e a espessura mínima de filme (b) (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

O que ocorre é que nas regiões de entrada e saída do lubrificante existem apreciáveis desvios na distribuição de tensões em relação ao contato seco, elipsoidal, indicado na Figura 2.3 pela linha pontilhada. A combinação do movimento de rolamento com o aumento de viscosidade do lubrificante (causado pelo aumento da pressão) promove o achatamento das superfícies, aumentando da área de contato e fazendo com que a pressão na entrada do contato seja menor que a do contato seco e estático. Na entrada, as superfícies tornam-se quase paralelas e o espaçamento entre elas é caracterizado pela espessura central do filme,  $h_c$ . A medida que o lubrificante avança na região de contato sua viscosidade aumenta mais ainda e volta a diminuir na saída do contato. Para manter a continuidade do fluxo e compensar a queda de viscosidade, uma constrição é formada próxima a saída do contato, conforme mostrado na Figura 2.3.

São de Hamrock e Dowson (1981 apud Stachowiak; Batchelor, 2001) as expressões para calcular as espessuras de filme elasto-hidrodinâmico. Elas aplicam-se a contatos pontuais, lineares ou elípticos e são dadas pelas equações 2.9 e 2.10.

---

HAMROCK, B. J., DOWSON, D. Ball bearing lubrication, the elasto-hydrodynamic of elliptical contacts. John Wiley & Sons, 1981.

$$\frac{h_c}{R'} = 2,69 \left( \frac{U\eta_o}{2E^* R'} \right)^{0,67} (2\alpha E^*)^{0,53} \left( \frac{W}{2E^* R'^2} \right)^{-0,067} (1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (2.9)$$

$$\frac{h_o}{R'} = 3,63 \left( \frac{U\eta_o}{2E^* R'} \right)^{0,68} (2\alpha E')^{0,49} \left( \frac{W}{2E^* R'^2} \right)^{-0,073} (1 - e^{-0,68k}) \quad (2.10)$$

onde:  $\mathbf{U}$  é a velocidade de entrada da superfície [m/s], isto é,  $\mathbf{U}=(\mathbf{U}_A+\mathbf{U}_B)/2$ ; os sub-índices referem-se aos corpos A e B;

$\eta_o$  é a viscosidade do lubrificante à pressão atmosférica [Pas];

$E^*$  é o módulo elástico combinado [Pa];

$\alpha$  é o coeficiente de variação da viscosidade com a pressão [m<sup>2</sup>/N];

$\mathbf{W}$  é a carga aplicada [N];

$\mathbf{k}$  é o fator de elipsidade;  $\mathbf{k}=1$  para contatos pontuais e  $\mathbf{k}=\infty$  para contatos lineares.

Estando resolvida a questão da espessura do filme lubrificante, Tallian (1969) propõe um parâmetro que relaciona a mínima espessura da película lubrificante com a rugosidade da superfícies, o parâmetro  $\lambda$ , o qual avalia o aproximação entre as asperezas. Esse parâmetro é apresentado na equação 2.11.

$$\lambda = \frac{h_o}{\sqrt{R_{qA}^2 + R_{qB}^2}} \quad (2.11)$$

onde  $\mathbf{R}_q$  é a rugosidade quadrática média das duas superfícies em contato e os sub-índices referem-se aos corpos A e B. Essa relação tenta descrever os limites da lubrificação elasto-hidrodinâmica e o início do dano às superfícies causado por uma aproximação excessiva entre elas. Valores inferiores a 1 indicam não apenas que haverá intenso contato plástico entre as asperezas, acompanhado por desgaste, mas também deformação plástica da superfície. Valores entre 1 e 1,5 indicam a haverá deformação plástica intensa das asperezas. Quando  $\lambda$  está entre 1,5 e 3, indica que pode haver deformação plástica das asperezas. Para valores maiores que 3

espera-se não haver contato plástico entre as asperezas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

### **2.3 Fundamentos da fadiga de contato de rolamento**

Inicialmente, há que fazer uma breve uniformização de linguagem envolvendo termos encontrados na literatura fazendo referência a fenômenos de desgaste por fadiga. A primeira distinção a ser feita é entre a fadiga dita convencional, ou seja, a fadiga estrutural relacionada a tensões distribuídas em grandes volumes de material e a fadiga de contato. Essa última está relacionada a esforços localizados, ou seja, distribuídos em áreas que são muito pequenas comparadas às dimensões dos corpos envolvidos. Outra distinção importante entre essas duas modalidades de fadiga é o fato da fadiga de contato de rolamento ser, o menos classicamente, um processo iniciado abaixo da superfície, enquanto a fadiga estrutural apresenta nucleação de trinca na superfície. Embora a expressão “fadiga de contato” seja consensualmente utilizada para referir-se à fadiga de contato de rolamento (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001), também existem fenômenos de fadiga envolvendo altas tensões de contato que podem ocorrer em situações quase estáticas (*fretting*) e de deslizamento. Feitos esses esclarecimentos, fica compreendido que nesse texto a expressão fadiga de contato será sempre usada como sinônimo de fadiga de contato de rolamento, a fim de melhorar a fluidez da leitura.

A fadiga de contato decorre do carregamento cíclico sobre contatos não-conformes. Esse carregamento resulta no acúmulo de deformações plásticas que, após um número finito de ciclos, pode conduzir a nucleação de uma trinca. Estão sujeitos a esse fenômeno, entre outros, componentes tais como esferas, rolos e pistas de rolamentos, cames, dentes de engrenagens, cilindros de laminação, trilhos e rodas ferroviárias.

Diferentemente da fadiga convencional, na fadiga de contato de rolamento não é esperado que exista um limite de carregamento nominal abaixo do qual o componente jamais

apresentará falha por fadiga, mesmo para aços (RABINOWICZ, 1965). A principal contribuição à restrição para a vida infinita vem da alta probabilidade de ocorrência de deformação plástica localizada nas superfícies de um sistema tribológico. Na Figura 2.4 estão sumarizados uma série de fatores envolvidos nesse sistema e que potencialmente podem contribuir para a nucleação e/ou propagação de uma trinca de fadiga de contato (ASM, 1996). Considerando-se todos esses fatores desprende-se que é absolutamente improvável que durante o funcionamento de um sistema de contato de rolamento, ao menos um desses fatores não venha a causar em uma microrregião o acúmulo de sucessivas deformações plásticas.

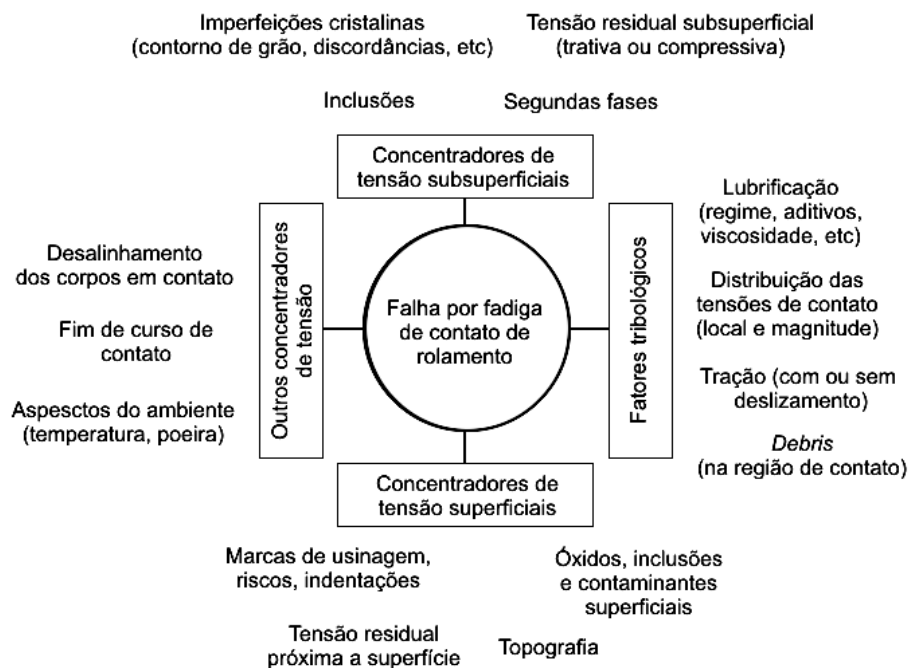


Figura 2.4 - Fatores que afetam a vida em fadiga de contato (ASM, 1996).

A respeito da Figura 2.4, vale salientar que alguns dos fatores separados estão intrinsecamente inter-relacionados, por exemplo, a temperatura, um fator ambiental, influencia diretamente o regime de lubrificação, classificada com um fator tribológico. Colocadas à parte considerações dessa ordem, o mérito da figura está em fortalecer a idéia de complexidade do sistema.

No movimento de rolamento puro de um cilindro sobre uma superfície plana, a máxima tensão de cisalhamento está posicionada abaixo da superfície de contato. No de deslizamento, no entanto, a máxima tensão cisalhante ocorre na superfície. Em regimes mistos de rolamento/deslizamento a posição da máxima tensão cisalhante dependerá da magnitude do atrito de deslizamento. Na Figura 2.5 estão ilustradas essa três condições, sendo que na combinação de rolamento/deslizamento, a curva pontilhada mostra que o atrito entre os corpos é suficiente para aproximar a máxima tensão cisalhante da superfície (ASM, 1996).

As tensões desenvolvidas abaixo da superfície podem então interagir, por exemplo, com alguma inclusão posicionada em seu campo de ação e este ser o ponto inicial de deformação localizada a partir de onde uma trinca será nucleada e se propagará pelo material até o desprendimento de uma lasca da superfície.

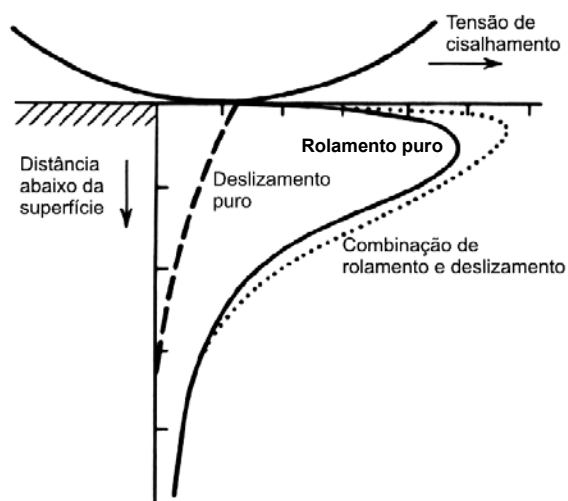


Figura 2.5 - Representação esquemática da distribuição de tensões de cisalhamento abaixo do contato nas situações de rolamento puro, deslizamento e rolamento com deslizamento (ASM, 1996).

De fato, no decorrer das últimas cinco décadas grandes avanços foram feitos no processo siderúrgico a fim controlar o nível de impurezas dos aços destinados a fabricação de rolamentos. Em 1960 Johnston e Sewell (1960) publicam trabalho comparando o desempenho em ensaios de fadiga de contato de rolamento de ligas com 1 %C e 1 %Cr fabricadas por

diferentes processos siderúrgicos. Em seus resultados são reportados essencialmente defeitos nucleados na subsuperfície e que todas as ligas fundidas em vácuo apresentaram resultado superior àquelas fundidas ao ar. Os autores classificaram o nível de inclusões como única variável do material – mantida a dureza constante – que apresentava correlação com os resultados dos ensaios. Ambos pesquisadores trabalhavam para companhias siderúrgicas, Johnston para a “*The United Steel Companies Ltd.*”, dos Estados Unidos, e Sewell para a *Samuel Fox Co.*, uma empresa britânica.

Uma década mais tarde Tallian e McColl (1971), ambos da “*SKF Industries*”, apresentam um modelo para a falha iniciada superficialmente em rolamentos. A justificativa para o interesse nesse desenvolvimento foi que nos anos anteriores a 1971 a quantidade de falhas de rolamentos causadas por lascamentos iniciados na superfície havia crescido comparativamente às iniciadas na subsuperfície. Tallian e McColl atribuíram essa mudança no modo de falha à evolução do processo siderúrgico. Segundo os autores, a qualidade do aço era tão baixa nas décadas anteriores que a probabilidade de falha iniciada na superfície era virtualmente desprezível, ou seja, o modo dominante de falhas era o subsuperficial. Esse modelo leva em consideração o aumento de tensão produzido no contato devido a deformações na superfície de um dos corpos em contato, causada, por exemplo, por uma indentação.

Avançando três décadas, Girodin et al. (2002), da “*SNR Roulements*”, publicam trabalho abordando a tolerância de alguns materiais à indentação causada por contaminantes no lubrificante. Segundo os autores, a contaminação do lubrificante por partículas que possam causar indentações nas superfícies de rolamento, levando essas regiões a atuarem como concentradoras de tensão é atualmente a principal causa de dano em aplicações comerciais.



## **2.4 Equipamentos para reproduzir a solicitação de fadiga de contato**

O cálculo da vida de rolamentos deve considerar fatores relativos tanto às características dos materiais empregados na fabricação dos componentes quanto às condições sob as quais o componente vai operar. A determinação do peso de cada um desses fatores deriva da experiência de fabricantes e usuários adquirida em anos de análises tanto de campo, quanto de simulações em laboratório (HOO, 1982).

O interesse em se desenvolver um ensaio para estudar fadiga de contato de rolamento relaciona-se à tentativa de obter dados de desempenho (relativos a materiais, lubrificantes ou condições operacionais) com menor custo e tempo que aqueles necessários à observação da falha em campo. Além disso, em laboratório os ensaios podem ser conduzidos sob condições mais controladas e sem o comprometimento de sistemas produtivos por ocorrência de uma falha.

Um fator importante de um equipamento desenvolvido para testes em laboratório é que esse seja capaz de gerar resultados em um período razoável de tempo e, ainda, passíveis de serem relacionados com condições reais. No entanto, na medida em que se utilizam condições de que tornam os ensaios cada vez mais curtos, ocorre um afastamento das condições reais de aplicação dos rolamentos. Um ponto de equilíbrio entre esses dois fatores essencialmente contraditórios ainda está por ser alcançado, visto não existir ainda hoje um ensaio padronizado para a qualificação de materiais submetidos à fadiga de contato.

Dentre as configurações de equipamentos existentes para a reprodução do carregamento de fadiga de contato de rolamento podem ser enumerados: disco sobre disco – onde os perfis de contato podem ser cilíndricos ou esféricos, esfera sobre plano, esfera sobre cilindro e esfera sobre esfera. Os primeiros ensaios com materiais de rolamento que não utilizaram rolamentos foram realizados num equipamento do tipo disco sobre disco e publicados em 1935 (ZARESTSKY; PARKER; ANDERSON, 1982), no entanto, nos 20 anos seguintes foi mantida

a tendência de ensaios com rolamentos, ao invés de corpos-de-prova fabricados com materiais de rolamentos.

A primeira máquina de fadiga de contato de rolamento do tipo esfera sobre plano encontrada na literatura foi anunciada por Bardgett (1954) da *United Steel Companies*, ao criticar Frith (1954) por ter utilizado ensaios de flexão rotativa para estudar propriedades de fadiga de aços para esferas de rolamento. O equipamento foi projetado e construído em cooperação com outras empresas, entre as quais uma empresa de rolamentos, a *Skefco Co.* O princípio básico consistia em montar um rolamento axial de esferas num eixo vertical e substituir uma das pistas externas por um corpo-de-prova plano. Devido ao corpo-de-prova ter a forma de uma arruela de faces planas esse tipo de configuração ficou posteriormente conhecido por “*flat washer*”, ou seja, arruela plana.

Equipamentos similares ao desenvolvido pela *United Steel* foram construídos em empresas como a *Rolls-Royce Ltd.* (BAMBERGER; CLARK, 1982) e o *Admiralty Oil Laboratory* (EASTAUGH, 1982). Na *Rolls-Royce* as características construtivas eram as mesmas do ensaio *Unisteel* (nome que deriva de *United Steel*), já no *Admiralty Oil Laboratory* os corpos-de-prova eram de menor diâmetro e o equipamento recebeu o nome de AOL (as iniciais da empresa). Embora a *Rolls-Royce* tenha tido acesso aos desenhos de projetos da máquina de ensaio *Unisteel*, normalmente não são encontrados na literatura nada mais do que esquemas de funcionamento desses equipamentos (JOHNSTON; SEWELL, 1960). Soluções relevantes de projeto, detalhes dimensionais e construtivos, bem como dados a respeito de ensaios de ajuste do equipamento são quase inexistentes. Da mesma forma, os encontros formais de discussão do tema fadiga de contato de rolamento são bastante restritos. Possivelmente somam-se para formar esse caráter restritivo os fatos de que os estudos costumam ser longos e, em geral, realizados dentro das próprias empresas, sejam elas

fabricantes de aço ou de rolamentos, envolvendo então uma menor disposição para a divulgação de resultados relevantes do que a que encontramos no meio acadêmico.

Entre os exemplos que contradizem o desenvolvimento de equipamentos vinculados ao setor industrial, encontram-se, além dos trabalhos vinculados a essa tese, os trabalhos de Kalin e Vižintin (2004) e de Leite et al. (2004). O primeiro foi idealizado para o ensaio de pares de rolamento cerâmica/aço e cerâmica/cerâmica, sua principal particularidade é que a amostra pode ser um paralelepípedo com a exigência de que possua duas faces opostas que sejam planas e paralelas. O equipamento desenvolvido por Leite et al. (2004) é do tipo esfera sobre plano, mas com o eixo do rolamento axial orientado horizontalmente e com a possibilidade de realizar medidas da força de atrito de rolamento a que os corpos de prova estão submetidos.

## **2.5 Componentes e materiais submetidos à fadiga de contato**

Possivelmente, rolamentos sejam os componentes mecânicos mais representativos quando se pensa em fadiga de contato de rolamento. Em Língua Portuguesa essa relação é amplificada pelo fato de uma mesma palavra, rolamento, ser usada na designação de dois entes distintos, o componente mecânico rolamento e um determinado tipo de movimento relativo entre dois corpos.

De forma bastante ampla pode se dizer que rolamentos podem ser divididos em três grandes classes quanto a sua aplicação: rolamentos para trabalho em condições normais, em temperaturas elevadas e em ambientes corrosivos. Para atender a essas aplicações e a algumas outras bem mais restritas, uma série de diferentes materiais têm sido empregados. Em termos quantitativos, isso fica claro se for observado, por exemplo, que no ano de 2001 a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) apresentava trinta e sete diferentes tipos de aços classificados como aços para rolamentos. Todos esses materiais devem possuir um ponto fundamental em comum: limpeza. Nesse caso, limpeza significa a ausência de inclusões

deletérias a suas propriedades, pois só assim os componentes fabricados poderão alcançar elevadas vidas em serviço (ASM, 1990). Graus diferentes de limpeza podem ser obtidos nos processos de fusão ao ar, refusão por eletro-escória, fusão ao ar seguida por refusão em vácuo e fusão por indução em vácuo seguido de refusão a arco em vácuo, evidentemente, cada um desses processos envolve diferentes resultados em termos de limpeza, confiabilidade e custo.

Apesar da fácil associação entre rolamentos e fadiga de contato de rolamento, estas não são, todavia, os únicos componentes sujeitos à fadiga de contato. Rodas e trilhos ferroviários, came em geral, cilindros de laminação e engrenagens também têm dinâmicas de funcionamento nas quais insere-se a possibilidade de dano por fadiga de contato. E muitos desses componentes estão inseridos em um universo completamente diferente daquele ao qual pertencem os rolamentos, seja em termos dos materiais empregados, dos processos de fabricação disponíveis ou, principalmente, dos mercados a que devem atender.

Nesse sentido, alguns estudos têm sido conduzidos na tentativa de compreender melhor o comportamento dos ferros fundidos, principalmente os nodulares de alta resistência, frente à fadiga de contato. O avanço das fronteiras de aplicação desse material passa necessariamente por tornar esse conhecimento disponível aos engenheiros projetistas de máquinas e componentes (MAGALHÃES; SEABRA; SÁ, 2000), (HATATE, 2001), (MAGALHÃES; SEABRA, 2005).

Em um primeiro trabalho, Salvande e Dommarco (2000) utilizam um equipamento de fadiga de contato baseado em um rolamento axial do tipo 51107, para estudar o desempenho sob fadiga de contato de rolamento de um ferro fundido nodular submetido a austêmpera em diferentes patamares de temperatura de transformação. Os autores fazem diversas indentações de dureza na trilha de rolamento para que estas atuem com pontos de início de trincas. Os ensaios são realizados com valores de parâmetro  $\lambda$ , apresentado na equação 2.11, que deve promover a nucleação de defeitos a partir da superfície. Os resultados são comparados entre si

e com um material de referência, um aço SAE 4140, e mostram que maiores vidas são obtidas para os tratamentos de austêmpera realizados em temperaturas de transformação mais baixas, ou seja, que resultam em durezas mais elevadas. No entanto, nenhum dos tratamentos aplicados ao ferro fundido faz com que esse material supere o desempenho do aço de referência.

Numa segunda rodada de testes Salvande e Dommarco (2001) realizam novos ensaios com condições semelhantes a do estudo anterior, mas adicionando ao grupo dos ferros fundidos uma nova condição microestrutural, um ferro fundido nodular parcialmente coquilhado ensaiado no estado bruto de fundição. A microestrutura dessa liga consiste de nódulos de grafita significativamente menores que aqueles observados no outro ferro nodular, distribuídos numa matriz de perlita e carboneto de ferro. Os resultados de vida sob fadiga de contato para o ferro parcialmente coquilhado superaram todos os resultados das ligas austemperadas e equipararam-se aos do aço SAE 4140.

Esse último resultado é particularmente interessante porque a redução dos nódulos poderia ser obtida por tratamentos de refusão localizada, com eletrodos não consumíveis, ou com *laser*, por exemplo. E no caso de se obter a eliminação total dos nódulos a adequada profundidade, é pertinente imaginar que em muitos casos não haverá grande diferença se o núcleo do material fosse de ferro fundido nodular ou cinzento, pois já que existe grande diferença no desempenho desses dois materiais frente à fadiga de contato (HATATE, 2001), pode-se fabricar uma superfície com material mais resistente e mais abaixo, longe da ação das tensões superficiais, utilizar ferro fundido cinzento ao invés de nodular, diminuindo-se custos do processo de fundição. Outra possibilidade tecnológica aberta pelo resultado de fadiga com o ferro parcialmente coquilhado é a sua utilização na fabricação de cilindros de encosto para laminação de aços, pois mantendo-se, ou melhorando, o desempenho em relação aos cilindros

produzidos em aço forjado, cilindros fabricados em ferro fundido poderão ter custo de fabricação significativamente menores.

Na continuação de seus trabalhos, Dommarco et al. (2006) intensificaram o estudo do efeito da diminuição do tamanho de nódulos de grafita no desempenho sob fadiga de contato do ferro fundido nodular. Os autores estudaram diferentes relações entre diâmetros de contato, fazendo ensaios com esferas de diferentes dimensões, e diâmetro de nódulos de grafita. O material foi ensaiado com diferentes condições de austêmpera e uma condição de têmpera e revenido e a pressão máxima de contato utilizada foi 1,6 GPa. Novamente aqui os resultados foram comparados com um aço SEA 4140. Os resultados mostram de forma bastante nítida que a vida em fadiga aumenta na medida em que o diâmetro de contato se torna relativamente maior que o diâmetro dos nódulos de grafita. De forma geral, os tratamentos da austêmpera a patamares de temperatura de transformação mais baixos também resultam em melhor desempenho de fadiga de contato. Um ponto em aberto nesse trabalho é que os autores não destacam o fato de os melhores resultados terem sido obtidos não com as amostras submetidas a austêmpera, mas sim o grupo que sofreu de têmpera e revenido. O desempenho desse grupo foi superior inclusive ao desempenho do aço de referência. É possível que isso tenha ocorrido pelo fato do grupo de amostras temperadas e revenidas ter apresentado dureza final superior às dos grupos austemperados e também do aço SAE 4140.

Cabe ainda dizer que a continuidade de estudos como os aqui brevemente relatados deparam-se sempre com uma dificuldade intrínseca ao estudo da fadiga de contato: os longos tempos de ensaio. Somando-se a isso o fato de que as dispersões de resultados costumam ser muito grandes, chegando a haver variações de duas ordens de grandeza nos resultados de um ensaio (RABINOWICZ, 1965), a obtenção de resultados estatisticamente relevantes toma em geral muito tempo, especialmente quando se dispões de um único equipamento de ensaio. Talvez isso seja uma justificativa para que boa parte do desenvolvimento experimental de

fatiga de contato de rolamento tenha sido desenvolvido dentro das próprias empresas produtoras de rolamento, ou dentro de siderúrgicas, fornecedoras dessas empresas.

## 2.6 Distribuição de Weibull e a durabilidade sob fadiga

As distribuições de Weibull, cujo nome tem origem no do professor sueco Wallodi Weibull, são largamente utilizadas para representar o tempo para que uma falha ocorra, ou a longevidade de componentes em um sistema mecânico e, em particular, para problemas envolvendo fadiga dos materiais (MODARRES, 1993; AMSTADTER, 1971).

Essa distribuição é descrita por três parâmetros estatísticos, um parâmetro de escala,  $\theta$ , um de forma,  $\beta$ , e um de localização,  $\gamma$ . Na equação 2.12 é apresentada a função de densidade de probabilidade de Weibull e na 2.13 a correspondente função de confiabilidade, para uma variável  $x$ , que tipicamente pode representar o tempo de vida para falha de um componente (MODARRES, 1993).

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{x - \gamma}{\theta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{x - \gamma}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (2.12)$$

$$C(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - \gamma}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (2.13)$$

Visto que a equação 2.12 representa a função confiabilidade, função de probabilidade de falha será dada pela unidade menos o valor de  $C(x)$ , como na equação 2.14 (McCOOL, 1982).

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - \gamma}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (2.14)$$

As Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 ilustram os diferentes valores desses parâmetros. Em cada uma delas um parâmetro é variado e os outros dois mantidos constantes. Na Figura 2.6 é

possível ver que a modificação de  $\theta$  não altera nem forma da distribuição, nem seu ponto zero, ela apenas é comprimida ou estendida ao longo do eixo das abscissas. Ainda sobre a Figura 2.6, a forma da curva poderia ser diferente para valores diferentes de  $\beta$ , mas todos os membros de uma família de mesmo  $\beta$  teriam a mesma forma. O mesmo ocorreria para um valor diferente de  $\gamma$ , haveria um deslocamento do ponto inicial de zero para um outro valor, mas todas as curvas da mesma família teriam o mesmo ponto inicial.

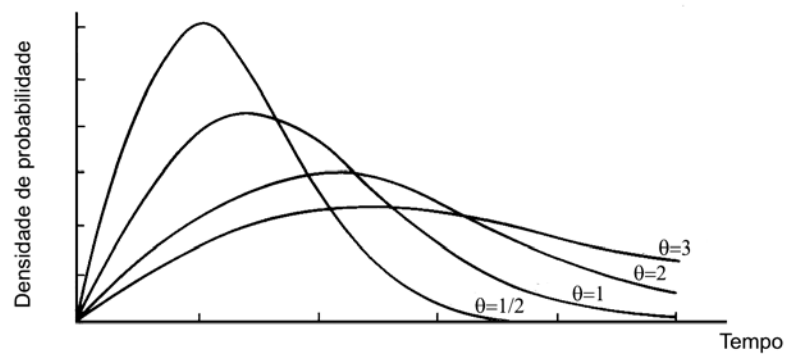


Figura 2.6 - Distribuições de Weibull para diferentes do parâmetro de escala,  $\theta$ ;  $\beta=2$ ;  $\gamma=0$  (AMSTADTER, 1977).

Na Figura 2.7 é variado  $\beta$  e quando isso ocorre, a forma da distribuição é alterada, mas não a escala nem o ponto inicial.

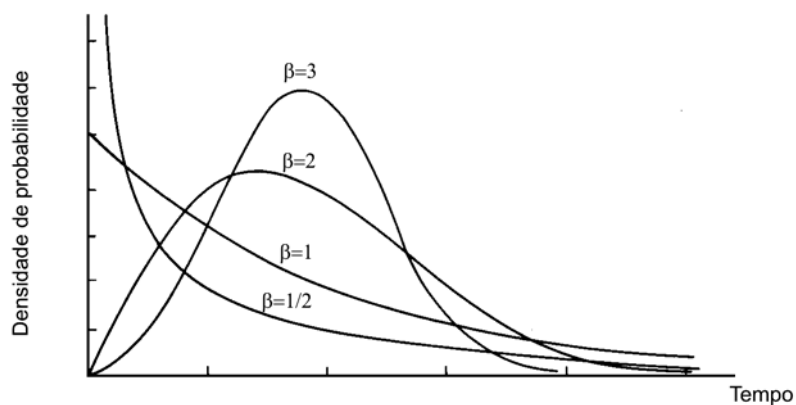


Figura 2.7 - Distribuições de Weibull para diferentes do parâmetro de forma,  $\beta$ ;  $\theta=1$ ;  $\gamma=0$  (AMSTADTER, 1977).



O efeito da variação do parâmetro de localização,  $\gamma$ , é apresentado na Figura 2.8. Um valor negativo de  $\gamma$  indica que alguns componentes falharão antes de entrar em operação, ou seja, no estoque. Um valor positivo indica que existe um período inicial livre de falha.

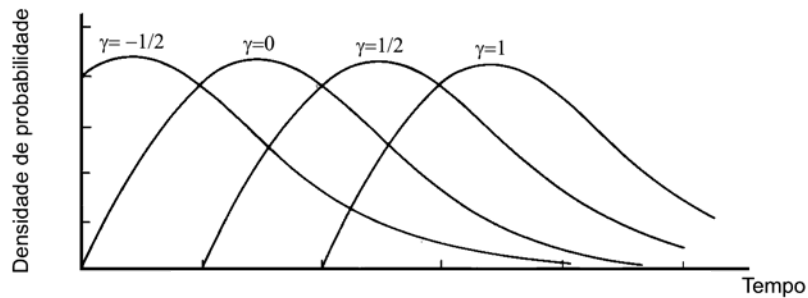


Figura 2.8 - Distribuições de Weibull para diferentes do parâmetro de escala,  $\gamma$ ;  $\theta=1$ ;  $\beta=2$  (AMSTADTER, 1977).

A NBR 6742 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987) descreve o procedimento para a que dados oriundos de ensaios de fadiga devem ser manipulados para que sejam interpretado como pertencendo a uma distribuição de Weibull. Na norma, é anulado o fator de posição e, portanto, probabilidade de falha não mais é descrita pela a equação 2.14, mas sim pela 2.15.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (2.15)$$

A norma orienta como montar o gráfico e como dele obter os parâmetros de forma e escala. Dado a facilidade atual para a solução de equações que exijam processo iterativo, o método numérico pode ser preferido ao gráfico. Nesse caso, os valores de  $\beta$  e  $\theta$  ,podem ser estimados mediante o uso das equações 2.16 e 2.17 (McCOOL, 1982).

$$\frac{1}{\beta_e} + \left(\sum_{i=1}^n \ln x_i\right) / n - \left(\sum_{i=1}^n x_i^{\beta_e} \ln x_i\right) / \left(\sum_{i=1}^n x_i^{\beta_e}\right) = 0 \quad (2.16)$$

$$\theta_e = \left( \sum_{i=1}^n x_i^{\beta_e} / n \right)^{\frac{1}{\beta_e}} \quad (2.17)$$

onde  $n$  é o tamanho da amostra,  $x_i$  é vida até a falha do  $i$ -ésimo componente os sub-índice “e” em  $\beta$  e  $\theta$  indicam o que está sendo calculado é uma estimativa, a partir de uma amostra, dos parâmetros de forma e escala da população, e não os parâmetros de forma e escala da população. Vale destacar que para estimar  $\beta$  e  $\theta$  usando as equações anteriores na forma como elas estão escritas, todos os  $n$  componentes devem ter sofrido falha. Em uma interpretação do sentido físico dos dois parâmetros, o parâmetro de escala,  $\theta$ , as vezes chamado de vida média, ou vida característica, é o valor de tempo (ou ciclos, ou rotações, etc.) correspondente a 63,2% de todas as falhas, ou seja, quanto o tempo “ $\theta$ ” tiver sido atingido, 63,2% das falhas já terão ocorrido. Já o parâmetro de forma,  $\beta$ , descreve a forma como a quantidade de falhas aumenta com o passar do tempo, ou ainda, dá uma dimensão da dispersão das vidas em torno do valor médio  $\theta$ .

A constante necessidade de testar parâmetros de funcionamento, tratamentos aplicados aos materiais, lubrificantes ou mesmo materiais diferentes, faz com que muitas vezes os ensaios de fadiga necessitem ser conduzidos com uma certa quantidade,  $\kappa$ , de condições distintas, originando  $\kappa$  diferentes distribuições. Em 1979 McCool publica em um periódico de estatística uma série de técnicas destinadas a análise de distribuições de Weibull de dois parâmetros. Esse trabalho foi financiado pelo “*U.S. Air Force Office of Scientific Research*” e é citado pelo autor em seu artigo publicado no simpósio de ensaios de fadiga de contato, organizado pela ASTM em 1982 (McCOOL, 1982). Nesse trabalho, onde o autor contextualiza a aplicação das técnicas em termos de ensaios de fadiga de contato de rolamento, é criticado o hábito corrente – ao menos até aquele momento – entre os trabalhos que aplicam o método de Weibull, de fazer distinção apenas entre os valores dos parâmetros de escala quando eram

comparadas duas distribuições. Segundo o autor, era procedimento usual ignorar possíveis diferenças entre os parâmetros de forma das distribuições.

A hipótese de que os parâmetros de forma de  $\kappa$  distribuições são iguais pode ser testada coma base na razão entre o maior o menor valores estimados de  $\beta$ . A Tabela 2.1 adaptada de McCool (1982) apresenta os valores críticos da relação  $\beta_{e-max}/\beta_{e-min}$  para uma confiança de 90%. Uma relação  $\beta_{e-max}/\beta_{e-min}$  superior ao valor indicado na tabela significa que, com 90% de confiança, os valores de  $\beta$  estimados são diferentes.

Tabela 2.1 - Valores críticos da relação  $\beta_{e-max}/\beta_{e-min}$  para testar a homogeneidade da estimativa de  $\kappa$  parâmetros de forma de Weibull.

<b>n</b> (tamanho da amostra)	$\kappa=2$	$\kappa=3$	$\kappa=4$
5	2,77	3,59	4,23
10	1,87	2,23	2,47
15	1,65	1,87	2,05
20	1,52	1,70	1,80
30	1,41	1,53	1,61

### 3 O DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

Para a concretização desse trabalho foi necessário iniciá-lo a partir do desenvolvimento do equipamento de ensaio, o qual será referido ao longo do texto como aparato, equipamento, ou máquina de ensaio.

A fim de resgatar adequadamente a cronologia dos eventos que levaram a este desenvolvimento, é fundamental esclarecer que os esforços dentro do Laboratório de Fenômenos de Superfície para a construção de um equipamento de ensaio de fadiga de contato de rolamento com geometria esfera contra plano são anteriores ao início desse trabalho de doutorado. Esses esforços foram mais concretamente traduzidos na proposição de um trabalho de formatura em engenharia mecânica no ano de 2001, o qual concernia o projeto e construção de uma máquina capaz de reproduzir o carregamento cíclico de rolamento de esferas sobre uma superfície plana (BARRUFFINI, 2001). No entanto, o projeto de formatura foi finalizado na etapa de fabricação dos componentes, ou seja, o equipamento não foi montado e posto em funcionamento no âmbito daquele trabalho. Portanto, é nessa transição que foram iniciadas as atividades experimentais do presente trabalho.

Neste capítulo é descrita a seqüência de eventos que levaram ao desenvolvimento do equipamento de ensaio que é um dos produtos resultantes desse trabalho. Esses eventos iniciam com a utilização do equipamento projetado por Barruffini (2001), que será chamado de *Máquina I*. Os resultados e observações decorrentes dessa etapa são organizados de forma a justificar a necessidade de um segundo equipamento de ensaio, a *Máquina II*. Apresentam-se então os critérios seguidos da concepção do segundo equipamento, sua construção, seqüência de montagem para a realização de experimentos e, por fim, os ensaios que validaram sua utilização.

### 3.1 Máquina I

#### 3.1.1 Projeto e construção

A primeira concepção da máquina destinada ao estudo da fadiga de contato de rolamento esfera contra plano baseou-se na substituição das pistas externas de um rolamento axial de duas fileiras de esferas por corpos-de-prova planos. O sistema foi montado verticalmente em dois conjuntos, um superior removível e um inferior fixo a estrutura. Nesta montagem todo o esforço axial é sustentado pelos corpos-de-prova. Um esquema da máquina é apresentado na Figura 3.1.

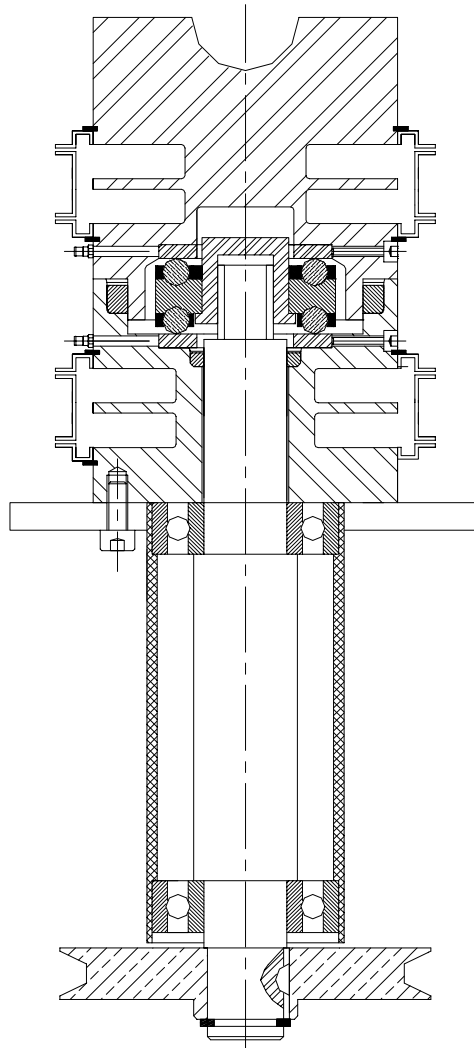


Figura 3.1 - Esquema da unidade de ensaio da máquina de fadiga de contato.

Quando a pista motora do rolamento entra em movimento as esferas são movidas devido ao atrito existente entre elas e as superfícies entre as quais estão comprimidas, ou seja, de um lado a pista intermediária original do rolamento axial (pista motora) e de outro lado o corpo-de-prova. Um esquema do identificando cada um dos elementos desse sistema é apresentado na Figura 3.2. Apenas a pista intermediária é que se move, pois está solidária ao eixo da máquina. Por ação da pista motora, as esferas, que são os contra-corpos, são forçadas a girar sobre os corpos-de-prova. Esses por sua vez permanecem estáticos em seus assentos. Alternativamente, pode-se trabalhar apenas com corpo-de-prova, ou na posição inferior, ou na superior. O rolamento axial escolhido para essa construção foi o DIN 52206, que trabalha com esferas de diâmetro 7,938 mm (5/16 polegada), e que é fabricado com aço ABNT 52100.

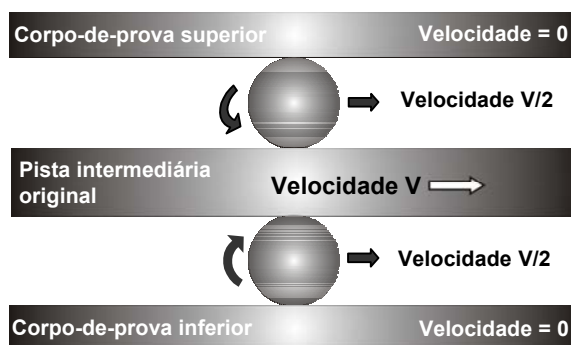


Figura 3.2 - Esquema mostrando os elementos envolvidos no ensaio de fadiga de contato de rolamento e seus respectivos movimentos. A gaiola foi omitida para tornar a figura mais clara.

Na Figura 3.3 é apresentado o desenho do corpo-de-prova. A escolha dessa geometria foi baseada fundamentalmente em dois aspectos:

- Facilidade de fabricação: a superfície plana é mais facilmente fabricada do que superfícies côncavas usuais de rolamentos.
- Dimensões compatíveis com o tamanho das câmaras dos microscópios eletrônicos disponíveis: essa dimensão de corpo-de-prova permite a sua introdução na câmara de um microscópio como, por exemplo, o Phillips XL-30, sem a necessidade de seccionamentos.

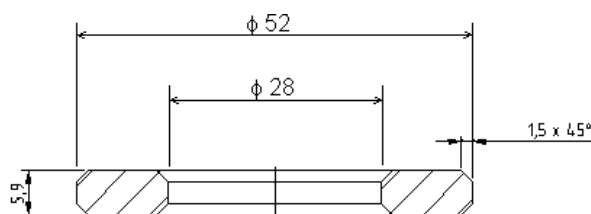


Figura 3.3 - Corpo-de-prova.

A pista intermediária do rolamento DIN 52206 está montada por interferência em uma bucha e esta encaixada no eixo da máquina, o qual é acionado por um motor elétrico, de 2.240 W (3 hp) e rotação nominal de 1.700 rpm, através de um sistema de correia e polias. O sistema de montagem da bucha no eixo foi projetado de modo que a bucha gire solidariamente a este, mas que os esforços axiais sejam transmitidos livremente da pista superior para a inferior. Essa montagem é apresentada na Figura 3.4, onde a bucha e a pista intermediária do rolamento estão seccionadas para mais fácil visualização.

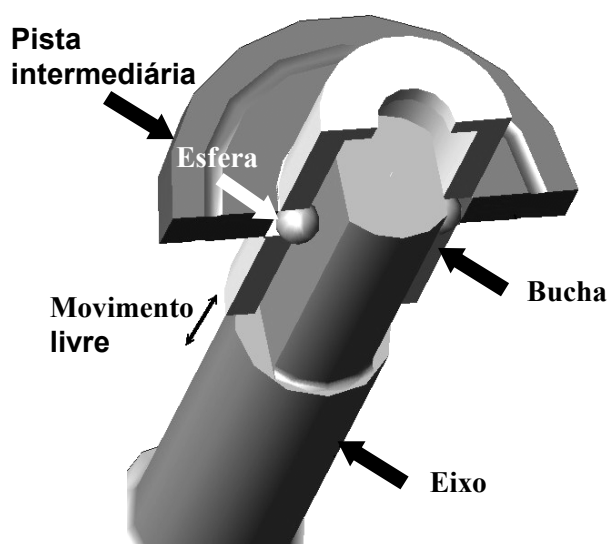


Figura 3.4 - Montagem da bucha no eixo da máquina.

Na Figura 3.5 são apresentadas mais detalhadamente as diferentes partes dos conjuntos superior e inferior do equipamento de ensaio. No topo do conjunto superior existe um

alojamento para a esfera de carga. Sobre a esfera será apoiada uma barra em cuja extremidade são colocados pesos mortos. A fim de que os ensaios possam ser realizados com lubrificação, existem orifícios para a entrada e saída de óleo da câmara de ensaio.

Para a extração do calor gerado no ensaio existe um sistema de refrigeração composto por duas camisas d'água, uma no conjunto inferior e outra no superior, um reservatório e uma bomba de baixa vazão.

No ajuste da velocidade de rotação do motor é utilizado um inversor de frequência, enquanto o número total de rotações é contado por conjunto sensor indutivo/contador totalizador acoplado diretamente ao eixo da máquina.

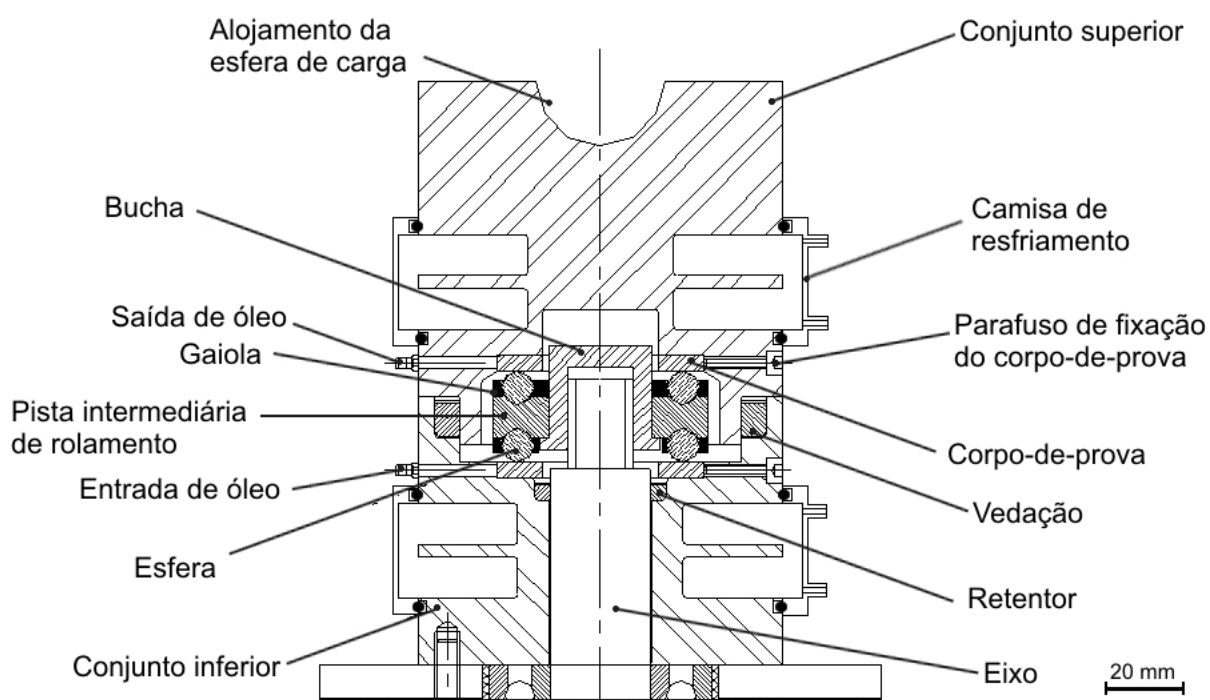


Figura 3.5 - Principais componentes da primeira versão da máquina de fadiga de contato.

Visto que o movimento das esferas é produzido pelo movimento da pista intermediária (a única pista que é móvel) e, portanto, as esferas giram sobre o corpo-de-prova estático, para se obter, em qualquer momento, o número total de ciclos de carregamento impostos ao corpo-de-prova deve-se multiplicar o número total de esferas pela metade do número de giros do eixo



da máquina. Como o equipamento conta com um contador totalizador para medir o número de rotações, pode-se obter o número total de ciclos de um ensaio pela equação 3.1.

$$N_t = \frac{N_c \times N_e}{2} \quad (3.1)$$

onde,  $N_t$  é o número total de ciclos de carregamento,  $N_c$  é o número de rotações registrado no contador  $N_e$  é o número total de esferas usadas no ensaio.

Na Figura 3.6 é apresentada a unidade de ensaio aberta, onde pode ser vista a fileira superior de esferas montadas numa gaiola de náilon sobre a pista intermediária. Já na Figura 3.7 são visíveis as conexões de água e óleo, bem como a esfera alojada no conjunto superior, por onde será aplicada a carga utilizada no ensaio.

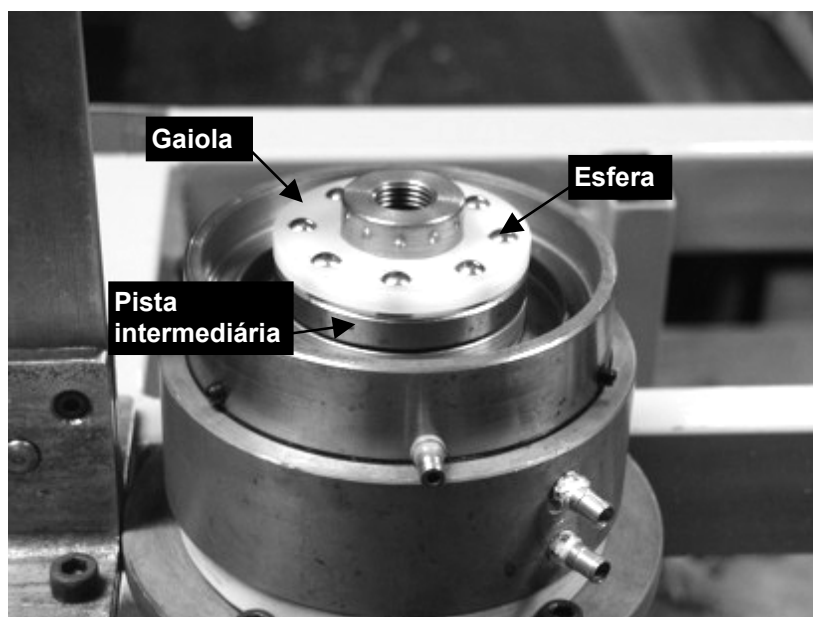


Figura 3.6 - Unidade de ensaio aberta.

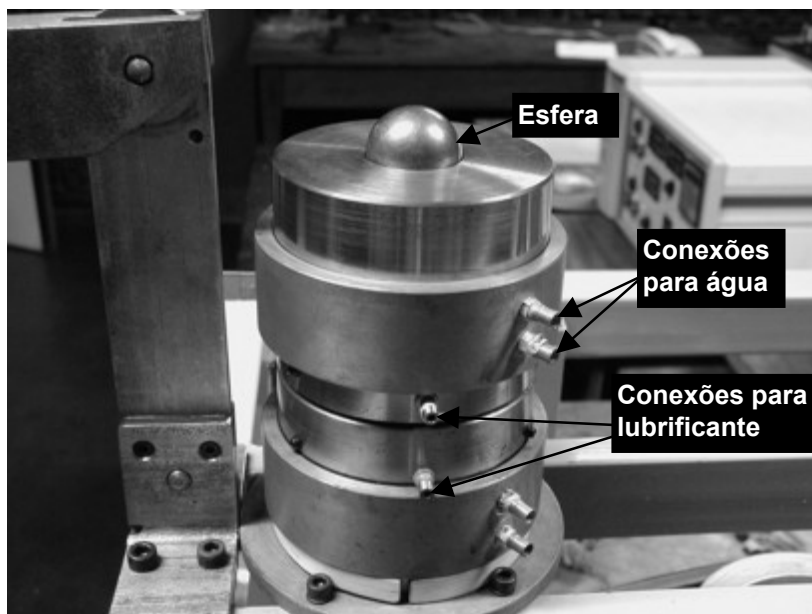


Figura 3.7 - Unidade de ensaio fechada.

A seqüência completa de montagem de um corpo-de-prova na máquina de fadiga de contato é apresentada na Figura 3.8(a) até (g). Primeiro é colocado o corpo-de-prova no assento do conjunto inferior, Figura 3.8(a) e (b), a seguir a fileira inferior de esferas com a gaiolo Figura 3.8(c). Então a bucha com a pista intermediária do rolamento axial é montada no eixo, item (d) da mesma Figura, e a fileira superior de esferas, (e).

O corpo-de-prova superior ou, caso não haja um segundo corpo-de-prova, simplesmente a pista original do rolamento axial, é montado no assento do conjunto superior. Na Figura 3.8(f), apenas para facilitar a compreensão, uma das pistas externas do rolamento axial DIN 52206 está apoiada sobre a fileira superior de esferas. Finalmente o conjunto superior é posicionado e a esfera de carga colocada em seu alojamento, Figura 3.8(g).

Nos ensaios lubrificados o óleo é introduzido na câmara de ensaio conectando-se um funil a mangueira da entrada de óleo (no conjunto inferior da máquina). O nível de lubrificante é monitorado pela altura da coluna de óleo na mangueira conectada a saída de óleo (no conjunto superior do equipamento).

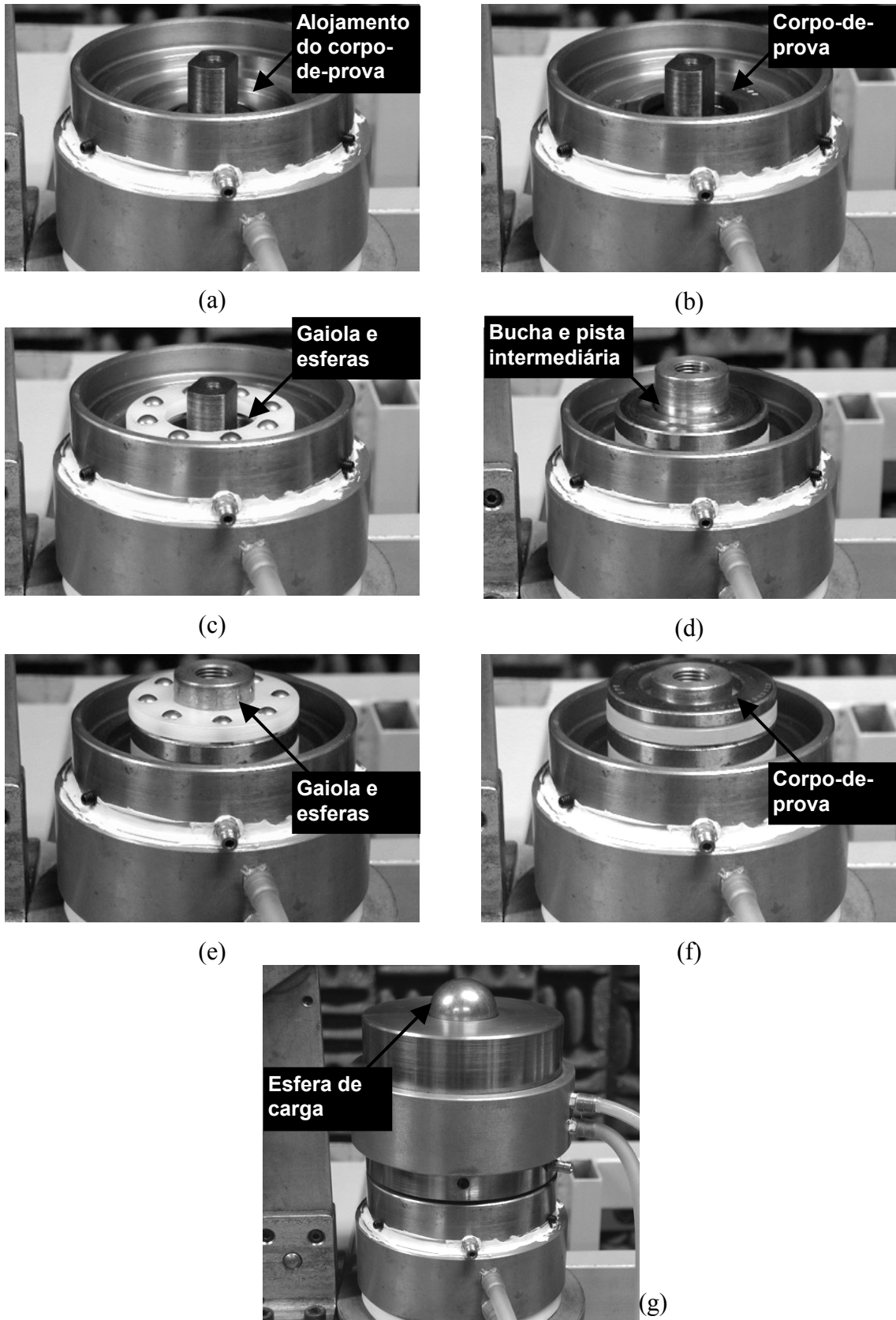


Figura 3.8 - Seqüência de montagem.

Como sistema de lubrificação foi utilizado um pequeno reservatório, de aproximadamente 6 litros, uma bomba centrífuga de vazão nominal de 650 litros/hora e água, onde foi adicionado aditivo para água de radiadores.

### *3.1.1.1 Corpo-de-prova*

Conforme já foi dito, o projeto do corpo-de-prova, Figura 3.3, visou atender os requisitos facilidade de fabricação e facilidade no manuseio e análise pós-ensaio.

De modo geral, a seqüência de fabricação dos mesmos contou com as seguintes etapas:

- Torneamento, normalmente a partir de uma barra do material a ser ensaiado, até as dimensões apresentadas na Figura 3.3.
- Tratamentos térmicos para a obtenção da dureza e/ou microestrutura desejadas.
- Retificação de uma das faces até a obtenção de planicidade (em geral remoção de 0,1 mm) e da face oposta até a remoção de mais 0,2 a 0,3 mm, a fim de remover as grandes deformações do torneamento e eventuais heterogeneidades do tratamento térmico. A face com maior remoção de material é a utilizada no ensaio.
- Preparação metalográfica da superfície a ser ensaiada utilizando-se a seqüência de lixas de grana 220, 320, 400 e 600, seguida por polimento com panos diamantados com abrasivos de granulometrias 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ .

Mediante a utilização deste procedimento buscou-se a visualização na superfície e microestrutura do dano causado pela interação esfera/corpo-de-prova. Além disso, a superfície preparada metalograficamente serviu com referência de acabamento superficial para o corpo-de-prova, a idéia então foi que mesmo quando se desejasse uma superfície com maior rugosidade do que a obtida pelo processo de polimento metalográfico, esta seria obtida a partir da modificação da superfície polida.

Um aspecto importante a destacar a respeito dos corpos-de-prova é que sua espessura não é um fator crítico, já que pelas características construtivas do equipamento de ensaio variações na espessura na ordem de 0,1 mm podem ser facilmente toleradas.

### 3.1.2 Primeira série de ensaios preliminares

Foi conduzido um primeiro conjunto de ensaios onde se buscou verificar o comportamento do equipamento e as características dos danos gerados em condições de trabalho a seco (NEVES; BARRUFFINI; SINATORA, 2003).

#### 3.1.2.1 *Materiais e métodos*

Os corpos-de-prova utilizados nesse trabalho foram confeccionados em aço ABNT 1045, o qual foi adquirido na forma de barra laminada a quente, de diâmetro 57,2 mm (2¼ polegada). O processo de fabricação dos corpos de prova seguiu a seqüência descrita no item 3.1.1.1, sendo que após o polimento da superfície a rugosidade média (Ra) foi menor ou igual 0,008 µm, a qual foi medida em um rugosímetro Surfcoeder SE 1700a. A face do corpo-de-prova usada para produzir a superfície de rolamento teve orientação perpendicular a direção de laminação da barra.

O material foi ensaiado com dois tratamentos térmicos, normalização e têmpera e revenido. Em cada ensaio foram utilizadas esferas comerciais novas, de 7,398 mm de diâmetro (5/16 polegada), fabricadas em aço ABNT 52100. Como a amostra que sofreu normalização apresentava ferrita e perlita, optou-se por realizar o ensaio com a amostra atacada com nital 2%, a fim de facilitar visualização de eventuais diferenças nos comportamentos desses constituintes.

Como o ensaio ocorreu sem lubrificação e nesse caso a umidade do ar pode tomar um papel importante nos fenômenos de superfície, foram conduzidos ensaios com duas umidades ambientes diferentes.

A umidade relativa do ar de 73% era a umidade ambiente nos dias em que os ensaios foram efetuados. A umidade mais baixa, ou seja, de 54% foi obtida ligando-se o equipamento de ar-condicionado da sala onde o ensaio foi realizado. A temperatura e umidade ambientes foram medidas com um termo-higrômetro Minipa MT-241. As variáveis de ensaio e a respectiva identificação das condições são apresentadas na Tabela 3.1. O sistema de refrigeração foi acionado durante os ensaios, no entanto, a temperatura atingida pelos corpos-de-prova não foi determinada. A amostra foi montada na posição no conjunto superior da máquina de ensaio.

Tabela 3.1 – Condições variáveis dos ensaios

<b>Codificação dos corpos-de-prova</b>	<b>Tratamento térmico / Dureza</b>	<b>UR*/ Temperatura ambiente</b>
<b>Nor-230-73</b>	Normalizado / 230 HV0,1	73% / 23°C
<b>TR-450-73</b>	Temperado e revenido / 450 HV0,1	73% / 21°C
<b>TR-450-54</b>	Temperado e revenido / 450 HV0,1	54% / 23°C

(\*) Umidade relativa do ar

A carga de 29 N foi aplicada sobre 8 esferas, ou seja, o carregamento por esfera foi de 3,63 N, o que aplicando as equações de Hertz – equações 2.3, 2.5 e 2.7 – resulta em um diâmetro de contato de 90  $\mu\text{m}$ , na máxima pressão normal de 838 MPa e na máxima tensão cisalhante de 260 MPa, esta última a profundidade de 22  $\mu\text{m}$ . É importante salientar que a carga de 29 N representa a menor carga possível de ser utilizada no equipamento, pois equivale ao peso próprio do conjunto superior da máquina. As condições de ensaio constantes a todos os corpos-de-prova são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Condições de ensaio comuns a todos corpos-de-prova.

---		Ensaio a seco	---
Lubrificante			
Carga total	29 N		
Número de esferas	8		
Carga por esfera	3,63 N		
Diâmetro da esfera	7,398 mm (5/16")		
Módulo combinado	115,4 GPa		
Raio do contato	0,045 mm		
Área de contato	0,007 mm <sup>2</sup>		
Pressão média de contato	556 MPa		
Máxima pressão de contato ( $p_0$ )	835 MPa		
Frequência de carregamento	26 Hz (para o eixo rodando a 395 rpm)		
Critério de fim de ensaio	80.000 ciclos		

Na análise dos resultados foram utilizadas as técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a primeira técnica foi utilizado um microscópio Neophot 32 e na microscopia eletrônica de varredura um Phillips XL-30.

### 3.1.2.2 Resultados e discussão

A imagem da superfície de rolamento da amostra **Nor-230-73** é apresentada na Figura 3.9. Nessa imagem é visível a deformação plástica nas bordas da trilha de rolamento. Nota-se também que a largura da trilha é bem superior aos 90  $\mu\text{m}$  calculados segundo a equação de Hertz, o que pode ser atribuído a carga de ensaio ter sido muito elevada, comparativamente a dureza do material, e ao desgaste resultante da intensa deformação plástica da superfície.

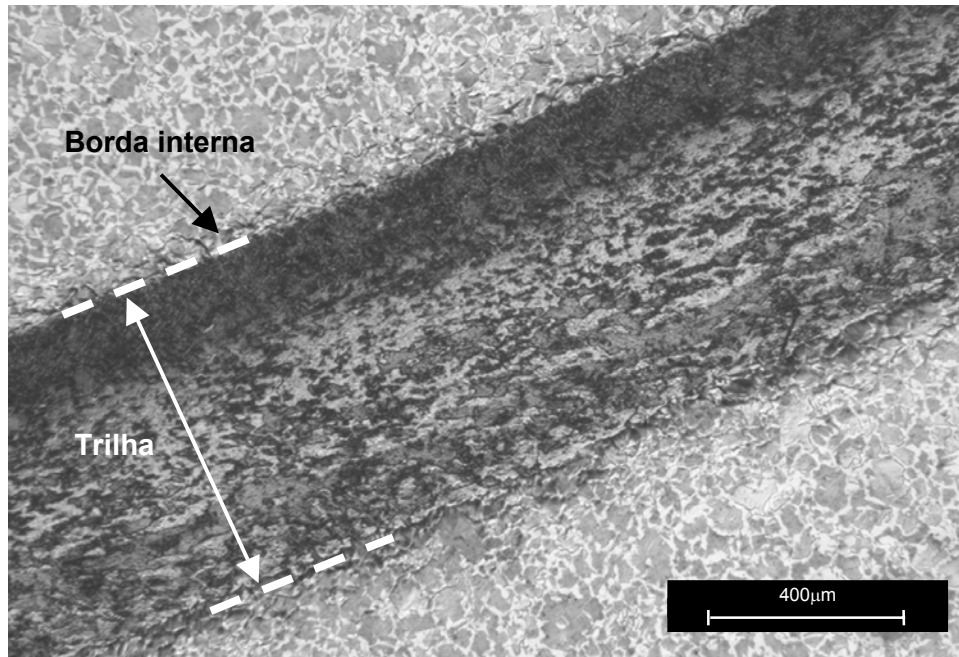


Figura 3.9 - Superfície de rolamento do aço ABNT 1045, condição **Nor-230-73**, da primeira série de ensaios. MO.

Considerando o caso do contato elástico entre uma esfera e uma superfície plana, apenas com movimento vertical de pressionamento de um corpo contra o outro, então conclui-se pela equação 2.7 que a máxima tensão de cisalhamento é de 260 MPa ( $0,31p_0$ ). Baseando-se agora no critério de escoamento de Tresca, o qual estabelece que o cisalhamento tem início quando a máxima tensão cisalhante superar 50% do valor obtido como tensão de escoamento no ensaio uniaxial de tração (HUTCHINGS, 1992), conclui-se que a deformação plástica ocorrerá se o limite de escoamento do material for inferior a 520 MPa ( $2 \times 260$  MPa), o que é bastante razoável, pois em geral dificilmente a tensão de escoamento de um aço ANBT 1045 no estado normalizado superaria os 400 MPa.

Na Figura 3.10 é evidenciada a ocorrência de deformação plástica nas bordas da trilha de rolamento, onde podem ser vistas bandas de deslizamento na ferrita.



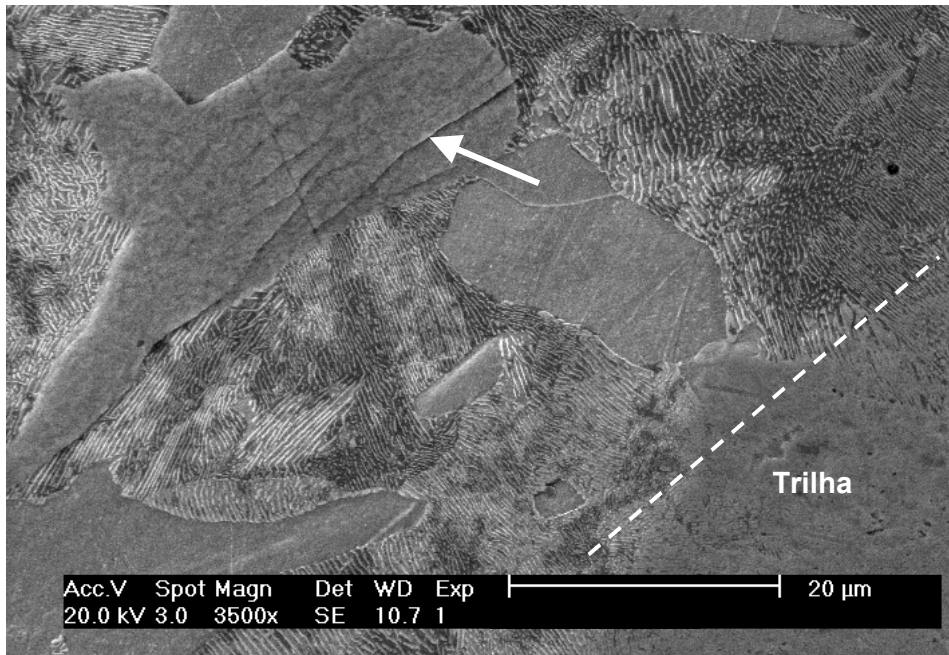


Figura 3.10 - Detalhe da deformação da ferrita na borda da trilha de rolamento. MEV.

As superfícies pós-ensaio das amostras nas condições **TR-450-73** e **TR-450-54** são apresentadas, respectivamente, na Figura 3.11 e na Figura 3.12.

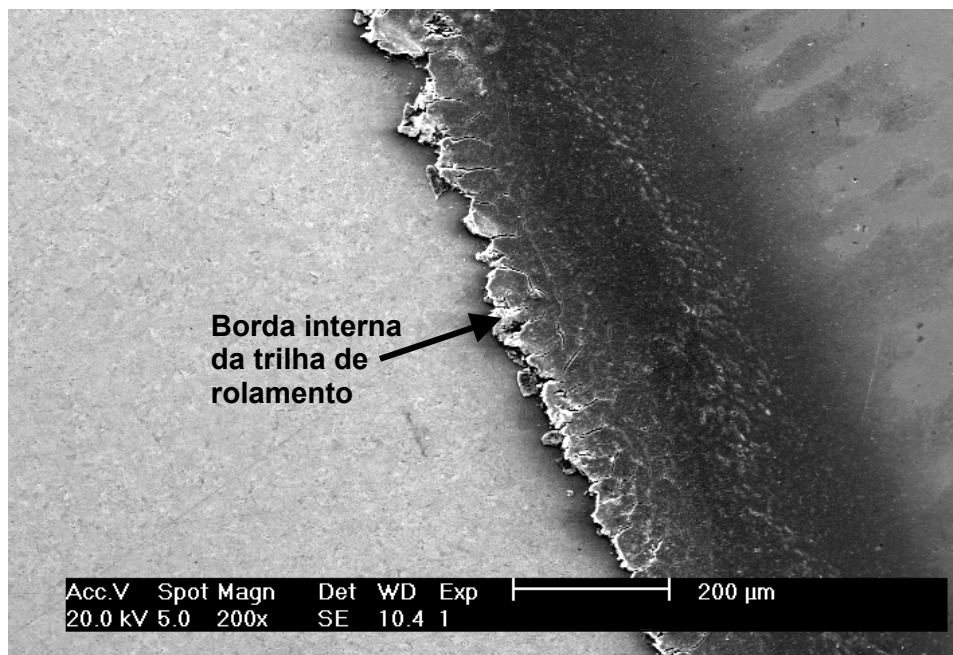


Figura 3.11 - Superfície de rolamento do aço ABNT 1045 na condição **TR-450-73**. MEV.

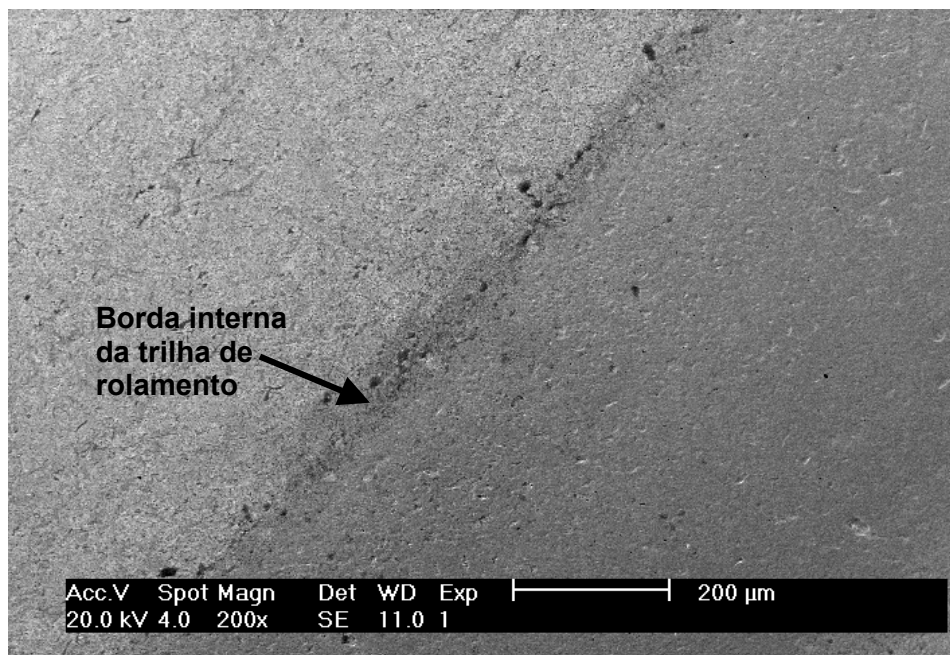


Figura 3.12 - Superfície de rolamento do aço ABNT 1045 na condição **TR-450-54**. MEV.

O aspecto das trilhas de rolamento mostrado nas duas últimas Figuras evidencia que, nas condições de carga e duração de ensaio utilizadas, a umidade relativa do afetou a formação de óxidos durante o ensaio. Essa oxidação resulta da interação entre a umidade presente na câmara de ensaio e a superfície localmente aquecida do corpo-de-prova. O aquecimento localizado da superfície do corpo-de-prova resulta da interação entre esta e esfera rolante. Na Figura 3.11 uma massa resíduos, provavelmente formada por de óxidos e partículas metálicas, pode ser vista em junto a borda interna de trilha de rolamento da amostra ensaiada com maior umidade, a **TR-450-73**. Na Figura 3.13 esses resíduos são mostrados com maior ampliação. A concentração dos resíduos na borda interna da trilha de rolamento deve-se provavelmente ao movimento de *spin* da esfera, que além de girar para frente gira em torno de seu eixo vertical, de modo a empurrar para o lado interno da trilha os resíduos gerados à frente do contato.

A maior formação de óxidos na umidade relativa de 73%, em contraposição a quase inexistência de óxidos na amostra ensaiada a 54%, concorda com os resultados obtidos por Liew (2005). Nesse trabalho (LIEW, 2005) fez ensaios de deslizamento de pino (com ponta

esférica de raio 5 mm) sobre disco, ambos de aço ao carbono, com carga de 5 N (o que resulta em tensão inicial similar a usada nesta série de ensaios) e foi observado que há uma transição na taxa de desgaste superior a uma ordem de grandeza em torno dos 60% de umidade relativa do ar. O autor relaciona a menor taxa de desgaste com a maior formação de óxidos na condição de umidade relativa mais alta.

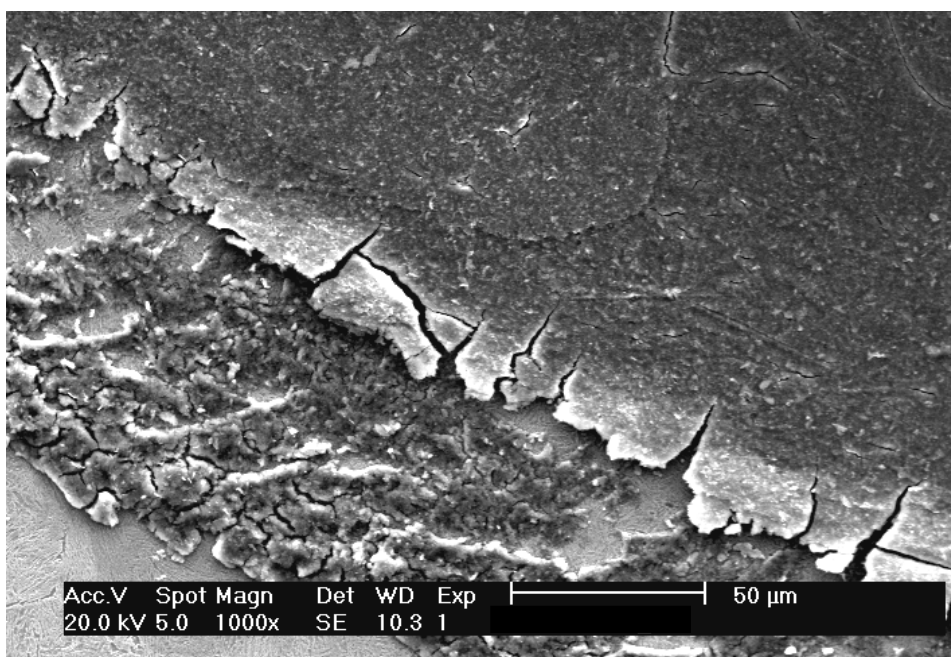


Figura 3.13 - Detalhe da camada de óxidos formada na amostra ensaiada na condição de maior umidade.

Uma característica do equipamento, no entanto, compromete aprofundamentos na análise a respeito do efeito da umidade. Como pode ser visto na Figura 3.14, há no topo do conjunto superior da máquina uma zona que pode confinar o ar e este, em contato com as paredes frias – paredes da zona de refrigeração – podem levar a condensação de água. Havendo água condensada num ambiente aquecido e confinado as condições de umidade do ar podem ficar muito diferentes daquelas do meio externo, que serviram de base às condições experimentais do trabalho.

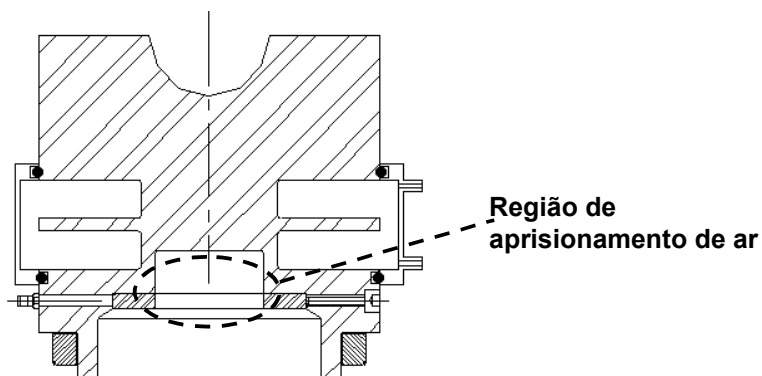


Figura 3.14 – Detalhe do conjunto superior da máquina I. A região indicada aprisiona ar que em contato com as paredes frias da zona de refrigeração pode condensar água.

### 3.1.2.3 Conclusão

A técnica de fazer ataque metalográfico prévio ao ensaio possibilitou identificar, nas bordas da trilha de rolamento, a diferença entre a deformação dos microconstituintes.

Houve notável diferença na formação de óxidos entre as amostras **TR** ensaiadas com níveis diferentes de umidade. No entanto, o fato da câmara aprisionar ar em seu interior, não encoraja o uso do equipamento para estudos sistemáticos envolvendo a variável umidade.

## 3.1.3 Segunda série de ensaios preliminares

Na segunda série de ensaios buscou-se observar a resposta do equipamento ao estudar o efeito da presença ou não de lubrificante no modo de dano a superfície.

### 3.1.3.1 Materiais e métodos

A fim de verificar a modificação do modo de dano à superfície em função da condição de lubrificação, foram conduzidos ensaios a seco e lubrificado.

No ensaio lubrificado foi utilizado um óleo comercial SAE 90 API-GL4, o qual é indicado para aplicações de extrema pressão, tal como caixas de transmissão por engrenagens.

A câmara de ensaio foi preenchida completamente com o óleo e não houve recirculação

durante o ensaio. Foram utilizados corpos-de-prova de aço ABNT 1045, temperados e revenidos, cuja preparação foi idêntica a descrita para os ensaios da primeira série, item 3.1.2.1. As condições das amostras e das variáveis do ensaio estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Condição das amostras e variáveis de ensaio.

<b>Codificação dos corpos-de-prova</b>	<b>Tratamento térmico/Dureza</b>	<b>Lubrificação</b>	<b>UR*</b>
<b>TR-450-Sec</b>	Temperado e revenido/ 450 HV0,1	Sem lubrificante	59%
<b>TR-450-Lub</b>		SAE 90	---

(\*) Umidade relativa do ar

O equipamento foi acionado a velocidade de 740 rpm, o que para um total de oito esferas resulta em uma frequência de carregamento de 49 Hz e os ensaios foram conduzidos até que se atingisse o total de um milhão de ciclos.

A carga aplicada durante o ensaio foi de 126 N, ou 15,8 N por esfera, o que resultou em 1363 MPa de tensão máxima de Hertz. Para essa condição de carregamento o diâmetro calculado para a região de contato entre a esfera e a superfície plana é de 150  $\mu\text{m}$ . As condições de ensaio estão resumidas na Tabela 3.4.

Assim como na primeira série de ensaios foram utilizadas as técnicas de MO e MEV na análise dos resultados. No entanto, desta vez o microscópio óptico utilizado foi um Olympus BX-60 e na análise de MEV contou-se com o auxílio da microanálise por energia dispersiva de raios-X (EDX). Primeiro observou-se as superfícies de topo e a seguir elas foram seccionadas transversalmente a região de rolamento. O perfil da superfície desgastada foi obtido utilizando-se o mesmo equipamento empregado nas medidas de rugosidade.

Tabela 3.4 – Condições de ensaio.

Lubrificante	Ensaio a seco ou SAE 90 API-GL4
Carga total	129,5 N
Número de esferas	8
Carga por esfera	15,8 N
Diâmetro da esfera	7,398 mm (5/16")
Módulo combinado	115,4 GPa
Raio do contato	0,075 mm
Área de contato	0,017 mm <sup>2</sup>
Pressão média de contato	909 MPa
Máxima pressão de contato ( $p_0$ )	1.363 MPa
Frequência de carregamento	49 Hz (para o eixo rodando a 740 rpm)
Critério de fim de ensaio	1.000.000 ciclos

### 3.1.3.2 Resultados e discussão

A trilha de rolamento produzida sobre a superfície do corpo-de-prova ensaiado na condição a seco, pode ser observada na Figura 3.15. Nesta imagem é possível constatar que a largura da trilha de rolamento formada após um milhão de ciclos é de aproximadamente 600  $\mu\text{m}$ , valor que novamente supera os 150  $\mu\text{m}$  calculados como diâmetro de contato. Embora parte dessa diferença possa estar relacionada a forma côncava da trilha de rolamento formada por efeito do desgaste, acredita-se que a maior contribuição para esse desvio venha do fato, já discutido por Johnston (1982), que as esferas não giram todas exatamente sobre a mesma circunferência. Comparando a largura da trilha de rolamento da Figura 3.15 com a da Figura 3.9 da chega-se a uma situação aparentemente paradoxal. Ainda que na primeira série de ensaios a pressão de contato e o número total de ciclos tenham sido menores do que na série atual, a trilha da amostra apresentada na Figura 3.9 é maior do que aquela mostrada na Figura 3.15. Há que considerar, no entanto, que o aumento da carga de ensaio também aumenta a restrição aos movimentos laterais das esferas, fazendo com que estas desviem menos do centro teórico da trilha. Com isso, até um certo limite, o qual não foi objeto desse trabalho, aumentos da carga de ensaio podem gerar reduções na largura da trilha de rolamento.



Figura 3.15 - Trilha de rolamento produzida na condição a seco. MO.

Na Figura 3.16 é apresentada uma região similar àquela da Figura 3.15, onde é possível a melhor visualização do aspecto geral da superfície de rolamento. Observando com maior aumentando uma região do centro da trilha de rolamento, Figura 3.17, evidencia-se a intensa deformação plástica ocorrida no ensaio sem lubrificação.

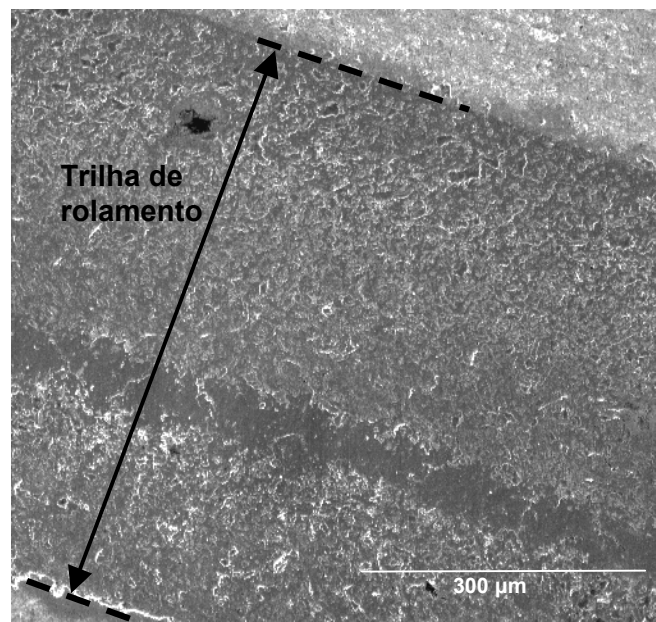


Figura 3.16 - Imagem de MEV da trilha de rolamento na amostra ensaiada a seco.

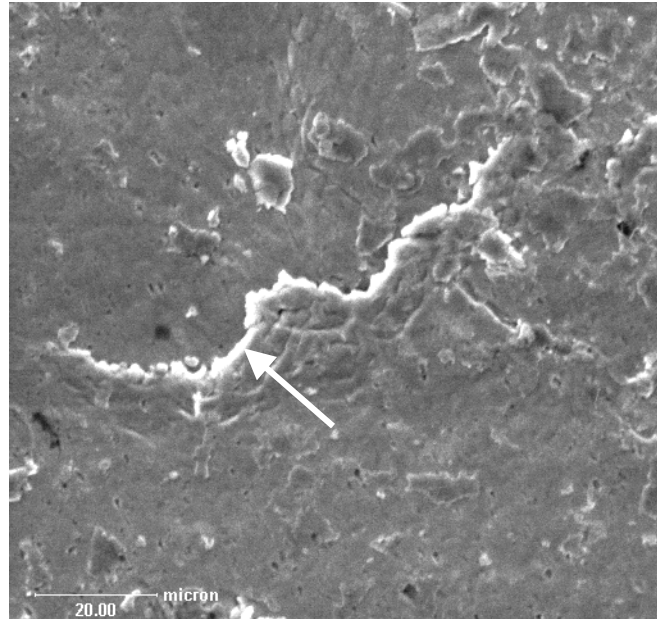
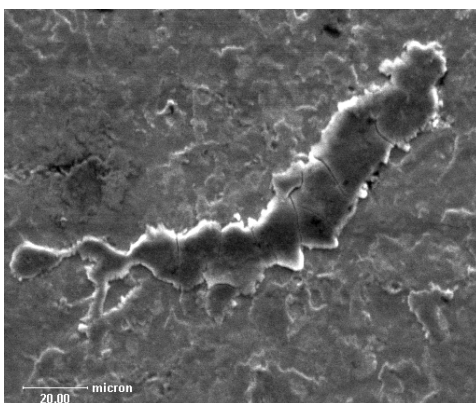
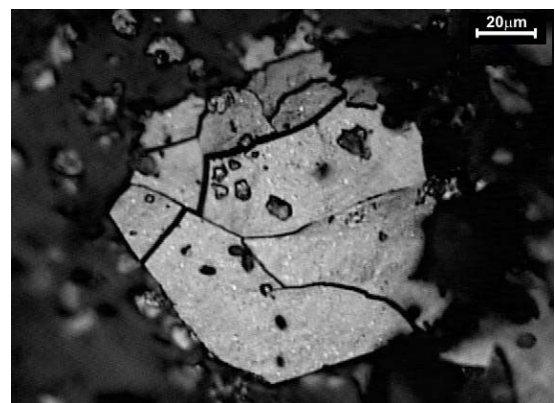


Figura 3.17 - Imagem de MEV mostrando zonas intensamente deformadas, próximas ao centro da trilha de rolamento, na amostra ensaiada sem lubrificação.

Também foi possível observar a ocorrência de finas partículas aderidas à superfície de rolamento, como mostrado na Figura 3.18a. Na Figura 3.18b apresenta-se uma dessas partículas após desprendimento da trilha de rolamento e na Figura 3.19 é apresentado o espectro da microanálise EDX das partículas da Figura 3.18a, o qual evidencia a formação de óxidos na trilha de rolamento.



(a)



(b)

Figura 3.18 - Partículas aderidas a trilha de rolamento MEV (a) e partícula desprendida da trilha MO (b). Ambas oriundas da amostra ensaiada sem lubrificação.



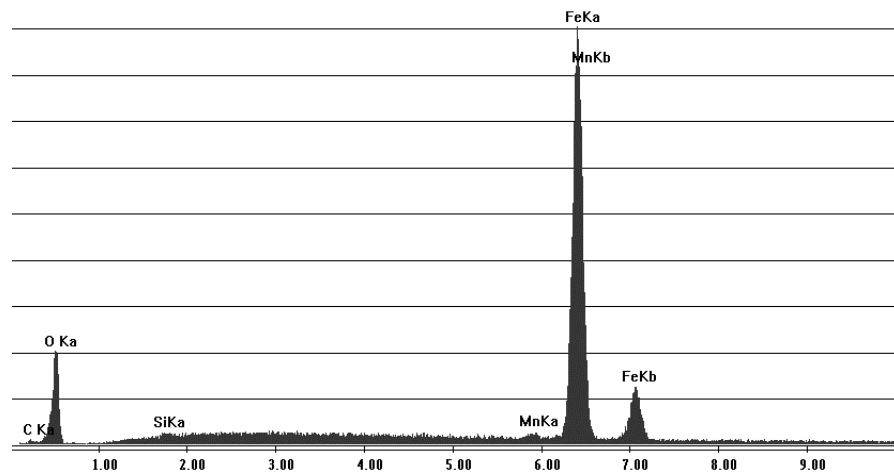


Figura 3.19 - Espectro EDX de partícula aderida à trilha de rolamento.

Na análise do ensaio lubrificado notou-se um padrão de modificação superficial bastante diferente daquele identificado na condição a seco.

Na Figura 3.20 é apresentada a vista de topo da trilha de rolamento produzida na condição lubrificada. Como pode ser visto, a largura da trilha de rolamento, aproximadamente 400  $\mu\text{m}$ , é cerca de metade da largura da trilha verificada no ensaio sem óleo, mas ainda o dobro do diâmetro calculado pela equação de Hertz. Nessa mesma Figura há dois padrões de dano que chamam a atenção. Ambos aparecem como pontos escuros, um tipo é representado por poucos pontos escuros grandes, e o outro por pontos pequenos distribuídos pela trilha. Na Figura 3.20 também é possível verificar que os “pontos escuros” observados via microscopia óptica tratam-se não apenas de indentações, mas também de inclusões que foram expostas à superfície.

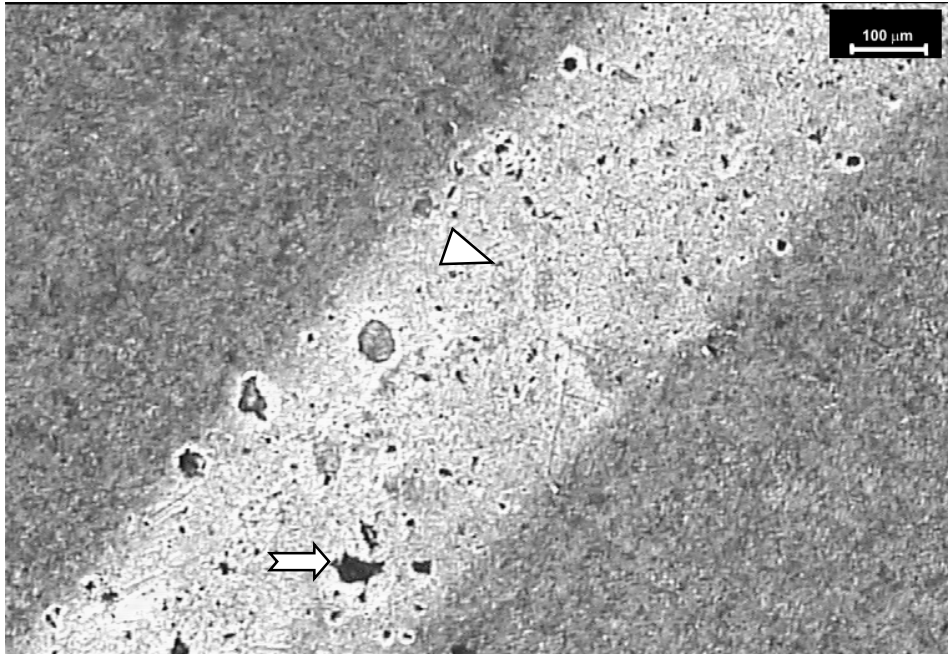


Figura 3.20 - Imagem de MO mostrando parte da trilha de rolamento da amostra ensaiada com lubrificação. Indentação (triângulo); inclusão exposta (seta).

A observação desses pontos em maior aumento mostra que na verdade tratam-se de inclusões que foram expostas a superfície, Figura 3.21, e permite dizer que essas inclusões sofrem fragmentação, possivelmente pela repetida passagem da esfera sobre a trilha, e que então as partículas geradas nesse processo indentam superfície de rolamento, principalmente nas adjacências da inclusão. Isso gera um processo de auto-contaminação do sistema de ensaio, ou seja, o material é indentado por partículas oriundas de sua própria microestrutura, sem que seja necessária a entrada no sistema de contaminantes externos. Na Figura 3.22 é apresentado o espectro da microanálise EDX efetuada na inclusão mostrada na Figura 3.21, esse espectro demonstra que a inclusão em questão trata-se de óxido de alumínio.

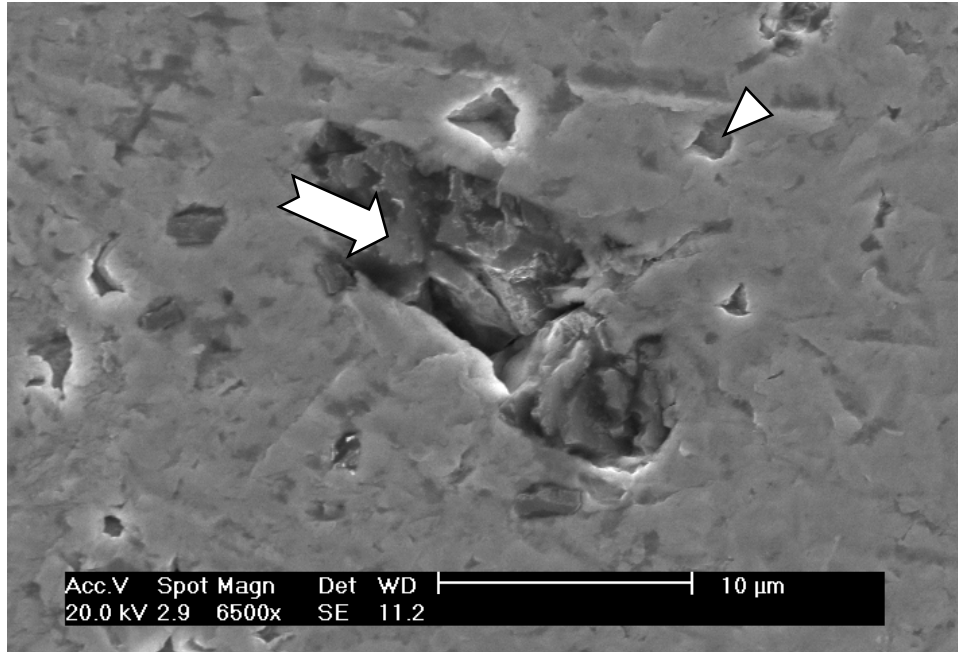


Figura 3.21 - Imagem de MEV mostrando inclusão exposta à superfície na amostra ensaiada com lubrificação e indentações adjacentes. Inclusão exposta (seta) e indentações(triângulo)..

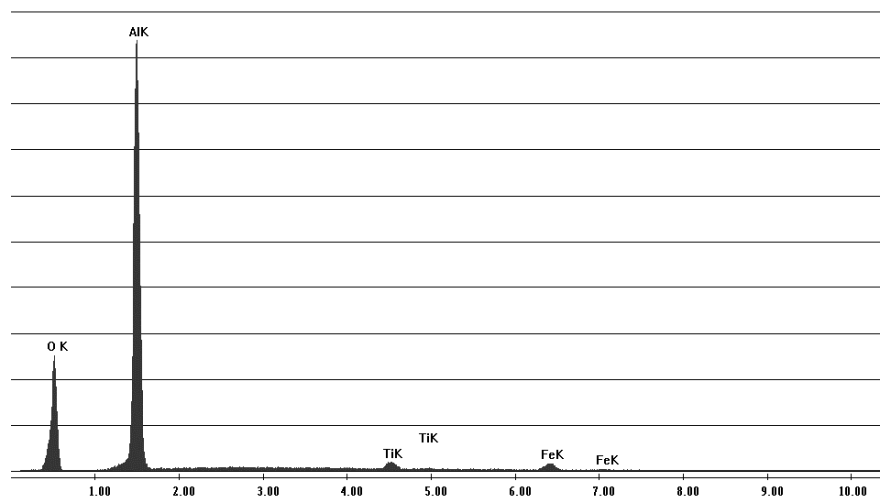


Figura 3.22 - Espectro EDX de inclusão exposta à trilha de rolamento.

Um outro padrão de dano superficial foi produzido no ensaio lubrificado, o qual pode ser visualizado na Figura 3.23. Essa imagem distingue-se da Figura 3.20 pela acentuada ocorrência de riscamento da superfície, indicando nessa região a esfera além de rolar, também

deslizou. Na Figura 3.24 o riscamento na amostra ensaiada com lubrificante é mostrado com maior detalhe.

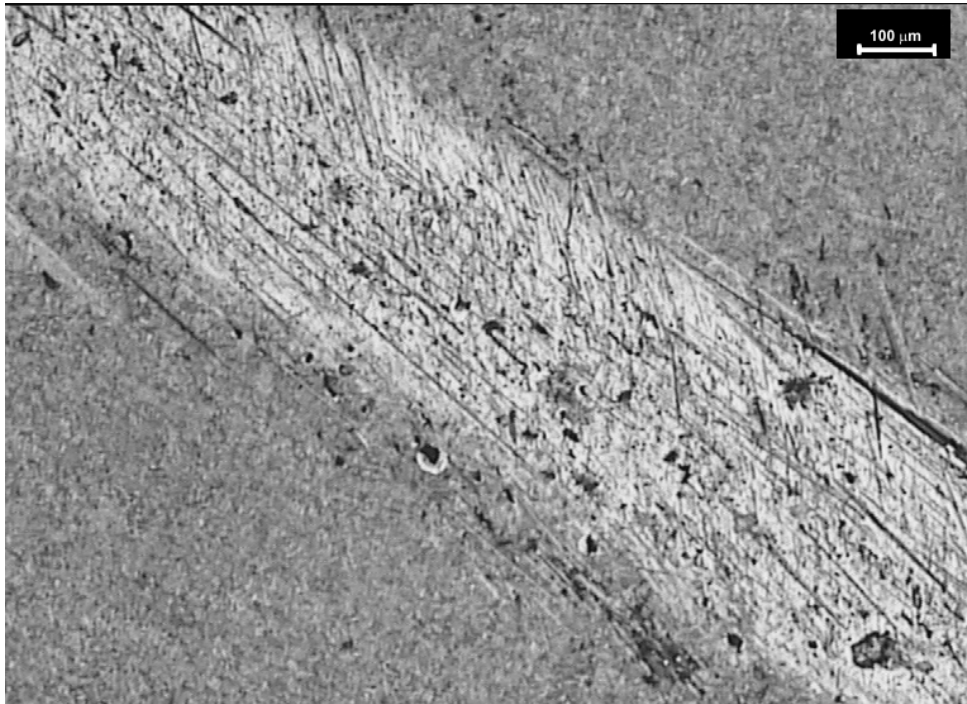


Figura 3.23 - Imagem de MO evidenciando a ocorrência de riscamento na trilha de rolamento-deslizamento.

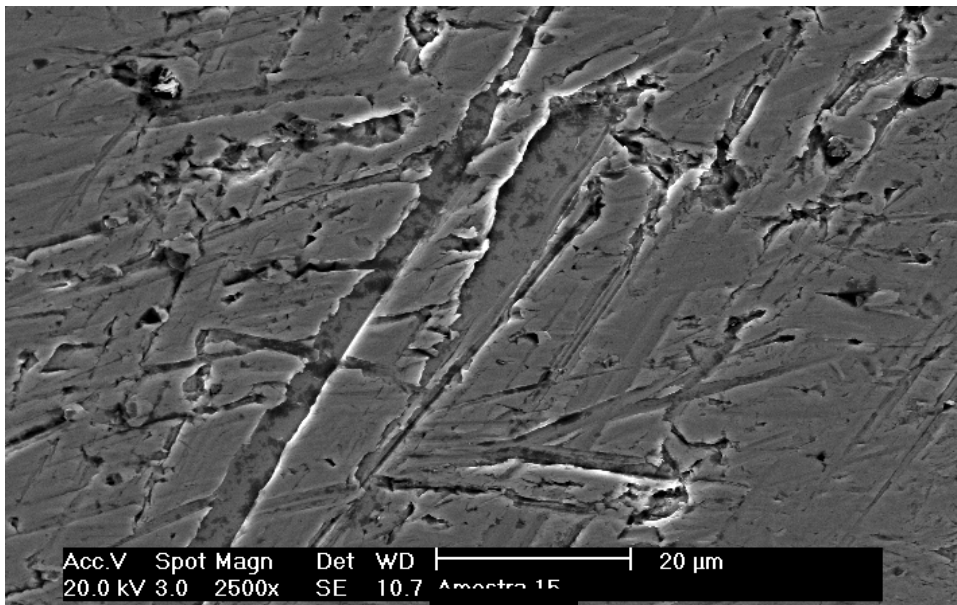


Figura 3.24 - Detalhe obtido por MEV mostrando o aspecto do dano produzido na região da amostra onde houve deslizamento.

A ocorrência de deslizamento é esperada em rolamentos axiais de assento plano, tal como o DIN 52206, quando houver desvio de perpendicularidade entre o eixo e os planos de assento das pistas externas, pois a tolerância desse tipo de rolamento a desalinhamentos é muito baixa (NSK, 2003). Dessa forma, o riscamento ocorrido nessa série de ensaios foi atribuído a existência de um erro de perpendicularidade entre o eixo da máquina e o assento do rolamento maior do que o tolerado pelo rolamento axial em uso. Nesse caso o que ocorre é que devido ao desalinhamento a pista intermediária do rolamento axial gira num plano que está inclinado em relação ao plano do assento do corpo-de-prova. Assim sendo, em uma dada região da circunferência da trilha as esferas foram pressionadas com maior intensidade do que em outras. O deslizamento ocorreu nas regiões de menor pressão, o que também é evidenciado pela largura menor da região da trilha de rolamento/deslizamento mostrada na Figura 3.23, aproximadamente 350  $\mu\text{m}$ , quando comparada com a região da mesma trilha mostrada na Figura 3.20, com aproximadamente 400  $\mu\text{m}$ . A hipótese do desalinhamento também é coerente com o fato de não estarem previstas tolerâncias de planicidade, perpendicularidade e concentricidade no projeto inicial do equipamento, mas apenas tolerâncias geométricas.

A ocorrência de deslizamento nesse sistema é altamente indesejável, pois descaracteriza o objeto de estudo, que é fadiga de contato de rolamento. Quando um corpo desliza sobre o outro em um sistema onde deveria rolar e no qual não há forma de determinar a relação rolamento/deslizamento a avaliação quantitativa de qualquer resultado obtido fica comprometida.

O perfil da trilha de rolamento após os ensaios indicou que no ensaio a seco o afundamento da trilha de rolamento atingiu cerca de 1,5  $\mu\text{m}$ , enquanto no ensaio lubrificado não foi verificado abaixamento do nível da trilha, como pode se observar na Figura 3.25. Esse resultado é esperado, já que uma das principais funções dos lubrificantes é minimizar o contato entre as superfícies evitando assim a ocorrência de desgaste.

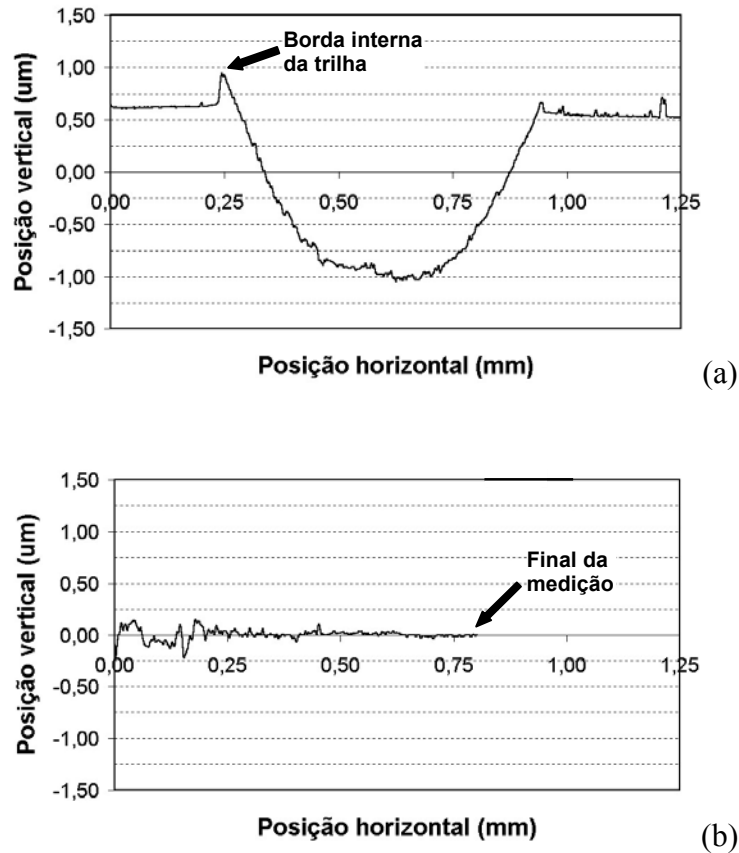


Figura 3.25 - Perfis das trilhas de rolamento, (a) sem lubrificação e (b) com lubrificação.

### 3.1.3.3 Conclusões

Conforme indicado pela análise de microscopia e pelos perfis das trilhas, o dano a superfície foi mais intenso no ensaio a seco. No entanto, um tipo de dano que só pode ser detectado no ensaio lubrificado – talvez pela severidade do ensaio a seco mascarar esse efeito – foi o mecanismo de fragmentação de inclusões situadas na região de rolamento. As partículas remanescentes do processo de fragmentação acabam por promover indentações na trilha de rolamento, o que após um longo ciclo de trabalho pode resultar na nucleação de uma trinca superficial.

As análises realizadas deixaram claro que o equipamento não reproduz integralmente o movimento de rolamento das esferas sobre a superfície do corpo-de-prova, pelo contrário, o intenso riscamento em algumas regiões da superfície evidencia a ocorrência de deslizamento.

### 3.1.4 Análise do desempenho do equipamento

#### 3.1.4.1 Método

Ao longo das duas séries de ensaio realizadas foram sendo anotadas as dificuldades operacionais encontradas na utilização do equipamento, bem como analisados resultados anômalos dos ensaios que pudessem decorrer do princípio de funcionamento do equipamento, ou ainda, aspectos simples de melhoria de projeto. Esses pontos serão discutidos a seguir.

#### 3.1.4.2 Resultados e discussão

A utilização da máquina nos ensaios anteriormente apresentados permitiu a identificação de uma série de detalhes construtivos que deveriam ser melhorados para tornar o equipamento mais confiável e seu manuseio mais simples. A seguir, essas observações serão relacionadas dentro de tópicos mais amplos.

#### *Facilidade de montagem e desmontagem do sistema*

Embora a montagem e desmontagem dos corpos-de-prova e demais componentes seja bastante simples a etapa de colocação do lubrificante na câmara de ensaio consumiu um tempo relativamente longo, nunca inferior a 30 minutos quando foi utilizado óleo SAE 90. Visto que a linha de encaixe entre os conjuntos superior e inferior da câmara de ensaio é mais baixa que o nível necessário de lubrificante dentro da câmara, Figura 3.26, a inserção deste só pode ser feita com o conjunto montado. Para tanto os orifícios de 3 mm de diâmetro demonstraram-se muito pequenos para entrada e saída de lubrificantes de alta viscosidade. Além disso, o conjunto superior apresenta um espaço vazio que aprisiona ar e dificulta o escoamento do óleo

quando esse atinge níveis mais altos dentro da câmara. Na Figura 3.26 também é mostrada a zona de aprisionamento de ar durante o enchimento da câmara.

### *Limpeza do sistema*

Devido aos conjuntos que formam a câmara de ensaio terem sido construídos em aço ferramenta, ABNT D2, esses componentes são bastante susceptíveis à corrosão atmosférica, principalmente porque é normal o uso de solventes para a remoção de resíduos de óleo na limpeza pós-ensaio, o que deixa ainda mais desprotegida a superfície dessas peças. Sempre que surgirem pontos de corrosão esses devem ser removidos, pois o desprendimento de produtos de corrosão durante o ensaio é uma situação altamente indesejável.

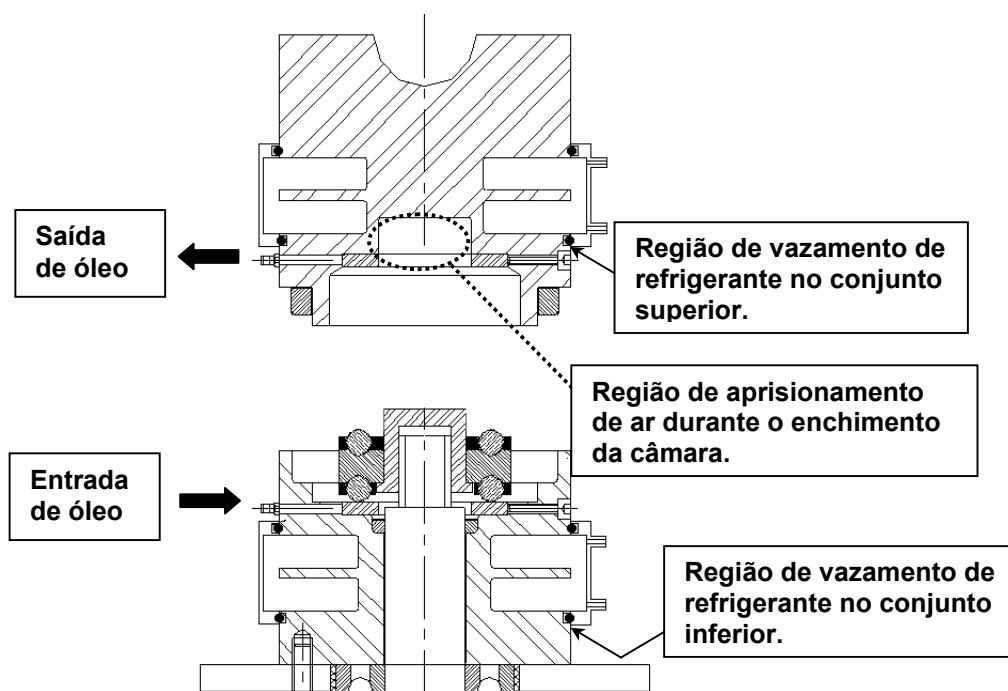


Figura 3.26 - Ilustração de que o nível do óleo na câmara de ensaio não pode atingir a superfície do corpo-de-prova superior sem que os dois conjuntos estejam encaixados e indicação de pontos de vazamento de fluido refrigerante.



### *Estanqueidade do sistema de refrigeração*

Um problema grave do primeiro equipamento foi a falta de estanqueidade do sistema de refrigeração, onde a vedação era feita por meio de anéis O. Na Figura 3.26 estão identificadas as regiões de vazamento. O vazamento de fluido refrigerante na camisa do conjunto inferior resulta em escoamento desse fluido pelo eixo da máquina, molhamento dos rolamentos radiais do equipamento, mostrados na Figura 3.1 (página 44), e finalmente sua projeção para a vizinhança da máquina ao atingir a polia. Já o vazamento pelo conjunto superior causa o escoamento do refrigerante diretamente para a câmara de ensaio, produzindo a indesejável mistura entre esse e o lubrificante. Diversos ensaios foram descartados devido a esse problema.

Como tentativa de contorná-lo, foi aplicado na região de vazamento um adesivo automotivo cuja finalidade é vedar juntas. No conjunto inferior o resultado foi satisfatório, pois o mesmo permanecia fixo. Já no conjunto superior o adesivo não apresentou resistência suficiente para resistir às sucessivas montagens e desmontagens e após alguns ensaios o vazamento reiniciava, sendo necessária sua substituição. O adesivo de vedação utilizado foi o Three Bond 1104. O adesivo pode ser visualizado como uma faixa branca as fotos da Figura 3.8. A hipótese de fixação da camisa de refrigeração por soldagem foi descartada, pois nesse caso a região de refrigeração se tornaria definitivamente inacessível, impossibilitando futuras operações de limpeza que certamente seriam necessárias a fim de remover incrustações que pudessem diminuir a eficiência da extração de calor.

### *Estanqueidade da câmara de ensaio*

Como ilustrado na Figura 3.26, o nível de lubrificante no interior da câmara de ensaio é mais alto que a linha de bi-partição dos conjuntos inferior e superior, havendo então a tendência desse escoar para fora da câmara. Com a finalidade de evitar isso existe o elemento

de vedação mostrado na Figura 3.5. No entanto, esse elemento não se mostrou eficiente em conter o vazamento de lubrificantes de baixa viscosidade como óleo hidráulico e nem mesmo os de maior viscosidade, como o óleo de engrenagens utilizado nos ensaios anteriormente apresentados, após um período de algumas horas. A utilização de um retentor que promovesse um encaixe com menor folga foi descartada, pois o surgimento de elevados esforços laterais poderia interferir no alinhamento da carga aplicada ao ensaio.

#### *Funcionamento geral do equipamento*

A respeito do funcionamento geral do equipamento o ponto de maior atenção foi sem dúvida o surgimento de zonas de deslizamento sobre a superfície das amostras ensaiadas, como apresentado na Figura 3.23. Visto que rolamentos axiais de assentos planos são pouco tolerantes a desalinhamentos entre eixo e assento, o sistema foi avaliado em uma máquina de medir por coordenadas, ZEISS modelo UMM550. Nessas medidas, tomando-se o eixo como referência, foi encontrado que o plano do assento do corpo-de-prova situa-se entre dois planos paralelos separados por uma distância de 0,1672 mm. Considerando um desvio de diâmetro das esferas da ordem de 1  $\mu\text{m}$  e o valor das deflexões das superfícies da esfera e do plano ( $\delta$ ) de 1,4  $\mu\text{m}$  conclui-se que o desvio de perpendicularidade de 0,1672 mm é suficientemente elevado para fazer com as esferas não estejam em contato simultâneo com a pista intermediária do rolamento axial e com o corpo-de-prova durante toda sua trajetória. No entanto, como estão presas a gaiola, as esferas são forçadas a se seguirem seu movimento, o qual sob essas condições não deverá ser de rolamento.

Adicionalmente uma outra carência do primeiro aparato de ensaio é a inexistência de acesso a sensores como de temperatura, por exemplo, ao interior da câmara de ensaio.

### 3.1.4.3 Conclusões

Considerando que entre os problemas detectados na máquina I estão:

- A câmara da ensaio oxida facilmente, exigindo grande esforço para que os ensaios não sejam contaminados por produtos de corrosão ou por resíduos de limpeza;
- A câmara de óleo não é estanque;
- A câmara de refrigeração não é estanque, ocasionando por vezes vazamentos para dentro da câmara de ensaio, o que acaba por invalidar o teste que estiver em andamento;

E somando-se a isso o fato de que durante os ensaios ocorre uma relação rolamento/deslizamento desconhecida, em apenas algumas regiões do corpo-de-prova, pode-se dizer que a confiabilidade do equipamento para a reprodução de resultado é baixa, o que justifica a necessidade da construção de uma segunda máquina.

## 3.2 Máquina II

### 3.2.1 Projeto e construção

Após a realização das duas séries de experimentos sistemáticos e da utilização do primeiro equipamento de ensaio por um período suficientemente longo para coletar informações sobre seu funcionamento e operação, foi elaborado o projeto de uma segunda versão do aparato de ensaio. Esse projeto incorporou muito da experiência de operação adquirida com a máquina I e seus principais pontos são apresentados a seguir. Antes disso, no entanto, deve ser esclarecido que diversas características do primeiro projeto foram mantidas no segundo, como por exemplo, a geometria do corpo-de-prova e o sistema de acionamento.

#### *3.2.1.1 Características e concepção do equipamento*

O novo projeto visou dar uma melhor resposta aos requisitos de montagem e desmontagem do ensaio, limpeza da câmara e estanqueidade, tanto do sistema de refrigeração quanto do sistema de lubrificação. As soluções encontradas são relacionadas a seguir.

*Facilidade de montagem e desmontagem do sistema:* foi idealizada uma câmara de ensaio onde a colocação do lubrificante possa ser feita com a câmara aberta, o que reduz para alguns segundos uma operação de vários minutos.

*Limpeza do sistema:* foi selecionado aço inoxidável ferrítico para a confecção da nova câmara, evitando assim produtos de corrosão venham a contaminar a câmara de ensaio. A escolha do aço ferrítico baseou-se em dois aspectos:

- O fato de o material ser ferromagnético deixa aberta a possibilidade futura de utilização de sensores, por exemplo, acelerômetros de fixação magnética;
- A resistência a corrosão desse material é superior a do aço martensítico, que seria a outra opção de aço inoxidável ferro-magnético.

*Estanqueidade do sistema de refrigeração:* o novo sistema conta com um único elemento de vedação e esse não fica sujeito a esforços de montagem e desmontagem.

*Estanqueidade da câmara de ensaio:* a nova câmara não apresenta bi-partição abaixo do nível do óleo na câmara de ensaio, na verdade o conjunto superior encaixa-se ao inferior como se fosse uma tampa.

*Alinhamento entre eixo motor e corpo-de-prova:* apesar do projeto do segundo equipamento ter incorporado tolerâncias mais rígidas que a primeira máquina de ensaio, optou-se ainda por se substituir o rolamento base do equipamento do DIN 52206 para o DIN 54206U. Esses dois rolamentos são idênticos quanto às dimensões do eixo no qual eles podem ser montados, assim como são iguais os diâmetros externos de suas pistas. A principal diferença entre os dois reside no fato de o primeiro é um rolamento axial de duas fileiras de esferas de assento plano e o segundo é de assento esférico. Para isso, ele é acompanhado por duas contra-placas esféricas que devem ser montadas no alojamento do rolamento e sobre as quais se apóiam suas pistas externas (de perfil esférico). A utilização desse tipo de rolamento torna o sistema tolerante a pequenos desalinhamentos entre o eixo da máquina e o assento dos corpos-de-prova.

A esse projeto foram incorporadas, além das tolerâncias convencionais, algumas tolerâncias de forma. Para os ajustes entre componentes foi selecionado o grau de tolerância (ou qualidade de trabalho) IT5. Esse grau de tolerância – que determina as tolerâncias dimensionais, com base nas dimensões nominais dos componentes – está na fronteira entre acoplamentos para componentes mecânicos e calibradores (AGOSTINHO; RODRIGUES; LINARI, 1977) ou seja, trabalhou-se com o ajuste mais fino indicado para componentes de máquinas em geral. As definições formais dessa terminologia são encontradas na norma NBR 6158.

Chegou-se então a concepção que está apresentada esquematicamente na Figura 3.27. Na Figura 3.28 é o novo equipamento é apresentado em perspectiva.

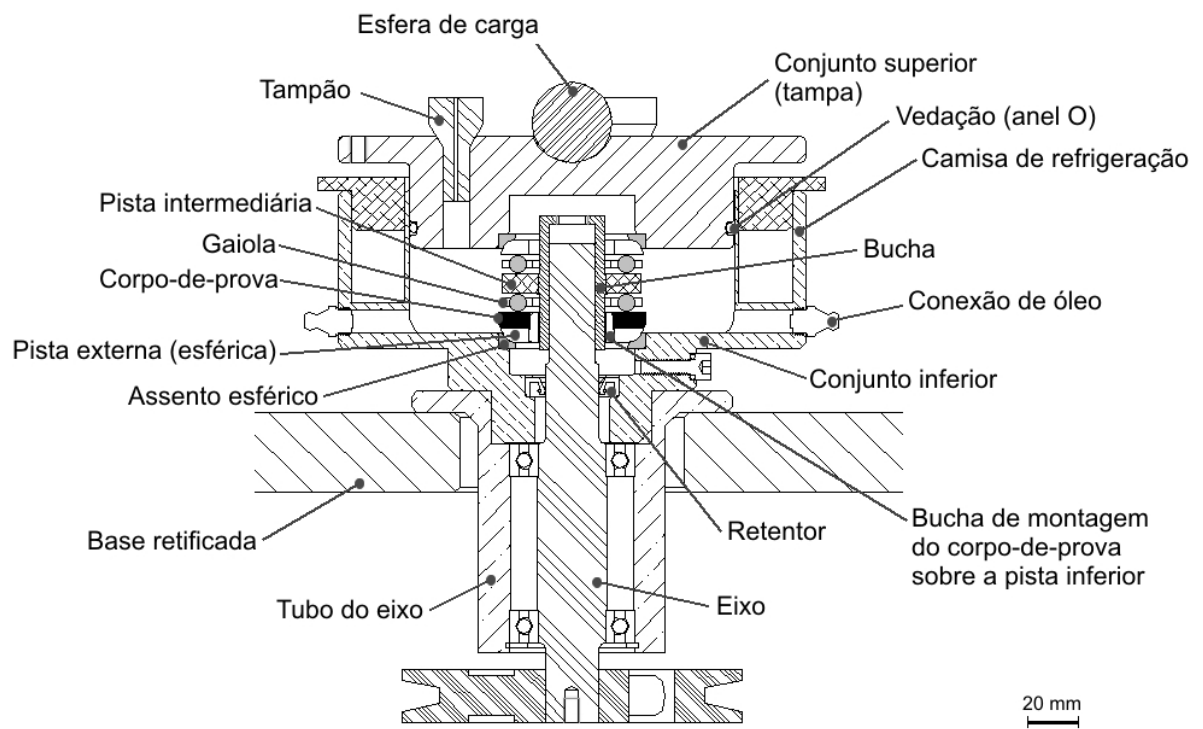


Figura 3.27 - Principais componentes da segunda versão da máquina de fadiga de contato.

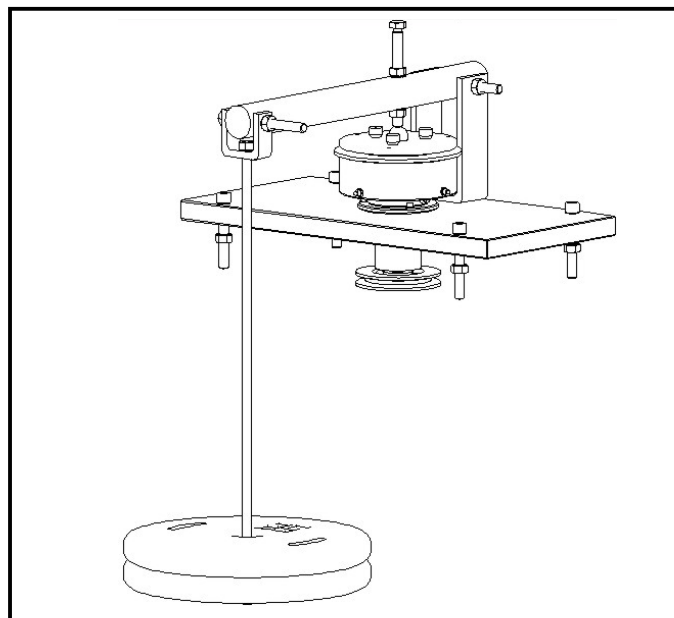


Figura 3.28 - Perspectiva do conjunto do segundo equipamento.

Dentre as características já mencionadas como integrantes do novo projeto, destaca-se o conjunto superior, o qual atua como tampa em relação ao conjunto inferior. Essa configuração permite que o abastecimento da câmara de ensaio com lubrificante seja muito fácil e rápido. A tampa tem abas laterais longas para dificultar que partículas oriundas do ambiente externos entrem na folga existente entre ela e o conjunto inferior.

A tampa da máquina foi projetada com três furos para passagem para o interior da câmara de sensores que eventualmente se façam necessários. O tampão em corte na Figura 3.27 apresenta ainda um orifício por onde pode ser introduzido um termopar.

Finalizada a etapa do projeto, os desenhos de fabricação foram encaminhados a uma ferramentaria para a fabricação. Os desenhos completos de fabricação podem ser encontrados no anexo A deste trabalho.

O tempo total de fabricação e montagem de todo o sistema foi de aproximadamente 60 dias e o equipamento completamente montado pode ser visto na Figura 3.29. Motor, inversor de frequência, sensor indutivo de contar rotações e o relógio totalizador de giros foram aproveitados do primeiro equipamento.



Figura 3.29 - Imagem da segunda máquina de fadiga de contato montada.

### 3.2.1.2 *Corpo-de-prova*

Os mesmos corpos-de-prova utilizados no primeiro equipamento podem ser também utilizados no segundo. No entanto, foram produzidos alguns corpos-de-prova que diferem daquele apresentado na Figura 3.3 pela dimensão do diâmetro interno da arruela. Ao invés dos 28 mm apresentados no desenho por vezes utilizou-se um diâmetro interno de 32 mm. A razão para isso é aproveitar melhor o tempo nas sessões de microscopia eletrônica de varredura, pois no furo central do corpo-de-prova de maior diâmetro pode ser encaixada uma peça embutida em baquelite, geralmente um corte transversal de um outro corpo-de-prova, minimizando o tempo para troca da amostras no MEV.

### 3.2.2 Montagem e utilização do novo equipamento

A seqüência de montagem da nova máquina de fadiga de contato é bastante similar a primeira. A principal diferença é que o rolamento axial utilizado nesse equipamento possui dois novos elementos, as contra-placas esféricas que devem ser montadas em seus alojamentos nos conjunto inferior e superior. A seqüência de montagem é apresentada na Figura 3.30(a) até (j).

Na Figura 3.30(a) é mostrado o conjunto inferior aberto e vazio. Na foto (b) foi adicionada a contra-placa esférica ao alojamento no fundo do conjunto inferior. A seguir, item (c), é adicionada a pista externa inferior do rolamento axial, a qual se encaixa na contra-placa esférica inferior. Nota-se que internamente a essa pista esta encaixada uma bucha que serve para o posicionamento e fixação do corpo-de-prova que se acomodará sobre a pista inferior, foto (d). A seguir, foto (e), é colocada a fileira de esferas que estarão em contato com o corpo-de-prova. Na imagem estão montadas na gaiola apenas três esferas, no entanto, como a gaiola admite até doze esferas podem ser utilizadas combinações de três, quatro, seis e doze esferas, mantendo-se igual espaçamento entre elas. A etapa seguinte o encaixe da bucha com a pista



intermediária no eixo da máquina, foto (f), depois a fileira superior de esferas, foto (g), e então a pista superior do rolamento axial, foto (h). Apenas a caráter ilustrativo, na foto (i), o assento esférico é posicionado sobre a pista superior. Na verdade ele é encaixado na tampa da máquina e essa então se acomoda sobre a pista superior do rolamento axial, fechando a câmara de ensaio, foto (j). Antes do fechamento, no entanto, coloca-se lubrificante na câmara de ensaio. Retornado a foto (h) da Figura 3.30, fica evidente a facilidade de colocar óleo na câmara de ensaio no novo equipamento.

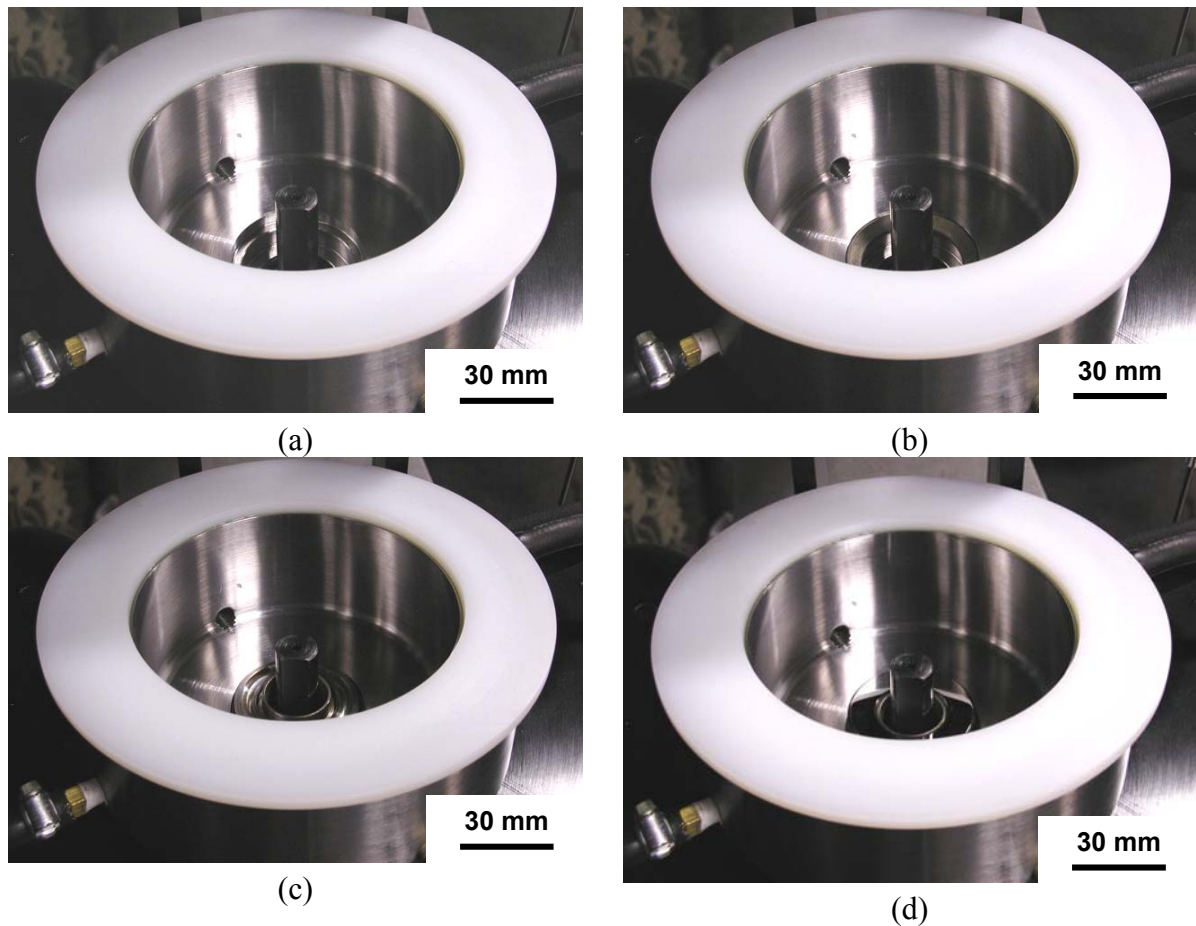


Figura 3.30 - Seqüência de montagem da nova máquina fadiga de contato.  
(Continua na próxima página)

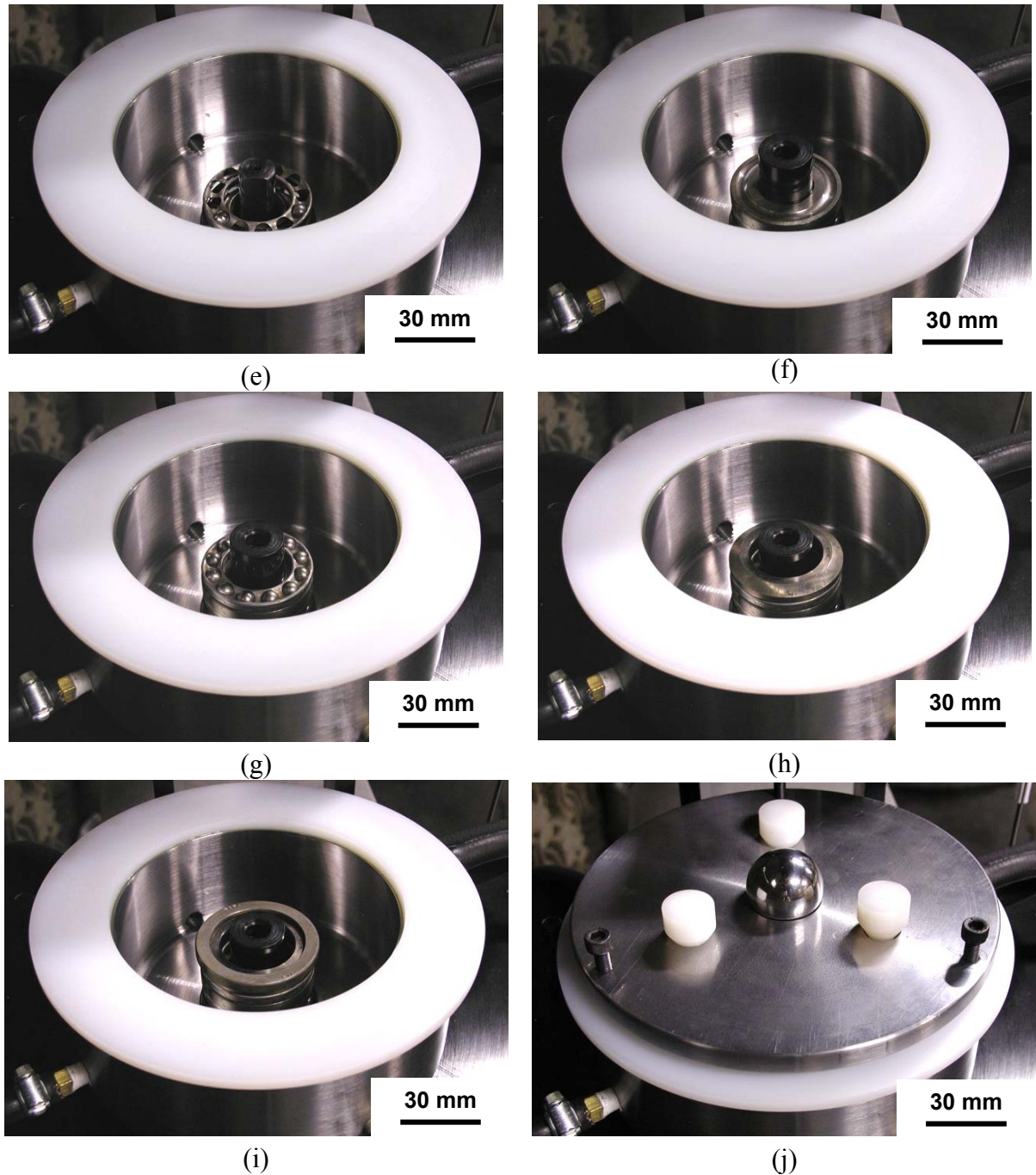


Figura 3.30 - Seqüência de montagem da nova máquina fadiga de contato.  
(Continuação da página anterior)

A aplicação de carga é feita posicionando o braço de carga da máquina sobre a tampa, Figura 3.31. Utiliza-se então um nível de bolha apoiado longitudinalmente sobre o braço de carga para efetuar seu nivelamento. O ajuste da altura da inclinação do braço de carga é realizado através da regulagem do parafuso que transmite carga a esfera. Esse nivelamento é

necessário garantir a aplicação vertical da carga de ensaio e deve ser conferido a cada novo ensaio para que pequenas diferenças na espessura do corpo-de-prova – que não é um fator crítico – venham a afetar a aplicação de carga.



Figura 3.31 - Braço de carga apoiado sobre a tampa da máquina nova.

No cálculo da carga resultante aplicada sobre o corpo-de-prova devem ser levados em conta, o peso próprio da tampa, o peso do braço de carga e a distância de seu baricentro até seu ponto de articulação, o comprimento do braço de carga, o peso colocado na extremidade do braço de carga e a distância entre a esfera de aplicação de carga e a articulação do braço de carga. Esses valores estão esquematicamente apresentados no diagrama de corpo livre da Figura 3.32. Evidentemente os valores do peso da tampa e do braço de carga são fixos, respectivamente, 39,2 N (4,0 kgf) e 80,9 N (8,25 kgf). Então a variação na força aplicada sobre o corpo-de-prova será obtida variando os pesos mortos sustentados pelo braço de carga. Para o cálculo das tensões de contato a carga do ensaio é dividida pelo número de esferas em contato com o corpo-de-prova.

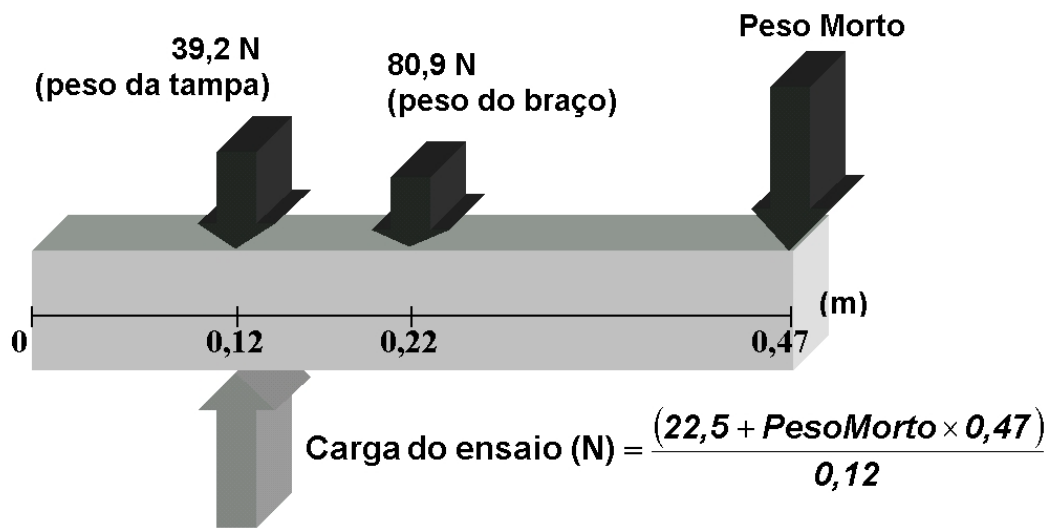


Figura 3.32 - Diagrama de corpo livre sistema de aplicação de carga da máquina nova. Na origem da barra da figura existe uma articulação que a permite girar.

### 3.3 Ensaios de validação do equipamento

Novamente cumpriu-se uma etapa de verificar o funcionamento de um equipamento recém construído. Em particular, o foco de observação estava centrado em saber se o novo equipamento seria capaz de reproduzir apenas movimento de rolamento em seu funcionamento.

#### 3.3.1 Materiais e métodos

Nestes ensaios utilizaram-se amostras de um aço forjado cuja composição básica é 0,4 %C e 5% temperadas e revenidas para a dureza de 48 HRC. A têmpera foi feita mediante austenitização em forno a vácuo a 950°C por 30 minutos e resfriamento em atmosfera gasosa de nitrogênio a alta pressão. O revenimento foi conduzido na temperatura de 200°C. As condições gerais de ensaio estão apresentadas Tabela 3.5. A carga de ensaio foi de 2.100 N, ou 700 N por esfera, já que foram empregadas apenas 3 esferas. Como módulo elástico e coeficiente de Poisson do aço foram utilizados, respectivamente, os valores de 210 GPa e 0,3.

Na lubrificação foi utilizado um óleo comercial para caixa de engrenagens SAE 90 – API-GL5. As amostras foram preparadas seguindo a mesma seqüência já descrita nos ensaio da máquina I, ver item 3.1.1.1.

Tabela 3.5 - Condições de ensaio.

Lubrificante	SAE 90 API-GL5
Carga total	2.100 N
Número de esferas	3
Carga por esfera	700 N
Diâmetro da esfera	7,398 mm (5/16")
Módulo combinado	115,4 GPa
Raio do contato	0,264 mm
Área de contato	0,218 mm <sup>2</sup>
Pressão média de contato	3,2 GPa
Máxima pressão de contato	4,8 GPa
Frequência de carregamento	46 Hz (para o eixo rodando a1900 rpm)
Critério de término	ocorrência de falha

### 3.3.2 Resultados e discussão

Os corpos-de-prova ensaiados apresentaram uma trilha de rolamento bastante uniforme, o que significa que a carga esteve bem distribuída ao longo de toda a trilha. Na Figura 3.33 pode ser visto o aspecto geral da trilha de rolamento. O que deve ser destacado na mesma figura, no entanto, é a ocorrência de lascamento na trilha de rolamento, o que aconteceu após 1.127.000 ciclos e representa um dano típico de fadiga de contato. Na Figura 3.34 o dano apresentado na figura anterior pode ser visualizado em maior detalhe.

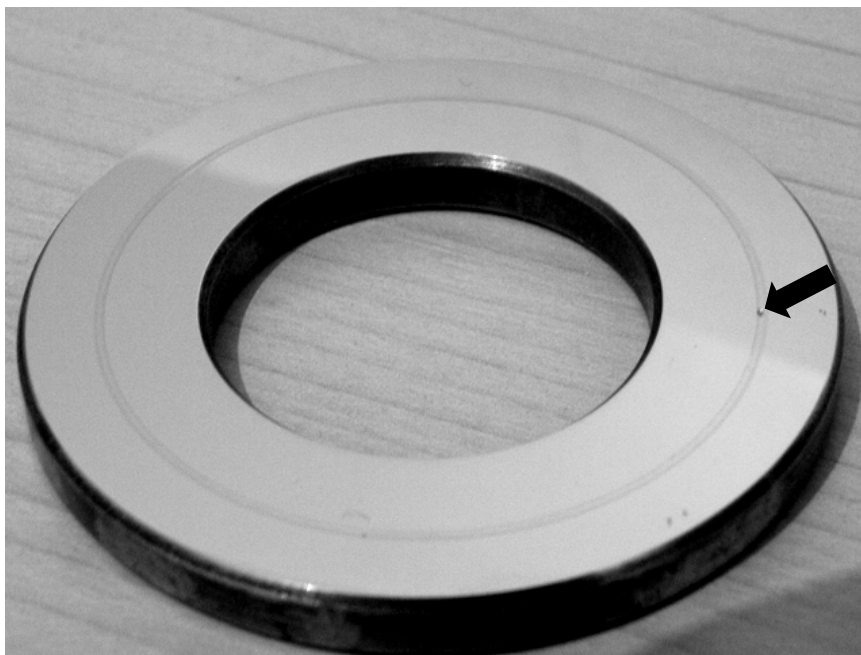


Figura 3.33 - Aspecto geral de um corpo-de-prova ensaiado na nova máquina. A seta indica o local onde ocorreu um lascamento.

Além da importância do novo equipamento ter sido capaz de reproduzir um dano típico de fadiga de contato, como o lascamento, outro fato a ser destacado é que a trilha de rolamento não mais apresentou a alternância entre regiões onde houve rolamento e onde houve deslizamento (regiões riscadas).

Na Figura 3.34 a linha AA' representa o plano de seccionamento do qual foi obtido a imagem apresentada na micrografia da Figura 3.35. Nessa secção vê-se que a profundidade do vazio produzido pela lasca que foi removida da superfície é de  $135\ \mu\text{m}$ . Calculando a profundidade para a máxima tensão de cisalhamento, a qual situa-se na profundidade de 0,47 vezes o raio de contato, ou seja,  $124\ \mu\text{m}$  (valor do raio retirado da Tabela 3.5) vê-se que este valor concorda muito bem com a profundidade do defeito gerado no ensaio.

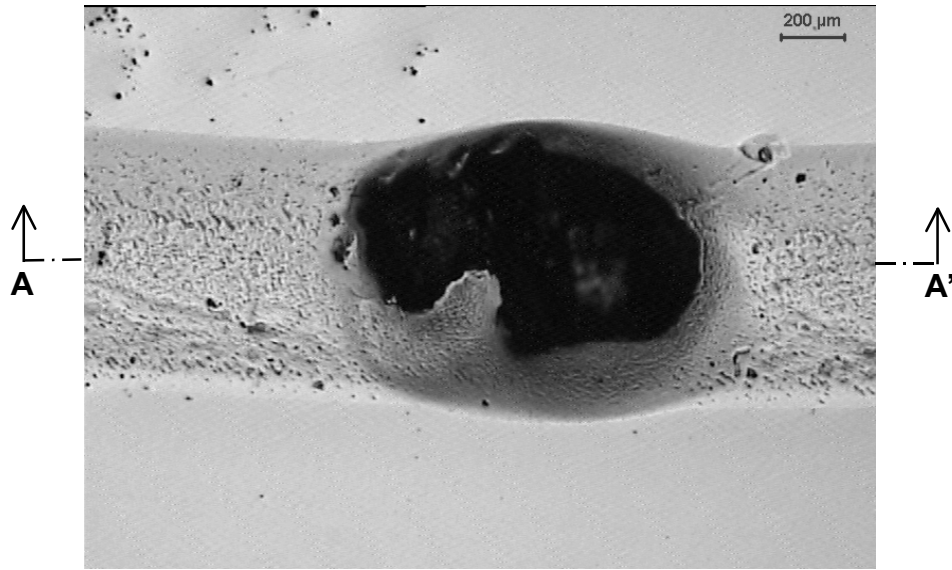


Figura 3.34 - Lascamento visto de topo; MO.

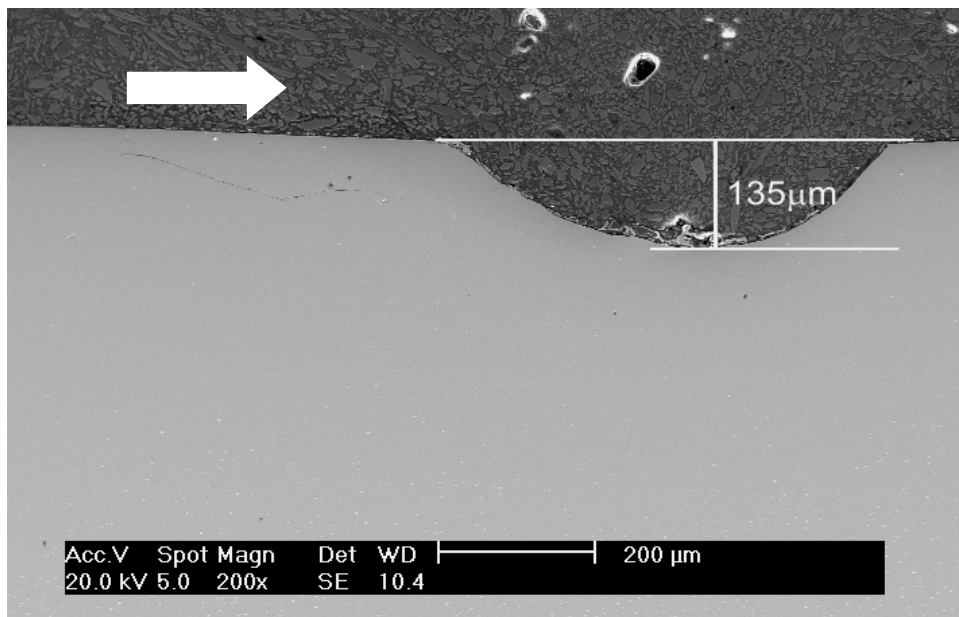


Figura 3.35 - Secção transversal longitudinal do lascamento da figura anterior.

Próximo ao fundo da região que sofreu lascamento é possível observar a presença de um carboneto cisalhado, Figura 3.36, o que evidencia a ocorrência de elevadas tensões de cisalhamento nessa região.

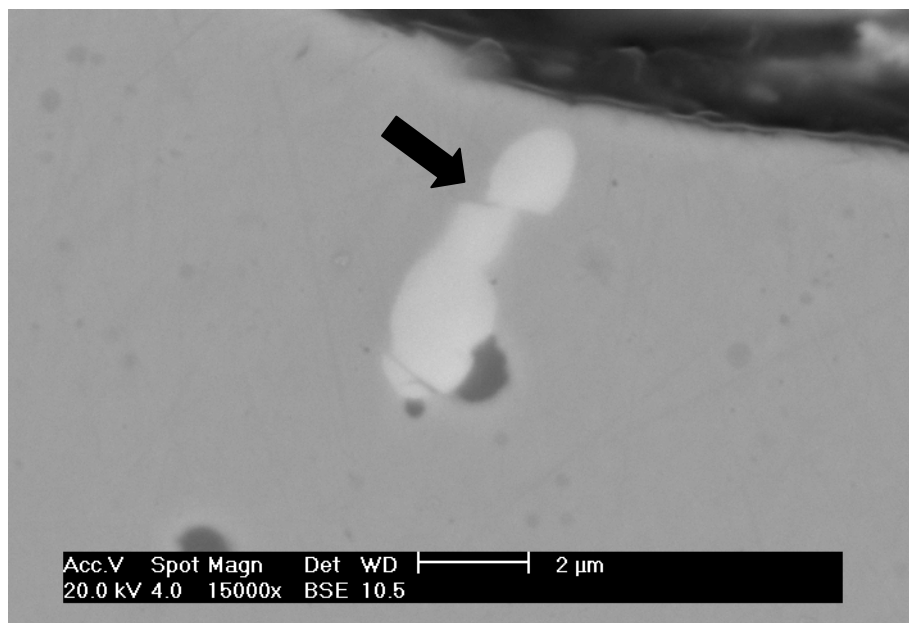


Figura 3.36 - Carboneto que sofreu cisalhamento, próximo à superfície de fratura, no fundo da cavidade deixada pela partícula desprendida.

Em outro corpo-de-prova ensaiado nas mesmas condições foi possível coletar o material destacado da superfície, dessa forma na Figura 3.37(a) apresenta-se a superfície com o vazio e na (b) a partícula removida da superfície. A observação com maior detalhe da partícula removida da superfície revela a presença de uma inclusão não-metálica de óxido de alumínio, conforme pode ser visto na Figura 3.38. O número total de ciclos para a ocorrência desse defeito foi de 17.738.000.

Embora ter as duas metades de uma fratura seja algo extremamente desejável para o entendimento dos mecanismos de falha, no ensaio de fadiga de contato de rolamento isso não é um fato comum. Em geral, a partícula que acabou de ser removida é imediatamente comprimida pela esfera seguinte e então fragmentada. Em outras palavras, a coleta dessa partícula praticamente intacta ao lado da trilha de rolamento foi um evento que não deve se repetir com alta frequência.



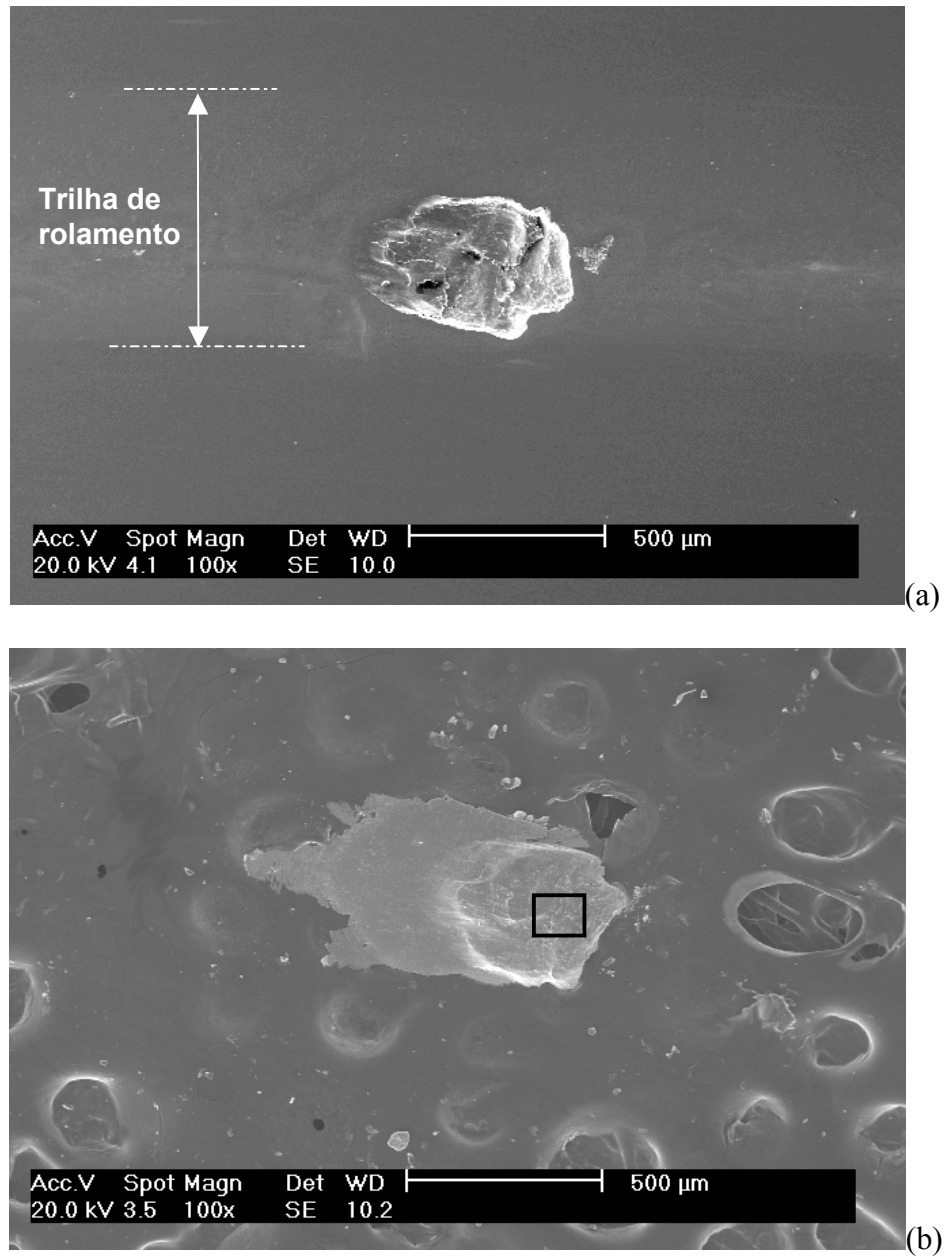


Figura 3.37 - Imagens de MEV mostrando lascamento na triha de rolamento (a) e a respectiva lasca coletada e colada sobre fita de carbono (b); o retângulo preto indica a região onde foi encontrada a inclusão não-metálica apresentada na próxima figura.

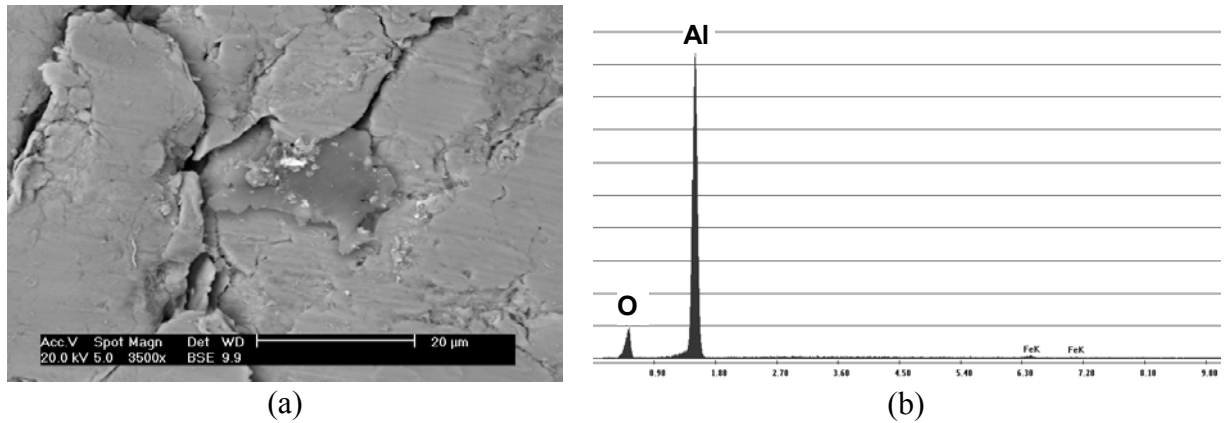


Figura 3.38 - Inclusão na partícula destacada da superfície (a) e o espectro EDX da inclusão (b).

### 3.3.3 Conclusão

Tendo em conta que, dentro das condições experimentais empregadas, foi possível reproduzir no novo equipamento mecanismos de falhas por fadiga de contato e que o movimento de deslizamento foi suprimido, pode-se afirmar que a nova máquina pode ser utilizada no estudo da fadiga de contato esfera contra plano.

## 4 ESTUDO DE FERROS FUNDIDOS: MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse estudo foram utilizados dois tipos de ferros fundidos, um cinzento e um nodular. Na condição bruta de fundição esses materiais apresentavam matrizes perlíticas. Neste trabalho, no entanto, os materiais foram submetidos à têmpera e revenido para a obtenção de matriz martensítica de elevada dureza o que conseqüentemente eleva a dureza global do material.

O estudo relativo ao desempenho e aos aspectos das falhas resultantes dos ensaios foi estruturado dentro de duas linhas principais:

- Comparar os resultados obtidos com o ferro fundido cinzento com os do ferro fundido nodular e, adicionalmente, confrontá-los com o de um aço ferramenta fundido tomado como referência.
- Submeter corpos-de-prova de cada um dos materiais a um pré-tensionamento inicial, idealizado para ser compressivo, e analisar o efeito dessa pré-tensão no comportamento de cada um dos materiais.

Embora em aplicações onde altas tensões de contato estejam envolvidas o emprego de ferro fundido cinzento seja menos indicado que o do ferro fundido nodular, por exemplo, em engrenagens de caixas de câmbio, essa metodologia visa avaliar a susceptibilidade desses materiais à imposição de tensão externa.

O pré-tensionamento inicial foi introduzido mediante a utilização de um dispositivo de compressão radial projetado e construído para essa finalidade. A avaliação do nível de tensionamento no corpo-de-prova foi feita utilizando-se modelagem por elementos finitos, onde um modelo foi alimentado com dados das dimensões pós-compressão.

A descrição desse dispositivo, da análise por elementos finitos e das demais condições experimentais é feita no decorrer do Capítulo.

#### 4.1 Caracterização dos materiais ensaiados

Os dois ferros fundidos utilizados nesse trabalho foram doados pela empresa Tupy, de Joinville (SC), na forma de barras redondas, lingotadas continuamente. A barra de ferro fundido cinzento é de 70 mm de diâmetro, enquanto a de nodular apresenta 66 mm. As composições das duas ligas são apresentadas na Tabela 4.1. Essas análises foram fornecidas pelo próprio fabricante do material.

Tabela 4.1 - Composições dos ferros fundidos utilizados nos ensaios de fadiga de contato.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr	Ni	Ti	V	Nb	CE
<b>Nodular</b>	3,75	2,54	0,16	0,068	0,009	0,60	0,037	0,058	0,020	0,011	0,008	0,005	4,60
<b>Cinzento</b>	3,41	2,58	0,30	0,068	0,086	0,15	0,001	0,075	0,027	0,012	0,007	0,008	4,06

As micrografias mostrando o aspecto das grafitas das duas ligas são apresentadas na Figura 4.1. Já as microestruturas pós-tratamento de têmpera e revenido são apresentadas na Figura 4.2. Para a têmpera fez-se austenitização em banho de sal à temperatura de 900°C durante 45 minutos e, a seguir, resfriamento em banho de sal a 160°C. O revenimento foi feito à 200°C por uma hora. Esses tratamentos foram feitos na empresa de tratamentos térmicos Brasimet. As matrizes martensíticas de ambos ferros fundidos atingiram, após o tratamento térmico, os valores de dureza mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Durezas das matrizes dos ferros fundidos após têmpera e revenido.

	Dureza da matriz HV 0,1
<b>Nodular</b>	796 ± 27
<b>Cinzento</b>	783 ± 19

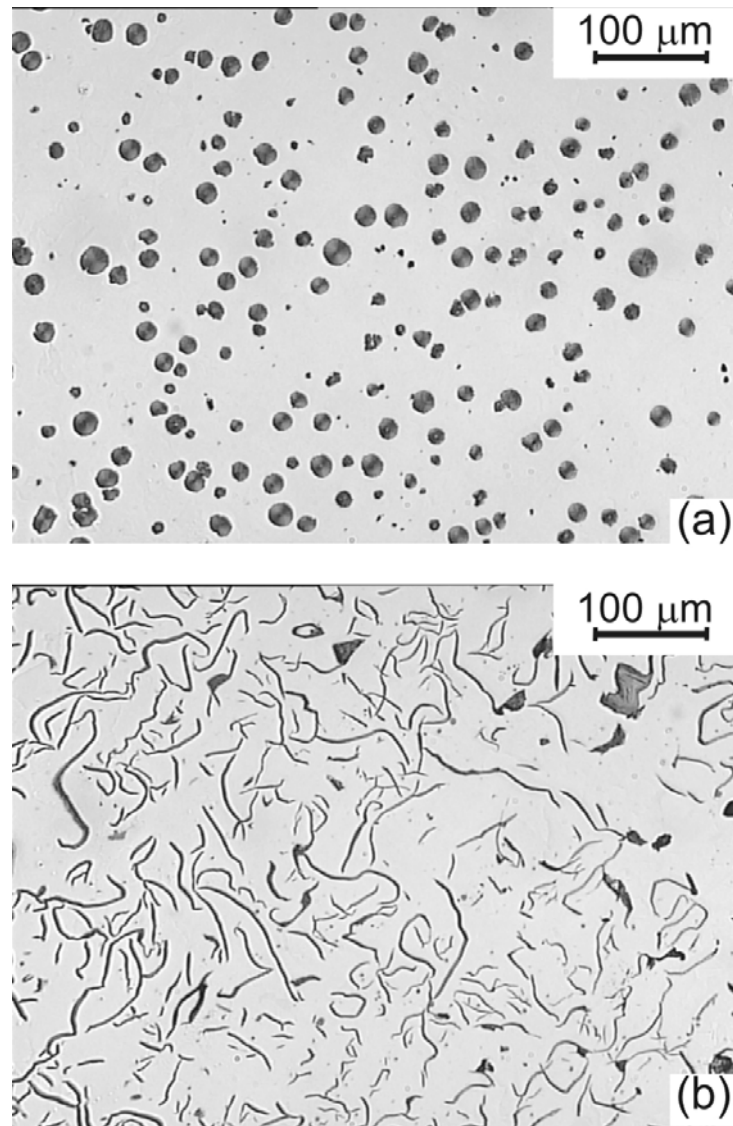


Figura 4.1- Microestruturas do ferro fundido nodular (a) e cinzento (b). Sem ataque.MO.

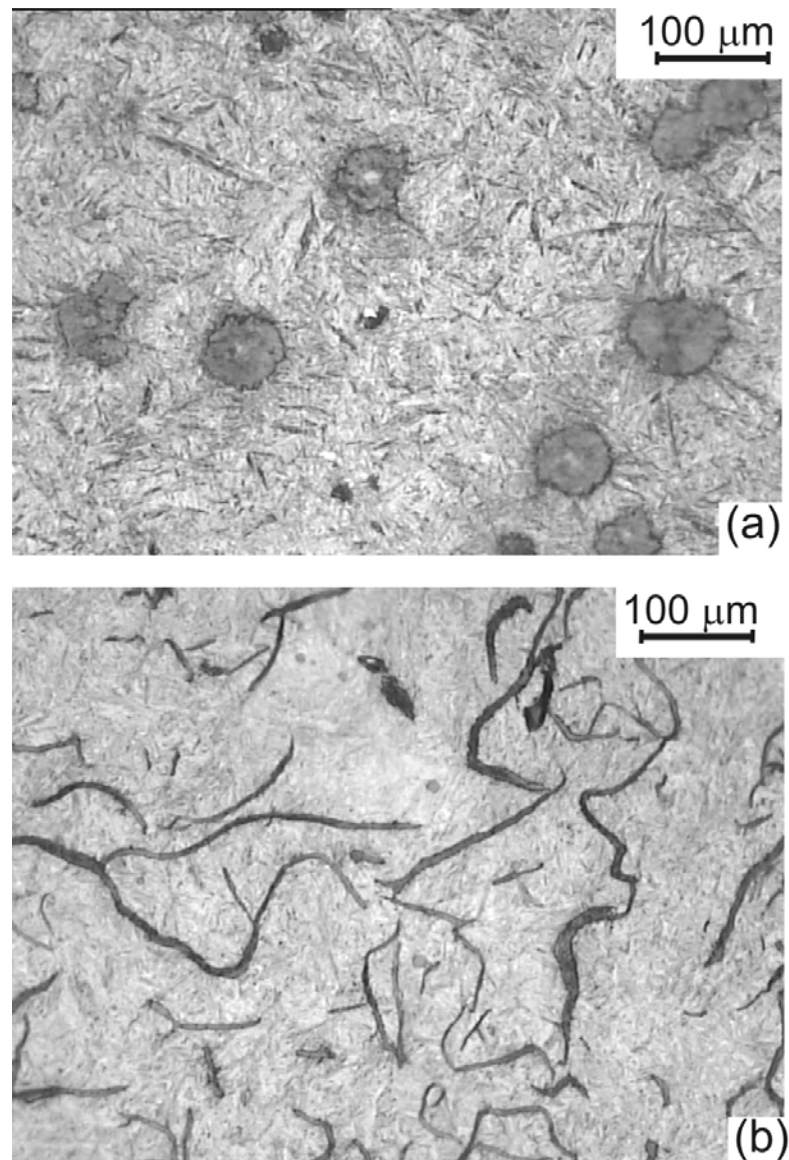


Figura 4.2 - Microestruturas dos ferro fundidos após a têmpera. Ferro fundido nodular (a) e ferro fundido cinzento (b). Ataque com nital 3%.

O aço ferramenta utilizado como referência foi obtido por fundição e tem composição nominal de 0,45 %C, 3 %Cr e 0,25 %Mo. Após a usinagem dos corpos-de-prova estes foram submetidos à têmpera e revenido para a dureza final de 580 HV30. A têmpera foi feita mediante austenitização em forno a vácuo a 950°C por 30 minutos e resfriamento em atmosfera gasosa de nitrogênio a alta pressão. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de dureza Vickers do aço e dos ferros fundidos. Essas durezas foram medidas com carga de 30 kgf, por

isso os valores encontrados para os ferros fundidos são menores que aqueles da Tabela 4.2, pois sofrem influência da grafita.

Tabela 4.3 – Dureza dos materiais ensaia

<b>Material</b>	<b>Dureza HV 30</b>
Aço	581 ± 13
Ferro fundido cinzento	517 ± 60
Ferro fundido nodular	549 ± 50

#### **4.2 Desenvolvimento do sistema de aplicação de pré-tensão**

A fim de que os esforços aplicados na periferia pudessem resultar em apreciável nível de tensão na região da trilha de rolamento, bem como, que o sistema de aplicação de carga tivesse dimensões compatíveis com o interior da câmara de ensaio, foi necessário diminuir a rigidez do corpo-de-prova. Dessa forma reduziu-se também a magnitude dos esforços requeridos para aplicação de pré-tensão ao corpo-de-prova.

O desenho do novo corpo-de-prova é apresentado na Figura 4.3. A seqüência de fabricação desses corpos-de-prova é: torneamento, tratamento térmico, retificação e polimento. Dessa forma, as dimensões apresentadas na Figura 4.3 referem-se (a) a condição logo após torneamento e (b) após retificação plana e cilíndrica. Essa distinção é necessária devido ao fato de ocorrer expansão dimensional na têmpera de aproximadamente 0,10 mm nos diâmetros interno e externo. Além disso, a necessidade de retificação de todas as faces do corpo-de-prova justifica-se por outras duas razões: a necessidade de acoplamento no dispositivo de aplicação de tensão e a possibilidade de considerar que todos os corpos-de-prova são dimensionalmente idênticos.

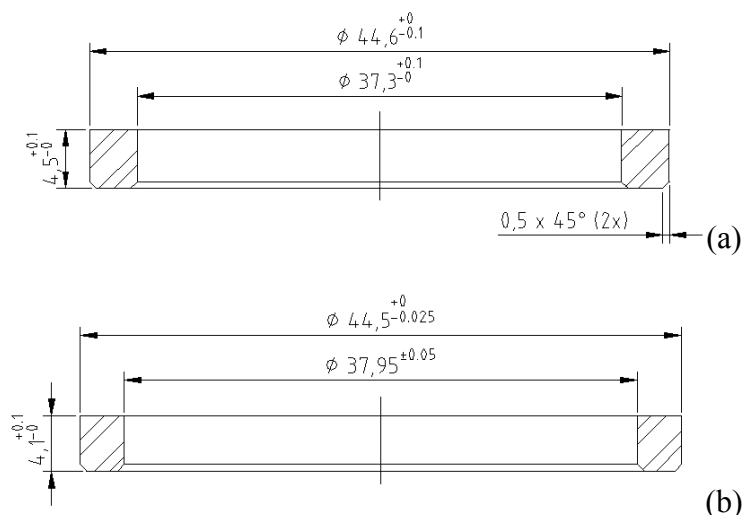


Figura 4.3 - Desenho do corpo-de-prova destinado para aplicação de pré-tensão com as dimensões pós-torneamento (a) e pós-retificação (b).

Na Figura 4.4 são apresentados os corpos-de-prova destinados a aplicação de pré-tensão em duas etapas do processo de fabricação (a) após tratamento térmico e (b) como retificado. No transcorrer do texto essa nova geometria de corpo-de-prova será referida como “anel”, em contraposição aos corpos-de-prova que seguem a geometria apresentada na Figura 3.3 (página 46), referida como “arruela”, visto que suas formas assemelham-se mais às formas de anel e arruela, respectivamente. Tomando-se os valores nominais dos diâmetros externo e interno indicados na Figura 4.3(b) observa-se que a largura nominal do anel (metade da diferença dos diâmetros) é de 3,275 mm. Considerando ainda que, em condições estáticas, o contato entre a esfera e a superfície do corpo-de-prova ocorre no diâmetro 41,0 mm do mesmo – pois essa é a posição do centro da trilha na pista no rolamento DIN 54206 – e que 500  $\mu\text{m}$  é uma largura típica para a trilha de rolamento, deduz-se que haverá entre a borda da trilha de rolamento gerada e a borda do corpo-de-prova uma distância equivalente a 2 a 3 vezes a largura da trilha de rolamento. Lembrando que em ensaio de dureza, onde ocorre extensa deformação plástica, exige-se em geral que a indentação mais próxima da borda diste da



mesma o equivalente a 3 diâmetros de indentação, o dimensionamento do corpo-de-prova é adequado, pois a priori o ensaio deve transcorrer dentro do campo elástico.

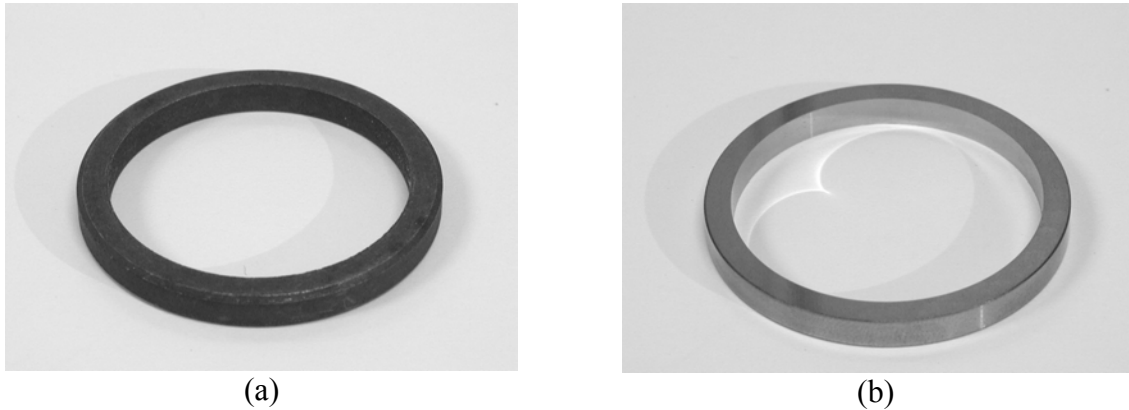


Figura 4.4 - Corpos de prova tipo anel em duas etapas do processo de fabricação: após tratamento térmico (a) e após retífica (b).

A compressão das amostras foi feita mediante o uso de um dispositivo bi-partido, chamado tensionador. A vista explodida do dispositivo de corpo-de-prova é apresentada na Figura 4.5. O tensionador foi projetado de forma a atender as limitações dimensionais da câmara de ensaio e do rolamento axial com o qual se trabalha. Para a utilização desse novo recurso foram também desenhados novos dispositivos de acoplamento do corpo-de-prova à pista inferior de rolamento, bem como um dispositivo auxiliar de montagem. Todos esse desenhos podem ser encontrados no anexo B desse texto.

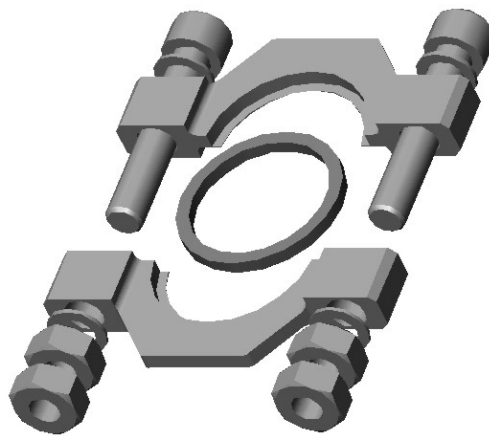


Figura 4.5 - Vista explodida do dispositivo de compressão dos corpos-de-prova de fadiga de contato.

### 4.3 Condições gerais de ensaio

Os ensaios foram conduzidos com lubrificação e sob mesma tensão nominal de contato em três materiais, ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e aço. Como lubrificante foi utilizado um óleo comercial de caixa de engrenagens com designação SAE 90 API-GL5. A tensão de contato máxima, 3,6 GPa, foi obtida mediante o carregamento do braço de carga da máquina com pesos mortos de 245 N (25 kgf) no caso dos ferros fundidos e 186 N (19 kgf) no caso do aço. Esses carregamentos resultaram em cargas totais de ensaio de 1143 N, para os ferros fundidos, e 915 N para o aço, respectivamente (na Figura 3.32 foi descrito como a massa dos pesos mortos é convertida em carga de ensaio). A diferença entre os carregamentos de ferros fundidos e aço deve-se a diferença entre os valores de módulos elásticos desses materiais. Nesse trabalho foram assumidos os valores de 0,3 para os coeficientes de Poisson de todos os materiais e de 210 GPa para o módulo elástico do aço e 164 GPa para o módulo elástico dos dois tipos de ferro fundido.

A rigor, os ferros fundidos cinzentos não obedecem à lei de Hooke, ou seja, seu módulo elástico dos ferros fundidos cinzentos varia com o aumento da tensão dentro do regime elástico. Essa variação, no entanto, pode ser desconsiderada dependendo da região da curva tensão deformação na qual se está trabalhando (para baixas tensões o comportamento se aproxima da linearidade). Outro aspecto que se deve considerar é que para ferros cinzentos o valor do módulo elástico varia fortemente com a resistência do material, conforme pode ser visto na Tabela 4.4 (ASM, 1978). De acordo com esses dados, pode-se esperar um valor alto de módulo elástico para a o ferro fundido cinzento usado no presente trabalho, pois o mesmo trata-se de uma liga de alta resistência. Considerando então que 164 GPa é um valor de módulo elástico compatível com ferros fundidos nodulares (ASM, 1990) e que também se aproxima bastante do máximo valor apresentado na Tabela 4.4, assumiu-se, por simplicidade, que esse valor representa o módulo elástico de ambos os materiais.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas típicas de barras padrão de ferro fundido cinzento no estado bruto de fundição.

Classe ASTM	Resistência à tração (MPa)	Modulo elástico (GPa)
20	152	66 a 97
30	214	90 a 113
40	293	110 a 138
50	362	130 a 157
60	431	141 a 162

Como contra-corpos foram utilizadas esferas de 7,938 mm de diâmetro produzidas com aço ABNT 52100, as quais foram doadas pela Schaeffler Brasil Ltda, denominação atual da fábrica de rolamentos INA de Sorocaba(SP). A cada ensaio todas as esferas foram substituídas e as pistas de rolamento intermediária e superior inspecionadas visualmente a fim de identificar eventuais danos e, quando o caso, efetuar a substituição.

O parâmetro de término de cada ensaio foi a ocorrência do primeiro lascamento da trilha de rolamento, o que foi detectado pelo aumento abrupto do ruído emitido pelo equipamento de ensaio. As condições de ensaio estão sumarizadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Condições de ensaio.

Lubrificante	SAE 90 API-GL5
Temperatura do lubrificantes	50 ± 2°C
Carga total <sup>†</sup>	1146 N / 915 N
Número de esferas	3
Carga por esfera <sup>†</sup>	382 N / 305 N
Diâmetro da esfera	7,398 mm (5/16")
Módulo combinado <sup>††</sup>	101,2 GPa / 115,4
Raio do contato <sup>†</sup>	0,224 mm / 0,199 mm
Área de contato <sup>†</sup>	0,158 mm <sup>2</sup> / 0,125 mm <sup>2</sup>
Pressão média de contato ( <b>p</b> )	2,4 GPa
Máxima pressão de contato ( <b>p<sub>o</sub></b> )	3,6 GPa
Frequência de carregamento	46 Hz (para o eixo rodando a 1900 rpm)

<sup>†</sup> O primeiro valor se refere aos ferros fundidos e o segundo ao aço.

<sup>††</sup> O primeiro valor se refere à combinação esfera de aço / corpo-de-prova de ferro fundido e o segundo a combinação esfera de aço / corpo-de-prova de aço.

A viscosidade cinemática do lubrificante utilizado nos ensaios foi medida em viscosímetro capilar nas temperaturas de 40, 50 e 100°C. O ensaio foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), segundo a norma NBR 10441, e utilizando equipamento Zeitfuchs Cross-arm. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.6. Usando-se balão volumétrico de 250 mL e balança com resolução de 1 mg determinou-se a massa específica do lubrificante, o resultado foi de 898 kg/m<sup>3</sup>. De posse desses da massa específica e da viscosidade cinemática foi calculada a viscosidade dinâmica, a qual é apresentada na terceira coluna da Tabela 4.6. O gráfico temperatura *versus* viscosidade cinemática pode ser visto na Figura 4.6.

Tabela 4.6 - Viscosidade do lubrificante.

Temperatura (°C)	Viscosidade Cinemática (m <sup>2</sup> /s) [cS*]	Viscosidade Dinâmica, $\eta_0$ (Pas)
40	$0,2184 \times 10^{-3}$ [218,4]	0,194
50	$0,1265 \times 10^{-3}$ [126,5]	0,113
100	$0,0185 \times 10^{-3}$ [18,5]	0,016

\* 1 cS = 1 mm<sup>2</sup>/s

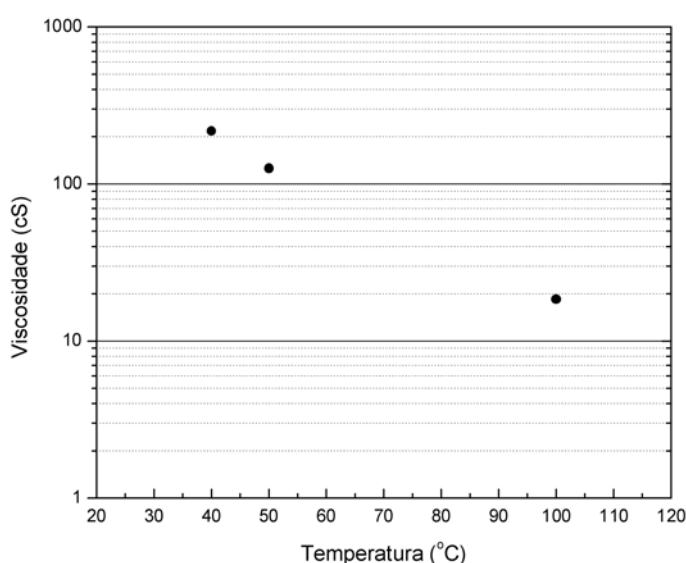


Figura 4.6 - Gráfico temperatura *versus* viscosidade do óleo utilizado.

Para identificar o nível de interação entre as superfícies das esferas e do corpo-de-prova, foram realizadas medidas de rugosidade nas trilhas, o que, juntamente com os dados de viscosidade e de operação do equipamento permite a determinação do parâmetro  $\lambda$  de separação das superfícies. Os valores médios da rugosidade quadrática média, antes do ensaio, dos corpos-de-prova fundidos são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores médios da rugosidade quadrática média,  $R_q$ , antes do ensaio, dos corpos-de-prova de ferro fundido e da esfera de aço ABNT 52100.

<b>Material</b>	<b><math>R_q</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Ferro fundido cinzento	$0,075 \pm 0,041$
Ferro fundido nodular	$0,110 \pm 0,048$
Esfera	$0,83 \pm 0,005$

De posse dos dados apresentados nas duas Tabelas anteriores pode-se estimar a mínima espessura de filme, equação 2.10, separando a esfera do corpo-de-prova e, a partir desse valor, calcular o parâmetro  $\lambda$ , para o sistema. Os utilizados para as variáveis da equação 2.10 são apresentados na Figura 4.7, onde os valores com sub-índice A referem-se ao corpo-de-prova e com B a esfera. A partir do resultado de  $h_o$ , determina-se pela equação 2.11 que os valores de  $\lambda$  são 0,98 para o ferro fundido cinzento e 0,80 para o nodular. Esse valores de  $\lambda$  indicam que as falhas tendem a ter origem na superfície do material.

$$\frac{h_o}{R'} = 3,63 \left( \frac{U \eta_o}{2E^* R'} \right)^{0,68} (2\alpha E')^{0,49} \left( \frac{W}{2E^* R'^2} \right)^{-0,073} (1 - e^{-0,68k})$$

$U = 1 \text{ m/s}$ , onde:       $R' = 1,8495 \times 10^{-3}$  onde:       $E^* = 101,15 \times 10^9$  onde:  
 $U_A = 0$  e  $U_B = 2 \text{ m/s}$        $R_{ax} = R_{ay} = \infty$        $E_A = 164 \text{ GPa}$   
                                           $R_{bx} = R_{by} = \frac{1}{2} (7,398 \times 10^{-3})$        $E_B = 210 \text{ GPa}$   
 $\eta_o = 0,113 \text{ Pas}$        $k = 1$        $\alpha = 1,9 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} (*)$        $W = 382 \text{ N}$

**$h_o = 0,11 \mu\text{m}$**

Figura 4.7 - Esquema de cálculo da espessura mínima do filme lubrificante,  $h_o$ . O valor de  $\alpha$  foi retirado de Williams (1994).

#### 4.4 Sistema de identificação dos corpos-de-prova

Visto que nesse etapa do trabalho experimental trabalhou-se com 3 diferentes materiais, aço e ferros fundidos cinzento e nodular, além de condições de ensaio com e sem pré-tensionamento, foi necessário criar um sistema de identificação para as amostras que torna-se direta a identificação do material e da condição de ensaio.

A codificação de identificação da amostras consta de um conjunto alfanumérico do tipo **XxxYy-i**, onde:

- **Xxx** designa o material do corpo-de-prova;
- **Yy** determina se o corpo-de-prova é do tipo arruela (ensaio sem pré-tensionamento) ou do tipo anel (ensaio com pré-tensionamento);
- **i** é o número de ordem da amostra dentro do seu grupo, ou seja, em um grupo de 5 amostras, a amostra “1” foi a primeira a ser ensaiada e a amostra “5” a última.

Na Tabela 4.8 é apresentada a correspondência entre os códigos empregados e os tipos de materiais e geometrias de corpos-de-prova. A título de exemplificação, a amostra identificada como “NodAr-02” trata-se de um corpo-de-prova do material ferro fundido nodular, fabricada com a geometria de arruela (o que significa que não foi pré-tensionado) e que foi o segundo a ser ensaiado dentro do grupo “arruelas de ferro fundido nodular”.

Tabela 4.8 – Significado dos códigos do sistema de identificação de amostras.

Designação de material		Designação de tipo de corpo-de-prova	
Código <b>Xxx</b>	Material	Código <b>Yy</b>	Geometria
Aco	Aço	An	Anel
Czn	Ferro fundido cinzento	Ar	Arruela
Nod	Ferro fundido nodular		

As condições de ensaio para todas as amostras já foram apresentadas na Tabela 4.5, no entanto, deve-se esclarecer que os ensaios com aplicação de tensão externa foram realizados

apenas com os ferros fundidos. Assim sendo, existem cinco grupos de resultados, a saber: **CznAn**, **CznAr**, **NodAn**, **NodAr** e **AcoAr**, cada um composto por cinco corpos-de-prova.

#### **4.5 Montagem do ensaio com aplicação de pré-tensão**

A principal distinção entre os ensaios usando corpos-de-prova tipo anel (com aplicação de tensão) e os ensaios realizados com corpos-de-prova do tipo arruela é justamente a montagem do anel no dispositivo de compressão.

Para isso são inicialmente colocados os parafusos unindo as duas metades da ferramenta e então apertadas as porcas, porém com grande folga, apenas para o primeiro assentamento do corpo-de-prova, Figura 4.8(a). Uma vez posicionado o anel no alojamento do tensionador, é dado um aperto inicial apenas com a utilização das mãos, Figura 4.8(b). A seguir, leva-se o conjunto tensionador/corpo-de-prova para o dispositivo de montagem, Figura 4.8(c). Esse dispositivo tem a função de sustentar de maneira firme o conjunto enquanto os dois parafusos do tensionador são alternadamente apertados, minimizando desalinhamentos entre as duas metades da ferramenta de compressão.

O principal parâmetro limitador do esforço de fechamento do tensionador, ou de aperto dos parafusos, é a variação dimensional do diâmetro interno do corpo-de-prova. Para isso foram medidos progressivamente os diâmetros internos mínimo e máximo do anel, os quais estão localizados, respectivamente, nas direções paralela e perpendicular à bipartição da ferramenta. A cada ensaio buscou-se atingir a mesma variação dimensional nas duas direções.



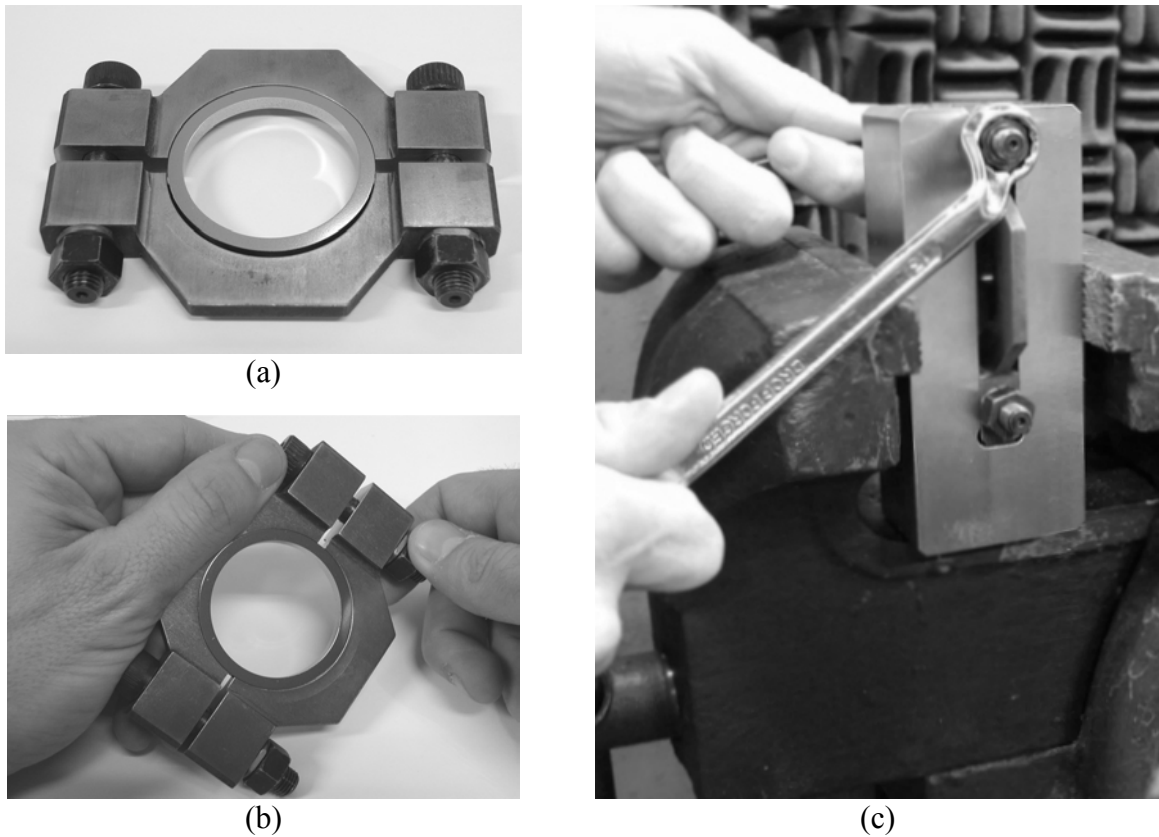


Figura 4.8 - Etapas de aperto do corpo-de-prova na ferramenta de aplicação de tensão.

Como um segundo fator de controle, também foram medidas as aproximações entre as duas metades do tensionador tomadas na posição indicada na Figura 4.9. A aproximação de referência foi de 0,30 mm. Assim sendo, buscou-se reproduzir em cada montagem não apenas a variação dimensional dos diâmetros internos dos anéis, mas também a mesma aproximação entre as duas partes do tensionador com medidas tomadas nas duas posições indicadas na Figura 4.9. Destaca-se então que sendo essa aproximação o segundo fator de controle, a interrupção do aperto dos parafusos do tensionador ocorreu sempre que a variação dimensional dos diâmetros internos do anel atingiu o nível desejado, ou seja, mais importante que buscar a aproximação de 0,30 mm foi atingir uma aproximação igual de cada lado do tensionador (tendo 0,30 mm como referência) que correspondesse a distorção desejada para o diâmetro do anel interno montado no tensionador.

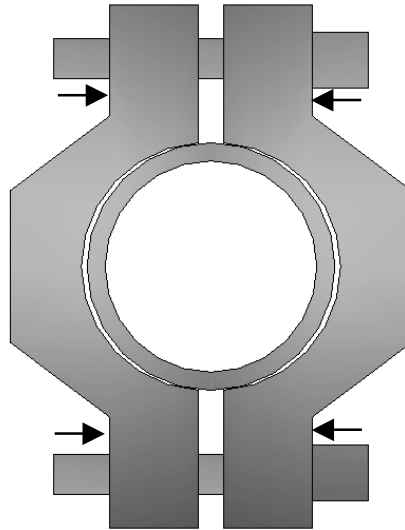


Figura 4.9 - Locais de medição da aproximação entre as duas metades do tensionador.

Após os ensaios procedeu-se a desmontagem do conjunto tensionador/anel e efetuou-se nova medição dos diâmetros, a fim de identificar se havia ocorrido de deformação permanente. Na Tabela 4.9 são apresentados as medidas de todos os diâmetros dos corpos-de-prova tipo anel antes da montagem, durante o tensionamento e após a desmontagem.

Tabela 4.9 - Medidas dos anéis antes do tensionamento, quando tensionados e após remoção da carga.

Identificação	Medida pré-montagem (mm)		Medida montado (mm)		Medida após desmontagem (mm)	
	máx	mín	máx	mín	máx	mín
CnzAn-1	37,94	37,94	37,87	37,50	37,93	37,85
CnzAn-2	37,93	37,93	38,87	37,67	37,93	37,92
CnzAn-3	37,95	37,95	37,87	37,67	37,95	37,94
CnzAn-4	37,94	37,94	37,89	37,66	37,94	37,94
CnzAn-5	37,94	37,94	37,88	37,66	37,94	37,93
NodAn-1	37,94	37,94	37,94	37,70	37,94	37,94
NodAn-2	37,95	37,95	37,95	37,64	37,95	37,94
NodAn-3	37,94	37,94	37,95	37,68	37,94	37,93
NodAn-4	37,94	37,94	37,95	37,69	37,94	37,93
NodAn-5	37,94	37,94	37,95	37,69	37,94	37,94

Visto que o corpo-de-prova destinado à aplicação de pré-tensão tem dimensões diferentes daquelas originalmente projetadas para o equipamento e que o sistema de aplicação de carga deve ficar no interior da câmara de ensaio, houve a necessidade de introduzir-se um novo componente, um acoplamento entre o corpo-de-prova e a pista inferior do rolamento 54206U. Na Figura 4.10 podem ser visualizadas as etapas da montagem do conjunto.

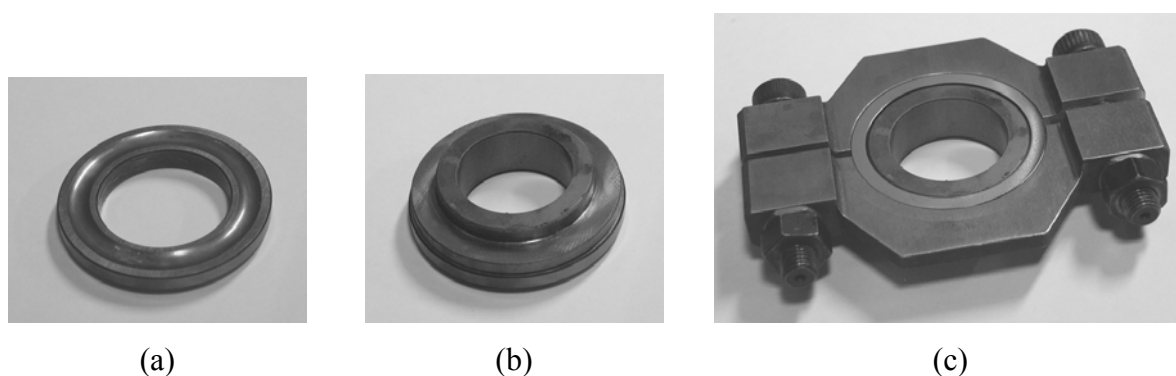


Figura 4.10 - Etapas da montagem do corpo-de-prova com tensionador: pista inferior (a); pista e bucha de acoplamento (b); conjunto corpo-de-prova/bucha/pista montado (c).

#### **4.6 Simulação das tensões desenvolvidas nos corpos-de-prova tipo anel usando modelagem por elementos finitos**

Foi utilizado o software Abaqus® de modelagem e análise por elementos finitos para estimar a magnitude das tensões impostas ao corpo-de-prova pela ferramenta de compressão. Para tanto, foi criado um modelo 2D da ferramenta de compressão e do corpo-de-prova e das cabeças dos parafusos de aperto. O modelo pode ser visto na Figura 4.11. Para os materiais do tensionador, aço D2, e do corpo-de-prova foram atribuídos os módulos de elasticidade de 210 e 164 GPa, respectivamente, e supôs-se que os esforços aplicados geram apenas deformações no campo elástico. Para o tensionador foi usada uma malha com 501 nós e 424 elementos, já para no anel a malha utilizada possuía 288 nós e 235 elementos. Devido à simetria do conjunto corpo-de-prova/tensionador foi simulado apenas metade do conjunto, pois as tensões na outra metade são iguais, ao menos para efeito de simulação. O sinal de

entrada no modelo foi a aproximação (deslocamento em milímetros) que ocorre entre as duas metades da ferramenta na região de contato entre o tensionador e a cabeça do parafuso (ou porca) de aperto. A simulação foi posta em andamento com as cabeças dos parafusos deslocando-se na direção da outra metade da ferramenta. A distância deslocada foi metade da distancia de referência de 0,30 mm, ou seja, 0,15 mm.

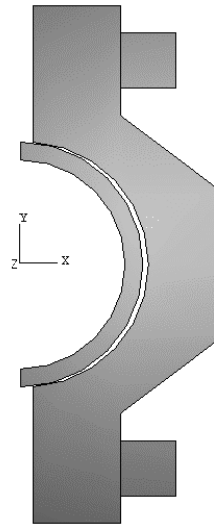


Figura 4.11 - Modelo 2D da ferramenta com o corpo-de-prova.

## 5 ESTUDO DOS FERROS FUNDIDOS: RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio de fadiga de contato de rolamento: análise do material

Neste grupo de resultados encontram-se todos os corpos-de-prova do tipo arruela, ou seja, os resultados dos ensaios com três materiais diferentes e nenhum deles submetidos ao pré-tensionamento. Na Tabela 5.1 são apresentadas as vidas em fadiga de cada ensaio realizado com os três materiais sob as condições apresentadas anteriormente, Tabela 4.5.

Assumindo-se que os resultados das vidas em fadiga podem ser descritos por uma função de Weibull de dois parâmetros, foram utilizadas as equações 2.16 e 2.17 para estimar os valores de  $\beta$  e  $\theta$ , respectivamente, parâmetro de forma e parâmetro de escala. Com isso, pode-se representar a curva de probabilidade de falha de cada um desses conjuntos de dados. Os valores de  $\beta_e$  e  $\theta_e$  são apresentados ao final da Tabela 5.1 e na Figura 5.1 podem ser vistos os pontos resultantes de cada ensaio, bem com as curvas de probabilidade de falha obtidas para cada grupo de materiais.

Tabela 5.1 - Vidas, em ciclos de carregamento, dos corpos-de-prova nos ensaios de fadiga de contato e parâmetros de Weibull para os ensaios sem pré-tensão.

Nº de ordem (i)	Ferro fundido cinzento (CznAr-i)	Ferro fundido nodular (NodAr-i)	Aço (AcoAr-i)
1	107.000	609.000	1.896.000
2	88.000	1.296.000	1.400.000
3	43.000	1.602.000	2.330.000
4	90000	1.385.000	4.690.000
5	76.000	1.584.000	4.605.000
$\beta_e$	4,8	4,8	2,4
$\theta_e$	88.638	1.421.713	3.389.140

A determinação da posição de cada ponto – dentro de um mesmo conjunto de dados – na Figura 5.1 seguiu o procedimento descrito na NBR 6742 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987), onde cada valor de vida é associado a uma probabilidade de falha, com a mesma confiabilidade. A observação das três curvas nesse gráfico deixa evidente o melhor desempenho do ferro fundido nodular frente ao ferro fundido cinzento, nas condições ensaiadas, ou seja, de solitação cíclica a elevadas cargas de contato. A vida característica do grupo de amostras de ferro fundido nodular foi 16 vezes maior que a vida característica do ferro fundido cinzento.

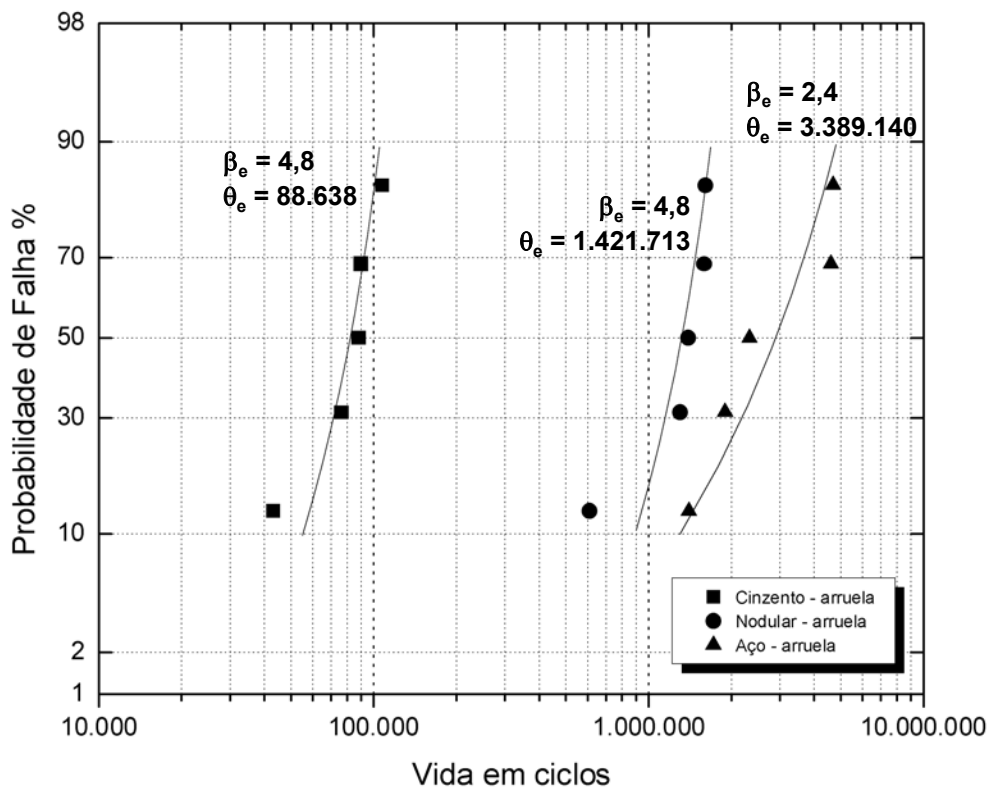


Figura 5.1 - Curvas de probabilidade de falha para os corpos-de-prova de ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e aço ensaiados sem pré-tensionamento.

Esse resultado, ao menos do ponto de vista qualitativo, não chega a ser surpreendente, pois é esperado que o desempenho em fadiga da grafita nodular seja de fato superior à grafita lamelar, afinal, a severidade dessa última maior quando está envolvida solitação de fadiga.

Essa severidade está relacionada não apenas a sua maior capacidade de concentrar tensões, mas também por oferecer um caminho mais curto a propagação de trincas que o ferro fundido nodular.

Do ponto de vista quantitativo, esses resultados ainda são insuficientes para serem diretamente aplicados a projetos mecânicos. No caso específico do ferro fundido cinzento, esses resultados são ainda mais solitários que os do ferro nodular, pois quase nada é encontrado a respeito de solicitação de fadiga de contato de rolamento aplicada a esse material.

O aço fundido apesar da dureza inferior a da matriz dos ferros fundidos e apresentando microvazios originados na solidificação da liga, Figura 5.2, ainda assim apresentou média superior à do ferro fundido nodular.

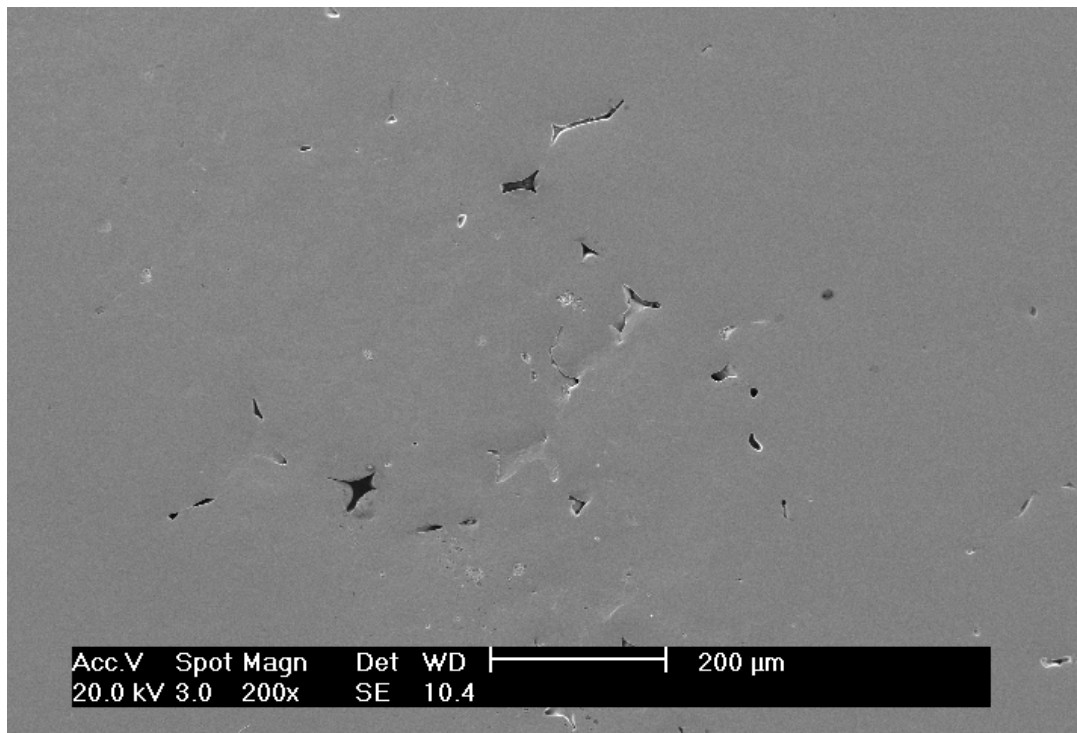


Figura 5.2 - Trilha de rolamento do corpo-de-prova **AcoAr-01** com presença de vazios originados na solidificação da liga.

Além da evidente diferença entre vidas sob fadiga dos dois tipos de ferros fundidos, um segunda característica chama a atenção nos resultados apresentados na Figura 5.1, a similaridade na distribuição dos tempos de vida de ambos os materiais. Em outras palavras, a

inclinação das duas curvas é muito semelhante, o que matematicamente é representado pelo parâmetro  $\beta$  da distribuição de Weibull. Esta inclinação representa não apenas a magnitude da relação entre as vidas do corpo-de-prova de maior e menor durabilidade, mas também a forma como a taxa de falha cresce na medida em que a vida dos corpos-de-prova torna-se mais longa. A igualdade entre os valores de  $\beta$  é também explicitada na Tabela 5.1.

Posto que a taxa de mortalidade de amostras cresce igualmente com o aumento da vida em ambos os ferros fundidos, pode-se ainda supor que a menor vida média apresentada pelo ferro fundido cinzento deva-se à nucleação antecipada de trincas nesse material quando comparado ao ferro nodular.

Por fim, do ponto de vista do funcionamento do equipamento pode-se dizer que os resultados aprestados na Figura 5.1 confirmam a sua capacidade em distinguir materiais e repetir resultados.

## **5.2 Ensaio de fadiga de contato: efeito da pré-tensão**

### **5.2.1 As tensões no modelo de elementos finitos**

Na Figura 5.3 pode-se ver a distribuição de tensões de von Mises (que representa esforço cisalhantes) para no corpo-de-prova tipo anel segundo as condições apresentadas no item 4.6. Já na Figura 5.4 e na Figura 5.5 podem ser vistos, respectivamente, detalhes das tensões no corpo-de-prova próximo a região central do tensionador e próximo a sua bipartição. Nesses detalhes é possível verificar que há uma faixa central, sentido da largura do corpo-de-prova, onde as tensões mantêm-se aproximadamente constantes, em torno de 350 MPa.



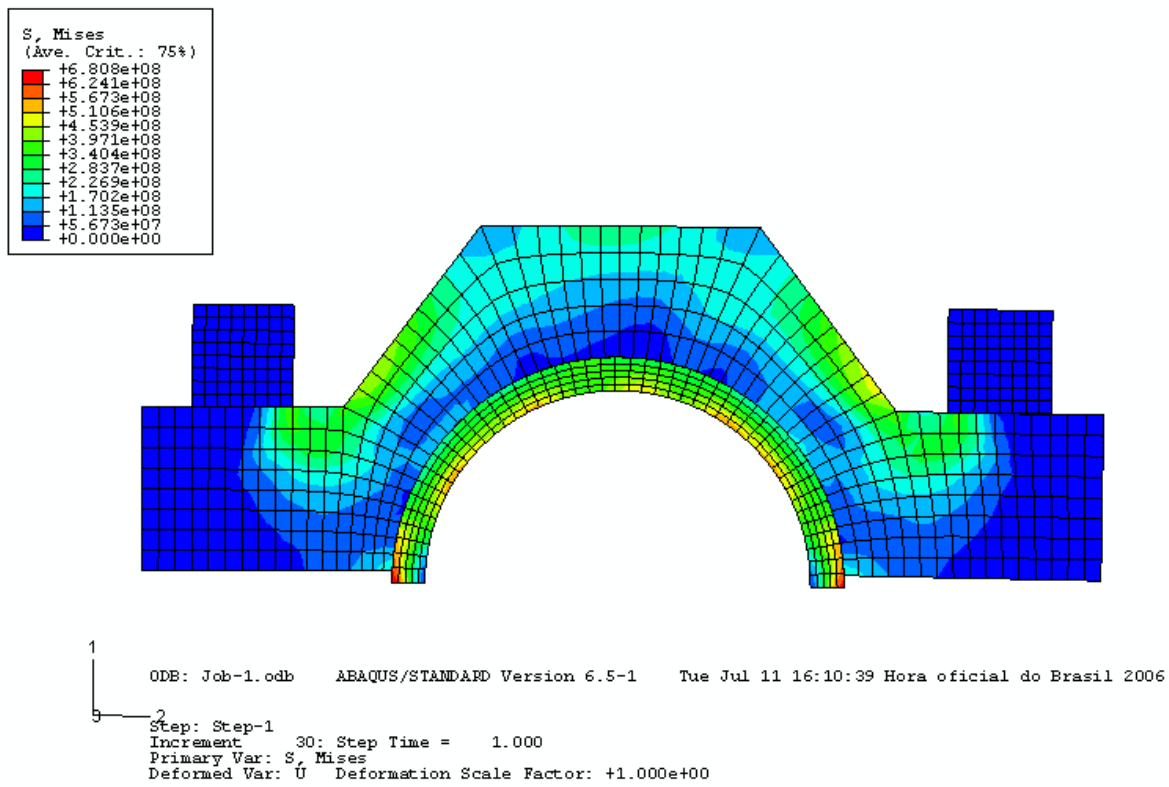


Figura 5.3 – Distribuição de tensões de von Mises no corpo-de-prova tipo anel.

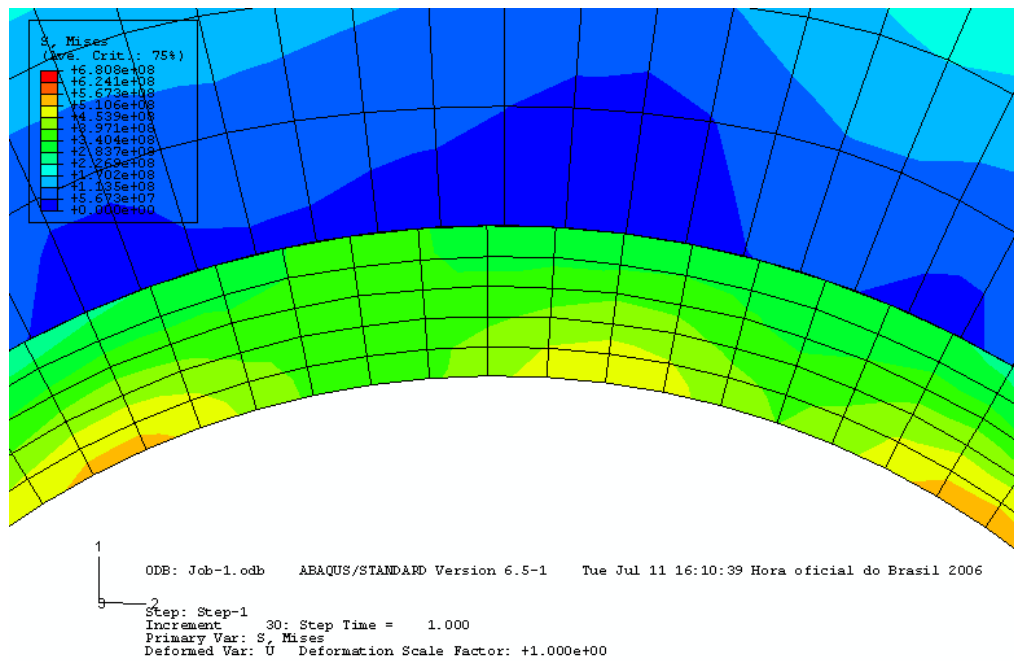


Figura 5.4 - Detalhe das tensões de von Mises na região central do corpo-de-prova.

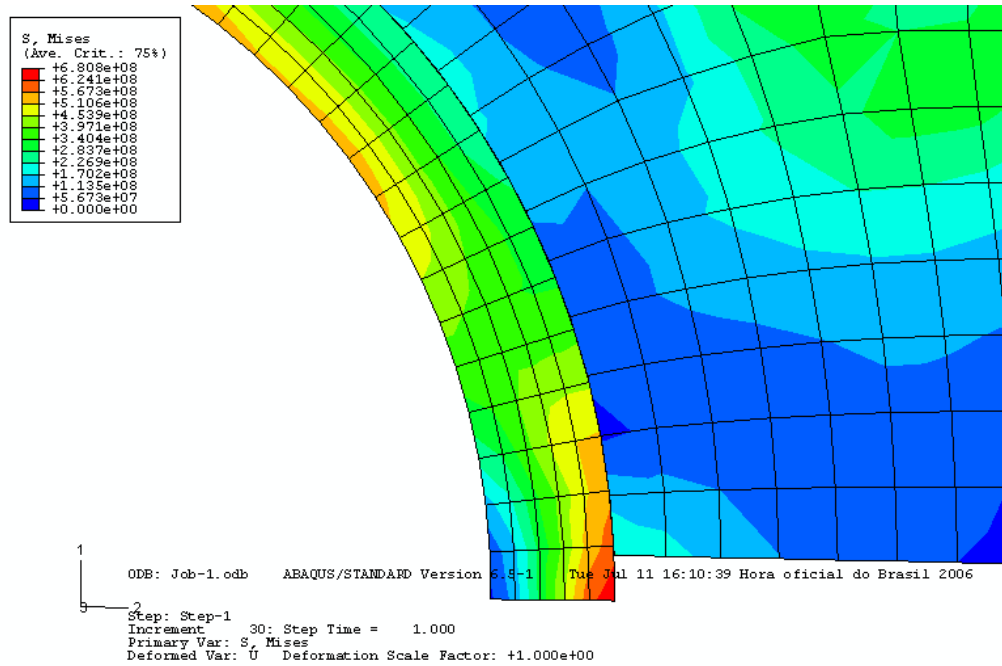


Figura 5.5 – Detalhe das tensões de von Mises na região próxima a bi-partição do tensionador.

As tensões principais máximas e mínimas podem ser vistas na Figura 5.6, onde observa-se que o anel está quase integralmente sob compressão. O modelo de elementos finitos indica que na região central do anel, onde se localiza a trilha de rolamento, as tensões variam de valores negativos próximos a zero a valores compressivo da ordem de 500 MPa, que por definição aparecem com sinal negativo nas Figuras. Detalhes das tensões principais máximas e mínimas podem se vistas na Figura 5.7, no centro do tensionador, e na Figura 5.8, região próxima a bi-partição.

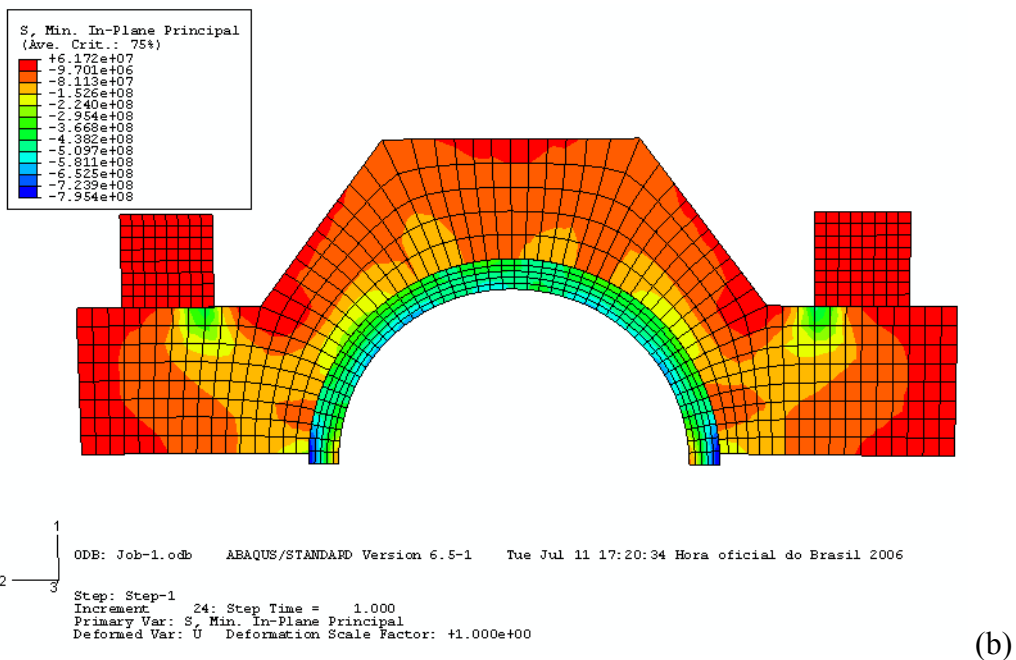
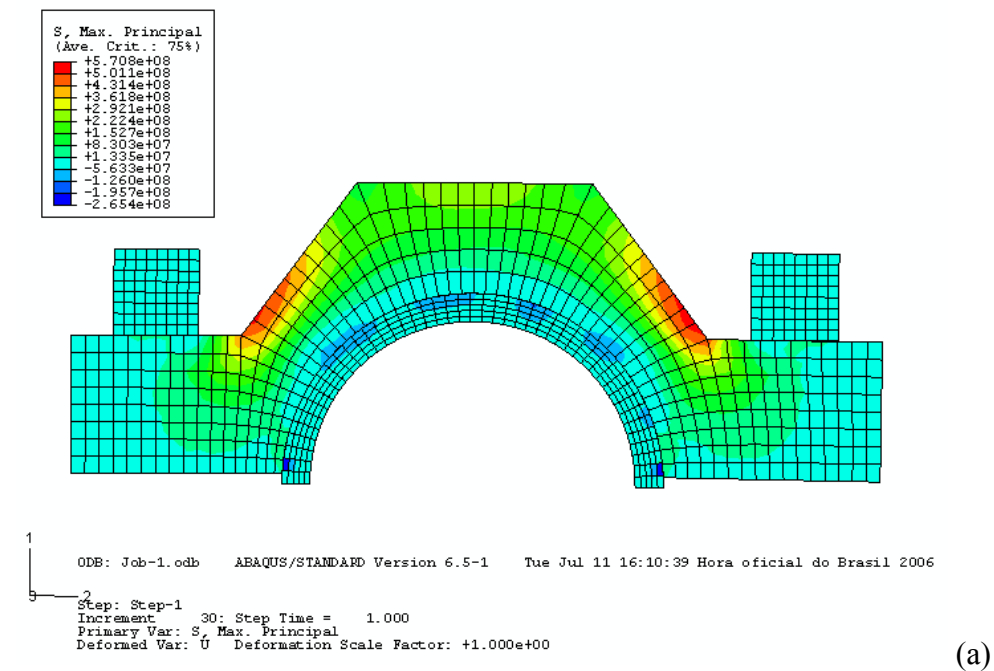
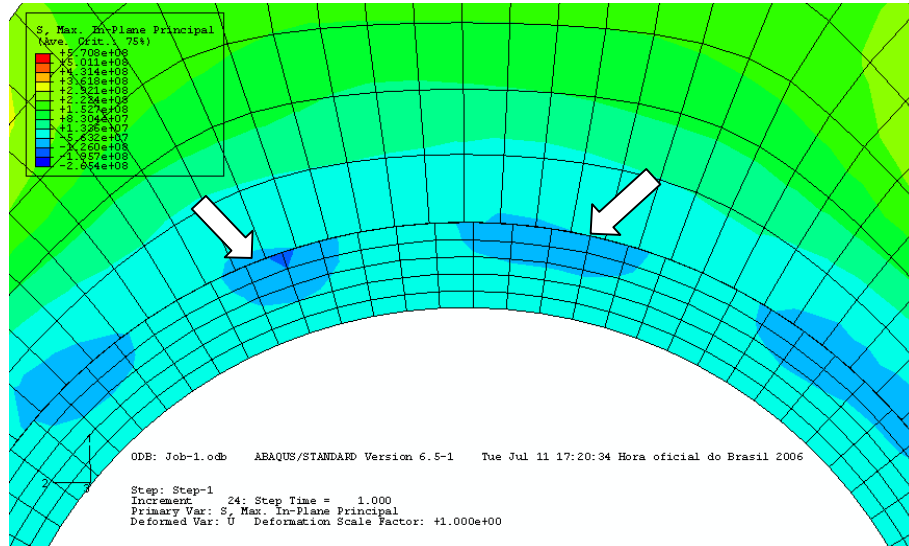


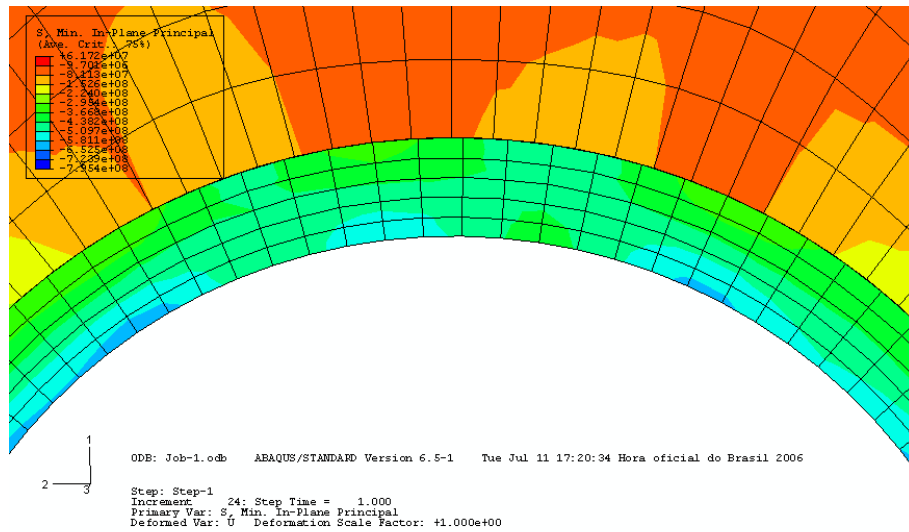
Figura 5.6 - Tensões principais máximas (a) e mínimas (b) no anel comprimido.

Um aspecto importante observado nestas simulações é que existem, como indicado pelas setas na Figura 5.7a, regiões onde ocorre concentração de tensão na interface tensionador/anel. Esse efeito é na realidade uma anomalia produzida pelo insuficiente refinamento da malha na região de contato entre as duas peças, fazendo com que a transmissão do esforço fique concentrada em alguns pontos. Em regiões mais distantes da interface há a

tendência de equalização da tensão para valores representativos da realidade, como ocorre na região central da trilha situada entre os locais de concentração de tensão.



(a)



(b)

Figura 5.7 - Detalhe das tensões principais máximas (a) e mínimas (b) no anel comprimido, próximo a região central do tensionador.

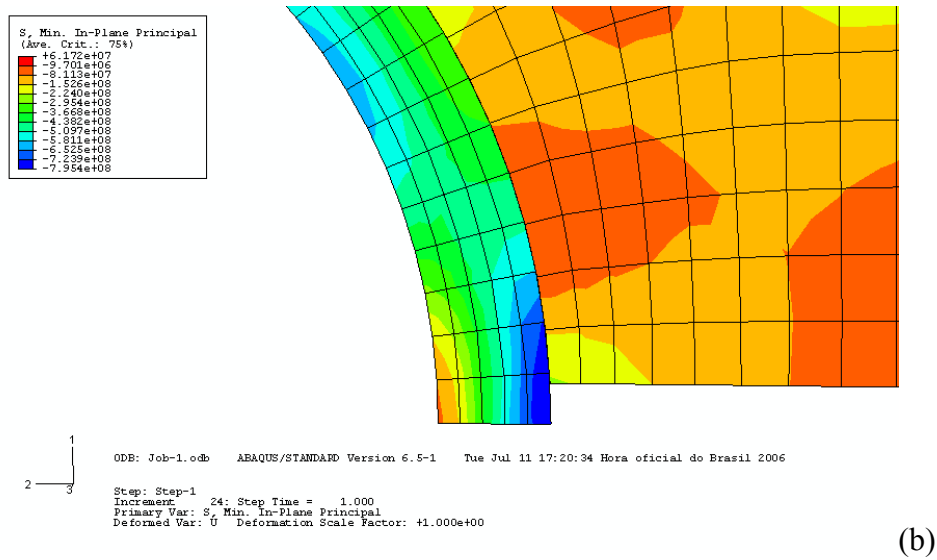
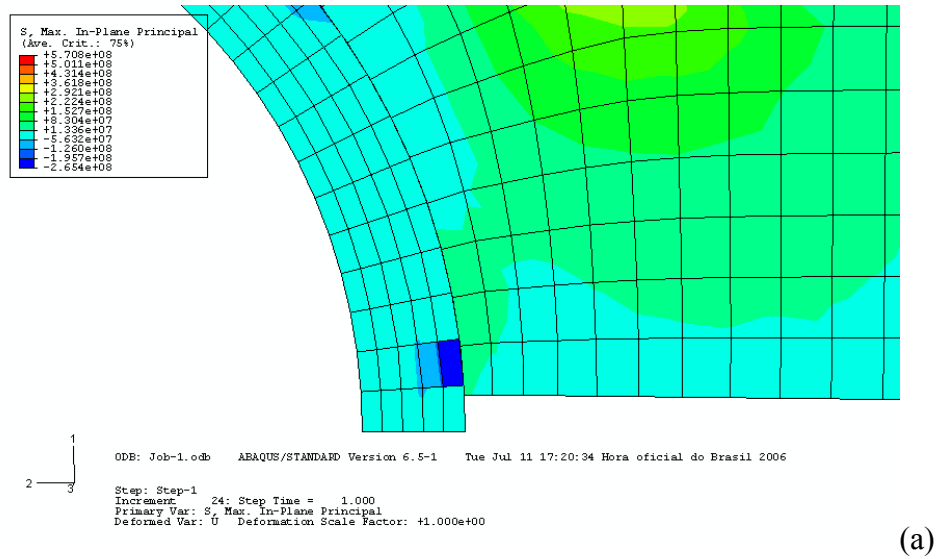


Figura 5.8 - Detalhe das tensões principais máximas (a) e mínimas (b) no anel comprimido, próximo a região de bi-partição do tensionador.

## 5.2.2 Durabilidade dos materiais ensaiados

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados de vida em fadiga dos dois grupos de corpos-de-prova ensaiados com pré-tensionamento. Ao final da Tabela também são indicados os valores de  $\beta$  e  $\theta$  calculados para as duas distribuições de falhas. Esses resultados demonstram novamente o desempenho superior do ferro fundido nodular frente ao cinzento, sendo que o primeiro apresentou uma vida média 26 vezes superior ao segundo.

Tabela 5.2 - Vidas, em ciclos de carregamento, dos corpos-de-prova nos ensaios de fadiga de contato e parâmetros de Weibull para os ensaios com pré-tensão.

Nº de ordem (i)	Ferro fundido cinzento (CznAn-i)	Ferro fundido nodular (NodAn-i)
1	95.000	3.249.000
2	26.000	1.695.000
3	65.000	2.425.000
4	49.000	769.000
5	79.000	191.000
$\beta_e$	3,0	1,4
$\theta_e$	70.554	1.811.667

A comparação mais interessante, no entanto, é a que se pode fazer entre os corpos-de-prova de mesmo material ensaiados com e sem compressão. É claro da comparação entre a Tabela 5.1 e a Tabela 5.2 que as vida médias de dos ferros fundidos cinzento com e sem compressão são muito próximas, assim como o são as vidas dos ferros fundidos nodulares.

No entanto, analisando os resultados de  $\beta_e$  percebe-se que esse parâmetro apresentou uma variação bem maior quando a pré-tensão foi aplicada ao ferro fundido nodular do que quando aplicada ao cinzento. Considerando o pré-tensionamento como um “tratamento” sob investigação, assim como seria a utilização de diferentes cargas ou lubrificantes, pode-se aplicar aos resultados obtidos para essas duas condições de ensaio o teste estatístico apresentado por McColl (1981) para determinação de equivalência entre os parâmetros de forma calculados a partir de distribuições que obedecem à distribuição de Weibull. A relação  $\beta_{e-max} / \beta_{e-min}$  para o ferro cinzento,  $4,8 \div 3,0$ , é igual a 1,6. Consultando a Tabela 2.1 (página 42) pode-se dizer que não há evidencia de que estes resultados sejam diferentes, mas analisando a relação  $\beta_{max} / \beta_{min}$  do ferro fundido nodular, ou seja,  $4,8 \div 1,5$ , chegamos a 3,2, o que nos permite afirmar, com 90% de confiança, que a os parâmetros de forma das duas distribuições são diferentes.

As comparações entre as distribuições dos diferentes ferros fundidos com e sem pré-tensionamento podem ser melhor visualizadas na Figura 5.9 e na Figura 5.10.

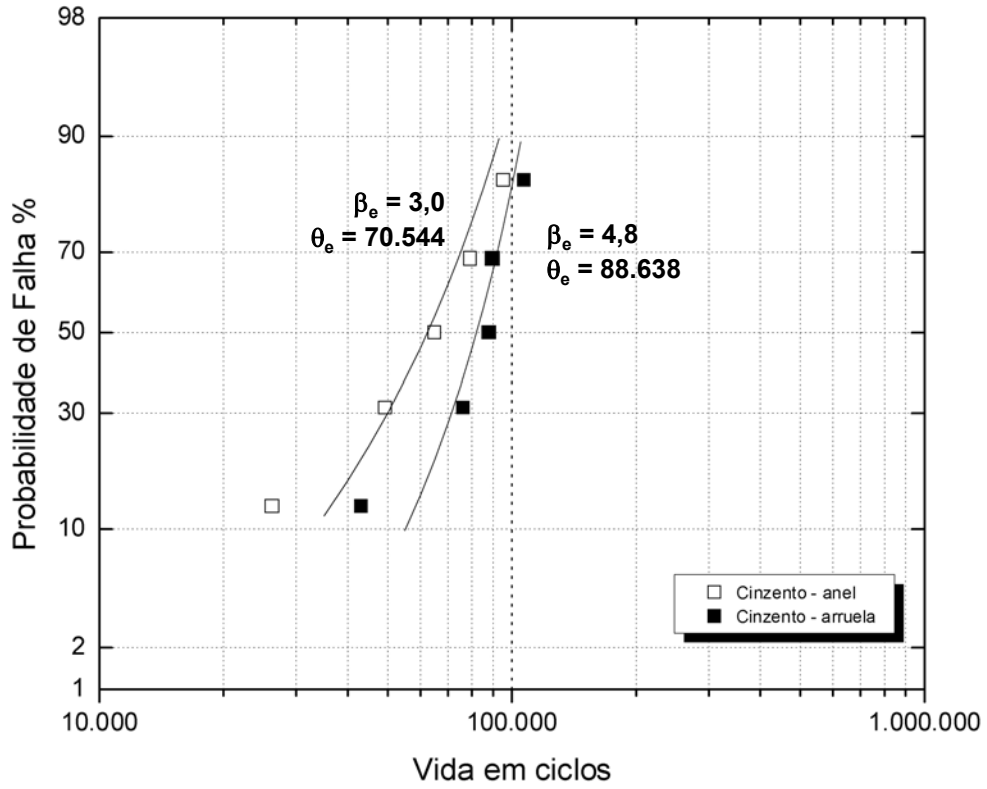


Figura 5.9 - Curvas de probabilidade de falha para as amostras de ferro fundido cinzeno com (anel) e sem pré-tensionamento (arruela).

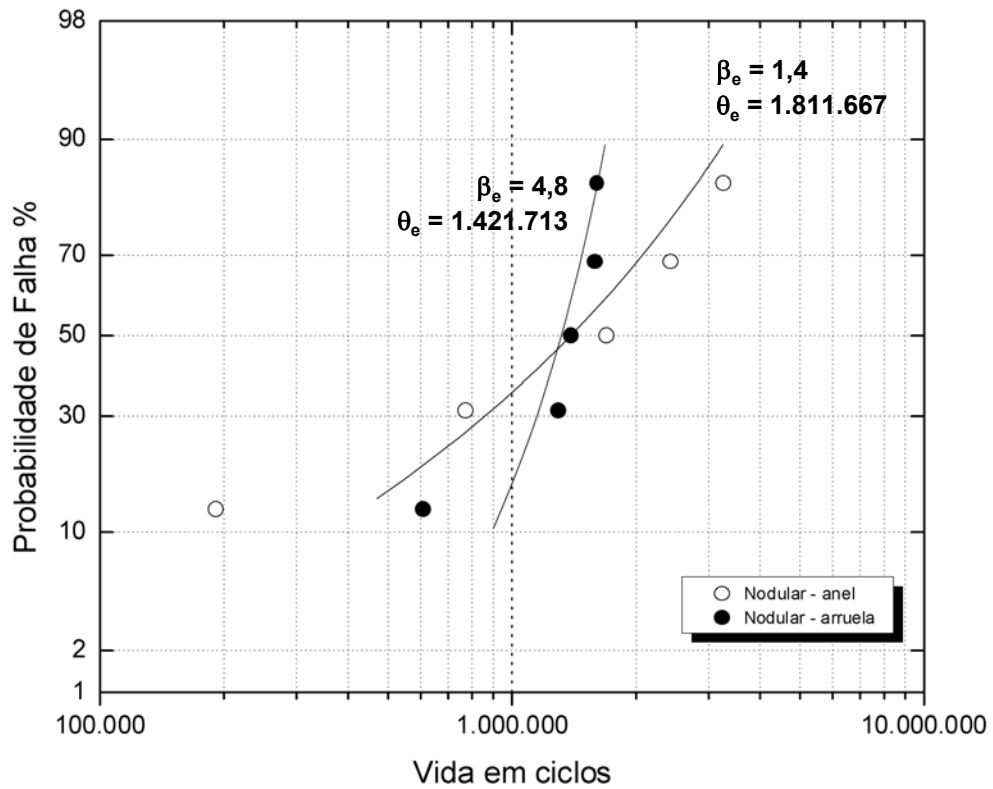


Figura 5.10 - Curvas de probabilidade de falha para as amostras de ferro fundido nodular com (anel) e sem pré-tensionamento (arruela).

De fato, a imposição de tensão prévia parece não ter afetado a distribuição de falhas do ferro fundido cinzento, mas alterou fortemente a distribuição do ferro fundido nodular. A seguir, estes resultados serão analisados à luz das observações microestruturais.

### **5.3 Observação do dano e aspectos microestruturais**

A medida em que se sucederam as falhas nos ensaios de fadiga de contato, teve-se o cuidado de observar se os danos produzidos eram do mesmo tipo, pois essa é uma premissa para que os dados possam ser analisados como pertencentes a uma distribuição descrita pelas equações de Weibull.

Na Figura 5.11 pode ser observada a vista de topo de uma região lascada em um corpo-de-prova de ferro fundido cinzento. A seguir, na Figura 5.12 tem-se o corte transversal do lascamento da Figura 5.11, no sentido da trilha de rolamento. Observando com maior ampliação as bordas do defeito, como apresentado na Figura 5.13, nota-se a que houve a formação de múltiplas trincas próxima a região de falha, indicando que o processo de falha do ferro fundido cinzento conta com uma taxa de nucleação de defeitos bem superior ao ferro nodular.

Voltando a Figura 5.11 percebe-se que a grafita na trilha de rolamento foi completamente removida. Com maior ampliação isso fica mais evidente na Figura 5.14. A saída de grafita dos veios provavelmente tem forte influência na nucleação de trincas a partir da superfície, pois esses vazios podem ser pressurizados com lubrificante quando ocorre a passagem da esfera.



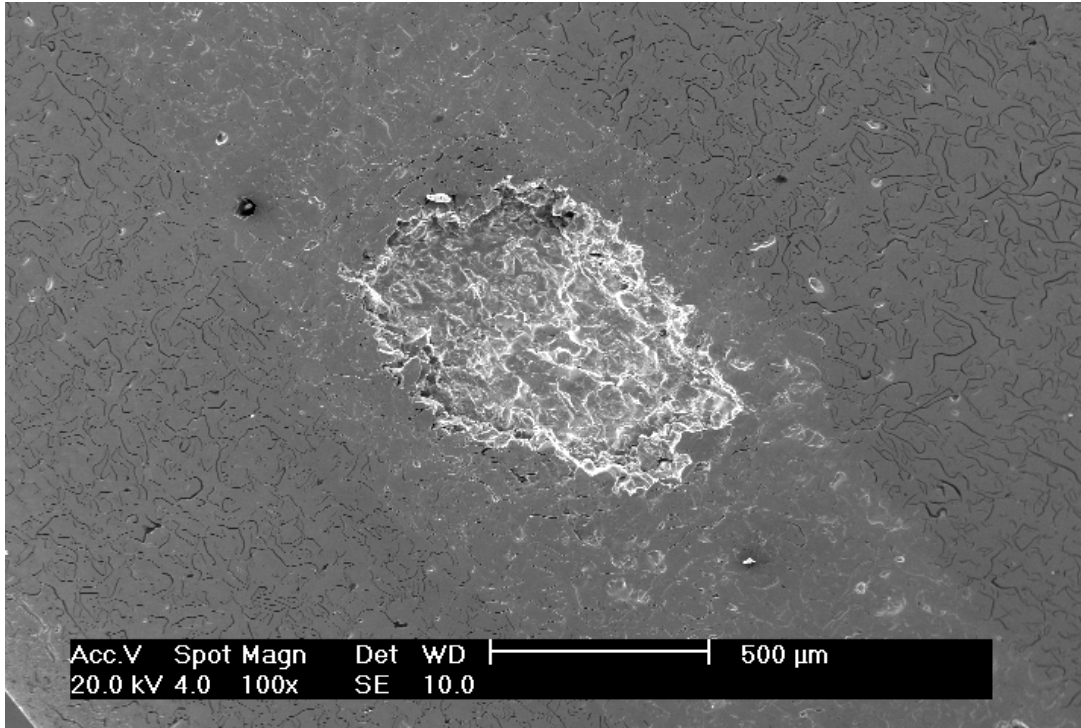


Figura 5.11 -Vista de topo do lascamento ocorrido no corpo-de-prova **CznAn-2**. O movimento da esfera foi de cima para baixo.

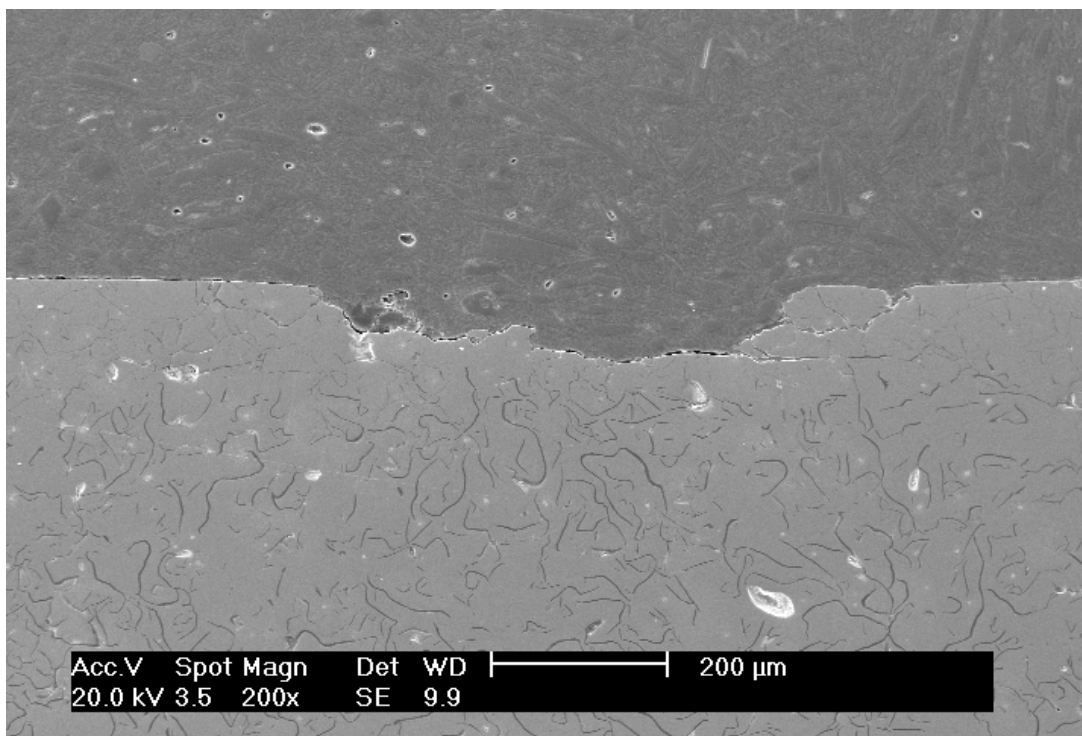


Figura 5.12 - Secção transversal, longitudinal a trilha de rolamento no local de lascamento do corpo-de-prova **CznAn-2**. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita.

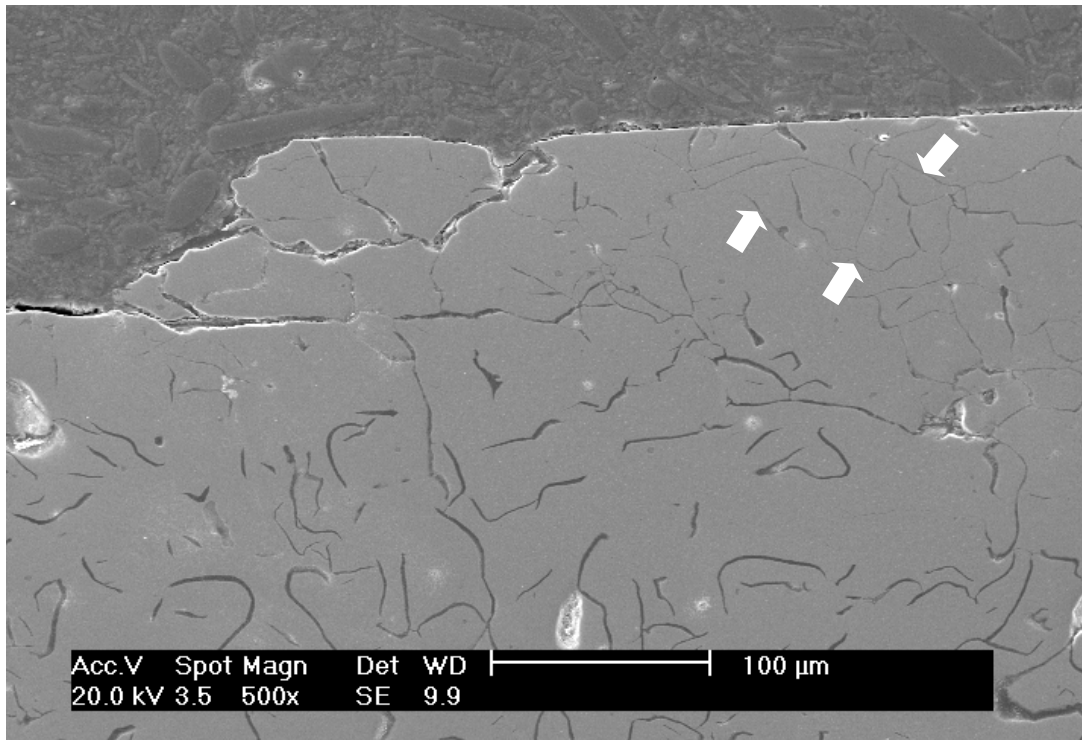


Figura 5.13 - Secção transversal, longitudinal a trilha de rolamento no local de lascamento do corpo-de-prova **CznAn-2**, com maior aumento que imagem anterior. Percebe-se a formação de múltiplas trincas a frente do defeito (setas). O movimento da esfera foi da esquerda para a direita.

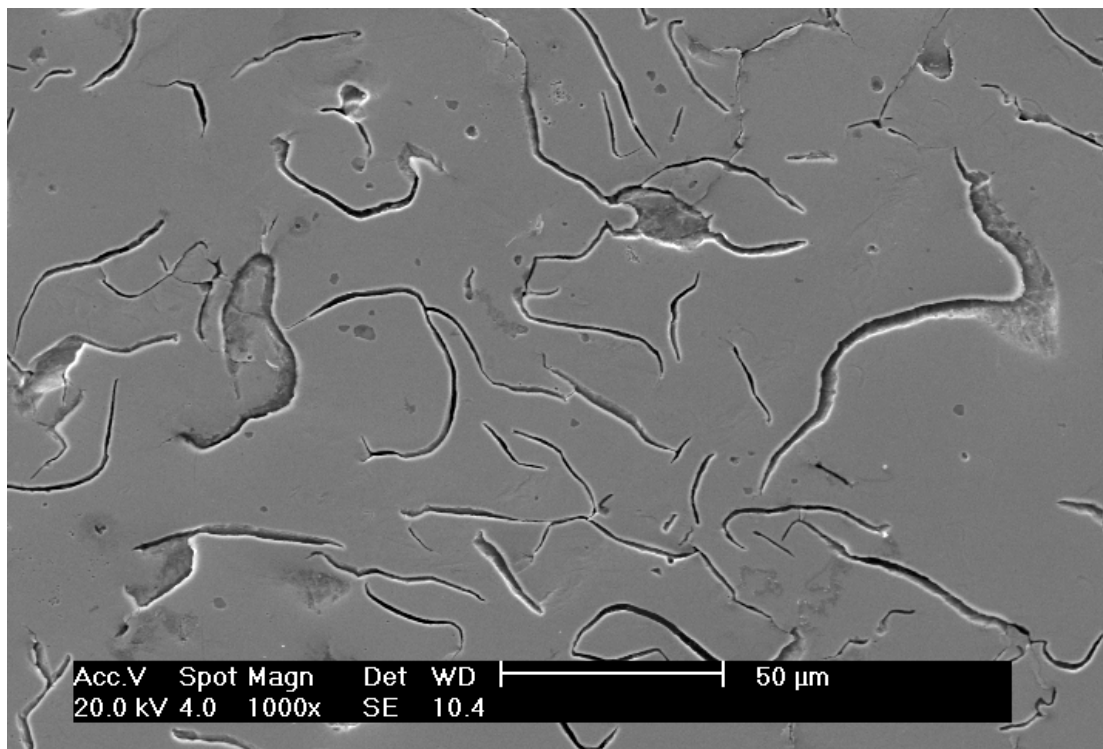


Figura 5.14 - Detalhe da remoção de grafita na trilha de rolamento. Amostra **CznAn-2**.

Analisando um seccionamento ortogonal a trilha de rolamento na amostra **CznAr-2** em uma região não falhada, Figura 5.15, é possível identificar a formação de uma grande trinca na profundidade aproximada de 100  $\mu\text{m}$ , o que coincide com a profundidade da máxima tensão de Hertz. Essa constatação evidencia que o mecanismo clássico de nucleação e crescimento de trinca subsuperficial também estava concorrendo para a ocorrência da falha. A respeito de profundidade de trinca, retornado à Figura 5.12, também percebe-se a concordância entre a profundidade da máxima tensão de Hertz e o defeito observado. Esse resultado evidencia a capacidade do equipamento em reproduzir, em movimento, um carregamento muito similar ao carregamento estático de uma esfera sobre um plano. Outro aspecto importante é que, nas condições empregadas nesse trabalho, a hipótese de Hertz de que as tensões na região de contato devem ser tratadas a parte da distribuição geral de tensões nos corpos em análise mostrou-se desnecessária, pois tanto o defeito no corpo-de-prova pré-tensionado quanto no sem tensão exibiram profundidades máximas previstas pelo modelo por seu modelo.

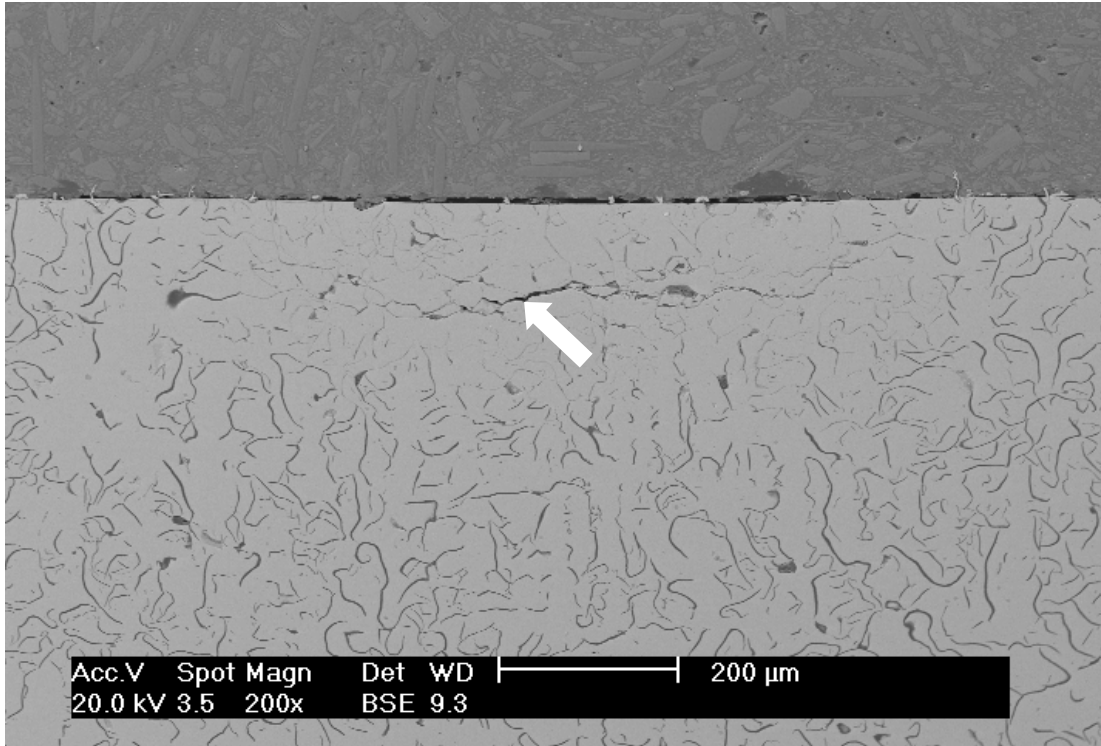


Figura 5.15 - Secção transversal, ortogonal a trilha de rolamento, da amostra **CznAr-2**, mostrando trinca subsuperficial (seta). A esfera está rolando para dentro da página e o centro da trilha corresponde ao centro da figura.

Analisando-se agora o mecanismo de desgaste do ferro fundido nodular, vê-se na Figura 5.16 e na Figura 5.17 imagens de topo da região onde ocorreu o lascamento da trilha em dois corpos-de-prova, na primeira **NodAr-2** e a segunda do **NodAn-2**. Em ambas figuras é bastante perceptível a remoção da grafita presente na trilha de rolamento. Esse fato já foi observado nesse trabalho para o ferro cinzento e em trabalhos de outros autores para o ferro fundido nodular (MAGALHÃES, 2000; LEITE, 2005).

Após a observação dos danos nesses e em outros corpos-de-prova notou-se que invariavelmente na região próxima a falha os nódulos de grafita apresentavam dimensões maiores que aqueles encontrados na posição diametralmente oposta da trilha de rolamento. Isso ocorreu tanto para os corpos-de-prova na forma de arruelas, como para os anéis.

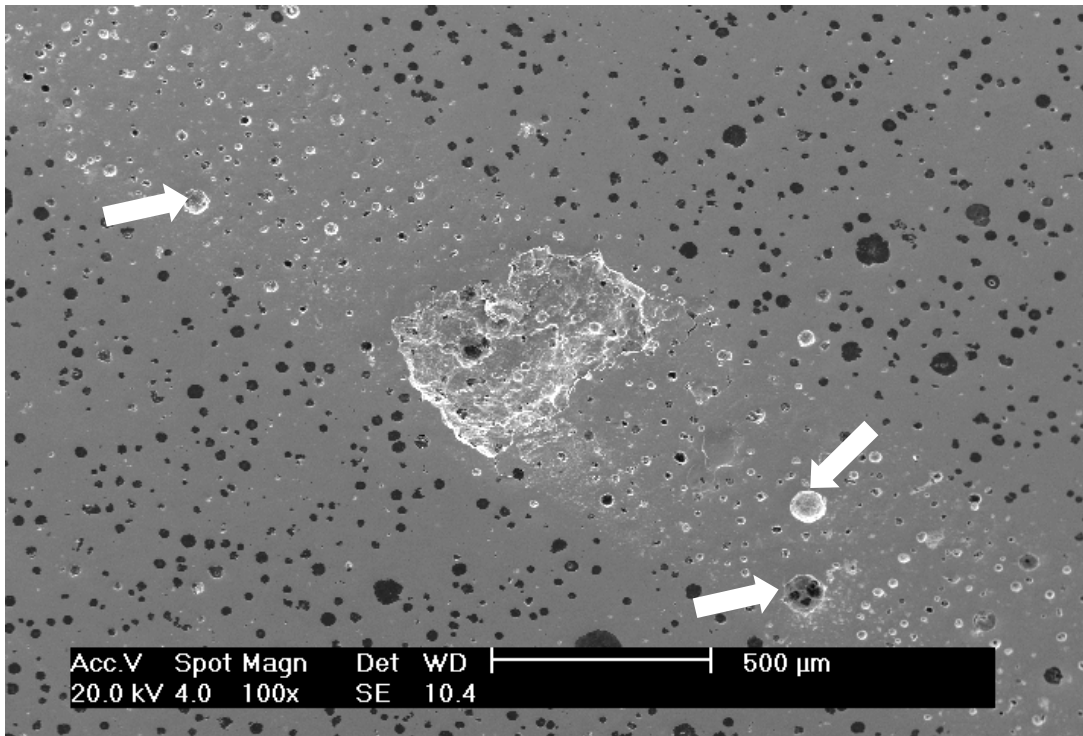


Figura 5.16 - Vista de topo do lascamento ocorrido no corpo-de-prova **NodAr-2**. As setas indicam locais onde houve arrancamento de grafita da trilha de rolamento. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita.

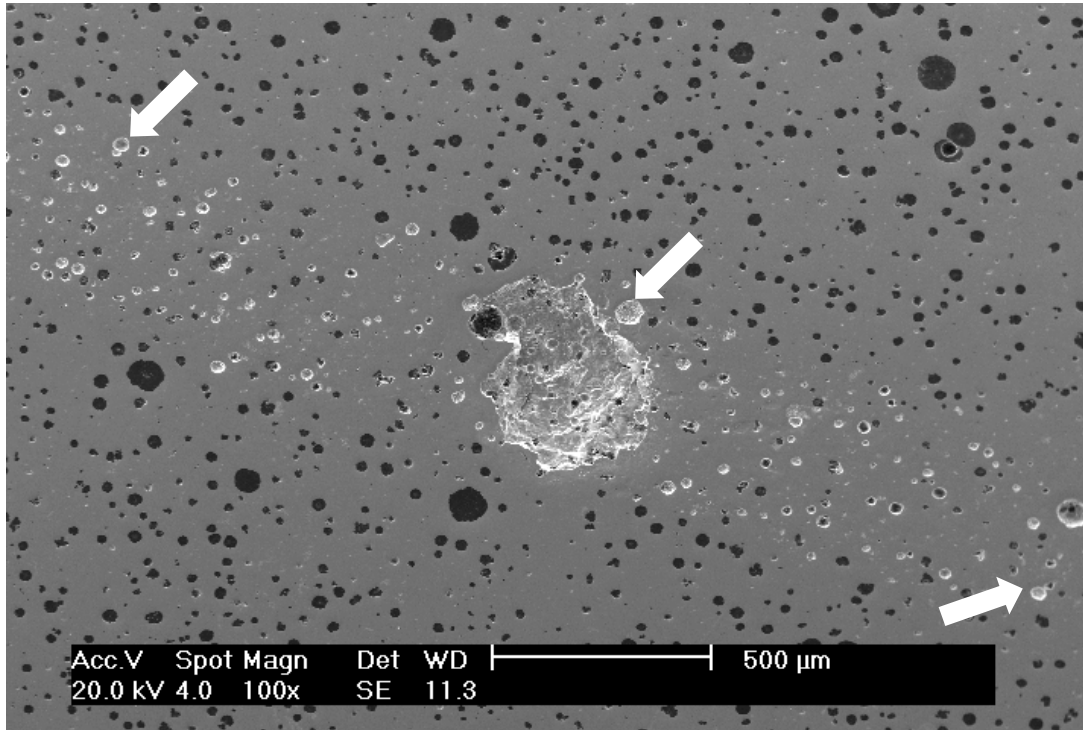


Figura 5.17 - Vista de topo do lascamento ocorrido no corpo-de-prova **NodAn-2**. As setas indicam locais onde houve arrancamento de grafita da trilha de rolamento. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita.

Na Figura 5.18 são exibidos três pares de imagens de regiões próximas e distantes do local de ocorrência do lascamento da superfície.

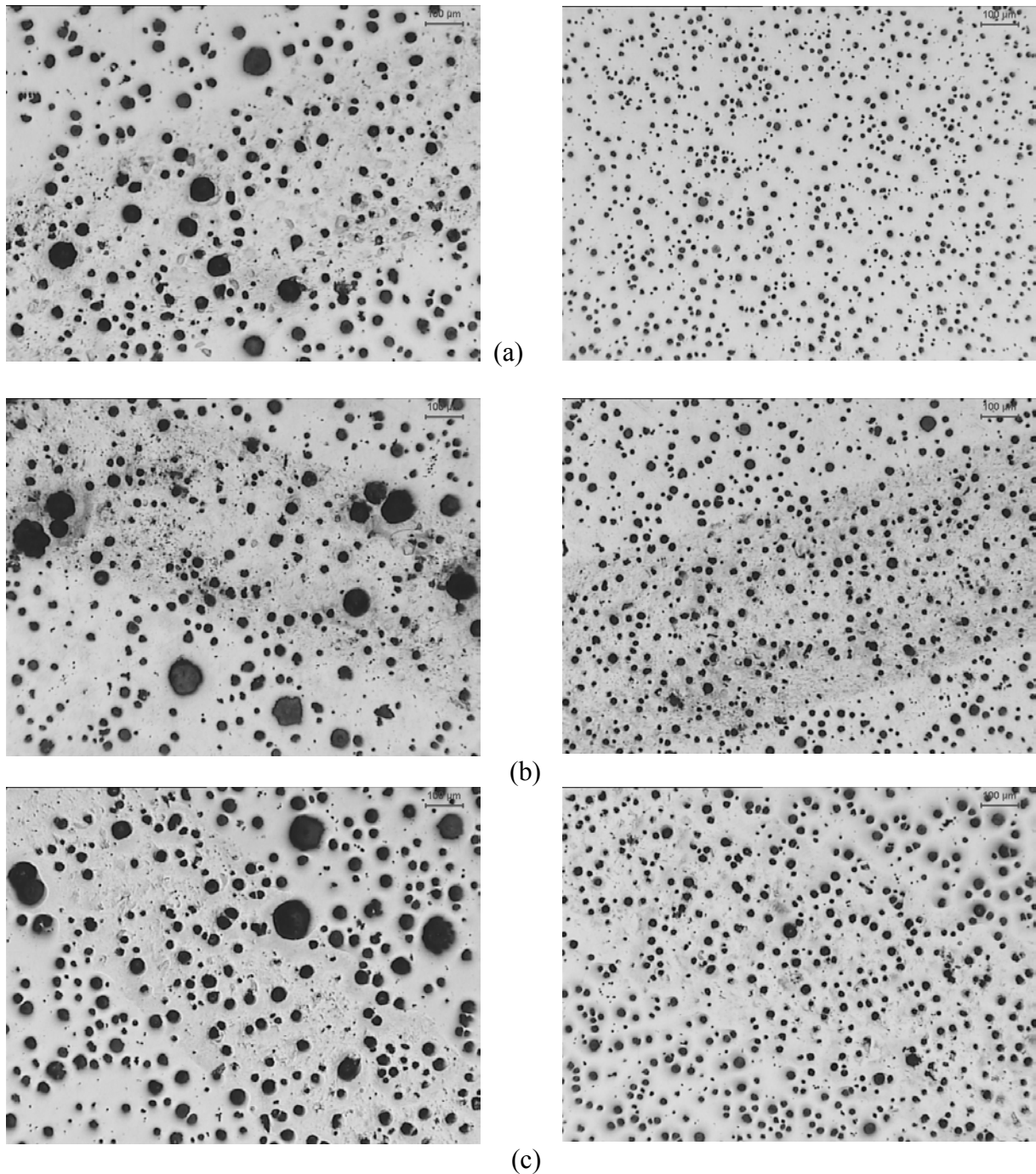


Figura 5.18 - Diferença entre os tamanhos das grafitas nas regiões próximas a falha por fadiga de contato (fotos da esquerda) e nas regiões diametralmente opostas (fotos da direita) nos corpos-de-prova NodAr-3 (a) NodAr-5 (b) e NodAn-1 (c).

O fato do lascamento da trilha de rolamento ter ocorrido em regiões com nódulos de grafita de maiores dimensões concorda com o extenso trabalho de Dommarco et al. (2006), no qual os autores estudam, em um equipamento de concepção similar ao utilizado nesse trabalho, o efeito de diferentes relações entre o diâmetro de contato esfera/amostra,  $C_d$ , (usando esferas de tamanhos diferentes) e o diâmetro médio dos nódulos,  $N_d$ , de amostras com três diferentes tamanhos de grafita (obtidas por diferença na velocidade de solidificação) sobre a resistência a fadiga de ferros fundidos nodulares austemperados. Nesse trabalho, Dommarco et al. (2006) atribuem o pior desempenho sob fadiga de contato de rolamento às relações mais baixas de  $C_d/N_d$  ao fato de haver um pico de tensão nas bordas de uma cavidade grafita quando o elemento rolante passa sobre o nódulo. Os autores sustentam essa conclusão baseados em um modelo de 2 dimensões de Gupta et al.(1995) no qual os picos de tensão nas bordas de uma indentação causada por contaminantes são tão mais elevados quanto maior for a largura da marca deixada, desde que se mantenha o valor do diâmetro de contato constante. Não há, contudo no trabalho experimental de Dommarco et al. (2006) evidência de iniciação de trinca em bordas de cavidades de nódulos. Além disso, a geometria de uma indentação pode ser bastante diferente da geometria de um vazio deixado por um nódulo de grafita, pois no segundo não há razão para a formação de bordas mais elevadas que o nível original da superfície, como pode ocorrer no primeiro caso.

Um aspecto importante da concordância entre os resultados desse trabalho com os de Dommarco et al (2006) reside na diferença entre as tensões máximas empregadas naquele, 1,6 GPa, e nesse trabalho, 3,6 GPa. As tensões aqui empregadas, ainda que bem mais elevadas, não interferiram na sensibilidade do ferro fundido nodular ao tamanho de nódulos de grafita. Em outras palavras, 3,6 GPa, não é um nível de tensão elevado o suficiente para mascarar o efeito do tamanho dos nódulos. A possibilidade de estudar essa variável em um nível de tensão mais elevado abre caminho para que os ensaios sejam mais curtos e, portanto, possam

ser gerados mais dados em menor tempo. Isso é um fator extremamente relevante, pois o principal problema em acelerar ensaios é extrapolar os limites da percepção dos fenômenos envolvidos. Nesse caso, ficou demonstrado que essa fronteira não foi ultrapassada.

Magalhães (2000), em seu trabalho sobre mecanismos de falha sob fadiga de contato em ferros fundidos nodulares austemperados, verificou que nódulos muito próximos à superfície acabam sendo expostos por perderem a fina camada de material que os separa do exterior. Seguindo o processo, as bordas da cavidade são quebradas e o nódulo acaba por ser de expulso. O autor diz ainda, que o vazio deixado por esse nódulo que estava relativamente próximo à superfície, ou por aqueles que já estão expostos no princípio do ensaio são sítios secundárias de nucleação de trincas. Por outro lado, Magalhães (2000) atribui a nódulos situados a uma profundidade um pouco maior, tipicamente 10 a 50  $\mu\text{m}$ , um maior poder de dano, pois nesse caso, após ser estabelecida a comunicação entre a cavidade do nódulo e o exterior as paredes da abertura formada não colapsam, fazendo com que a cada passagem do contra-corpo óleo possa ser pressurizado para o interior da cavidade, o que facilita a nucleação e propagação de trincas. Na Figura 5.19 é apresentada a cavidade deixada por nódulos de grafita que estavam aglomerados e que foram arrancados durante o ensaio. Como pode ser visto a remoção de material é pequena em relação ao tamanho dos nódulos que ocupavam o vazio deixado, sugerindo que existem condições para que entre em operação o mecanismo descrito do Magalhães (2000) para nódulos na profundidade crítica.



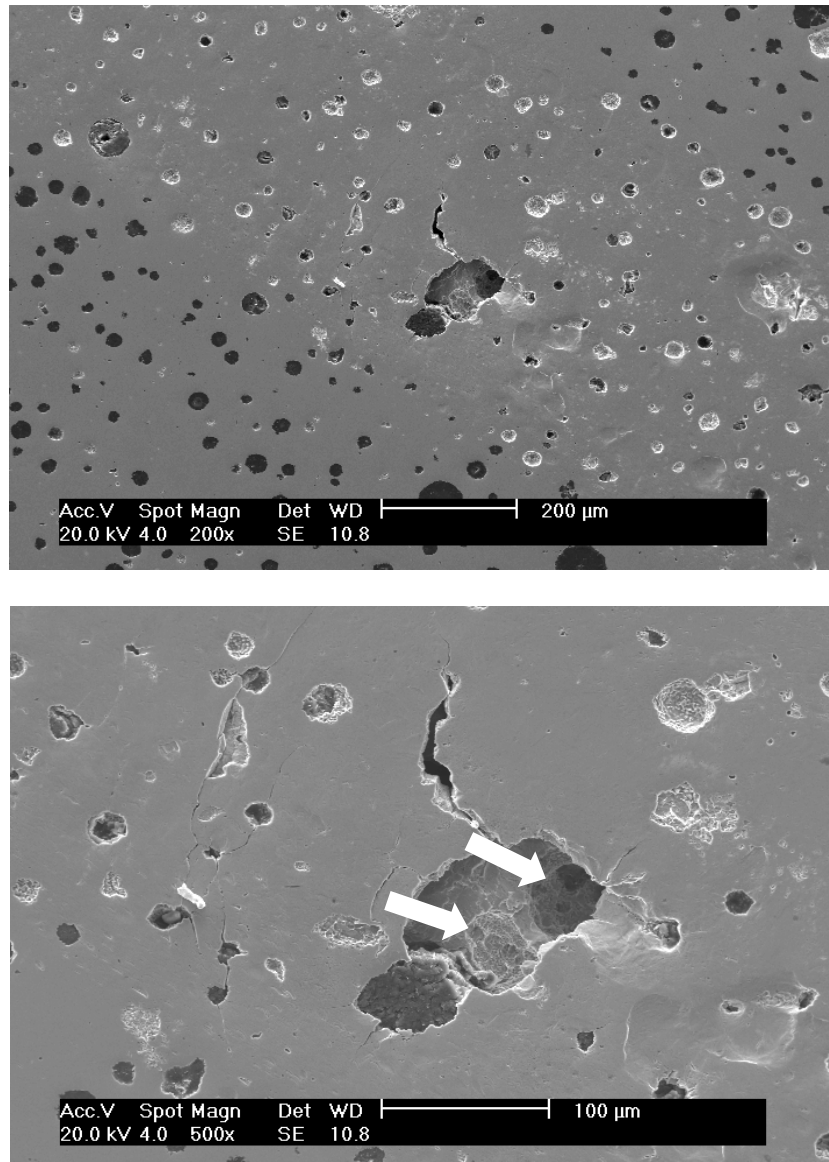


Figura 5.19 - Vista de topo de remoção de grafita em uma região próxima ao local de falha do corpo-de-prova **NodAr-2** (a) e detalhe da cavidade deixada pela grafita (b). As setas indicam locais onde houve arrancamento de grafita da trilha de rolamento. O movimento da esfera foi da esquerda para a direita.

O seccionamento da trilha no seu sentido longitudinal é apresentado na Figura 5.20 onde é possível identificar a posição de pelo menos uma grafita situada dentro da faixa crítica proposta por Magalhães (2000), a qual é indicada pela seta menor.

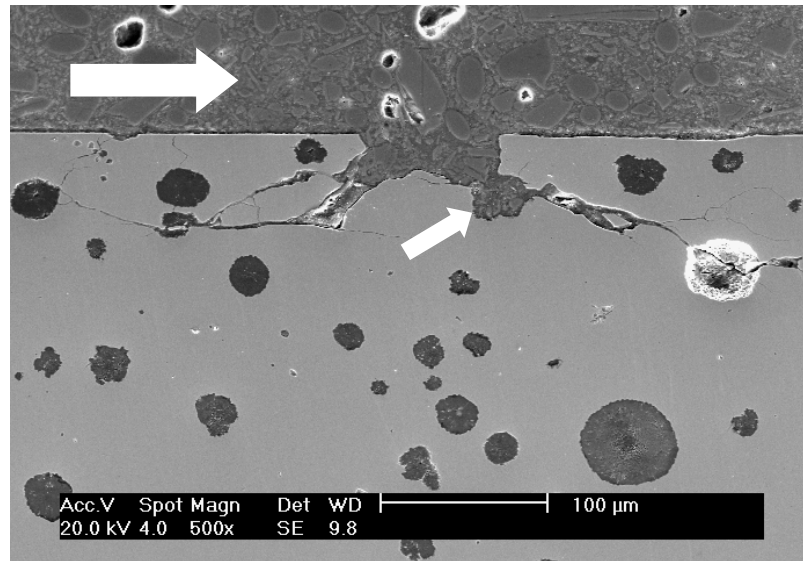


Figura 5.20 - Secção transversal longitudinal da trilha de rolamento da figura anterior. A seta maior indica a direção de rolamento da esfera sobre a superfície do corpo-de-prova e a menor a posição onde havia uma grafita.

#### 5.4 A posição dos defeitos nos ensaios com pré-tensão

Desde o princípio dos ensaios com pré-tensionamento suspeitava-se que seria muito difícil que o dispositivo de compressão fosse capaz de aplicar esforços distribuídos igualmente ao longo de toda a circunferência do anel, seja pela concepção original do conjunto, seja pelo fato que qualquer desvio da fabricação pode levar a desvios na aplicação de esforços. Os resultados da modelagem por elementos finitos apresentados no início desse capítulo demonstram que nem mesmo no modelo computacional as tensões geradas são uniformemente distribuídas, havendo pontos de concentração de tensão.

Assim sendo é necessário fazer algumas considerações que relacionem os resultados obtidos com o uso do tensionador, com a incerteza intrínseca ao uso de um dispositivo dessa natureza. Após cada ensaio tomou-se o cuidado de registrar fotograficamente a posição de cada falha ocorrida nos corpos-de-prova montados no tensionador. Ao olhar-se de frente para o conjunto corpo-de-prova/tensionador podemos dividir imaginariamente a superfície do corpo-

de-prova como se esse fosse o marcador de um relógio, conforme esquematizado na Figura 5.21.

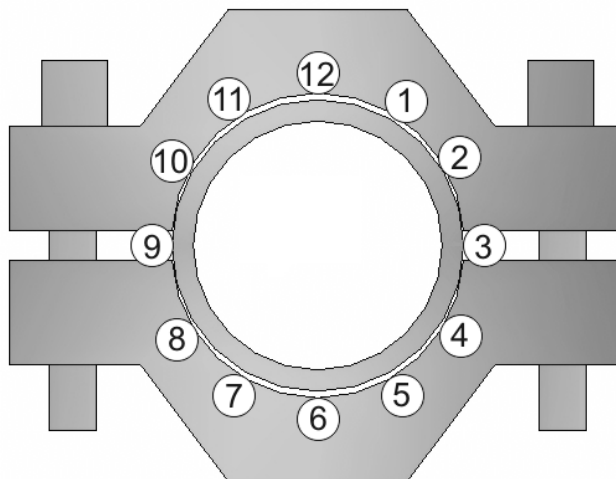


Figura 5.21 - Sistema de referência para localização da superfície do corpo-de-prova montado no tensionador.

As posições reais das falhas nos corpos-de-prova NodAn-1 e NodAn-5 são apresentadas na Figura 5.22, aos quais, segundo o sistema de referência da Figura 5.21, ocorreram nas posições 4 e 12 horas, respectivamente. Seguindo com essa associação para os demais corpos-de-prova, chegamos aos resultados apresentados na Tabela 5.3.

Todas as falhas dos ferros fundidos nodulares ocorreram em regiões do corpo-de-prova onde havia maior concentração de nódulos grandes de grafita, logo em cada posição indicada na Tabela 5.3 haviam nódulos grandes. Imediatamente é chamada a atenção para o fato da vida em fadiga ter sido menor, na medida em que o local crítico para falha do corpo-de-prova foi deslocado dentro do tensionador. Ainda que haja a necessidade de uma quantidade maior de experimentos para a melhor compreensão de como podem estar relacionadas a região crítica do corpo-de-prova com a posição deste no tensionador, esses resultados chamam a atenção para a possibilidade de que problemas sistemáticos de montagem ou de algum desvio de fabricação do tensionador possam ter atuado de forma a criar regiões de diferentes níveis de solicitação dentro da ferramenta de pré-tensionamento.

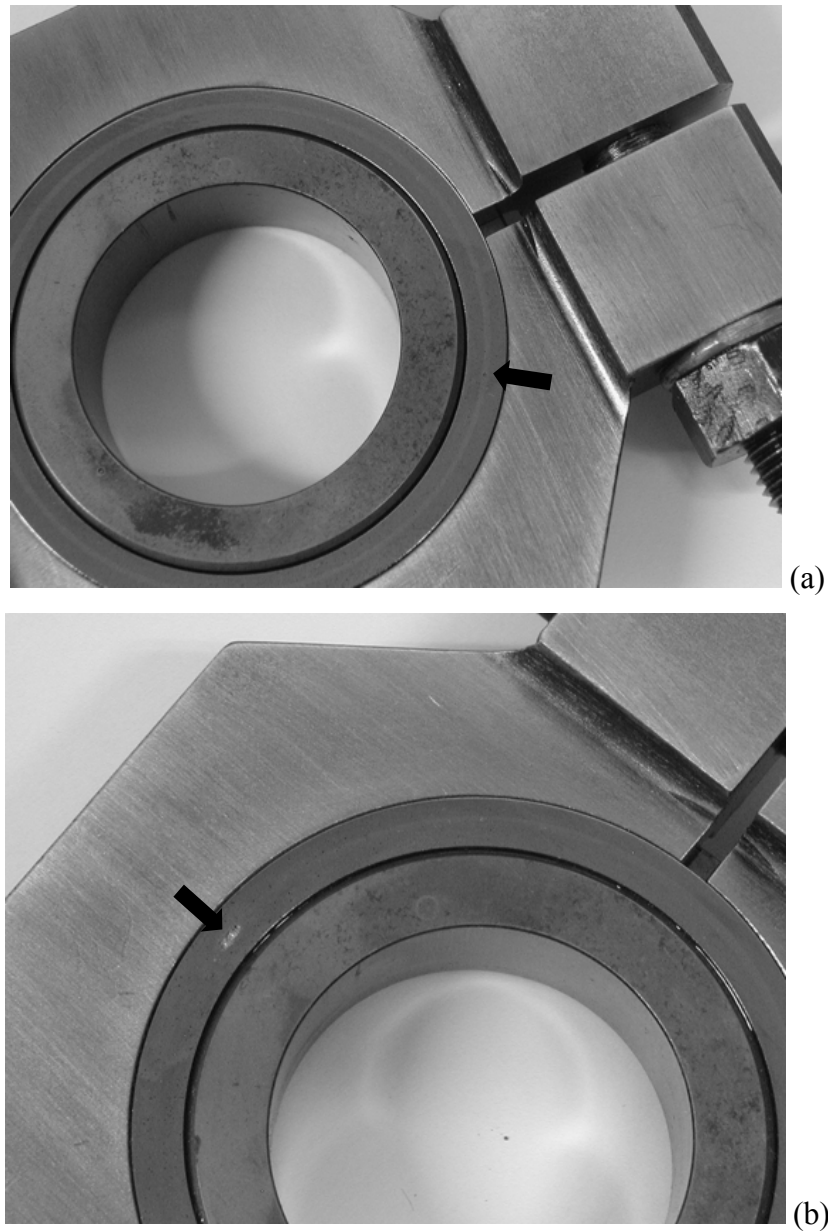


Figura 5.22 - Posições das falhas nos corpos-prova **NodAn-1** (a) e **NodAn-5** (b).

Tabela 5.3 - Posições das falhas dentro do tensionador e vida associada a cada posição.

Posição da falha	Corpo-de-prova	Vida
4 horas	<b>NodAn-1</b>	3.249.000
5 horas	<b>NodAn-3</b>	2.425.000
7 horas	<b>NodAn-2</b>	1.695.000
7 horas	<b>NodAn-4</b>	769.000
12 horas	<b>NodAn-5</b>	191.000

O fato do ferro fundido cinzento não ter apresentado mudança na sua distribuição de falhas quando pré-tensionado pode estar relacionado ao fato da solicitação dos ensaios ter sido próxima ao limite suportável pelo material, fazendo com que efeitos secundários não pudessem ser observados.

## 6 CONCLUSÕES

Ao final da análise dos resultados aqui apresentados é possível enumerar as seguintes conclusões:

- O equipamento desenvolvido nesse trabalho é capaz de reproduzir o mecanismo de falha por fadiga de contato. Além disso, seu funcionamento é regular e sensível o suficiente para distinguir materiais – como fez ao separar os desempenhos dos ferros fundidos utilizados – e também para perceber heterogeneidades do material – demonstrado no ferro fundido nodular.
- A observação das profundidades dos danos de fadiga de contato gerados nos ensaios demonstrou que o equipamento é capaz de gerar máxima tensão cisalhante em profundidade equivalente a prevista no carregamento estático de uma esfera sobre uma superfície plana.
- Embora o modelo de Hertz estabeleça a restrição inicial de que as tensões de contato devam ser tratadas a parte da distribuição geral de tensões nos corpos em análise, essa imposição mostrou-se desnecessária dentro das condições de ensaio utilizadas nesse trabalho.
- Não foi possível perceber diferença de comportamento entre as duas condições de ensaio do ferro fundido cinzento, provavelmente pelas condições de ensaio terem sido excessivamente severas para esse material.
- No ferro fundido nodular a utilização do tensionador aumentou significativamente a dispersão dos resultados, contudo não foi possível identificar a causa desse comportamento. É possível que ele esteja relacionado a algum desvio da idealidade no acoplamento tensionador/corpo-de-prova.

- A pressão de contato usada nesse trabalho foi mais de duas vezes superior a que Dommarco et al. utilizaram com ferros fundidos de dureza similar. Ainda assim foi possível perceber o efeito do tamanho de nódulo da grafita em todas as repetições. Isso abre caminho para o aumento da severidade do ensaio, o que traduz-se em tempos mais curtos de ensaio e, por consequência, na obtenção mais rápida de resultados, o que é sempre um fator crítico quando se trabalha com vida em fadiga.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização desse trabalho abriu algumas possibilidades que podem ser seguidas a fim de ampliar a contribuição com a fadiga de contato de ferros fundidos, as quais ficam aqui sugeridas:

- Aplicar refusão superficial em amostras de ferro fundido nodular e cinzento, a fim de estudar a o possível efeito de refino microestrutural ocasionado por esse processo no desempenho do material sob fadiga de contato.
- Produzir amostras de ferro fundido mesclado de grafita fina e comparar o desempenho desses materiais com os dos aços utilizados atualmente em cilindros de encosto, aplicação onde a resistência à fadiga de contato é um dos fatores críticos.
- Visto que no trabalho de Dommarco et al. o melhor desempenho em fadiga de contato foi obtido com um ferro fundido temperado e revenido, o qual era mais duro que os austemperados testados em paralelo, sugere-se produzir microestruturas bainíticas e martensíticas de mesma dureza a fim de isolar o efeito da microestrutura.
- Simular em modelagem por elementos finitos o rolamento sobre as microestruturas próxima e distante da zona de fratura observadas nesse ensaio.
- Avaliar o efeito da tensão residual imposta por processos usuais de fabricação como, por exemplo, *shot peening*.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMSTADTER, B. L. **Reliability Mathematics: Fundamentals; Practices; Procedures**. McGraw-Hill, 1971, 408p.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LINARI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 295 p.

ASM. **ASM Handbook Volume 1: Properties and Section: Irons, steels, and high-performance alloys**. ASM International, 1990. 1063p.

ASM, **ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology**, ASM International, 1992. 942p.

ASM, **ASM Handbook Volume 19: Fatigue and fracture**, ASM International, 1996. 1057p.

ASM. **Metals Handbook 9<sup>th</sup> Edition Volume 1, Properties and Section: Irons and steels**. American Society for Metals, 1978. 1063p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6742: utilização da distribuição de Weibull para interpretação de durabilidade por fadiga. Rio de Janeiro, 1987.

BAMBERGER, E. N., CLARK, J. C. Development and application of the rolling contact fatigue test rig. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**, J. J. C. Hoo, American Society for Testing and Materials, 1982, p. 85-106.

BARDGETT, W. E. Discussion at autumn general meeting, 1954: Fatigue tests on rolled alloy steels. **Journal of the iron and steel institute**, v.181, 1955. p. 328-329.

BARRUFFINI, F. F. **Projeto de uma máquina para estudo de fadiga de contato**. São Paulo: USP, 2001. 57 p.

BESWICK, J. M. Overview. **Bearing steel technology, ASTM STP 1419**, J. M. Beswick, American Society for Testing and Materials, 2002, p.ix-xii.

DOWSON, D., HIGGINSON, G. R. **Elasto-hydrodynamic lubrication** (SI edition). Oxford: Pergamon Press Ltd., 1977. 235p.

DOMMARCO, R. C., JAUREGUIBERRY, A. J., SIKORA, J. A. Rolling contact fatigue resistance of ductile iron with different nodule counts and matrix microstructures. **Wear**, v.261, 2006, p.172-179.

EASTAUGH, P. R. Use of accelerated tests to establish the lubricant-steel interaction on bearing fatigue life. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**, J. J. C. Hoo, American Society for Testing and Materials, 1982, p. 219-236.

FRITH, P. H. Fatigue tests on rolled alloys steels made in electric and open-hearth furnaces. **Journal of the Iron and Steel Institute**, v.180, 1955, p.26-36.

GUPTA, V., HAHN, G., BASTIAS, P., RUBIN, C. Influence of indent geometry on repeated two-dimensional rolling contact. **Journal of Tribology**, v.117, 1995, p.655-659.

GIRODIN, D., VILLE, F., GUERS, R., DUDRAGNE, G. Rolling contact fatigue test to investigate surface initiated damage and tolerance to surface dents. **Bearing steel technology, ASTM STP 1419**, J. M. Beswick, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2002. p. 263-281.

HATATE, M., SHIOTA, T., TAKAHASHI, N., SHIMIZU, K. Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron. **Wear**, v.251, 2001, p.885-889.

HOO, J. J. C. Introduction. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**. J. J. C. Hoo, American Society for Testing and Materials, 1982. p. 1-2.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992. 273p.

JOHNSON, K. L. **Contact mechanics**, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1985.

JOHNSTON, G. B., ANDERSSON, T., AMERONGEN, E. v., VOSKAMP, A. Experience of element and full-bearing testing of materials over several years. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**, J. J. C. Hoo, American Society for Testing and Materials, 1982, p. 190-205.

JOHNSTON, R. F., SEWELL, J. F. The bearing properties of 1%C-Cr steel as influenced by steelmaking practice. **Journal of Iron and Steel Institute**, December 1960, p. 414-444.

KALIN, M.; VIŽINTIN, J. A rolling-contact device that uses the ball-on-flat testing principle. **Wear**, v.256, 2004, p.335-341.

LEITE, M. V. **Análise dos mecanismos de desgaste por fadiga de conato**. 2005. 97 f. Dissertação(Mestrado Engenharia Mecânica) – PPGEM, Centro Federal de educação Tecnológica do Paraná, Curitiba.

LEITE, M. V., MERCER NETO, I., NEVES, J. C. K., PINTAÚDE, G. Descrição de um método de ensaio para controle da força de atrito em contato não-conforme lubrificado. **Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. [CDROM]**. Belém: Associação Brasileira de Ciência dos Materiais. 2004. ISBN 85-85769-16-5.

LIEW, W. Y. H. Effect of relative humidity on the unlubricated wear of metals. **Wear**, v. 260, 2005, p.720-727.

MAGALHÃES, L., SEABRA, J., SÁ, C. Experimental observations of contact fatigue crack mechanisms for austempered ductile iron (ADI) discs. **Wear**, v.246, 2000, p.134-148.

MAGALHÃES, L., SEABRA, J. Artificial indentations for the study of contact fatigue of austempered ductile iron (ADI) discs. **Wear**, v.258, 2005, p.1755-1763.

McCOOL, J. I. Analysis of sets of two-parameters Weibull data arising in rolling contact endurance testing. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**, J. J. C. Hoo, American Society for Testing and Materials, 1982, p. 293-319.

MORRADES, M. **What every engineer should know about reliability and risk analysis**. New York: Marcel Dekker, 1993. 350p.

NEVES, J. C. K., BARRUFFINI, F. F., SINATORA, A. Desenvolvimento de uma máquina destinada ao estudo da fadiga de contato no sistema esfera contra plano. **Anais do 58º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. [CDROM]. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003, p. 606-612.

NEVES, J.C.K., SINATORA, A. Caracterização do dano superficial causado em um aço ABNT 1045 pelo movimento de rolamento esfera contra plano nas condições com e sem lubrificação. In: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 59, São Paulo, 2004. **Anais do 59º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - Internacional**. [CD-ROM]. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004. p. 4385-4394.

NEVES, J. C. K., LEITE, M. V., SILVA, F. C., SANTOS, C. E. R., CARVALHO, M. A., SINATORA, A. Development of an apparatus for rolling contact fatigue tests. **Proceedings of International Conference: Abrasion 2005 - Abrasion wear resistant alloyed white cast iron for rolling and pulverizing mills**. Department of Mechanical Engineering, University of São Paulo and Institute for Technological Research - IPT, São Paulo, Brazil, 2005. p. 129-141.

NSK. NSK Catálogos, **Indústria e comércio de rolamentos**, 2003.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. New York: John Wiley & Sons, 1965. 336p.

SALVANDE, J., DOMMARCO, R. Estudio de la resistencia a la fatiga de contacto de fundición nodular. Jornadas. **Anales de las Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga**. Neuquén: Asociación Argentina de Materiales, 2000, p.421-427.

SALVANDE, J., DOMMARCO, R. Resistencia a la fatiga de contacto de fundición nodular, austemperada y parcialmente acoquillada. Jornadas. **Anales de las Jornadas SAM-CONAMET 2001**. Posadas: Asociación Argentina de Materiales, 2001, p.213-220.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Boston: Butterworth Heinemann, 2001. 744p.

TALLIAN, T. E. On competing failure mode in rolling contact fatigue, **ASLE Transactions**, v.10, 1967, p.418-439.

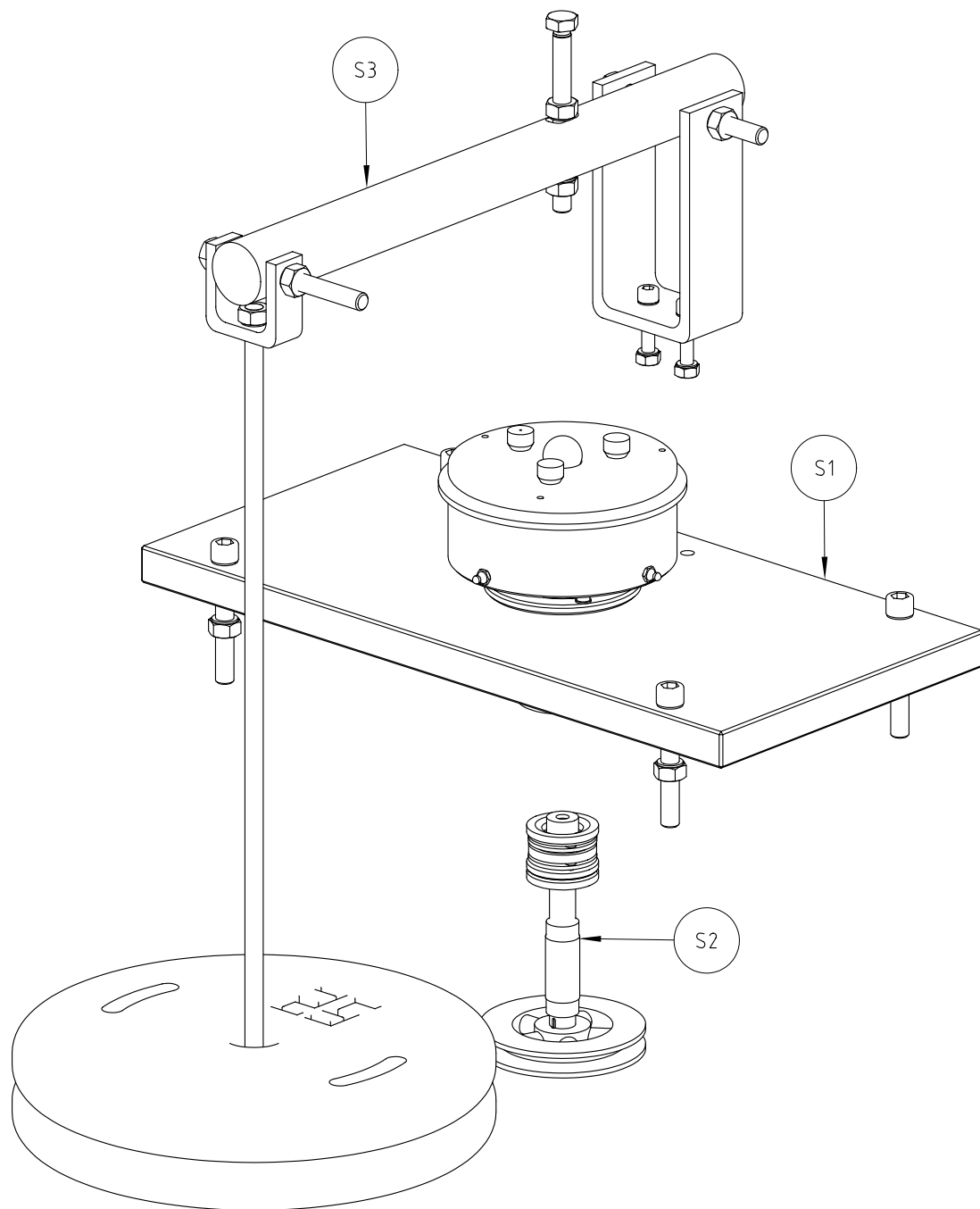
TALLIAN, T. E., McCOOL, J. I., An engineering model of spalling fatigue failure in rolling contact, II. The surface model. **Wear**, v.17, 1971, p.447-461.

WILLIAMS, J. A. **Engineering Tribology**. New York: Oxford University Press, 1994. 488p.

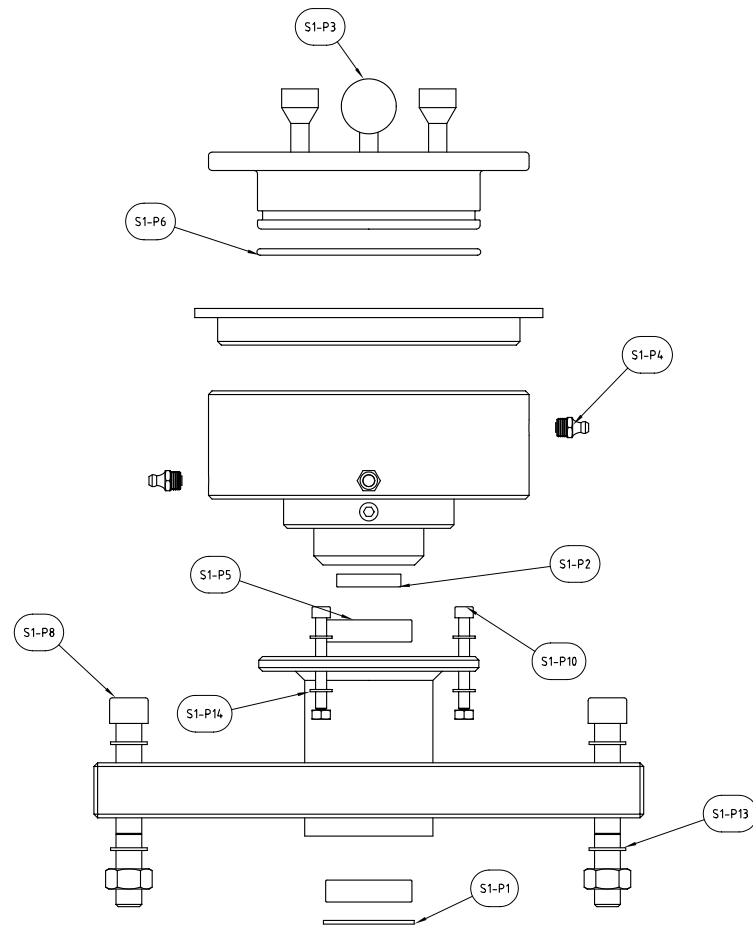
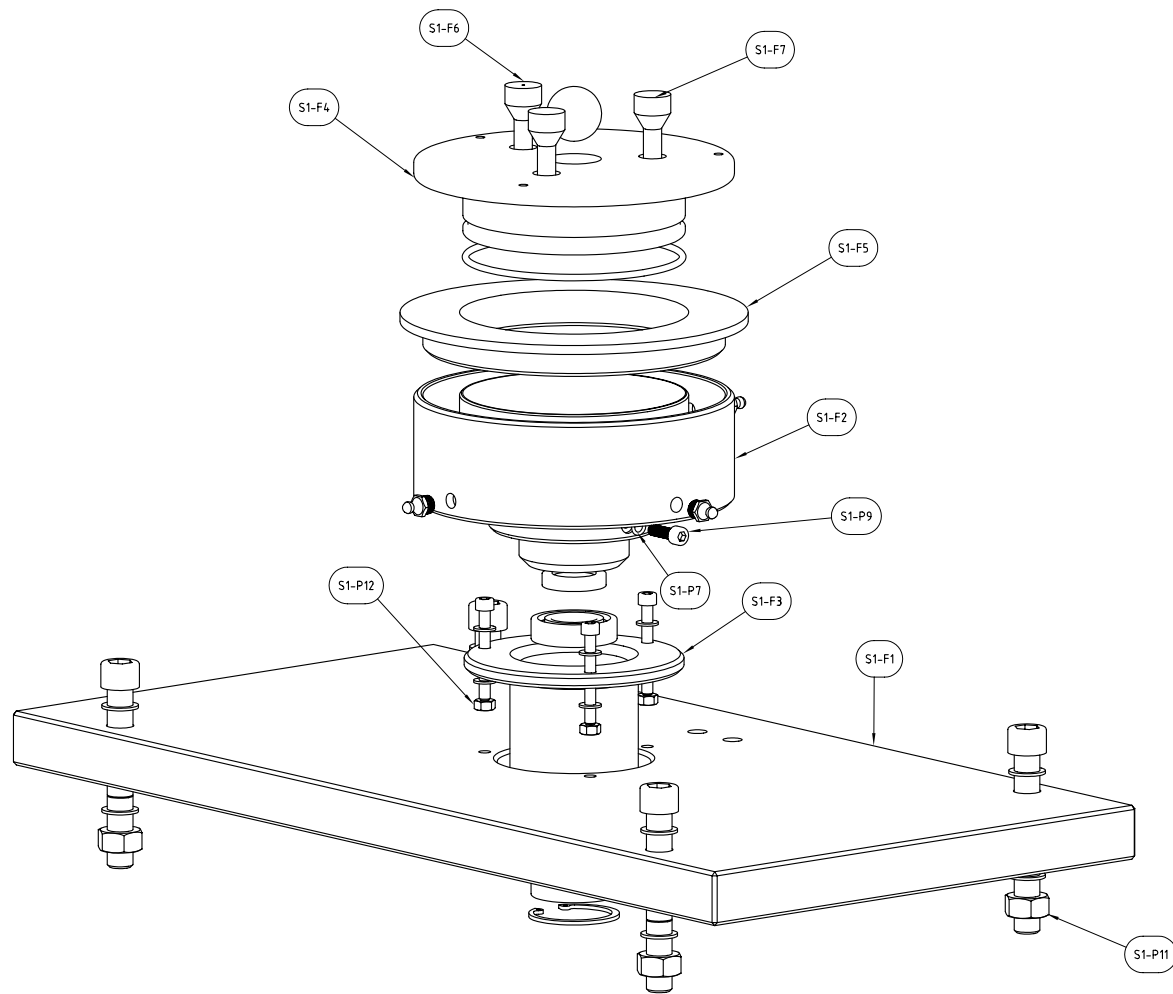
ZARESTSKY, E. V., PARKER, R. J., ANDERSON, W. J. NASA Five-ball fatigue tester – over 20 years of research. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**, J. J. C. Hoo, American Society for Testing and Materials, 1982, p. 5-45.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**



S3	SUBCONJUNTO PARA APLICAR CARGA	01				
S2	SUBCONJUNTO DE FUNCIONAMENTO	01				
S1	SUBCONJUNTO ESTRUTURAL	01				
C1	DESENHO DE CONJUNTO PARA MONTAGEM	01				
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A1
			TOL. GERAL		DATA	30/10/2004
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			1:5			



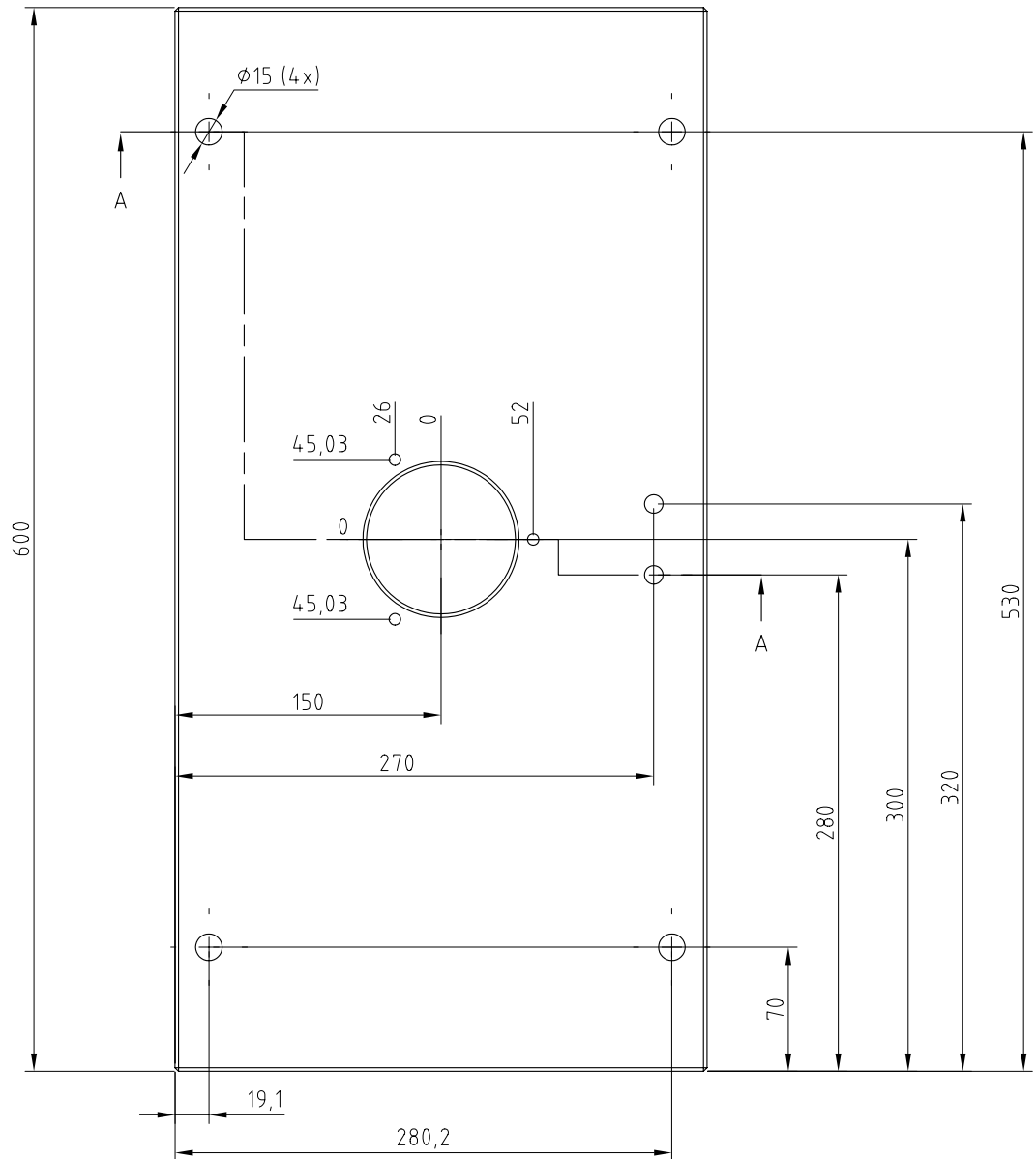
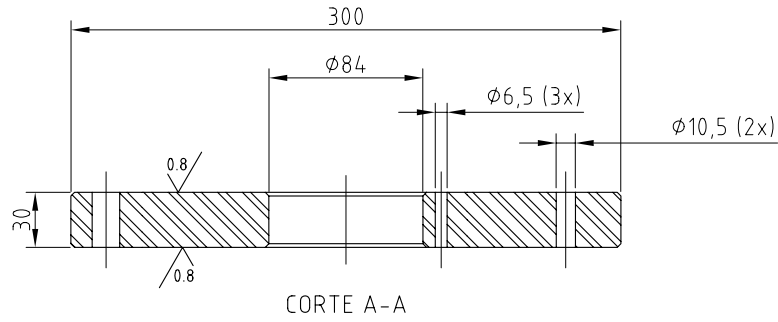
S1-P14	ARRUELA M6	06	CONF. DIN 988	
S1-P13	ARRUELA M14	08	CONF. DIN 988	
S1-P12	PORCA SEXTAVADA M6	03	CONF. DIN 934	
S1-P11	PORCA SEXTAVADA M14	04	CONF. DIN 934	
S1-P10	PARAFUSO TIPO ALLEN M6 x 50	03	CONF. DIN 912	
S1-P9	PARAFUSO TIPO ALLEN M6 x 20	01	CONF. DIN 912	
S1-P8	PARAFUSO TIPO ALLEN M14 x 100	04	CONF. DIN 912	
S1-P7	ANEL O'RING 6 x 1,8	01	CONF. DIN 3771	
S1-P6	ANEL O'RING 115 x 3,55	01	CONF. DIN 3771	
S1-P5	ROLAMENTO RADIAL DE UMA CARREIRA DE ESFERAS	02	ESPECIF. 6905	
S1-P4	NIPPLE M10	04	COMERCIAL	
S1-P3	ESFERA DE CARGA (30 mm)	01	AÇO ABNT 52100	
S1-P2	RETENTOR 20 x 35 x 7	01	CONF. DIN 3760	
S1-P1	ANEL ELÁSTICO PARA FURO 47 x 2	01	CONF. DIN 472	
S1-F7	TAMPA DE RESPIRO	02	NYLON	
S1-F6	TAMPA PARA TERMOPAR	01	NYLON	
S1-F5	TAMPA DE AQUECIMENTO	01	NYLON	
S1-F4	TAMPA DAS AMOSTRAS	03	AÇO INOX FERRÍTICO	RAIOS $\bar{N}$ ESPECIF. = 2 mm
S1-F3	MANCAL DO EIXO	01	AÇO INOX FERRÍTICO	
S1-F2	SUPORTE DAS AMOSTRAS	01	AÇO INOX FERRÍTICO	RAIOS $\bar{N}$ ESPEC. = 1 mm
S1-F1	SUPORTE DA ESTRUTURA	01	AÇO ABNT 1045	CHANFROS 2 mm x 45°
S1	SUBCONJUNTO ESTRUTURA - VISTA EXPLODIDA	01		
PÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
			UNIDADE	DES. Nº
			TOL. GERAL	DATA
			NOME	Mário Vítor Leite
			VISTO	Prof. Julio Klein
			ESCALA	
			1:2	

CEFET - PR

LASC - LFS

FADIGA DE CONTATO

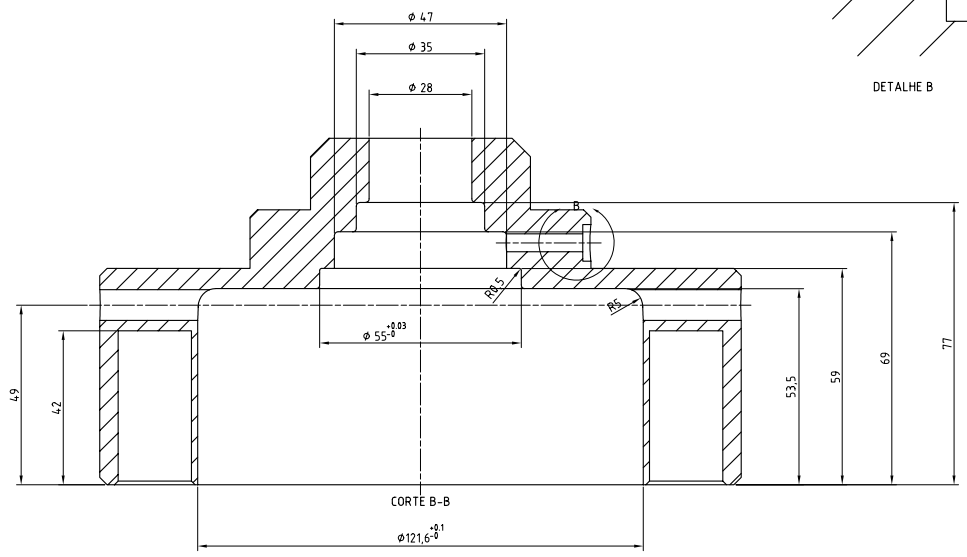
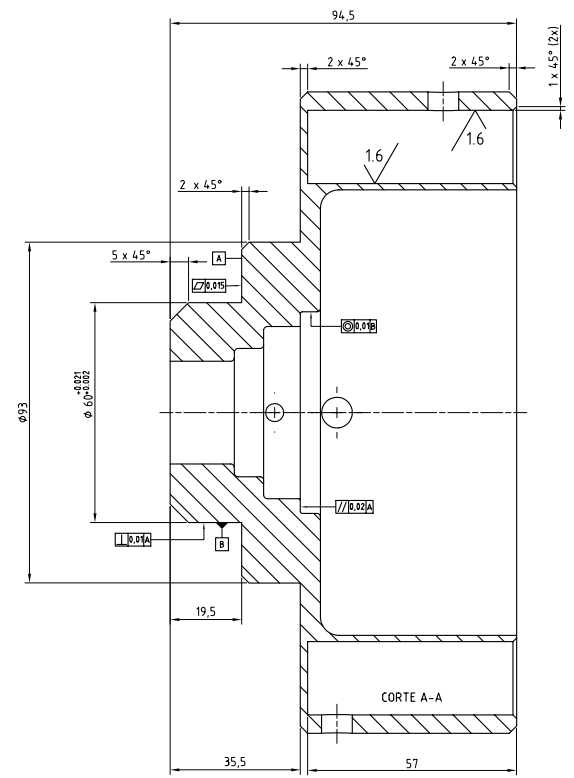
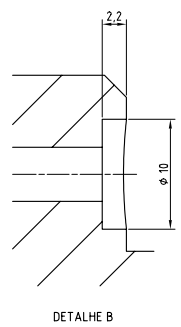
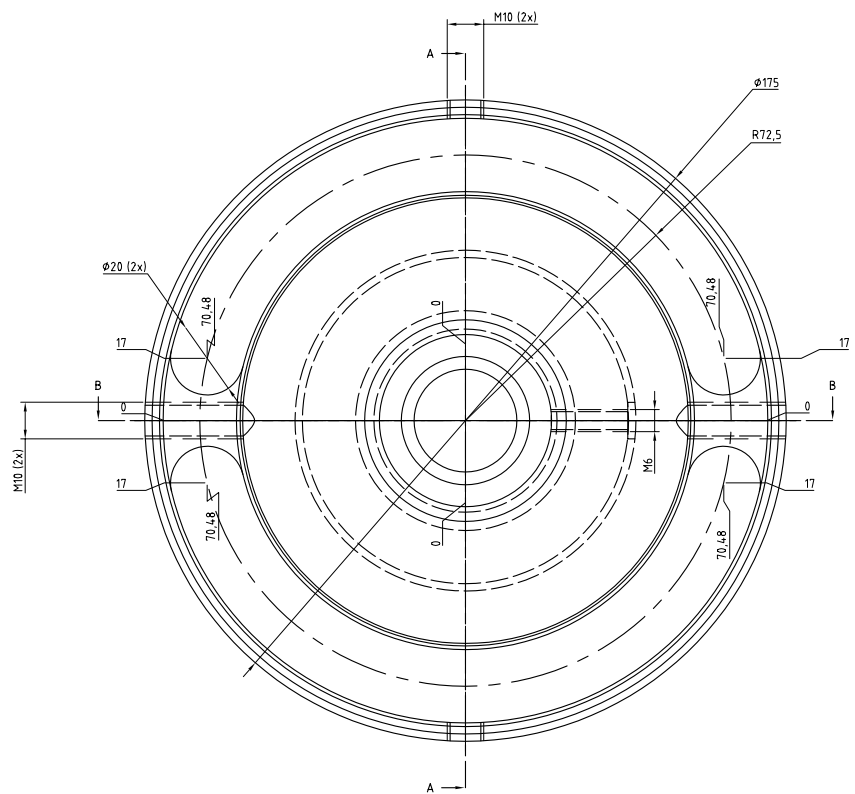
UNIDADE	mm	DES. Nº	A2
TOL. GERAL		DATA	30/10/2004
NOME	Mário Vítor Leite		
VISTO	Prof. Julio Klein		
ESCALA			
1:2			



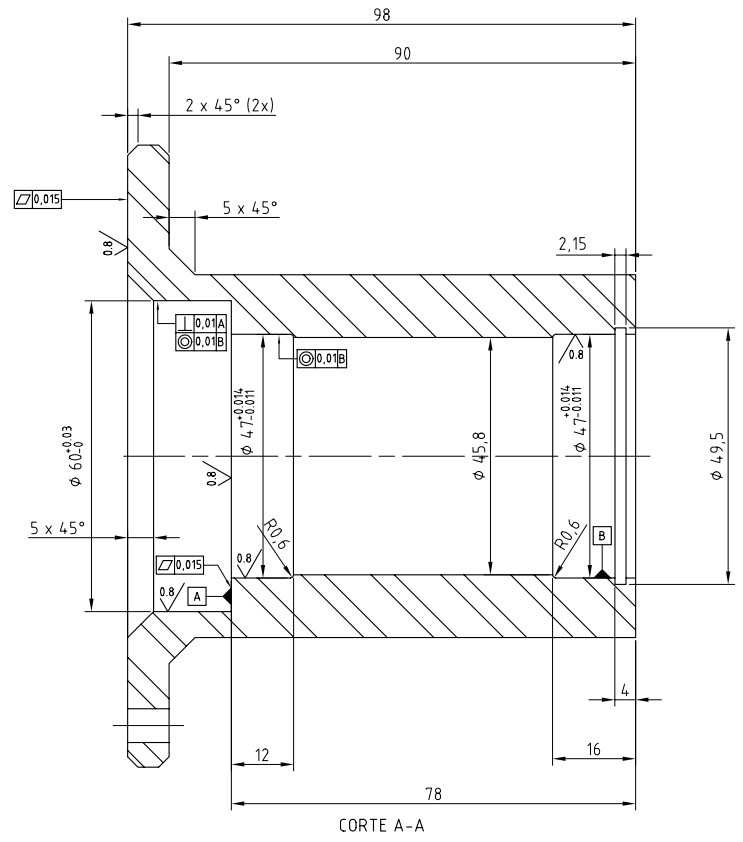
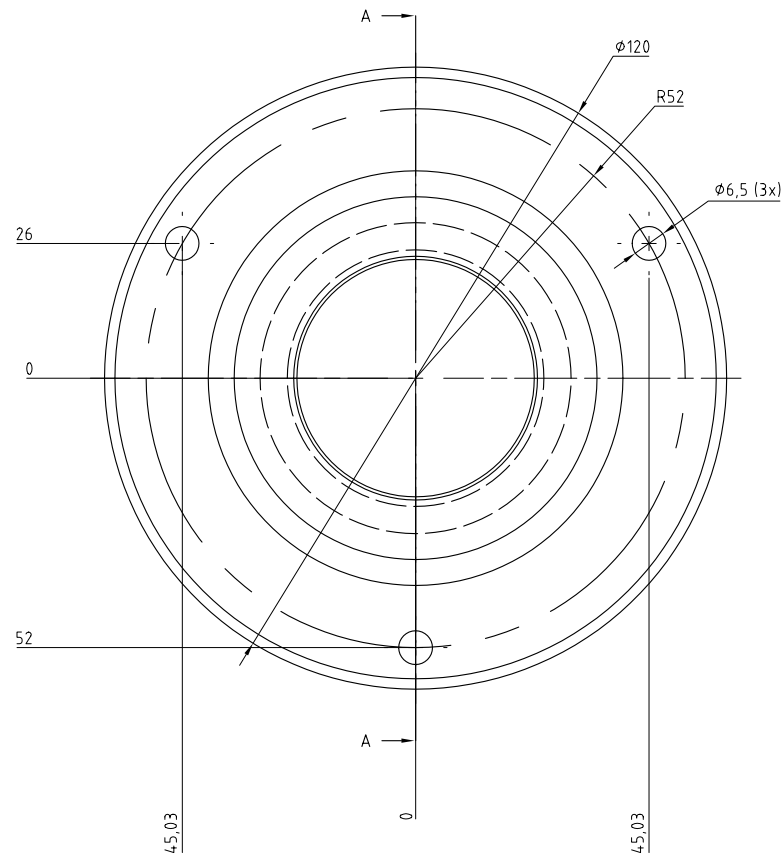
S1-F1	SUORTE DA ESTRUTURA	1	AÇO ABNT 1045	CHANFROS 2 mm x 45°		
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A3
			TOL. GERAL		DATA	31/10/2004
<b>LASC-LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:4		



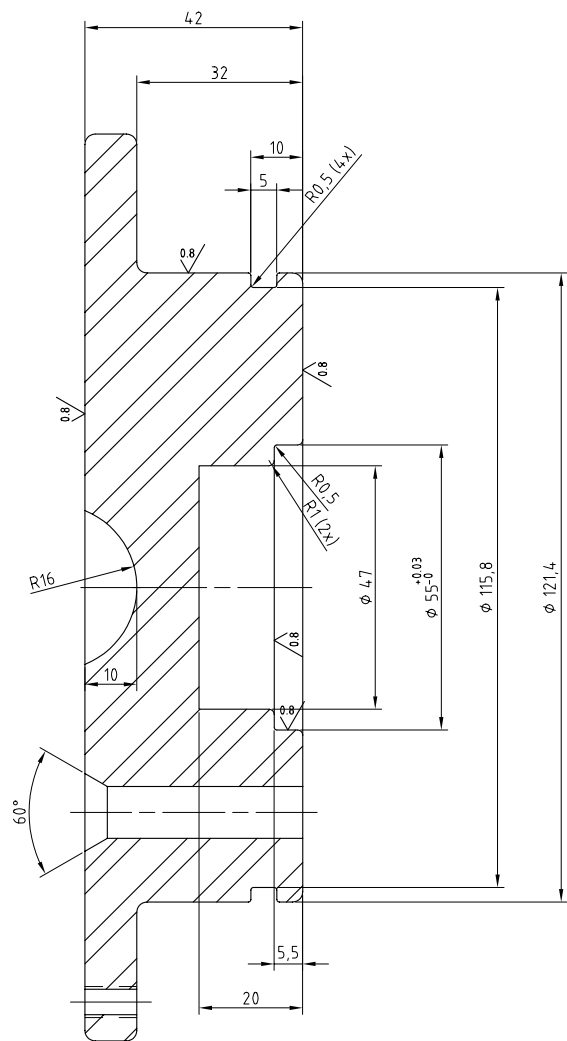
0.8 / (1.6)



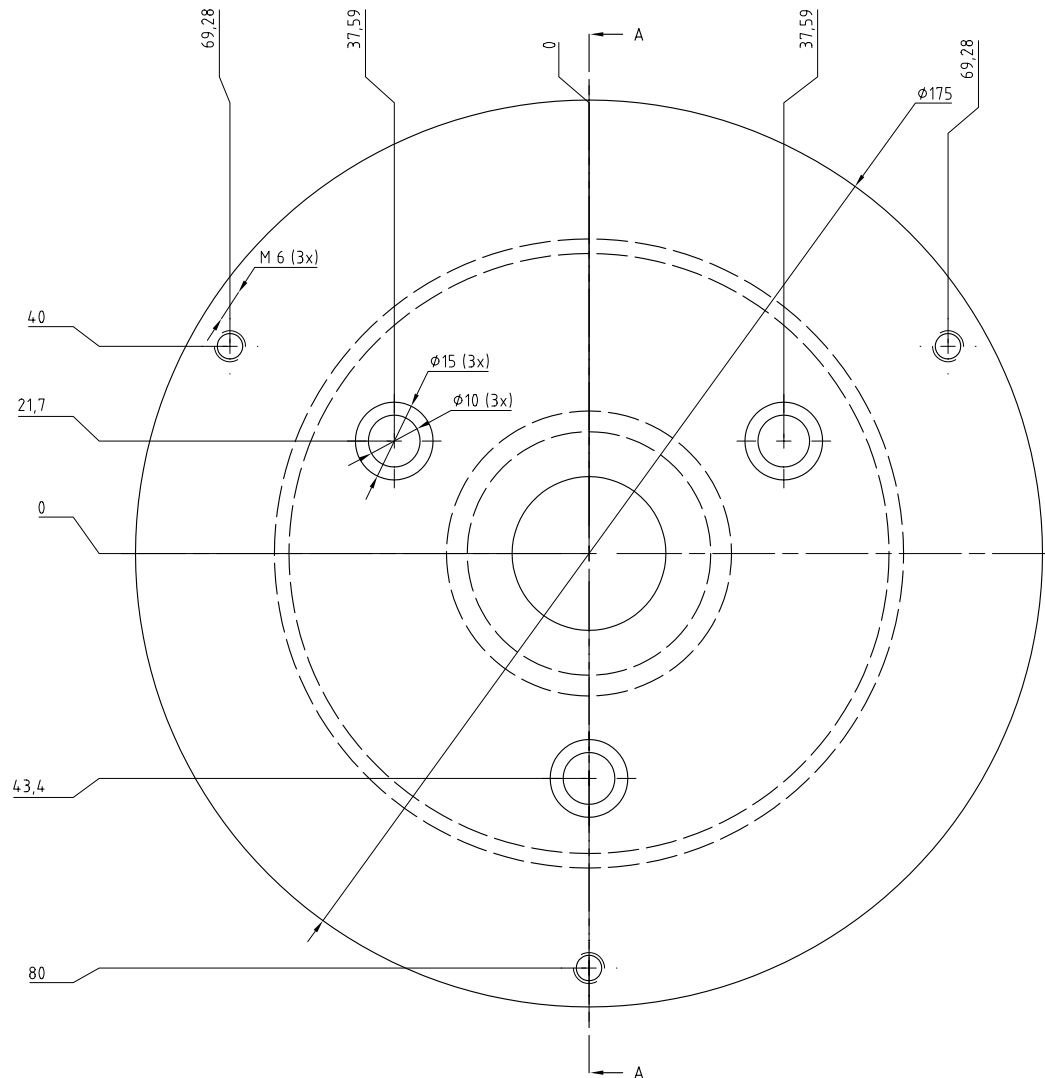
SI-F2	SUPORTE DAS AMOSTRAS	1	ACO INOX FERRITICO	RAIOS N ESPEC. = 1 mm
PCA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
	<b>CEFET - PR</b>		UNIDADE	DES. N°
	<b>LASC-LFS</b>		mm	A4
	<b>FADIGA DE CONTATO</b>		TOL. GERAL	DATA
			NOME	30/10/2004
			VISTO	Mário Vítor Leite
			ESCALA	Prof. Julio Klein
			1:1	



S1-F3	MANCAL DO EIXO	1	AÇO INOX FERRÍTICO	
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	
<p align="center"><b>CEFET - PR</b></p> <p align="center"><b>LASC-LFS</b></p> <p align="center"><b>FADIGA DE CONTATO</b></p>			UNIDADE	mm
			TOL. GERAL	DATA
			NOME	Mario Vitor Leite
			VISTO	Prof. Julio Klein
			ESCALA	1:1

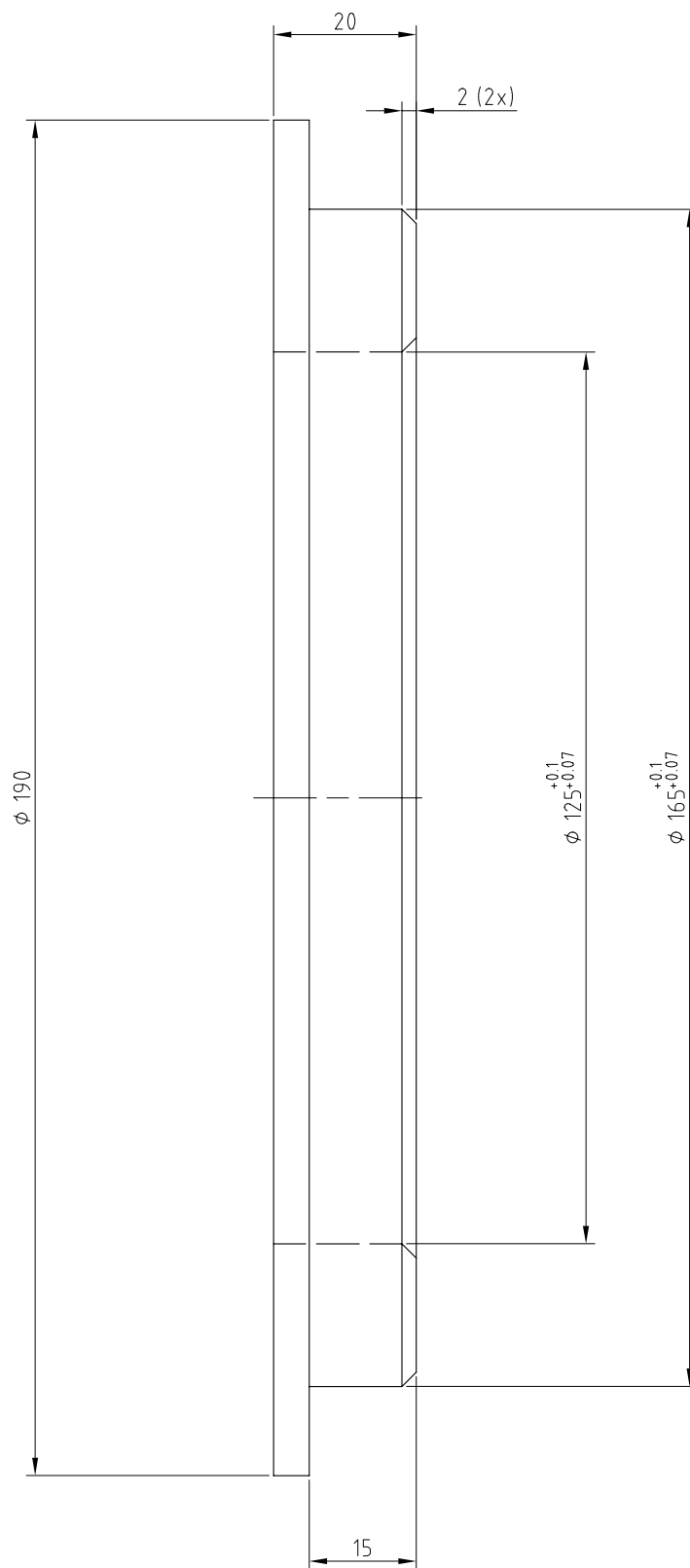


CORTE A-A

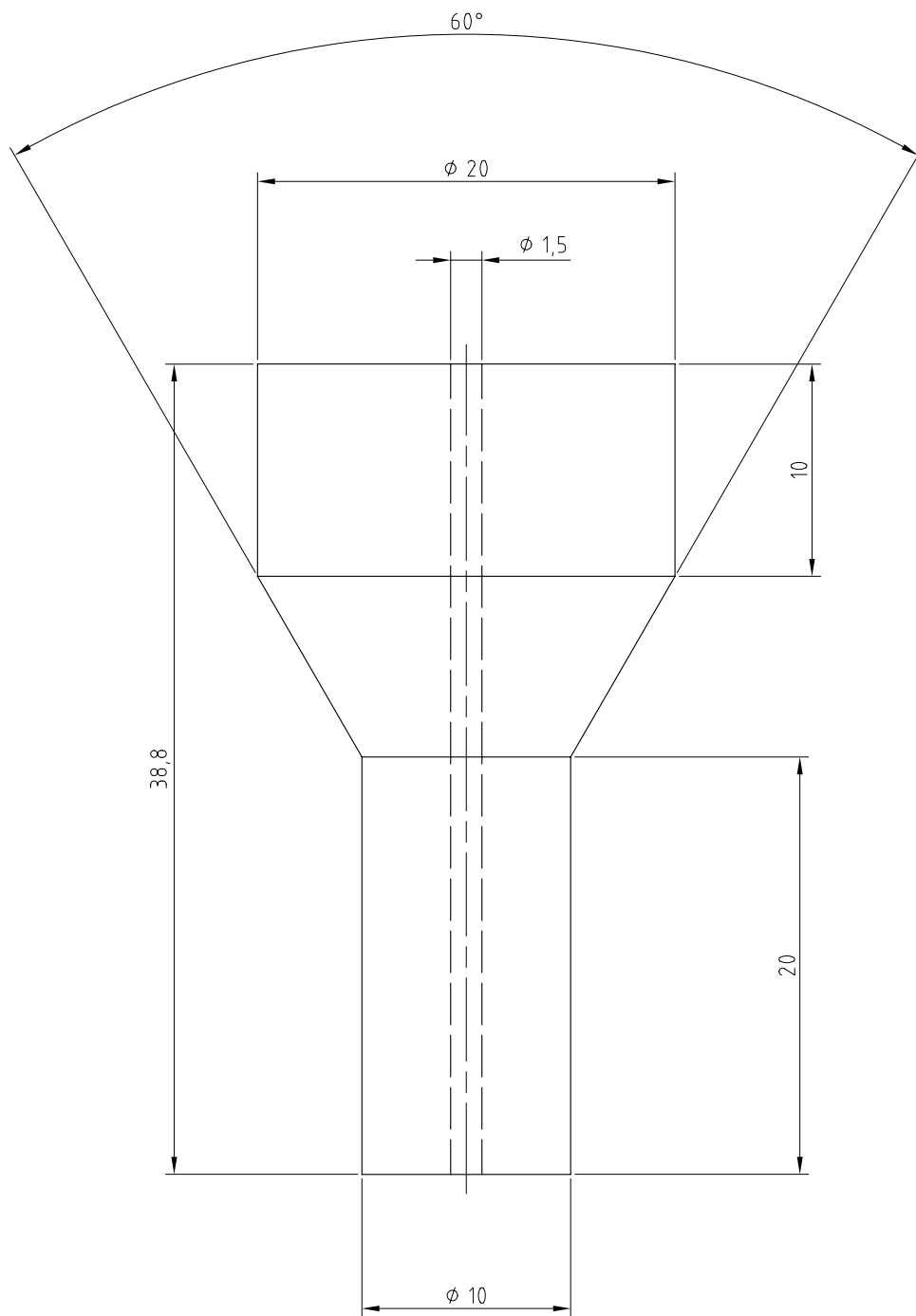


S1-F4	TAMPA DAS AMOSTRAS	1	AÇO INOX FERRÍTICO	RAIOS Ñ ESPECIF. = 2 mm
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm
			TOL. GERAL	DATA 30/10/2004
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite
			VISTO	Prof. Julio Klein
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:1

1.6

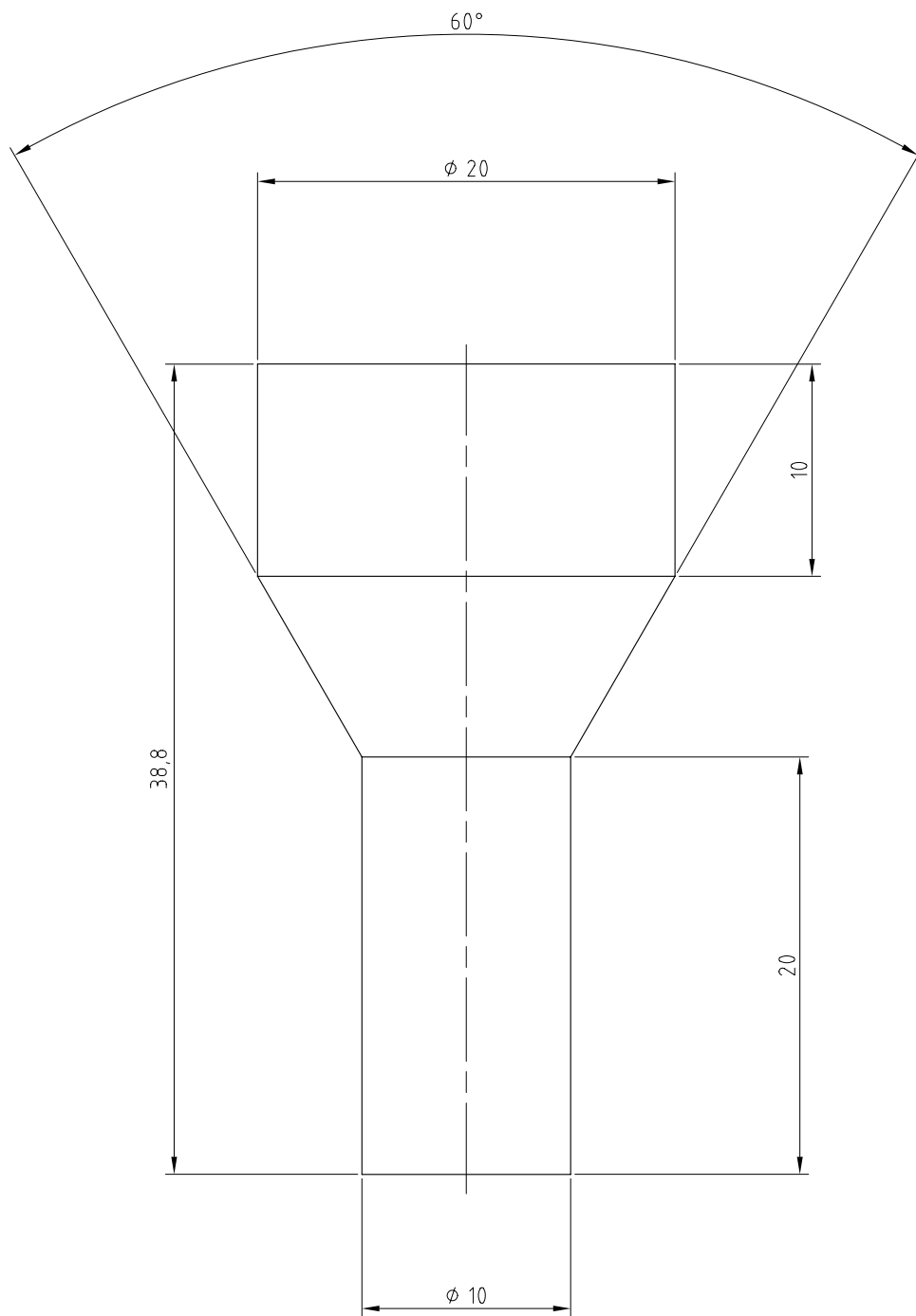


S1-F5	TAMPA DE AQUECIMENTO	01	NYLON			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
CEFET - PR			UNIDADE	mm	DES. N°	A7
			TOL. GERAL		DATA	30/10/2004
LASC - LFS			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
FADIGA DE CONTATO			ESCALA 1:1			

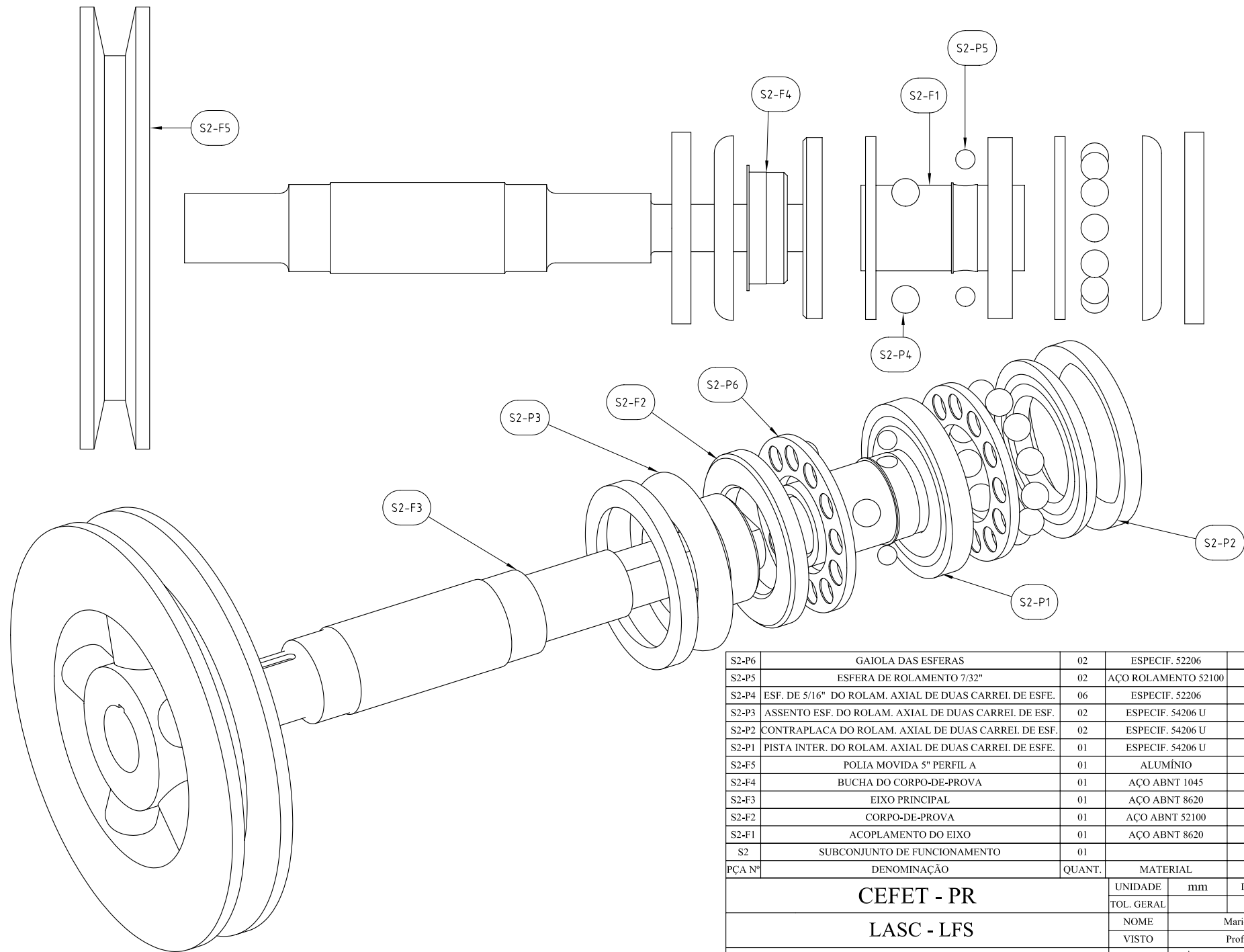


S1-F6	TAMPA DO TERMOPAR	01	NYLON			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A8
			TOL. GERAL		DATA	30/10/2004
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			3:1			

1.6

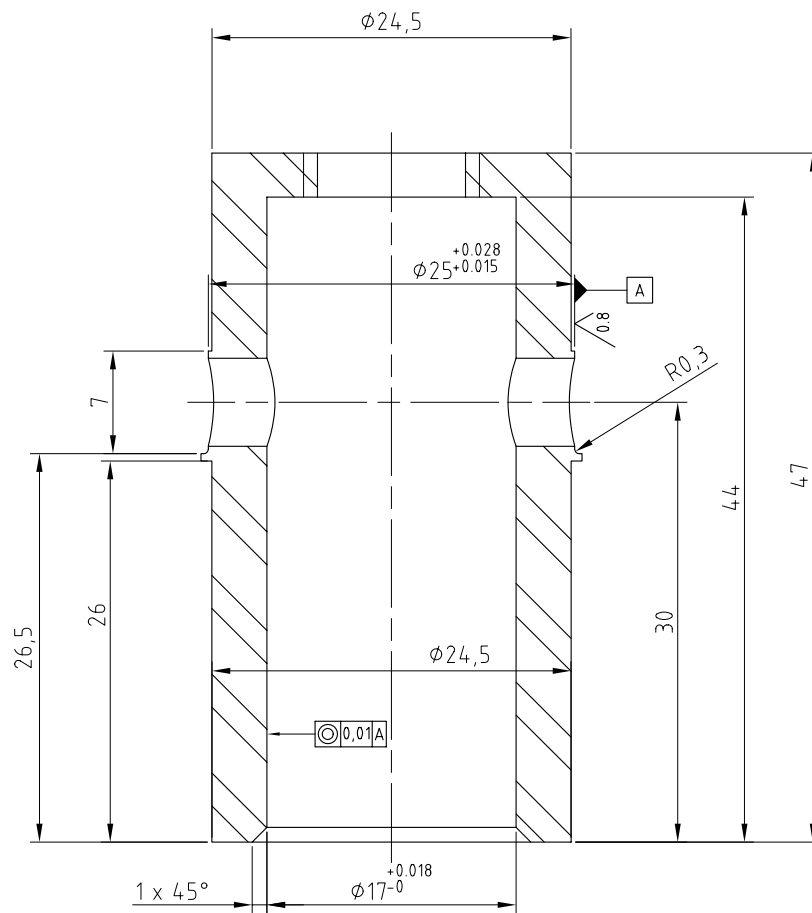


S1-F7	TAMPA DE RESPIRO	02	NYLON			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A9
			TOL. GERAL		DATA	30/10/2004
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			3:1			

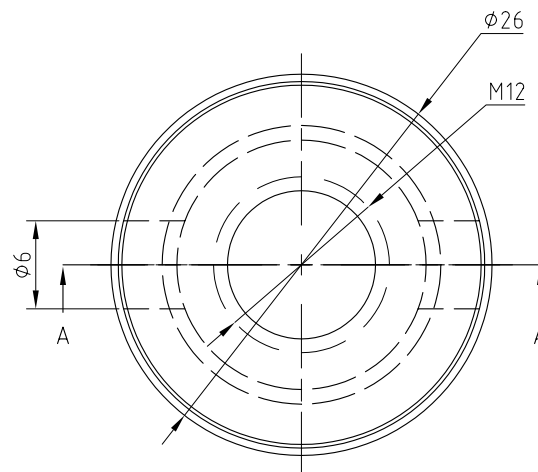


S2-P6	GAIOLA DAS ESFERAS	02	ESPECIF. 52206			
S2-P5	ESFERA DE ROLAMENTO 7/32"	02	AÇO ROLAMENTO 52100			
S2-P4	ESF. DE 5/16" DO ROLAM. AXIAL DE DUAS CARREI. DE ESFE.	06	ESPECIF. 52206			
S2-P3	ASSENTO ESF. DO ROLAM. AXIAL DE DUAS CARREI. DE ESF.	02	ESPECIF. 54206 U			
S2-P2	CONTRAPLACA DO ROLAM. AXIAL DE DUAS CARREI. DE ESF.	02	ESPECIF. 54206 U			
S2-P1	PISTA INTER. DO ROLAM. AXIAL DE DUAS CARREI. DE ESFE.	01	ESPECIF. 54206 U			
S2-F5	POLIA MOVIDA 5" PERFIL A	01	ALUMÍNIO			
S2-F4	BUCHA DO CORPO-DE-PROVA	01	AÇO ABNT 1045			
S2-F3	EIXO PRINCIPAL	01	AÇO ABNT 8620			
S2-F2	CORPO-DE-PROVA	01	AÇO ABNT 52100			
S2-F1	ACOPLAMENTO DO EIXO	01	AÇO ABNT 8620			
S2	SUBCONJUNTO DE FUNCIONAMENTO	01				
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A10
			TOL. GERAL		DATA	27/08/2006
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:1		

1.6 / (0.8)

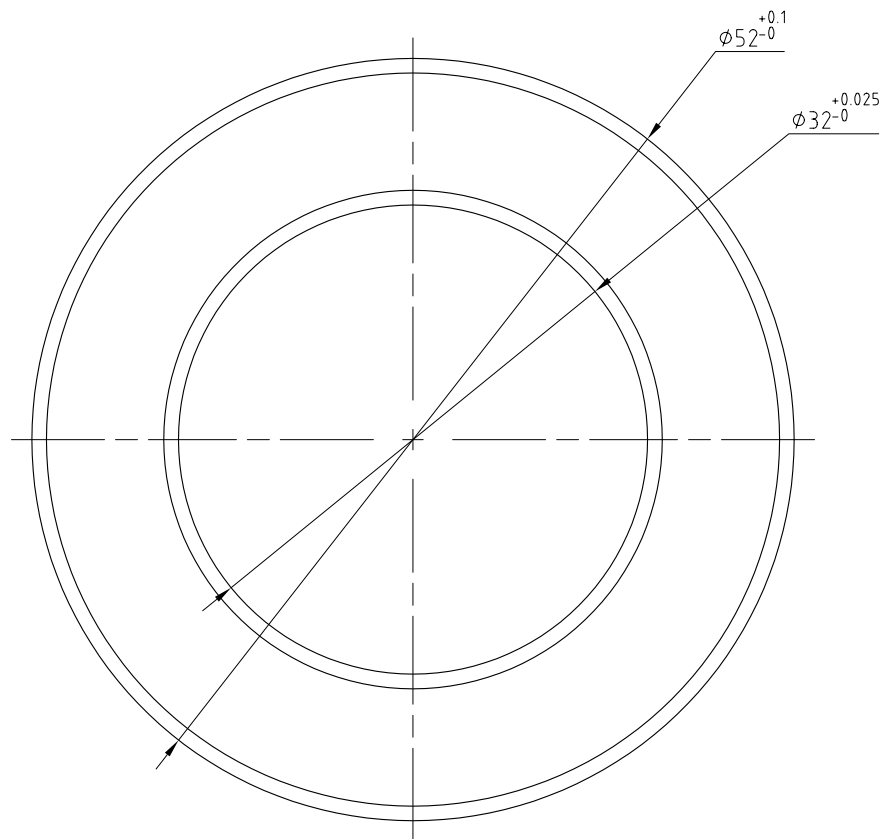
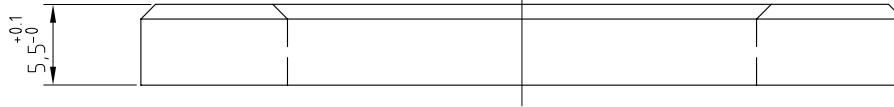


CORTE A-A

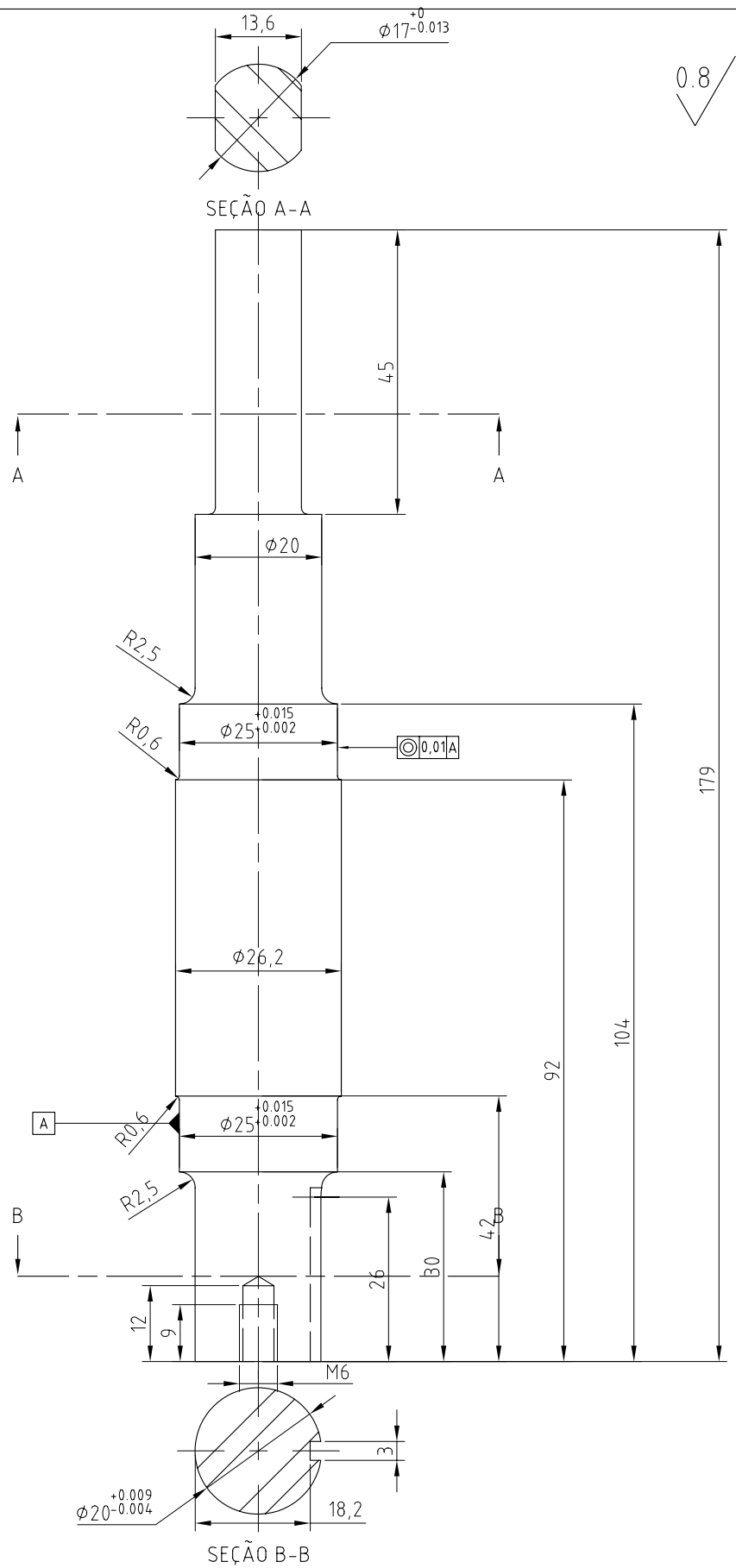


S2-F1	ACOPLAMENTO DO EIXO	1	AÇO ABNT 8620			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
CEFET - PR			UNIDADE	mm	DES. N°	A11
			TOL. GERAL		DATA	26/08/2006
LASC - LFS			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
FADIGA DE CONTATO			ESCALA	2:1		



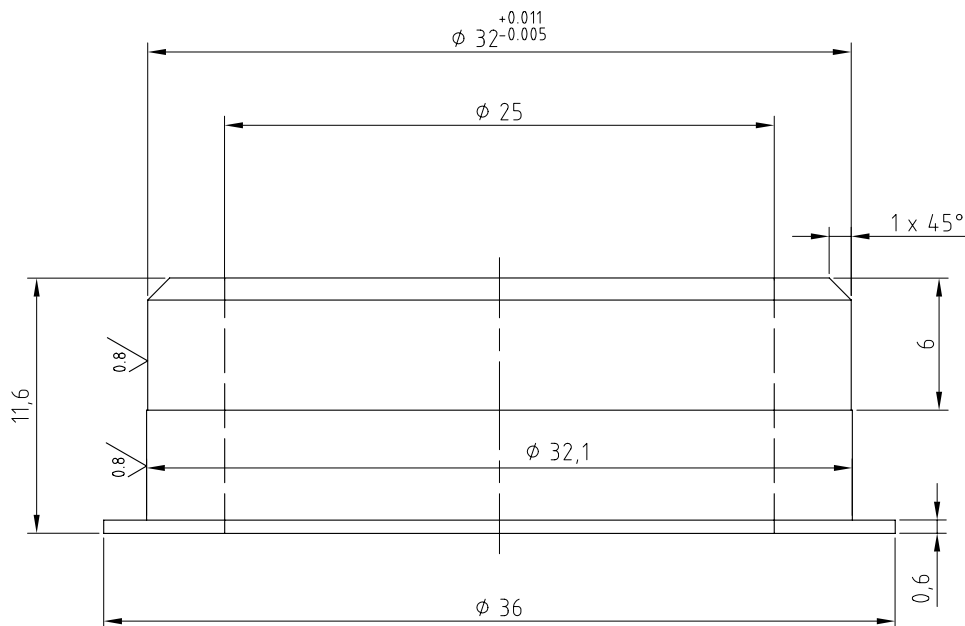


S2-F2	CORPO-DE-PROVA	01	FERRO FUNDIDO			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
CEFET - PR			UNIDADE	mm	DES. N°	A12
			TOL. GERAL		DATA	26/08/2006
LASC-LFS			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
FADIGA DE CONTATO			ESCALA 2:1			



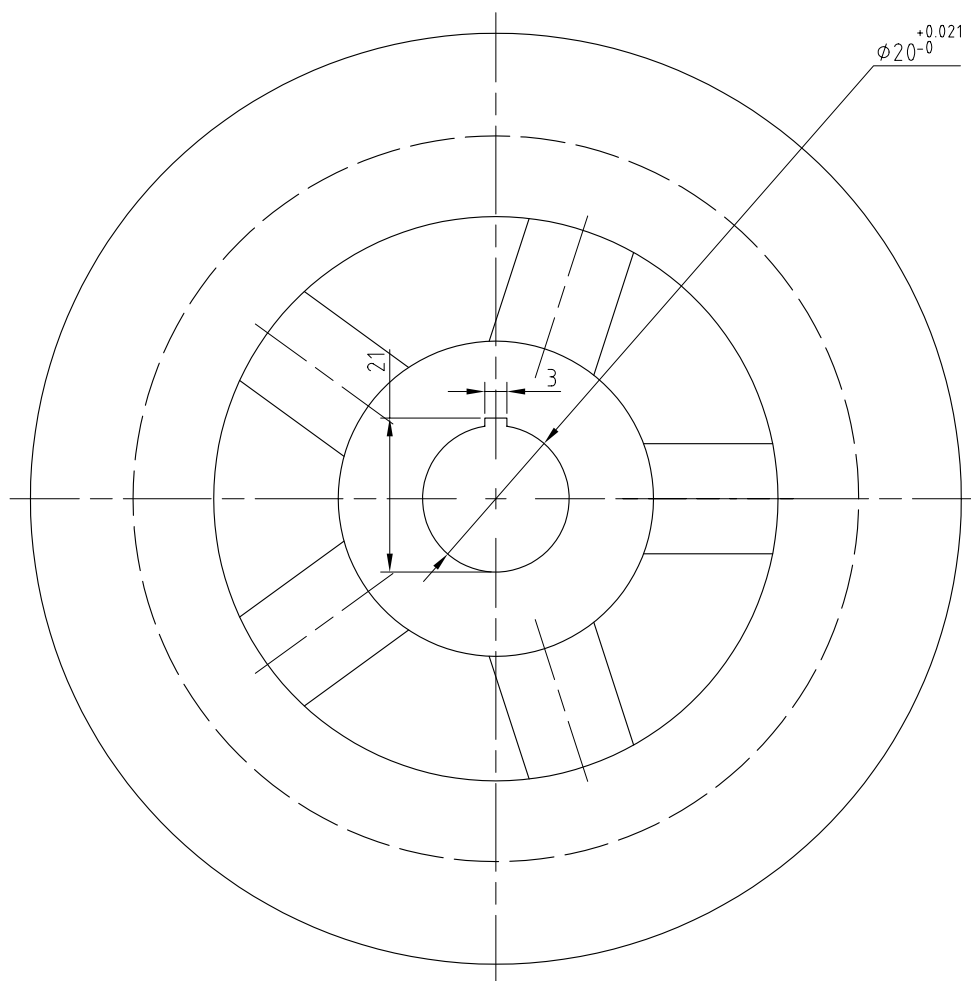
S2-F3	EIXO PRINCIPAL	1	AÇO ABNT 8620			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
CEFET - PR			UNIDADE	mm	DES. N°	A13
			TOL. GERAL		DATA	31/10/2004
LASC-LFS			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
FADIGA DE CONTATO			ESCALA	1:1		

1.6 / (0.8)

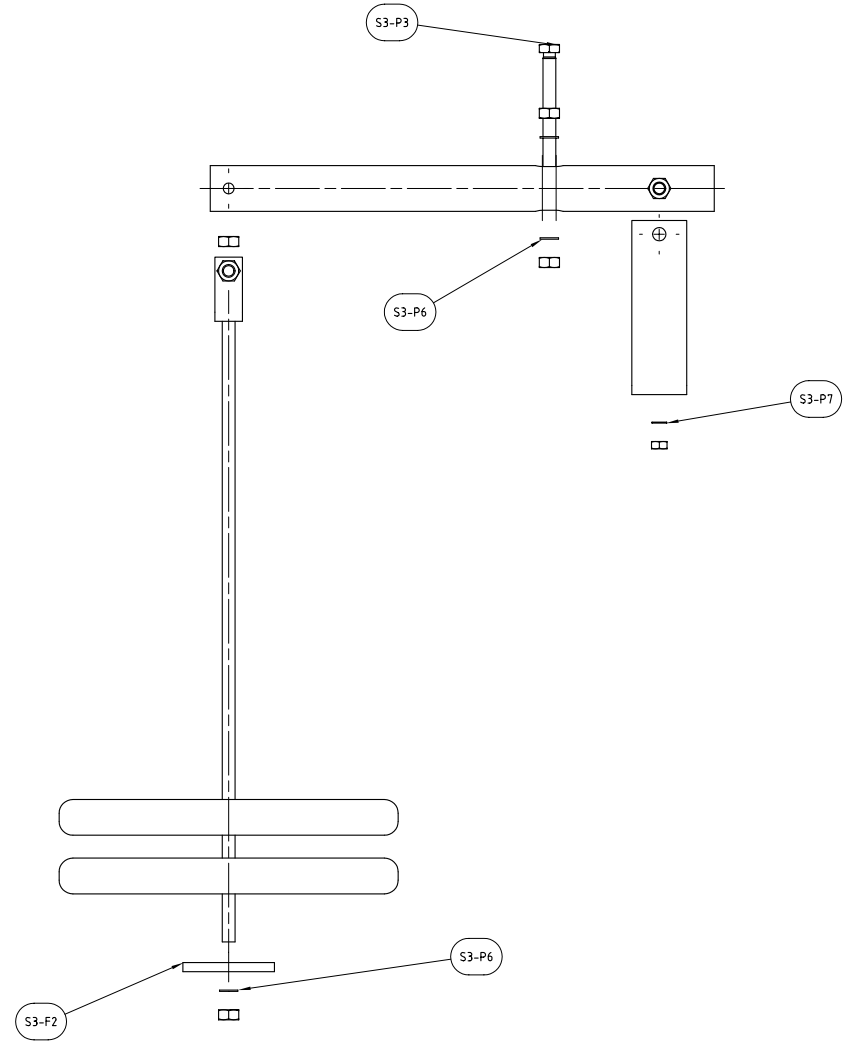
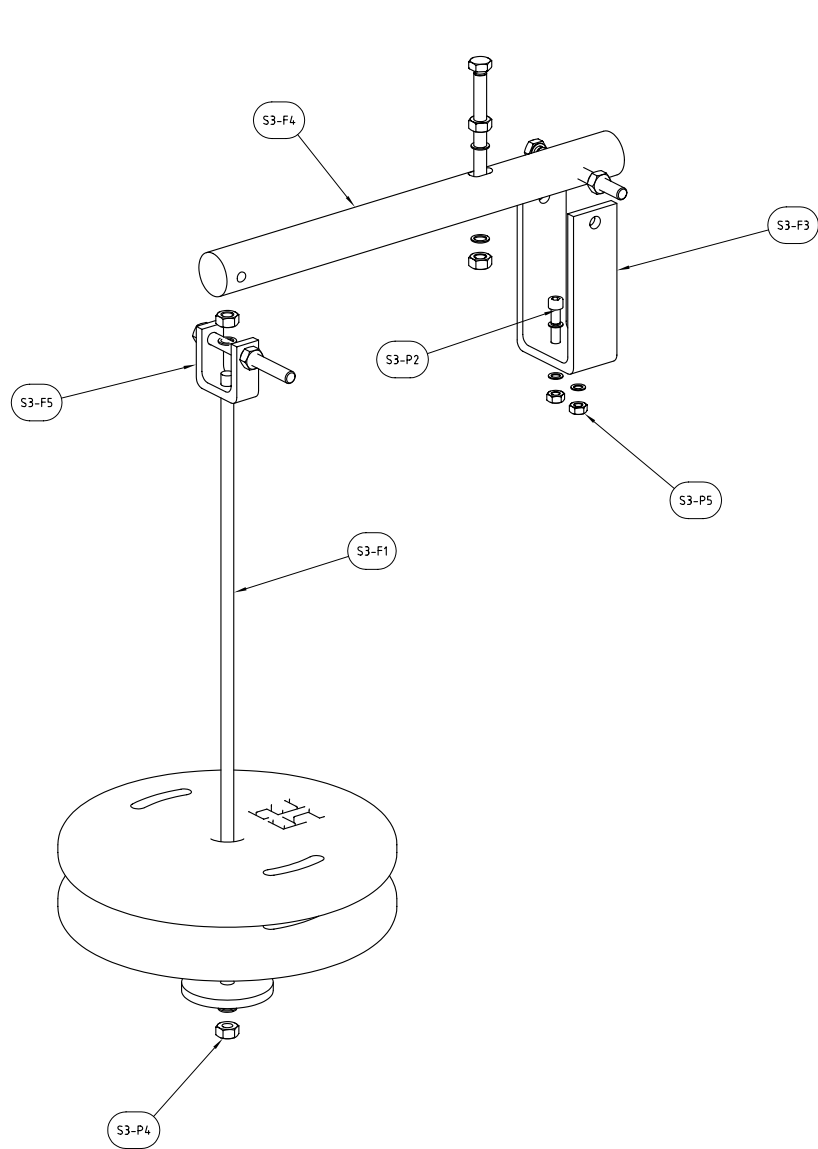


S2-F4	BUCHA DO CORPO-DE-PROVA	01	AÇO ABNT 1045			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A14
			TOL. GERAL		DATA	27/08/2006
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA 2:1			

3.2



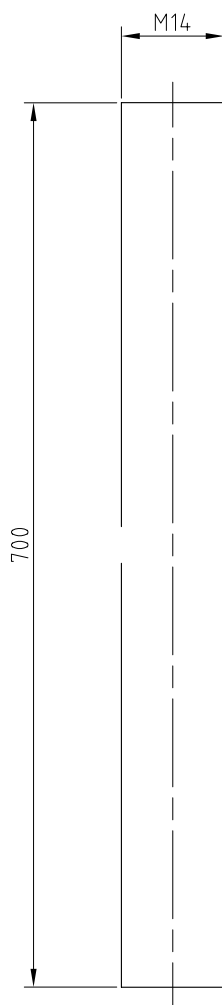
S2-F5	POLIA MOVIDA 5"	1	ALUMINIO			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A15
			TOL. GERAL		DATA	29/05/2004
<b>LASC-LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:1		



S3-P7	ARRUELA M10	02	CONF. DIN 988	
S3-P6	ARRUELA M14	08	CONF. DIN 988	
S3-P5	PORCA SEXTAVADA M10	02	CONF. DIN 934	
S3-P4	PORCA SEXTAVADA M14	06	CONF. DIN 934	
S3-P3	PARAFUSO CAB. SEXTAVADA M14 x 150	03	CONF. DIN 931	
S3-P2	PARAFUSO TIPO ALLEN M10 x 50	02	CONF. DIN 912	
S3-P1	ALTERES DE 25 kg	02	FERRO FUNDIDO	PADRÃO COMERCIAL
S3-F5	CHAPA PARA ARTICULAR PESOS	01	ACO ABNT 1045	RAIO R ESPECIF. = 10 mm
S3-F4	EIXO DE CARGA	01	ACO ABNT 1045	
S3-F3	CHAPA PARA APLICAÇÃO DE CARGA	01	ACO ABNT 1045	RAIO R ESPECIF. = 10 mm
S3-F2	PLACA SUPORTE DOS PESOS	01	ACO ABNT 1020	
S3-F1	BARRA ROSCADA M14x700	01	ACO ABNT 1045	PADRÃO COMERCIAL
S3	SUBCONJUNTO CARGA	01		
PÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
			UNIDADE	mm
			TOL. GERAL	DES. Nº A16
			NOME	DATA 27/08/2006
			VISTO	Mário Vítor Leite
			ESCALA	Prof. Julio Klein
			1:4	

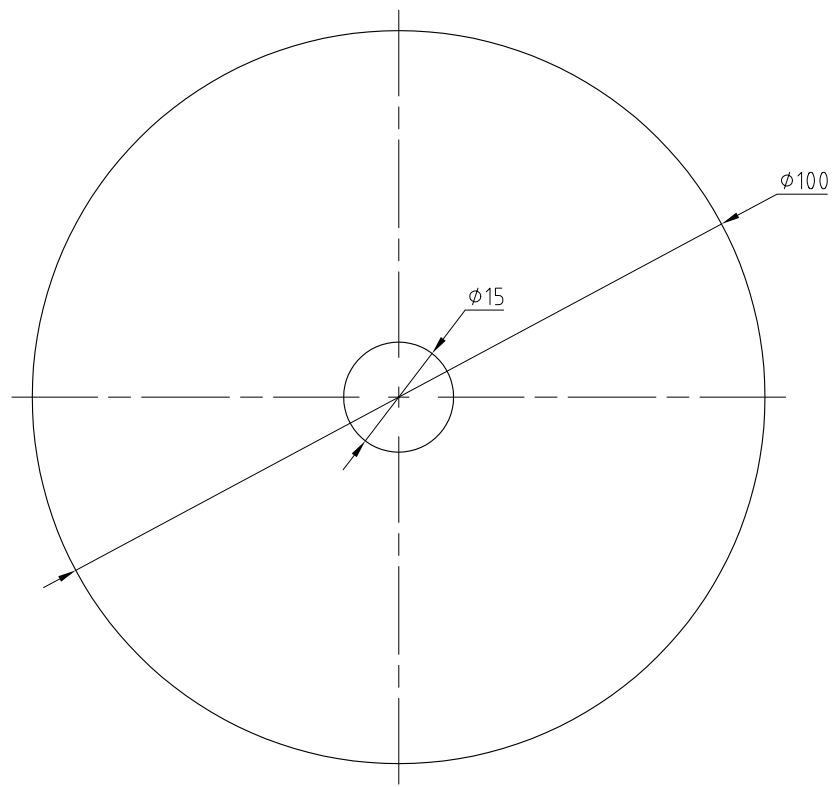
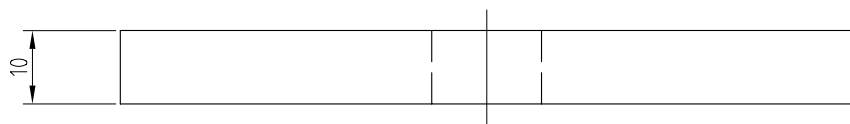
CEFET - PR  
LASC-LFS  
FADIGA DE CONTATO





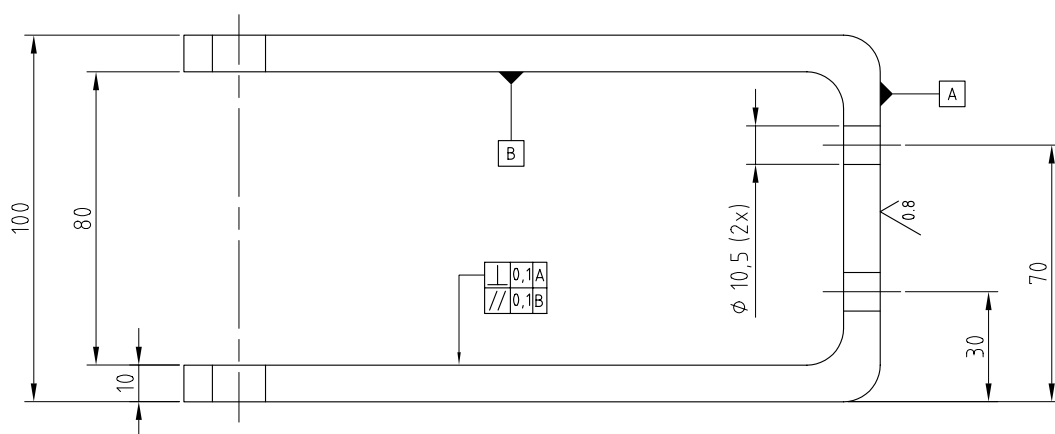
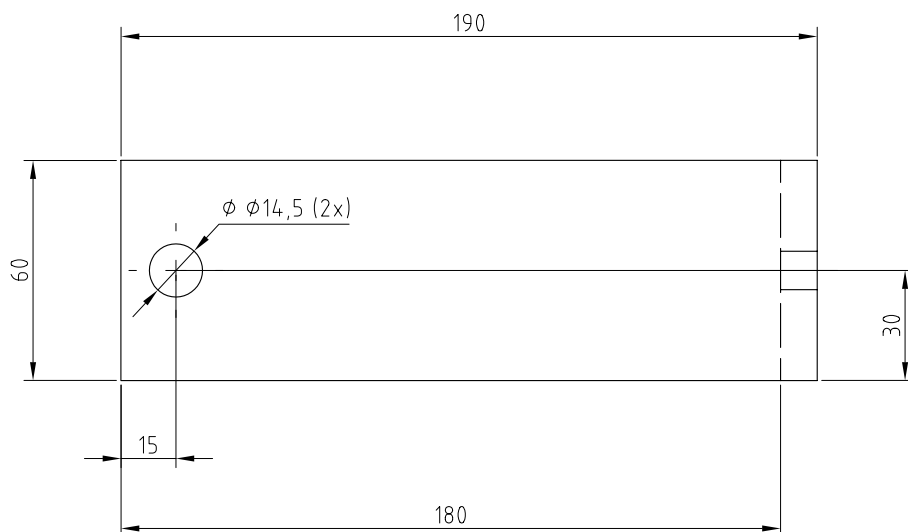
S3-F1	BARRA ROSCADA M14x700	01	AÇO ABNT 1045	PADRÃO COMERCIAL		
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A17
			TOL. GERAL		DATA	28/08/2006
<b>LASC-LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			1:1			

3.2 ✓



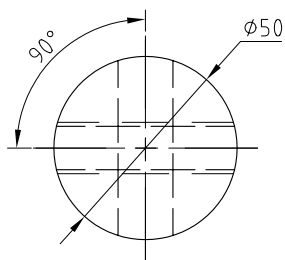
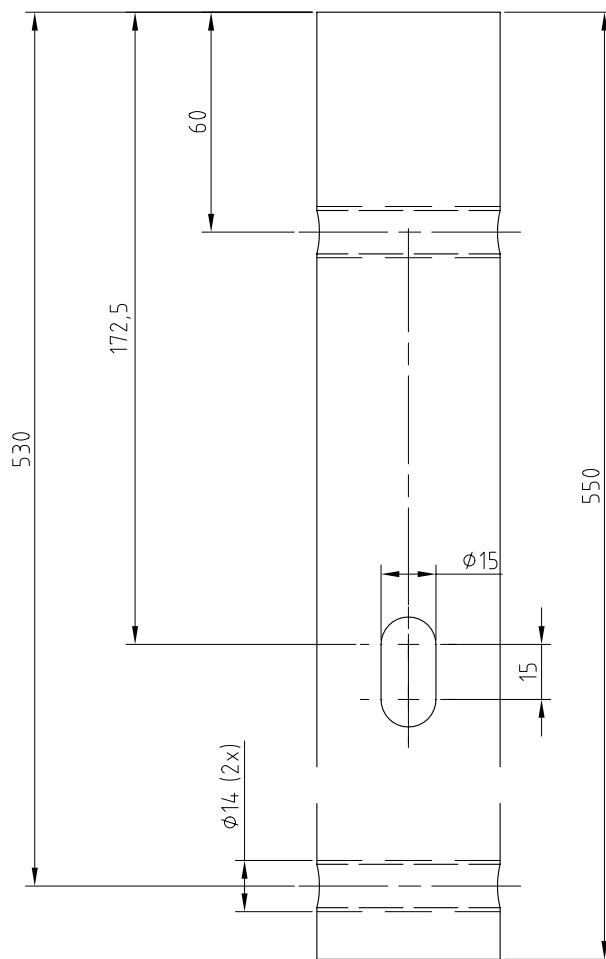
S3-F2	PLACA SUPORTE DOS PESOS	01	AÇO ABNT 1020			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A18
			TOL. GERAL		DATA	28/08/2006
<b>LASC-LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			2:1			

1.6 / (0.8)



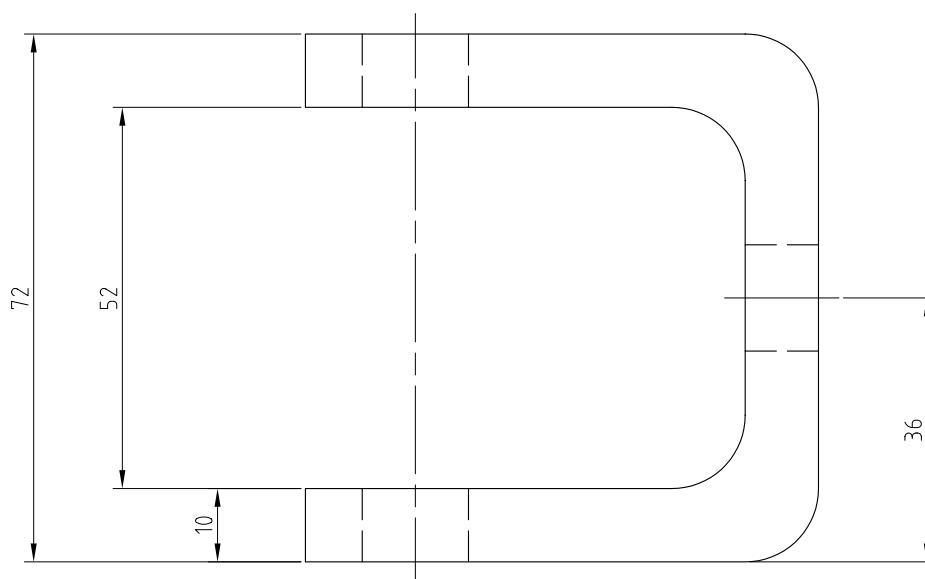
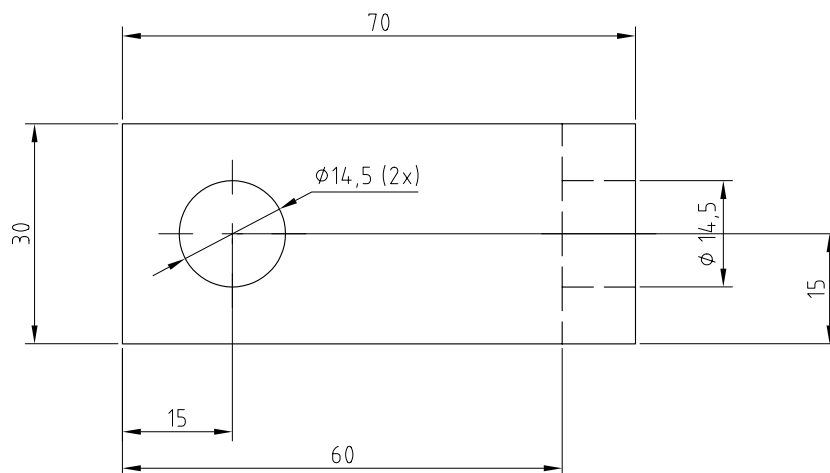
S3-F3	CHAPA PARA APLICAÇÃO DE CARGA	01	ÁÇO ABNT 1045	RAIO Ñ ESPECIF. = 10 mm	
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N° A19
			TOL. GERAL		DATA 27/08/2004
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite	
			VISTO	Prof. Julio Klein	
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA 1:2		





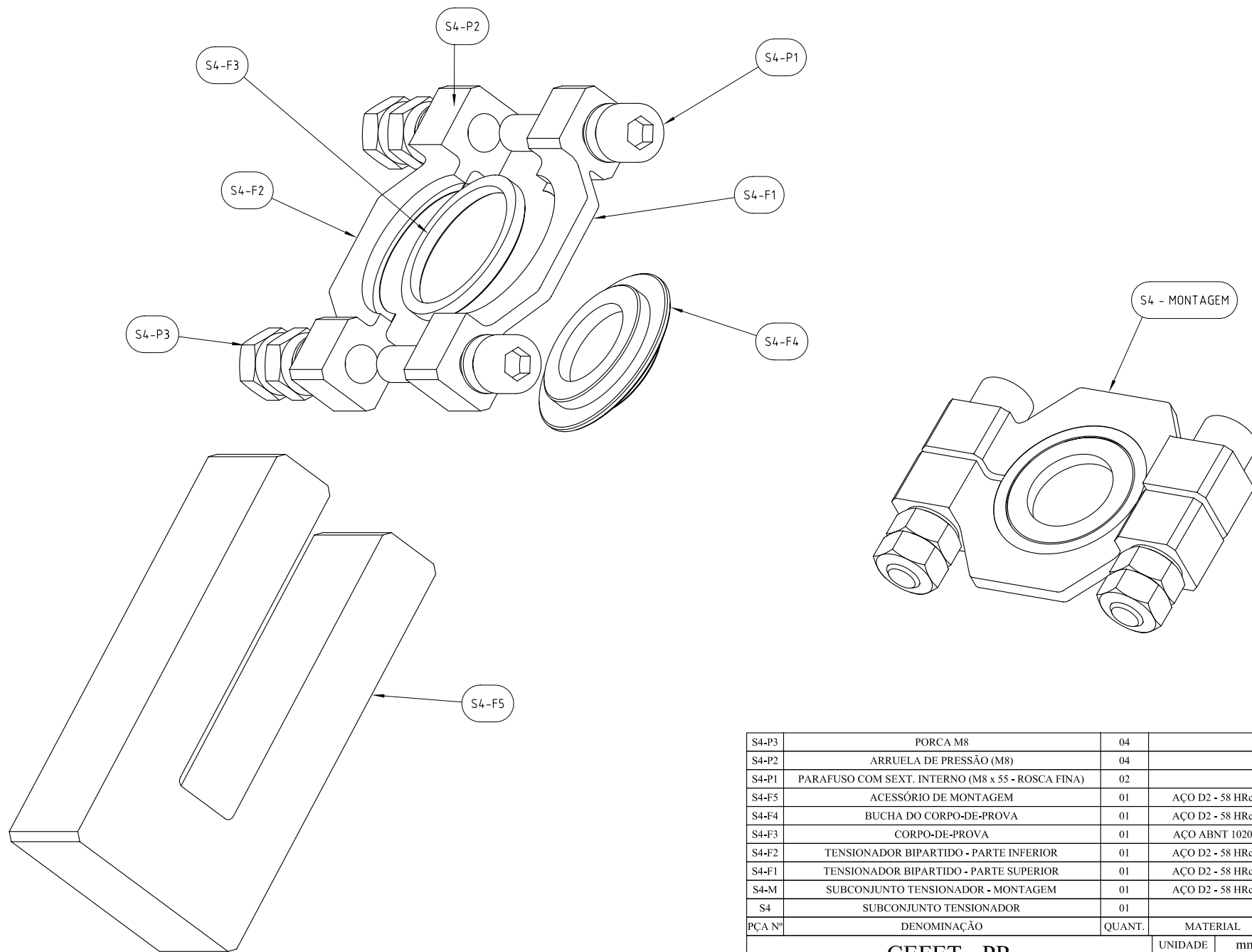
S3-F4	EIXO DE CARGA	01	AÇO ABNT1045			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A20
			TOL. GERAL		DATA	27/08/2006
<b>LASC-LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:2		

1.6

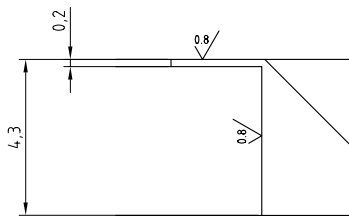


S3-F5	CHAPA PARA ARTICULAR PESOS	01	ÇO ABNT 1045	RAIO Ñ ESPECIF. = 10 mm		
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	A21
			TOL. GERAL		DATA	27/08/2006
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			2:1			

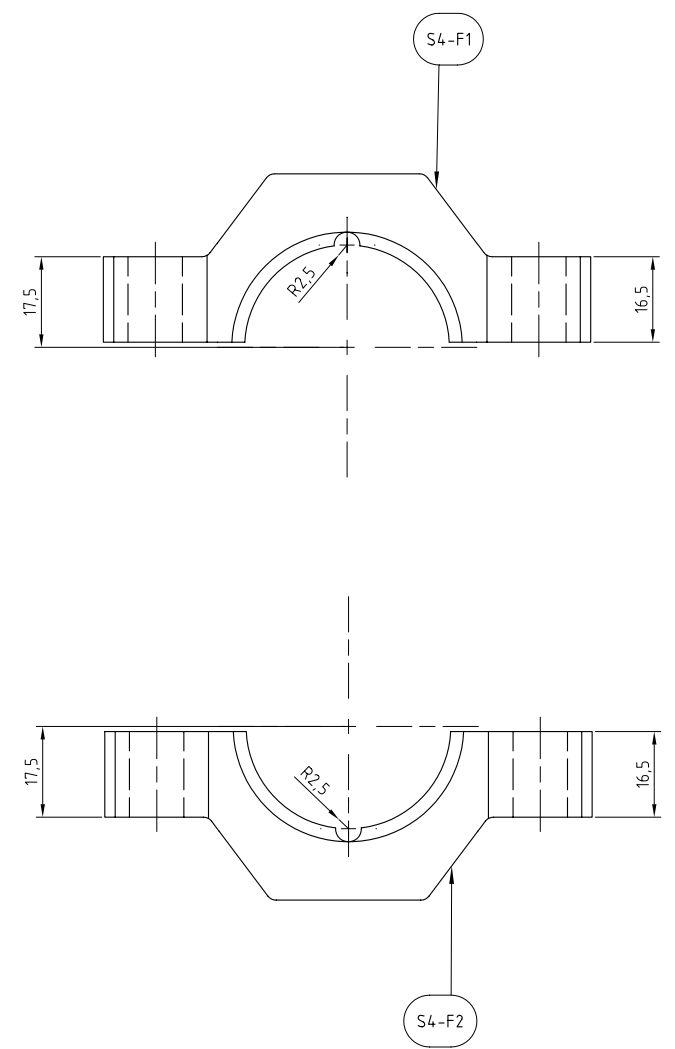
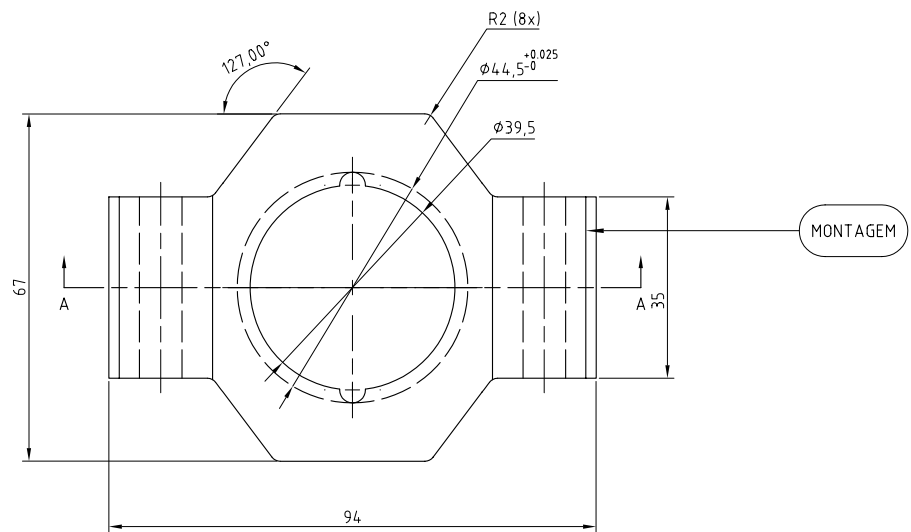
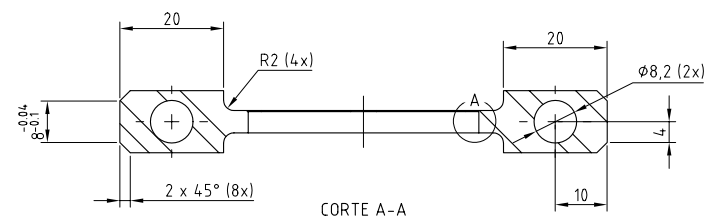
## **ANEXO B**



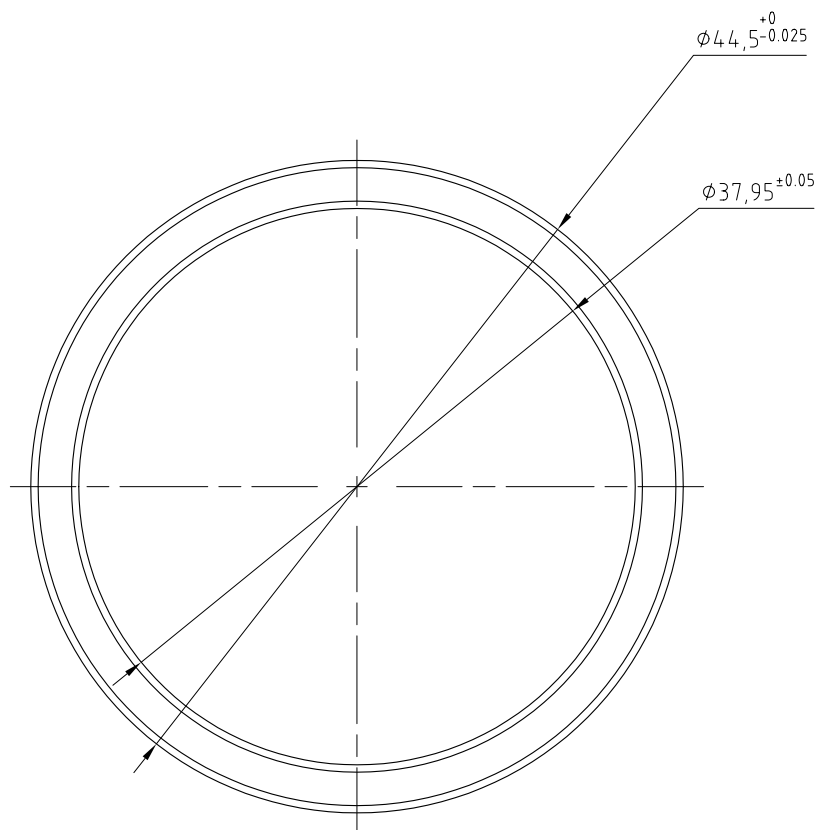
S4-P3	PORCA M8	04		
S4-P2	ARRUELA DE PRESSÃO (M8)	04		
S4-P1	PARAFUSO COM SEXT. INTERNO (M8 x 55 - ROSCA FINA)	02		
S4-F5	ACESSÓRIO DE MONTAGEM	01	AÇO D2 - 58 HRc	
S4-F4	BUCHA DO CORPO-DE-PROVA	01	AÇO D2 - 58 HRc	
S4-F3	CORPO-DE-PROVA	01	AÇO ABNT 1020	
S4-F2	TENSIONADOR BIPARTIDO - PARTE INFERIOR	01	AÇO D2 - 58 HRc	
S4-F1	TENSIONADOR BIPARTIDO - PARTE SUPERIOR	01	AÇO D2 - 58 HRc	
S4-M	SUBCONJUNTO TENSIONADOR - MONTAGEM	01	AÇO D2 - 58 HRc	
S4	SUBCONJUNTO TENSIONADOR	01		
PÇA N <sup>o</sup>	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm
			TOL. GERAL	
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite
			VISTO	Julio Klein
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:1



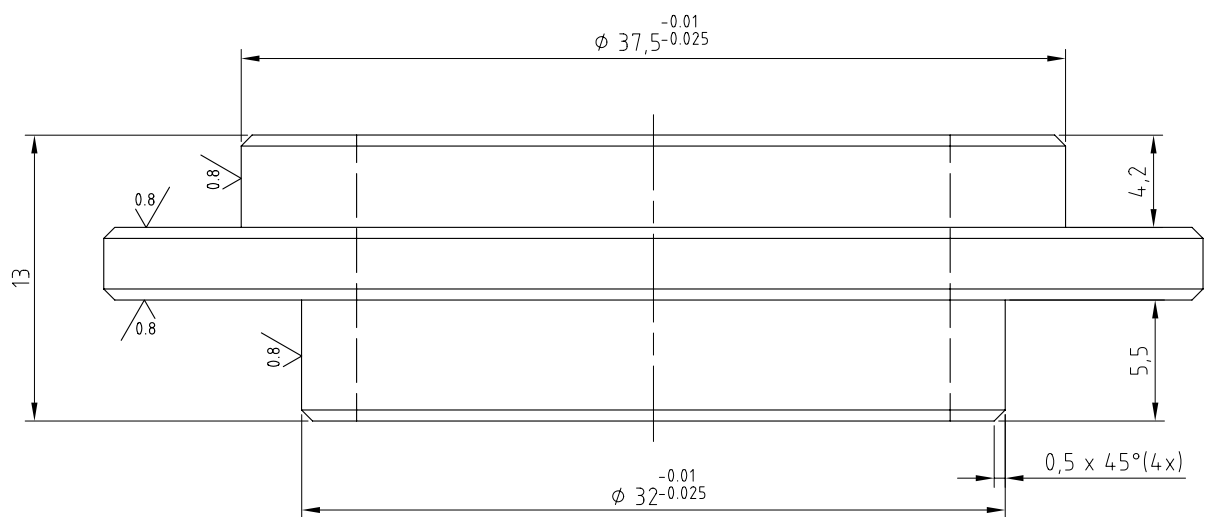
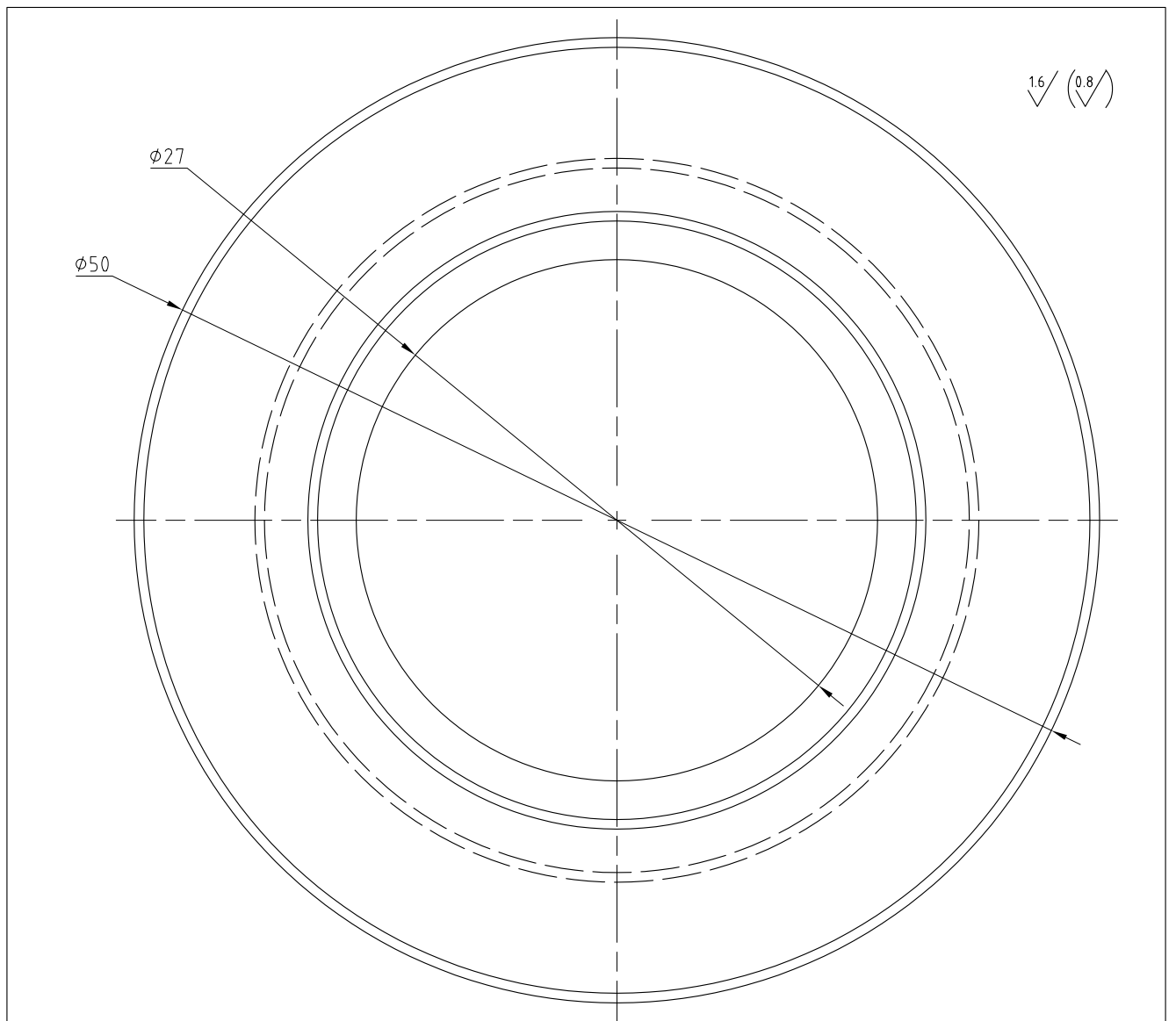
DETALHE A  
ESCALA 7:1



S4-F2	TENSIONADOR BIPARTIDO - PARTE INFERIOR	01	AÇO D2 - 58 HRc	Dimens. peça 1	
S4-F1	TENSIONADOR BIPARTIDO - PARTE SUPERIOR	01	AÇO D2 - 58 HRc	Dimens. peça 1	
	TENSIONADOR BIPARTIDO				
PÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. Nº B2
			TOL. GERAL		DATA 27/08/2006
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite	
			VISTO	Julio Klein	
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA	1:1	

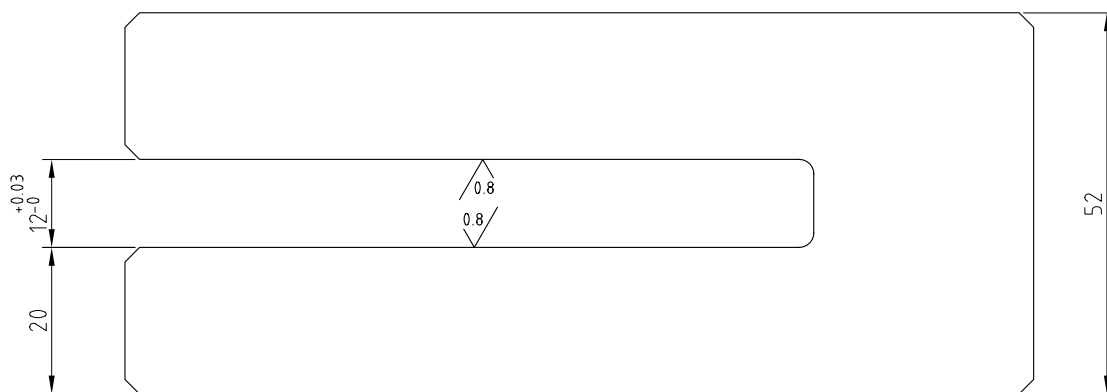
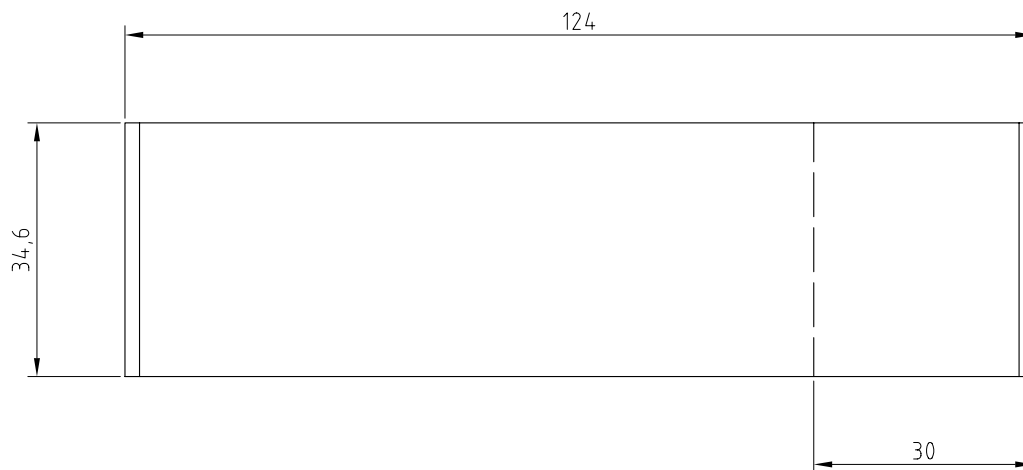


S4-F3	CORPO-DE-PROVA	01	FERRO FUNDIDO	TEMPERADO		
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	B3
			TOL. GERAL		DATA	27/08/2006
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			2:1			



S4-F4	BUCHA DO CORPO-DE-PROVA	01	AÇO D2 - 58 HRc			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	B4
			TOL. GERAL		DATA	19/09/2005
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Prof. Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA			
			3:1			

1.6 / (0.8)



S4-F5	ACESSÓRIO DE MONTAGEM	01	AÇO D2 - 58 HRc			
PÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		OBSERVAÇÃO	
<b>CEFET - PR</b>			UNIDADE	mm	DES. N°	B5
			TOL. GERAL		DATA	27/08/2006
<b>LASC - LFS</b>			NOME	Mario Vitor Leite		
			VISTO	Julio Klein		
<b>FADIGA DE CONTATO</b>			ESCALA 1:1			



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)