



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X EM AÇO ROLAMENTO SUBMETIDO A ESFORÇOS CÍCLICOS

EUGÊNIO TEIXEIRA DE CARVALHO FILHO

Orientador: Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros
Co-orientador: Prof. Dr. Djalma Ribeiro da Silva

Natal
Janeiro/2015



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X EM AÇO ROLAMENTO SUBMETIDO A ESFORÇOS CÍCLICOS

EUGÊNIO TEIXEIRA DE CARVALHO FILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros
Co-orientador: Prof. Dr. Djalma Ribeiro da Silva

Natal
Janeiro/2015

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Carvalho Filho, Eugênio Teixeira de.

Estudo da evolução das tensões residuais através da difratometria de raios x em aço rolamento submetido a esforços cíclicos / Eugênio Teixeira de Carvalho Filho. – Natal, RN, 2015.

107 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros.

Coorientador: Prof. Dr. Djalma Ribeiro da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Tensão residual – Dissertação. 2. Difratometria de raio x – Dissertação. 3. Desgaste por contato cíclico – Dissertação. 4. Tribologia – Dissertação. I. Medeiros, João Telésforo Nóbrega de. II. Silva, Djalma Ribeiro da. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS
ATRAVÉS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X EM
AÇO ROLAMENTO SUBMETIDO A ESFORÇOS
CÍCLICOS**

EUGÊNIO TEIXEIRA DE CARVALHO FILHO

**Esta dissertação foi julgada APROVADA para a obtenção do título de
Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA**

Sendo APROVADA em sua forma final.

Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros - Orientador

Prof. Dr. Djalma Ribeiro da Silva – Co-orientador

Prof. Dr. Nicolau Apoena Castro – Externo ao programa

Prof. Dr. Luis Gallego Martinez – Externo à instituição

DEDICATÓRIA

É com muita gratidão que dedico este trabalho à minha família, os principais responsáveis pelo sucesso da minha vida.

Vocês são minha base, minha fortaleza, meu escudo, minha inspiração.

Uma família batalhadora, destemida, unida e amada.

Tenho profunda admiração e respeito por vocês que sempre se dedicaram muito para construir uma família exemplar!

Minha Mãe, Profa. Lane Vivian Varela T. de Carvalho

Meu pai, Eugênio Teixeira de Carvalho

Meu Irmão Prof. João Teixeira de Carvalho Neto

É com todo meu amor que eu dedico essa dissertação à vocês!

AGRADECIMENTOS

É com toda humildade a que venho tentar expressar toda a minha gratidão àquelas pessoas que contribuíram direta e indiretamente para o sucesso desse trabalho e que me fez ser uma pessoa melhor, justa e dedicada a cada dia.

À **Deus** pela oportunidade de me fazer existir e ter saúde para enfrentar o árduo caminho;

Ao meu tio e padrinho **Francisco de Assis T. de Carvalho (Tio Chiquinho)** – em memória – que sei que gostaria de compartilhar esse momento comigo e à minha madrinha **Mama** que sempre me acolheu com muita simplicidade, muito amor e um carinho sem fim;

Aos meus familiares tios, tias, primos e primas que me deram vários ensinamentos que serão levados para toda minha vida. Em especial ao meu primo que me adotou como irmão caçula (a recíproca é verdadeira), **André Elias Farias Netto**, pelo companheirismo, dedicação, ensinamentos, confiança e incentivo. E minha tia **Neide** pelos cuidados e orações.

À minha namorada **Laura Guedes** pelo amor, dedicação, infinita paciência e cordialidade. Por muitas vezes ter sido os meus membros de apoio e de sustentação. Pelos inúmeros incentivos de continuidade. Por ter me ajudado em toda caminhada que não foi fácil, ela sabe melhor do que ninguém. E a sua família que tão bem me acolheu.

Ao meu orientador professor doutor **João Telésforo Nóbrega de Medeiros**, por todos os ensinamentos, no âmbito profissional e pessoal, que muitas vezes no início não ficam tão claros, mas com o passar do tempo conseguimos apreender todos eles, pelo acolhimento em seu grupo de pesquisa e toda sua paciência. Muito obrigado pelos incentivos e pela amizade verdadeira.

Ao professor **Dr. Djalma Ribeiro da Silva** pela Co orientação, ensinamentos e todo apoio que foi me concedido desde a minha graduação.

Aos professores **Dr. Luis Gallego Martinez, Dr. Wanderson Santana da Silva, Dr. Nicolau Apoena Castro e Dr. Efrain Pantaleon Matamouros**, pelas

varias oportunidades de discussão, incentivos e valiosas contribuições na minha formação.

Ao **laboratório de Refino e Tecnologia Ambiental (LABTAM)**, à professora **Dra. Dulce Maria** e aos operadores **Ângelo, Rodolfo, Anderson e Rodrigo** pela disponibilidade dos equipamentos e por todas as análises necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao **laboratório de Microscopia** do departamento de materiais da UFRN e ao técnico **Igor** pela compreensão e prontidão.

Ao **laboratório de usinagem** da UFRN e ao mecânico **Frazão** pelas inúmeras peças usinadas.

Aos Amigos e Colegas de pós graduação **Armando, Hudson e Emanoela Mattos**, pelas discussões construtivas e momentos de descontração.

À **família Oliveira Guedes** que me recebeu e acolheu como membro nas minhas estadias em São Paulo.

Ao **Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos NUPPRAR-UFRN** por toda a assistência, apoio técnico e pessoal aos colegas de trabalho **Artejose, Jardel, Tarcila, Emily, Mariela, Francinaldo, Evelyn, Morgana** e todos que participam desse grupo tão esforçado e que fazem todos os dias de trabalho ficarem melhores e mais divertidos.

Aos amigos de longas datas **Emerson José, Raphael Fonseca, Paulo Mauricio, Bia Villas, Barbara Lais, Hanoch, Raylanderson, Alan Michel, Victor, Paulo Nielsen e Yuri Andrews**, que demonstraram todos esses anos serem mais que amigos e fazerem parte de minha família.

Ao casal de amigos **José Luiz e Clélia Alencar**, pela verdadeira amizade e todas as conversas, momentos compartilhados e incentivos.

Ao **Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural GET-UFRN** por todo o carinho e acolhimento que recebi ao ingressar nessa família. Inicialmente a **Fernando** que foi minha ponte de acesso, ao secretário **Ricardo** pela organização e prontidão para resolver nossos problemas burocráticos, aos

mestres da paciência e sabedoria **Prof. Manoel Fernandes** e **Prof. Roberto Fernandes**, ao amigo **Jarbas Santos** que sempre esteve disposto a ajudar em tudo, virar a noite trabalhando, discutindo e dando orientações valiosíssimas, à doutoranda **Juliana** pelas palavras de apoio incentivadoras e realistas, à **Ana Emília** e **Kaic** pelas varias correções, contribuições e discussões, à **Fabiana** pelos momentos de ajuda simultânea, conversas que pareciam desanimadoras, mas que sempre acabavam em uma injeção de ânimo e determinação, ao **Óliver** pelos sábios conselhos, conversas construtivas e por toda ajuda braçal e intelectual, aos demais colegas **Dyego, Edilson, Kaka, Joãozinho, Val, Marcinha, Cristiano, Benevides, Vinícius, Plínio, Tony, João Flávio Rômulo, Silvio, Mousinho, André, Ruy, Mariana, Ludmila, Mousinho, João, Luciana, Álvaro e Aline** por todas as ajudas de última hora que foi requisitado e sempre algum de vocês estavam dispostos a ajudar, pelos momentos compartilhados e conversas descontraídas que fizeram esse período mais prazeroso.

RESUMO

As micro deformações decorrentes do carregamento cíclico causam a variação das distâncias entre os átomos da rede cristalina provocando uma irreversibilidade no componente. Com o objetivo de estudar e entender o comportamento do material este trabalho verificou a influência sofrida pelas tensões residuais em pistas de rolamentos axiais, fabricados em aço AISI 52100, após ensaios por contato cíclico de rolamento em um tribômetro a 1 m/s, sob duas pressões de contato (500 MPa e 1400 MPa) em condições seca e regime de lubrificação limítrofe. Foram desenvolvidos procedimentos de ensaios isolados termo acusticamente para o monitoramento dos sinais de temperatura de contato e nível de pressão sonora para estabelecer um comparativo entre as medidas de tensão residual, microdureza Vickers e registros micrográficos buscando um indicativo da evolução do desgaste. O método $\text{Sen}^2\psi$ através técnica de difratometria de Raios X foi usado para quantificar as tensões residuais. Três zonas da pista de rolamento foram selecionadas para a avaliação do desgaste e da morfologia da superfície após ciclagens pré-determinadas, comparando-as com a sua condição nova ("como recebido"). Medidas de microdureza e tensão residual apresentaram variações significativas após os ensaios e foi possível observar a relação entre o incremento da pressão sonora e a tensão residual para os ensaios com contato conforme seco e lubrificado.

Palavras-Chave: *Tensão Residual; Difratometria de Raios X; Desgaste por contato cíclico; Tribologia*

ABSTRACT

The micro-deformations caused by cyclic loading origins the variation of the distances between atoms of the crystal lattice producing the irreversible component. In order to study and understand the microstructural behavior of the material this paper investigated the influence suffered by residual stresses in thrust rolling bearing races fabricated in AISI 52100 steel, after tests by cyclic rolling contact in a tribometer at 1m/s under two contact pressures (500 MPa and 1400 MPa) in dry and boundary lubrication conditions. Procedures of tests thermo-acoustically isolated were developed for monitoring the contact temperature and sound pressure level signals to establish a comparison between the residual stress measurements, micro-hardness Vickers and micrographic registers searching an indication of wear evolution. The $\sin^2\psi$ method by X-ray diffraction technique was used to quantify the residual stresses. Three raceway zones were selected for the evaluation of wear and surface morphology after predetermined cycling, comparing with their new condition ("as received"). Micro-hardness and residual stress measurements showed significant changes after the tests and it was possible to observe the relationship between the increase of sound pressure level and the residual stress for dry and lubricated conditions.

ABSTRACT: Keywords: Residual Stress; X-Ray Diffraction; Wear cyclic contact, Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Áreas industriais que contemplam o estudo das tensões residuais.	19
Figura 2- Diferentes formas de atrito sendo F uma força de tração e W a força peso. (a) Atrito de rolamento (b) Atrito de deslizamento.....	23
Figura 3 -- Representações dos contatos mecânicos (a) Conforme (b) Não conforme.....	24
Figura 4 - Imagem das linhas de iso tensão de cisalhamento na configuração esfera-plano considerando o contatonormal e tangencial utilizando técnicas de fotoelasticidade.....	26
Figura 5 - Contato elástico entre dois corpos elípticos	26
Figura 6 - Curva de Stribeck	29
Figura 7 - (a) Distribuição espacial de tensões da superfície. (b) Tensões de cisalhamento subsuperficiais	32
Figura 8- Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760..	33
Figura 9 – (a) Efeito das tensões residuais no desempenho dos materiais. (b) Superposição das tensões residuais e as tensões de serviço.....	34
Figura 10- Tipos de tensões residuais	35
Figura 11- Atuação das diferentes tensões residuais.....	37
Figura 12- Perfil de distribuição de tensões residuais em uma placa que sofre tratamentos superficiais	39
Figura 13- Comportamento das tensões residuais compressivas em um componente com solicitações trativas.....	40
Figura 14– (a) – Influência dos tratamentos superficiais na evolução do dano por fadiga em aços austeníticos AISI 304. (b) Influência da tensão de laminação na taxa de propagação das trincas por fadiga.....	41
Figura 15- Perfil das tensões residuais em um cilindro de aço temperado a 900°C e resfriado a água	42
Figura 16 - Perfil da distribuição de tensões residuais na solda	43
Figura 17- Tipos de rosetas A, B e C	45
Figura 18- Esquema da técnica de medida de tensões residuais pelo furo cego	45
Figura 19- Desenho esquemático da técnica de seccionamento.....	46

Figura 20- Representação do método de deflexão.....	47
Figura 21- Estrutura dos domínios magnéticos em um material.....	49
Figura 22 - Visão esquemática da configuração de medida pelo método de ultrassom.....	50
Figura 23- Representação esquemática dos parâmetros envolvidos na lei de Bragg.....	52
Figura 24– (a) Estado de tensões (ASTM E2860-12) (b) representação da variação dos ângulos psi.....	54
Figura 25- Perfis de curva de $\theta\psi$ versus $\text{sen}^2\psi$	55
Figura 26 – Gráfico com a evolução do nível de pressão sonora [dB] e da tensão residual com a distância de rolamento.....	56
Figura 27 - Desenho esquemático das áreas a serem analisadas no corpo de prova, pista (a) inferior (b) Superior.....	57
Figura 28- Fotos das localizações dos corpos de prova (a) Pista inferior na posição invertida (b) Pista superior na posição original.....	58
Figura 29- Adaptação do porta amostra para a análise de DRX.	58
Figura 30– Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu.	60
Figura 31– Desenho esquemático das regiões onde foram feitas as indentações na pista com a posição invertida.	60
Figura 32 – Desenho esquemático das regiões onde foram feitas as indentações na pista com a posição normal.....	61
Figura 33 – (a) Pista invertida posicionada com auxílio do dispositivo (b) Medida de Microdureza Vickers na pista invertida.	61
Figura 34– Difratorômetro de raios X equipado com o módulo “stress”	62
Figura 35– Desenho esquemático das regiões da pista invertida analisadas na tensão residual.....	63
Figura 36 – Desenho esquemático das regiões da pista normal analisadas na tensão residual.....	63
Figura 37– (a) Desenho esquemático das regiões analisadas na tensão residual. (b) Dispositivo para análise de Tensão Residual	64
Figura 38– Posicionamento das amostras na direção (a) radial, (b) circunferencial (pista invertida) e (c) circunferencial (pista posição normal). ...	65

Figura 39– (a) Desenho esquemático do tribômetro vertical (b) Tribômetro vertical no detalhe (acima) polia multiplicadora de carga, (abaixo) acondicionamento dos corpos de prova.	67
Figura 40– (a) Vista da bancada térmica-acusticamente isolada (b) Bancada instrumentada com posicionamento em (1) decibelímetro, (2) Acelerômetro, (3) Termopar em contato com a amostra inferior e (4) Parafuso para prender a pista inferior.	68
Figura 41– (a) Representação do contato não conforme esfera com 4,65 mm de diâmetro sobre plano (b) Posicionamento da pista inferior (c) Posicionamento das esferas com gaiola.	69
Figura 42– (a) Representação do contato conforme esfera sobre pista com curvatura de raio = 3,01 mm (b) Posicionamento das esferas com pista inferior.	70
Figura 43– (a) Óleo lubrificante SAE 40 SF (b) Lubrificação do ensaio	71
Figura 44 – Microestrutura do aço 52100 através do M.O. Ataque: Nital 2% ..	72
Figura 45– Microestrutura do aço 52100 através do MEV. Ataque: Nital 2% ..	73
Figura 46– Mapeamento realizado no aço 52100 pela técnica de EDS.	75
Figura 47 – Difratoograma do aço 52100 evidenciando as fases de Fe-Cr e Fe ₃ C	76
Figura 48 – Curva $\text{Sen}^2\psi$ versus 2θ do pó de aço ferrítico para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.	77
Figura 49 – Perfis da curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ com a presença de tensões de cisalhamento (a) os 11 ângulos ψ (b) Desconsiderados os dois primeiros valores	78
Figura 50 – Evidências do desgaste na pista do rolamento, regiões LI, LII e LIII	79
Figura 51 – Acompanhamento do desgaste na esfera	80
Figura 52 – Acompanhamento do desgaste sofrido no corpo de prova: Lado LI	81
Figura 53 – Acompanhamento do desgaste sofrido no corpo de prova: Lado LII	82
Figura 54 – Acompanhamento do desgaste sofrido no corpo de prova: Lado LIII	83
Figura 55 - Evolução das tensões residuais.	85

Figura 56 - Microdureza HV0.025, com evidência do período de running-in. ..	86
Figura 57 – Superfície da trilha de rolamento na condição recebida.	87
Figura 58 – Registro fotográfico após ensaio a seco.....	87
Figura 59 - DRX do pó proveniente do ensaio a seco	88
Figura 60 – Superfícies desgastadas pelo ensaio a seco.....	90
Figura 61 – Gráfico com valores (MPa) das medidas de tensões residuais para a condição SECO na condição recebida e após 106 ciclos nas regiões LI, LII e LIII.....	91
Figura 62 – Gráfico com valores das medidas de microdureza Vickers.	91
Figura 63 – Registro fotográfico após o ensaio lubrificado (SAE 40).....	93
Figura 64 – Imagens obtidas por MEV da morfologia da superfície dos CPs. .	94
Figura 65 – Gráfico com valores (MPa) das medidas de tensões residuais para a condição LUBRIFICADO na condição recebida e após 106 ciclos nas regiões LI, LII e LIII.....	95
Figura 66 – Gráfico com valores das medidas de microdureza Vickers.	96
Figura 67– História térmica dos ensaios com contato conforme seco (CC SECO), lubrificado (CC LUBRIFICADO) e com contato não conforme seco (CNC SECO).....	97
Figura 68 - Níveis de pressão sonora dos ensaios com contato conforme seco (CC SECO), lubrificado (CC LUBRIFICADO) e com contato não conforme seco (CNC SECO).....	98
Figura 69 – Evolução do nível de pressão sonora [dB] e da tensão residual com a distância de rolamento quantidade de ciclos para os ensaios seco e lubrificado das duas pistas inferior e superior.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química mássica (%) do aço AISI 52100	57
Tabela 2- Configurações das medidas de difração para análise de tensão residual.	66
Tabela 3– Configuração do ensaio com contato não conforme	69
Tabela 4– Configuração do ensaio com contato conforme não lubrificado	70
Tabela 5– Propriedades do óleo lubrificante Dulub SAE 40 SF	71
Tabela 6 – Resultado da análise química pelo EFRX.....	74
Tabela 7 – Resultado da análise química pelo EPMA	74
Tabela 8 – Valores (MPa) das medidas de tensões residuais e dos valores das tensões equivalentes calculadas.....	84
Tabela 9 – Tabela contendo valores das massas dos corpos de prova e referentes à perda.....	89
Tabela 10 – Valores (MPa) das medidas de tensões residuais e a porcentagem de incremento	90
Tabela 11 – Valores das massas dos corpos de prova e referentes à perda. .	93
Tabela 12 – Valores (MPa) das medidas de tensões residuais e a porcentagem de incremento	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. Objetivos.....	21
2.1 Objetivos Gerais	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3. Hipótese.....	21
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1 Tribologia.....	22
2.1.1 Atrito de deslizamento.....	23
2.1.2 Atrito de rolamento.....	24
2.2 Contatos Mecânicos	24
2.2.1 Contato conforme.....	25
2.2.2 Contato não conforme.....	25
2.3 Lubrificação	28
2.3.1 Regimes de lubrificação	28
2.3.1.1 Regime Hidrodinâmico	29
2.3.1.2 Regime Elastohidrodinâmico	30
2.3.1.3 Lubrificação Limítrofe	30
2.3.1.4 Lubrificação Mista.....	30
2.4 Fadiga de contato por rolamento	31
2.5 Tensão residual.....	34
2.5.1 Tensão residual Macroscópica ou do tipo I	35
2.5.2 Tensão residual Microscópica ou do tipo II.....	36
2.5.3 Tensão residual Submicroscópica ou do tipo III	36
2.5.4 Geração e modificação das Tensões Residuais.....	37
2.5.4.1 Processos mecânicos.....	38
2.5.4.2 Endurecimento de superfícies	39

2.5.4.3 Processos Térmicos	41
2.5.5 Métodos de quantificação	43
2.5.5.1 Furo cego	44
2.5.5.2 Técnica de seccionamento	46
2.5.5.3 Remoção de camadas (Deflexão).....	47
2.5.5.4 Ruído Barkhausen.....	48
2.5.5.5 Medidas por Ultrassom.....	49
2.5.5.6 Difração de Raios X.....	51
2.5.5.7 Relação entre tensão e deformação para a análise de DRX.....	53
2.6 Tensão Residual e Nível de Pressão Sonora (NPS)	56
3. MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 Materiais.....	57
3.2 Ensaios de Caracterização	58
3.2.1 DRX	58
3.2.2 Análise Química	59
3.2.3 Preparação Metalográfica	59
3.2.4 Microdureza	60
3.2.5 Tensão Residual por Difração de Raios X.....	62
3.2.6 Ensaios Tribológicos	67
3.2.6.1 Ensaio com contato não conforme.....	68
3.2.6.2 Ensaio com contato conforme não lubrificado.....	69
3.2.6.3 Ensaio com contato conforme lubrificado	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.1 Caracterizações dos corpos de prova antecedentes aos ensaios tribológicos	72
4.1.1 Metalografia via Microscopia Óptica.....	72
4.1.2 Análise química.....	74

4.1.3 Difração de raios X.....	75
4.1.4 Tensão Residual por Difração de raios X	76
4.2 Ensaio de contato não conforme:	79
4.3 Ensaios com contato conforme:.....	86
4.3.1 Ensaio contato conforme Seco:.....	87
4.3.2 Ensaio contato conforme Lubrificado	92
4.4 Análise da Temperatura	96
4.5 Análise do Nível de Pressão Sonora (NPS)	97
4.4.1 Evolução das tensões residuais e do Nível de pressão sonora	98
5. CONCLUSÃO	100
6. REFERÊNCIAS.....	101

1. INTRODUÇÃO

Em meados do século XIX o contato e o movimento entre corpos foram objetos de estudos por vários pesquisadores, se destacando Hertz e Reynolds com seus modelos. Hertz estudou o contato estático não conforme de dois corpos de superfícies elásticas desconsiderando o atrito, enquanto Reynolds considerava o atrito e o movimento relativo entre si (HUTCHINGS, 1992).

O movimento relativo entre componentes quando não lubrificado adequadamente, compromete a integridade estrutural provocando danos e desgaste. Através de pesquisas realizadas pela *American Society for Mechanical Engineers* nos Estados Unidos foi sinalizada uma perda econômica de 1% a 2,5% do produto interno bruto devido ao desgaste. Na década de 80 a Alemanha revelou que o desgaste contribui com a perda de 4,5% do produto interno bruto (GAHR, 1987).

As perdas econômicas ocasionadas pelo desgaste podem ser reduzidas com a otimização do processo, redesenho de projeto, produção, montagem e aplicação. O controle do custo do desgaste pode começar com o processo de fabricação correto para o produto. O que inclui a escolha do equipamento e lugar de instalação, questões de padronização e estoque. O projeto pode efetivamente reduzir o desgaste do componente ao otimizar a transferência de carga e movimento, permitindo apenas baixa tensão, usando material apropriado e lubrificante em função da carga, temperatura e ambiente. As partes em desgaste podem ser projetadas para fácil recolocação. (GAHR, 1987).

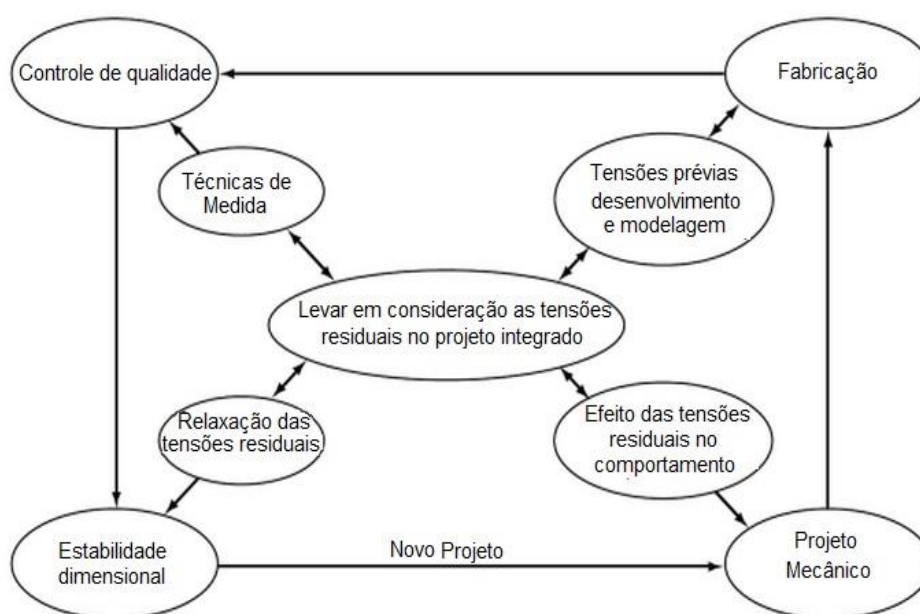
Dentro desse contexto está a ciência que estuda esses fenômenos de contato e movimentos entre corpos, a tribologia. No cenário industrial um termo que está se destacando e é a chave para o sucesso das empresas que trabalham com produtos é a “confiabilidade”, que é a probabilidade de um elemento exercer uma função, sob condições pré-estabelecidas, de forma adequada, como previsto no projeto, durante um período de tempo pré-determinado e também está relacionado com a garantia de execução de suas funções sistemáticas sem falha prévia.

A medição, controle e monitoramento de tensões residuais durante toda rota de processamento do material é de vital importância para assegurar os desvios de forma e dimensão previstos no projeto de engenharia em etapas subsequentes de processamento do material (NUNES, 2008).

As tensões residuais são de extrema importância quando falamos de nucleação e propagação de trincas. Existe um interesse crescente no âmbito das tensões residuais, como elas podem afetar as propriedades mecânicas de um material ou de uma estrutura. As falhas dos componentes não estão ligadas apenas aos esforços externos. O estado de tensões residuais é um fator importante que deve ser levado em consideração tendo em vista que todos os processos de manufatura imprimem um novo estado de tensões residuais.

Essas tensões podem ser maléficas ou benéficas ao componente, dependendo do seu caráter e magnitude. Áreas como a de design aeroespacial, automotiva, nuclear, inclusive as indústrias de microeletrônica consideram o estudo das tensões residuais para estabilidade dimensional dos elementos. A medição dessas tensões residuais é uma das maiores fontes de variação na falta de correlação entre os dados de fadiga reais e soluções de modelagem preditiva. Na Figura 1 se observa os diferentes campos de pesquisa entre os quais as tensões residuais são consideradas relevantes para a aplicação industrial. (LU, 2002)

Figura 1– Áreas industriais que contemplam o estudo das tensões residuais.



Fonte: LU (2002)

A crescente tendência à miniaturização de sistemas torna ainda mais importante o conhecimento acerca de fenômenos no nível atômico surgindo a necessidade de desenvolvimento e estudos em técnicas e tecnologias adequadas para detecção prévia e monitoramento de danos. Tal fato gerou um grande salto a partir do século XIX nesses estudos de escala atômica com os estudos da difração de raios X.

O presente trabalho investiga a evolução das tensões residuais em aço rolamento, fabricado em aço AISI 52100, através da técnica não destrutiva, difratometria de raios X, em componentes que operam em contatos cíclicos no decorrer de sua vida em serviço.

2. Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

Esse trabalho tem como objetivo geral estudar o desgaste proveniente do contato cíclico em mancais de rolamento investigando a influência que as tensões residuais sofrem quando ensaiados em um tribômetro vertical.

2.2 Objetivos Específicos

- Adaptação de uma bancada para a realização de ensaios cíclicos de rolamento.
- Realizar ensaios cíclicos tribológicos por rolamento com diferentes pressões de contato seco e lubrificado;
- Desenvolvimento de uma metodologia confiável para análise de tensões residuais pela técnica de Difractometria de Raios X
- Analisar a evolução das tensões residuais devido ao contato de rolamento cíclico de corpos sólidos metálicos;
- Verificar se existe a correlação entre microdureza e tensão residual para as condições do trabalho;
- Identificar os principais mecanismos de dano em corpos rolantes;
- Monitorar assinaturas de nível de pressão sonora e temperatura e relacionar com a evolução de desgaste;
- Relacionar a tensão residual com o nível de pressão sonora.

3. Hipótese

A variação das tensões residuais em contatos cíclicos lubrificados é desprezível em relação aos contatos secos para duas pressões de contato.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tribologia

O termo tribologia é originário da língua grega onde “*tribo*” significa esfregar e “*logia*” significa estudo, tendo como tradução direta, o estudo do atrito ou deslizamento. É a ciência que estuda o contato e movimento relativo entre corpos envolvendo o atrito, desgaste, a lubrificação e conseqüentemente a vida de sistemas (ASM INTERNATIONAL, 1992). Desde meados de 1900 antes de Cristo já fora observado em documentos ptreos que a tribologia era uma ciência atuante. Pessoas tidas como escravos transportavam monumentos da ordem de 60 toneladas com o auxílio de corpos rolantes e um fluido lubrificante com a intenção de reduzir o atrito e tornar possível a tarefa (MEDEIROS, 2002).

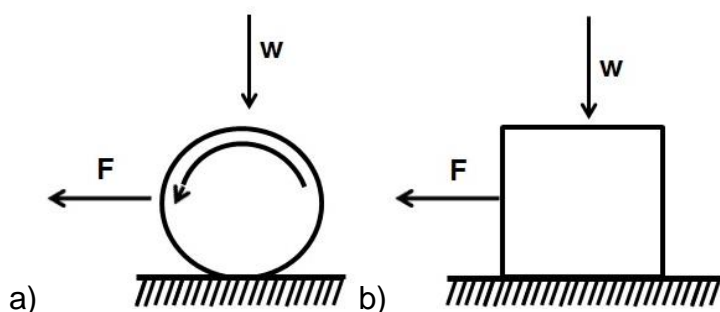
O atrito é definido como sendo a resistência ao movimento relativo entre duas superfícies em contato. Um dos nomes mais importantes na tribologia moderna é Leonardo da Vinci que estudou, no Século XV, as forças de atrito em planos horizontais e inclinados, demonstrando que estas dependem da força normal ao deslizamento dos corpos e independem da área de contato aparente (desconsiderando a rugosidade), propôs uma distinção entre atrito de deslizamento e de rolamento e introduziu o coeficiente de atrito (HUTCHINGS, 1992).

Fenômenos microscópicos de origem física, química ou microestrutural que provocam a resistência ao movimento, são denominados de mecanismos básicos do atrito. Vários desses mecanismos foram propostos e estudados nos últimos anos. Da Vinci foi o pioneiro a formular leis fundamentais do atrito juntamente com Guillaume Amontons e Charles Augustin Coulomb. As leis pioneiras não se referem à presença de lubrificante e elas não se aplicam a todas as situações.

O desgaste, por sua vez, é definido como sendo a perda progressiva ou transferência de material entre superfícies de corpos. O desgaste é proporcionado pela interação e/ou movimento relativos entre os corpos, não são propriedades intrínsecas do material, mas uma característica do sistema tribológico (ASM INTERNATIONAL, 1992).

H. Peter Jost (1960) escreveu um relatório para o comitê do Departamento Inglês de Educação e Ciência utilizando oficialmente, pela primeira vez o termo “tribologia”. A partir daí vários trabalhos foram publicados. Em 1990 Jost afirmou que o estudo da tribologia se fazia necessário do ponto de vista da viabilidade econômica, tendo uma maior eficiência, melhor desempenho, menos perdas por desgaste e conseqüentemente economias significativas. Seus estudos foram baseados na otimização dos parâmetros tribológicos (atrito e lubrificação) para diminuir o desgaste (Jost, 1960). O atrito entre dois corpos em movimento, denominado atrito sólido pode ser classificado em duas configurações: atrito de rolamento (Figura 2 (a)) e o atrito de deslizamento ou deslizante (Figura 2 (b)) (CAMPANHA, 2008; HUTCHINGS, 1992).

Figura 2- Diferentes formas de atrito sendo F uma força de tração e W a força peso. **(a)** Atrito de rolamento **(b)** Atrito de deslizamento



Fonte: HUTCHINGS (1992)

2.1.1 Atrito de deslizamento

Tem-se o atrito de deslizamento puro quando se observa a existência do deslizamento sem a presença do rolamento. A ASM INTERNATIONAL (1992) o descreve como o movimento relativo entre dois corpos, cujas velocidades na área da superfície comum são diferentes na magnitude e/ou na direção. O atrito de deslizamento é comumente estudado, pois sempre está presente nas interações dinâmicas de componentes.

Alguns mecanismos microscópicos que participam na resistência entre os corpos são: as interações mecânicas devido às rugosidades superficiais, a interação físico-química pela adesão, o sulcamento entre asperezas, deformação ou fratura de camadas superficiais (óxidos e revestimentos), deformações plásticas ocasionadas por terceiros corpos, basicamente devido a

um aglomerado de partículas oriundas do desgaste que se interpõem entre as superfícies em movimento (CAMPANHA 2008; HUTCHINGS, 1992).

2.1.2 Atrito de rolamento

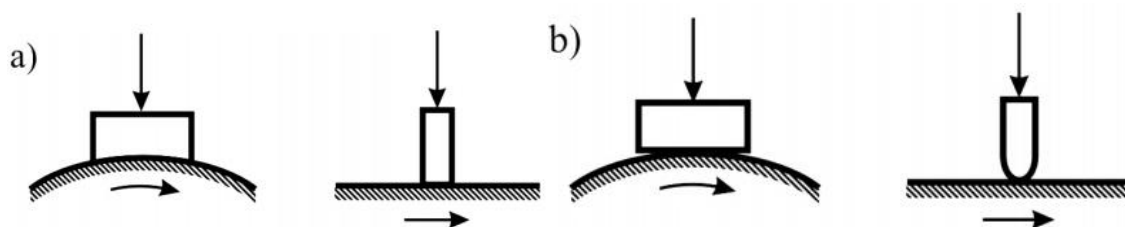
O atrito de rolamento puro é evidente quando existe o rolamento sem a presença do deslizamento e é descrito pela *American Society for Metals* (1992) como um movimento relativo entre dois corpos de curvaturas distintas, cujas velocidades na área da superfície comum são idênticas na magnitude e na direção.

Algumas características são particulares do atrito de rolamento, tais como, o coeficiente de atrito têm valores menores do que o atrito de deslizamento. Para metais de dureza elevada, pode ser da ordem de 0,001, tornando essa característica muito importante na redução do desgaste entre componentes (CAMPANHA, 2008). A condição de rolamento puro é pouco provável de acontecer na prática, ou seja, quase sempre no atrito por rolamento há presença de atrito por deslizamento ou rotação (HUTCHINGS, 1992).

2.2 Contatos Mecânicos

O contato mecânico entre corpos é descrito por Johnson em 1985 como sendo a interação física entre corpos e que foi classificada de acordo com as respectivas geometrias sendo conformes ou não conformes (Figura 3) (HUTCHINGS, 1992):

Figura 3 -- Representações dos contatos mecânicos (a) Conforme (b) Não conforme



Fonte: HUTCHING (1992)

2.2.1 Contato conforme

No contato conforme as superfícies em contato se encaixam com pouca ou sem deformação. Os raios de curvatura das superfícies sejam do mesmo lado da interface, fazendo com que a área de contato aparente seja facilmente mensurável a partir dos valores dos raios (quando se tem uma superfície côncava e outra convexa). Como exemplo de contatos conformes têm-se os mancais fixos. Em comparação com os contatos não conformes, para uma mesma carga, os conformes possuem uma menor pressão de contato devido sua área (HUTCHINGS, 1992).

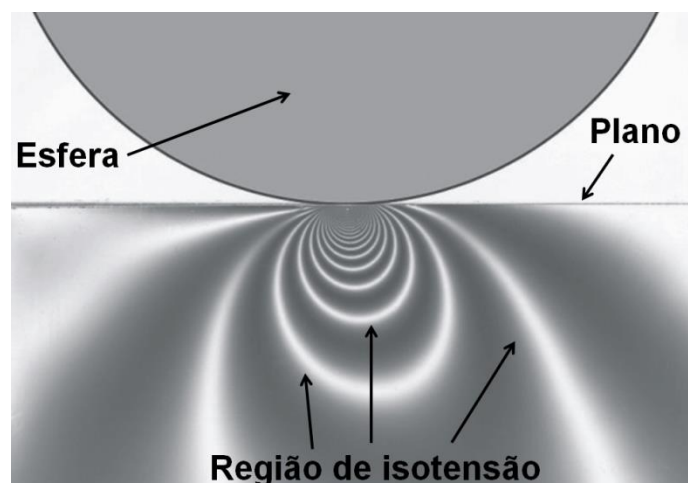
2.2.2 Contato não conforme

São ditos os contatos não conformes, aqueles contatos que possuem geometrias superficiais distintas entre si. Os raios de curvatura das superfícies são de lados opostos da interface fazendo com que a área de contato seja pontual ou linear, como por exemplo, contatos de mancais de rolamento do tipo rolo, esferas, dentes de engrenagem, entre outros. Geralmente a área de contato nesse caso acaba sendo pequena em relação ao tamanho dos corpos intensificando assim a pressão de contato (HUTCHINGS, 1992).

Em meados de 1882 Hertz, em um dos seus experimentos com esferas e placas de vidro, estudou as propriedades ópticas do contato e observou o crescimento da área de contato como uma função da força normal “N” aplicada, baseado num modelo elástico linear. Ele mostrou experimentalmente e matematicamente que essa área de contato, assim como os estados de tensão e de deformação poderiam ser calculados a partir dos parâmetros geométricos e das propriedades elásticas do material. O contato deve ser estático e não conforme, e o atrito deve ser desconsiderado (MEDEIROS, 2002).

A Figura 4 ilustra a distribuição das tensões na superfície e subsuperfície no contato entre uma esfera e um plano, mostrando as linhas de iso tensões de cisalhamento. É observado que para o carregamento tangencial e normal desconsiderando o atrito entre corpos rígidos, a tensão de cisalhamento máxima encontra-se na subsuperfície.

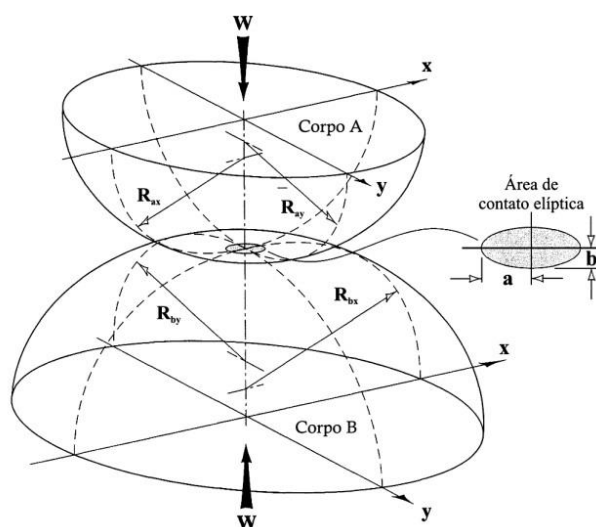
Figura 4 - Imagem das linhas de iso tensão de cisalhamento na configuração esfera-plano considerando o contato normal e tangencial utilizando técnicas de fotoelasticidade.



Fonte: Adaptado SANTOS (2012)

Para o cálculo da área de contato entre os corpos, é necessário levar em consideração as curvaturas dos corpos que podem ser diferentes. Sendo de curvatura côncava aquela que tem o centro de sua curvatura para dentro do sólido, e convexa aquela que tem o centro de sua curvatura para fora do sólido. Na Figura 5 observa-se que em um contato de superfícies convexas, tem-se a redução do raio de curvatura que pode ser calculado a partir da Equação 1 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001):

Figura 5 - Contato elástico entre dois corpos elípticos



Fonte: STACHOWIAK; BATCHELOR (2001).

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

Onde:

R_x = Raio de curvatura reduzido na direção x;

R_y = Raio de curvatura reduzido na direção y;

R_{ax} = Raio de curvatura do corpo A reduzido na direção x;

R_{ay} = Raio de curvatura do corpo A reduzido na direção y;

R_{bx} = Raio de curvatura do corpo B reduzido na direção x;

R_{by} = Raio de curvatura do corpo B reduzido na direção y;

Para calcular o módulo de Young ou módulo de elasticidade equivalente, definido pelos dois materiais em contato tem-se a Equação 2 (SANTOS, 2012):

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_b^2}{E_b} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

ν_a = Coeficiente de Poisson do material A

ν_b = Coeficiente de Poisson do material B

E_a = Módulo de elasticidade do material A

E_b = Módulo de elasticidade do material B

Quando se observa a configuração descrita por Hertz, ou seja, esfera sobre plano, podem-se calcular outros parâmetros que são de grande importância para a engenharia com as Equações 3, 4, 5 e 6 (SANTOS, 2012):

$$a = \left(\frac{3WR}{4E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\delta = \left(\frac{9W^2}{16RE'^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\rho_0 = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{\pi a^2} \right) = \left(\frac{6WE'^2}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\rho = \rho_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

a = Raio da circunferência de contato;

δ = Deformação elástica dos pontos de contato;

ρ_0 = Pressão máxima de contato

ρ = Distribuição e pressão dentro da região de contato

W = Carga aplicada

R = Raio da esfera

r = Raio do contato variável da origem no centro do contato até a .

E assim pode-se calcular a tensão de cisalhamento máxima que está localizada a $0,47a$ (Equação 7):

$$\tau_1 = 0,31\rho_0 \quad \text{Eq. (7)}$$

Assim como também é possível calcular a máxima tensão de tração superficial (Equação 9):

$$\sigma_r = \frac{1}{3}(1 - 2\nu)\rho_0 \quad \text{Eq. (8)}$$

2.3 Lubrificação

Objetivando minimizar o desgaste causado pelo atrito, tem-se a lubrificação. Seu papel é introduzir um filme de baixa resistência ao cisalhamento que acaba reduzindo a resistência ao movimento entre o par tribológico. É esperado com uso de lubrificantes que a taxa de desgaste seja reduzida sendo uma função direta do regime de lubrificação aplicada nas partes. O filme lubrificante tem a função de separar as superfícies, retirar o calor do sistema e *debris* gerados no contato das superfícies, podendo esse lubrificante ser constituído por uma variedade de líquidos, sólidos ou gases, puros ou em misturas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

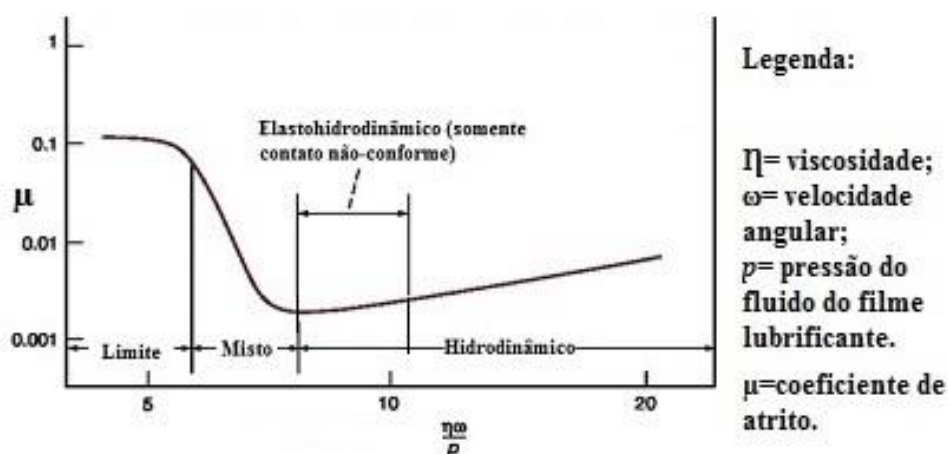
2.3.1 Regimes de lubrificação

Quando duas superfícies estão em movimento relativo e são lubrificadas, há presença de um filme lubrificante que pode ser responsável por suportar total ou parcialmente a carga atuante no sistema. Nas condições citadas, o filme entre as superfícies será responsável pela redução do atrito e

consequentemente do desgaste. Quando as cargas são elevadas ou a velocidade relativa é baixa, ou ainda, a viscosidade do lubrificante é diminuída, pode haver uma maior interação entre as superfícies aumentando o atrito e o desgaste. (HUTCHINGS, 1992).

Para o melhor entendimento sobre a interação entre as superfícies, é necessário definir o regime de lubrificação, observando a carga, velocidade e a rugosidade das superfícies de deslizamento (DUARTE, 2005). Dessa forma, os regimes de lubrificação são classificados como: hidrodinâmico, elastohidrodinâmico, misto e limítrofe. Estes regimes são bem definidos na curva de Stribeck (Figura 6).

Figura 6 - Curva de Stribeck



Fonte: HERSEY (1966)

2.3.1.1 Regime Hidrodinâmico

O regime de lubrificação hidrodinâmica é considerado um dos mais importantes no campo da tribologia tendo em vista o desempenho tribológico que este regime oferece: menor atrito e menor desgaste. Este regime de lubrificação é caracterizado quando duas superfícies em movimento relativo são separadas completamente por uma película de um fluido lubrificante. A lubrificação hidrodinâmica é mais facilmente visualizada em sistemas com contatos conformes (ex.: mancais de deslizamento), por ter espessuras do filme de fluido lubrificante suficiente para evitar o contato entre as asperezas (HAMROCK *et. Al.* 2004).

2.3.1.2 Regime Elastohidrodinâmico

Para o regime de lubrificação elastohidrodinâmico a característica principal é a elevada pressão transmitida pelo fluido sendo suficiente para deformar elasticamente os corpos. O corpo é pressionado contra o fluido, com uma intensidade que causa a deformação elástica do corpo e do contra corpo. Nessas condições, a viscosidade do fluido aumenta, conforme aumenta a carga normal. Segundo Bhushan (2001), as características desse regime dependem da rugosidade da superfície, da pressão do filme fluido, da pressão de contato, da dureza e da rigidez das asperezas. Na lubrificação elastohidrodinâmica é mais difícil de formar um filme completo, pois, as superfícies com contatos não conformes tendem a expelir o lubrificante ao invés de permitir a sua entrada (Norton, 2004).

2.3.1.3 Lubrificação Limítrofe

Regime limítrofe ou limite é o regime de lubrificação por filme fino em que toda a carga é suportada pelas asperezas lubrificadas (resultando em deformações plásticas e desgaste) por um filme a nível molecular (ASM Handbook, 1992). Tabor (1973) sugere que a lubrificação limítrofe é dada nas condições de velocidade de deslizamento baixa entre as superfícies e altas cargas (forças) associadas, ocorrendo então um rompimento da camada de óleo que separa as duas superfícies e elas passam a ser separadas apenas por filmes de lubrificante de dimensões moleculares. Esse regime também vai depender das características físico químicas do óleo lubrificante.

Neste regime de lubrificação não há presença de um filme hidrodinâmico e ou elastohidrodinâmico. Nesse regime de lubrificação, é observado que a espessura do filme de lubrificante é menor que a rugosidade combinada do par tribológico sob contato. A força de atrito para este modo de lubrificação é o resultado do produto da resistência mecano química do sistema tribológico e da área total de contato (HAMROCK *et. Al.* 2004).

2.3.1.4 Lubrificação Mista

Este regime de lubrificação é caracterizado pela não separação das superfícies em contato por completo devido fina espessura do filme lubrificante.

Desta forma, na lubrificação mista são observados os efeitos simultâneos do regime de lubrificação hidrodinâmico e limítrofe (HAMROCK *et. Al.* 2004). Os níveis de atrito e pressão serão intermediários àqueles relacionados com os regimes de lubrificação hidrodinâmica e limite.

2.4 Fadiga de contato por rolamento

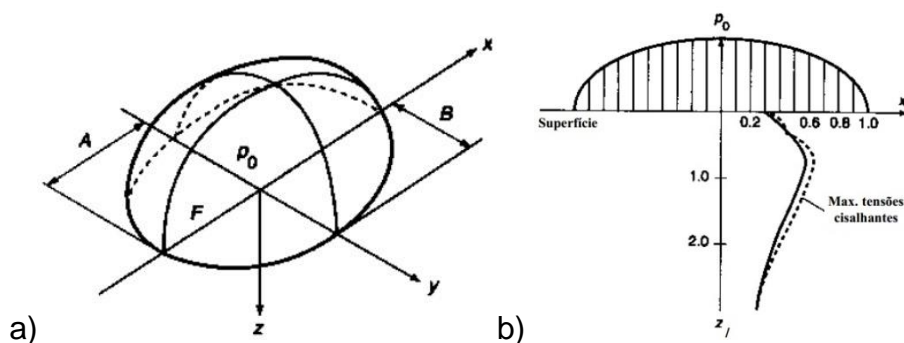
A indústria mecânica investiu nos estudos para a extensão e estimativa da vida em fadiga desses componentes. As falhas mais comuns quando componentes são solicitados dinamicamente é a fadiga de superfície e subsuperfície. A vida em fadiga é um critério fundamental para a seleção ou avaliação de rolamentos, mas não contempla fatores importantes na vida do rolamento.

A condição de lubrificação é essencial na vida de materiais rolantes por promover a formação de filmes protetores entre as superfícies em contato, prevenindo o desgaste excessivo. Em mancais de rolamento estão presentes o atrito por rolamento e por deslizamento. O atrito por deslizamento irá diminuir a vida em serviço caso o componente não esteja lubrificado adequadamente (SILVA, 2001).

Quando se tem um contato de rolamento, observa-se um estado complexo de tensões, fazendo com que a maioria dos modelos existentes assumam condições ideais de carregamento e condições ambientais. A análise do estado de tensões hertziano assume um contato não conforme sendo sua área de contato circular, elíptica ou linear e uma distribuição de pressões parabólica com o máximo de tensões cisalhantes no centro do contato e abaixo da superfície.

A Figura 7 mostra a distribuição de tensões no contato elíptico e com valor máximo localizado na subsuperfície. A localização e magnitude desse ponto com valor máximo vão depender da área de contato (características dos corpos e magnitude da tensão aplicada) e do coeficiente de atrito entre o par tribológico. O aumento do coeficiente de atrito leva o ponto de tensão de cisalhamento máxima da subsuperfície para a superfície, aumentando também sua magnitude (SILVA, 2001).

Figura 7 - (a) Distribuição espacial de tensões da superfície. (b) Tensões de cisalhamento subsuperficiais



Fonte: SILVA (2001)

Os danos na estrutura do componente proveniente das tensões de contato iniciam quando ocorrem repetidas deformações localizadas. Por sua vez são causadas quando a máxima tensão de cisalhamento atinge um valor crítico ocasionando o escorregamento de um plano cristalino específico e o acúmulo de discordâncias. Após o acúmulo dessas deformações ocorre a nucleação e propagação de uma trinca, levando à microfissuras e ao mecanismo de dano conhecido como lascamento ou “*spalling*”.

Esse mecanismo de dano proveniente da fadiga de contato, assim como outros mecanismos provocados por diversos fatores, estão presentes na superfície e subsuperfície. Eles são diretamente influenciados pelos seis desvios de forma que a norma DIN 4760 de 1982 apresenta (Figura 8). De acordo com Medeiros (2002), esses desvios são gerados nos processos cumulativos de produção, beneficiamento, tratamentos térmicos do material e vão desde irregularidades da ordem macroscópica até distâncias interatômicas.

Figura 8- Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760

DESVIOS DE FORMA (representados por uma seção do perfil)		EXEMPLOS DE TIPOS DE DESVIOS	EXEMPLOS DE CAUSAS GERADORAS DOS DESVIOS DE FORMA
 <p>1ª Ordem</p>	FORMA	Planicidade Cilindricidade Retilicidade	Defeitos nas guias da máquina ferramenta, deformação por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça, deformações devido ao tratamento térmico, desgaste nas guias da peça
 <p>2ª Ordem</p>		Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa, fixação excêntrica da peça, vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça, deflexão da peça ou da máquina durante a usinagem, tratamento térmico, tensões residuais de fundição ou forjamento
 <p>3ª Ordem</p>	RUGOSIDADE	Ranhuras ou raias	Forma da ferramenta (gumes e raio de quina), avanço ou profundidade de corte
 <p>4ª Ordem</p>		Estrias Escamas Protuberâncias	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço), deformação do material com jato de areia, formação de crateras e de protuberâncias após tratamento galvânico
<p>5ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica</p>		Microestrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ataque químico (ex. decapagem), corrosão
<p>6ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica</p>		Reticulado cristalino do material	Processos físicos e químicos da estrutura da matéria, tensões de cisalhamento na estrutura reticular do material
		Superposição dos desvios de primeira à quarta ordem	

Fonte: Norma DIN 4760 *apud* MEDEIROS (2002)

Em casos de pares tribológicos de rolamento cíclico seco, o comportamento do contato em um determinado instante de tempo é influenciado pelos seis desvios de forma, chamando a atenção para o sexto desvio que diz respeito ao arranjo cristalino do material. Esse desvio é o objeto de estudo do presente trabalho (MEDEIROS, 2002).

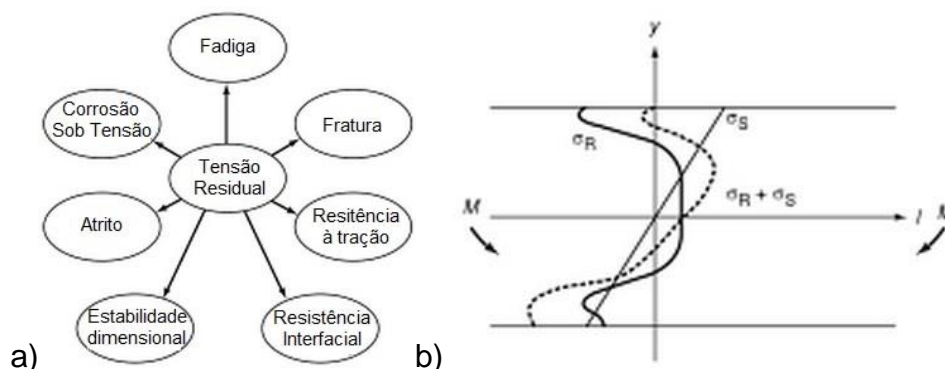
Os danos nos materiais estão associados a fatores relacionados à concentração de tensões como o acabamento superficial, partículas de segunda fase, inclusões e contaminantes sólidos presentes no lubrificante. Esses danos podem gerar alterações nas assinaturas de nível de vibração global e pressão sonora do equipamento ou componente (SILVA, 2001; SANTOS, 2012; MEDEIROS, 2002).

2.5 Tensão residual

Definem-se tensões residuais como aquelas que permanecem atuantes em um corpo depois de retirados quaisquer esforços externos, isentando-se a força de gravidade (JAMES e LU, 1996; GUROVA, *et al.*, 2006). As tensões residuais são de caráter elástico possuindo assim seu valor máximo, em módulo, o limite de escoamento do próprio material. Qualquer perturbação que gere gradientes de deformação plástica, aplicação de carregamentos térmicos (diferentes coeficientes de expansão térmica e gradientes de resfriamento) e mudanças microestruturais, alteram o seu estado e causam sua redistribuição, de modo que as tensões se equilibrem novamente.

A presença de tensões residuais em elementos de engenharia pode modificar de forma significativa no desempenho dos materiais, como por exemplo, na capacidade dos elementos de suportar cargas externas. A Figura 8 (a) mostra algumas propriedades que podem ser influenciadas pelas tensões residuais (LU, 2002). Uma vez que estas tensões residuais se sobrepõem à tensão aplicada ao equipamento, elas podem aumentar ou reduzir a tensão efetiva aplicada, conforme a sua natureza trativa ou compressiva (Figura 9(b)) (LU, 2002).

Figura 9 – (a) Efeito das tensões residuais no desempenho dos materiais. (b) Superposição das tensões residuais e as tensões de serviço.



Fonte: LU (2002).

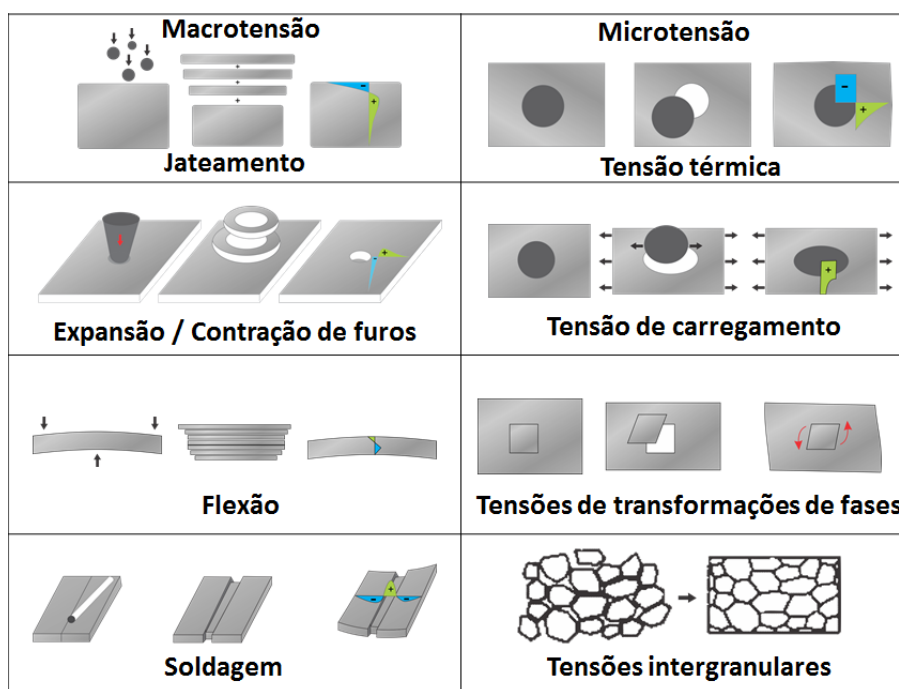
As tensões residuais podem ser introduzidas propositalmente ou de forma accidental durante os diversos processos de fabricação, tais como: soldagem, tratamentos térmicos, nas operações de conformação mecânica de

forjamento, trefilação, laminação, dobramento e nos processos mecânicos de usinagem, autofretagem ou jateamento de partículas (SOARES,1998).

As tensões residuais são auto equilibrantes, ou seja, a soma das tensões totais trativas (representadas pelo sinal positivo) e compressivas (representadas pelo sinal negativo) no componente sempre será zero, assim, plotando-se uma curva das tensões trativas e compressivas presentes no material obtêm-se a soma das forças e momentos igual a zero.

A Figura 10 expõe como as tensões residuais podem existir e coexistir em diferentes escalas, dando a elas características e nomenclaturas diferentes (Macroscópica, Microscópica e Submicroscópica).

Figura 10- Tipos de tensões residuais



Fonte: WHITHERS e BHADSHIA (2001).

2.5.1 Tensão residual Macroscópica ou do tipo I

As tensões macroscópicas são distribuídas em larga escala, atuam em grandes volumes ou porções do material quando comparadas ao tamanho de grão, são originárias de fontes mecânicas, térmicas ou químicas. Essas tensões por serem em grandes porções podem causar instabilidade dimensional no componente, sendo de grande importância para os profissionais que trabalham com fabricação. Durante um processo de

usinagem, por exemplo, pode haver a redistribuição dessas tensões e causar distorção no componente, o que é indesejável na engenharia de fabricação. As medidas dessas tensões geralmente são feitas através de técnicas destrutivas ou semidestrutivas (NUNES, 2008; RODRIGUES, 2007).

2.5.2 Tensão residual Microscópica ou do tipo II

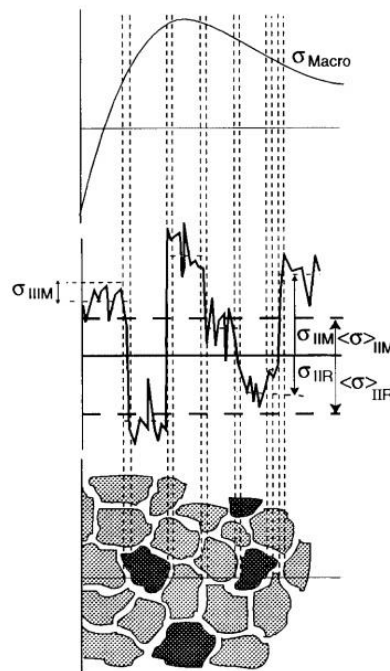
Essas tensões, como a nomenclatura já sugere, são em escalas microscópicas, elas estão presentes em materiais policristalinos e atuam entre os grãos dos materiais. Elas são originadas pela heterogeneidade no retículo cristalino, materiais com tamanhos de grãos diferentes e ou fases diferentes. Têm valores intensificados quando se observam transformações de fases na microestrutura. Fases com diferentes parâmetros cristalinos causam distorção no retículo original (tratamentos térmicos, transformação por deformação) (NUNES, 2008; RODRIGUES, 2007).

2.5.3 Tensão residual Submicroscópica ou do tipo III

Quando se refere à escala sobmicroscópica, considera-se que as tensões estão atuando na escala atômica abrangendo a porção de um grão. Este tipo de tensão residual por sua vez, ocorre em materiais nos quais existam defeitos cristalinos como, átomos substitucionais, intersticiais, vacâncias, impurezas ou falhas de empilhamentos, etc. causando distorções no parâmetro de rede do cristal. Dependendo da causa da geração das tensões residuais modifica-se a escala (tipo de tensão) e pode-se escolher a melhor forma de caracterizá-las e quantificá-las com melhores aproximações (NUNES, 2008; RODRIGUES, 2007).

Na Figura 11 estão esquematizados como os diferentes níveis de tensão atuam no interior do material onde a tensão macro (σ_{macro}) abrange vários grãos, a tensão micro (σ_{IM}) atua entre os grãos e a submicro (σ_{IIIM}) atua dentro de apenas um grão.

Figura 11- Atuação das diferentes tensões residuais



Fonte: WHITHERS e BHADESHIA (2001).

O valor das tensões residuais em um determinado componente ou ponto desse componente é expresso através da superposição dos três tipos de tensões juntamente com suas direções (WHITHERS e BHADESHIA, 2001). No entanto, não existe superposição de tensões residuais ocasionadas por várias operações de conformação, ou seja, não há a adição algébrica das distribuições de tensões correspondentes aos consecutivos processos de conformação. Geralmente, é o processo de deformação final que gera o estado de tensões residuais final. Apesar disso, a superposição de distribuições de tensões é um raciocínio válido quando se pensa no efeito que as tensões residuais têm sobre a resposta de um corpo a um sistema de tensões externo (VALDEZ, 2008).

2.5.4 Geração e modificação das Tensões Residuais

As tensões residuais são bastante estudadas nas áreas da mecânica do contato, mecânica do dano e mecânica da fratura buscando uma melhor resposta sobre comportamento dos materiais. Sob essa óptica, as tensões residuais caracterizam-se como uma resposta elástica às alterações microestruturais que geram perturbações e distorções na rede cristalina tais

como um gradiente de deformações plásticas a frio, tratamentos térmicos, transformação de fases e defeitos cristalinos. Serão abordados alguns dos principais processos nos itens subsequentes.

2.5.4.1 Processos mecânicos

Os produtos metálicos finais geralmente passam por algum processo de conformação mecânica, trabalhos superficiais (polimento, jateamento) e/ou processos de usinagem que envolvem contatos, movimentos entre corpos e deformações plásticas tendo como objetivo dar forma e configuração final à peça.

Os processos mecânicos têm como principal mecanismo de geração e modificação das tensões residuais a heterogeneidade das deformações plásticas que são causadas nas diversas partes dos componentes. No entanto não se pode deixar de considerar que durante esses processos outros fatores podem atuar influenciando no estado de tensões finais, como por exemplo, o atrito e a temperatura.

Na usinagem, processos como fresagem, furação, torneamento, corte e retífica têm o estado de tensões final dependente de fatores como material usinado, ferramenta de corte, condições de usinagem e fluido refrigerante. Nesses processos, a modificação e geração de tensões são dadas pela pressão de contato exercida pela ferramenta de corte e pelo aquecimento localizado, podendo induzir tensões trativas ou compressivas (SOARES, 1998).

Coto *et al.* (2010) concluiu que, no processo de torneamento, uma menor taxa de avanço e maior velocidade de corte promovem um melhor estado de tensão (menos tensão de caráter trativo) e um acabamento no componente (menor rugosidade). Essa redução de tensões residuais trativas acontece devido à redução do calor gerado (temperaturas elevadas na superfície favorecem o aparecimento de tensões trativas).

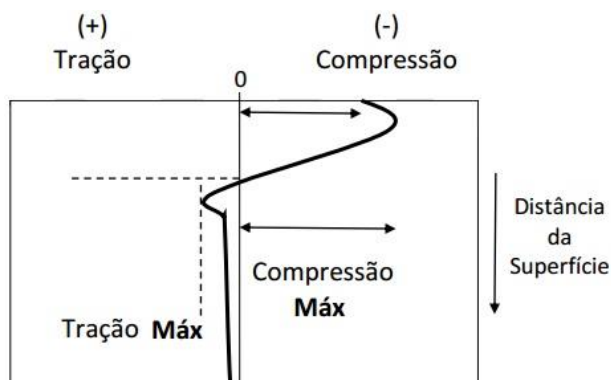
A geração de tensões residuais por deformação mecânica é mais efetiva em materiais de maior resistência que as retém melhor do que materiais com baixo limite de escoamento. No entanto, materiais de maior resistência são mais suscetíveis aos efeitos de descontinuidades superficiais e entalhes, diminuindo a sua resistência à fadiga (HOOPE, 2002).

2.5.4.2 Endurecimento de superfícies

As operações de tratamentos superficiais como jateamento de granalhas, laminação superficial, polimento, entre outros, deformam a superfície mais do que o interior do componente, encruando superficialmente e dando origem a uma camada de tensões residuais conhecidas. Do ponto de vista microestrutural, aumenta-se a densidade de discordância na superfície trabalhada. Elevando o encruamento superficial, que eleva a dureza e o limite de escoamento da camada superficial.

O perfil de distribuição de tensões ao longo da profundidade típico de tratamentos superficiais é apresentado na Figura 12, no qual as tensões compressivas restringem-se a uma camada na superficial e as tensões de tração no interior do componente promovendo o equilíbrio. (SCURACCHIO, 2012; NUNES, 2008).

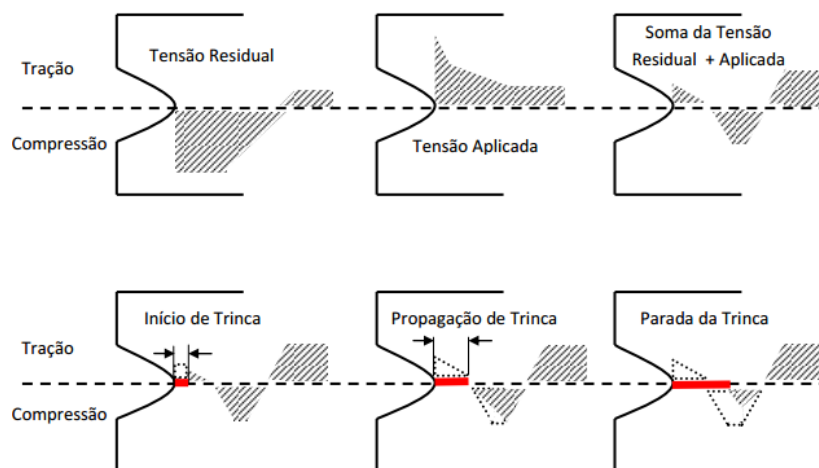
Figura 12- Perfil de distribuição de tensões residuais em uma placa que sofre tratamentos superficiais



Fonte: Adaptado: SCURACCHIO (2012)

Na Figura 13 representa-se o comportamento das tensões residuais provocadas pelos tratamentos de superfície quando o componente está sendo solicitado, demonstrando a superposição das tensões e sua influência na propagação de uma trinca.

Figura 13- Comportamento das tensões residuais compressivas em um componente com solicitações trativas



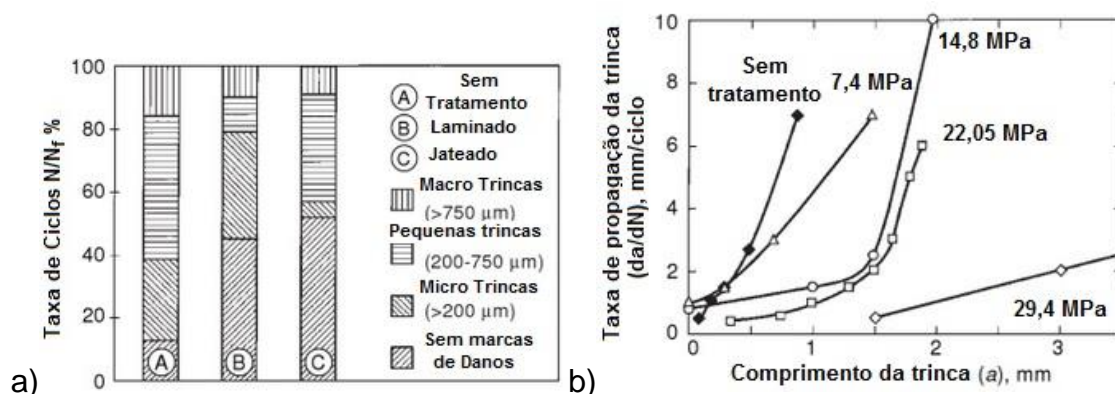
Fonte: SCURACCHIO (2012).

Altenberger (2000) estudou como os tratamentos de superfície como jateamento de granalhas (*shotpeening*) e laminação (*rolling*) promovem uma alteração no estado de tensão de aços austeníticos e o comportamento dessas tensões residuais na vida em fadiga de um determinado componente.

Neste estudo, Altenerger (2010) mostrou que esses processos que induzem um estado de tensão residual compressivo superficial retardam a nucleação e propagação de trincas (Figura 13 (a)), protelando sua vida em serviço quando submetida à fadiga. A eficácia do tratamento de *rolling deep* está diretamente ligada a tensão imprimida na laminação (Figura 14 (b)).

Com o aumento da tensão aplicada, a tendência é que as tensões residuais compressivas também aumentem em módulo, mas não a partir de $\sigma_a = 22,05$ MPa onde $\sigma_r = -400$ MPa houve uma redistribuição de tensões e com a tensão aplicada $\sigma_a = 29,4$ MPa a tensão residual caiu para $\sigma_r = -300$ MPa.

Figura 14– (a) – Influência dos tratamentos superficiais na evolução do dano por fadiga em aços austeníticos AISI 304. (b) Influência da tensão de laminação na taxa de propagação das trincas por fadiga



Fonte: Adaptado: ALTENBERGER, 2000.

Tratamentos térmicos e termoquímicos superficiais também induzem tensões residuais significativas com o mesmo perfil citado na Figura 12. Podem ocorrer transformações de fases na superfície que dependem da composição química do material e da rota do tratamento. O tratamento de nitretação, por exemplo, consiste na formação de uma camada superficial de nitretos que tem um volume superior a ferrita predominante no restante da peça.

2.5.4.3 Processos Térmicos

As tensões residuais originadas de processos térmicos podem ser classificadas como aquelas decorrentes de gradientes térmicos isolados, por diferenças de coeficientes de dilatação térmica e/ou taxas de resfriamento, sem que haja transformação de fase, e as de um gradiente térmico em combinação com transformações de fase, como no caso dos tratamentos térmicos de aços.

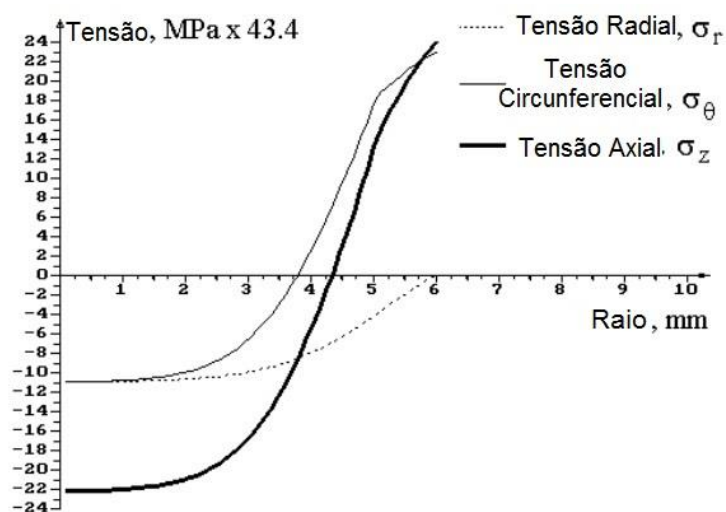
Os tratamentos térmicos de têmpera de aços sem transformação de fases (geralmente abaixo de $650 \text{ }^\circ\text{C}$) promovem uma região superficial com tensões residuais de compressão e uma região com tensões trativas no núcleo devido as diferentes taxas de resfriamento.

Quando se deseja obter mudanças microestruturais (geralmente acima de 800°C) devem-se levar em consideração outros fatores como, transformações volumétricas e temperatura de início de transformação. (SAE HS784, 2003)

A transformação da austenita envolve a formação de outras microestruturas como a martensita, bainita e a perlita. Tomando como exemplo a transformação da martensita, há uma mudança da estrutura cúbica de face centrada para a tetragonal de corpo centrado provocando uma expansão volumétrica (TODINOV, 1999).

Em um tratamento de têmpera em um cilindro, feito a 900 °C e resfriado a água, é observado que a expansão ocorre primeiramente na superfície gerando tensões superficiais trativas deixando o núcleo que ainda não sofreu a transformação com tensões compressivas. Após o resfriamento completo a situação se inverte como mostrado na Figura 15:

Figura 15- Perfil das tensões residuais em um cilindro de aço temperado a 900°C e resfriado a água



Fonte: Adaptado: TODINOV (1999)

Outro processo térmico que gera um estado de tensões residuais complexo é o processo de soldagem. Vários fenômenos como diferentes aportes de calor, transformações de fases, taxas de resfriamento, estão presentes no processo.

Além dos fenômenos, fatores como dimensões estruturais, sequência de soldagem, preparação de chanfro, velocidade de soldagem e número de passes também são decisivos no estado de tensões final. Portanto devido a grande complexidade, é necessário levar em conta a distribuição de tensões e sua magnitude ao projetar um componente soldado (JAUREGI *et al.*, 2014).

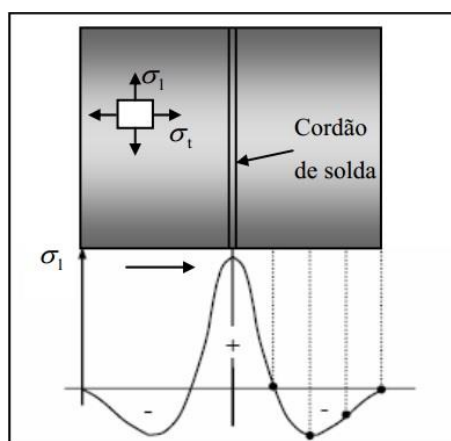
O processo de soldagem é realizado a temperaturas que promovam a fusão do material na poça. As tensões são geradas por escoamentos parciais localizados que ocorrem durante o ciclo térmico da soldagem gerando um perfil heterogêneo. O caráter dessas tensões vai depender da região (zona fundida, zona afetada pelo calor e a zona do metal de base) (MARQUEZE, 2002).

A intensidade das tensões está relacionada aos graus de restrição na direção analisada com a taxa de resfriamento na superfície. Em uma peça soldada irão existir gradientes de temperatura que promoverão um perfil não homogêneo de tensões.

Outro fator decisivo são as transformações de fases. Geralmente elas acarretam variações volumétricas na zona afetada pelo calor, bem como na zona fundida, tendendo a expandir-se, porém ficará impedida pelo restante do material mais frio que não foi transformado, gerando tensões compressivas.

Quando a porção aquecida que se encontra comprimida começa a resfriar, a tendência é de que o material se contraia. Então a região tende a aliviar a compressão e, como não consegue reduzir seu tamanho, pois o restante do material não permite, ela acaba sendo tracionada promovendo o seguinte perfil de tensões residuais (Figura 16) (RODRIGUES, 2007).

Figura 16 - Perfil da distribuição de tensões residuais na solda



Fonte: RODRIGUES (2007).

2.5.5 Métodos de quantificação

As tensões residuais diferem da tensão aplicada, pois seu efeito não é facilmente visualizado, medido e calculado. É necessário o uso de técnicas

especiais e cálculos com um grau relativo de precisão para caracteriza-las e quantificá-las (OLIVEIRA, 2009).

A quantificação das tensões residuais é um método de controle da qualidade importante na fabricação e desempenho de estruturas e componentes. Existem diversas formas para medição de tensões residuais que se dividem de acordo com a severidade do dano causado ao componente.

As metodologias tradicionais de análise experimental de tensões residuais fazem o uso de métodos destrutivos, que danificam o componente avaliado, comprometendo o seu desempenho ou até mesmo inutilizando-o. Geralmente essas técnicas não são usadas como técnicas de análise durante a vida em serviço de um componente. As técnicas destrutivas utilizam o princípio de remoção de material, da peça que está sendo analisada, para obter informações das tensões e deformações existentes (SOARES, 2003).

As técnicas semidestrutivas são aquelas que inserem algum tipo de dano no componente, no entanto, não comprometem seu desempenho nem sua integridade. As deformações causadas pelo alívio das tensões residuais são medidas e, através de modelos matemáticos adequados, baseados na teoria da elasticidade, são determinadas as tensões residuais.

Nestes dois tipos de análises somente são analisadas as tensões residuais macroscópicas. As técnicas consideradas não destrutivas não removem material nem provocam qualquer tipo de dano no componente para a medição de tensões residuais. Elas se baseiam na relação entre propriedades cristalográficas ou físicas do material em relação às tensões residuais (MORCINO, 2014).

2.5.5.1 Furo cego

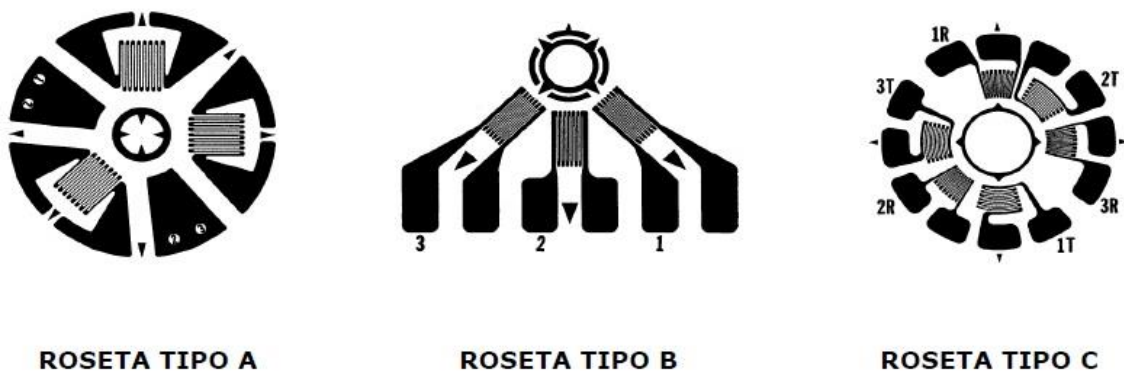
O método do furo cego ou *hole drilling* é considerada uma técnica semidestrutiva. Consiste na usinagem de um furo superficial não passante (cego) onde são posicionados extensômetros em volta do furo para avaliar as deformações ocasionadas pela redistribuição das tensões internas (STROHAECKER *et al.*, 2004).

A técnica é bastante usada por não inutilizar o componente, ser relativamente simples e versátil. Todavia, a técnica apresenta algumas limitações. As medidas são normatizadas pela ATSM E837-01 e necessitam

ser feitas por pessoas cuidadosas e capacitadas, exigindo uma boa preparação da amostra, bem como um ótimo alinhamento do furo e um controle de profundidade. Estes fatores são os maiores causadores de erros de medidas durante o ensaio (MELO, 2014; ROSSINI *et al.*, 2011; NUNES, 2008).

A precisão da medida está ligada ao tipo de extensômetros usado. Os extensômetros usados são do tipo roseta e os mais comuns são mostrados na Figura 17, no qual cada um tem sua particularidade e é indicado a determinadas condições de aplicação.

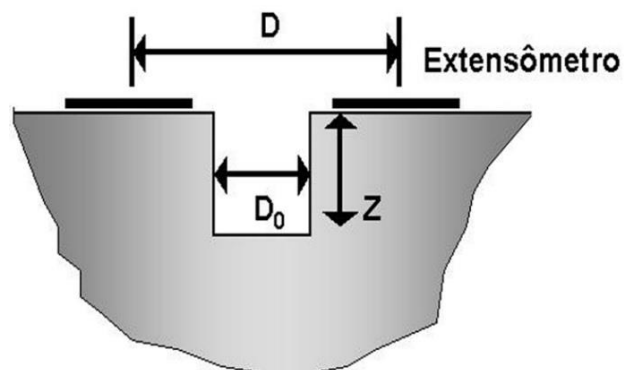
Figura 17- Tipos de rosetas A, B e C



Fonte: NUNES (2008)

Nesta perspectiva, o método consiste em primeiramente fixar o extensômetro com adesivos apropriados e é esperado um tempo para a cura desse adesivo. Após essa cura é feito o furo com tamanhos e profundidades (D_0 e Z) bem definidas. Depois da leitura a região onde o material foi removido é reparada. (MELO, 2014; NUNES, 2008). Na Figura 18 está esquematizado o princípio da técnica.

Figura 18- Esquema da técnica de medida de tensões residuais pelo furo cego



Fonte: STROHAECKER *et al* (2004)

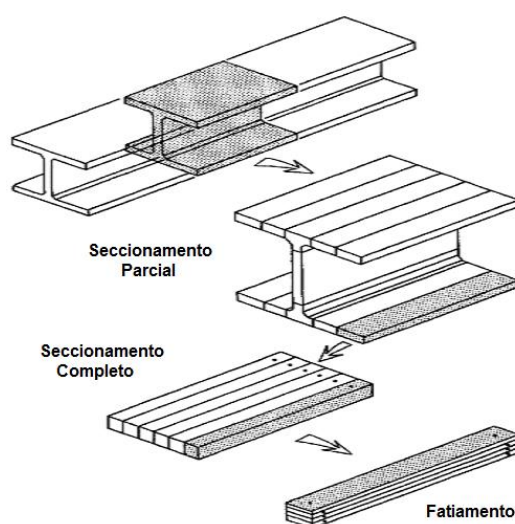
2.5.5.2 Técnica de seccionamento

A técnica Seccionamento é um método destrutivo, que se baseia na medição da deformação devido à liberação das tensões residuais após a remoção do material da amostra (Figura 19). Esta técnica é usada extensivamente para analisar tensões residuais em aço carbono estrutural, alumínio e seções de aço inoxidável (SOARES, 2003).

O método consiste em efetuar um corte numa placa, instrumentada com extensômetros mecânicos ou elétricos, de forma a liberar as tensões residuais que estavam presentes na direção do corte (Figura 18). Para isso, o processo de corte utilizado não deve gerar deformações plásticas ou calor, de modo que o estado de tensão original possa ser medido sem a influência dos efeitos de plasticidade na superfície dos planos de cisalhamento.

Geralmente é utilizado ataque químico ou eletrolítico (ROSSINI *et al.*, 2011). De acordo com experimentos realizados durante o doutoramento de Medeiros (2002) o corte feito pela técnica de eletro-erosão não altera o estado de tensões residuais da peça.

Figura 19- Desenho esquemático da técnica de seccionamento



Fonte: Adaptado: ROSSINI *et al.* (2011)

Para analisar peças cilíndricas e tubulares foram desenvolvidas técnicas de seccionamento específicas. Através de cortes radiais em tubos, é possível determinar as tensões residuais circunferenciais compressivas ou trativas,

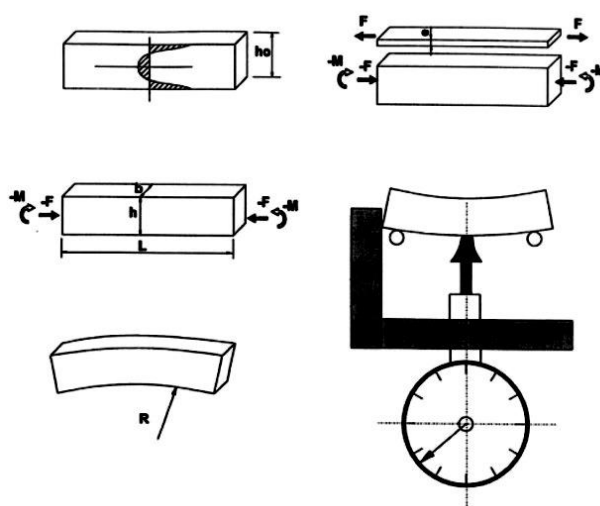
dependendo do fechamento ou abertura do tubo, respectivamente (RODRIGUES, 2007).

2.5.5.3 Remoção de camadas (Deflexão)

A técnica de remoção de camadas ou deflexão também é considerada como uma técnica destrutiva, ela consiste na remoção de camadas superficiais e na medição das distorções da peça (deflexão) (Figura 20). A técnica se baseia no princípio de equilíbrio de tensões após a retirada de uma camada, uma vez que as tensões internas se redistribuem com a remoção do material.

Esse método geralmente é aplicável apenas para as barras retangulares ou chapas e o princípio de remoção das camadas segue o mesmo perfil da técnica de seccionamento (MELO, 2014).

Figura 20- Representação do método de deflexão



Fonte: MELO (2014)

Para o melhor entendimento, a explicação em relação aos esforços pode ser feita da seguinte forma: a remoção de uma camada causa o desequilíbrio das forças e momentos aos quais o componente estava submetido. Uma vez que o equilíbrio do componente deve ser mantido, este se deforma de modo a gerar um par força–momento equilibrante.

A variação da deflexão, após a retirada de uma camada de material, a partir de uma espessura pode ser relacionada com a tensão, que atuava naquela camada, pela Equação 8:

$$\sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \left[-\frac{4}{3} \frac{e^2}{l^2} \frac{df}{de} + 8 \frac{e}{l^2} (f_{e_i} - f_e) + \frac{8}{3l^2} \int_{e_i}^e e' df \right] \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade do material;

ν = Coeficiente de Poisson;

e' = Espessura do corpo de prova antes da remoção de uma determinada camada de espessura " de ";

e_i = Espessura do corpo de prova antes da remoção de qualquer camada;

e = Espessura final do corpo de prova;

l = Comprimento no qual a deflexão está sendo medida;

f = Deflexão;

df = Variação da deflexão pela retirada de uma camada de espessura;

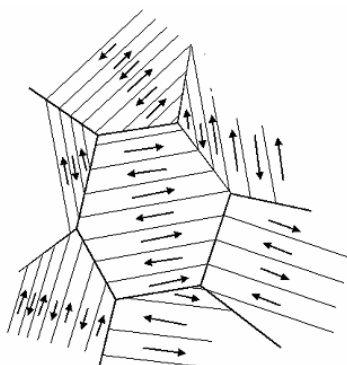
f_{e_i}, f_e = deflexões inicial e final, respectivamente.

2.5.5.4 Ruído Barkhausen

A partir deste método de quantificação, começar-se-á abordando técnicas que não promovem nenhum tipo de dano ao material analisado, sendo elas as técnicas não destrutivas. As medidas pelo ruído Barkhausen são baseadas no princípio da orientação dos domínios magnéticos (STROHAECKER *et al.*, 2004).

Os materiais com características ferromagnéticas possuem regiões microscópicas magneticamente ordenadas, chamadas de domínios (Figura 21). Cada domínio é magnetizado segundo direções cristalográficas preferenciais à magnetização. Dentro de um grão cristalino pode haver vários domínios, os quais são separados por paredes também chamadas de paredes de Bloch. Dentro destas paredes a direção de magnetização geralmente muda de 90° ou 180° (ROSSINI *et al.*, 2011).

Figura 21- Estrutura dos domínios magnéticos em um material



Fonte: LU (1996)

A densidade de fluxo magnético num material ferromagnético, sujeito a um campo magnético oscilante, pode variar de forma descontínua, em pequenos incrementos chamados saltos Barkhausen. Estes saltos estão diretamente relacionados aos movimentos das paredes dos domínios magnéticos e ao processo de rotação que ocorrem no interior do domínio durante a magnetização de alta intensidade (STROHAECKER *et al.*, 2004).

Se uma bobina condutora for posicionada próxima à amostra enquanto a parede de um domínio se move, a mudança resultante na magnetização induzirá um pulso elétrico na bobina que é chamado de ruído Barkhausen. Imperfeições cristalinas como contornos de grão, discordâncias, partículas de segunda fase, impurezas assim como as tensões residuais afetam fortemente o ruído (STROHAECKER *et al.*, 2004).

Esses fenômenos de propriedades elásticas que interagem com a estrutura do domínio e as propriedades magnéticas do material é chamado de interação magneto-elástica. Para materiais com anisotropia magnetostrictivas positivas, a presença das tensões residuais trativas eleva a taxa de alinhamento dos domínios magnéticos na direção do campo magnético externo e a intensidade do ruído Barkhausen produzido. Para tensões compressivas o efeito é o contrario (STROHAECKER *et al.*, 2004; ROSSINI *et al.*, 2011).

2.5.5.5 Medidas por Ultrassom

Técnicas de medição de tensões residuais por ultrassom são baseadas no efeito elastoacústico das ondas, ou seja, na dependência da variação da velocidade acústica da onda ultrassônica com a deformação num material

anisotrópico (ROSSINI *et al.*, 2011). Esse efeito pode ser relacionada pela Equação 9:

$$V = V_0 + K\sigma \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

V_0 – É a velocidade de propagação da onda no meio isento de tensões;

K – É um parâmetro conhecido como constante elastoacústica que

depende do material. Dada em $\frac{m^3}{N \times s}$;

σ – É tensão atuante.

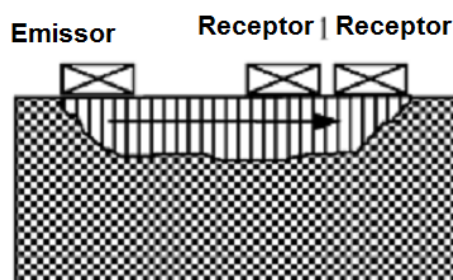
Num material isotrópico e livre de tensão as velocidades de propagação características das ondas elásticas para o material não variam e dependem, fundamentalmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio e, portanto, da sua simetria estrutural.

O pesquisador Ashby (2000) em sua primeira carta de seleção de materiais catalogou os grupos de materiais estruturais de engenharia relacionando o módulo de elasticidade longitudinal (E) com a massa específica (ρ) de um determinado material e mencionou que a velocidade de propagação de uma onda elástica longitudinal no sólido (V_L) e a sua frequência natural de vibração são proporcionalmente relacionadas com a Equação 10:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Eq. (10)}$$

No geral, as ondas são emitidas por um transdutor de transmissão, propagam-se através de uma região do material, e são detectados por um transdutor de recepção, como mostrado na Figura 22:

Figura 22 - Visão esquemática da configuração de medida pelo método de ultrassom



Fonte: Adaptado: ROSSINI *et al.*, 2011

2.5.5.6 Difração de Raios X

Em meados de 1895, o pesquisador alemão Wilhelm Conrad Röntgen fazia experimentos com raios catódicos quando ele percebeu o comportamento de alguns raios com propriedades físicas desconhecidas, ondas eletromagnéticas que possuíam alta energia e que penetravam em materiais sólidos. Então Roentgen denominou esses raios como raios X. (CULLITY, 1978).

Em 1912 o físico alemão Von Laue, sugeriu que poderia haver uma interação construtiva entre os raios X e um material microestruturalmente organizado. Laue fez passar um feixe de raios X por uma amostra monocristalina, e pôs um filme fotográfico após a amostra, o resultado foi que após revelar o filme este apresentava pontos sensibilizados pelos raios X difratados (CULLITY, 1978).

Aproximadamente um ano depois, os físicos ingleses W. H. Bragg e seu filho W. L. Bragg formularam uma equação relativamente simples relacionando o comprimento de onda dos raios X com a distância entre os átomos, que previam os ângulos onde seriam encontrados os picos de máxima intensidade de difração. Essa relação ficou mundialmente conhecida como lei de Bragg (Equação 11). Assim, conhecendo-se as distâncias interatômicas, fenômenos envolvendo estruturas cristalinas podiam ser esclarecidos.

$$n\lambda = 2d\operatorname{sene}\theta \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

n = Ordem de difração;

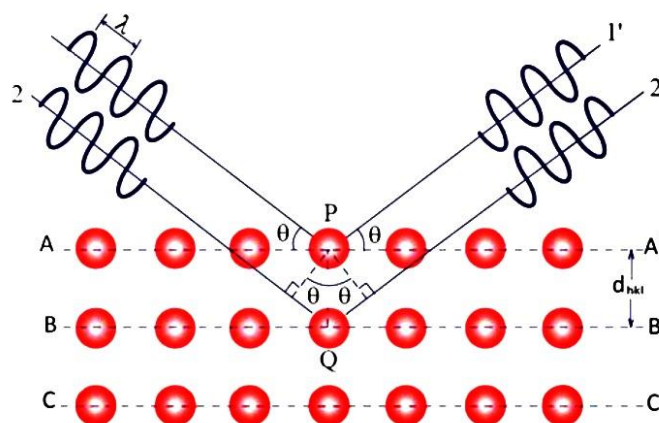
λ = Comprimento de onda;

d = Distancia interplanar;

θ = Ângulo entre o feixe incidente e o plano que está difratando.

A Figura 23 ilustra os parâmetros envolvidos na lei de Bragg.

Figura 23- Representação esquemática dos parâmetros envolvidos na lei de Bragg



Fonte: Adaptado: SOUSA (2012)

A técnica de mensurar as tensões residuais através da difração de raios X foi inicialmente proposta por Lester e Aborn no ano de 1925. Em 1930, Sachs e Weerts mostraram que o método tem uma boa precisão. O método foi aperfeiçoado em 1934 por Barret e Gensamer para quantificar a soma dos três tipos de tensões residuais. Em 1935, Glocker mostrou que era possível avaliar cada um dos tipos de tensão residual (JAMES e LU, 1996).

Quando um material cristalino é tensionado, os espaços entre os planos no arranjo cristalino mudam, ou seja, podem diminuir (esforço compressivo) ou podem aumentar (esforço trativo). A técnica de difração de raios X pode mensurar essas mudanças e, portanto constitui uma poderosa e precisa técnica para avaliar o estado de tensão residual em um componente (ASTM E1426-09).

Com os avanços tecnológicos e uma melhor compreensão da deformação da rede cristalina, especialmente a influência da anisotropia e a textura cristalográfica, houve vários avanços no método e normas foram estabelecidas para uma padronização nos ensaios. Algumas delas são:

- ASTM E2860-12 – Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels;
- E1426-98 (2009)– Determining the effective Elastic Parameter for X-Ray Diffraction Measurements of Residual Stress;
- ASTM E915-10 Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement;

- SAE HS784-03 Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction.

O método de difração de raios X é utilizado na determinação de campos de tensões em camadas com espessuras variáveis, de acordo com o material que está sendo analisado e o comprimento de onda incidente (alvo da fonte de raios X) podendo variar de 4 a aproximadamente 10 μm . Quando aplicado em conjunto com uma técnica para retirada de finas camadas, possibilita que profundidades de 100 μm ou mais sejam analisadas (ROSSINI *et al.*, 2011).

A área da superfície analisada depende do diâmetro do feixe de raios X, que em alguns instrumentos varia entre 1 e 8 mm e do ângulo de Bragg a ser analisado (SOARES, 2003; NOYAN e COHEN, 1987).

2.5.5.7 Relação entre tensão e deformação para a análise de DRX

Quando um corpo é solicitado com a aplicação de determinada carga, os átomos deslocam-se em resposta a essa tensão e a rede cristalina pode ser enxergada como um pequeno extensômetro, uma vez que as alterações no parâmetro de rede representam a deformação elástica induzida pelo carregamento externo.

Assim, considerando “ d ” o parâmetro de rede sem o carregamento e “ θ ” seu ângulo correspondente, e “ d_1 ” o parâmetro de rede após a deformação elástica que a peça foi submetida e θ_1 o ângulo correspondente, a deformação na rede (ε) na direção normal do plano difratado pode ser calculada pela Equação 12:

$$\varepsilon = \frac{d_1 - d}{d} = \frac{\Delta d}{d} \quad \text{Eq. (12)}$$

Associando com a equação da lei de Bragg a deformação na rede cristalina é definida como:

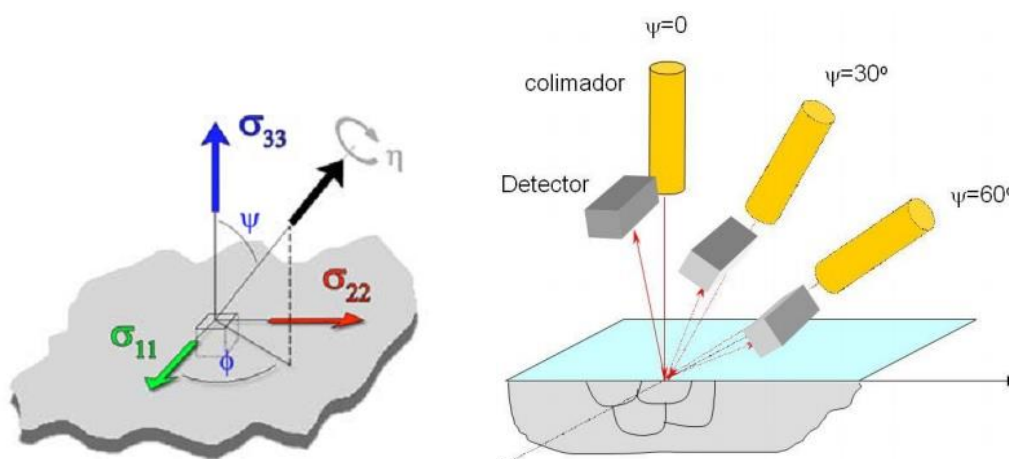
$$\varepsilon = \frac{\sin\theta}{\sin\theta_1} - 1 \quad \text{Eq. (13)}$$

Os valores da tensão residual pela difratometria de raios X são calculados baseando-se na determinação de duas componentes de

deformação $\varepsilon_{\phi\psi_1}$ e $\varepsilon_{\phi\psi_2}$ nas direções determinadas pelos ângulos ϕ e ψ de um sistema de coordenadas esféricas.

Definindo a relação entre o plano da tensão e a distorção da superfície da amostra, calcula-se a relação da tensão para um dado grau de inclinação da superfície da amostra. A inclinação do plano de difração e o plano da amostra são definidos como ψ (psi). Um método bastante usado e que foi usado nas medidas desse trabalho é o $\text{sen}^2 \psi$, no qual as medidas são realizadas para vários ângulos (Figura 24).

Figura 24– (a) Estado de tensões (ASTM E2860-12) **(b)** representação da variação dos ângulos psi.



Fonte: SCURACCHIO (2012)

Tomando um ponto qualquer na superfície da amostra como foco da medição, pode-se definir σ_1 , σ_2 e σ_3 como as tensões principais e ε_1 , ε_2 e ε_3 como as deformações principais. É considerado o plano biaxial de tensão. A σ_3 para o eixo σ_{33} é 0 pois a profundidade de penetração do raio X é pequena ao ponto de poder ser desconsiderada. O vetor deformação $\varepsilon_{\phi\psi}$ pode ser expresso relacionando o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de elasticidade do material (E) através da teoria da elasticidade (sólido isotrópico) (Equação 14):

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \times \sigma_{\phi} \times \text{sen}^2 \psi - \frac{\nu}{E} \times (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{Eq. (14)}$$

O cálculo da componente de tensão (σ_{ϕ}) na direção escolhida é dado através da Equação 15:

$$\sigma_{\phi} = -\left(\frac{E}{1-\nu}\right) \times \frac{\cot\theta_0(\theta_{\phi\psi_2} - \theta_{\phi\psi_1})}{\sin^2\psi_2 - \sin^2\psi_1} \quad \text{Eq. (15)}$$

De posse de várias medidas para diversos ângulos ψ os resultados devem ser plotados em uma curva $d_{\theta\psi}$ versus $\sin^2\psi$. Então a tensão residual deve pode ser obtida pela Equação 16.

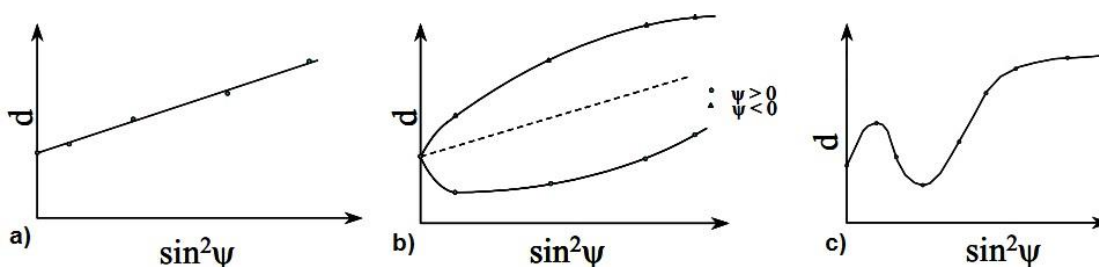
$$\sigma = \left(\frac{E}{1-\nu}\right) \times m \quad \text{Eq. (16)}$$

Onde esse "m" é a coeficiente angular (inclinação) da curva $d_{\theta\psi}$ versus $\sin^2\psi$.

Alguns perfis de curva $d_{\theta\psi}$ versus $\sin^2\psi$ podem ser obtidos de acordo com o estado de tensão e as propriedades cristalográficas do material analisado.

Quando é obtida uma reta regular, sem grandes desvios de medidas Figura 25 (a) significa que as deformações são homogêneas e não há presença das tensões de cisalhamento (FITZPATRICK *et al.*, 2005). A presença de tensões de cisalhamento resulta no perfil mostrado na Figura 25 (b) indicando que as deformações não são homogêneas e a presença de textura (orientação preferencial dos planos cristalinos) mostra um perfil oscilatório Figura 25 (c).

Figura 25- Perfis de curva de $\theta\psi$ versus $\sin^2\psi$



Fonte: FITZPATRICK *et al.*, (2005).

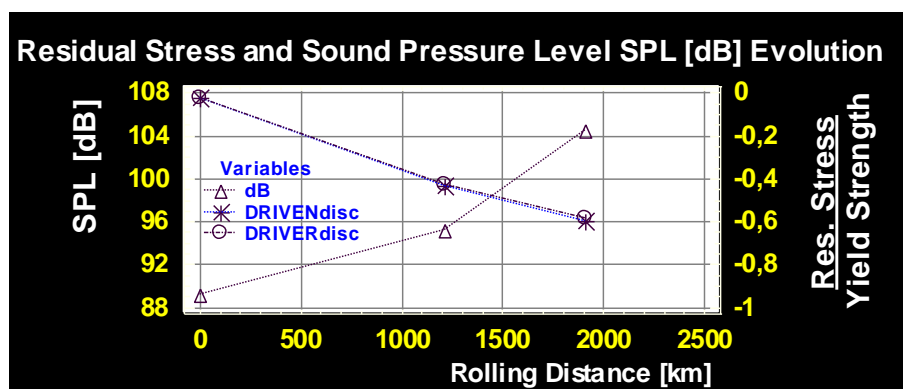
É importante para a confiabilidade dos resultados que o material medido tenha uma granulometria refinada, comportamento linear elástico, seja homogêneo e isotrópico, e não possua gradientes de tensão na região analisada. Outros fatores limitantes para o emprego do método são: alto custo

de seus equipamentos e a periculosidade devido à radiação atrelada ao processo.

2.6 Tensão Residual e Nível de Pressão Sonora (NPS)

MEDEIROS *et al.*, (2002) buscando desenvolver um método não destrutivo para avaliar as mudanças no campo das tensões residuais avaliaram o comportamento do aço AISI 52100 submetidos a rolamento seco em uma máquina de ensaio disco-disco, com pressões de contato que variaram de 2,22 a 2,49 GPa e velocidade de $40 \pm 0,5$ m/s. Os autores constataram que o desenvolvimento do desgaste, ao longo da vida está associado à evolução e dispersão das tensões residuais σ_r [MPa] nas pistas de rolamento e ao nível de pressão sonora, NPS [dB]. Os sinais de pressão sonora foram aquisitados por um decibelímetro que operava na frequência de 20 Hz até 8 kHz durante os ensaios. As medidas de tensão residual foram feitas através da técnica de difratometria de raios X ($\text{sen}^2\psi$). Os resultados estão expostos conforme a Figura 26.

Figura 26 – Gráfico com a evolução do nível de pressão sonora [dB] e da tensão residual com a distância de rolamento



Fonte: MEDEIROS *et al.* (2002).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os corpos de prova adquiridos foram rolamentos de esferas, do tipo axial, modelo 51100 e da marca GBR que se encontrava devidamente acondicionado. É um rolamento comumente utilizado no mercado e com um preço acessível. Fabricado em aço AISI 52100, equivalente ao aço DIN100Cr6 (norma alemã) que tem sua composição química disponibilizada em catálogos industriais eletrônicos (Tabela 1).

Tabela 1- Composição química mássica (%) do aço AISI 52100

C	Si	Mn	Cr	P	S	Mo	Fe
0,98...1,1	0,2...0,35	0,25...0,45	1,3...1,6	≤0,025	≤0,025	≤0,08	Bal

Fonte: GBR Rolamentos

Para as análises deste trabalho foram desenvolvidas várias metodologias. A primeira etapa para conseguir confiabilidade nos resultados foi selecionar três regiões equidistantes na pista de rolamento tanto superior quanto inferior para serem analisadas assim como mostra nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Desenho esquemático das áreas a serem analisadas no corpo de prova, pista (a) inferior (b) Superior

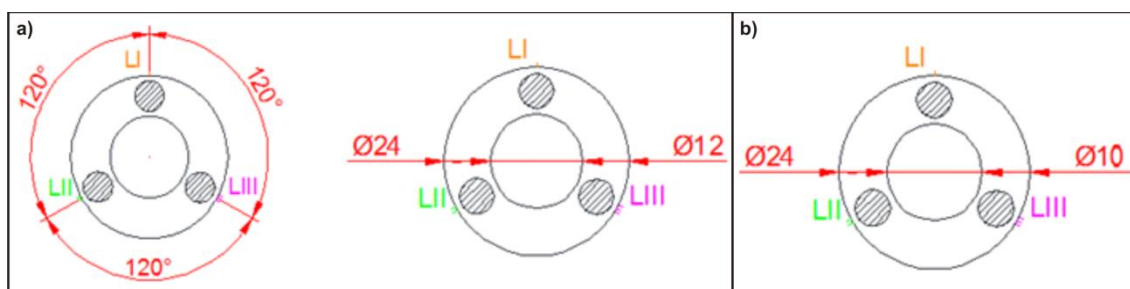
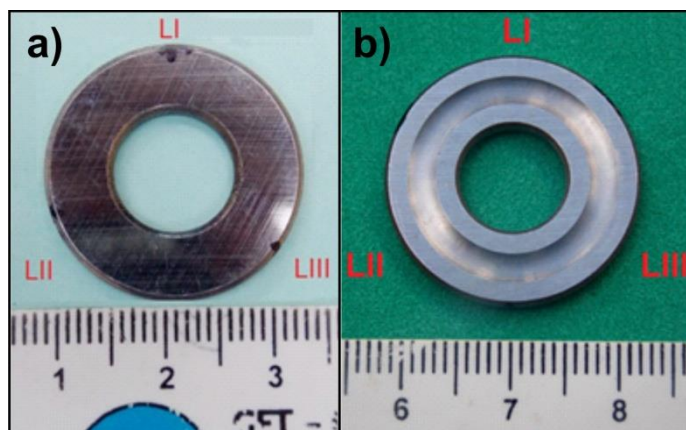


Figura 28- Fotos das localizações dos corpos de prova **(a)** Pista inferior na posição invertida **(b)** Pista superior na posição original



3.2 Ensaios de Caracterização

3.2.1 DRX

Para a caracterização das fases do corpo de prova foi utilizado um difratômetro de raios X modelo 6000, Shimadzu onde foi utilizada radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), realizada uma varredura de 30° a 120° com o passo de $0,01^\circ$ e um tempo de 3 segundos por passo. Para realizar a análise foi necessário uma adaptação no porta amostra sendo isolado (Figura 29) a fim de capturar apenas os picos do aço rolamento.

Figura 29- Adaptação do porta amostra para a análise de DRX.



O mesmo equipamento foi usado para caracterizar o pó proveniente do ensaio não lubrificado. Foi mapeado com varredura de 10° a 120° , com passo de $0,02^\circ$ e um tempo de 1,5 segundos por passo.

3.2.2 Análise Química

As análises químicas foram realizadas em três medidas e feitas a média aritmética. O corpo de prova foi analisado em dois equipamentos a fim de comparar os resultados para uma melhor confiabilidade na composição química do material. Foram usados o Espectrômetro de Fluorescência de raios X Shimadzu, modelo XRF-1800 Sequencial, e o Microanalisador de Sonda Eletrônica (EPMA) também Shimadzu, modelo 1720 localizados no Núcleo de Estudos em Petróleo e Energias Renováveis e no Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduo, respectivamente, ambos situados na UFRN. A metodologia empregada é a dispersão por comprimento de onda (WD), sendo sua faixa de detecção do sódio (Na - Z=11) ao urânio (U - Z=92) e radiação $RhK\alpha$ ($\lambda = 0,615\text{Å}$), no modo semi quantitativo.

Um mapeamento, no EPMA, com a metodologia da energia dispersiva também foi feito para observar a distribuição dos elementos químicos.

3.2.3 Preparação Metalográfica

Para a caracterização metalográfica foram utilizadas lixas de 220, 400, 600, 1000 e 1500 *mesh*, seguido de polimento com suspensão de alumina com partículas de $1\mu\text{m}$ objetivando a diminuição dos riscos provenientes do processo de fabricação do rolamento. Para revelar a microestrutura foi preparada uma solução ácida de Nital com concentração de 2% de ácido nítrico (HNO_3) e 98% de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$). O ataque químico foi realizado por imersão

A captura de imagens foi feita no laboratório de tribologia e integridade estrutural da UFRN através de um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX60M.

Para maiores aumentos e melhores resoluções foram extraídas imagens através de um Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu, modelo SSX – 550 (Figura 30) no Laboratório de Refino e Tecnologias Ambientais – UFRN e o Microanalisador de Sonda Eletrônica (EPMA) citado no tópico (análise química). Condições como, voltagem, distância de trabalho e magnitude variaram e foram descritas nas legendas das respectivas imagens.

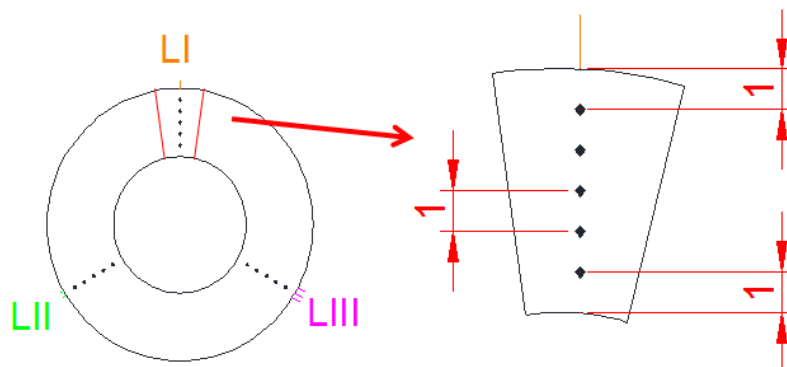
Figura 30– Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu.



3.2.4 Microdureza

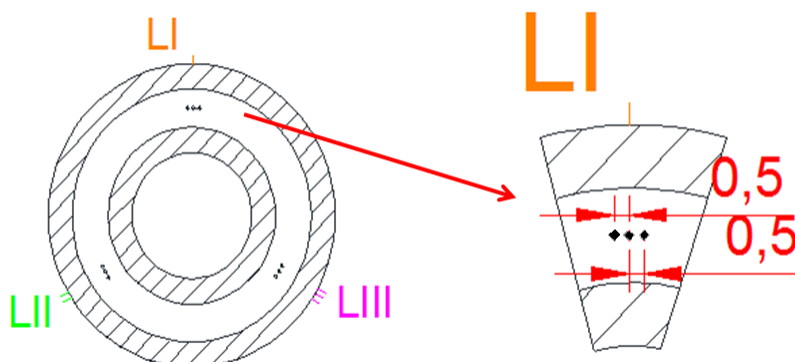
As medidas de microdureza foram realizadas no laboratório de Tribologia e Integridade Estrutural – UFRN. Foi utilizado um microdurômetro Vickers, marca Pantec, modelo MV 2000A. Antes da realização das medidas foi feito o ajuste de nível para garantir que as indentações fossem realizadas perpendicularmente ao corpo de prova. Para a realização das medidas foi obedecida a metodologia de analisar sempre a mesma região, onde na pista invertida foi admitida a distância de 1,0 mm da borda e dado um espaçamento de 1,0 mm entre cada indentação como mostra a Figura 31. Foram realizadas 5 medidas em cada região com carga de 25gf ($HV_{0,025}$).

Figura 31– Desenho esquemático das regiões onde foram feitas as indentações na pista com a posição invertida.



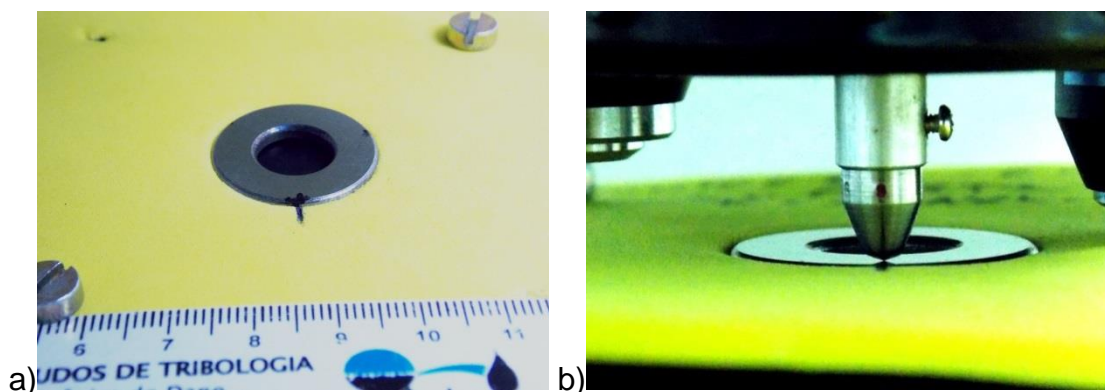
Para as medidas na pista com a posição original foram feitas 3 medidas no centro da pista em cada região. As indentações foram distanciadas lateralmente 0,5 mm (Figura 32).

Figura 32 – Desenho esquemático das regiões onde foram feitas as indentações na pista com a posição normal.



Como forma de garantir a repetitividade no local das medidas foi desenvolvido um gabarito para auxiliar a execução dos ensaios, onde era fixado na base do equipamento por dois parafusos de forma que o corpo de prova encontrava-se no centro da base (Figura 33).

Figura 33 – (a) Pista invertida posicionada com auxílio do dispositivo (b) Medida de Microdureza Vickers na pista invertida.



Por tratar-se de uma medida micrométrica, a técnica é vulnerável a erros sistemáticos e aleatórios de medidas. Visualizando minimizar os erros, todas as leituras foram realizadas por apenas um operador e foi estabelecido o critério de arredondamento para as diagonais da pirâmide. Quando o número decimal ≥ 5 incrementou-se uma unidade (Ex.: 6,42 = 6; 6,54 = 7).

3.2.5 Tensão Residual por Difração de Raios X

As medidas de tensão residual foram realizadas com o auxílio do assessorio de analisador de tensões acoplado ao difratômetro de raios X Shimadzu, modelo 7000, localizado no Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduo – UFRN (Figura 34). Antes de iniciarem as medidas de tensão residual, foram feitas algumas medidas para avaliar o alinhamento do equipamento como recomendam as normas SAE HS784 e ASTM E915-10.

Foi analisado um pó de aço ferrítico com a granulometria fina ($>45 \mu\text{m}$) e tratado termicamente no vácuo para alívio de tensões. Para os ensaios realizados usou-se a geometria de feixes paralelos com a técnica *iso-inclination* (ψ -constante) e fez-se o uso da fenda de divergência com abertura de 2 mm na frente do tubo.

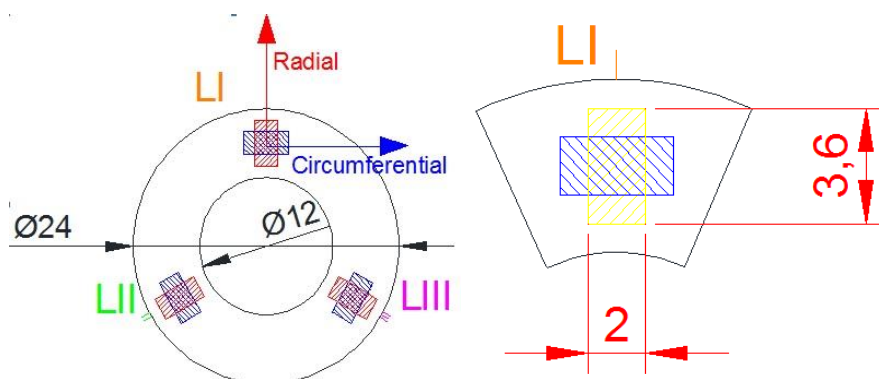
Figura 34– Difratômetro de raios X equipado com o módulo “stress”



Tendo em vista as dimensões do corpo de prova foi calculada geometricamente, a área que o raios X iria varrer amostra, com a configuração do equipamento e a varredura 2θ . Foi observado que pela geometria do equipamento e metodologia dos ensaios, a área varrida ira ser de $7,2 \text{ mm}^2$.

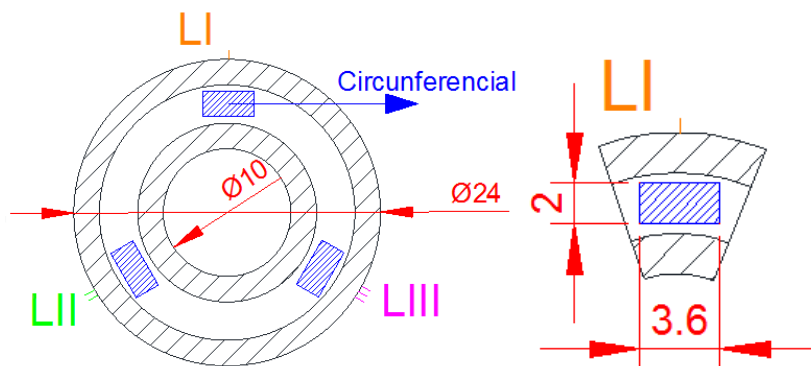
Para as pistas invertidas foram feitas medidas nas direções radial ($\phi = 0^\circ$) e circunferencial ($\phi = 90^\circ$) nas três áreas previamente selecionadas. (Figura 35)

Figura 35– Desenho esquemático das regiões da pista invertida analisadas na tensão residual.



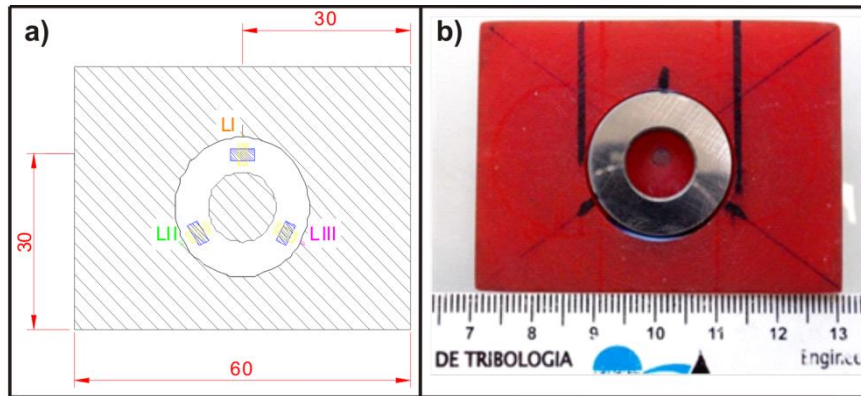
Nas pistas com a posição normal foram realizadas apenas medidas na direção circunferencial. Apesar da geometria de feixes paralelos minimizarem os erros de irregularidades superficiais não foi possível fazer as medidas na direção radial. (Figura 36)

Figura 36 – Desenho esquemático das regiões da pista normal analisadas na tensão residual.



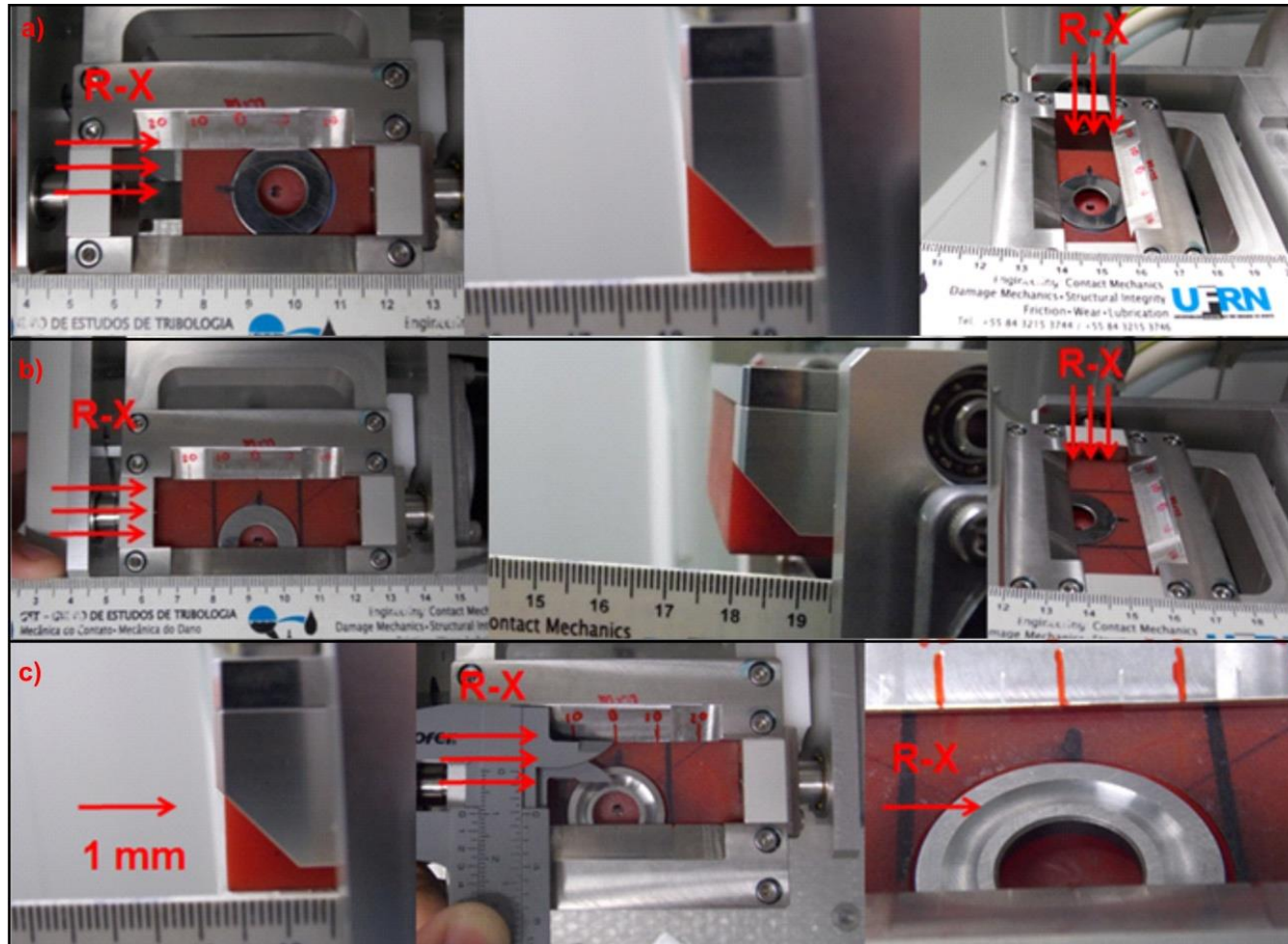
Para manter a repetitividade do local onde é analisada a amostra, foi desenvolvido um porta amostra com medidas específicas (Figura 37), garantindo que as medidas sejam sempre adquiridas no mesmo local e nas direções radial e circunferencial.

Figura 37– (a) Desenho esquemático das regiões analisadas na tensão residual. **(b)** Dispositivo para análise de Tensão Residual



Observam-se na Figura 38 as fotos com o posicionamento da amostra no acessório para as medidas de tensão residual.

Figura 38– Posicionamento das amostras na direção (a) radial, (b) circunferencial (pista invertida) e (c) circunferencial (pista posição normal).



Nota-se que para a direção circunferencial com a pista na posição normal que foi necessário ajustar em um milímetro a posição do porta amostra para que o feixe de raios X incidisse exatamente no meio da pista minimizando o efeito da curvatura.

As medidas de tensão residual foram realizadas nas condições descritas na Tabela 2:

Tabela 2- Configurações das medidas de difração para análise de tensão residual.

Ânodo (alvo do tubo)	CrK α (2,289Å)
Método	<i>Iso-inclination</i> (ψ -constante)
Geometria	Feixe paralelo
Raio do Goniômetro	200 cm
Ângulo de Difração	156° (211)
Varredura	150° a 162°
Passo	0,01°
Tempo por passo	2 segundos
Velocidade	3°/minuto
Corrente	30 mA
Tensão	40 kV
Ângulos ψ	(0; 12,92; 18,43; 22,79; 26,56; 30; 33,21; 36,27; 39,23; 42,13; 45.)

Para atender critério de análise $\text{sen}^2\psi$, foram adotados 11 ângulos ψ mantendo as medidas de $\text{sen}^2\psi$ com os mesmos intervalos. (0; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45). As propriedades do material utilizadas para a determinação do valor da tensão foram o módulo de elasticidade: adotado 210 GPa e o coeficiente de Poisson: adotado 0,3.

Para as medidas feitas nas duas direções foi adotado o critério de Von Mises para o cálculo das tensões equivalentes a partir da equação (17).

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \times [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \text{ Eq. (17)}$$

Onde:

σ_1 = Tensão na direção radial;

σ_2 = Tensão na direção circunferencial;

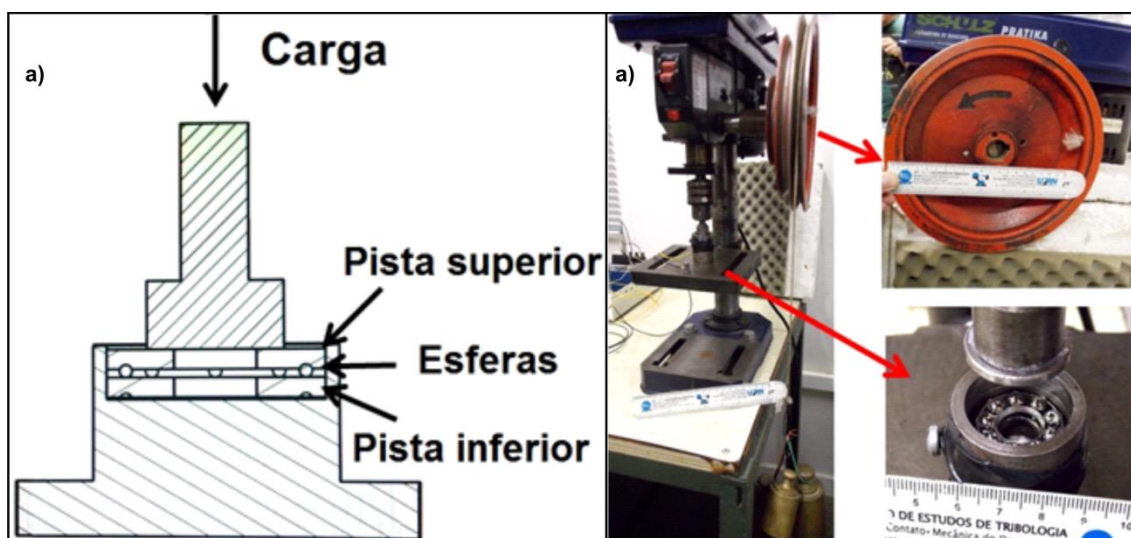
σ_3 = Tensão axial.

Como não foi mensurado a σ_3 devido a baixa penetração dos raios X na amostra considera-se com o valor 0.

3.2.6 Ensaios Tribológicos

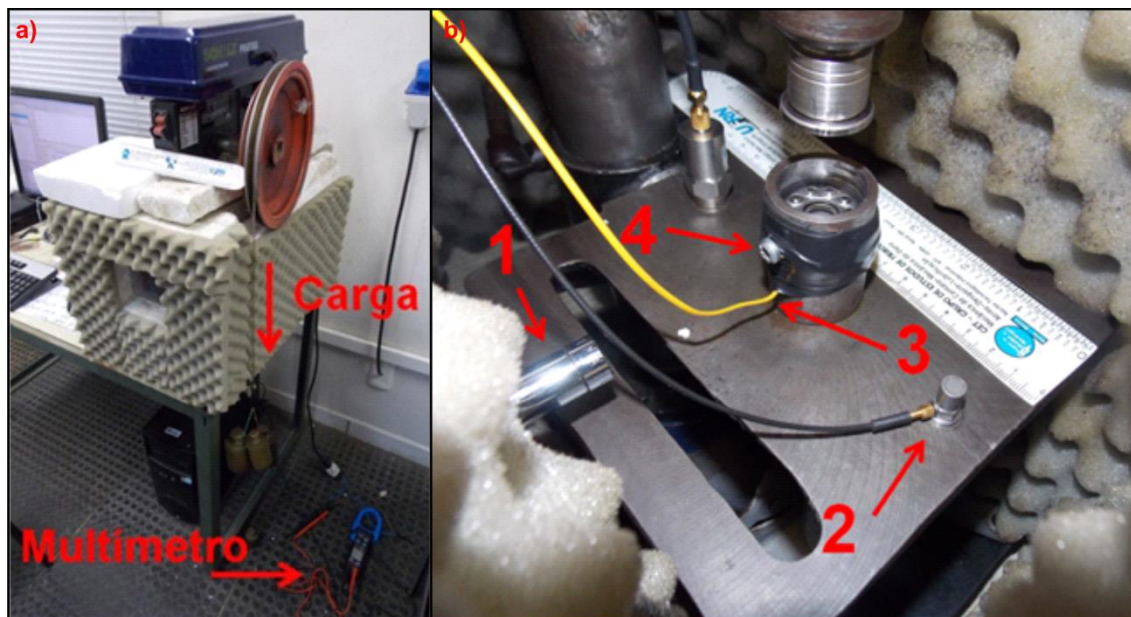
Os ensaios foram realizados no laboratório de Tribologia e Integridade Estrutural – UFRN em um tribômetro em vertical adaptado pelo grupo (GET-UFRN) para fazer ensaios de contatos cíclicos de rolamento (Figura 39).

Figura 39– (a) Desenho esquemático do tribômetro vertical **(b)** Tribômetro vertical no detalhe (acima) polia multiplicadora de carga, (abaixo) acondicionamento dos corpos de prova.



A bancada foi isolada térmica-acusticamente do ambiente e instrumentada para aquisição dos sinais de nível de pressão sonora (decibelímetro), vibração global (acelerômetro), temperatura ambiente (termopar tipo K), temperatura na pista inferior (termopar tipo K, posicionado a uma distância de 2 milímetros na face oposta da pista do contato) e a potência exigida pelo tribômetro (multímetro). (Figura 40)

Figura 40– (a) Vista da bancada térmica-acusticamente isolada **(b)** Bancada instrumentada com posicionamento em (1) decibelímetro, (2) Acelerômetro, (3) Termopar em contato com a amostra inferior e (4) Parafuso para prender a pista inferior.



O ensaio tribológico consiste em aplicar uma carga axial de 50kg, sobre o rolamento e rotacionar o corpo de prova superior para que o mesmo transfira o movimento para as esferas. O corpo de prova inferior ficara preso por um parafuso impedindo que o corpo de prova inferior rotacione. Foi tomado o cuidado para sempre colocar o corpo de prova na mesma posição para todos os ensaios. Os ensaios foram realizados com as configurações descritas nos subtítulos subsequentes:

3.2.6.1 Ensaio com contato não conforme

O ensaio com o contato não conforme (Figura 41) foi analisada apenas a pista inferior com as condições descritas na Tabela 3. Com o objetivo de avaliar a evolução das tensões residuais e dos danos, o ensaio foi interrompido após 10^4 , 10^5 ciltos e 10^6 ou no colápsso. A cada interrupção, assim como na condição recebida foram feitas as caracterizações anteriormente descritas. (Figura 41 (b)).

Figura 41– (a) Representação do contato não conforme esfera com 4,65 mm de diâmetro sobre plano **(b)** Posicionamento da pista inferior **(c)** Posicionamento das esferas com gaiola.

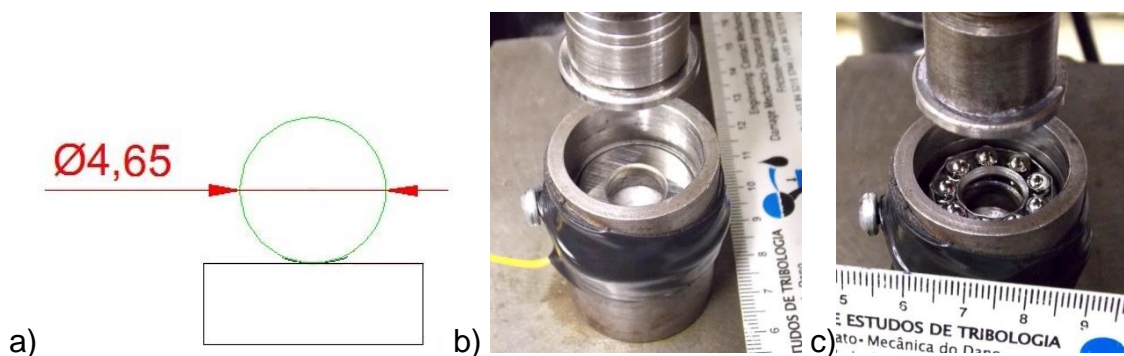


Tabela 3– Configuração do ensaio com contato não conforme

Pista superior	Posição original
Pista inferior	Posição invertida
Quantidade de esferas	9 com separador (Gaiola)
Material das esferas	AISI 52100
Lubrificação	Seco (Sem lubrificante)
Carga por esfera	5,55 N
Pressão de contato máx.	1400 MPa
Pressão de contato média	900 MPa
Velocidade	1100 rpm
Frequência	165 Hz

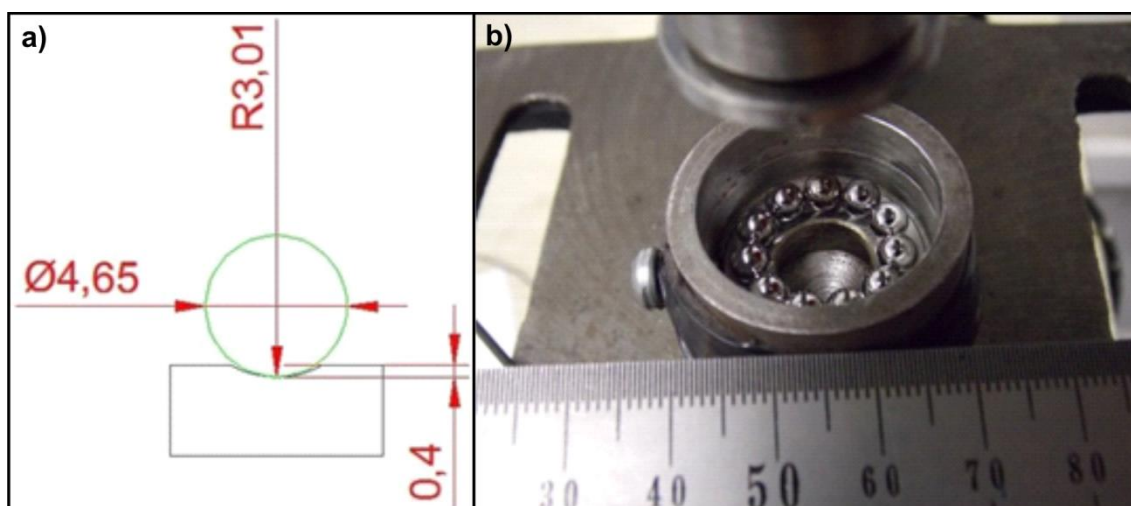
A frequência foi calculada multiplicando a velocidade com a quantidade de amostras

3.2.6.2 Ensaio com contato conforme não lubrificado

O ensaio com o contato conforme (Figura 42) foram analisadas as duas pistas (superior e inferior). Com o objetivo de avaliar o comportamento das tensões residuais e dos danos nas duas superfícies

- Pista superior - Movimento de rolamento da pista sobre as esferas e das esferas em movimento de rolamento e rotação sobre a pista;
- Pista Inferior - Movimento de rolamento e rotação das esferas em relação à pista.

Figura 42– (a) Representação do contato conforme esfera sobre pista com curvatura de raio = 3,01 mm **(b)** Posicionamento das esferas com pista inferior.



O ensaio foi realizado com 10^6 ciclos e feita as caracterizações anteriormente descritas. Para os ensaios com contatos conformes foram pesadas as pistas antes e depois de todos os ensaios, em uma balança de precisão (quatro casas decimais). As condições do ensaio são descritas na Tabela 4.

Tabela 4– Configuração do ensaio com contato conforme não lubrificado

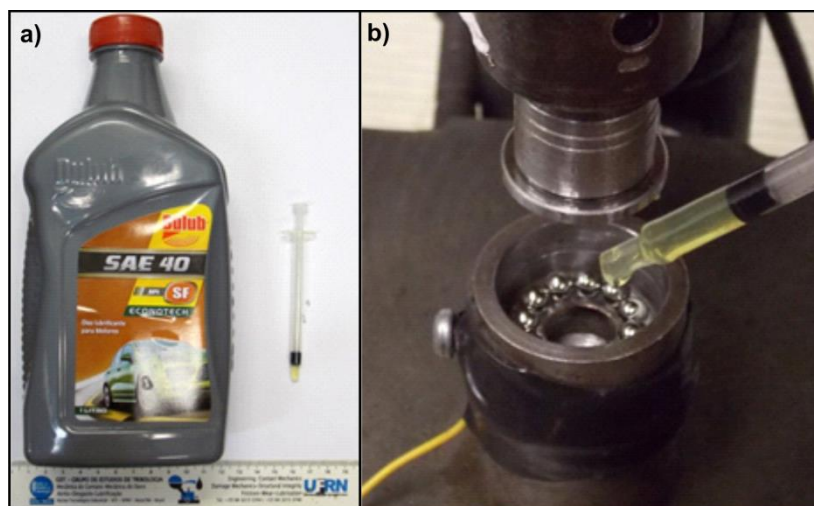
Pista superior	Posição original
Pista inferior	Posição original
Quantidade de esferas	11 sem separador (Gaiola)
Material das esferas	AISI 52100
Lubrificação	Seco (Sem lubrificante)
Carga por esfera	4,6 N
Pressão de contato máx.	500 MPa
Pressão de contato média	300 MPa
Velocidade	1100 rpm
Frequência	201,7 Hz

3.2.6.3 Ensaio com contato conforme lubrificado

Com o intuito de acelerar o processo de desgaste e incrementar o grau de severidade do dano (comparando a ensaios lubrificados), foi adotado o regime de lubrificação limítrofe, adicionando-se apenas uma gota de óleo lubrificante SAE40 SF (Figura 43 (a)), com massa de $0,0246 \text{ (g)} \pm 0,001 \text{ (g)}$. O lubrificante é recomendado para motores de combustão interna de automóveis movidos a álcool e a gasolina (par tribológico: Cilindro-Pistão). Com exceção

da adição do lubrificante, a configuração do ensaio foi a mesma realizada no ensaio com contato conforme não lubrificado.(Figura 43 (b))

Figura 43– (a) Óleo lubrificante SAE 40 SF (b) Lubrificação do ensaio



Na Tabela 5 estão contidas as informações a respeito das características do óleo usado.

Tabela 5– Propriedades do óleo lubrificante Dulub SAE 40 SF

Densidade a 20/4 °C	0,878
Viscosidade	
40 °C	142mm ² /s
100 °C	14,6mm ² /s
Índice de Viscosidade	102
Ponto de Fulgor (VA)	220°C
Ponto de Fluidez	-3°C
Corrosão de lamina de Cobre 3h, 100 °C	1B
TBN (mgKOH/g)	4,60

Fonte: DULUB

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

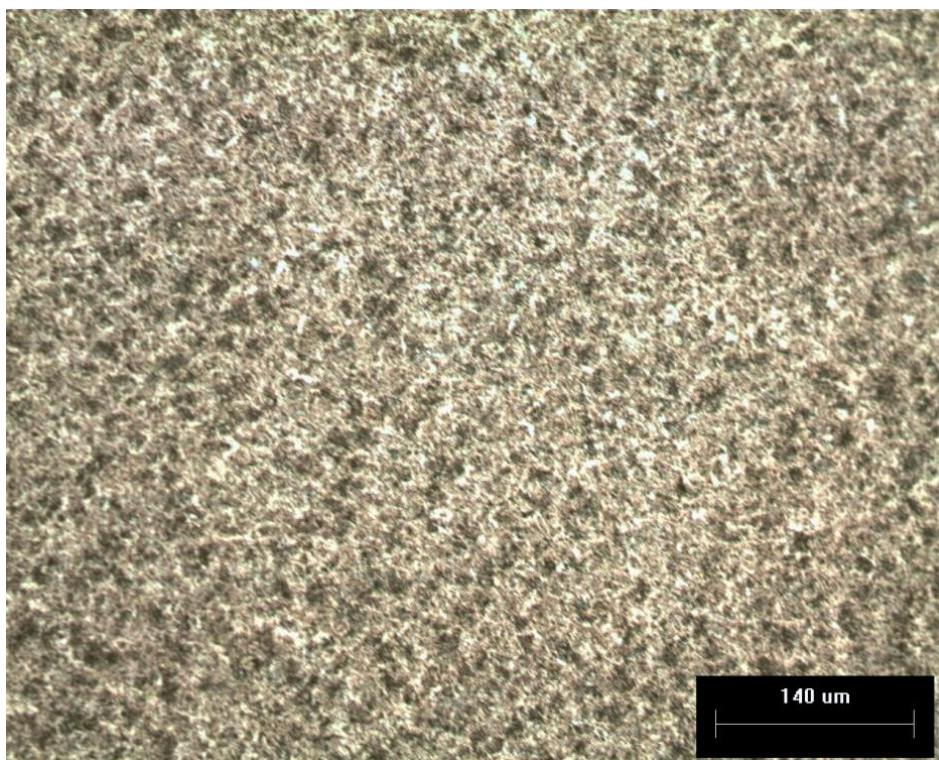
4.1 Caracterizações dos corpos de prova antecedentes aos ensaios tribológicos

A caracterização do Aço AISI 52100 para rolamentos, foi feita através de análises como: Microscopias: óptica e eletrônica de varredura, análise química e DRX como já descrito anteriormente, a fim de garantir que as características fornecidas pelo fabricante sejam confiáveis para este trabalho.

4.1.1 Metalografia via Microscopia Óptica

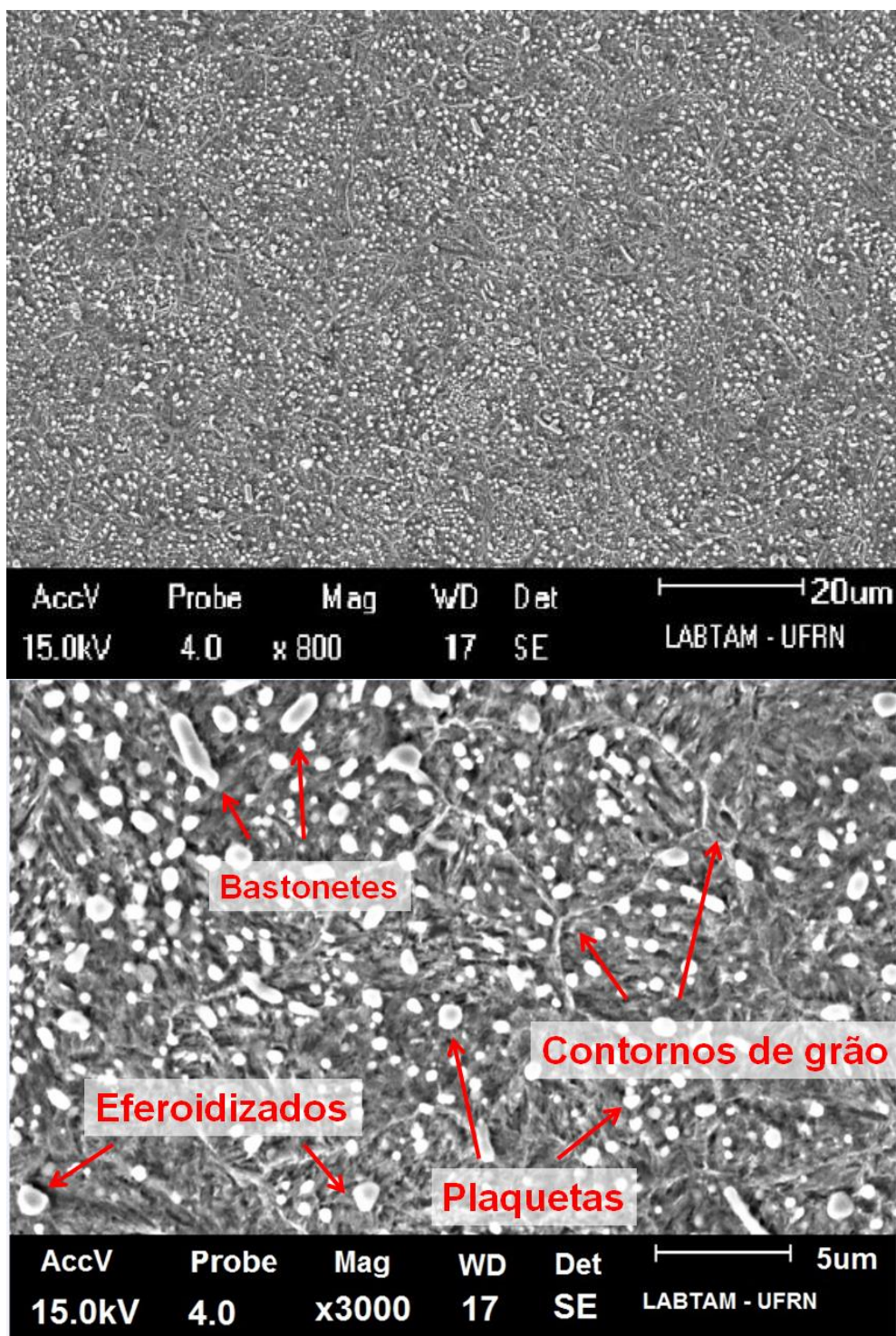
Na Figura 44 observa-se a micrografia obtida com o uso do microscópio óptico e corrobora com o resultado da Figura 45 que apresenta a microestrutura do material com mais qualidade e nitidez.

Figura 44 – Microestrutura do aço 52100 através do M.O. Ataque: Nital 2%



Na Figura 45 observa-se através da microscopia eletrônica de varredura evidências de carbonetos. Marcomini (2012), em sua tese de doutorado investigou microestruturas de aços 52100 comercial e apresentou algumas micrografias semelhantes às mostradas na Figura 45.

Figura 45– Microestrutura do aço 52100 através do MEV. Ataque: Nital 2%



As micrografias eletrônicas da Figura 45, também deixaram evidentes que há carbonetos nos contornos de grão e ilhas de precipitados de carbonetos pró-eutetóides distribuídos na matriz do aço. Carbonetos em diversas morfologias como bastonetes, plaquetas e em sua grande maioria os

carbonetos esferoidizados menores que 5 μm . A presença majoritária dessa morfologia de carbonetos é proveniente do tratamento térmico de esferoidização.

De acordo com Santos (2001) e Campanha (2008), esse perfil de microestrutura é requerido para conferir, uma maior dureza e resistência ao desgaste e a fadiga de contato, propriedades estas necessárias aos aços AISI 52100 para rolamentos.

4.1.2 Análise química

A análise química resultante do aço AISI 52100 é descrita nas Tabelas 6 e 7 de acordo com os equipamentos. Para o espectrômetro de fluorescência de raios X foi possível fixar o valor do carbono em 1% e recalculando os valores em balanço, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado da análise química pelo EFRX

Elemento	% (mássica)	% (mássica)
Fe	97,85	96,87
Cr	1,54	1,53
Mn	0,31	0,31
Si	0,29	0,29
C	-	1,00

Para o EPMA não foi possível fixar o valor de carbono e foram registrados os valores descritos na Tabela 7:

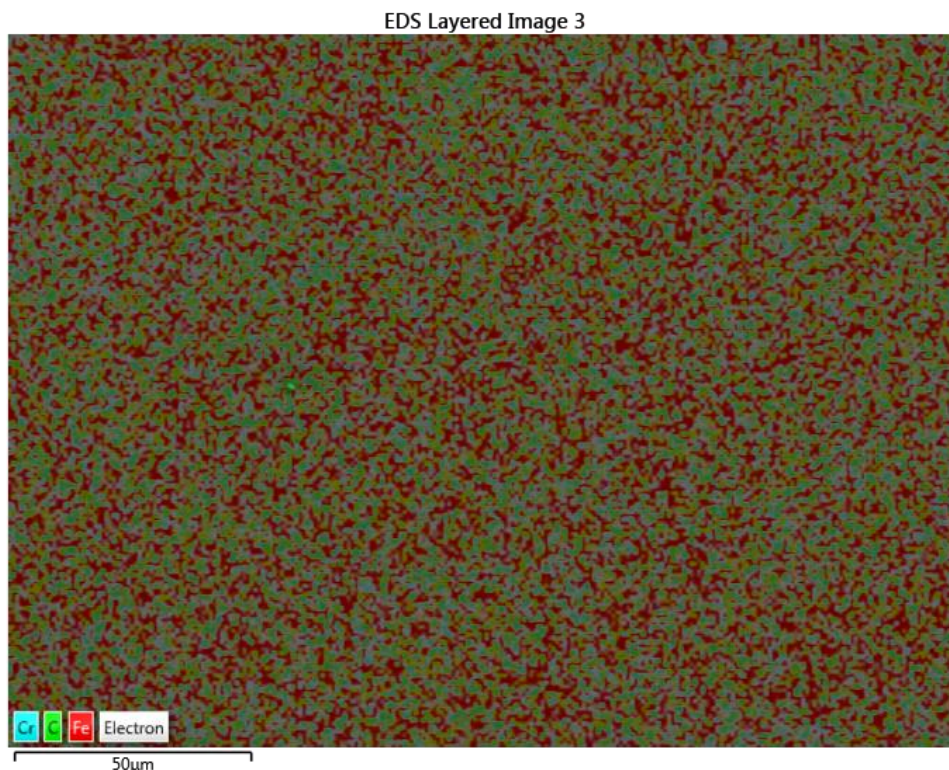
Tabela 7 – Resultado da análise química pelo EPMA

Elemento	% (mássica)
Fe	97,88
Cr	1,51
Mn	0,35
Si	0,26

Os resultados mostraram-se compatíveis em relação aos valores informados pelo fabricante, disponíveis na Tabela 1. As análises realizadas não se mostraram sensíveis para os elementos em menores frações (com sua porcentagem em massa menor que 0,1%).

Foi realizado mapeamento de distribuição qualitativa da composição química de acordo com a Figura 46 que evidenciou uma distribuição homogênea dos elementos químicos no material, evidenciando a presença Carbono, Ferro e do Cromo, convergente com as análises químicas anteriores.

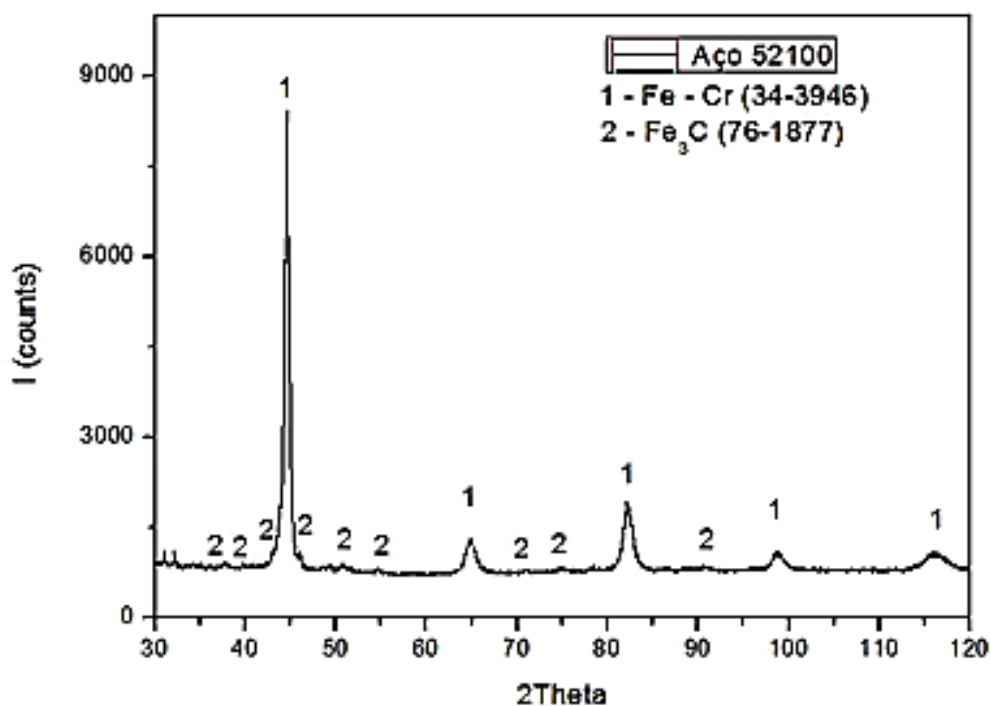
Figura 46– Mapeamento realizado no aço 52100 pela técnica de EDS.



4.1.3 Difração de raios X

Na análise de Difração de Raios X, conforme Figura 47, foram detectadas a presença de algumas fases, sendo uma delas a fase do Ferro α com Cromo em solução sólida e Carboneto de Ferro (Cementita) com as cartas do banco de dados do PDF/ICDD, 34-3946 e 76-1877 respectivamente.

Figura 47 – Difratoograma do aço 52100 evidenciando as fases de Fe-Cr e Fe₃C

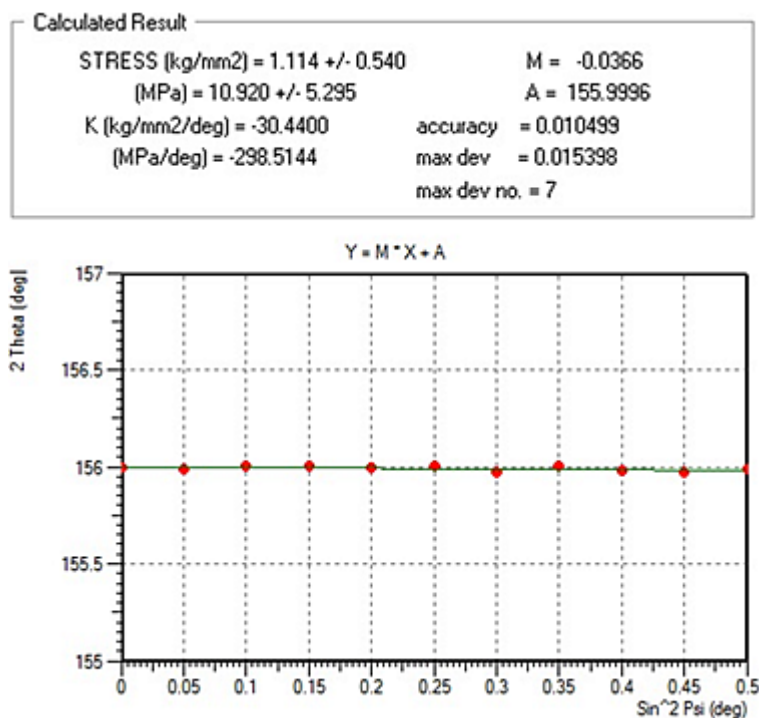


Não foi detectada a presença da austenita retida apesar de ser muito comum em aços que sofrem tratamentos térmicos de têmpera que é resultado da alta taxa de resfriamento. Em geral a austenita retida modifica algumas propriedades do aço como a dureza final e a tenacidade à fratura. (MARCOMINI, 2012; SANTOS, 2001).

4.1.4 Tensão Residual por Difração de raios X

O resultado da medida de tensão residual e a curva $\text{Sen}^2\psi$ versus 2θ no pó de aço ferrítico, tratado termicamente, pode ser visualizado na Figura 48 abaixo:

Figura 48 – Curva $\text{Sen}^2\psi$ versus 2θ do pó de aço ferrítico para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.



De acordo com norma ASTM E915-10, a medida de um pó com a granulometria adequada e tratado termicamente para alívio de tensões tenham valores aproximados a 14 ± 7 MPa. O valor obtido pela medida realizada antes dos ensaios (10 ± 5 MPa) evidencia que o equipamento encontra-se calibrado e apto para as análises de tensões residuais assim como a posição do pico (211) em 156° para o $\text{sen}^2 \psi = 0$ demonstrando também o alinhamento geométrico. As medidas no aço 52100 evidencia uma mudança no parâmetro de rede causando um pequeno deslocamento no pico, consequência do átomo de cromo causar a distorção no parâmetro de rede da estrutura ferrítica. A mesma variação acontece quando há presença de um ou mais dos quatro primeiros desvios de forma (ver Figura 8) no componente, no entanto, a geometria de feixes paralelos minimiza esse erro.

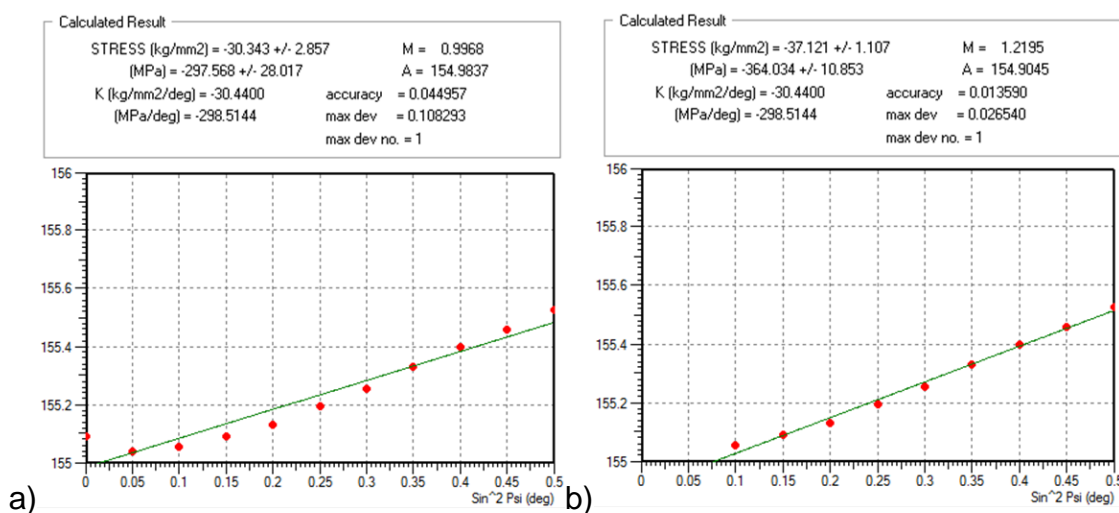
Quando existem irregularidades superficiais, todos os picos (2θ para os ângulos ψ) sofrem as mesmas variações de posição fazendo com que as medidas de tensão residual não sejam fortemente afetadas, já que os valores são calculados a partir do coeficiente angular da curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ .

Após a primeira medida no rolamento foi constatado a presença de tensões de cisalhamento, provocando um comportamento " *ψ -splitting*" na curva

$\text{sen}^2\psi$ versus 2θ (Figura 49 (a)). As tensões de cisalhamento presentes na peça devem-se ao processo de fabricação do material, tratamento térmico e acabamento da peça. São processos que induzem deformações plásticas em direções distintas.

O comportamento da curva foi visualizado em todas as áreas analisadas na peça, aumentando o desvio de medida em cada resultado. É observado que para valores de ângulos ψ baixos as tensões de cisalhamento têm forte influência na tendência da reta e para valores altos não é observado essa influência. Yang *et. al* (2008), Sakakibara e Sato (2005) para minimizar o efeito do “ ψ -splitting” configuraram suas medidas para ângulos ψ positivos e ψ negativos. Devido a limitações do equipamento não foi possível adotar essa solução sendo desconsiderados para todos os resultados, os dois primeiros valores de $\text{sen}^2\psi$ (0 e 0,05) (Figura 49 (b)).

Figura 49 – Perfis da curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ com a presença de tensões de cisalhamento (a) os 11 ângulos ψ (b) Desconsiderados os dois primeiros valores



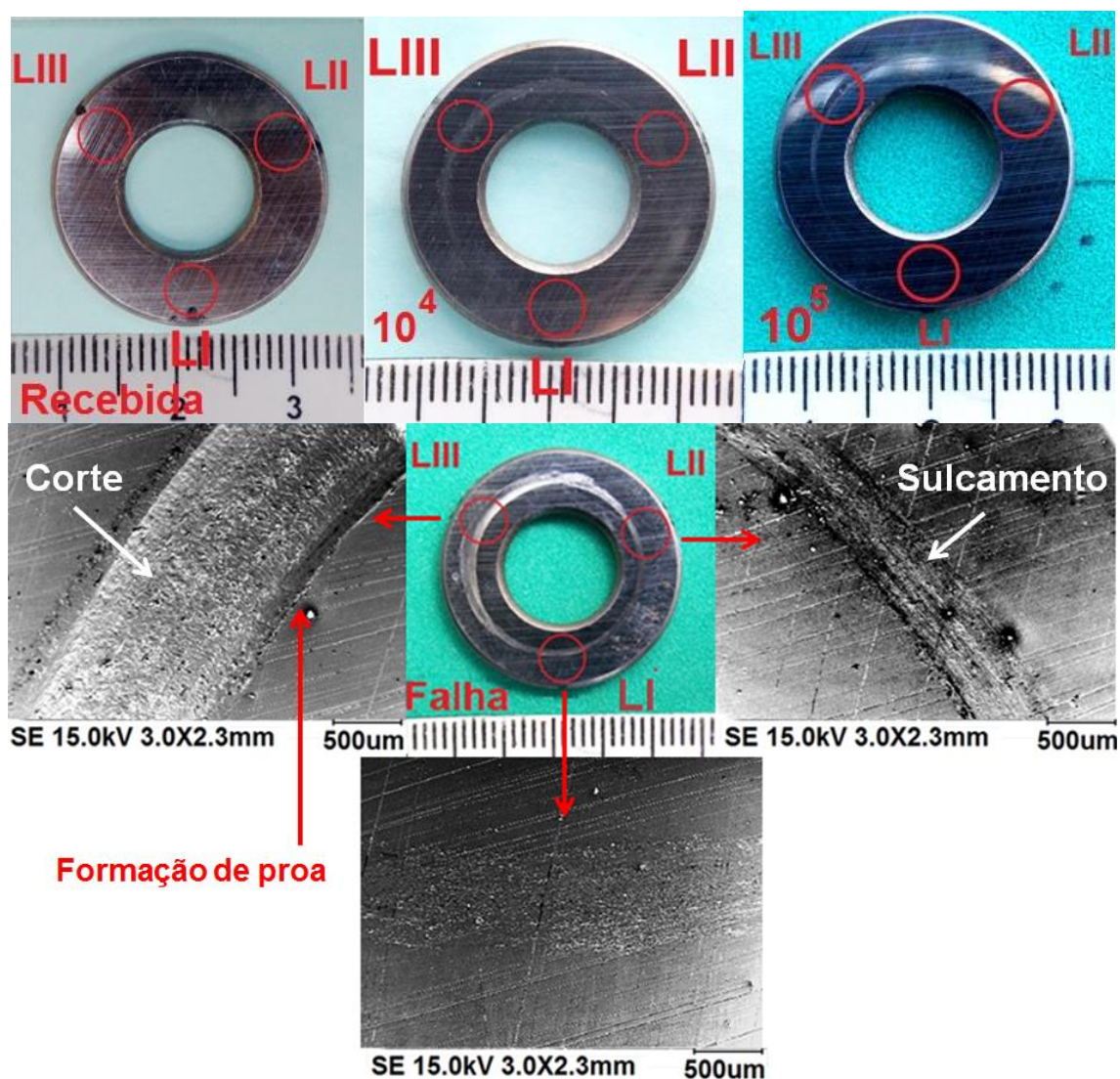
Após a retirada dos dois primeiros valores, os desvios de medidas reduzem em mais de 50% os valores, deixando a inclinação da curva mais fiel à tendência dos pontos obedecendo à regressão linear. Essa metodologia foi utilizada baseada na norma ASTM 2860-12, onde sugere que uma análise com resultados satisfatório deve ter no mínimo 5 pontos e o desvio de medidas não deve ser acima de 20 MPa. Também não é especificado os valores dos ângulos ψ . Todos os cálculos foram realizados a partir de 9 ângulos ψ e com a dispersão de medidas menor que 20 MPa.

4.2 Ensaio de contato não conforme:

Inicialmente o ensaio iria ser interrompido depois de 10^6 ciclos, entretanto na última ciclagem o ensaio precisou ser interrompido com 24 minutos devido ao colapso da gaiola, durando um tempo total de 34 minutos ($3,38 \times 10^5$ ciclos).

As imagens da Figura 50 evidenciam o acompanhamento do desgaste não uniforme entre as três regiões da superfície do corpo de prova. Observaram-se também três mecanismos distintos do desgaste abrasivo, como: corte, sulcamento e formação de proa, nessas condições.

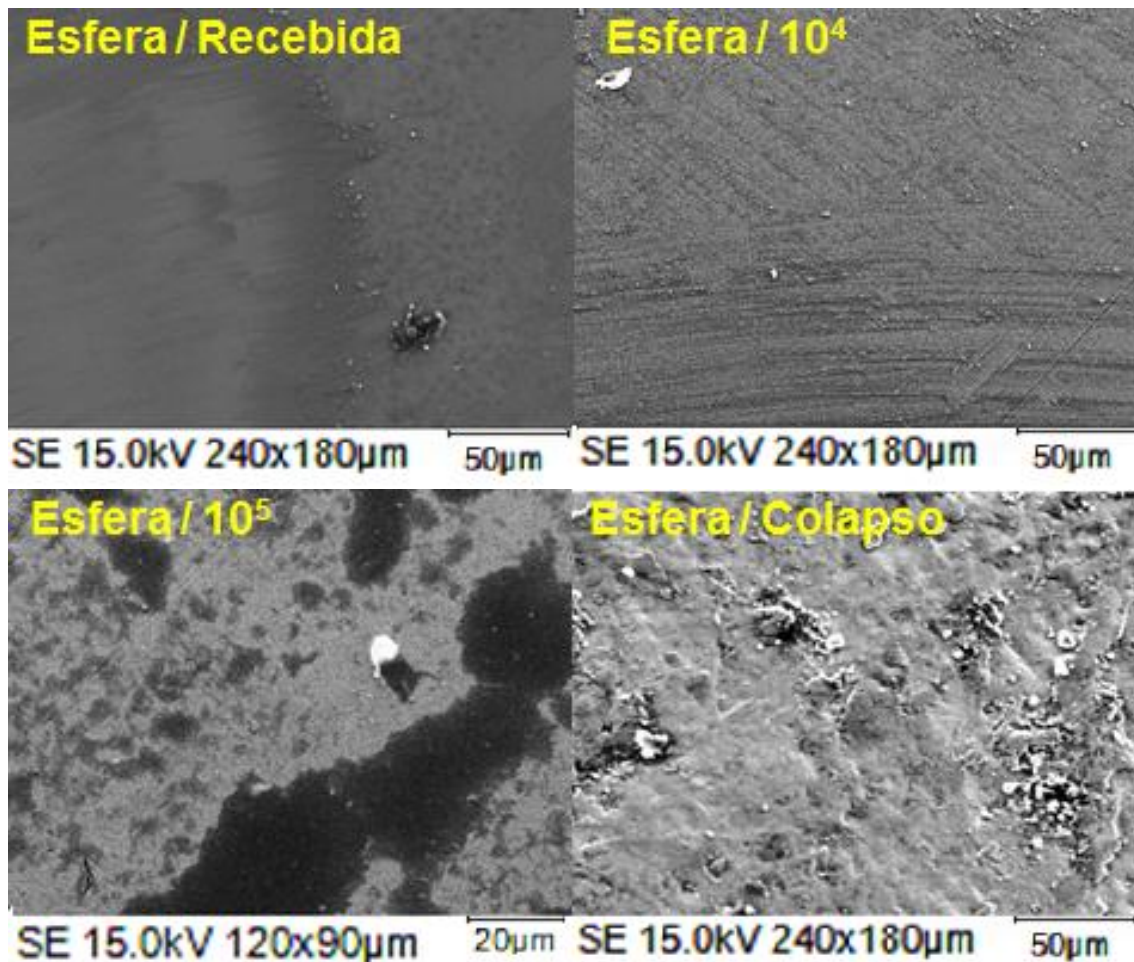
Figura 50 – Evidências do desgaste na pista do rolamento, regiões LI, LII e LIII



Conforme Figura 50, o desgaste foi mais acentuado nas regiões LII e LIII no qual é observada a formação de dupla proa decorrente da elevada pressão de contato e do atrito por rolamento em conjunto com deslizamento.

O mapeamento da esfera e das superfícies de cada região foi registrado na condição recebida e após cada ciclagem (10^4 , 10^5 e colapso) como indicado em cada imagem apresentadas de acordo com a Figura 51.

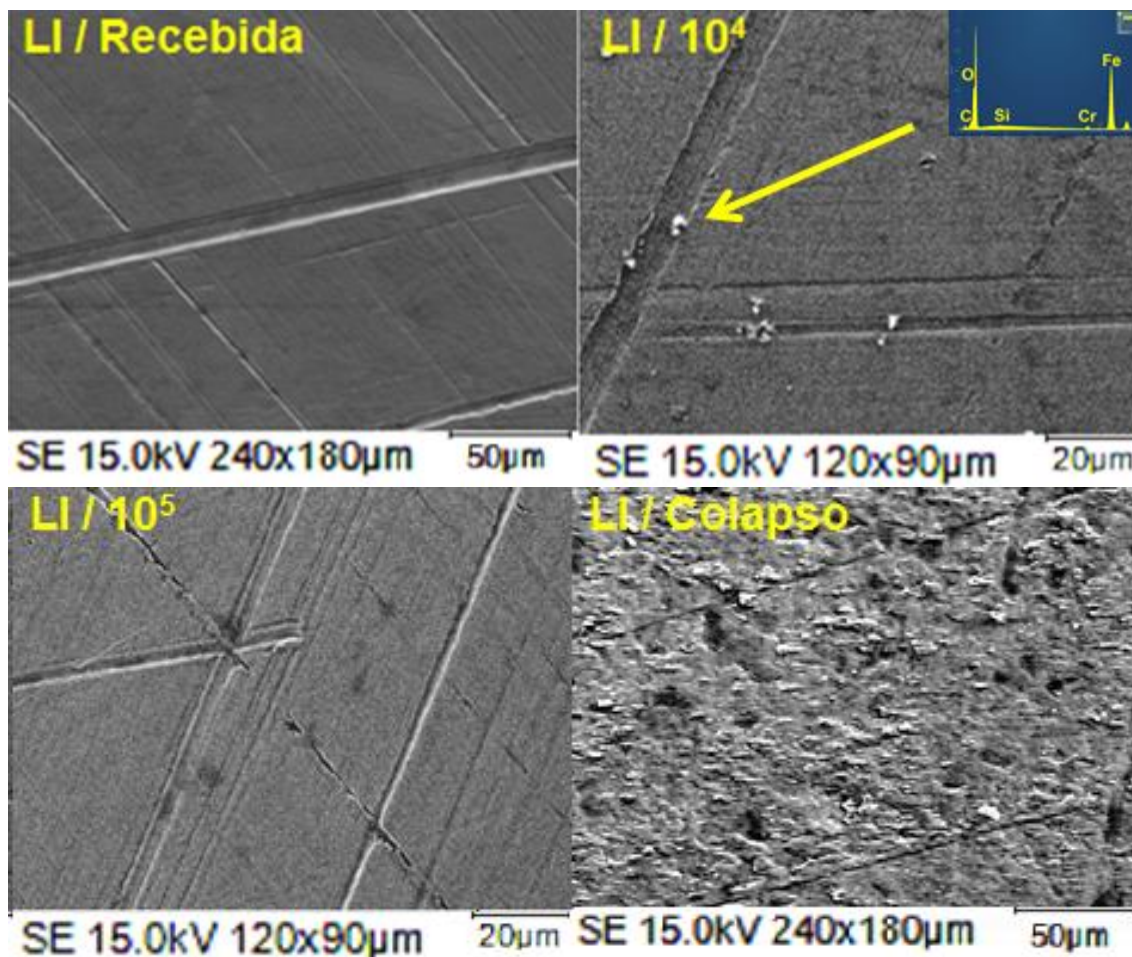
Figura 51 – Acompanhamento do desgaste na esfera



Considerando uma única esfera para as fotos, observa-se na primeira ciclagem (10^4 ciclos) o aparecimento de microsulcamentos e finas partículas. Na segunda ciclagem (10^5 ciclos), os microsulcamentos não estão mais aparente devido o intenso desgaste. Após o colapso é evidente uma severa deformação plástica e a aderência de particulados metálicos e de óxido em sua superfície. De acordo com Quinn (1983) para regimes de desgastes oxidativos moderados as temperaturas de contato das asperezas podem atingir valores acima de 400°C ocorrendo o crescimento da camada superficial. Com o passar

dos ciclos essa camada vai se desprendendo da superfície e gerando partículas finas que atuarão como partículas abrasivas (terceiro corpo). Esse fenômeno é observado mais claramente para os ensaios que foram realizados sem lubrificação (Figura 52).

Figura 52 – Acompanhamento do desgaste sofrido no corpo de prova: Lado LI

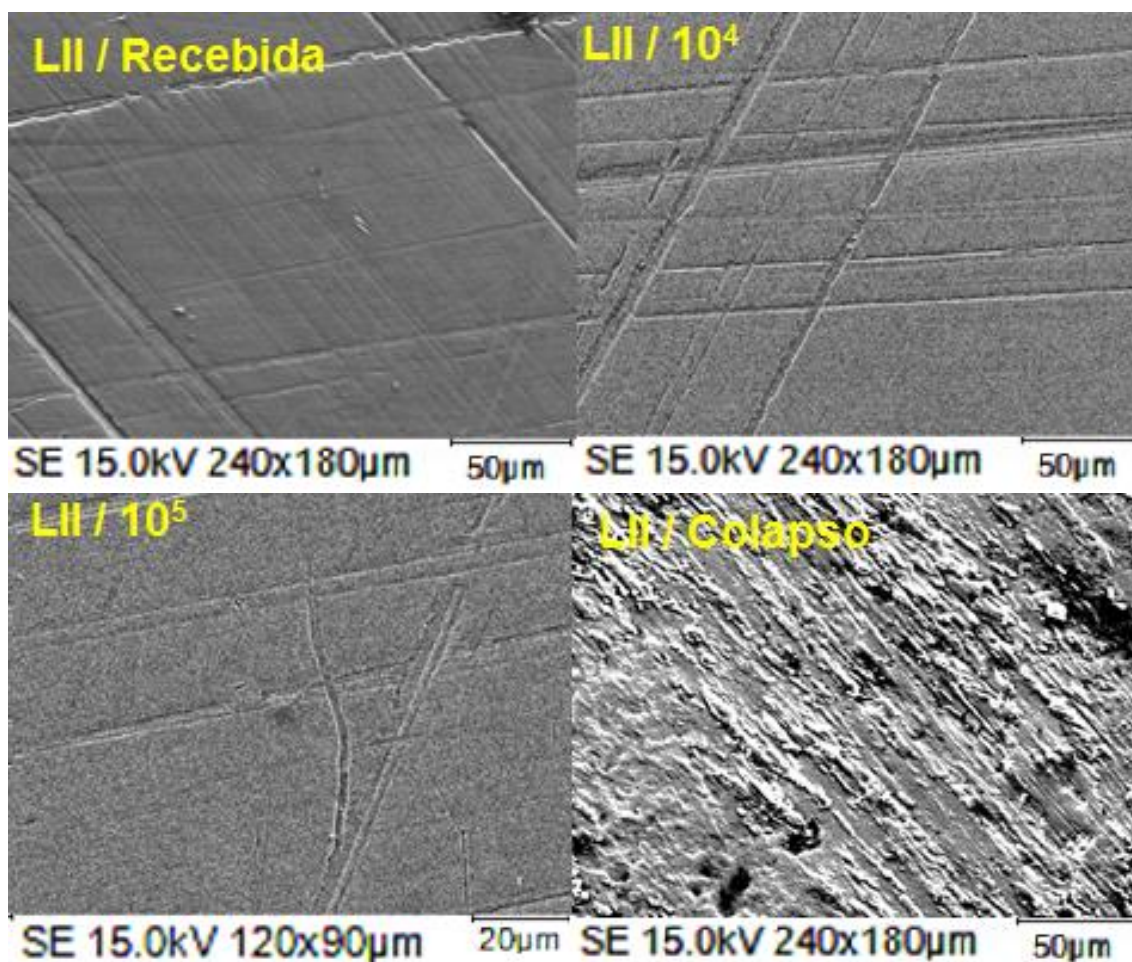


Na condição recebida é evidente as ranhuras em várias direções provenientes da usinagem e do acabamento que é comum em todo o corpo de prova estudado nesse trabalho. Cabe salientar que a utilização dessa superfície não é recomendada para o uso do rolamento. A escolha da superfície foi feita pelo autor, a fim de promover uma maior pressão de contato entre as estruturas.

Na primeira ciclagem mostrada na Figura 52, também é observado a presença de particulados, após a segunda ciclagem, os microssulcamentos são intensificados e observam-se deformações plásticas pouco acentuadas. Na terceira ciclagem, apesar da deformação ser mais intensa e existir evidências

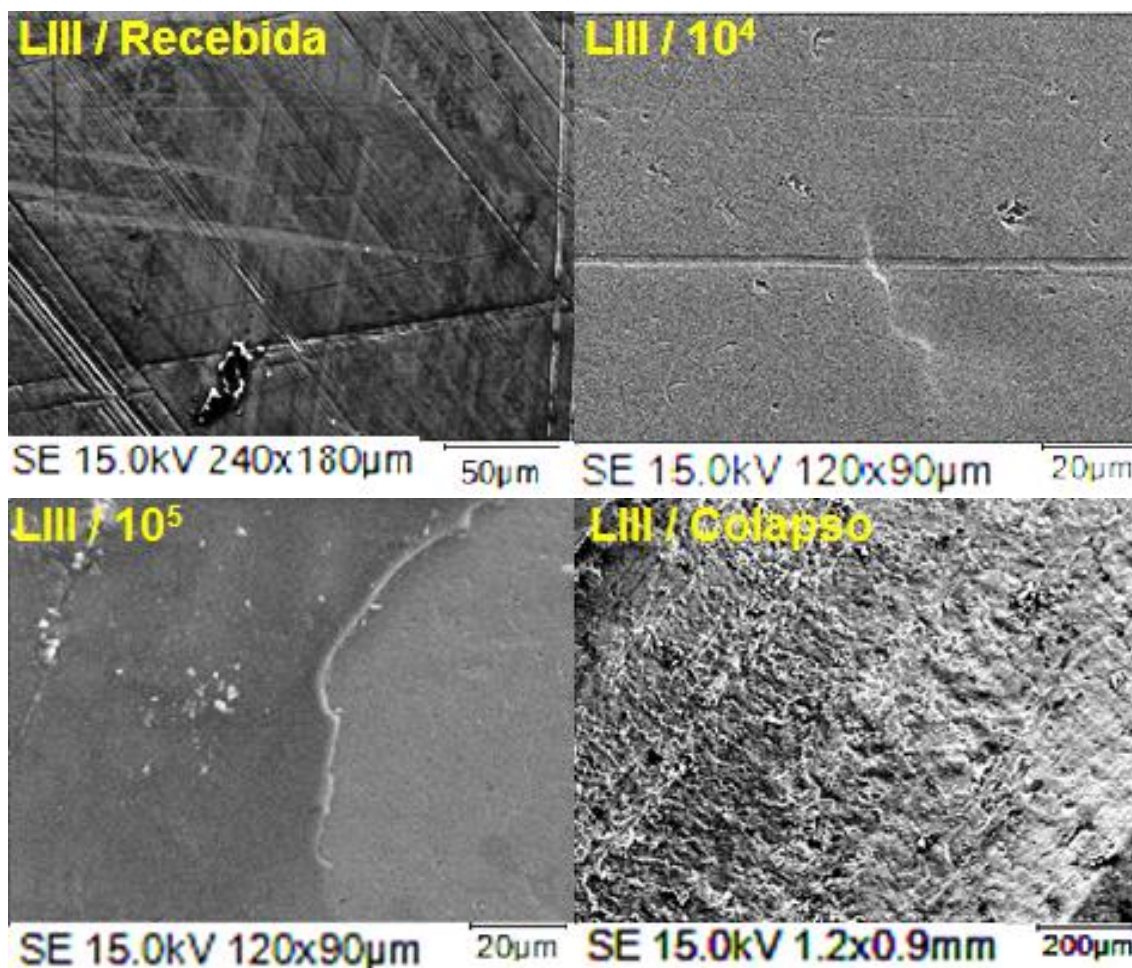
da aderência de partículas, ainda é possível visualizar alguns microsulcamentos iniciais, provenientes da usinagem.

Figura 53 – Acompanhamento do desgaste sofrido no corpo de prova: Lado LII



Na região LII da Figura 53, é observada após 10^5 ciclos a diminuição das asperezas provenientes da usinagem e do acabamento superficial, assim como o aparecimento de novos microsulcamentos em direções aleatórias. Após o colapso não é possível observar a presença dos microsulcamentos iniciais, evidenciando o desgaste abrasivo mais intenso em relação à mesma vida na região LI. Na região LII após o colapso também é observada a aderência de partículas na superfície e micro pites.

Figura 54 – Acompanhamento do desgaste sofrido no corpo de prova: Lado LIII



As imagens da região da Figura 54 corroboram evidências do desaparecimento de alguns microssulcamentos iniciais a partir da primeira ciclagem, o que esse fenômeno só foi observado para ciclagens maiores, ainda após 10^4 ciclos, é observada a presença de alguns micro pites, também observado no estudo feito por Medeiros (2002). Após a vida de 10^5 ciclos não é possível visualizar mais nenhum microssulcamento proveniente da usinagem. Após o colapso é visível a intensa deformação plástica, formando um sulcamento provocado pela elevada pressão de contato, dureza do material e duração do ensaio.

As medidas de tensões foram obtidas através da técnica de difratometria de raios X descritas anteriormente na metodologia. A Tabela 8 contém resultados medidos das tensões residuais predominantemente compressivas, bem como as tensões equivalentes calculadas a partir do critério de Von Mises. Os valores confirmam a anisotropia (ψ -splitting) na superfície plana do corpo de prova, decorrente do processo de fabricação e acabamento entre direções

circunferencial e radial, a qual se propaga após as três ciclagens subsequentes.

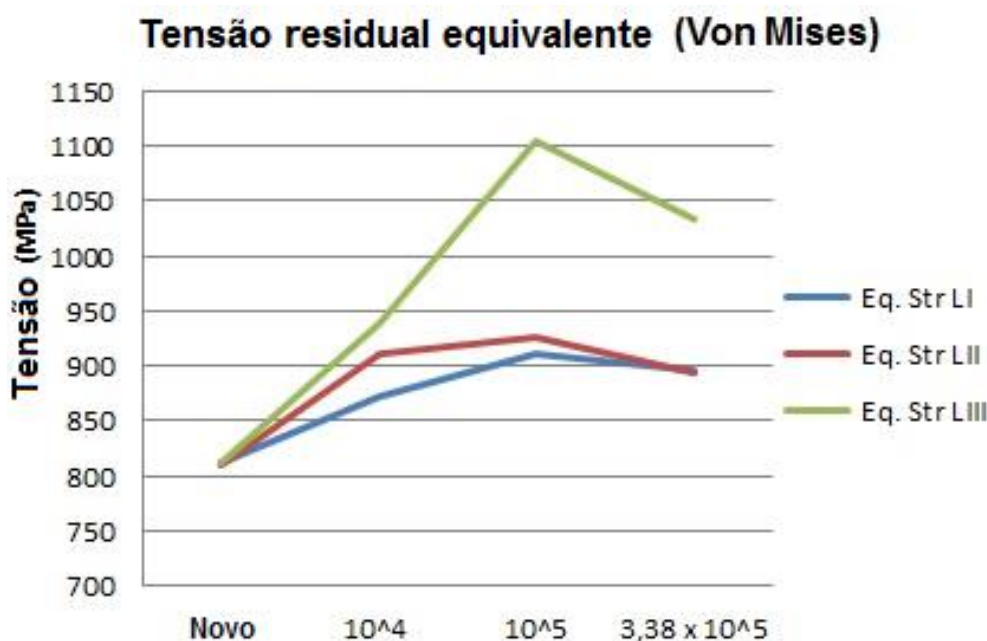
Tabela 8 – Valores (MPa) das medidas de tensões residuais e dos valores das tensões equivalentes calculadas

Posição / Direção	Cond. Recebida	10 ⁴ Ciclos	10 ⁵ Ciclos	3,38 x 10 ⁵ Ciclos
LI Radial (σ_1)	-877	-966	-972	-987
LI Circunferencial (σ_2)	-725	-733	-832	-765
LII Radial (σ_1)	-702	-819	-826	-862
LII Circunferencial (σ_2)	-887	-980	-1001	-923
LIII Radial (σ_1)	-852	-952	-1219	-1161
LIII Circunferencial (σ_2)	-766	-926	-931	-821
Tensão Equi. LI	812	873	910	897
Tensão Equi. LII	810	910	926	894
Tensão Equi. LIII	812	939	1104	1034

Martins *et al.* (2005) investigou as tensões residuais em aço 52100 pelo método de furo cego, e observou que as tensões provenientes do processo de usinagem são influenciadas pela direção do ataque da ferramenta e pelas condições de usinagem. No caso dos corpos de prova estudados neste trabalho, os microssulcamentos do processo de retífica estão presentes em várias direções, não mantendo assim, um padrão.

Conforme a Figura 55 observa-se a evolução das tensões residuais equivalentes. Inicialmente os valores calculados das tensões equivalentes foram praticamente os mesmos para as três regiões analisadas, após 10⁴ ciclos, as tensões majoraram até 15% em relação ao valor inicial.

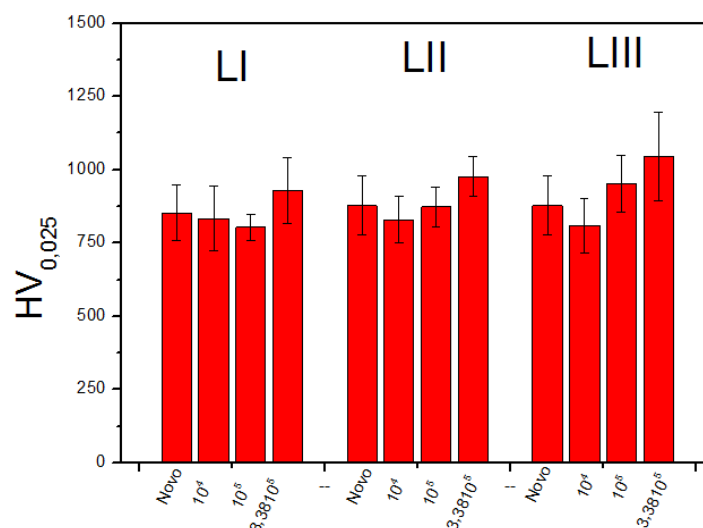
Figura 55 - Evolução das tensões residuais.



A partir de 10^5 ciclos, destaca-se a região LIII que para a mesma vida apresentou valores de 19% e 20% maiores do que a região LI e LII, respectivamente. Com $3,38 \times 10^5$ ciclos a tensão equivalente foi 15% maior em relação às outras regiões. A partir da ciclagem 10^5 até o colapso percebe-se uma deflexão na tendência, levando em consideração que para a vida 10^5 as tensões residuais apresentaram seu valor máximo. Foi observado que os incrementos da tensão residual em LI, LII e LIII foram respectivamente 12%, 14% e 36%. É importante salientar que as tensões residuais compressivas, na condição recebida, já se encontravam em um nível elevado, em consequência do grau de deformação plástica sofrido pelo processo de usinagem. Quanto maior com a densidade de discordâncias mais difícil é para deformar o material plasticamente e conseqüentemente imprimir e modificar as tensões residuais.

Os resultados de microdureza descritos na Figura 56 foram analisados pela Análise de Variância (ANOVA) a um nível de 95% de confiança, com auxílio do software *Statgraphics*[®]. Os resultados desta análise apresentaram diferenças estatísticas significativas na região LIII. Observa-se que o período de *running-in* no LI durou até a vida de 10^5 ciclos, enquanto nas regiões LII e LIII nota-se uma tendência no aumento na dureza a partir desta mesma vida.

Figura 56 - Microdureza HV0.025, com evidência do período de running-in.



Os resultados de microdureza podem ser explicados por uma possível transformação de fase na microestrutura (formação da camada branca) na região LIII. De acordo com *Zhang et al.* (2006) a camada branca é uma martensita com uma alta densidade de discordância e maclas ocasionais contendo finas partículas de cementita não dissolvidas. *Zhang et al.* (2006), *Jouini et al.* (2013), *Ramesh et al.* (2005), estudaram a formação e as características dessa camada branca, onde estas camadas tem dureza de aproximadamente mil Vickers. Essas camadas são encontradas onde existem deformações plásticas severas, tratamentos superficiais, movimento de deslizamento e rolamento.

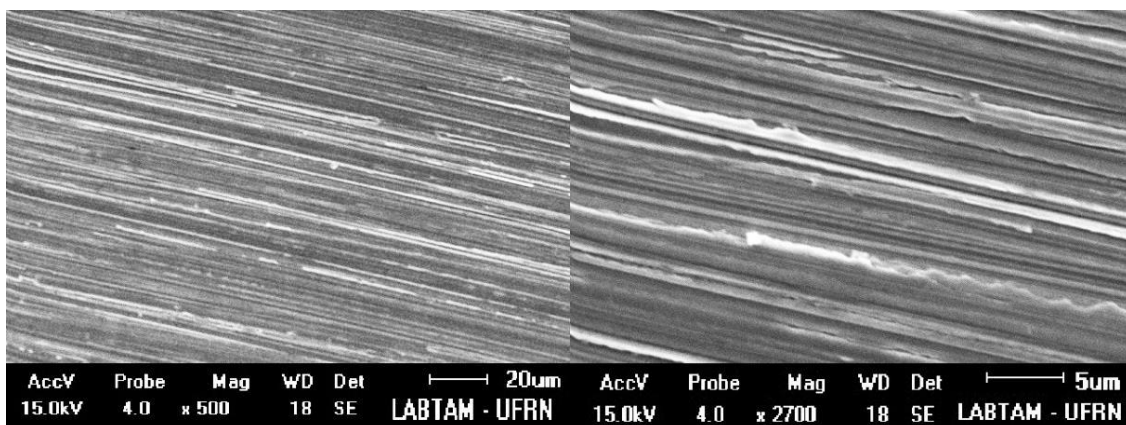
Foi detectado que para as configurações desse ensaio, o separador de esferas (gaiola) é o primeiro componente a entrar em colapso e interromper o ensaio. Por esse motivo não houve repetitividade nos ensaios. Para minimizar a influência da gaiola nos ensaios com contato conforme, foi removida a gaiola. As esferas foram alinhadas na pista de rolagem. Para preencher os espaços que ocupava a gaiola e manter o contato cíclico com o intervalo de tempo igual, adicionaram-se duas esferas do mesmo diâmetro e mesmo material.

4.3 Ensaio com contato conforme:

Antes de iniciar os ensaios com contato conforme, foram registradas através de MEV as características superficiais da pista de rolagem.

Posteriormente foram comparadas com registros das superfícies após ensaiadas com e sem lubrificação.

Figura 57 – Superfície da trilha de rolamento na condição recebida.

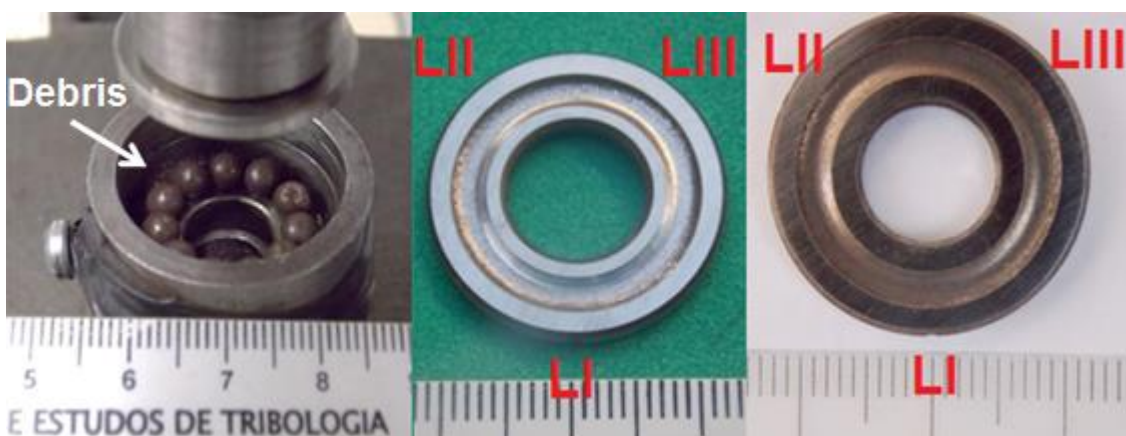


É possível visualizar na Figura 57, ranhuras decorrentes do processo de usinagem e acabamento antes dos ensaios.

4.3.1 Ensaio contato conforme Seco:

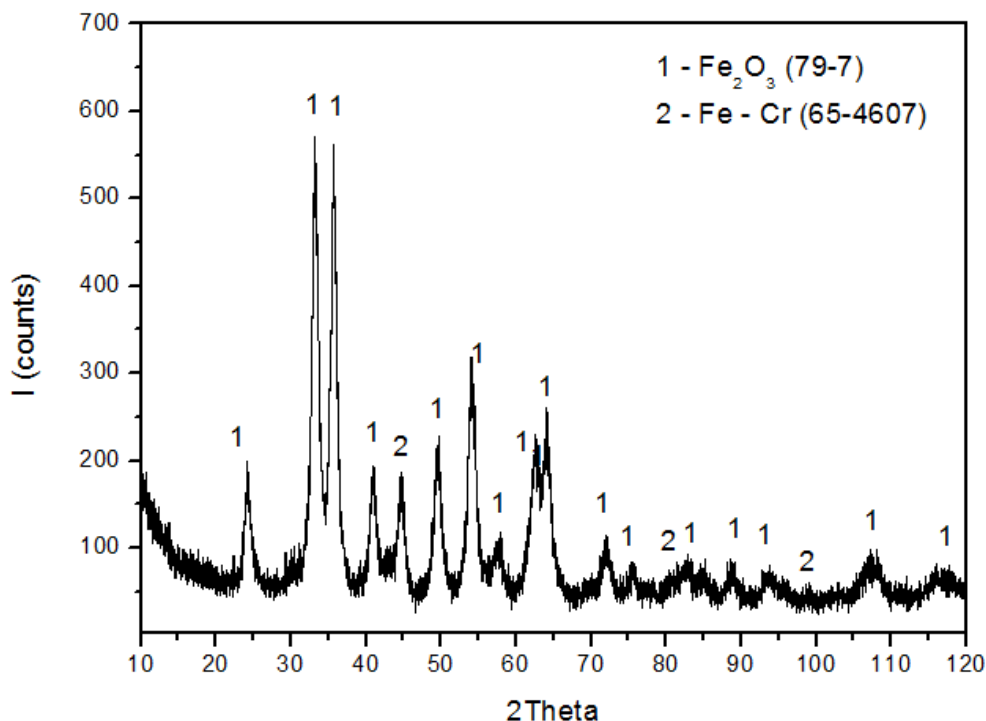
As imagens da figura 58 mostram os corpos de prova após o ensaio de contato conforme, chamando a atenção para a presença de *debris* no interior da cápsula que acondiciona o corpo de prova, devido ao desgaste nas pistas e esferas. A temperatura da pista inferior teve o seu valor máximo de aproximadamente 85°C. Destaca-se que o termopar é posicionado em contato com o lado oposto à superfície de rolamento. A temperatura pontual das asperezas do contato chega a valores superiores aos mensurados pelo termopar.

Figura 58 – Registro fotográfico após ensaio a seco



Após o ensaio, foi realizada a caracterização desse pó por difração de raios X e então detectado que houve a formação de hematita (óxido de ferro) assim como foi observada a presença da fase Fe-Cr do material, conforme difratograma exibido na Figura 59.

Figura 59 - DRX do pó proveniente do ensaio a seco



A formação de óxido deve-se à presença do atrito sólido causado pelos movimentos de rolamento, deslizamento e rotação (das esferas) entre as superfícies, intensificado pela falta de lubrificação e umidade relativa do ar conforme estudos de Neves (2006). Fazendo assim com que a temperatura no contato no tribossistema se elevasse favorecendo a reação com o oxigênio, levando à oxidação do material. Com o passar das ciclagens observaram-se fenômenos de arrancamento dessa camada de óxidos registrado através do mapeamento registrado pela microscopia eletrônica de varredura apresentado na Figura 60.

Após o ensaio os corpos de prova foram limpos no banho ultrassônico durante 10 minutos e verificado sua massa em uma balança analítica com resolução de 0,0001 gramas. Na Tabela 9 estão descritos valores das massas, assim como a perda mássica das duas pistas de rolagem indicando que para

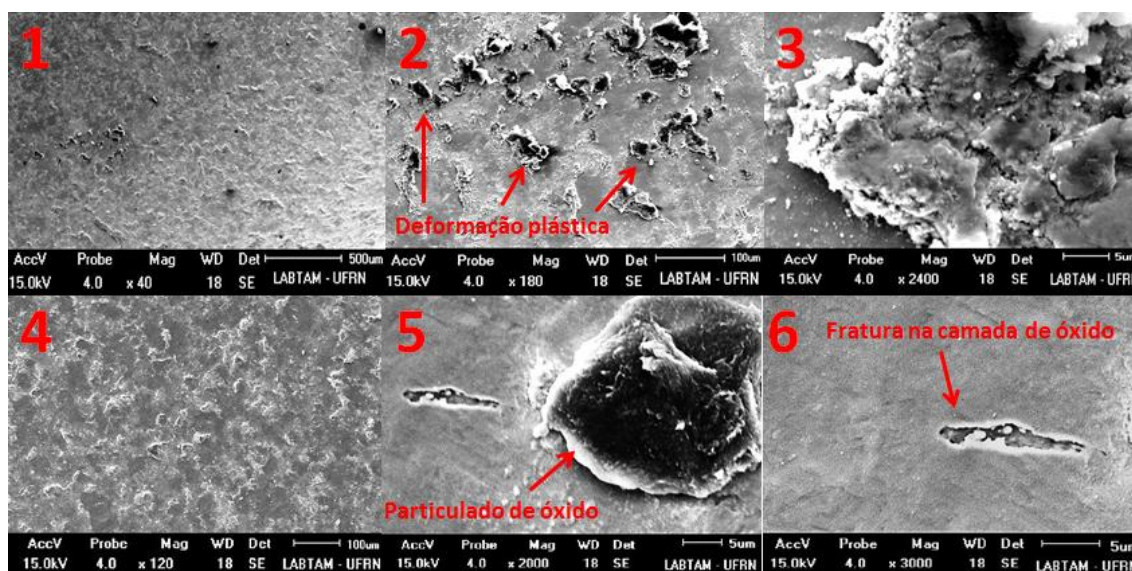
as condições submetidas aos corpos de prova, a pista superior sofreu uma perda mássica mais acentuada do que a pista inferior.

Tabela 9 – Tabela contendo valores das massas dos corpos de prova e referentes à perda.

Ensaio à Seco	Pista Superior	Pista Inferior
Massa Antes (g)	6,6933	6,2655
Massa Depois (g)	6,6622	6,2432
Perda mássica (%)	0,46	0,36

Nas imagens obtidas por MEV são observadas as características da pista superior (Figura 60 = 1, 2 e 3) e da pista inferior (Figura 60 = 4, 5 e 6), ambas apresentam uma intensa deformação plástica com aderências de particulados sólidos evidenciando um desgaste severo (formação de *debris* > 20 μm) também estudado por Lima (2010). As superfícies revelam a formação da camada de óxido, não sendo possível visualizar as ranhuras iniciais do processo de fabricação e acabamento. Nas Figuras 60 (5 e 6) observa-se uma pequena fratura da camada e o desprendimento de particulados finos.

Figura 60 – Superfícies desgastadas pelo ensaio a seco.



Neves (2006) em sua tese investigou o comportamento sob carregamentos cíclicos de aços tratados termicamente, conferindo ao material estudado uma dureza na faixa de 450 HV_{0,1}. A morfologia da superfície ensaiada a seco apresentou características semelhantes à apresentada na Figura 60.

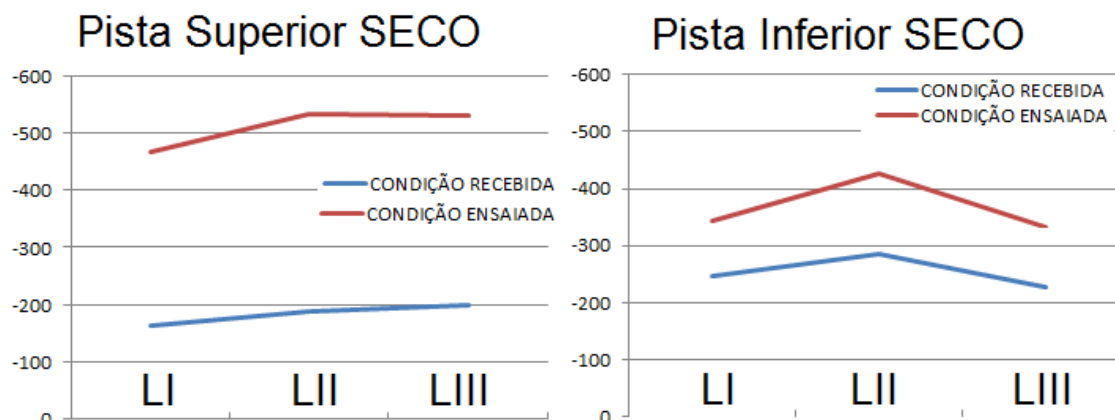
A Tabela 10 contém resultados medidos das tensões residuais nas pistas de rolagem.

Tabela 10 – Valores (MPa) das medidas de tensões residuais e a porcentagem de incremento

Pista / Posição	Cond. Recebida	10 ⁶ Ciclos	Incremento (%)
Superior / LI	-164	-446	172
Superior / LII	-189	-533	182
Superior / LIII	-198	-532	169
Inferior / LI	-247	-344	39
Inferior / LII	-286	-426	48
Inferior / LIII	-228	-332	46

Na Figura 61 estão plotados os gráficos com os valores das tensões residuais também na pista de rolagem, onde essas tensões residuais mostraram-se predominantemente compressivas antes e após o ensaio.

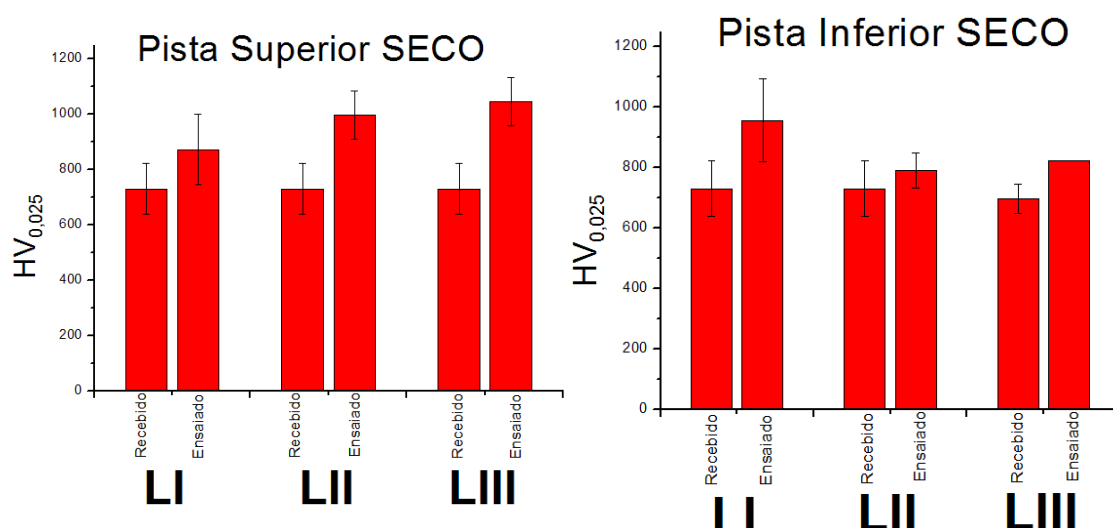
Figura 61 – Gráfico com valores (MPa) das medidas de tensões residuais para a condição SECO na condição recebida e após 106 ciclos nas regiões LI, LII e LIII.



É observado que o incremento das tensões residuais foi bem maior na pista de rolagem superior do que na pista inferior evidenciando regimes de fenômenos diferentes durante o ensaio. Também é percebido que em relação ao ensaio com contato não conforme as porcentagens de incremento também sofreram uma mudança maior. Esse comportamento possivelmente se deve ao nível de tensões residuais iniciais. Sugerindo que quanto mais alto o valor, menor será a capacidade de a tensão residual sofrer mudanças. Plotados os valores nos gráficos, a visualização dos incrementos das tensões é mais nítido, demonstrando que houve um comportamento semelhante entre as regiões antes e após o ensaio.

As medidas de microdureza Vickers estão dispostas nos gráficos apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Gráfico com valores das medidas de microdureza Vickers.



As medidas de microdureza para os ensaios de contato conforme também analisados pela ANOVA a um nível de 95% de confiança, com auxílio do software *Statgraphics*[®]. Os resultados apresentaram um incremento significativo nos valores após o ensaio em todas as regiões analisadas da pista superior e apenas na região LI da pista inferior sugerindo a presença de uma camada superficial que possivelmente sofreu uma alteração na microestrutura da mesma forma que aconteceu com a pista inferior do ensaio com contato não conforme.

4.3.2 Ensaio contato conforme Lubrificado

Na Figura 63 estão os registros fotográficos após o ensaio, chamando a atenção para a coloração do óleo que sugere uma degradação devido às condições de ensaio. A temperatura máxima registrada durante o ensaio no corpo de prova foi de aproximadamente 43°C. No regime de lubrificação limítrofe, o filme de óleo lubrificante não preenche todas as asperezas. Na trilha de rolagem da pista as ranhuras têm picos de rugosidades variáveis fazendo com que exista a presença de atrito sólido entre as asperezas. A partir da análise, sabe-se que os picos das temperaturas de contato das asperezas podem ocorrer com temperatura local maior que a da superfície, mensurada pelo termopar (SOOM, 2001). É observado que ao final do ensaio houve uma diferença na distribuição do óleo lubrificante na pista inferior. Na região LI ficou retida um aglomerado de lubrificante aludindo uma melhor lubrificação, na região LII encontramos uma camada mais fina e na região LIII com ainda menos lubrificante. No corpo de prova superior a distribuição do óleo lubrificante pareceu homogênea e com menor quantidade de lubrificante.

Figura 63 – Registro fotográfico após o ensaio lubrificado (SAE 40)



Assim como no ensaio a seco, os corpos de prova foram limpos no banho ultrassônico e foram verificadas suas massas que estão dispostas na Tabela 11.

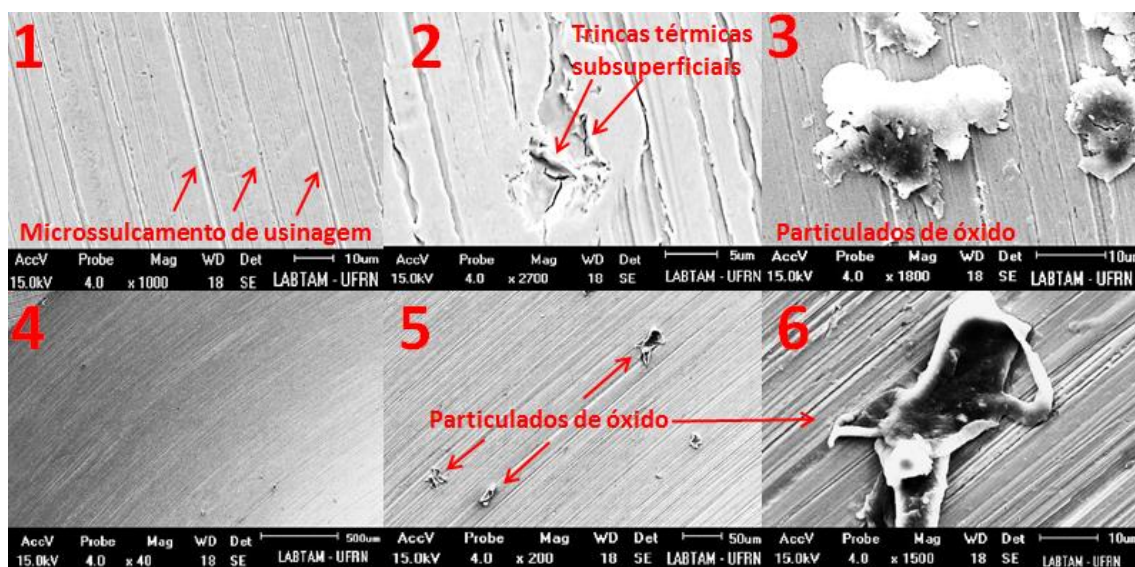
Tabela 11 – Valores das massas dos corpos de prova e referentes à perda.

Ensaio com SAE 40	Pista Superior	Pista Inferior
Massa Antes (g)	6,6537	6,3427
Massa Depois (g)	6,6536	6,3422
Perda mássica (%)	0,0010	0,0070

Os dados evidenciaram uma perda mínima $<0,01\%$ confirmando que o óleo lubrificante desempenhou um papel fundamental na proteção das superfícies em estudo, quando comparado com o ensaio sem lubrificante.

A morfologia da superfície registrada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura indica uma menor agressividade nos danos causados pelos ensaios. (Figura 64)

Figura 64 – Imagens obtidas por MEV da morfologia da superfície dos CPs.



Nas imagens 1 2 e 3 da Figura 64 são observadas as características referentes à pista superior, e nas imagens 4, 5 e 6 referentes à pista inferior. Para ambas as pistas, foram evidenciadas deformações plásticas nas ranhuras da usinagem e não foi observada a formação da extensa e homogênea camada de óxido vista no ensaio não lubrificado. Na Figura 64 (1) é observada a largura da trilha formada pelo movimento de rolamento das esferas. A imagem (2) da Figura 64 demonstra a presença de estrias causadas pelos ciclos de contato. Na imagem (3) são visualizadas trincas térmicas subsuperficiais. Essas trincas nucleiam devido à formação de uma camada cerâmica com baixa ductilidade, que com o passar dos ciclos de contato, irão promover o aquecimento localizado. O metal da subsuperfície consegue absorver a deformação causada pela temperatura e pela pressão de contato, conseqüentemente ocorrendo o trincamento na interface metal-cerâmica (MEDEIROS, 2002). Nas imagens (4, 5 e 6) é possível visualizar particulados >20 μm que se desprenderam da matriz sugerindo um desgaste severo (LIMA, 2010).

A Tabela 12 contém resultados medidos das tensões residuais nas pistas de rolagem e na Figura 65 estão plotados os gráficos com os valores das tensões residuais.

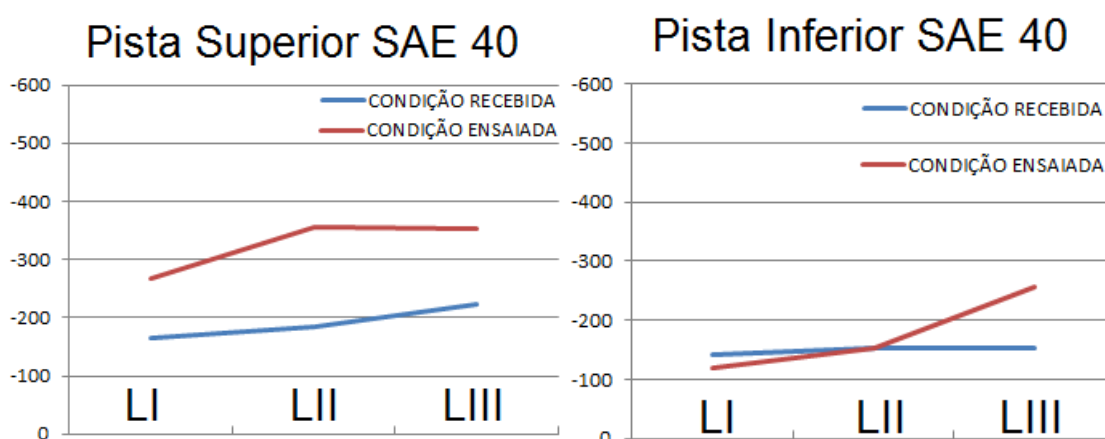
Tabela 12 – Valores (MPa) das medidas de tensões residuais e a porcentagem de incremento

Pista / Posição	Cond. Recebida	10 ⁶ Ciclos	Incremento (%)
-----------------	----------------	------------------------	----------------

Superior / LI	-164	-267	62
Superior / LII	-185	-356	92
Superior / LIII	-222	-353	59
Inferior / LI	-142	-119	-16
Inferior / LII	-154	-154	0
Inferior / LIII	-153	-257	67

Os valores das tensões residuais apresentaram-se em sua totalidade o caráter compressivo antes e após o ensaio. É notado que a porcentagem incremento das tensões residuais foi maior na pista de rolagem superior do que na pista inferior corroborando o comportamento do ensaio a seco.

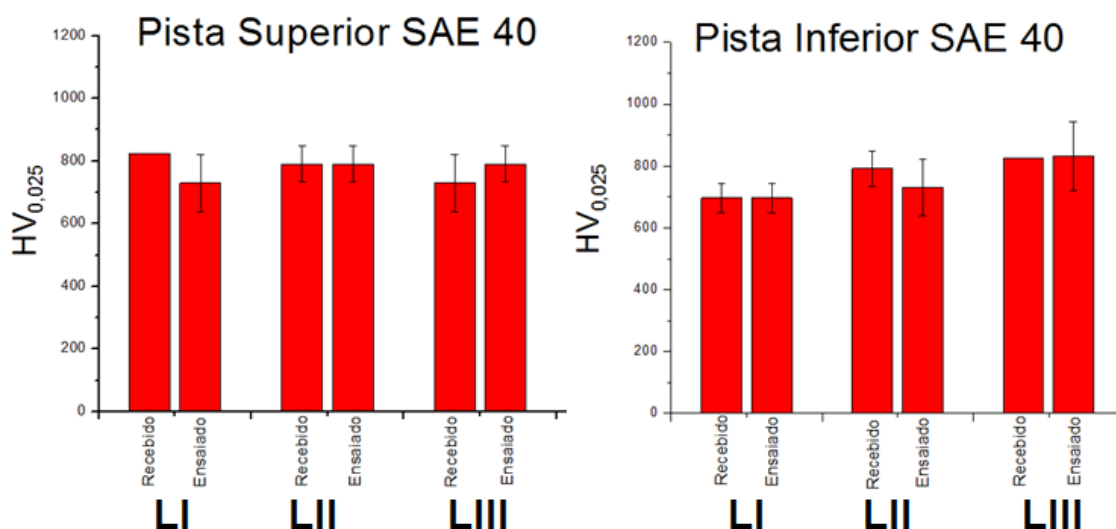
Figura 65 – Gráfico com valores (MPa) das medidas de tensões residuais para a condição LUBRIFICADO na condição recebida e após 106 ciclos nas regiões LI, LII e LIII.



Os resultados das tensões residuais mostram que para a pista superior houve o aumento nas tensões residuais compressivas em todas as regiões, e na pista inferior, apenas na região LIII, aparentemente a região com menor lubrificação. Na Figura 65 destaca-se a pista inferior pela heterogeneidade no incremento das tensões residuais de acordo com as regiões. Na pista superior o comportamento das porcentagens de incremento mostrou-se homogêneo e crescente. Para as configurações do ensaio, pista superior está sujeita à ação da gravidade, fazendo com que o óleo lubrificante tenha a tendência a escoar para a pista inferior, conferindo a ela uma lubrificação mais eficiente. (Figura 65)

As medidas de microdureza Vickers para as pistas ensaiadas com lubrificante estão dispostas nos gráficos apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Gráfico com valores das medidas de microdureza Vickers.

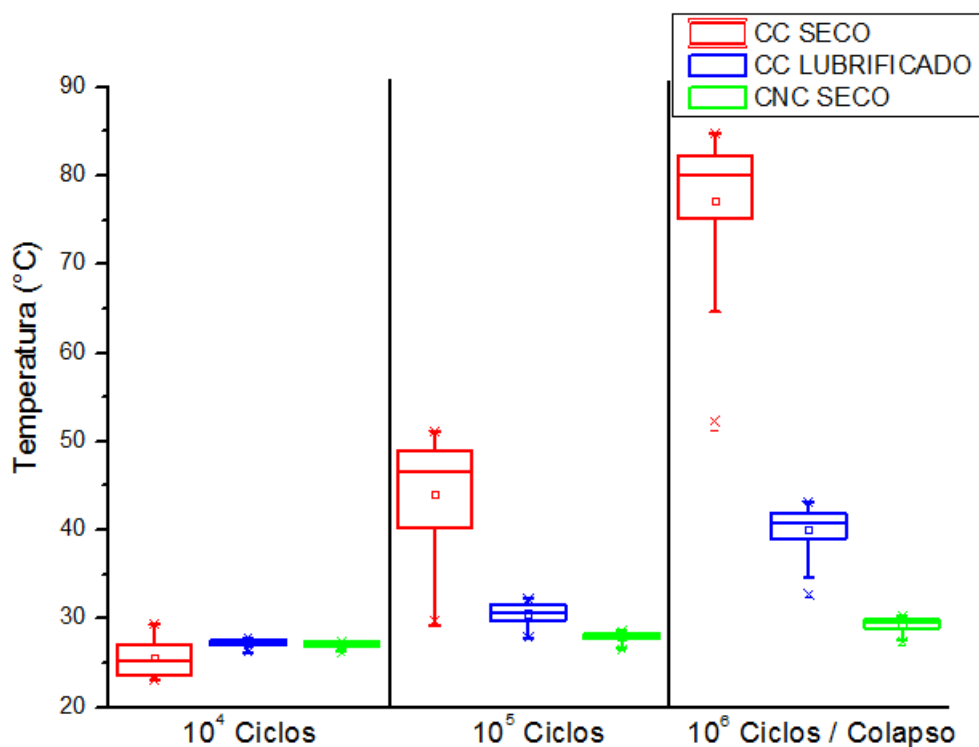


As medidas de microdureza para o ensaio lubrificado não apresentaram mudanças significativas em seus valores. Indicando que não houve nenhuma mudança microestrutural significativa na superfície. Diferentemente do que ocorreu nos ensaios realizados sem lubrificação.

4.4 Análise da Temperatura

A história térmica dos ensaios, mostrados na Figura 67, corroboram com a evolução do desgaste, indicando que para o ensaio de contato conforme a seco (CC SECO), houve um aumento na taxa de aquecimento e temperatura em relação ao ensaio com contato conforme lubrificado (CC LUBRIFICADO).

Figura 67– História térmica dos ensaios com contato conforme seco (CC SECO), lubrificado (CC LUBRIFICADO) e com contato não conforme seco (CNC SECO).

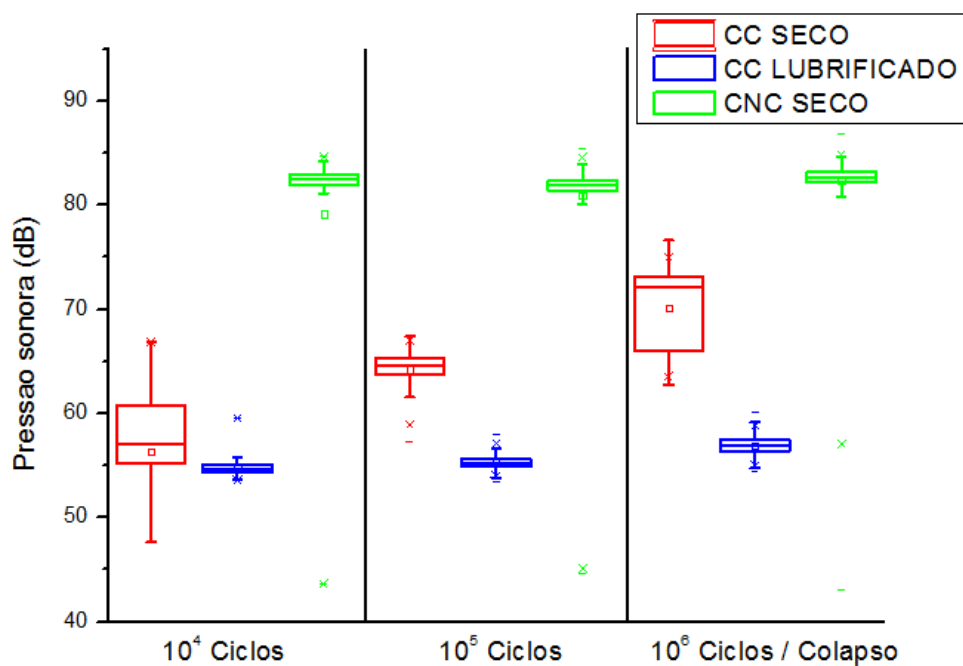


No ensaio com contato não conforme a seco (CNC SECO) a história térmica não foi representativa devido ao mau posicionamento do sensor, pois a ponta do termopar não estava em contato com a pista.

4.5 Análise do Nível de Pressão Sonora (NPS)

De acordo com Medeiros (2002), é possível acompanhar a evolução do desgaste pelo som emitido pelas irreversibilidades do contato cíclico de rolamento. Os níveis de pressão sonora dos ensaios, observados na Figura 68, legitimam a evolução do desgaste, indicando que para o ensaio de contato conforme a seco (CC SECO) os valores tiveram maior dispersão e apresentaram seus valores médios maiores do que os valores do ensaio com contato conforme lubrificado (CC LUBRIFICADO).

Figura 68 - Níveis de pressão sonora dos ensaios com contato conforme seco (CC SECO), lubrificado (CC LUBRIFICADO) e com contato não conforme seco (CNC SECO).

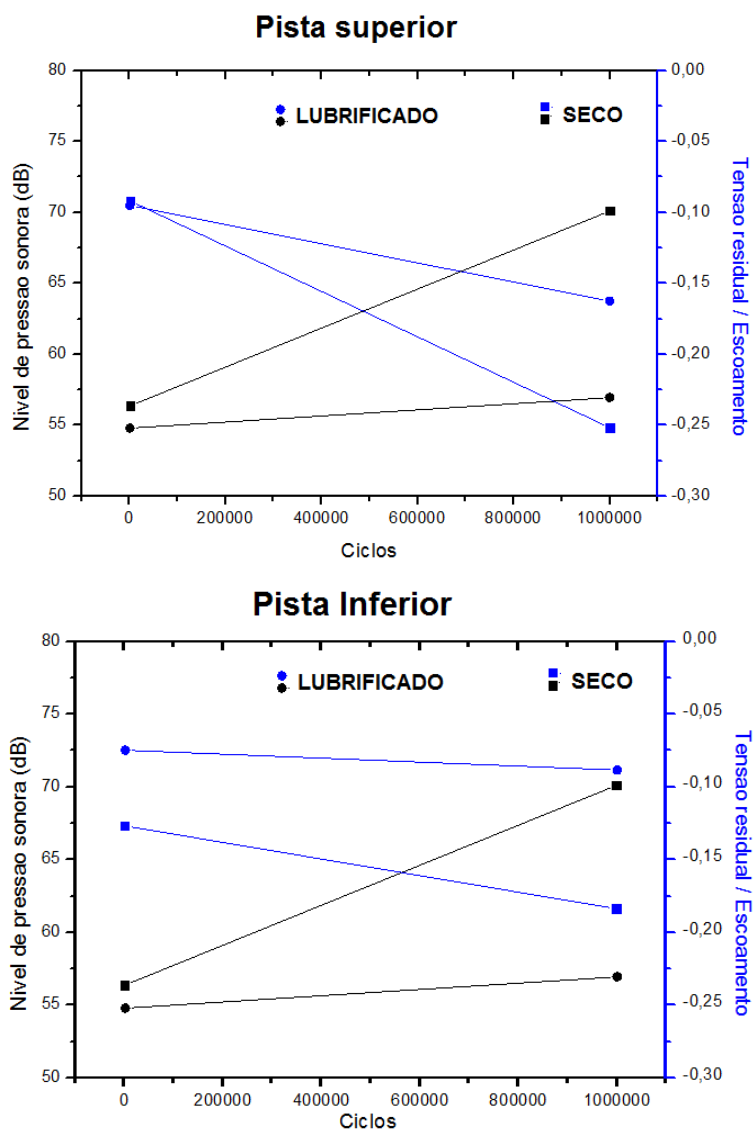


Os níveis de pressão sonora no ensaio com contato não conforme a seco (CNC SECO) não representaram as irreversibilidades da evolução do contato devido o desbalanceamento e desalinhamento da bancada fazendo com que seus efeitos interferissem nas medidas reais do ensaio. Apresentando dessa forma valores elevados (aproximadamente 85 dB, limite que não danifica o aparelho auditivo humano) e aproximadamente constantes durante todo o ensaio.

4.5.1 Evolução das tensões residuais e do Nível de pressão sonora

Para relacionar os valores de tensão residual e pressão sonora foram feitas as médias das três regiões dos corpos de prova (LI, LII e LIII) para a tensão residual. Para o nível de pressão sonora os valores usados foram as médias dos 60 segundos (10⁴ ciclos) iniciais e finais.

Figura 69 – Evolução do nível de pressão sonora [dB] e da tensão residual com a distância de rolamento quantidade de ciclos para os ensaios seco e lubrificado das duas pistas inferior e superior.



A relação entre o incremento da pressão sonora e a tensão residual para os ensaios com contato conforme seco e lubrificado, descrita na Figura 69, evidenciam a relação existente entre o método de monitoramento não destrutivo e a tensão residual. Observa-se que no sistema lubrificado o coeficiente angular da relação entre a tensão residual e a tensão de escoamento (eixo Y azul) é menor do que para o sistema ensaiado a seco sinalizando uma menor taxa de desgaste

5. CONCLUSÃO

- As adaptações da bancada se mostraram eficazes para o ensaio de contato cíclico por rolamento
- As porcentagens de incremento das tensões residuais foram desprezíveis para ensaios lubrificados nas duas pressões de contato estudadas. Com a ressalva que o material que apresenta altos níveis de tensões residuais são menos susceptíveis a mudar o estado de tensão que os que apresentam tensões residuais com níveis mais baixos e a superfície precisa estar adequadamente lubrificada;
- A tensão residual estudada no presente trabalho é influenciada pelo gradiente de deformação plástica gerado pelo ensaio. A deformação plástica é resultado de deslocamentos de discordância fazendo com que ocorra a distorção no retículo cristalino do material. Então o grau de encruamento do material torna-se mais difícil na medida em que o material já tenha sofrido alguma deformação plástica.
- De acordo com os resultados mostrados não houve correlação direta entre a microdureza e as medidas de tensão residual. É necessário parâmetros específicos para que a correlação exista.
- A metodologia desenvolvida no presente trabalho para analisar as tensões residuais permitiu obter medidas representativas nas quais foram possíveis correlacioná-las com o desgaste e o nível de pressão sonora.
- A metodologia usada para relacionar o nível de pressão sonora demonstrou ser eficaz à evolução do desgaste em contatos cíclicos seco e lubrificado.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. ASTM E915: Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement: ASTM, 2010. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. ASTM E1426: Standard Test Method for Determining the Effective Elastic Parameter for X-Ray Diffraction Measurement of Residual Stress: ASTM, 1998 (Reapproved 2009). 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. ASTM E915: Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels : ASTM, 2012. 18 p.

ALTENBERGER, I, Dr.-Ing Thesis University GH Kassel, (2000)

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1992, **ASM Handbook** Vol. 18, Friction, Lubrification and Wear Technology, Glossary Terms p. 1847

ASHBY, M. F. **Materials Selection in mechanical Design**.2. Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 502p

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook. Principles of Tribology**. United States: CRC press LLC.Vol. 1, 2001.

CAMPANHA, M. V.; **Estudos Sobre a Vida Útil de Rolamento Fixos de uma carreira de esferas**. 2008. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo .São Paulo. 2002.

COTO, B., NAVAS, V. G., GONZALO O., ARANZABE, A., SANZ, C., **“Influences of turning parameter in surface residual stresses in AISI 4340 steel”** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 9–12, pp. 911–919, 2011.

CULLITY, B. D.; **Elements of X-Ray Diffraction**. 2nd Ed. Addison-Wesley Publishing Company Inc. Reading, MA, 1978

FITZPATRICK, M. E.; Fry, A. T.; Holdway, P.; Kandil, F. A.; Shackleton, J. and Suominen, L. **Determination of residual stresses by X-ray diffraction**, N°52, National Physical Laboratory, Teddington, UK. 2005.

GAHR, Karl-Heinz Zum. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series, v10. Amsterdam: Elsevier, 1987. p.560

GUROVA, T.; QUARANTA, F.; ESTEFEN, S. **Monitoramento do estado das tensões residuais durante a fabricação de navios**. In: 21 Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore 27.11-01.12.2006, p.1-9, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

HERSEY, M.D., **Theory and Research in Lubrication**. 1th ed. John Wiley & Sons, Inc., 1966.

HOOPE, R. A.; **Avaliação da Vida em Fadiga de Ganchos**. 2002. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2002.

HUTCHINGS, I.M. – **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, Edward Arnold, UK, 1992;

JAMES, M.R.; LU, J. INTRODUCTION. IN: LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**; Society for Experimental Mechanics; Fairmont Press; cap. 1; dez. 1996.

JAUREGI, A. L; ULACIA, I; ESNAOLA, J. A; UGARTE, D; TORCA, I. **Procedure to Predict Residual Stress Pattern In Spray Transfer Multipass Welding**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, In Press, 5 October 2014) 13p

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

JOST, H.P. – **Tribology - Origin and Future**, *Wear* (136), 1990, pp.1-17

JOUINI, N; REVEL, P; MAZERAN, P. E; BIGERELLE, M. **“The Ability of Precision Hard Turning to Increase Rolling Contact Fatigue Life”** Tribology International 59 (2013) 141–146.

LIMA, E. C. C; **Mecanismos de Desgaste, História Térmica e Ciclo de Vida de Componentes de um Motor de Combustão Interna de Aeromodelo.** 2010. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010.

LOHE, D.; LANG, K. H.; VOHRINGER, O.; **Residual Stress and Fatigue Behavior Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.** ASM International, Germany, 2002 p27-53.

LU, J. - **Handbook on Measurement of Residual Stresses**, Vol. 1 - SEM - Society for Experimental Mechanics, TheFairmont Press, Lilburn, GA, USA, 1996.

LU, J., **Handbook of Measurements of Residual Stress**, Vol. 2, Ed. SEM, 2ed. 2005, 417p

LU, J. “Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress problem”. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.** ASM International, Ohio, 2002, p11.

MARCOMINI, J. B. **“Caracterização da Nova Liga Fe-C-Mn-Si-Cr: Fragilização da Martensita Revenida e Curvas de Revenimento”.** 2012. 180p. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica em São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais São Paulo, 2012

MARQUEZE, C. M., **“Análise por Ultrassom da Textura dos Materiais e Tensões Residuais em Juntas Soldadas”** Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, 2002

MARTINS, C. O. D; ROCHA, A. S; STROHAECKER, T. R; HIRSCH, T. K. **Análise das Tensões Residuais Em Anéis para Rolamentos do Aço ABNT**

52100 Através do Método do Furo Cego - Estudos Tecnológicos – Vol.1
nº2:39-47. Dezembro de 2005

MEDEIROS, J.T.N. – **Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaio a seco de rolamento cíclico**; Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica em São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia, 2002. 2 Vol.;

MELO, A. P. B, **Avaliação de Tensões Residuais na Operação de Cunhagem em um Componente Automotivo Estampado**. 2014. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 03 de fevereiro de 2014.

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. 74p. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica em São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica São Paulo, 2006.

NORCINO, A. B, **Uma Contribuição ao Estudo das Tensões Residuais No Fresamento**. 2013. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, 21 de agosto de 2013.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. Ed. Bookmam, Porto Alegre-RS, 2ª Ed. p. 931, 2004.

NOYAN, I. C., COHEN, J. B “**Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation**”, Springer-Verlag, 276p, 1987

NUNES, R. M. **Análise de Tensões Residuais no Processo de Trefilação Combinada do Aço AISI 1048 Visando Minimizar Distorções Pós Processamento**. 2008. 124p. (Dissertação de Mestrado) –Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, 2008.

OLIVEIRA, J.C.P.T; **Evolução da microestrutura e da textura durante a laminação a frio e a recristalização de alumínio com diferentes níveis de**

pureza, 2009. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

QUINN, T. F. J; **Review of Oxidational Wear**. Part II: *Recent Developments and Future Trends in Oxidational Wear Research*. Tribology International, p. 305 – 315, 1983

RAMESH, A; MELKOTE, S. N; ALLARD, L. F; RIESTER, L; WATKINS, T. R. **“Analysis of White Layers Formed in Hard Turning of AISI 52100 Steel”** Materials Science and Engineering A 390, p. 88.

RODRIGUES, L. D. **Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados**. 2007. 155p. (Dissertação de Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

ROSSINI, N. S., DASSITI M., BENYOUNIS K. Y., OLABI, A.G. **Methods of Measuring Residual Stresses in Components**. Materials and Design, 35, 572-588. (2011)

SAKAKIBARA, T; SATO, Y. **“Non Linear 2θ - $\sin^2\psi$ Diagram by Shot Peening on Spring Steel”** *Powder Diffraction*, Vol. 20 (2), pp. 117-120 (2005)

SANTOS, C. E. R. **Avaliação Comparativa da Resistência à Fadiga de Contato para um aço Ferramenta com Microestruturas Martensíticas e Bainíticas**. 2012. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

SCURACCHIO, B. G. **“Tensões Residuais Induzidas por Shot-Peening e Durabilidade de Molas em Lamina”**. 2012. 113p. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica em São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais São Paulo, 2012.

SILVA, P. R. T. **“Análise do Comportamento em Fadiga do Aço SAE 52100 Sob Diferentes Condições Microestruturais”**. Tese (Doutorado em Engenharia) UFRGS, Porto Alegre, 2001.

SOARES, C. A. C. **“Avaliação dos defeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego”**. 2003, 116p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

SOARES, M. C. B. V., **“Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas”**. 1998, Tese (Doutorado em Ciências na área de reatores nucleares de potência e tecnologia do combustível nuclear) IPEN-USP, São Paulo, 1998.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS INTERNATIONAL – SAE. HS-784: Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction: SAE, 2003. 85 p.

SOOM, A; SERPE, C. I; DARGUSH, G. F. **“Thermomechanics of Sliding Contact. Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro and Micro/Nanoscales.”** *NATO science series. II. Mathematics, physics and chemistry*, vol. 10. Dordrecht: Kluwer; 2001 p. 467–85.

SOUSA, D. A., **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por Meio de Ensaio de Dureza**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del- Rei, São João Del-Rei. 2012

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W. **Tribology Engineering**. Elsevier Butterworth Heinemann. (2005)

STROHAECKER, T. R; MARTINS, C. O. D; ROCHA, A. S; HIRSCH, T. K. **Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100**. *Revista Matéria*, v. 9, n. 1, pp. 20-28

TABOR, D. - **Friction Mechanisms, Effect of Lubricants**. In: **Neale, M.J. - Tribology Handbook**. Butterworths, London, v.1. p.185. 1973.

TODINOV, M. T., **Influence of some parameters on the residual stresses from quenching**. *Modelling Simul. Materials and Science Eng.* (1999), pp. 25-41.

TRINDADE, N. M. X., “**Medição do Atrito de Escorregamento Através da Energia Dissipada em Sistemas Vibratórios**”. 2011. 49p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Projecto Mecânico) – Universidade de Coimbra, Coimbra. 2011

VALDEZ, C.E.S. “**Avaliação através da inspeção magnética da condição superficial de anéis de rolamento de aço DIN 100 Cr6 após torneamento duro a seco**”. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

WITHERSH, P. J., BHADSHIA, K. D. H. “**Overview - Residual Stress part 1 – Measurement Techniques**” Materials Science and Technology, Vol17, 366–375, 2001.

YANG, F; JIANG, J. Q.; FANG, F; WANG, Y. MA, C. “**Rapid determination of Residual Stress Profiles in Ferrite Phase of Cold-Drawn Wire by XRD and Layer Removal Technique**” Materials Science and Engineering A, Vol. 486, 2008, pp. 455–460.

ZHANG, H. W; OHSAKI, S; MITAO, S; OHNUMA, M; HONO, K. “**Microstructural Investigation of White Etching Layer on Perlite Steel Rail**” Materials Science and Engineering A, vol. 421, no. 1-2, pp. 191–199