

JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS

**FADIGA DE CONTATO
DE DISCOS METÁLICOS NÃO-CONFORMES
SUBMETIDOS A ENSAIOS A SECO
DE ROLAMENTO CÍCLICO**

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

v. 1

**CONSULTA
FT-1710
v.1**

**SÃO PAULO
2002**

JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS

**FADIGA DE CONTATO
DE DISCOS METÁLICOS NÃO-CONFORMES
SUBMETIDOS A ENSAIOS A SECO
DE ROLAMENTO CÍCLICO**

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

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Titular
Dr. Deniol Katsuki Tanaka**

v. 1

**SÃO PAULO
2002**

“Hoje, que o comércio e a indústria fazem estimar o dinheiro, se não dermos estímulos de emulação aos talentos, serão estes deslocados pelo gosto da cobiça. Haverá egoísmo e corrupção; mas corrupção sem cultura do espírito, que é o último grau de vileza em que pode cair a espécie humana”.

ANDRADA E SILVA^(*), José Bonifácio de [1763-1838] *Projetos para o Brasil*. São Paulo, Companhia das Letras, 1998. p. 197. Organizado por Miriam Dolhnikoff.

(*) Primeiro Metalurgista brasileiro. Mais de cem trabalhos publicados no exterior. Advogado (Universidade de Coimbra, 1783). Poliglota (dominava seis idiomas, do latim ao grego). Frequentou curso de Mineralogia e Química (Paris, 1791) e se formou em Minas, Metalurgia, Mineralogia, Orictognosia e Geognosia (Freiburg, 1794). Fez estudos, visitou minas na Áustria, Alemanha, Itália, Suécia, Dinamarca e Portugal, publicando-os em vários periódicos. *Primeiro professor, admitido por concurso (1801), da disciplina Metalurgia, no curso de Filosofia da Universidade de Coimbra*. Ingressou (1808) no Corpo Voluntário Acadêmico, para lutar contra os franceses e foi promovido a tenente-coronel. Retornou à cátedra, assumiu várias funções e se tornou secretário da Academia de Ciências de Lisboa. Recebeu autorização para retornar ao Brasil (1819) e fez estudos mineralógicos no interior de São Paulo. Foi convocado e entrou na política, tomando-se vice-presidente da Junta Provisória da Província de São Paulo (1821) e a seguir, ministro. Demitiu-se, foi preso e expulso para a França (1823). No retorno (1829) ao Brasil, sua esposa faleceu no navio. Foi indicado (1831) pelo imperador Pedro I, que se retirava do Brasil, para ser tutor de Pedro II, de onde foi afastado, em 1833, e recolhido à prisão domiciliar na ilha de Paquetá, julgado à revelia e, em 1835, absolvido do crime de *“conspiração e levante armado contra o governo”*. Faleceu em Paquetá, em 1838, aos 75 anos.

(Nos meus livros de História do Brasil, do curso primário nos anos sessenta, em Taperoá-Pb, aprendi haver sido José Bonifácio o “Patriarca da Independência”. Foi na Universidade de Coimbra, em 2001, por convite e insistência do estimado tribologista e professor Amílcar Ramalho, que assisti a uma brilhante palestra sobre “Duzentos anos do ensino de Metalurgia em Portugal” que, na prática, foi um relato da obra de José Bonifácio. Só então eu aprendi a admirar a sua obra e entendi porque os portugueses o cultuam e o homenagearam durante o First International Materials Symposium.)

Solidarizo-me a José Bonifácio e a todos os que tiveram, ou têm, a sua contribuição efetiva à Humanidade não reconhecida, ceifada ou perseguida por sentimentos, atitudes ou posturas minúsculas.

“A invenção da roda freqüentemente é apregoada como a mais louvável realização da civilização... Rodas são úteis somente num mundo com estradas e trilhos. Atolam em qualquer terreno mole, escorregadio, íngreme ou irregular. As pernas são melhores. As rodas precisam rolar sobre uma superfície contínua de apoio, mas as pernas podem ser colocadas em uma série de bases de apoio diferentes, sendo a escada um exemplo extremo... Mas as pernas têm um preço alto: o software para controlá-las...”

STEVEN PINKER(*) [1997] *Como a mente funciona*. São Paulo, Companhia das Letras, p. 20-1.

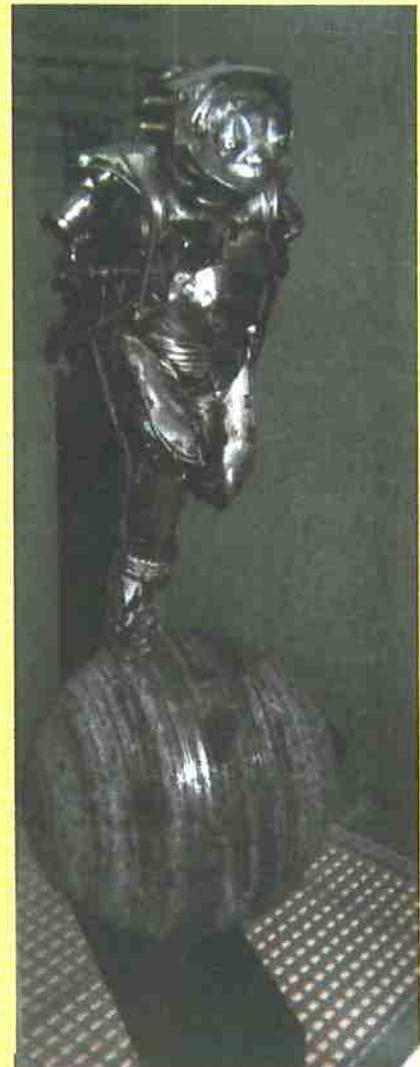
*Diretor do Centro de NeuroCiência do MIT, USA

Transporte, Mobilidade, Movimento –
Tema do pavilhão francês na Expo 2000,
em Hannover, Alemanha, idealizado a
partir da reprodução - à direita - de uma
fotografia feita em 1888 intitulada

“O homem correndo”

“A partir da visualização de seqüências de
movimentos simples dessa foto, pelo
fotógrafo Etienne Jules Marey, chegou-se à
invenção do cinema.”

Das EXPO-Buch: EXPO2000 – *Hannover*.
Offizieller Katalog zur EXPO2000. Gütersloh,
Bertelsmann Event Media, 2000. 528 p.



DEDICATÓRIA

Aos dez anos, primogênita de uma família de seis irmãos, a minha mãe ficou órfã do seu pai, o meu querido avô Josué. Morava em um sítio, em plena caatinga, convivendo com a aridez dos sertões. Esse palco, mais agressivo e exterminador de vidas que a violência urbana dos dias atuais em São Paulo e Rio de Janeiro, jamais foi tratado pela via apropriada, a da Educação para a competência.

Na cabeça daquela adolescentezinha, uma mensagem paterna lhe martelava o cérebro: -“a única chance de vida da nossa família é através da Educação, minha filha. Não se esqueça disto.”

Foi à luta e jamais se dobrou a quaisquer óbices, ante os inúmeros que transpôs, trabalhando e estudando. Por seu exemplo, atitudes e beleza interior, conquistou meu pai e, com ele, semeou o seu amor, a sua determinação e o exemplo de trabalho contínuo à família. Instituiu paradigma de vida aos alunos, ignora a fadiga e sua energia interior tem superado todas as irreversibilidades.

Oh mãe e guerreira querida, Edi, pérola que enobrece a raça humana, a ti ofereço o fruto do meu trabalho, um nada ante o tudo que nos deste, ao meu pai, a mim e aos meus irmãos estimados, Conceição, Hamurabi e Expedito.

É a essa família de trabalhadores que dedico esta Tese.

AGRADECIMENTOS

Aos que contribuíram direta e indiretamente para a concretização desta investigação e fazem do trabalho cotidiano o seu desafio de vida e o seu compromisso de edificar uma Nação brasileira sólida, ética e que não se desmancha no ar;

Ao apoio, compreensão e confiança recebidos das comunidades que integram a **UFRN** e a **CAPES**, possibilitando-me a viabilização do programa de doutorado;

Ao Prof. Dr. Deniol Katsuki **Tanaka** (LFS), por sua orientação, comprometimento institucional, postura científica e amizade fraternal na convivência fundamentada no respeito mútuo e nas discussões em Engenharia, Ciências, Humanidades e Artes;

A **Margareth** e Prof. Dr. **Amilton** Sinatora (LFS), pela amizade, consideração, discussões, e apoio;

Ao Prof. Dr. Roberto **Martins** de Souza (LFS) e aos colegas Mestres Luis **Gallego** Martinez (IPEN) e **Wanderson** Santana da Silva (PMT) pelos ensinamentos, amizade, discussões e trabalhos conjuntos;

Aos Professores Doutores **Carlos** Rafael Figueroa Hernández e Francisco **Urbano** Hernandez Ordoñez, do Instituto Superior Politécnico ISPJAE – Havana - Cuba, pelas sugestões, discussões técnico-científicas e ontológicas;

Aos amigos **Neuza** e Prof. Dr. **Samuel** Washington Célere (*in memoriam*), da EESC-USP, pela orientação e por haverem se integrado à nossa família há duas décadas;

Aos Professores Dr. **Rosalvo** Tiago Ruffino, MSc. José Roberto **Gambarini**; Dr. João **Lirani**, Dr. Mário **Pinotti** Jr., Dr. **Mário** Mucheroni, Dr. **João** Fernando Gomes de Oliveira, Dr. **Benedito** di Giácomo, Dr. **Artur** José Vieira Porto, Dr. Geraldo **Lombardi**, Dr. **Antonio** Moreira dos Santos e MSc. **Luis** Augusto Martin Gonçalves, pelos ensinamentos, consideração, apoio e discussões formalizadas na EESC-USP;

Aos tribologistas e Professores Doutores Benedito de Moraes **Purquério** (EESC-USP), **Amilcar** Ramalho (FEM - Universidade de Coimbra), **Jorge** Oliveira **Seabra** e **Luis** Andrade **Ferreira** (FE – Universidade do Porto) e **Daniel** Nélias (LMC-INSA-Lyon, França), pela acolhida, ensinamentos, estímulo e/ou bibliografia repassada;

Ao Eng. **Alex** Oraggio, pela contribuição no processo de aquisição e tratamento de dados dos termopares da máquina de ciclagem térmica;

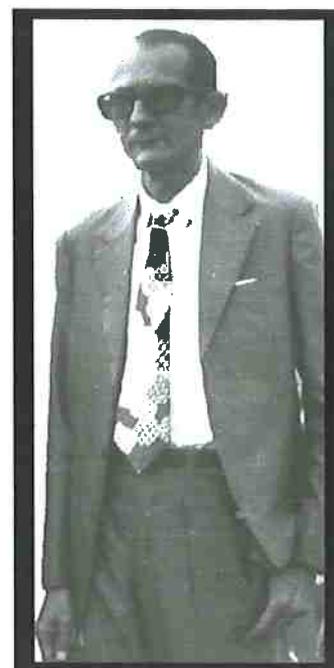
Ao Prof. Dr. **José** Maria Campos dos Santos (DMC-FEM-UNICAMP) pelas discussões e suporte logística bancada de aferição do decibelímetro;

Aos doutores engenheiros da divisão de Metalurgia do IPT, Eduardo **Albertin** e **Mário** Bocalini Jr. e à técnica **Alzira** Correa (IPT), sempre solidários e partícipes;

Ao apoio, ensinamentos e estímulos recebidos dos Professores Doutores **Linilson** Padovese (PME-EPUSP), **Hélio** Goldenstein e **André** Tschiptschin (PMT-EPUSP), **Gilmar** Batalha, **Gilberto** Martha de Souza e **Edison** Gonçalves (PMC-EPUSP), **Francisco Ambrozio** Filho, **Nelson** Batista de Lima, **Odília**, **Marilena** e **Baby** (IPEN);
Aos técnicos **Francisco** José da Silva Neto, **Maria de Fátima** Ferreira Neto e **Leandro**, A. da Silva, pelo apoio metalurgista, muitas vezes extrapolando seus expedientes;
Ao corpo técnico da Oficina Mecânica da EPUSP, **Alceu** Gomes da Silva, **José César**, **Cícero** Cruz, **Edson** Tu Li, **Fidel** de Paula, **Laércio** e **Paulão**; da Mecatrônica, **Adilson** Félix, **Fernando** Maiorquin e **Gilberto** Garcia; da Térmica, **Ademir**, **José Guilherme** Campetela e **Wilson**; do setor de reprografia, **Márcio**, **Nélson** e **Pena**;
Aos amigos do LFS, **Adelci** Oliveira, **Alexandre** Martins, **Andréia** Ranzan, **Carlos** Henrique da Silva, **Carlos Monese**, **Daniel**, **Efrain** Pantaleón, **Felipe** Bernardes, **Giuseppe** Pintaúde, **Joviano** Oliveira Santos, **Leandro** Justino de Paula, **Márcia** Maru, **Maria** Cristina More Farias, **Márcio** Cuppari, **Márco** Matos, **P. Ferrari**, **Paulo** Ferrer, **Relbis** Valera, **Silene** e **Sidney** Carneiro e **Vanderlei** Ferreira, pelas discussões e apoio;
Ao Engenheiro **Ricardo Cumino** e família, da INA-Sorocaba, pela amizade, discussões e disponibilização dos recursos materiais e humanos dos setores metalográfico e metrológico da empresa, sempre solícitos e dedicados;
Ao Sr. **José M. Silvestre**, da Thyssen Aços Especiais, pelo fornecimento do aço AISI M2, importado da Alemanha;
Às bibliotecárias **Fátima** e **Elias** (PMN) e **Clélia** (PMT) e a **Luci**, da pós, pelo apoio;
Aos profissionais que nos cativaram pelo seu trabalho, Sr. **Paulo** (Tecluba/usinagem), Sr. **Cobra** (Pindamonha/usinagem), Sr. **Flávio** Nunes (retificação), Sr. **Domingos** (Fermaz/usinagem); Sr. **Marcos** (Tratamento térmico/Combustol);
Aos meus co-orientados de trabalho de final de curso da Engenharia Mecânica – EPUSP, **Akira** e **Fabiana**, pelo interesse, discussões e respostas aos problemas formulados;
À querida **Rosângela**, esposa e colega de doutorado, e aos nossos filhos **Érika**, **Étore** e **Telésforo Filho**, cujos acordes contagiaram o meu espírito, por todo o sempre;
Aos meus sogros **Medeiros** Lula e **Betinha** e familiares, e a **Terezinha**, cujos estímulos sempre foram generosos e importantes;
Às famílias de **Ademar** e **Goreth**, **Tito** e **Gorete**, **José** e **Valquíria**, **Pedro** e **Telma**, que mantiveram acesa a chama e o cheiro da nossa terra em solo paulista,

o nosso reconhecimento e gratidão.

*Pai, meu querido amigo, conselheiro de todas as horas,
a Você, o reconhecimento eterno de toda a família.
Pelo respeito e dedicação à coisa pública, coletiva, que você nos repassou.
Por sua retidão, seu senso de justiça, sua competência, sua humildade.
Por seu amor à família, sua dedicação ao trabalho por dias e noites a fio ...
Por nos haver legado o amor aos livros e ao conhecimento...
Por seu exemplo de uma vida despojada de vaidades.
Por sua aversão à mediocridade, à futilidade, à injustiça, à desonestidade.
Sua turma da Faculdade de Direito do Recife de 1945 fez Escola, pai.
Quantas vezes nos deparamos em casa, madrugada a dentro, eu pondo a matéria
da Escola Técnica ou da Faculdade em dia e você, dedicado, despachando
processos e mais processos em seu quarto, aconselhando-me a ir dormir um pouco,
para preservar minha saúde ...
Não foi em vão o seu exemplo de integridade, honradez
e senso de justiça à Magistratura do país que tanto amou.
Registro, neste trabalho de tese à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, mais que o meu amor filial,
nesta homenagem póstuma,
o muito obrigado de cada Engenheiro deste país que tem
fome e sede de justiça e que, no cotidiano do trabalho,
procura disseminar os ideais de justiça social e satisfação
das necessidades da população mais sofrida e injustiçada.
Honro a palavra empenhada: eis a Tese que me pediu
e que consumiu esses longos anos que me afastaram
do seu convívio, mas jamais de suas reflexões profundas.*



Juiz Moacyr Medeiros

RESUMO

MEDEIROS, J.T.N. *Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico*. São Paulo, 2002. 2v. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O desgaste por fadiga de contato de rolamento entre superfícies metálicas, importante ao desenvolvimento tecnológico, foi investigado em laboratório por ensaios em máquina disco-disco, associando-o ao número de ciclos (n) e a mecanismos cujas compreensão, sistematização e modelagem são complexas, envolvendo fenômenos não-lineares. A análise e avaliação desse desgaste em tempo real são dificultadas por sua ocorrência iniciar-se, geralmente, nas zonas Hertzianas em que o limite de escoamento local do material é superado pela tensão máxima de cisalhamento na subsuperfície das pistas de contato. Foi desenvolvido um conjunto de procedimentos de manufatura e ensaio dos discos, registrando-se medidas de velocidades (V) dos discos motor (primeiro corpo) e movido (antagonista), carga normal, variação mássica, monitoração termoacústica dos discos em contato e termo-higrométrica da sala especialmente isolada para a realização dos ensaios. Propôs-se uma metodologia eletroerosiva para extração de coroas circulares das pistas após serem ensaiadas, medição de tensões residuais (σ_R) na zona de contato das pistas de rolamento, por difração de raios-X (XRD), através da técnica de $\text{sen}^2\psi$ e determinação da relação entre a pressão máxima de Hertz, $[(p_o)_{\text{máx}}]$ e σ_R . Desenvolveu-se um procedimento de manufatura para usinagem simultânea de entalhe em grupos de quatro corpos-de-prova “chevron”, para estudo da tenacidade à fratura do material novo ou ensaiado, extraído dos discos, além de se propor um ensaio de “duplo chevron”, para análise de rigidez e propagação de trincas. Utilizou-se o teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para comparação entre duas distribuições de janelas temporais do sinal do nível de pressão sonora (NPS [dB]) para níveis semelhantes e crescentes de energia elástica de vibração do sistema, investigando-se a sua sensibilidade. A aferição dos sistemas de medição da temperatura (T) de contato, por pirômetro óptico, e do NPS [dB] dos sólidos em rolamento cíclico, por meio de decibelímetro, quantificou erros experimentais. Identificaram-se e discutiram-se os principais mecanismos de dano em corpos rolantes, que mostraram associação com o parâmetro de desgaste de rolamento, RW , definido como uma função logarítmica da razão entre a energia de entrada $\{f[(p_o)_{\text{máx}}, V]\}$ no par tribológico e a energia de saída, $[f(T, \text{NPS}, n)]$ compondo o *mapa RW* de desgaste por rolamento cíclico.

ABSTRACT

MEDEIROS, J.T.N. *Contact fatigue of nonconformal metallic discs submitted to dry cyclic rolling tests.* São Paulo, 2002. 2v. Doctoral thesis. Polytechnic School of the University of São Paulo.

The rolling contact fatigue wear between metallic surfaces, valuable for technological development, was investigated. The disc-disc testing results were associated to the number of cycles (n) and damage mechanisms, which understanding, systematization and modeling are complex, involving non-linear phenomena. The real time wear analysis and its evaluation are difficult due to its initiation, usually, occurring at the contact track subsurface Hertzian zone, where the material's local maximum shear stress overcomes the shear yield point. It was developed a disc manufacturing procedure and testing methodology for data acquisition and monitoring, such as driving and driver discs speed (V), applied normal load, weight loss, thermo-acoustic monitoring and test room thermo-hygrometric records of specially insulated laboratory. It is proposed an electrodischarge machining procedure for circular crown coupons extraction, after wear test, from the disc rolling track for residual stresses (σ_R) measurements using X-ray diffraction (XRD) through $\sin^2\psi$ technique and its correlation with Hertz's maximum pressure [$(p_o)_{max}$]. An approach is suggested for extraction, by EDM, and simultaneous grinding of chevron notches for fracture toughness measurements specimens, from new and tested discs. It is also proposed a dual chevron test methods, for the stiffness and crack propagation analysis. The Kolmogorov-Smirnov nonparametric statistical test was used to compare among two temporal distributions windows of sound pressure levels (SPL [dB]), collected from the similar and the increasing elastic energy of vibrating tribological system. The experimental data error assessment was performed by the temperature (T) measurement system calibration, through optical pyrometer, and the sound pressure level measurement, by sound level meter. The main damage mechanism of rolling bodies was identified and associated to the rolling wear parameter, RW , defined as a function of logarithm of input energy $\{f[(p_o)_{max}, V]\}$, and to the output energy $[f(T, SPL, n)]$ of tribological system. The calculated RW values were plotted as a function of cyclic rolling life establishing the so called RW map of cyclic rolling wear.

ERRATA

MEDEIROS, J.T.N. *Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico*. São Paulo, 2002. 2v. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Pág.	Linhas	Onde se lê	Leia-se
78	13	HEGEL [1966, p. 350-366]	(a complementação da fonte:) HEGEL, G. W. F. [1966] <i>Science of Logic</i> . London, George Allen & Unwin Ltd. p. 350-366.
91	-	Figuras 36.A, 36.A1, 36.B, 36.B1	Figuras 39.A, 39.A1, 39.B, 39.B1
95	-	Figura 3.41.B	Figura 41.B
105	2 e 3	Câmara semi-aneecóica	Câmara parcialmente reverberante
263	última		
287	5		

Sumário (Volume I)

Lista de tabelas
Lista de figuras
Lista de abreviaturas
Lista de símbolos
Resumo
Abstract

	Página
1. Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. O desgaste de rolamento	3
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo Geral	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
2. Revisão da Literatura	7
2.1. Irreversibilidade na relação com o outro	7
2.2. Estudos do contato estático e do desgaste de sólidos sob rolamento até o século XIX	8
2.3. Estudos sobre irreversibilidade e resistência ao rolamento no século XX	14
2.4. Desgaste de materiais devido ao contato cíclico	28
2.4.1. Engenharia de projeto de superfícies de contato	28
2.4.2. Mecanismos de desgaste de materiais sob contato de rolamento	33
2.4.2.1. Desgaste, microdeformação, adesão e aderência	33
2.4.2.2. Mecanismos metalúrgicos	37
2.4.2.3. Mecanismos geométricos e operacionais	41
2.4.2.4. Mecanismos hidrodinâmicos	50
2.4.2.5. Mecanismos das pequenas trincas	52
2.4.2.6. Mecanismos acústicos do colapso e do desgaste	54
2.5. Emissão acústica e nível de pressão sonora (NPS) do contato cíclico seco de rolamento	54
2.5.1. O envelope e o sinal acústico no domínio do tempo	55
2.5.2. O sinal acústico no domínio da frequência	57
2.5.2.1. Contato de rolamento em escala atômica	57
2.5.2.2. Contato de rolamento em escala micrométrica	58

ferro

de N

de

Sumário (Volume I) (continuação)

	Página
2. Revisão da Literatura (continuação)	
2.5.3. Medida da intensidade do som	60
2.5.3.1. Modelagem da vazão e pressão de ar em um tubo e efeito da estricção	61
2.5.3.2. Interação fluido e superfície de contato	64
2.5.3.3. Modelagem do sinal de pressão de ar em um sistema dinâmico	66
2.6. Detecção de danos de desgaste em sólidos por SLM	67
3. Reflexões Metodológicas, Materiais e Métodos	71
3.1. Introdução	71
3.2. Formalizando o método e a hipótese central	75
3.3. Materiais	82
3.3.1. Aço AISI 52100 (DIN 100Cr6)	83
3.3.2. Aço AISI M2	92
3.3.3. Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) Nitretado	100
3.3.4. Aço AISI 1045 nitretado a plasma	103
3.3.5. Cobre eletrolítico comercial	103
3.4. Métodos desenvolvidos e utilizados	105
3.4.1. Ensaios tribológicos de rolamento a seco	105
3.4.2. Dispositivos e procedimentos desenvolvidos para avaliar a resposta do material ao rolamento cíclico	110
3.5. Planejamento dos ensaios disco disco	117
4. Resultados	122
4.1. Resposta da aquisição do NPS [dB] por microcomputador	123
4.1.1. Primeiro corpo de Aço AISI M2 e antagonista de Aço AISI 52100 ou ADI nitretado	123
4.1.1.1. Ensaios M231, M232, M233 e M239 (Aços AISI M2 e 52100 OQT)	123
4.1.1.2. Ensaios M234, M235, M236, M237 e M238 (Aços AISI M2 e ADI nitretado)	130
4.1.2. Primeiro corpo e disco antagonista de Aço M2	138
4.2. Resposta do NPS [dB] associado à pressão de Hertz p_o máx para primeiro corpo de Aço AISI M2 e antagonista de Aço AISI 52100 ou ADI nitretado	141
4.3. Danos constatados em algumas pistas desgastados e colapsos em C.P. "Chevron" e "Flexão três pontos"	145
4.3.1. Evidências de microscopia e ensaios mecânicos	145

Sumário (Volume I) (continuação)

página

4. Resultados (continuação)	
4.3.2. Evidências ou gênese de mecanismos de desgaste em discos rolantes sob carga mecânica e/ou térmica	159
4.4. Evolução do desgaste e variação de parâmetros de análise de superfície em ensaios de Aços AISI M2 versus AISI 52100	169
4.4.1. Desvios de circularidade e batimento radial	169
4.4.2. Parâmetros híbridos Rk	170
4.5. Variação da carga normal e resposta do NPS [dB] em ensaios ADI-ADI e Aço AISI 52100-ADI	173
4.5.1. Ensaios Aço AISI 52100-Ferro Fundido Nodular Austemperado e Nitretado (ADI)	174
4.5.2. Ensaios ADI-ADI	175
4.6. Partículas desprendidas das pistas	176
4.7. Sinopse das grandezas macroscópicas avaliadas nos ensaios de rolamento cíclico disco-disco	179
5. Discussão	185
5.1. Introdução	185
5.2. Regimes de desgaste por contato de rolamento cíclico	189
5.3. Vida de um par tribológico de rolamento cíclico	191
5.3.1. Modelagem determinística da vida de um contato	191
5.3.2. Critérios de colapso do contato de rolamento	194
5.4. Irreversibilidades na relação com o outro	218
5.4.1. Unidades adjacentes compondo um material	218
5.4.2. Trincas em série e em paralelo	219
5.4.3. Delimitação de campo de modelagem do desgaste por rolamento cíclico	221
5.5. Perturbações no contato de rolamento	222
5.6. Taxa de produção de entropia associada à fadiga de contato e outros mecanismos de dano por contato	227
5.7. Hipótese das elipses limites e o mapa RW de desgaste por rolamento cíclico	230
6. Conclusões	236
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	239

Sumário (Volume II)

Anexo A. Procedimentos de manufatura e extração de corpos-de-prova (C.P.) para análise	240
A.1. Retificação das superfícies esféricas	240
A.2. Extração, por eletroerosão, de amostras dos discos ensaiados para manufatura de C.P. com entalhe “chevron”	246
A.3. Retificação final dos C.P. com entalhe “Chevron”	249
Anexo B. Aferição e calibração do sistema de medida da temperatura de contato por pirômetro óptico	252
B.1. Pirômetro óptico da máquina de ensaio disco-disco	252
B.2. Sistema de aferição da medida do pirômetro em um campo de temperatura	253
B.3. Evidências dos efeitos térmicos de alta temperatura	258
Anexo C. Aferição do decibelímetro (SPM)	262
C.1. Apresentação do sistema	262
C.2. Metodologia	264
C.3. Caracterização dos sinais de entrada/saída na aferição	264
C.4. Resposta do Medidor de Pressão Sonora (“Sound Pressure Meter” [SPM]) ou decibelímetro, às entradas sonoras	281
C.5. Avaliação do erro experimental de medida do nível de pressão sonora (NPS)	286
Anexo D. Resultados dos ensaios disco-disco	288
Anexo E. Contato de Hertz	488
Bibliografia	492

LISTA DE QUADROS e TABELAS

Quadro	Assunto apresentado	Pág
1	Leis do Atrito (de Deslizamento)	12
2	Fontes de dissipação de energia no contato de rolamento	17
3	Regime de trepidação elástica (“ <i>Shakedown</i> ”) no contato de rolamento	22
4	Mecanismos de abrasão promovidos por penetrador esclerométrico cônico e ângulos de cone correspondentes	32
5	Classificação de pares tribológicos segundo as condições de desgaste	41
6	Tensões Residuais e NPS decorrentes do desgaste por rolamento cíclico	187
7	Mecanismos de desgaste por rolamento cíclico	190
8	Sinopse dos parâmetros considerados na modelagem da vida de sólidos sujeitos à fadiga de contato de rolamento	193

Tabela	Assunto apresentado	Pág.
1	Méritos relativos entre os métodos de avaliação da dureza por Indentação e esclerometria	31
2	Definição da frequência natural e fator de amortecimento do sistema dinâmico de segunda ordem representado na Figura 25	67
3	Classificação de propagação de ondas em sólidos	68
4	Sinopse de reflexões metodológicas importantes à Ciência	72
5	Composição química mássica (%) do aço AISI 52100	83
6	Esquemas utilizados para usinagem, tratamento térmico, retificação e caracterização geométrica final dos corpos-de-prova (C.P.)	85
7	Procedimentos de ensaio, preparação e inspeção de defeitos nos C.P.	85
8	Composição química mássica (%) do aço AISI M2 importado	92
9	Composição química mássica (%) do aço AISI M2 nacional	92
10	Esquema utilizado para tratamento térmico dos discos corpos-de-prova (C.P.) de aço AISI M2 importado e testemunhas de processo de aço AISI M2 nacional (A _i) e importado (B _i)	93
11	Composição química mássica (%) do ADI nitretado	100
12	Esquema utilizado para tratamento térmico e usinagem dos discos de ferro fundido nodular austemperado (ADI) e nitretado	100
13	Composição química mássica (%) do Aço AISI 1045	103
14	Composição química mássica (%) do Cobre eletrolítico	104
15	Etapas metodológicas utilizadas nesta investigação de desgaste de discos metálicos por fadiga de contato sob rolamento cíclico	109
16	Planejamento dos ensaios dos discos metálicos	118
17	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M231	123
18	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M232	125
19	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M233	126
20	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M239	126

LISTA DE QUADROS e TABELAS (continuação)

Tabela	Assunto apresentado	Pág.
21	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição ,M234	130
22	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M235	132
23	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M236	132
24	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M237	135
25	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M238	135
26	Distribuição do NPS em função do tamanho da janela de aquisição, M240	138
27	Análise KS dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS[dB]) em função dos pontos iniciais e finais de cada ciclagem do Ensaio M240	140
28	Comparação da distribuição do sinal de NPS [dB] entre ensaios aço AISI M2-52100 e aço AISI M2-ADI, pressões de Hertz semelhantes	142
29	Comparação do NPS [dB] dos ensaios aço M2-52100 e M2-ADI, segunda ciclagem, pressões máximas de Hertz diferentes	143
30	Comparação do NPS [dB] entre ensaios aço M2-52100 e M2-ADI , segunda ciclagem, pressões máximas de Hertz diferentes	144
31	Comparação da Tenacidade à fratura K _{1C} [Mpa√m] das testemunhas do Tratamento Térmico ensaiados como C.P. “Chevron” segundo a velocidade de carregamento	154
32	Sinopse das faixas de carga normal , temperatura máxima de contato , faixa de pressão máxima de Hertz e vida do contato	180
33	Valores medidos da temperatura no centro das faces anterior e posterior do corpo-de-prova e calculados para a tensão axial em um ciclo térmico	216
34	Esquemas de resposta de um sistema a uma perturbação externa	226
35	Dimensões dos corpos-de-prova para usinagem de entalhe Chevron segundo a norma ASTM 1304 / 97	246
36	Ajuste dos dados de temperatura medidos nas colunas 1, 2, 3, 5, 6 e 7 e aqueles medidos na coluna central	256
37	Caracterização metodológica da aferição do Decibelímetro	264

LISTA DE FIGURAS – Volume I

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
1	Baixo relevo ilustrando o transporte de um colosso egípcio, 1900 a.C	9
2	Fragmentos e reconstrução conceitual de um mancal axial, Roma, 40 a.C	10
3	Mancais esboçados por Leonardo Da Vinci, nos anos 1490	11
4	Parâmetros de Hertz entre dois sólidos comprimidos um contra o outro	14
5	Descrição esquemática da direção do escorregamento relativo (“ <i>slip</i> ”)	19
6	Rolamento e deslizamento entre dois dentes de engrenagens cilíndricas	20
7	Deformação subsuperficial em um contato cíclico de rolamento	21
8	Mapas de “ <i>shakedown</i> ”: atrito de deslizamento e atrito de rolamento	23
9	Limite de micro-escoamento (k) em rolamento de aço AISI 52100	27
10	Vida de contatos de rolamento cíclico a seco de Aço AISI 52100	27
11	Modelo icônico do processo tribológico em um contato	29
12	Fatores que afetam os mecanismos de deformação e adesão do atrito	29
13	Resolução associada à medida da altura e espaçamento de asperezas	30
14	Indentação por um cone JOHNSON [1989] e DARQUE-CERETTI [1997]	35
15	Mecanismos de desgaste em engrenagens cilíndricas	36
16	Aço AISI 52100 comercial após ensaio	40
17	Desvios de forma do perfil de uma superfície (DIN4760, por BET [1999])	43
18	Curva de Abbott ou Abbott-Firestone de um perfil de rugosidade	45
19	Mecanismo de desgaste de deslizamento devido ao escoamento plástico	48
20	“ <i>Debris</i> ” liberados do desgaste por fadiga de contato de rolamento	49
21	Trincas, intensificação de tensão e pites em contatos de rolamento	53
22	Nomenclatura adotada para sinais acústicos no domínio do tempo	56
23	Intensidade sonora das microtrincas	60
24	Velocidade entre placas paralelas: Perfil de Couette e Perfil de Poiseuille	62
25	Variação da vazão e pressão de ar com a estricção do tubo	64
26	Fluido e microzonas de contato entre as asperezas da superfície de contato	65
27	Reservatório de ar entre asperezas, à pressão do ar p_m e volume V	66
28	Morfologia dos discos metálicos utilizados nos ensaios disco-disco	76
29	Bancada para ciclagem térmica em disco único ou em 6 corpos-de-prova	77
30	Visão sistêmica do desgaste por fadiga de contato em ensaio disco-disco	80
31	Entrada-saída em materiais submetidos ao contato cíclico de rolamento	81
32	Materiais utilizados nos ensaios disco-disco	82
33	A. Aço AISI 52100, grãos de perlita e ferrita – Nital 1% 150X A1. Contraste de cores da Fig. 33.A B. Aço AISI 52100, grãos de perlita e ferrita – Nital 1% 780X B1. Contraste de cores da Fig. 33.B	84
34	A. Aço AISI 52100OQT – Nital 1% 780X. Zona central: sulfeto A1. Contraste de cores da Fig. 34.A B. Aço AISI 52100OQT – Nital 1% 390X. Zona central: sulfeto B1. Contraste de cores da Fig. 34.B	86

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
35	A. Aço AISI 52100OQT -- Picral-Nital 390X A1. Contraste de cores da Fig. 35.A B. Aço AISI 52100OQT -- Picral-Nital 390X B1. Contraste de cores da Fig. 35.B	87
36	A. Aço AISI 52100OQT --Picral-Nital 780X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 36.A B. Aço AISI 52100OQT --Picral-Nital 780X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 36.B	88
37	A. Aço AISI 52100 SBQT -- Nital 1%; 780X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 37.A B. Aço AISI 52100SBQT -- Nital 1% 390X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 37.B	89
38	A. Aço AISI 52100 SBQT--Picral-Nital 780X, Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 38.A B. Aço AISI 52100SBQT -- Picral-Nital 390X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 38.B	90
39	A. Aço AISI 52100 SBQT -- Picral-Nital 780X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 39.A B. Aço AISI 52100SBQT -- Picral-Nital 780X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 39.B	91
40	A. Aço AISI M2 nacional, Nital 2% 500X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 40.A B. Aço AISI M2 nacional Nital 2% 1000X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 40.B	94
41	A. Aço AISI M2 nacional, Groensbeck 100X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 41.A B. Aço AISI M2 nacional, -- Groensbeck; 1000X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 41.B	95
42	A. Aço AISI M2 importado, Nital 2% 100X Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 42 B. Aço AISI M2 importado, Groensbeck 1000X Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 42.B	96
43	A. Aço AISI M2 importado, Groensbeck; 500X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 43.A B. Aço AISI M2 importado, Nital 2% 1000X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 43.B	97
44	A. Aço AISI M2 importado, Groensbeck; 100X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 44.A B. Aço AISI M2 importado, Groensbeck; 500X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 44.B	98

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
45	A. Aço AISI M2 importado, Nital 2% 500X; Matriz martensítica A1. Contraste de cores da Fig. 45.A B. Aço AISI M2 importado, Nital 2% 1000X; Matriz martensítica B1. Contraste de cores da Fig. 45.B	99
46	Ferro fundido nodular ADI, Nital 2% 400X; Matriz de ferita bainítica A. Contraste de cores da Fig.46	101
47	Ferro fundido nodular ADI, Nital 2% 400X; Matriz de ferita bainítica A. Contraste de cores da Fig. 47	101
48	Camada branca e zona de difusão no disco de ensaio; SEM-SE, 200X A. Contraste de cores da Fig. 48	102
49	Camada branca de nitretos, zona de difusão e matriz de ADI Nital 2% A. Contraste de cores da Fig. 49	102
50	Aço-carbono AISI 1045, Nital 1% A. Contraste da Fig. 50	104
51	Cobre eletrolítico sem ataque A. Contraste de cores da Fig. 51	104
52	Esboço esquemático da bancada experimental dos ensaios disco-disco	105
53	Gabinete disco-disco	106
54	Evolução do dano decorrente do desgaste por contato de rolamento A. Dispositivo-mesa desenvolvido para apoiar o disco de trabalho	107 110
55	Corte das coroas circulares (anéis), viabilizado por eletroerosão (EDM)	111
56	Sistematização da retirada de amostras do material dos discos	112
57	Aferição da célula de carga da INSTRON 4400R e ensaio em processo	113
58	Esquema iconográfico de ensaio de flexão com entalhe “Chevron”	115
59	Critério adotado para a usinagem do entalhe “Chevron”	116
60	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M231	124
61	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M232	127
62	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M233	128
63	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M239	129
64	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M234	131
65	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M235	133
66	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M236	134
67	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M237	136
68	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M238	137
69	Parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] ensaio M240	139
70	Morfologia de pistas desgastadas após ensaio M240	145
71	Morfologia de pistas de aço M2 desgastadas após ensaio M240	146
72	Morfologia de pistas de ADI 201 desgastadas após ensaio AISI M234	147
73	Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe	148
74	Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe	149
75	Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe	150
76	Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe	151

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
77	Morfologia do C.P. “Chevron” após fratura por ensaio de tenacidade	152
78	Tenacidade à fratura dos C.P. “Chevron” testemunhas	153
79	Tenacidade à fratura dos C.P. “Chevron” disco AISI M2 importado	155
80	Resistência à flexão dos C.P. “Chevron” do disco AISI M2 importado	156
81	Dureza HRC dos C.P. “Chevron” M2 nacional	157
82	Dureza HRC dos C.P. “Chevron” testemunhas de aço AISI M2 importado	158
83	Borboleta em formação e firmando dano por fadiga de contato	159
84	Morfologia de danos em pistas desgastadas após ensaio	160
85	Formação de proa em superfícies esféricas de aço 52100 – aço 52100	161
86	Danos em ADI e aço após ensaios disco-disco	162
87	Pistas desgastadas após ensaios disco-disco e de ciclagem térmica	163
88	Danos em aço após ensaios disco-disco e ciclagem térmica	164
89	Danos em aço. após ensaios disco-disco e ciclagem térmica	165
90	Aderência de material à interface borda - pista de rolamento	166
91	Corrugação e trepidação em discos nitretados	166
92	Desgaste abrasivo em discos motor e movido não-nitretados	166
93	Aspecto de desgaste por “scuffing” em um sistema de rolamento cíclico	167
94	Delaminação em pista de cobre, aspecto do antagonista e tensões residuais	168
95	Desvio de circularidade dos discos de aço AISI M2 e AISI 52100	169
96	Desvio de batimento radial dos pares de disco de aço AISI M2 e 52100	170
97	Parâmetro híbrido Rk de análise de superfícies de aço AISI M2 e 52100	171
98	Parâmetros híbridos Rpk e Rvk de análise de aço AISI M2 e 52100	172
99	Janelas temporais do NPS em contato de rolamento de aço e ferro	174
100	Janelas temporais do NPS em contato de rolamento de ferro e ADI-ADI	175
101	Debris de ensaios 52100, ADI-ADI, ADI-Aço M2 e Aço 52100-Aço 52100	177
102	Evolução do NPS e da tensão residual com a distância de rolamento	186
103	Dano por lascamento (“spalling” ou “flaking”) em pista de rolamento	189
104	Aspecto de uma microtrinca propagada na direção axial	196
105	Danos localizados e partículas encontradas em pistas de cobre e de aço	197
106	Tensão devido à conjugação do contato cíclico de rolamento	200
107	Nucleação de trincas pelos nódulos de grafite deformados e extrudados	201
108	Ensaio de dureza HRC em superfícies fraturadas “Chevron” aço AISI M2	205
109	Trincas radiais na interface “indentação-borda”	208
110	Morfologia da trinca no meio e na borda da parte comprimida da pista, P1	210
111		P11 211
112		P21 212
113	Evolução temporal da propagação de trinca	214
114	Malha de trincas térmicas no meio da pista de rolamento	217
115	Microtrincas paralelas à pista de contato de rolamento	220
116	Delimitação da modelagem do fenômeno e sólidos sob fadiga de contato	221
117	Microdureza HV _{0,05} da seção abaixo de pista de rolamento ADI nitretado	225
118	Mapa do parâmetro de desgaste por rolamento cíclico RW	234

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviatura/Sigla	Significado
ADI	Austempered Ductile Iron (Ferro Fundido Nodular Austemperado)
AFM	Microscopia de Força Atômica
ANOVA	Analysis of Variance
B.S.E.	Elétrons Retroespalhados
c.p.	circunferência primitiva
C.P.	Corpo-de-Prova
CNC	Comando Numérico por Computador
der	dark etching region (região de coloração escura)
DEP	Densidade Espectral de Potência
DR	Distância de Rolamento
DRX	Difração de Raios – X (X-Ray diffraction)
EDM	Electrical Discharge Machining (Eletroerosão)
EDS	Energy-Dispersive Spectrometer
EHL ou EHD	Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica
ER	Ensaio de Rolamento
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FRF	Função Resposta em Frequência
HBN	Hardness Brinell Number (Dureza Brinell)
HRC	Hardness Rockwell C (Dureza Rockwell C)
HV	Hardness Vickers (Dureza Vickers)
KIC	Tenacidade à Fratura
K-S	Kolmogorov-Smirnov
LP	Lundberg-Palmgren
NC	Número de coordenação
NPS	Nível de Pressão Sonora
OQT	Oil Quenching and Tempering (Têmpera em Óleo e Revenimento)
PE	Perdas de Energia
PEEK	Poliesterestercetona (material polimérico)
RMS	Raiz Média Quadrática
RW	Rolling Wear
S.A.H.	Sentido Anti-Horário
S.E.	Elétrons Secundários
S.H.	Sentido Horário
SBQT	Salt Bath Quenching and Tempering (Têmpera em Banho de Sais e Revenimento)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura)

Abreviatura/Sigla	Significado
SFA	Surface Force Apparatus (Aparelho de Força de Superfície)
SIF	Stress Intensifier Factor (Fator de Intensificação de Tensão)
SLM	Sound Level Meter (Decibelímetro)
SPM	Scanning Probe Microscopy
STM	Microscopia de Varredura por Tunelamento
TRS	Resistência à Ruptura Transversal
wer	white etching region (região de coloração branca)
Z.C.	Zona Comprimida

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Semilargura do contato
A	Afinidade térmica = $1/T_{\text{ambiente}} - 1/T_{\text{contato}}$
A _i	Testemunha de processo de tratamento térmico do aço nacional
B	Rigidez flexional
B _i	Testemunha de processo de tratamento térmico do aço importado
c	Velocidade de propagação da onda
C	Capacidade de carga dinâmica
d _{atôm}	Densidade linear atômica
E	Módulo de Young, de elasticidade longitudinal
F	Força de atrito
F _t	Força tangencial
G	Módulo de elasticidade transversal do meio
H	Umidade relativa do ar
k	Limite de escoamento em cisalhamento simples
L	Vida dos discos
l _n (1/Sobrev)	Probabilidade de sobrevivência
M	Parâmetro elástico do contato
Mr	Corpo sólido (disco) Motor
Mv	Corpo sólido (disco) Movido
n	Número de ciclos acumulados
N	Carga normal
P	Pressão média do ar
PE/DR	Relação entre a perda de energia e a distância e rolamento
(p ₀) _{max} , p _{máx}	Pressão máxima de Hertz
p _m	Pressão média de Hertz
p _z	Pressão de contato unidimensional
q _{vol}	Vazão volumétrica
R	Raio de curvatura da superfície de contato
R (r _t)	Resistência ao escoamento de ar
Ra	Rugosidade média aritmética
r _{atôm}	Raio atômico
ResRol	Coefficiente de resistência ao rolamento
Rmax	Altura máxima de pico a vale
Ry	Profundidade máxima da rugosidade
Rz	Altura média de pico de aspereza a vale
s	Posição relativa entre os discos motor e movido
t	Espessura nominal do entalhe
T _c , T, T _{contato}	Temperatura de contato

Símbolo	Significado
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidade de giro maior dentre os discos motor e movido
V_{Mr}	Velocidade do disco motor
V_{Mv}	Velocidade do disco movido
v_s	Velocidade
W_{ar}	Trabalho de fronteira sobre o ar ambiente
Y	Limite de escoamento em tração ou compressão uniaxial
α	Coefficiente de perda por histerese do material, ao respectivo nível de deformação específica
δP	Incremento de carga no contato de rolamento
ϵ	Deformação média do material em contato normal
γ	Parâmetro de direcionalidade da textura da superfície
η_0	Viscosidade absoluta à temperatura constante
K_{elast}	Coefficiente elástico
μ_d	Coefficiente de atrito dinâmico
μ_f	Viscosidade
ν	Coefficiente de Poisson
θ	Temperatura de contato acima da temperatura ambiente
$\partial\theta, \partial T$	Taxa de variação da temperatura de contato
ρ	Massa específica
σ_R	Tensão residual
τ	Tensão de cisalhamento
ω_n	Frequência natural
ψ	Ângulo de inclinação de feixe para medida de Tensão Residual, vide Figura 54.A
ζ	Fator de amortecimento
ΔS	Variação de Entropia
Δu	Deslocamento tangencial relativo no contato

Parâmetros Rk – Metrologia	
Símbolo	Significado
A1	Volume correspondente à região de picos, compreendida entre a curva de Abbott e a linha superior da região de rugosidade central
A2	Volume correspondente à região de vales, compreendida entre a curva de Abbott e a linha inferior da região de rugosidade central
Mr1	Percentual de material correspondente à interseção entre a linha superior da região de rugosidade central e a curva de Abbott, ou seja, o menor percentual de suporte da região central
Mr2	Percentual de material correspondente à interseção entre a linha inferior da região de rugosidade central e a curva de Abbott, ou seja, o maior percentual de suporte da região central

Símbolo	Significado
Rk	Core roughness depth (Profundidade da rugosidade central)
Rpk	Reduced peak height (Altura reduzida dos picos)
Rvk	Reduced valley depth (Profundidade Reduzida de vales)

1

Introdução

“Os últimos capítulos analisam os dentes de engrenagem em ação... Eles incluem ... as cargas limites de desgaste ou a resistência potencial à deterioração da superfície e o desgaste excessivo. Não pretendo afirmar que esta análise seja completa ... Tenho muito a aprender sobre o assunto.”

BUCKINGHAM, Earle (*) [march 1949] (no prefácio de seu livro clássico, que reúne 25 anos de experiência e estudos sobre engrenagens: *Analytical Mechanics of Gears*. New York, Dover Publications, 1988. Reprint).

(*) Professor of Mechanical Engineering, Emeritus, M.I.T.

1.1. Considerações iniciais

O desgaste dos corpos sólidos, orgânicos ou inorgânicos, tem inquietado o ser humano nos últimos milênios. Instiga-o a superar limites, após constatar as etapas sequenciais produzidas pelas irreversibilidades: os sistemas físicos depreciam-se, envelhecem, transformam-se (ou morrem, segundo vozes discordantes de Lavoisier).

Quando esses sistemas estão próximos ao equilíbrio, as irreversibilidades são pouco ou nada observadas e atuam de modo subliminar. Longe do equilíbrio, geralmente são melhor observadas, enxergadas e, diversas vezes, investigadas.

A idéia de acumular energia paulatinamente e convertê-la em outra forma, para ser liberada de forma abrupta ou concentrada, levou o ser humano a desenvolver o arco e flecha, com objetivos voltados à caça, de cuja carne surgia ainda a gordura e a constatação de que um galho *portátil* de madeira seca impregnada com óleo formava uma bela e duradoura tocha. A *mecânica do contato* entre o arco e a flecha e entre esta e o alvo desafiou gerações, assim como entre a madeira e a gordura que a untava.

Na antiga Suméria, entre os rios Tigres e Eufrates, situava-se a Mesopotâmia (hoje integrando o Iraque), berço da escrita, da matemática e das religiões e da então *alta tecnologia* no campo da agricultura mecanizada. As soluções de vanguarda foram um arado de madeira revolucionário e um sistema de mobilidade ágil, uma

carroça, ambos, com tração humana, que permitiu recolher cargas pesadas, as safras de grãos, entre o campo e os armazéns, antes do próximo ataque do vizinho, inimigo secular.

Os horizontes do ser humano *ampliavam-se do simples* preparar-se para a próxima refeição para *o complexo* produzir e estocar grãos para as refeições dos próximos anos – desafio de milhares de gerações.

É plausível supor-se que o *contato* entre o arado, constituído por um galho robusto com dentes, e o solo, proporcionou um *sentido organizacional* à sementeira, trato e colheita de grãos jamais visto com a tecnologia obsoleta aleatória, onde as sementes eram atiradas ao chão. O desafio do equacionamento entre a sazonalidade das chuvas e as paradas de produção por quebras sucessivas do arado e diminuição de eficiência produtiva devido ao desgaste de seus dentes, percebido por observadores privilegiados, promoveu a ruptura tecnológica do paradigma vigente: surgiram o arado de ferro e a tração animal.

Possivelmente, enquanto pessoas qualificadas ligadas às tribos agricultoras se aperfeiçoavam no trato da saúde humana e na evolução dos pares tribológicos e organizacionais arado-solo, outros idealizavam o desenvolvimento de veredas e sistemas de mobilidade com cargas até duas ordens de grandeza acima do peso do homem e velocidades, sob carga, de até duas vezes à do homem, graças à evolução de pares tribológicos roda-solo.

As rodas de carroças, dependendo das cargas que conduziam a uma frequência, velocidade, distância e tipo de terreno, mutável com as águas, ao se quebrarem, contribuíram para novos desenvolvimentos em materiais, processos e inovações como dois eixos independentes, barra de direção, freios, etc, chegando à mobilidade aérea.

Os desafios foram se multiplicando: contatos calçado-solo, ferradura-solo, pele-roupa, flecha-animal, embarcação-água, roda d'água-água corrente, talhadeira-pedra, broca-madeira, espada-bainha, agulha-couro, corda-rolana, trenó-gelo, bala esférica-canhão, roda-trilho, pneu-estrada, avião-atmosfera, foguete-capa atmosférica ...

Uma dezena de milênios após, *os horizontes* do ser humano *ampliam-se do simples* produzir e estocar grãos para as refeições dos próximos anos *para o*

complexo sistema de identificação e minimização de irreversibilidades associadas à *vida racional, orgânica e inorgânica*, desafio desta e das gerações vindouras.

1.2. O desgaste de rolamento

Na segunda metade do Século XX, intensificaram-se os estudos sobre o desenvolvimento e avaliação de sistemas estruturais, microestruturais e moleculares com movimentos relativos entre si, ferramentas de prognóstico e diagnóstico de vida útil e eficaz em serviço.

Inserir-se no contexto o desgaste de corpos sólidos com movimento de rolamento puro, ou rolamento com pequenos deslizamentos, que afeta elementos de máquinas como mancais de rolamentos, engrenagens e sistemas roda-trilho e pneu-estrada.

Os principais mecanismos do desgaste são identificados e classificados por Tallian na literatura de contato de rolamento em duas grandes categorias: *spalling* (lascamentos) e *surface distress* (distensão superficial). (DUMONT [1997], NÉLIAS e colaboradores [1997, 1998]).

Grandes os progressos, arraigamento de certezas, inúmeras dúvidas ensejadas. Nos aços AISI 52100, por exemplo, constituintes da maioria dos rolamentos, os níveis de pureza têm assegurado um aumento de vida de até uma ordem de grandeza nos corpos rolantes, atingindo vidas de até 10^8 ciclos (HUTCHINGS [1992]).

A predição de vida útil desses mancais, conceito utilizado em todos os manuais de rolamentos, assume um mecanismo de dano cumulativo linear, desenvolvido na metade do Século XX por Lundberg-Palmgren, modelo LP, que tem apresentado respostas satisfatórias para aplicações rotineiras (HUTCHINGS [1992]).

NÉLIAS [1989], investigando rolamentos lubrificadas de turbomáquinas, girando a velocidades da ordem de 100 m/s e pressões máximas de Hertz de 2,0 GPa, demonstrou que: a) o dano não é linear; b) o aumento de temperatura de operação é um parâmetro significativo; c) o modelo LP não se aplica a tais casos e d) há muito por se investigar em relação ao desgaste de sólidos rolantes.

As demandas por maiores velocidades e cargas aos sistemas rolantes, de um lado, e miniaturização ou manutenção das dimensões das estruturas, de outro, têm

intensificado as solicitações aos materiais, aumentando também o ruído e a temperatura de operação em regime. Técnicas de redução de ruído tendem a majorar ainda mais a temperatura, tornando o problema mais complexo.

BIGNONNET e MERRIEN [1998], em congresso da Associação Francesa de Metalurgia e Materiais (SF2M) dedicado integralmente à Fadiga de Contato, justificaram a crescente atenção dispensada ao tema pela constatação de que “40% das rupturas de sistemas mecânicos devidas à fadiga decorrem do contato entre duas superfícies”. Trata-se de um custo elevado, mas de contabilidade difícil.

Segundo DANG VAN e MAITOURNAM [1998, p. 1(1)], os problemas de contato entre superfícies sólidas situam-se entre os mais importantes e difíceis de estudar, dado o descompasso entre o lento progresso do conhecimento dos mecanismos envolvidos e a ausência de ferramentas de modelagem para interpretar os estudos experimentais já realizados. Ao destacar a contribuição de JOHNSON e equipe [1989], eles criticam a simplificação em suas modelagens (plasticidade perfeita, problema bidimensional, cisalhamento total, ...) que “*descrevem mal a realidade*”.

A hipótese central a ser investigada neste trabalho, que trata de dois sólidos rolando por atrito, sem lubrificação externa, é: *As irreversibilidades no desgaste por fadiga de contato de rolamento dos materiais dependem da energia de entrada fornecida ao sistema e são associadas a um ou mais mecanismos de desgaste pela energia de saída configurada na resposta termoacústica, dependente do meio, e vinculada à história do contato.*

A *energia de entrada*, neste contexto, é proposta ser avaliada como uma função do par $(p_o)_{máx} V_{máx}$ (pressão máxima de Hertz e velocidade de giro maior dentre os discos motor e movido), enquanto a *anergia¹ de saída*, uma função de $T.NPS.n$ (temperatura do contato, nível de pressão sonora e número de ciclos acumulados). Um novo parâmetro, *RW*, é proposto para quantificar o desgaste de rolamento cíclico

¹ A *anergia*, inicialmente definida como a parte da energia não transformável, é uma diferença entre a energia e a exergia de um sistema. A *exergia* foi inicialmente proposta na Alemanha [1956] como sendo a parte da energia que pode ser convertida em qualquer outro tipo de energia, em um processo reversível, e depende da forma e movimento do envelope ou superfície de controle. Todo fenômeno irreversível causa perda de exergia, levando a estados termodinâmicos de anergia crescente. (SZARGUT; MORRIS; STEWARD [1988]).

([ing.]“*cyclic rolling wear*”), definido como uma relação funcional logarítmica *energial/anergia*.

Além desta introdução, cinco Capítulos e cinco Anexos compõem este trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica integrada por um histórico do desgaste de contato de rolamento cíclico, os mecanismos de dano impostos aos materiais em contato, a caracterização metrológica das superfícies em contato, o papel abrasivo de inclusões e partículas oriundas do desgaste, os efeitos das tensões residuais e da ciclagem térmica nos materiais e a resposta acústica oriunda do contato.

No Capítulo 3, apresentam-se a metodologia proposta e utilizada, a sala termoacusticamente isolada, os materiais, a instrumentação e as tecnologias desenvolvidas e utilizadas.

No Capítulo 4, apresentam-se resultados obtidos nos ensaios, algumas análises estatísticas pertinentes e morfologias de danos detectados. Para maior clareza da apresentação, parte dos resultados é apresentada no segundo volume, permitindo-se, assim, nesse Capítulo, introduzir alguma discussão relativa ao cerne da pesquisa.

No Capítulo 5, discutem-se os principais resultados e formaliza-se a contribuição original desta Tese: (a) apresentam-se seis regimes de desgaste, constituídos por diferentes mecanismos identificados experimentalmente; (b) tais regimes são associados à vida do contato e ao parâmetro proposto para quantificar o desgaste por rolamento, *RW*, em um mapa de desgaste.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e sugestões para continuidade desta linha de pesquisa proposta.

Seguem-se cinco Anexos, no *segundo volume* desta Tese, relativos:

- (A) aos procedimentos de manufatura dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de rolamento, de extração das pistas para análises subseqüentes e dos ensaios de tenacidade à fratura em corpos-de-prova “*Chevron*”;
- (B) à aferição e calibração do pirômetro óptico utilizado;
- (C) à aferição e calibração do decibelímetro utilizado;

- (D) aos ensaios de rolamento cíclico efetuados em máquina disco-disco, utilizando pares de discos metálicos de aço-aço, aço-ferro fundido nodular, ferro fundido nodular-ferro fundido nodular e cobre-aço;
- (E) à determinação das variáveis de Hertz que fundamentam a Mecânica do Contato entre dois sólidos esféricos.

O segundo volume é finalizado com a bibliografia citada ao longo deste trabalho.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar o desgaste por *fadiga de contato* de discos metálicos, com superfície de contato esférica, ensaiados em máquina disco-disco.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Avaliar a complexidade associada às irreversibilidades do desgaste de pistas metálicas em contato de rolamento cíclico;
2. Elaborar um mapa de desgaste por rolamento cíclico de discos metálicos;
3. Sistematizar o ensaio de desgaste de discos em máquina disco-disco;
4. Identificar os principais mecanismos de dano em corpos rolantes;
5. Analisar a evolução das tensões residuais devido ao contato de rolamento cíclico de corpos sólidos metálicos;
6. Desenvolver um procedimento de manufatura, ensaio e análise dos discos e de corpos-de-prova “*Chevron*”, para estudo da tenacidade à fratura do material novo ou ensaiado, extraído dos discos.

2

Revisão da Literatura

2.1. Irreversibilidade na relação com o outro

“Quando duas consciências estão frente a frente, cada uma tenta não só atrair os objetos para o seu mundo perceptivo como também procura incorporar a outra consciência. Cada consciência tenta “objetivar” a outra. Mas essa objetivação não pode redundar na morte do outro nem na sua anulação como consciência. Pois se quero possuir o outro, quero-o como consciência e não como coisa. Em outras palavras, quero-o como liberdade, na exata medida em que também sou liberdade. No entanto, como possuir o outro a não ser como objeto? Como incorporar à minha liberdade uma outra liberdade? A finalidade do desejo, aqui, é um absurdo; não pode realizar-se. Por isso, a relação com o outro está destinada ao fracasso”

ABRÃO, B.S. Sartre e a angústia de ser livre. In: _____ História da Filosofia. São Paulo, Editora Nova Cultural Ltda, 1999. p. 449.

Na visão filosófica de Sartre, toda *relação* entre humanos é irreversível e *está* fadada ao fracasso, à degradação, à deterioração. Trata Sartre do desgaste ontológico, decorrente do relacionamento humano. Em sua concepção, um processo intrinsecamente paradoxal, por envolver dois sentimentos antagônicos, de liberdade e posse ou confinamento.

Análoga é a natureza do contato físico entre sólidos com movimento relativo entre si. Submetem-se ao contato, desgastam-se e *são* fadados à deterioração. É papel da Tribologia qualificá-lo, quantificá-lo, esmiuçar-lhe os mecanismos, a sua natureza.

Separaram tais *estar* e *ser* destinados à deterioração, a compreensão, a engenhosidade e a sensibilidade humanas, de um lado, e os condicionantes de irreversibilidade física e química a que se sujeitam os materiais, de outro.

Os sistemas mecânicos de rolamento puro ou rolamento com deslizamento têm integrado, há vários séculos, a vida humana. Estão presentes na estrutura dos principais sistemas de mobilidade, de energia e de produção de bens disponíveis. Envolvem o contato de sólidos em sistemas de transmissão de força e movimento,

como discos de atrito, pares de engrenagens, polia-correia, roda-trilho, pneu-estrada, came-seguidor. Todos se submetem ao desgaste em serviço.

2.2. Estudos do contato estático e do desgaste de sólidos sob rolamento até o século XIX

“La meccanica è il paradiso delle scienze matematiche, perché in quella si perviene al frutto matematico”.

Da Vinci, Lionardo [1452 - 1519] *I manoscritti di Lionardi Da Vinci*, Fogli E, 8 v.

Quando a carga de transporte de madeira, pedras, alimentos, embarcações e instrumentos bélicos superou em uma ordem de grandeza o peso próprio do ser humano, esse problema passou a instigar os principais personagens da Antiguidade.



Figura 1. Baixo relevo egípcio ilustrando o transporte de um colosso de cerca de 60 toneladas por 172 escravos, 1900 a.C., segundo HALLING [1983, p. 5]. Destaque em cores para a ação dos *tribologistas* que gerenciavam a operação, conduziam corpos rolantes em madeira e fluido lubrificante em jarras, viabilizando o processo.

A Figura 1 retrata um documento pético egípcio que descreve detalhadamente a metodologia de transporte de carga, estimada por HALLING [1983, p. 5-6] em cerca de 60 toneladas, utilizada por aquele povo há cerca de dois milênios antes de Cristo.

Os sistemas mecânicos de rolamento puro ou rolamento com deslizamento têm evoluído, desde então. A Figura 2 apresenta, à direita, o mais antigo fragmento de

um mancal axial, ou de escora, encontrado no Ocidente, com datação provável atribuída ao ano 40 a.C..

HALLING [1983, p. 6] especula que uma possível utilização desse mancal haja sido como mesa giratória, em que escultores italianos que utilizavam grandes blocos de pedra presumivelmente punham o material bruto para trabalhar com maior maestria e comodidade em suas obras colossais.

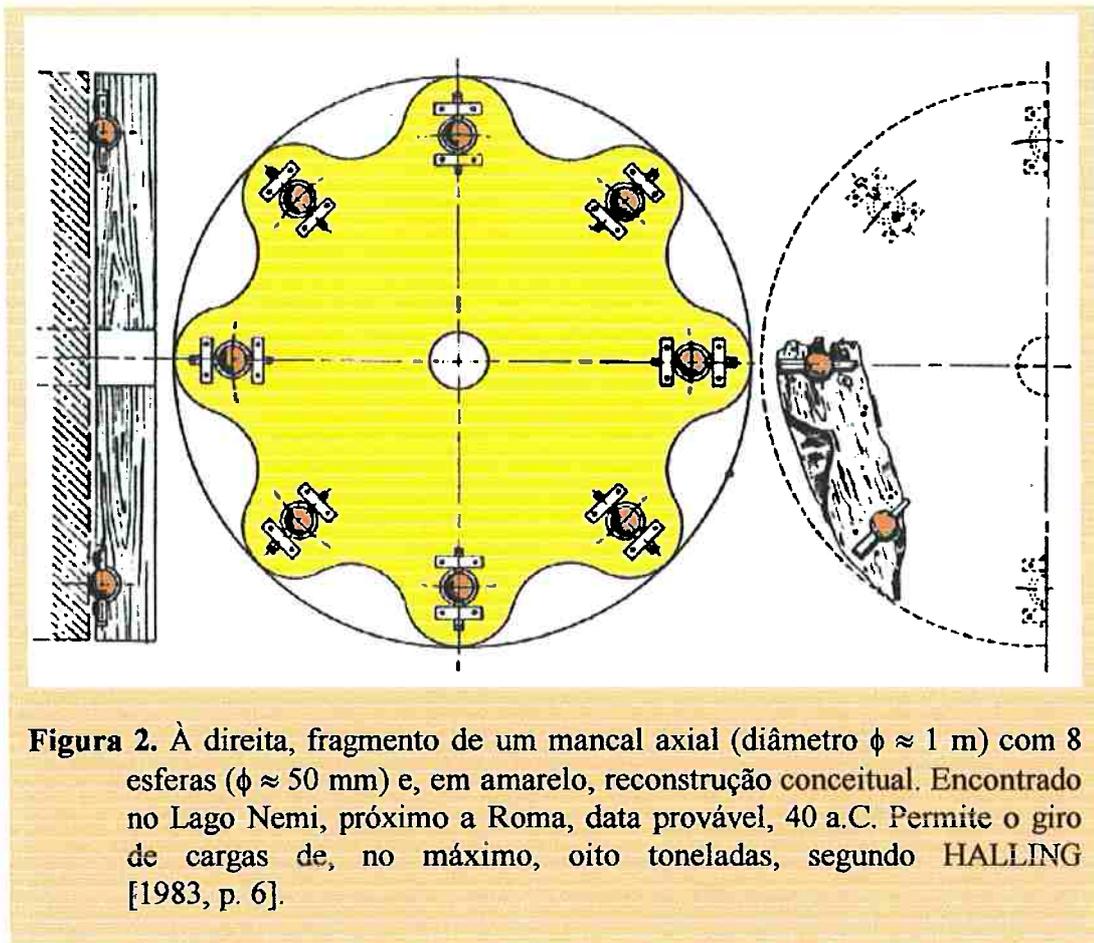


Figura 2. À direita, fragmento de um mancal axial (diâmetro $\phi \approx 1$ m) com 8 esferas ($\phi \approx 50$ mm) e, em amarelo, reconstrução conceitual. Encontrado no Lago Nemi, próximo a Roma, data provável, 40 a.C. Permite o giro de cargas de, no máximo, oito toneladas, segundo HALLING [1983, p. 6].

Apesar desses desenvolvimentos, o estudo do desgaste associado ao contato entre corpos sólidos sob rolamento começou a ter um enfoque *quantitativo* a partir do Renascimento.

Dentre os textos escritos e resgatados pela humanidade, destaca-se a contribuição de Leonardo Da Vinci ao estudo das características e desempenho do que ele definiu pioneiramente como *Elementos de Máquinas*.

A esse tema da Engenharia, Da Vinci dedicou um tratado inteiro, paralelamente ao estudo do corpo humano, considerado por ele composto por dispositivos mecânicos altamente sofisticados, ambos desenvolvidos na última década do Século XV.

Nos *órgãos de máquinas* relacionados com a redução de atrito, como ele os denominou, a sua observação pertinente às forças de acionamento, atrito e desgaste, é demonstrada, por exemplo, pela gravura da Figura 3(a), relativa ao estudo de um eixo cilíndrico de extremidade cônica, em contato com rolos.

Naquele estudo, Da Vinci expõe que há um menor desgaste na solução da Figura 3(a), quando o eixo gira três rotações para cada rotação dos mancais, em relação à solução da Figura 3(b), quando o eixo gira numa relação de transmissão 1:1 face aos mancais. Em relação à gravura apresentada na Figura 3(b), Da Vinci comenta que

“Três esferas sob o pino são melhores do que quatro, porque três esferas são, por necessidade, contactadas e igualmente movidas pelo pino. Usando-se quatro esferas, haveria o perigo de que uma delas não fosse contactada, aguardando a oportunidade para produzir atrito.”

Na Figura 3(c) é exposta a concepção de Da Vinci para o mancal de rolamentos de uma carreira de esferas, idealizado para reduzir o atrito, permitindo fácil movimento de giro à plataforma superior, ainda que sob carga pesada.

Duzentos anos após Da Vinci, Amontons, em 1699, redescobriu-o e desenvolveu experimentos com metais e madeira lubrificadas com gordura de porco.

Esse sistema pode ser caracterizado como uma *lubrificação limite*, de acordo com HUTCHINGS [1992-a, p. 23], e serviu para a formalização das hoje chamadas *Três Leis do Atrito* (de deslizamento), apresentadas no Quadro 1, em paralelo com as suas limitações.

Os metais obedecem à primeira e segunda Leis do Atrito, o que geralmente não ocorre com os materiais poliméricos. A terceira Lei, por sua vez, geralmente é válida para velocidades de deslizamento de até uma ordem de grandeza, em m/s (HUTCHINGS [1992-a, p. 23-4]).

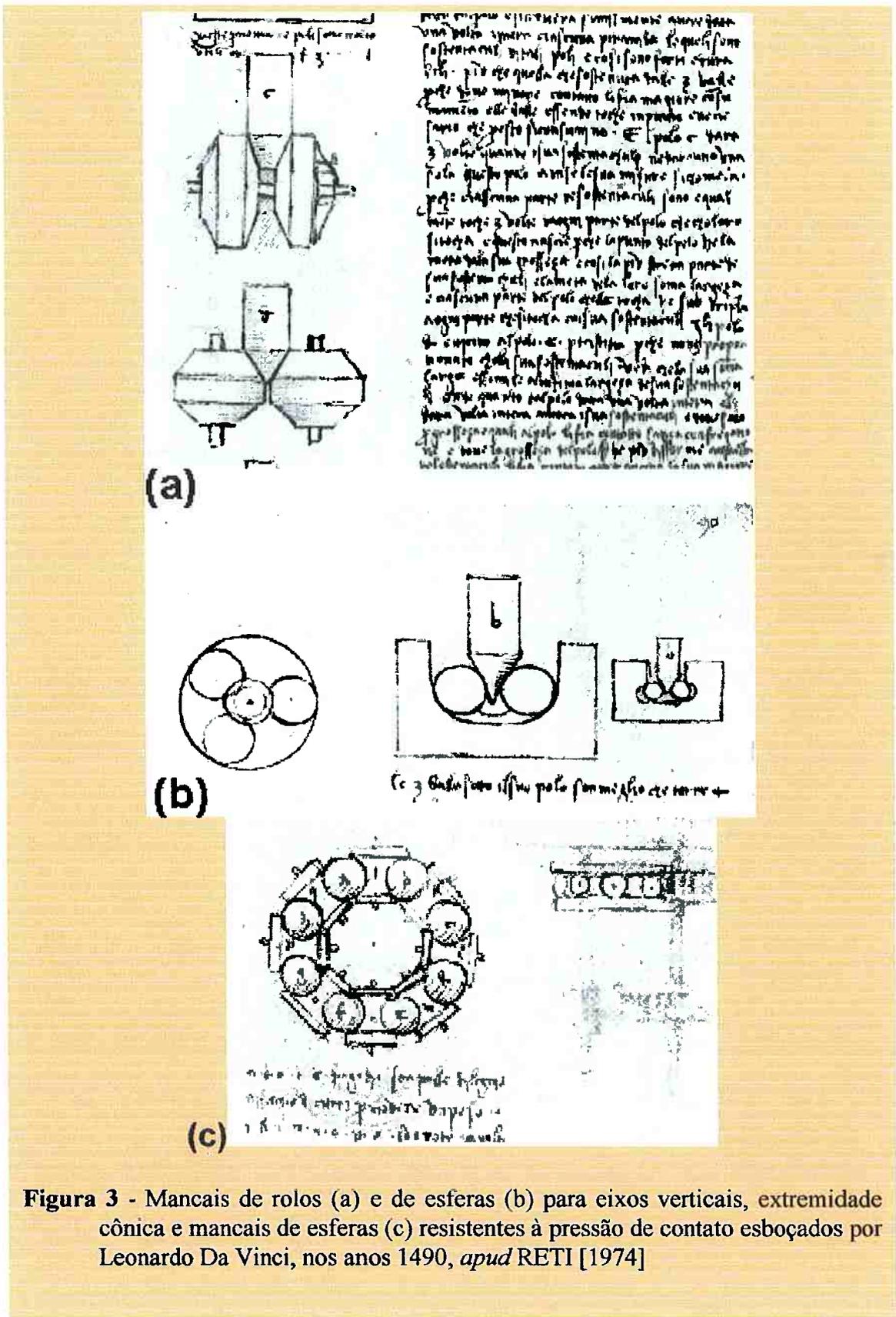


Figura 3 - Mancais de rolos (a) e de esferas (b) para eixos verticais, extremidade cônica e mancais de esferas (c) resistentes à pressão de contato esboçados por Leonardo Da Vinci, nos anos 1490, *apud* RETI [1974]

Quadro 1. LEIS DO ATRITO (DE DESLIZAMENTO)

Primeira Lei: $F = \mu N$

“A força de atrito F é proporcional à carga normal N ”

Não obedecem à Primeira Lei: geralmente os Materiais Poliméricos

Segunda Lei:

“A força de atrito é independente da área aparente de contato”

Não obedecem à Segunda Lei: geralmente os Materiais Poliméricos

Terceira Lei:

“A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento”

Não obedecem à Terceira Lei: Em sistemas de deslizamento animados com velocidades de dezenas ou centenas de metros por segundo, o coeficiente de

atrito dinâmico μ_d diminui quando a velocidade V_s aumenta

Fonte: HUTCHINGS [1992a, p. 23-4]

Em cerca de quatro séculos subseqüentes a Da Vinci, a Mecânica do Contato de rolamento teve poucos avanços até que o Engenheiro Osborne REYNOLDS [1875] idealizou e publicou um experimento entre um rolo cilíndrico de ferro e uma superfície plana de borracha natural.

Ele demonstrou que, em uma rotação, havia uma diferença sensível na deformação da superfície entre ambos. Reconhecia que uma variação nas *constantes*

elásticas dos materiais em contato de rolamento contribui para o *micro-escorregamento* [“*microslip*”(ing.), “*microglissement*”(fr.)].

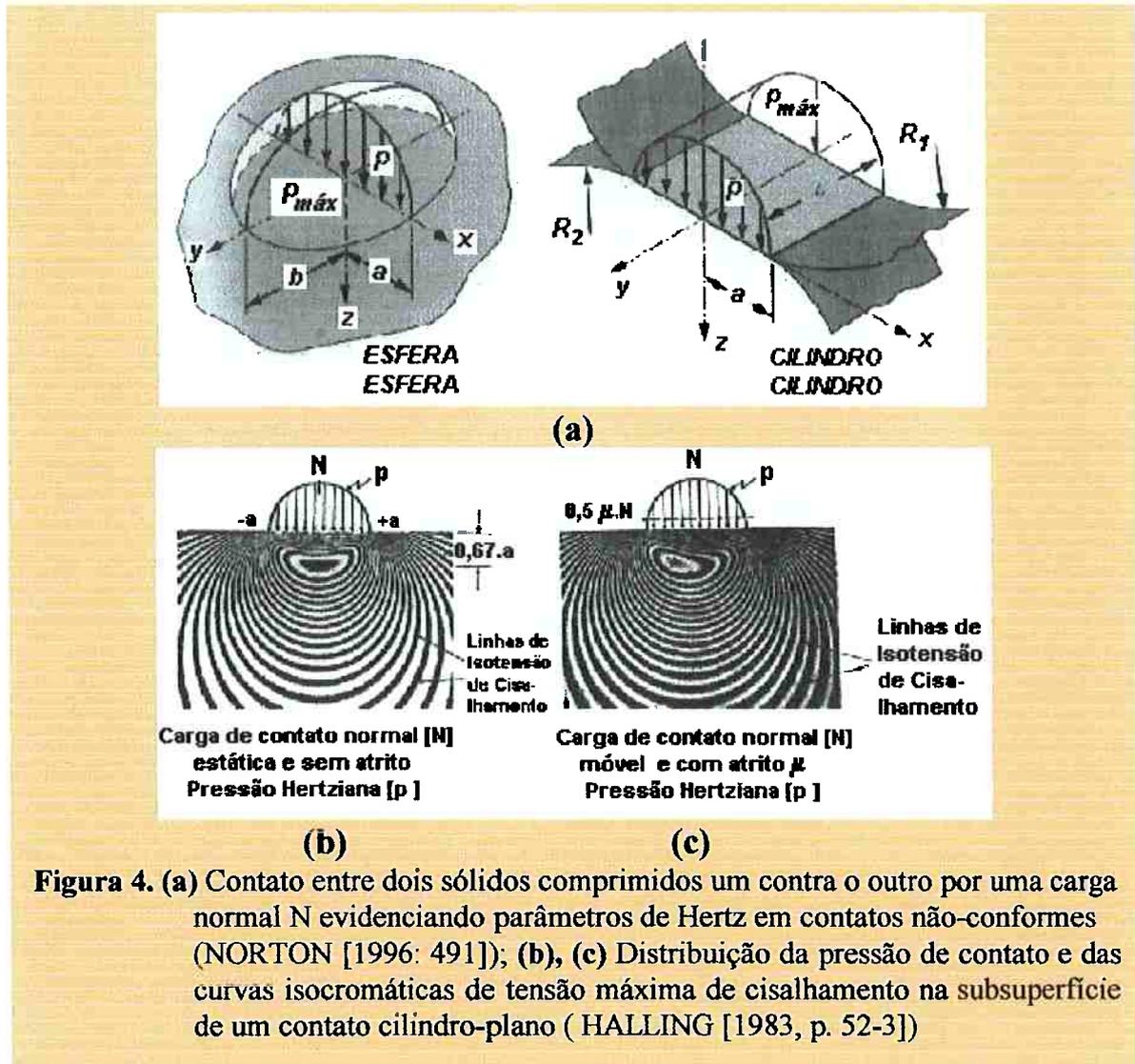
REYNOLDS [1875] atribuiu então parte da resistência ao rolamento à energia dissipada, destacando que um alto coeficiente de atrito entre as superfícies em contato evitaria micro-escorregamento, enquanto que um coeficiente de atrito muito baixo permitiria escorregamento sem maiores dificuldades, predizendo que a resistência friccional de rolamento exibiria um máximo para algum valor intermediário do coeficiente de atrito. Percepção aguçada, considerados os meios disponíveis ao final do Século XIX, então incorporando ao problema um conhecimento formal inerente à Mecânica dos Sólidos.

HEINRICH HERTZ [1882] investigou tensões e deformações em lentes vítreas ópticas, definidas como superfícies estáticas convexas, ditas não-conformes, comprimidas entre si, na *ausência de atrito*, Figuras 4 (a) e (b). Evidenciou em sua modelagem, sintetizada no Anexo E, que a pressão de contato p_z assume a forma de um *potencial de campo elástico* com fronteira bem definida. *Dentro desse campo*, as tensões associam-se às deformações elásticas. *Além da fronteira* do campo, as deformações elásticas em ambos os sólidos, decorrentes do contato, são zero.

A contribuição efetiva de Hertz foi demonstrar matematicamente que, em contato de sólidos estáticos não-conformes comprimidos entre si e sem atrito, parâmetros *geométricos e elásticos do material* são necessários e suficientes para definir a *área de contato* e os *estados de tensão e deformação* atuantes.

Divergiam as motivações então contemporâneas de REYNOLDS [1875] e de HERTZ [1882]. Ao primeiro, interessavam as superfícies *com atrito e movimento relativo entre si*, Figura 4 (c). O segundo voltava-se à modelagem de duas superfícies estáticas não-conformes comprimidas e sem atrito, Figura 4 (b).

A maioria dos desenvolvimentos subseqüentes assumiu as hipóteses de Hertz, como apresenta a minuciosa revisão de KALKER [1990]. As investigações não solucionadas por REYNOLDS [1875] seriam retomadas oitenta anos após, por TABOR e colaboradores que serão revistas a seguir.



2.3. Estudos sobre irreversibilidade e resistência ao rolamento no século XX

É sempre assim. Quem, pois, levantando-se de um festim, tem ainda o apetite tão forte como na hora em que se assentou? Onde está o cavalo capaz de voltar sobre as pegadas de sua fatigante jornada com o fogoso brio da partida inicial? Todas as coisas deste mundo são perseguidas com maior ardor do que gozadas. Como se parece com um jovem ou com um filho pródigo a barca empavesada que sai da baía natal acariciada e beijada pela brisa cortesã! E quando, semelhante também ao filho pródigo, volta com os flancos avariados pelas borrascas, as velas em farrapos, extenuada, arruinada, esgotada pela brisa cortesã!

Shakespeare, William. The merchant of Venice. Act II. Scene VI. In: _____ The complete works of William Shakespeare. New York, Gramercy Books, 1975. p.211.

TABOR [1955], ELDREDGE e TABOR [1955-a, 1955-b] e GREENWOOD, MINSHALL e TABOR [1961] desenvolveram estudos teórico-experimentais objetivando investigar a origem da *resistência ao rolamento*. A maior parte da perda

de energia decorrente do micro-escorregamento, chamada por eles de resistência friccional, foi atribuída às histereses dos materiais em contato.

No estudo de GREENWOOD, MINSHALL e TABOR [1961], estabeleceu-se uma expressão para calcular a resistência ao rolamento, **ResRol**, devido à histerese interna no material, dada por

$$\mathbf{ResRol} = \frac{(PE/DR)}{N} = \frac{2}{3\pi} \alpha \frac{a}{R} \quad [2.1]$$

onde: **PE/DR** [J/m] é a relação entre a perda de energia e a distância de rolamento;

N [N] é a carga normal;

α [adimensional] é o coeficiente de perda por histerese do material, ao respectivo nível de deformação específica;

a [m] é a semilargura do contato;

R ($R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$) [m] é o raio equivalente do contato.

Esses autores, considerando que o menor valor prático de $\alpha = 0,5\%$ aplica-se a superfícies de aço tratado termicamente, estimam que a resistência ao rolamento seria

$$\mathbf{ResRol} = \frac{(PE/DR)}{N} \cong 1 \times 10^{-3} \frac{a}{R} \quad [2.2]$$

BENTALL e JOHNSON [1967] desenvolveram uma modelagem para calcular a contribuição do micro-escorregamento ao atrito global de rolamento. Em sua análise, constataram que, na zona de contato,

- a) *uma diferença nas constantes elásticas associa-se a uma diferença na velocidade tangencial dos sólidos em contato*
- b) *a velocidade de superfícies mais flexíveis é maior que a de superfícies mais rígidas*

e quantificaram, também, a hipótese de REYNOLDS [1875] relativa à resistência friccional ao rolamento, de que ela atingiria um máximo para algum valor intermediário do coeficiente de atrito, μ .

Retomando o estudo de GREENWOOD, MINSHALL e TABOR [1961], designando os módulos de Young e coeficientes de Poisson dos materiais em contato

por E_1 e E_2 [N/m^2] e ν_1 e ν_2 , respectivamente, BENTALL e JOHNSON [1967] definiram um coeficiente elástico κ_{elast} como:

$$\kappa_{elast} = \frac{\left\{ \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{E_2} \right\} - \left\{ \frac{(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{E_1} \right\}}{\left[\frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right] + \left[\frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} \right]} \quad [2.3]$$

e, ratificando a expressão verbal de REYNOLDS, estimaram que *o valor máximo do coeficiente de resistência ao rolamento* é dado por:

$$(ResRol.)_{máximo} = \frac{(PE / DR)}{N} \cong 7,5 \times 10^{-4} \frac{\kappa_{elast} \cdot \alpha}{R} \quad [2.4]$$

A estimativa de BENTALL e JOHNSON da *resistência máxima ao rolamento* é uma função linear de parâmetros geométricos e elásticos dos sólidos em contato, como proposto por HERTZ e REYNOLDS, individualmente, e das *perdas de energia PE* e da *distância de rolamento DR* (além da *carga normal N*), como preconizado por REYNOLDS.

Além disso, BENTALL e JOHNSON [1967] destacam que os seus resultados numéricos relativos ao contato de dois cilindros elásticos constituídos por materiais distintos rolando por atrito apresentam, em uma superfície de contato instantânea, três regiões de micro-eskorregamento, sendo uma a montante e outra a jusante da zona de contato.

Em uma terceira zona de contato, dependendo do coeficiente de atrito, propriedades elásticas e cinemática das superfícies em contato, *o equilíbrio é assegurado pela mudança do sentido do skorregamento*, que muda de sinal devido às *alternâncias relativas de velocidade entre os dois corpos em contato*, ou seja, ora a superfície motora gira um pouco mais rápido, ora um pouco mais lento, que a movida. (Ilustrado pela Figura 6, p. 20).

Dessa maneira, BENTALL e JOHNSON [1967] propuseram que, nessa zona de contato, a tensão de cisalhamento está orientada alternadamente, no sentido de giro ou no sentido oposto. E arrematam: *a máxima resistência provável devido ao micro-eskorregamento é substancialmente menor do que aquela devido à histerese dos materiais em contato*.

Baseado em JOHNSON [1989, p.306], construiu-se o Quadro 2, especificando-se e classificando-se as principais fontes dissipativas de um contato cíclico de rolamento de acordo com três categorias distintas.

Quadro 2. FONTES DE DISSIPACÃO DE ENERGIA NO CONTATO DE ROLAMENTO

Fontes dissipativas de primeira categoria

Microdeslizamento e atrito na interface do contato

Essas fontes são devido a:

- a) **constantes elásticas diferentes;**
- b) **geometrias com curvaturas diferentes;**
- c) **movimento de *spin*.**

Fontes dissipativas de segunda categoria

Propriedades inelásticas do material

No caso de:

- a) **metais**, são governadas por movimentos de discordâncias e, a temperaturas próximas às do ambiente, pouco dependem da temperatura ou da taxa de deformação;
- b) **sólidos porosos ou de baixa densidade**, como borracha ou polímeros, cuja deformação seja de natureza viscoelástica, sensível à temperatura e à taxa de deformação;
- c) **baixa condutibilidade térmica do material**, provoca temperaturas internas elevadas e colapso por tensões térmicas cíclicas.

Fontes dissipativas de terceira categoria:

Rugosidade das superfícies rolantes

Sua influência sobre a dissipação de energia no rolamento acontece por:

- a) **intensificação da pressão real de contato**, em que uma menor área real de contato associa-se, geralmente, a superfícies mais rugosas;
- b) **flutuações de alta frequência**, com instabilidade do centro de massa dos corpos em contato, principalmente com superfícies rugosas duras e baixas cargas.

Fonte: JOHNSON [1989, p. 306]

A complexidade de um sistema tribológico de rolamento torna-se crescente à medida que o interrelacionamento entre essas três categorias de fontes de irreversibilidade, expostas no Quadro 2, combinam-se uma ou múltiplas vezes, ciclo após ciclo, ora gerando relações lineares, ora não-lineares, entre as variáveis envolvidas.

Há diversas variações nas forças de contato e deslizamentos na área de contato de rolamento e não existe uma teoria geral, demandando uma teoria local de atrito, de acordo com KALKER [1990, p. 19], citando as propostas por Cattaneo [1938], Mindlin [1949] e Rabinowicz [1965], baseadas no atrito de Coulomb, no equilíbrio da tração e na compatibilidade do deslocamento para a determinação do sentido e magnitude do micro-escorregamento relativo entre as superfícies em contato.

Para ilustrar o aspecto fenomenológico que rege os pequenos deslizamentos na zona de contato de rolamento, tem-se a modelagem física apresentada na Figura 5, através da caracterização de duas *condições progressivas de um contato sob pequenos incrementos da carga*: a de “*slip*”¹, em que se verificam pequenos *deslocamentos tangenciais relativos* entre os sólidos e, portanto, $\Delta \mathbf{u} \neq \mathbf{0}$ e a de “*stick*”, onde tais deslocamentos são nulos, ou seja, $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{0}$.

Tais condições são úteis na determinação do módulo e sentido da força de tração tangencial. A seqüência esquemática desses movimentos, considerada na modelagem do problema do contato de rolamento por MAN, ALIABADI e ROOKE [1993], serve de ilustração na monitoração das etapas que associam os deslocamentos tangenciais relativos $\Delta \mathbf{u}$ aos incrementos de carga no contato de rolamento, $\delta \mathbf{P}$.

Na seqüência apresentada de 1 a 4 na Figura 5, referente aos instantes de tempo subsequentes $IT = 0, 0^+, 0^{++}, 0^{+++}$, assumiu-se uma *posição relativa inicial* $\mathbf{s} = \mathbf{0}$ entre dois pontos integrantes de dois sólidos de revolução de mesmo tamanho, um pertencente ao sólido motor (\mathbf{Mr}) e o outro ao sólido movido (\mathbf{Mv}).

Com o passar do tempo, de acordo com eventos sucessivos próximos, a grandeza vetorial *escorregamento relativo* assume uma flutuação espacial de aparente vai-e-vem, o qual dita o comportamento da força de tração tangencial, que caracteriza a primeira categoria de fonte de dissipação descrita no Quadro 2.

¹ Os anglicismos “*stick*” e “*slip*” são termos técnicos específicos consagrados na literatura mundial, justificando a sua incorporação ao português moderno.

Associa-se a essas pequenas flutuações espaciais um gradiente temporal de velocidade, ou seja, microacelerações positivas ou negativas, instauradoras dos gradientes, geralmente não-lineares, da força de tração tangencial e da temperatura de contato.

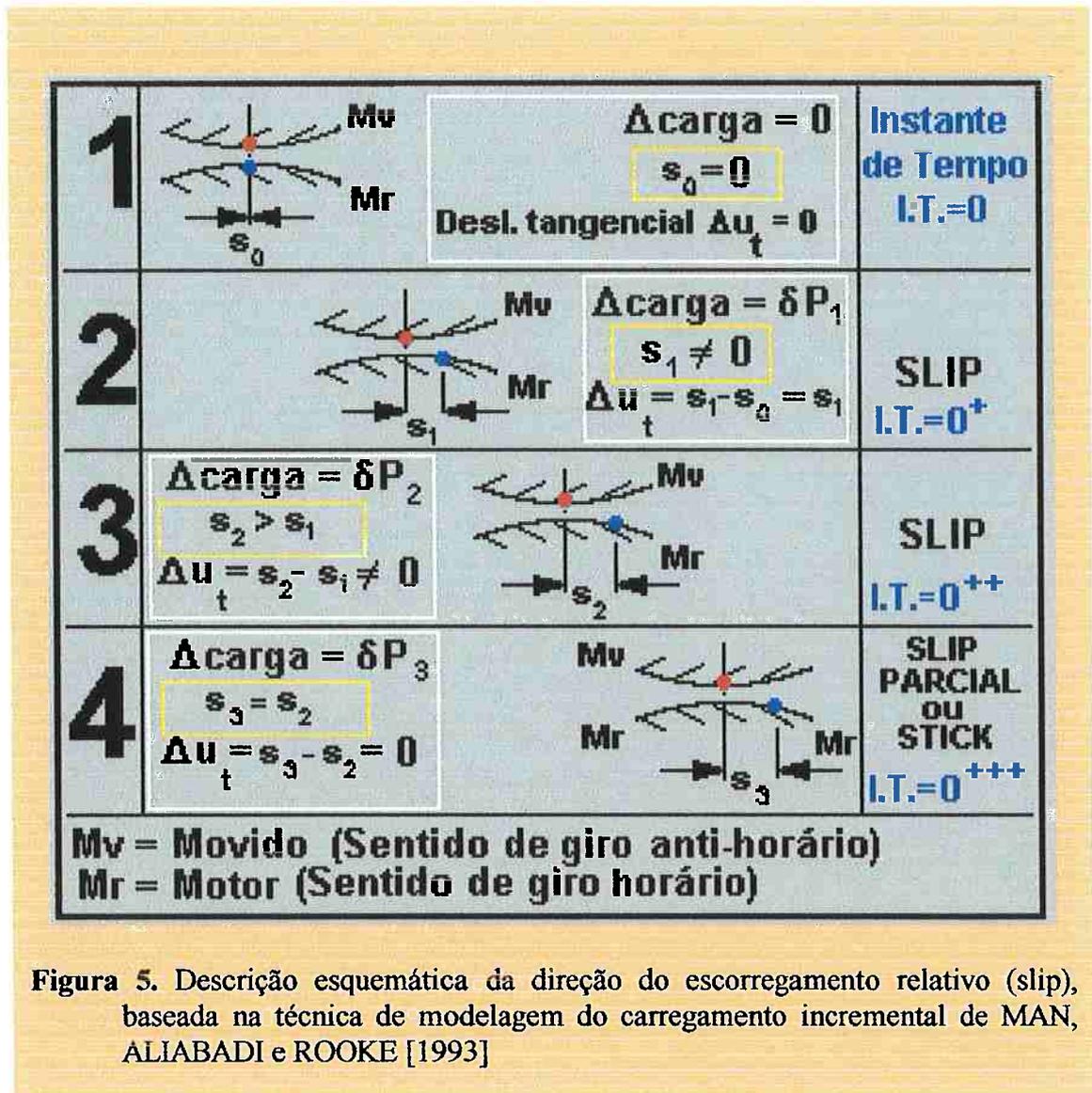


Figura 5. Descrição esquemática da direção do escorregamento relativo (slip), baseada na técnica de modelagem do carregamento incremental de MAN, ALIABADI e ROOKE [1993]

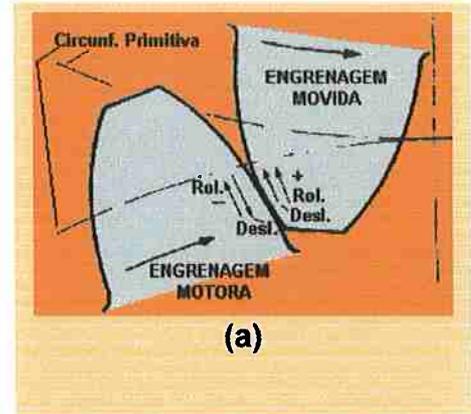
Exemplo do exposto é o caso dos pequenos movimentos relativos e forças atreladas à transmissão de potência por um par de dentes de engrenagens (Figura 6).

No contato entre os dentes de um par de engrenagens, o ponto de tangência entre suas duas circunferências primitivas (c.p.) é o ponto primitivo. A cabeça do dente, ou *addendum*, situa-se acima da c.p. e o pé do dente, ou *dedendum*, abaixo da c.p..

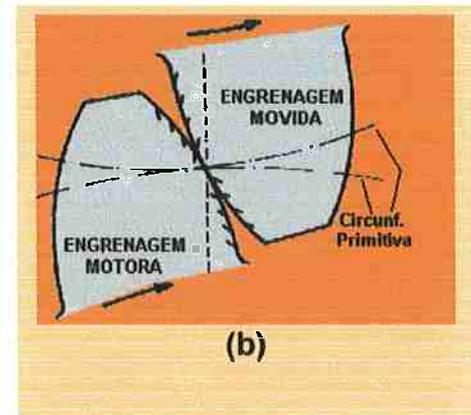
O contato entre dois dentes engrenados, dependendo da posição relativa do *addendum* de um e do *dedendum* do dente engrenado, pode envolver *rolamento puro* ou *rolamento e deslizamento*, como ilustra a Figura 6. O sentido de rolamento é sempre o mesmo, mas há alternância no sentido de deslizamento para que o sistema mantenha-se em equilíbrio.

Na Figura 6 (a), constata-se que o rolamento tem sentido oposto ao do deslizamento no *dedendum* do dente da roda motora (diz-se deslizamento negativo) enquanto no *addendum* do dente da roda movida tem-se rolamento no mesmo sentido do deslizamento (diz-se que o deslizamento é positivo).

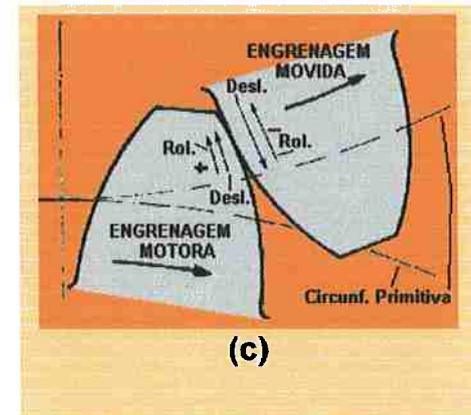
Na Figura 6 (b), o contato entre os dentes é feito à altura da c.p., tendo-se rolamento puro. À medida que o contato se afasta dessa condição, a velocidade de deslizamento aumenta e a figura 6 (c) apresenta alternância no deslizamento em relação àquele da Fig. 6 (a). TRICOT [1976] assegura que o deslizamento negativo associa-se à condição mais severa de contato.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Esquema de alternância no sentido das solicitações de rolamento e deslizamento ao longo de um contato entre dois dentes de engrenagens cilíndricas, em relação à circunferência primitiva, baseado em TRICOT [1976]

Um ciclo de deformação do material submetido a um contato de rolamento cíclico não pode ser estimado a partir de dados de sollicitação cíclica uniaxial porque envolve rotação dos eixos principais de deformação entre os pontos B, C e D, como sugerido pela Figura 7, com uma variação na energia de deformação total muito pequena em um ciclo (JOHNSON [1989, p. 284-6]), para quem

“O fator de perda por histerese em um contato de rolamento cíclico não é geralmente uma constante do material nem pode ser identificado com o fator de perda em um ciclo simples de tração ou compressão.”

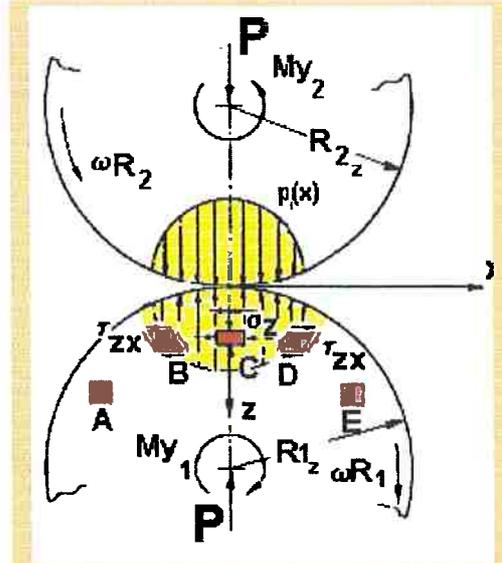


Figura 7. Deformação na sub-superfície em um contato cíclico de rolamento, baseado em JOHNSON [1989, p. 284]

É portanto muito complexa a formalização de uma teoria geral que associe ao ambiente a dissipação de energia nos pequenos movimentos entre duas superfícies em contato cíclico, suas geometrias absoluta e relativa, a alternância do sentido e a flutuação do módulo da força tangencial, as propriedades elásticas e o limite de escoamento dos materiais.

Graças a essa complexidade, na modelagem do problema do contato cíclico de corpos inelásticos, JOHNSON [1989: p. 286-95] assume um comportamento elastoplástico ideal para os materiais em contato cíclico. Considerando a ciclagem mecânica e o limite de escoamento, há um consenso entre os estudiosos da Mecânica do Contato na definição conceitual de um regime próprio do contato cíclico de rolamento, a trepidação elástica (“*shakedown*”), exposta no Quadro 3.

Dessa forma, até o limite de escoamento Y (em tração ou compressão uniaxial) ou k (cisalhamento simples), esse autor idealiza que os materiais constituintes dos sólidos em contato assumirão um comportamento perfeitamente elástico e, além desse limite, deformar-se-ão em um modo perfeitamente plástico, ou seja, *irreversível* e dependente da história de carregamento. No regime de “*shakedown*” de rolamento cíclico, ao primeiro escoamento ($p_{o,máx} \approx 1,6.Y$) sucede novamente um modo de deformação perfeitamente elástico (JOHNSON [1989: p. 286]).

Quadro 3. REGIME DE TREPIDAÇÃO ELÁSTICA (“*Shakedown*”) NO CONTATO DE ROLAMENTO

A Mecânica do Contato introduz o regime de contato de rolamento denominado trepidação elástica (“*shakedown*” [ing.]) ao considerar que, em um contato cíclico entre duas superfícies sob carga, constata-se sucessivos estados de deformação plástica e de deformação sob o limite elástico dos materiais.

WILLIAMS [1996, p. 438], que define trepidação elástica (“*shakedown*”) como “o processo segundo o qual a deformação plástica nos ciclos iniciais de carregamento conduz a um estado cíclico em regime permanente no âmbito do limite elástico”,

destaca que, em contatos cíclicos em linha ou bidimensionais, podem contribuir com esse fenômeno:

1. **Tensões Residuais** que, ao serem introduzidas pelo fluxo plástico inicial, podem atuar para inibir plasticidade adicional no regime permanente e
2. **Encruamento** do material, podendo elevar o seu limite elástico.

Estão necessariamente embutidas no conceito do processo de trepidação elástica (“*shakedown*”) de um contato cíclico as **tensões Hertzianas máximas de contato** ($P_{\text{máx}}$) aplicadas e a propriedade mecânica **limite de escoamento** ao cisalhamento de cada material que integra os sólidos em contato cíclico de rolamento.

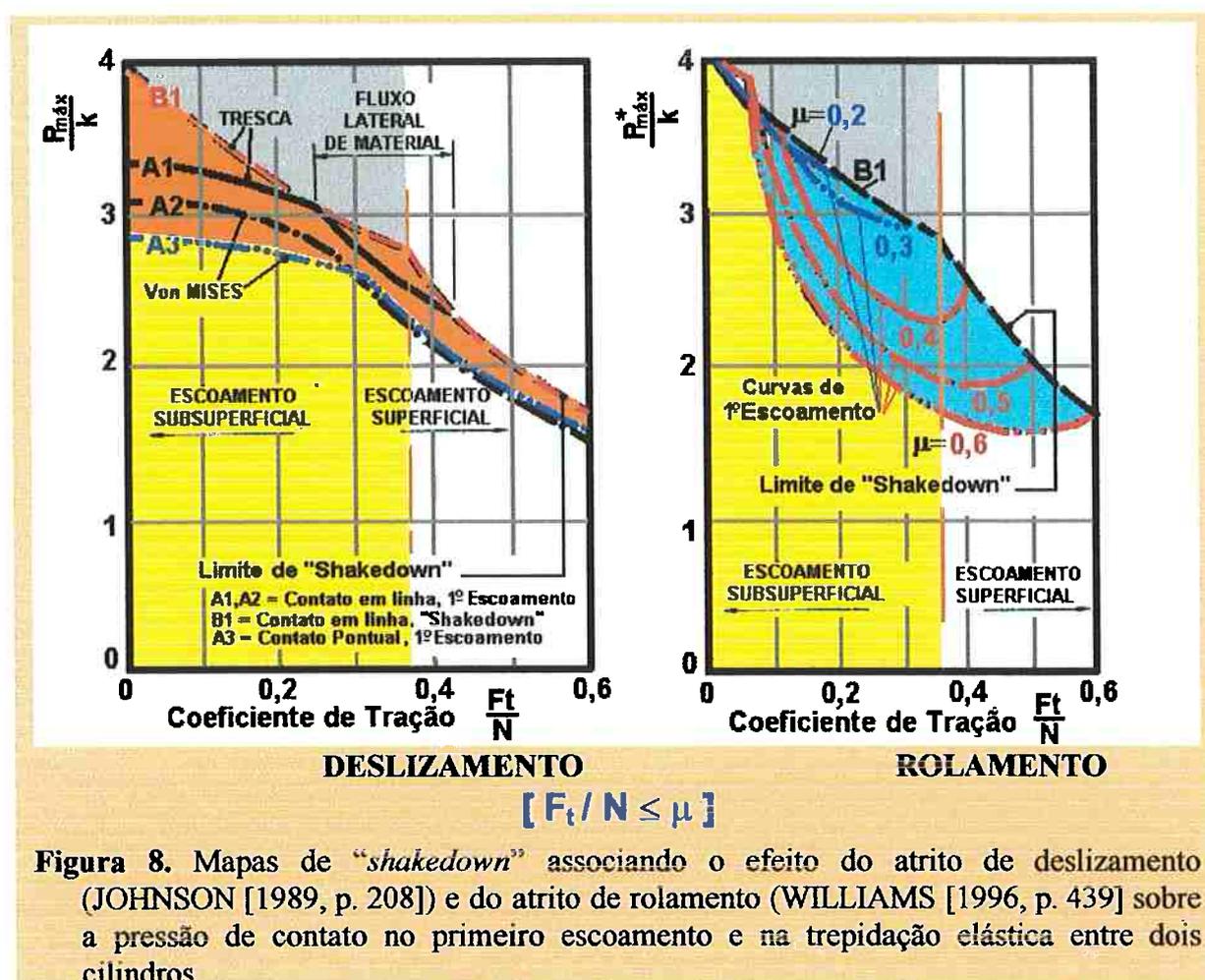
Por esta razão, utilizando o conceito de “*shakedown*” e os critérios de escoamento de Tresca e de Von Mises, a equipe de JOHNSON [1989, p. 206-8] formulou uma modelagem para predição dos regimes de escoamento subsuperficial, superficial e de fluxo axial ou lateral de um material em contato, de deslizamento ou de rolamento, em função do coeficiente de atrito.

Surgem os *mapas de shakedown*, de acordo com JOHNSON [1989] e WILLIAMS [1996], apresentados na Figura 8. No eixo das abscissas, representa-se o coeficiente de tração, dado pela relação entre as forças tangencial (F_t) e normal (N) e, no eixo das ordenadas, a relação entre a máxima pressão de Hertz (p_o)_{máx} e o

limite de escoamento ao cisalhamento simples (k). Duas condições geométricas de osculação do contato são consideradas:

- o contato pontual, como o de uma esfera e um plano (A3);
- o contato em linha, como o de dois cilindros (A1, A2 e B1).

A diferença entre as linhas A1 e A2 diz respeito aos diferentes valores encontrados para a relação entre $(p_o)_{\max}/k$ e o primeiro escoamento, de acordo com os critérios de Tresca e Von Mises, respectivamente. A linha B1 define a condição limite de regime de trepidação elástica, ou limite de “shakedown”.



De acordo com JOHNSON [1989, p. 207], em *contatos de deslizamento em linha* (entre dois cilindros), para coeficientes de atrito $\mu < 0,25$ (Tresca) e relação $4 > P_{\max}/k > 3,1$, o gráfico à esquerda na Figura 8 mostra que, muito provavelmente, o material atingirá o seu primeiro escoamento abaixo da superfície de contato, isto é, na subsuperfície, de acordo com a curva A1, atingindo o limite do regime de

“*shakedown*” na curva B1. Isso deverá acontecer porque, nessa faixa de coeficiente de atrito, a tensão máxima de cisalhamento atuará na subsuperfície (HAMILTON & GOODMAN [1966]). Sob essas condições, não há fluxo lateral de material (JOHNSON [1989, p. 208]).

Quando, no contato de deslizamento entre cilindros, o coeficiente de atrito se eleva à faixa de $0,44 \geq \mu \geq 0,25$ (Tresca), o gráfico mostra que na zona de ocorrências prováveis compreendida entre o primeiro escoamento do material e o regime de “*shakedown*” haverá fluxo lateral de material na zona de contato para relações $3,1 > P_{\text{máx}}/k > 2,3$.

Para valores elevados do coeficiente de atrito $\mu > 0,44$ (Tresca) e relações $1,5 < P_{\text{máx}}/k < 2,3$, o gráfico à esquerda na Figura 8 mostra que o primeiro escoamento de material é provável de acontecer *na superfície de contato* e não deverá haver fluxo lateral de material no contato.

O mapa de “*shakedown*” mostrado à direita na Figura 8 diz respeito a *contatos de rolamento em linha*, entre dois cilindros. Seu limite superior é extraído da condição de deslizamento B1 do gráfico à esquerda. Observa-se que para coeficientes de tração $F_t/N < 0,30$, condições regidas pelas tensões subsuperficiais (HAMILTON & GOODMAN [1966]), as curvas relativas a $\mu = 0,2$ e $\mu = 0,3$ (na cor azul), com fortes chances de o primeiro escoamento do material ocorrer na subsuperfície do contato, localizam-se muito próximas do limite das curvas tracejadas de trepidação elástica (“*shakedown*”). Esses fenômenos são prováveis de ocorrer na zona de solicitações $4,0 < P_{\text{máx}}/k < 2,9$.

Na região de baixos coeficientes de atrito, $\mu < 0,3$, portanto, as tensões subsuperficiais de cisalhamento, à direita na Figura 8, são provavelmente pouco influenciadas pelas solicitações tangenciais da superfície e há fortes chances do desenvolvimento de trincas subsuperficiais de fadiga de contato paralelas à superfície, como previstas pela teoria Hertziana.

À direita da Figura 8, nas curvas de coeficientes de atrito $\mu = 0,4$ a $0,6$, constata-se um abaixamento dos limites das curvas de primeiro escoamento e “*shakedown*”. Para uma tração com $F_t/N = 0,4$ e um coeficiente de atrito $\mu = 0,4$, por exemplo, prevê-se a ocorrência de trepidação elástica (“*shakedown*”) quando a máxima pressão de Hertz, $P_{\text{máx}}$ equivaler a cerca de duas e meia vezes do limite de

escoamento no cisalhamento simples, k , ou seja, $P_{m\acute{a}x} = 2,5.k$. Intensificando-se esse coeficiente de atrito para $\mu = 0,6$, sob idêntico coeficiente de tração, ter-se-á o primeiro escoamento na superfície e o processo de trepidação elástica para $P_{m\acute{a}x} = 1,7.k$.

A determinação do valor do limite de escoamento k de materiais aplicáveis a contatos de rolamento tem estimulado o desenvolvimento de métodos experimentais a partir da compreensão do seu significado físico. De acordo com VOSKAMP [2000], baseado em seu doutorado desenvolvido em duas décadas de pesquisas na SKF holandesa, k deve ser entendido como o limite de escoamento local do material em um contato cíclico de rolamento, ou o *limite de micro-escoamento*, como o denominou.

Esse autor constatou experimentalmente que a determinação do limite de micro-escoamento k em pistas de rolamento que utilizam o aço AISI 52100 pode ser eficazmente realizada através de um ensaio de carga incremental em combinação com termometria. Através dessa técnica, cujos resultados acham-se no gráfico *log-log* na Figura 9, pode-se observar que há uma clara transição na curva da amplitude de tensão versus o incremento da temperatura de contato, atingido o limite a que esse autor denominou de *limite efetivo de micro-escoamento*.

A combinação de carga, número de ciclos e termometria foi identificada por MEDEIROS e colaboradores [2000-a] como uma ferramenta útil na avaliação das irreversibilidades e, portanto, no regime de desgaste.

O *tempo de estabelecimento* do regime permanente da temperatura de contato cíclico de rolamento, em um mesmo par de superfícies de aço AISI 52100 foi observado como sendo geralmente menor à medida que o desgaste dos materiais em contato se acentuava e a distância de rolamento crescia cerca de uma ordem de grandeza. A Figura 10 apresenta essa tendência para superfícies de aço AISI 52100 tratado termicamente.

VOSKAMP [2000] e MEDEIROS colaboradores [2000-a] perceberam que há uma associação entre a resposta da temperatura de contato de rolamento e as irreversibilidades inerentes à deterioração do contato.

Da mesma forma que, em seres vivos, variações da ordem de 10% nas pressões sistólica e diastólica e na temperatura histórica do corpo – fácil e rapidamente medidas – têm fortes chances de detectar uma anomalia orgânica ou uma resposta do organismo a uma ou um conjunto de patologias em processo, tanto VOSKAMP quanto MEDEIROS e colaboradores buscavam meios simples, diretos, rápidos e baratos de identificar, respectivamente, *microdanos* e *degradação progressiva* nos materiais em contato.

VOSKAMP, variando a carga, correlacionou a *variação do incremento da temperatura de contato* ao que ele denominou de *limite efetivo de microescoamento do material*, ou seja, uma resposta do material a um processo quase-estático irreversível.

MEDEIROS e colaboradores [2000-a], utilizando carga constante, pista esférica de contato e adotando um nível de pressão sonora (NPS) de 120 dB como critério de final de ensaio, presumivelmente de longa duração, investigaram o comportamento da *taxa de variação da temperatura de contato no tempo*, $\partial\theta / \partial t$, desde a temperatura ambiente até o regime permanente, em diversos instantes da vida do contato, expressa pela distância de rolamento, $\partial\theta / \partial DR$, ou número de ciclos, $\partial\theta / \partial n$.

Utilizaram um fundamento acústico e um termodinâmico:

- 1) da habilidade acústica humana, desenvolvida historicamente por oficiais ferreiros (como eram denominados na Antiga Grécia, à época de Aristóteles, os cidadãos especialistas no trabalho em metais) e mecânicos, de que a iminência ou ocorrência de um colapso de componente mecânico é associada à intensificação do nível de pressão sonora (NPS) e
- 2) sob um mesmo caminho, o acúmulo de irreversibilidades dos materiais em contato pode ser detectado pela *taxa de variação da temperatura de contato*, como uma resposta do material às flutuações da resistência ao rolamento cíclico.

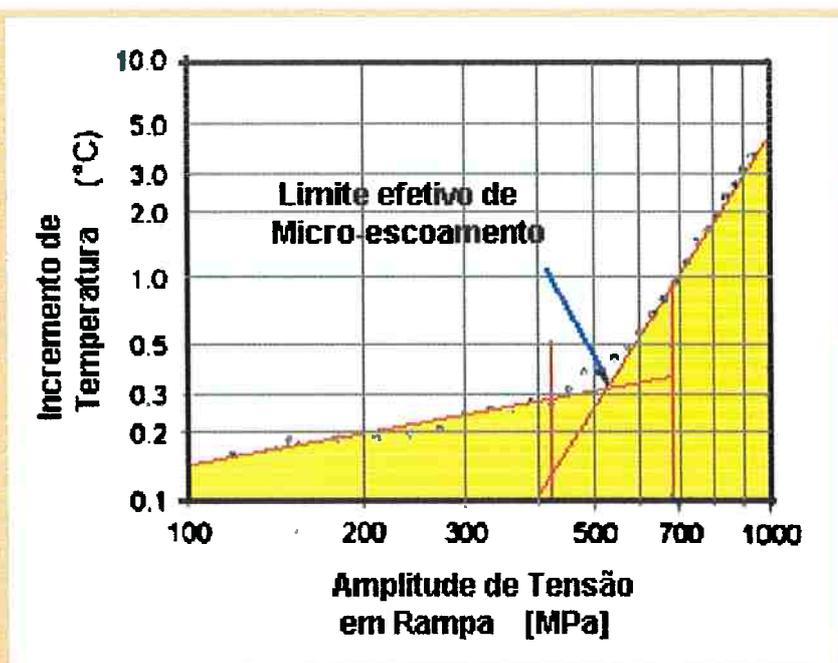


Figura 9. Determinação do limite de micro-escoamento (k) a partir da resposta do incremento da temperatura de contato de rolamento cíclico em rolamento de aço AISI 52100 (VOSKAMP [2000])

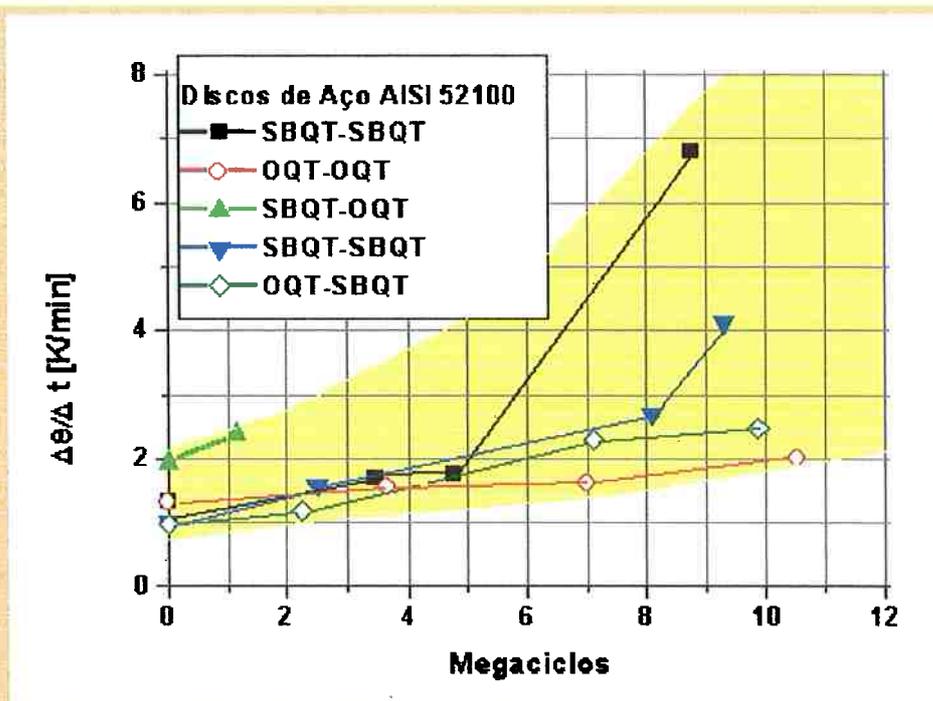


Figura 10. Avaliação da vida de contatos de rolamento cíclico a seco de Aço AISI 52100 temperado e revenido, em óleo (OQT) e banho de sais (SBQT), a partir da resposta da resistência ao rolamento pela taxa de aquecimento desde a temperatura ambiente até a temperatura de contato em regime ($P_{m\acute{a}x} = 2,23$ GPa), baseado em MEDEIROS e colaboradores [2000]

2.4. Desgaste de materiais devido ao contato cíclico

“O que é uma coisa ? É preciso ensinar que as coisas não são apenas coisas, mas também sistemas que constituem uma unidade, a qual engloba diferentes partes. Não mais objetos fechados, mas entidades inseparavelmente ligadas a seu meio ambiente...”

“O que é uma causa ? É preciso aprender a ultrapassar a causalidade linear causa → efeito. Compreender a causalidade mútua interrelacionada, a causalidade circular (retroativa, recursiva), as incertezas da causalidade (por que as coisas não produzem os mesmos efeitos ... e por que causas diferentes podem provocar os mesmos efeitos).

MORIN, Edgar [1999] **A Aprendizagem cidadã**. In: _____ A cabeça bem feita. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. 3ª. edição. p. 76-77.

2.4.1. Engenharia de projeto de superfícies de contato

A compreensão dos mecanismos de contato entre superfícies com movimento relativo entre si requer considerações aos níveis macro, micro e nano. Os desenvolvimentos tecnológicos do final do Século XX (energia, materiais, processos, instrumentação, revestimentos com filmes finos e modelagem entre os corpos) têm possibilitado ampliar a visão e os recursos para a consolidação da ciência tribológica.

Os desafios multiplicam-se, dada a complexa e crescente gama de demanda por produtos melhores, mais eficientes, mais confortáveis, mais baratos e de possível utilização em ambientes diversificados.

HOLMBERG, MATTHEWS e RONKAINEN [1998], buscando responder a esses desafios, propuseram-se a investigar a tribologia de revestimentos. É deles a análise sistêmica sintetizada no modelo da Figura 11, estabelecida como a sua base de estudo dos mecanismos de contato direcionada à formulação de uma Engenharia de Projeto de Superfícies. Embasam-na quatro subsistemas de entrada e de saída: a) Material; b) Ambiente; c) Geometria; d) Energia. A composição de cada um desses subsistemas é descrita na Figura 11.

LIM [1998] propõe a construção de mapas de desgaste que possam utilizar parâmetros *facilmente controláveis e mensuráveis na prática*. Esse autor critica a formalização da apresentação de dados de desgaste através da simples tabulação das taxas de desgaste e respectiva elucidação dos mecanismos dominantes observados sob condições operacionais de interesse. Dessa forma, ainda que possuam natureza empírica, esse autor considera os mapas capazes de proporcionar uma melhor compreensão do comportamento do desgaste. Dentre tais parâmetros, inclui

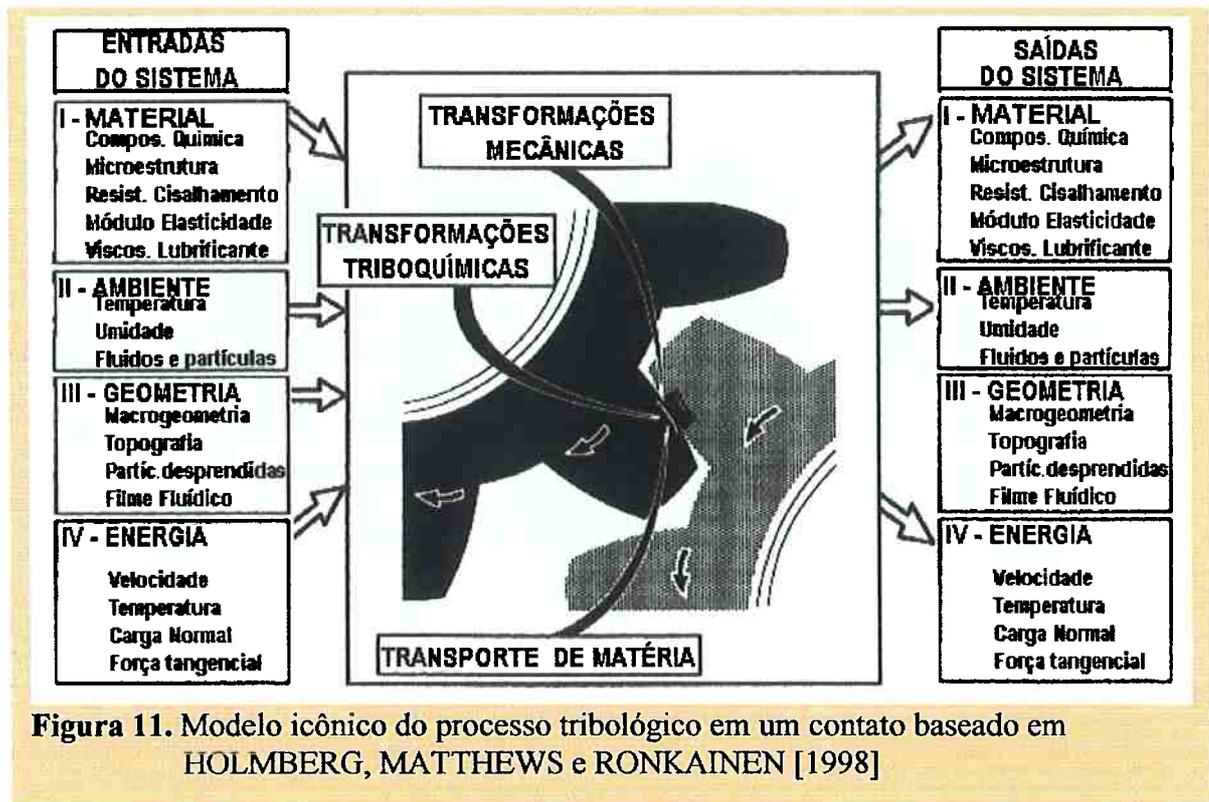


Figura 11. Modelo icônico do processo tribológico em um contato baseado em HOLMBERG, MATTHEWS e RONKAINEN [1998]

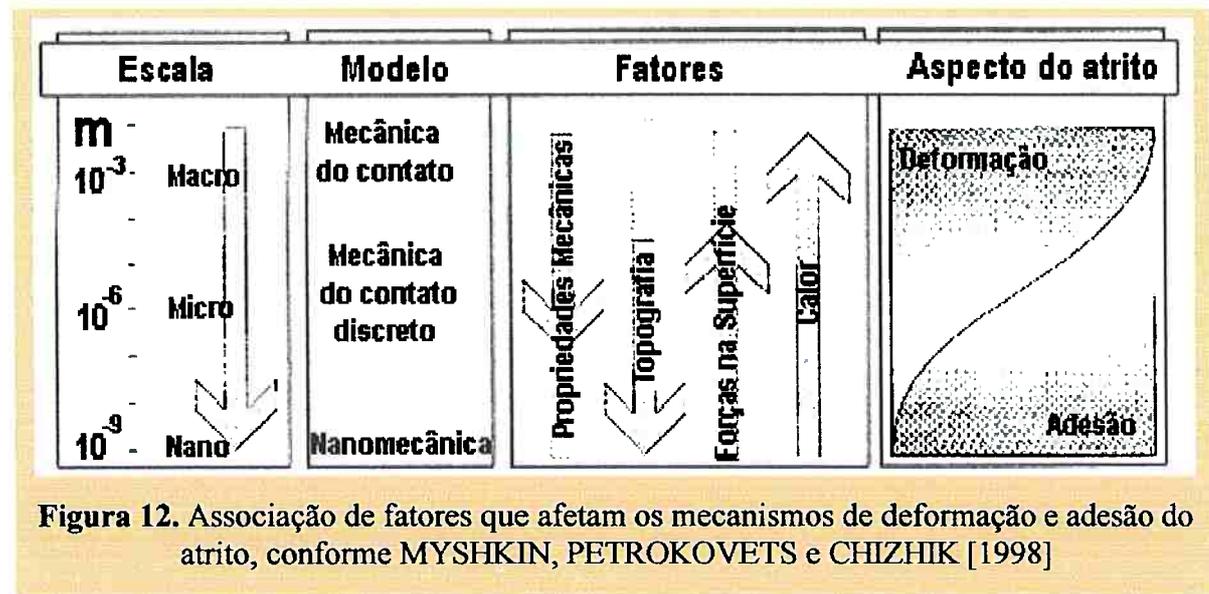


Figura 12. Associação de fatores que afetam os mecanismos de deformação e adesão do atrito, conforme MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK [1998]

- a) Pressão de contato;
- b) Velocidade;
- c) Variáveis relacionadas ao material, se necessárias.

MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK [1998] apresentam, na Figura 12, um esboço esquemático dos fatores que, em sua opinião, influenciam os

mecanismos de deformação e adesão do atrito relativamente à escala considerada e revelam sua expectativa na aplicação de Microsonda de Varredura (SPM, *Scanning Probe Microscopy*) à avaliação de *propriedades mecânicas de camadas* das superfícies em contato, correlacionando-as com medidas de nanoindentação.

Considerado o fator de escala, esquematicamente apresentado na Figura 13, esses autores destacam a sua preocupação com:

- a) a interpretação física dos dados experimentais assim gerados;
- b) a auto-afinidade entre esses dados e dados macroscópicos.

A utilização de perfilometria, mecânica e óptica, e microscopia eletrônica de varredura (SEM), como se vê na Figura 13, permite a investigação de regiões submetidas a processos de desgaste em *microcontatos* e *contatos de precisão*, cujo espaçamento entre asperezas possui dimensões mínimas de fração de micrometros [μm] e alturas mínimas de asperezas na faixa de 0,01 a 0,001 μm , relativas a *ondulação* e *microrugosidade*.

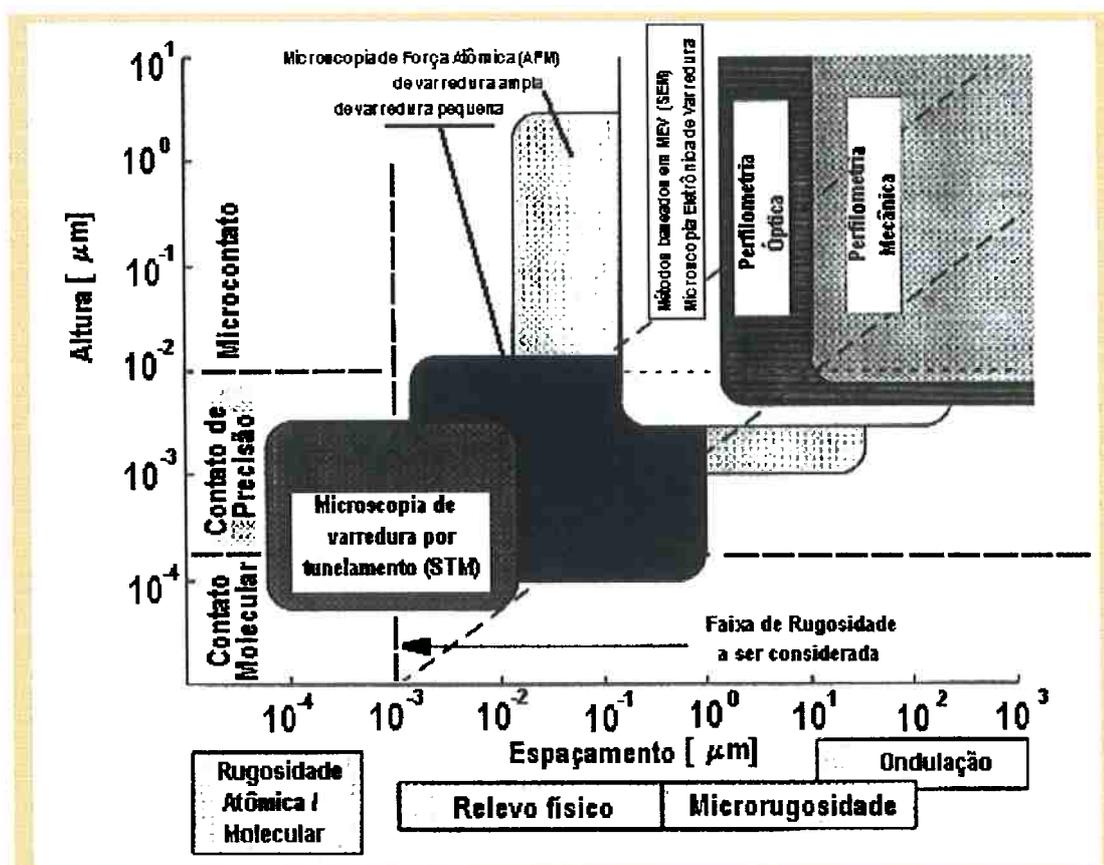


Figura 13. Recursos disponíveis (ao final do Século XX) e resolução associada à medida da altura e espaçamento de asperezas, de acordo com MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK [1998]

Através de perfilometria e microscopia eletrônica de varredura (SEM), entretanto, não há condição de se detectar danos com altura de asperezas ao nível de *contato molecular*, da ordem de 10^{-4} μm e espaçamento ao nível de *rugosidade atômica molecular*, cuja altura situa-se entre 10^{-3} μm a 10^{-4} μm . Essa dimensão justifica a utilização de microscopia de varredura por tunelamento (STM).

Além da ordem de grandeza dos mecanismos de deformação e adesão presentes em um contato tribológico, a literatura destaca a importância da avaliação da dureza e/ou microdureza dos pares em contato. Em artigo de 1998, investigando *deslizamento* entre superfícies poliméricas, BRISCOE [1998] avalia comparativamente o emprego dos métodos de esclerometria e indentação, resumidos qualitativamente na Tabela 1.

Para esse autor, nanoesclerometria e nanoindentação, ao reduzirem a escala da deformação, talvez não expressem realisticamente as interações dinâmicas entre as asperezas em contatos tribológicos reais. Destaca ainda a importância do desenvolvimento e uso de *sensores* que sejam representativos das deformações das asperezas das superfícies e forneçam dados sobre os modos de dano, a irreversibilidade medida pelo trabalho dissipado e a faixa de variação e abrangência de algumas propriedades mecânicas durante o processo (limite de escoamento e módulo de Young).

Tabela 1. Méritos relativos entre os métodos de avaliação da dureza por Indentação e esclerometria, segundo BRISCOE [1998]

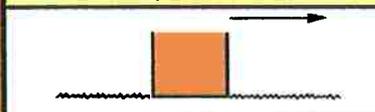
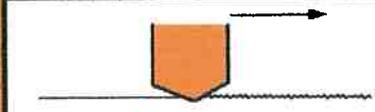
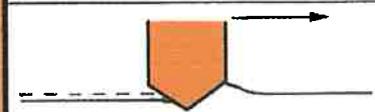
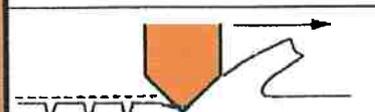
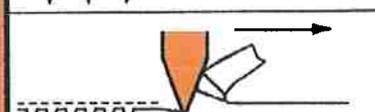
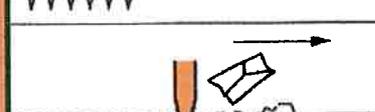
Característica	Indentação	Esclerometria
Resposta elástica	Satisfatório	Limitado
Resposta plástica	Satisfatório	Frequentemente satisfatório
Modos dependentes do tempo	Limitado, às vezes	Flexível, mas limitado
Frágil / dúctil	Emaranhado	Bom
Modos de dano	Limitado aos extremos	Subjetivo, mas efetivo
Lubrificação / Gradientes de superfície	Problemático em potencial	Sensível

A correlação estabelecida por JOHNSON [1989] entre a deformação média decorrente do contato normal, ϵ , e o ângulo de geratriz, α , de um indentador cônico

em metais, como o exposto no Quadro 4, é expressa matematicamente como ϵ proporcional a $0,2.tg(\alpha)$. Segundo BRISCOE [1998], regimes de deformação e mecanismos, como os expostos no Quadro 4, podem ser avaliados a partir de estudos de microscopia eletrônica de varredura (SEM).

STACHOWIAK [1998] elaborou um estudo de revisão a respeito da caracterização numérica da morfologia e angularidade de partículas oriundas do desgaste. Para ele, essa quantificação depende fortemente da técnica e da qualidade de imagem empregada e, através de microscopia eletrônica de varredura (SEM), em que a imagem das partículas pode ser obtida através dos modos de elétrons secundários (S.E.) ou retroespalhados (B.S.E.), podem-se constatar diferenças significativas no contorno das partículas. Influem, nesse sentido, a tensão elétrica de aceleração, a magnitude do ruído da imagem e o nível de foco, dentre outras variáveis.

Quadro 4. Mecanismos de abrasão promovidos por penetrador esclerométrico cônico e ângulos de cone correspondentes, baseados em BRISCOE [1998]

RESPOSTA		Angulo do cone α
Esquemática	Genérica	
	Elástica	180°
	Alisamento	150°
	Formação de proa dúctil	120°
	Usinagem dúctil + Rachadura	90°
	↕	60°
		Usinagem frágil
		0°

2.4.2. Mecanismos de desgaste de materiais sob contato de rolamento

“Pedra que rola não cria limo”
Adágio popular universal

2.4.2.1. Desgaste, microdeformação, adesão e aderência

Há salutares divergências de hipóteses, metodologias teóricas e experimentais, resultados e visões a respeito do *desgaste por fadiga de contato* e, não bastassem, há também divergência de nomenclatura na literatura especializada em desgaste.

O norte-americano BUCKINGHAM [1988, p. 502-8], um dos fundadores da AGMA (American Gear Manufacturers Association) e autor de um livro clássico (referendado) sobre projeto de engrenagens, reeditado há meio século, descreve cada tipo de desgaste atuante em engrenagens como: *pitting, abrasion, scoring or cutting, spalling, galling or scuffing, seizing*.

Cerca de quatro décadas após, o tribologista inglês HUTCHINGS [1992-a, p. 77-8] esclarece que os termos *scuffing, scoring, galling*, são freqüentemente associados ao desgaste severo *por deslizamento*, “mas são mal definidos”, assegura, e “seu uso varia entre os dois lados do Atlântico: no Reino Unido, *scuffing* refere-se a dano superficial localizado associado com soldagem de estado sólido local entre superfícies sob deslizamento... nos EUA, *scoring* implica em riscos por partículas abrasivas ... e *galling* representa uma forma mais severa de *scuffing*, devida à soldagem local, associada com dano superficial total” .

Este tipo de discussão sobre desgaste envolve um conceito anterior, sobre a compreensão do atrito e suas teorias – geralmente desenvolvidas para metais e relativas ao atrito de deslizamento. O trabalho de Charles Coulomb, resposta à oferta de um prêmio da Academia Francesa de Ciências em 1785 para a solução de problemas tribológicos navais e militares, fê-lo distinguir empírica e pioneiramente entre os efeitos de *adesão* e *deformação* em um contato. Esses conceitos foram formulados, expandidos e modelados por Bowden e Tabor , em Cambridge, entre os anos 1930 e 70, baseados no *mecanismo de dissipação de energia* em um contato entre superfícies (HUTCHINGS [1992-a, p. 25-30]; WILLIAMS [1996, p. 31]).

O conceito de *deformação* é bem definido. O de *adesão* suscita divergências.

DARQUE-CERETTI [1997], observa que “os cientistas anglo-saxões não fazem distinção entre a *adesão* (“*l’adhésion*” [fr.]) e a *aderência* (“*l’adhérence*” [fr.]”, utilizando em ambos os casos o termo ‘*adhesion*’ e define:

“Adesão é todo fenômeno de atração entre dois corpos limitado às interações eletromagnéticas. As atrações devido às forças de gravidade ou às forças nucleares não se enquadram nesta definição... O fenômeno de adesão pode se explicar pela fisico-química.”

“A aderência manifesta a dificuldade de separação entre dois corpos. A força de aderência mede a força necessária para a ruptura do conjunto.”

De acordo com esse autor, a *ruptura* entre dois corpos A e B, produzida por ensaios de aderência, depende da escala observada e pode ser

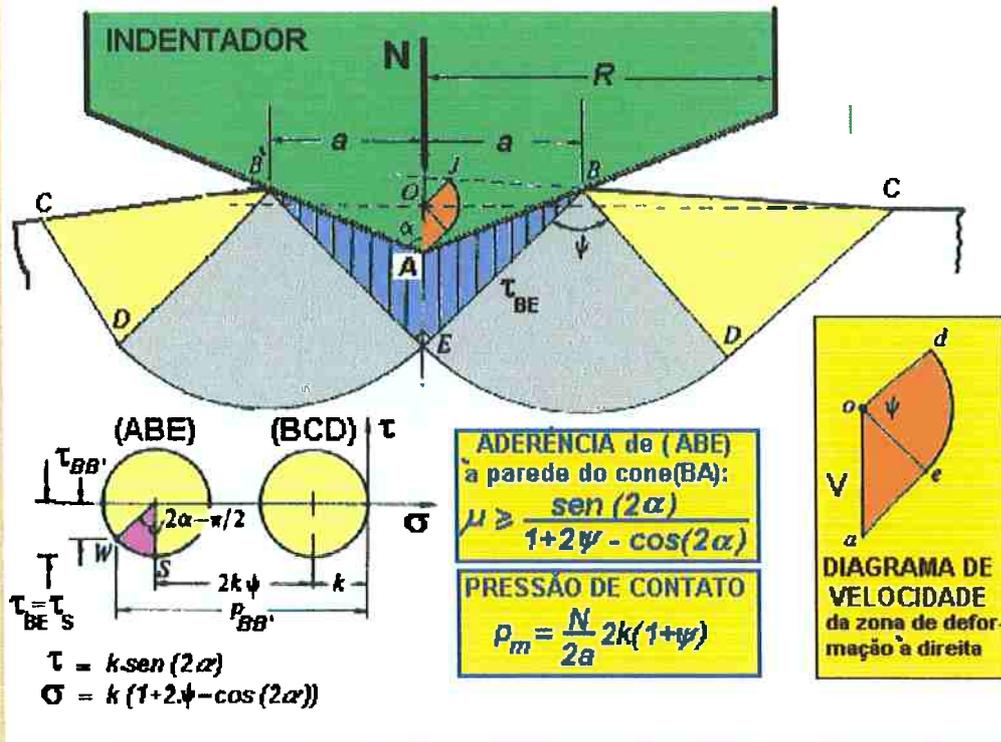
- a) *Coesiva*, quando acontece na *interfase*, a zona onde as propriedades físico-químicas (pontos de fusão e ebulição, pressão de vapor, pressão osmótica, ...) e mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, ...) são diferentes de A e de B;
- b) *Interfacial* (ou *adesiva*), quando acontece na *interface* e a coesão de cada um dos corpos se apresenta melhor que a sua adesão, não havendo resíduos de B sobre A, nem de A sobre B, após a ruptura.

O contato de sólidos rígidos perfeitamente plásticos através do processo de indentação e a influência do atrito, adesão e escorregamento no processo tem sido estudado por JOHNSON [1989: 153-69].

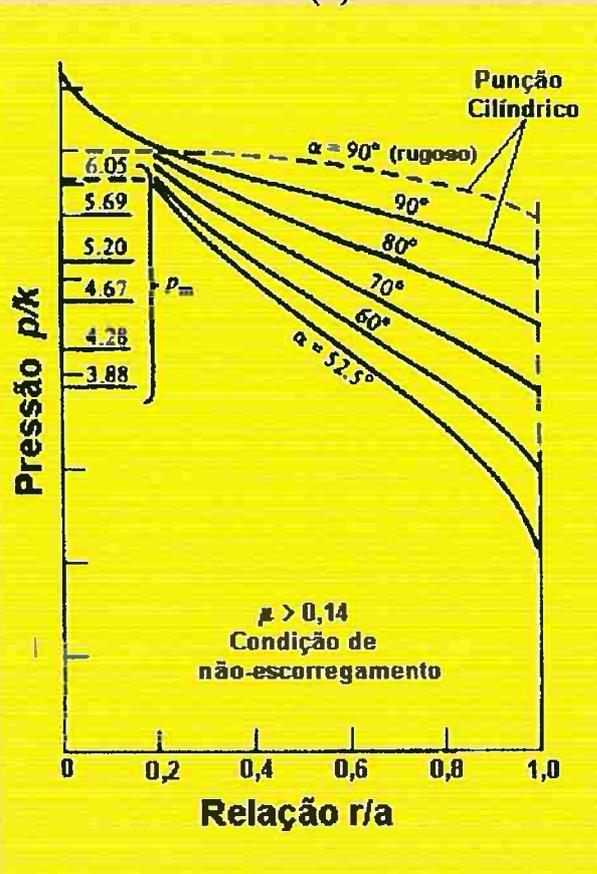
Ao penetrar em um corpo sólido, a uma velocidade de regime V , representada no diagrama de velocidade da Figura 14(a) por oa , o indentador provoca uma separação **ECD** entre a região rígida e a região que se deforma. Dependendo do coeficiente de atrito μ entre a parede do indentador e o material, a região **ABE** adere ao indentador, move-se a uma velocidade oe e desliza, a uma velocidade ae , em relação à geratriz do cone, enquanto a região **BDC**, à velocidade od , aprofunda-se paralelamente a **CD**.

Ao longo da linha de escorregamento **BE** atua a tensão de cisalhamento τ_{BE} , enquanto na geratriz **AB** do cone atuam as tensões normal $\sigma = k(1 + 2\psi - \cos 2\alpha)$ e de cisalhamento $\tau_w = k \cdot \sin(2\alpha)$, representadas no ponto S do Círculo de Mohr **ABE**, à esquerda, enquanto o da direita representa o estado de tensão na região **BCD**, *locus* de compressão uniforme, com magnitude $2k$.

Um mapa de indentações em um meio-espaco é mostrado na Figura 14(b).



(a)



(b)

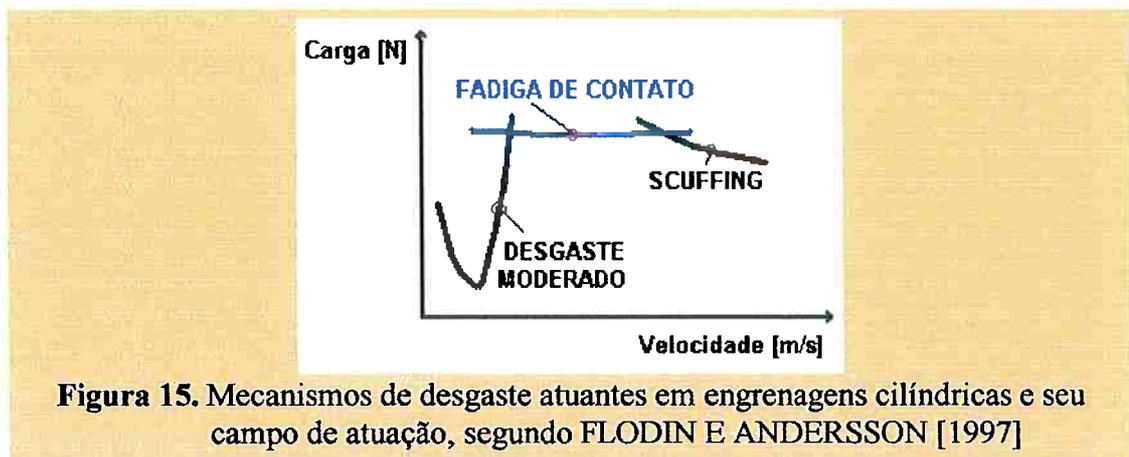
Figura 14. (a) Indentação por um cone sem deslizamento; (b) linha sólida: indentação polida; linha tracejada: indentação com aderência, baseadas em JOHNSON [1989, p. 164-9] e DARQUE-CERETTI [1997]

Um cone rígido é o indentador usado na obtenção das curvas esboçadas na Figura 14(b). As linhas tracejadas evidenciam as zonas em que se constatou aderência de material do meio-espaço plástico rígido à geratriz do cone. As linhas contínuas da Figura 14(b) representam as zonas em que as indentações mostraram-se com aspecto liso e íntegro.

JOHNSON [1997] demonstra que o efeito de forças adesivas no contato de duas esferas é aumentar o raio de contato a além do valor predito pela teoria de Hertz. Segundo ele, as conseqüências da aplicação de forças tangenciais a contatos adesivos ainda não são bem entendidas, já que essas pesquisas prosperaram a partir do último lustro do Século XX, em que a nanotribologia incorporou a microscopia de força atômica (AFM) e aparelho de força de superfície (SFA), em que cilindros cruzados de mica clivada ou superfícies semelhantes são comprimidos um contra o outro.

Na Figura 6 (página 20) apresentou-se o mecanismo de atuação da força de tração na zona de contato de um par de dentes de engrenagens cilíndricas. A Figura 15 ilustra a visão sintética de FLODIN e ANDERSSON [1997] relativa aos limiares inferiores dos regimes de desgaste atuantes devido a esses contatos, considerados isolada e simplificada como dependentes das solicitações carga-velocidade e por eles classificado em três regimes: (a) desgaste *moderado*; (b) desgaste por *fadiga de contato*; (c) desgaste por “*scuffing*”.

A inflexão na curva de desgaste moderado da Figura 15 é atribuída à geração de filme de óxidos e respectiva capacidade lubrificante dessa camada presente na superfície de contato dos dentes de engrenagem para um certo conjunto de combinações entre carga e velocidade.



2.4.2.2. Mecanismos metalúrgicos

A predição de falha por fadiga de contato e a compreensão dos mecanismos nela interagentes têm desafiado mecânicos e metalurgistas ao longo do tempo. Mas foi um estatístico, WEIBULL [1951, 1962], quem justificou esse tipo de dificuldade e a associou à ocorrência de tensões extremamente elevadas concentradas em pequenos volumes do material, cujas propriedades mecânicas, ele as considerou *aleatórias por natureza*. Por essa razão, julgava a etapa experimental relativa à consecução de dados de fadiga de contato indispensável à complementação e evolução da base teórica já desenvolvida.

LITTMAN E WIDNER [1966], apesar de reconhecerem que os “*mecanismos da fadiga de contato não são bem compreendidos*”, enumeram como causas desse tipo de falha :

- a) *Presença de inclusões* (frequência e natureza de óxidos ou outras inclusões duras);
- b) *Concentração geométrica de tensões* (grau de osculação entre os sólidos em contato, desalinhamentos e deflexões das superfícies decorrentes do seu comportamento dinâmico associado ao regime de escoamento (turbulento, de Couette etc.) e espessura do filme lubrificante);
- c) *Origem em superfícies pontuais* (contatos localizados decorrentes da relação entre a espessura do filme lubrificante e as asperezas, flutuações na viscosidade do filme, relação deslizamento e rolamento, magnitude da força tangencial);
- d) *Pite (pitting [ing.]) superficial* (causado pelos efeitos dos contatos entre as asperezas das superfícies, principalmente no “*running-in*”, pelas pressões vacuométricas na interface entre o filme lubrificante e os materiais, pela afinidade química entre o lubrificante, seus contaminantes e os materiais);
- e) *Falha subsuperficial* em componentes cementados (causada pelas solicitações termomecânicas cíclicas atuantes entre a camada tratada e o núcleo e sua resistência, sob a influência da espessura, homogeneidade e porosidade dessa camada e raio de curvatura dos corpos em contato).

A fadiga de contato se traduz, no material, no aparecimento de transformações microestruturais ou “decoesões” (“*decohesion*” [ing.]), mais ou menos localizadas, que conduzem ao dano das superfícies. Nos aços usados em rolamentos, um mecanismo comum a essas transformações é a migração de carbono por efeito das tensões cíclicas, correlacionando-se com a modificação das propriedades mecânicas do material. O fenômeno é acelerado na circunvizinhança de inclusões, provocando sobretensões localizadas. As decoesões são atribuídas à superação do limiar de compatibilidade entre o campo de tensões a que se submete o contato, as flutuações no atrito - com reflexo direto na posição variável de incidência da máxima tensão de cisalhamento - e o comportamento do material (GRAS e INGLEBERT [1998]).

Uma das evidências da fadiga de contato referendada na literatura pertinente por TALLIAN [1992-a, 1992-b] e DUMONT [1997, p. 29], é a presença de danos identificados nos contatos:

- i) *Lascamento* (*spalling* [ing.], *écaillage* [fr.]), onde os ciclos termomecânicos subseqüentes de deformações plásticas e encruamentos induzem a nucleação e propagação de trincas no campo de tensões hertzianas e promovem a formação de crateras macroscópicas;
- ii) *Microlascamento* (*surface distress* [ing.], segundo DUMONT também reportado como *peeling*, *micro-spalling*, *delamination wear*, *micro-pitting*, *fatigue wear* [ing.], *micro-écaillage* [fr.]), onde os danos têm ordem de grandeza similar à do perfil de rugosidade superficial, além do contato apresentar superfícies lustrosas.

De acordo com CHENG e colaboradores [1994], as duas etapas seqüenciais constituintes do principal mecanismo de desenvolvimento de trincas por fadiga de contato são caracterizadas, respectivamente, por:

- i) *uma elevada concentração de tensões* cisalhantes, associada a microdeformações plásticas em torno de micro-heterogeneidades ou defeitos do material, induz a um acúmulo local de discordâncias nos corpos em contato, provocando o início de microtrincas, que pode surgir na superfície ou na subsuperfície, a uma profundidade rasa ou profunda;
- ii) *um carregamento cíclico* solicitante e inferior à tensão de ruptura do

material provoca propagação de microtrincas, cuja taxa de evolução depende do comportamento de cada material em contato, do campo de tensões aplicados e das peculiaridades dessas microtrincas.

LITTMAN e WIDNER [1966] mostraram que nas regiões sujeitas às máximas tensões subsuperficiais podem ser constatadas variações na microestrutura, algumas delas afetando a matriz em geral, nos casos de pistas de mancais de rolamentos, enquanto outras são bastante localizadas, como as que têm a aparência de *asas de borboleta* quando examinadas na seção transversal paralela à direção de rolamento e perpendicular à área de contato. Segundo eles, Denning e Rice, após seus ensaios de fadiga, em 1963, constataram a presença de borboletas em torno de inclusões de partículas não-metálicas na matriz de aço de rolamento.

Segundo VOSKAMP [1985, 1996], as regiões de coloração escura (*der, dark etching region*) e as de coloração branca (*wer, white etching region*) surgem no aço de rolamento, para conjuntos de combinações de temperatura de contato, pressões de Hertz e número de ciclos sob tensão. Ele credita o surgimento das regiões *der* às micromigrações de átomos de carbono provocadas por movimentos de discordâncias. VOSKAMP [1997, 2000] ressalta a importância da temperatura de contato e pressão de Hertz sobre as tensões residuais e o tipo de “*spalling*”.

NÉLIAS e colaboradores [1998] citam que o principal mecanismo de fadiga de contato em aços de rolamento iniciada na subsuperfície - zona hertziana - advém do surgimento e propagação das microtrincas em torno de inclusões, sejam de óxidos - as mais severas - sejam de carbonetos ou nitretos, sob o efeito de incompatibilidades entre a sua deformação e a da matriz martensítica.

Ao longo dos ciclos, em função da magnitude, direção e sentido da pressão de contato, quando atingido um limite crítico de densidade de discordâncias, podem surgir microtrincas sob a forma de fase branca, com a aparência de uma borboleta.

Uma discussão consolidada relativa a danos em rolamentos comerciais com pistas de aço, geralmente AISI 52100 termicamente tratados, diz respeito à possível associação entre as microestruturas bainíticas e martensíticas, os mecanismos de desgaste e o surgimento de microtrincas anteriormente ao tratamento térmico, ilustrada nas Figuras 16(a), (b) e (c).

AKBASOGLU e EDMONDS [1990], utilizaram três esquemas diferentes de tratamentos térmicos para os aços AISI 52100, antes de submetê-los a ensaios de fadiga de contato de rolamento:

- a) Austenitização a 840 °C por 20 minutos, resfriamento em óleo e revenimento a 175 °C, por 1 hora, obtendo *martensita dura* (785 HV);
- b) Austenitização a 840 °C por 20 minutos, resfriamento em óleo e revenimento a 250 °C, por 1 hora, obtendo *martensita mole* (710 HV);
- c) Austenitização a 840 °C por 20 minutos, tratamento em banho de sais a 250 °C, por 40 minutos, resfriamento ao ar, obtendo *bainita* (710 HV).

De acordo com AKBASOGLU e EDMONDS [1990], danos nas pistas de rolamento, lubrificadas por óleo mineral, resultaram em pites na bainita (a), iniciados na superfície após vidas longas, e pites na martensita dura (b), iniciados na subsuperfície e associados a vidas curtas.

O *Metals Handbook*, v.9, salienta processos de descarbonetação (áreas brancas) do aço AISI 52100 ao longo de *trincas vinculadas a veios* Fig. 16(c), em contraste à superfície não descarbonetada: a trinca, observada após martensita resultante de austenitização, resfriamento em água e revenimento, antecede ao tratamento.

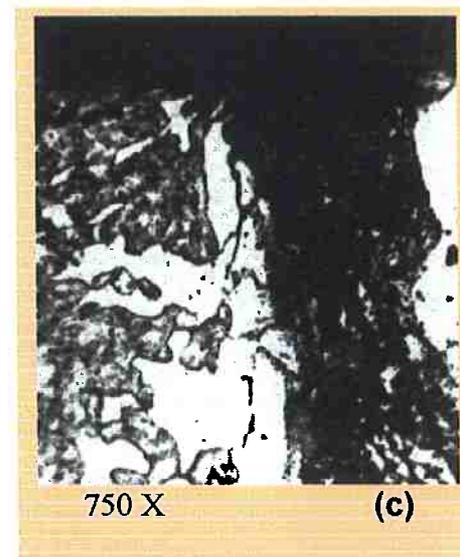
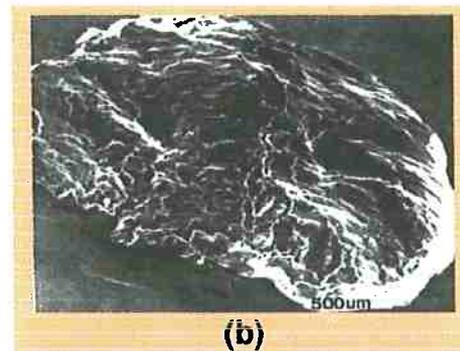
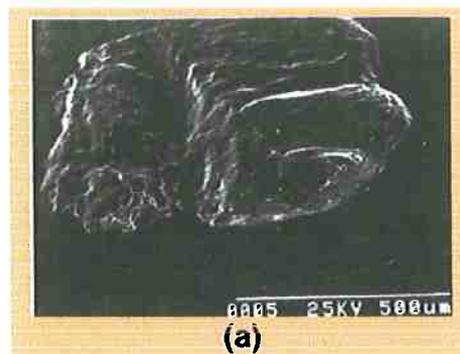


Figura 16. Aço AISI 52100: 1) pites de fadiga de contato de rolamento, microestrutura bainítica (a) e martensítica dura (b), após ensaios em óleo mineral (AKBASOGLU e EDMONDS [1990]); 2) descarbonetação, áreas brancas (c) ao longo de trinca precedente à martensita após têmpera (água) e revenido [ASM, Metals 9, p. 196]

2.4.2.3. Mecanismos geométricos e operacionais

“O ovo revela o acabamento/ a toda mão que o acaricia,/ daquelas coisas torneadas/ num trabalho de toda a vida./ E que se encontra também noutras/ que entretanto mão não fabrica:/ nos corais, nos seixos rolados/ e em tantas coisas esculpidas/ cujas formas simples são obra/ de mil inacabáveis lixas/ usadas por mãos escultoras/ escondidas na água, na brisa./ No entretanto, o ovo, e apesar/ da pura forma concluída,/ não se situa no final:/ está no ponto de partida.”

MELO NETO, João Cabral de [1920-1999] O ovo de galinha. In: _____ [1968] Poesias Completas. Rio de Janeiro, Sabiá. p. 64-66.

O Quadro 5 mostra uma contribuição de PRONIKOV [1981, p. 122-3] em relação ao agrupamento e classificação de pares tribológicos de acordo com as *condições* e os *tipos de contato*. Há duas *condições de contato*: *invariáveis* e *variáveis*. Há dois *tipos de contato*: *contatos do tipo I* e *contatos do tipo II*.

Quadro 5 - Classificação de pares tribológicos segundo as condições de desgaste, de acordo com PRONIKOV [1981, p. 123]

TIPO	Condições de Contato Invariável		Condições de Contato Variável		
	1º grupo	2º grupo	3º grupo	4º grupo	5º grupo
I					
II					
TIPO I	Peças com desgaste na direção x-x ou guias com pouco desgaste		II — Peças auto-alinhadas		

Nos contatos do *tipo I*, o desgaste geralmente é unidirecional e de baixa magnitude e os pontos se locomovem em uma *trajetória praticamente idêntica*. Nos contatos do *tipo II*, as *peças em contato são auto-alinhadas* e suas posições relativas são uma função do desgaste, pois dependem da forma das superfícies em contato, merecendo assim uma maior atenção do projetista e exigindo mais dos materiais

adotados, das condições de lubrificação, operação e manutenção (PRONIKOV [1981, p. 122-3]).

A determinação quantitativa do desgaste deve incorporar a magnitude da pressão hertziana de contato (média ou máxima), a análise da geometria das superfícies desgastadas, os mecanismos e a quantidade de desgaste. GRAS e INGLEBERT [1998] destacam a importância do conhecimento pleno do contato ligado à sua concepção, construção e funcionamento, interagentes diretamente na vida à fadiga de contato das superfícies envolvidas.

Superfícies novas, rugosas, com defeitos de forma como ondulações ou submetidas aos contaminantes do lubrificante são as deflagradoras do início de microtrincas superficiais geralmente em torno de 10^5 ciclos, segundo NÉLIAS e colaboradores [1998]. Esses autores fazem menção à ondulação da superfície, gerando microlascamentos (*microspallings*) de acordo com o modo II da mecânica da fratura, por cisalhamento. Destacam também que o carregamento cíclico elevado pode se constituir em fator importante na taxa de propagação de trincas. A concentração de inclusões pode atuar retardando ou acelerando essas taxas.

BET [1999, p. 54] demonstrou que, na medição de rugosidade (e ondulação) de uma peça, quatro são as questões básicas:

- a) Com qual equipamento medir ?
- b) Quais parâmetros utilizar ?
- c) Em qual direção medir ?
- d) Em quantos pontos ?

A resposta a cada uma dessas questões é complexa e BET [1999] discute cada conjunto de respostas e propõe uma metodologia direcionada à quantificação da textura superficial por meio de sondas mecânicas e ópticas tipo seguidor.

A norma DIN 4760, 1982, apresenta seis tipos de diferentes desvios de forma, relativamente ao perfil ideal da superfície de um componente mecânico, expostos na Figura 17. A textura de uma superfície, na óptica da Metrologia Mecânica convencional, diz respeito aos desvios de forma de segunda à quinta ordem. Engloba, assim, a medição da rugosidade e da ondulação. (BET [1999, p. 8]).

O sexto desvio de forma, como mostra a Figura 17, diz respeito ao reticulado cristalino do material e ainda fogia ao escopo da Metrologia Mecânica de superfície ao final do Século XX. Entretanto, em um par tribológico de rolamento cíclico seco, o comportamento cinemático e dinâmico do contato, em cada instante de tempo, é influenciado, em maior ou menor grau, por cada um desses seis desvios de forma e não apenas pelos cinco abordados pela Metrologia convencional.

Tais desvios, originalmente oriundos dos processos cumulativos de produção e beneficiamento dos materiais, manufatura e tratamento térmico dos componentes, submeter-se-ão continuamente à ação do contato e respectivo desgaste das superfícies rolantes, através de seus diferentes mecanismos interagentes.

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 Retilidade	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>	ONDULAÇÃO	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 raios	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 postigo), 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	

Figura 17. Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760, adaptado de BET [1999, p. 15]

A Figura 18(a) apresenta a família **Rk** de parâmetros híbridos de avaliação da topografia superficial e, à direita, a curva de Abbott, ou curva de relação de material [WHITEHOUSE, 1994, p. 16-17; p. 947]. Um parâmetro é híbrido quando contém informações relativas ao espaçamento, altura de picos e profundidade de vales de asperezas. Na Figura 18(b), um exemplo comparativo entre medidas Rk e Ra.

De acordo com as definições de BET [1999],

Rk = Profundidade da rugosidade central = “*Core roughness depth*” [ing.] = Profundidade da rugosidade com exceção dos picos e vales ou a altura da região de rugosidade central.

Rpk = Altura reduzida dos picos = “*Reduced peak height*” [ing.] = Caracteriza a porção do perfil que está acima da região de rugosidade central. É a altura da região de picos.

Rvk = profundidade reduzida de vales = “*Reduced valley depth*” [ing.] = caracteriza a porção do perfil que está abaixo da região de rugosidade central. É a altura da região de vales.

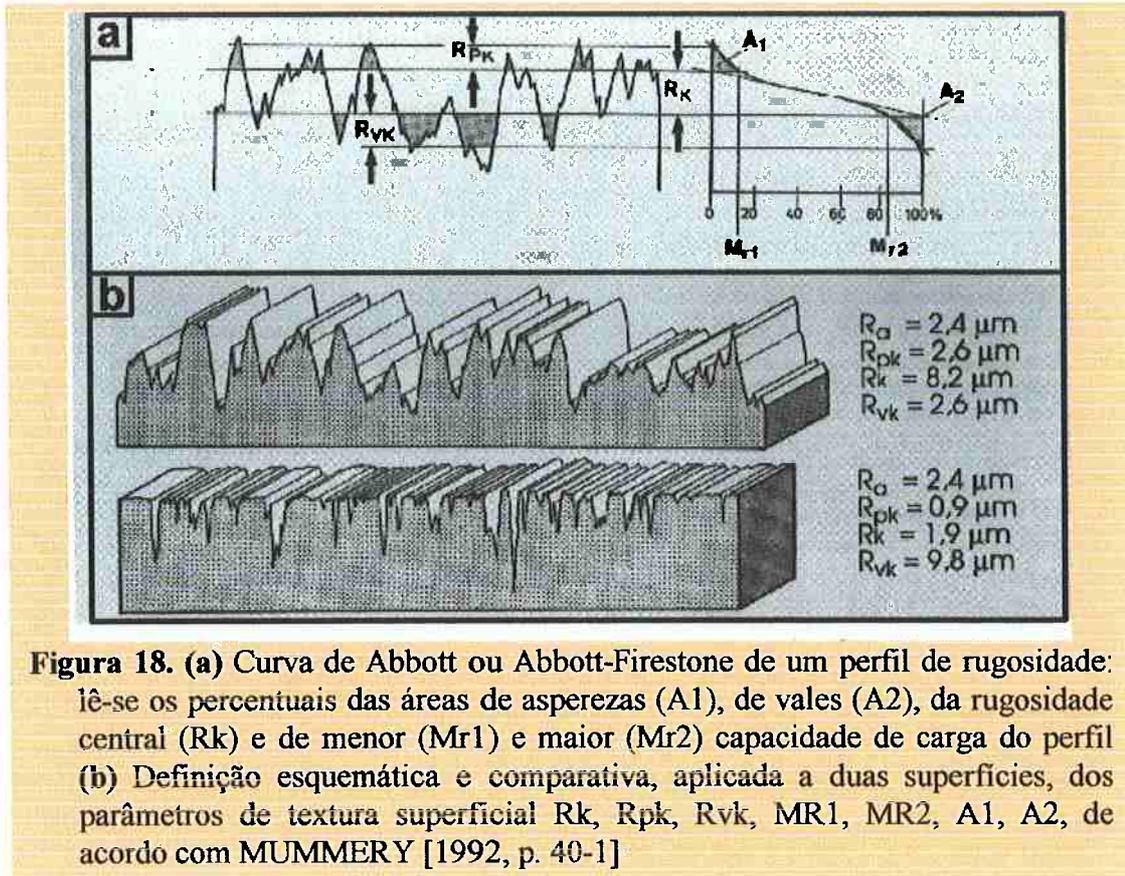
Mr1 = percentual de material correspondente à interseção entre a linha superior da região de rugosidade central e a curva de Abbott, ou seja, o *menor percentual de suporte* da região central.

Mr2 = percentual de material correspondente à interseção entre a linha inferior da região de rugosidade central e a curva de Abbott, ou seja, o *maior percentual de suporte* da região central.

A1 (vol.) = volume correspondente à região de picos, compreendida entre a curva de Abbott e a linha superior da região de rugosidade central.

A2 (vol.) = volume correspondente à região de vales, compreendida entre a curva de Abbott e a linha inferior da região de rugosidade central.

Dentre as proposições de BET [1999, p. 54], incluem-se as de se iniciar o processo de caracterização da textura pelo pior grau de acabamento da superfície investigada, utilizando-se os parâmetros verticais simples de rugosidade média (Ra), alturas média (Rz[DIN]) e máxima (Rmax) de pico a vale e profundidade máxima da rugosidade (Ry).



MUMMERY [1992] destaca a importância de se utilizar a família Rk quando se pretende avaliar o contato interativo entre duas superfícies, estimar os limites da espessura do filme de óleo ou o desgaste entre pares tribológicos.

Na prática de Engenharia com lastro em valores tecnológicos competitivos, essas questões não podem ser relevadas a plano secundário. Por outro lado, é inviável, a cada instante de tempo em um contato de rolamento cíclico entre componentes mecânicos, paralisá-lo para inspeção e medida dos seus desvios de forma.

WHITEHOUSE [1994, p. 866], discutindo fadiga e geometria superficial, comenta que “em termos teóricos parece óbvio que a Mecânica da Fratura deva ser central na discussão”, uma vez que em algum momento da vida de um componente estrutural, trincas ou falhas apresentar-se-ão na estrutura da sua superfície.

Do ponto de vista do processo operacional durante o contato cíclico entre duas superfícies, é importante o mecanismo de formação e desprendimento de partículas (“debris”) de desgaste. HIRATSUKA [1995] conjectura que

“se pudessemos descobrir a relação entre partículas de desgaste e os estados reais de atrito e desgaste, poderíamos diagnosticar esses estados de atrito e

desgaste e efetuar monitoração em tempo real a partir de observação de partículas de desgaste... Necessitar-se-ão de uma (modelagem) matemática para a caracterização de tais atributos de partículas de desgaste (...), bem como uma caracterização das propriedades estatísticas das partículas de desgaste que hajam sido geradas em massa. ”

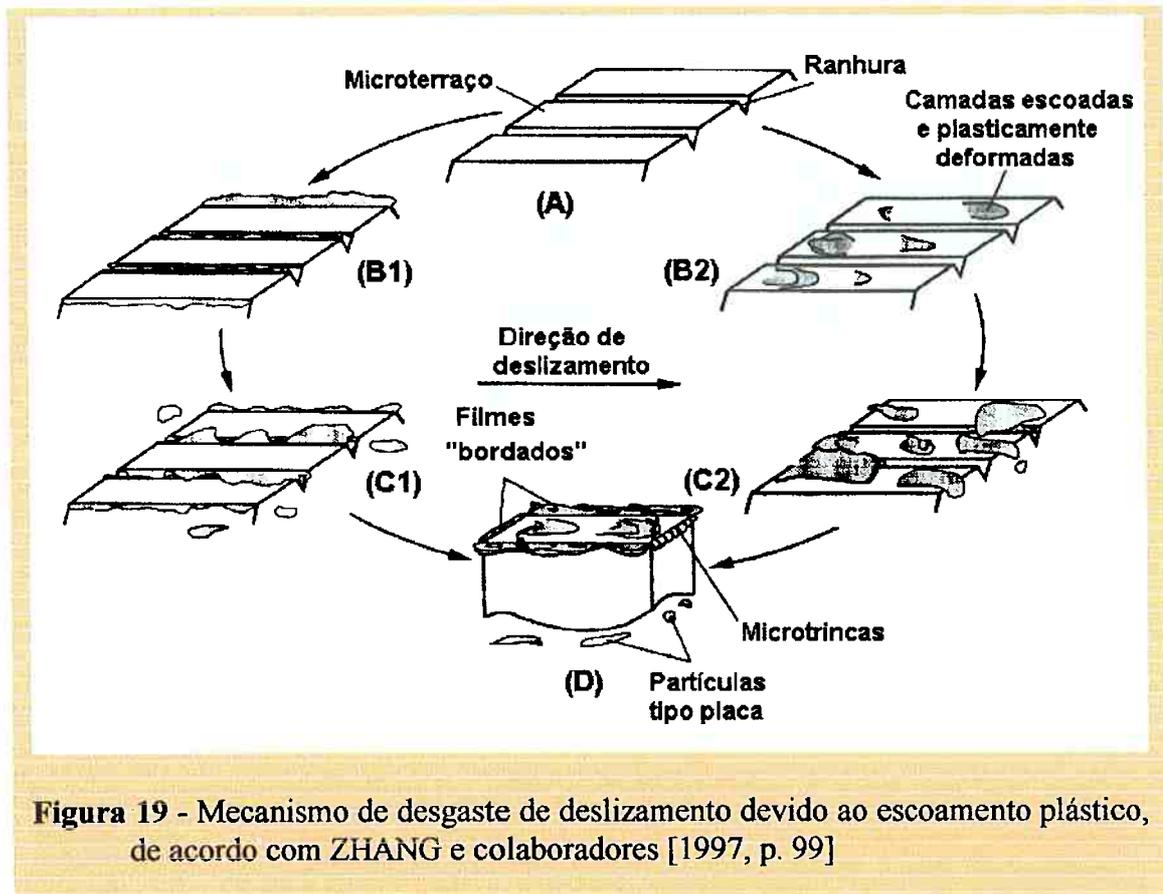
ZHANG, LU e FRIEDRICH [1997] reconhecem que as partículas de desgaste (“*debris*”) contêm extensiva gama de informações sobre desgaste e atrito de materiais, relevante para a pesquisa tribológica. Eles ensaiaram pinos de polímero (poliesterestercetona, “*PEEK*”) contra disco estacionário de aço DIN 100Cr6, HRC 62, velocidade $V = 1$ m/s, e pressões Hertzianas máximas de contato, $p = 1, 2, 3, 4, 6, 7$ e 8 MPa e, a cada duas horas, paravam o ensaio para coletar as partículas oriundas das etapas de desgaste.

De acordo com esses autores, diferentes morfologias das partículas de desgaste devem resultar de distintos mecanismos de desgaste. Relatam que, em toda a faixa ensaiada de $p.V$, tais partículas, cujas bordas e superfícies eram irregulares como um indicativo de estiramento plástico e fusão da resina durante sua formação, assumiam forma de placa, cilindro, bastonete, placa + bastonete ou bloco. Nos valores superiores de $p.V$, registraram-se, adicionalmente, partículas em forma de leque, que poderiam se inserir em um quadrado de 0,7 mm de lado.

Esses autores asseguram que a pressão de contato limite para os mancais de polímeros termoplásticos é definida pela resistência à fluência (“*creep*”) e não pelo seu desempenho ao desgaste. Investigando o *desgaste por deslizamento* de pinos de polímero em discos de aço, atribuíram-no aos mecanismos seguintes:

- a) **microcorte abrasivo** por formação de proa (“*ploughing*”), associado às morfologias de partículas granulares tipo bastonete e bloco. Na superfície do corpo de menor dureza, esse tipo de desgaste associa-se a uma série de sulcos paralelos, com várias profundidades e larguras;
- b) **delaminação por fadiga de contato**, associada à morfologia de partículas granulares tipos placa e placa+bastonete. A nucleação e coalescimento de trincas subsuperficiais, devidas à deformação por cisalhamento da superfície mais mole induzida pela tração das asperezas mais duras, culminam o processo de geração de placas;

- c) *fadiga de contato severa*, associada à morfologia de partículas tipo leque, cuja fractografia da superfície do pino de polímero PEEK (poliesterestercetona), revelou linhas extensas de escoamento em forma de V (“*chevron*”) na propagação da trinca;
- d) outros mecanismos de desgaste, como um *mecanismo de escoamento plástico*, a ocorrência de placas finas, não foram convincentemente explicadas pelos modelos acima, pois deveria haver alguma evidência de fratura dúctil em seus fragmentos. A hipótese é que, durante o período de *running-in*,
- d1) algumas asperezas são deformadas e outras submetidas a colapso, gerando assim *microterraços* delimitados longitudinalmente por sulcos paralelos;
 - d2) o contato pino-disco muda da forma aspereza-aspereza para aspereza-plano, promovendo flutuações nas tensões normal e tangencial e no calor gerado pelo atrito entre as superfícies;
 - d3) inicia-se nos microterraços, assim, uma deformação plástica por cisalhamento e escoamento, que pode assumir dois mecanismos, a saber:
 - d3.1) *extrusão* das camadas deformadas através de ambos os lados de alguns microterraços na direção *perpendicular ao deslizamento* (Figura 19-B1);
 - d3.2) *deformação plástica por cisalhamento e escoamento* após carregamento concentrado cíclico no topo dos microterraços (Figura 19-B2). Camadas finas deformadas alojam-se nas ranhuras e coalescem (Figuras 19-C1, C2) e, após um certo tempo:
 - d.3.2.1) um grupo se fragmenta devido a concentração de tensões ou defeitos internos e são excluídas do contato;
 - d.3.2.2) outro grupo é continuamente extrudado em decorrência dos filmes “bordados” em torno das arestas do pino (Figura 19-D), parte dos quais apresentam microtrincas quando algumas asperezas do disco de aço executam uma raspagem no pino. Geram-se partículas de desgaste em forma de placas quase-quadradas e nervuradas.



Segundo HUTCHINGS [1992-a, p. 110], a maioria das partículas desprendidas de movimentos relativos com amplitude micrométrica (*"fretting"*), é constituída por óxidos.

SPIKES [1986] especula que há um *mecanismo de extrusão* na formação de partículas tipo microplacas (*"platelets"*) de desgaste por fadiga de contato e afirma que não está completamente esclarecida a maneira como tais partículas (*"debris"*) são formadas a partir das superfícies das pistas com trincas inclinadas.

NEALE [1997, p. D14] apresenta, como testemunhas da natureza do desgaste em processo por fadiga de contato, morfologias de partículas (*"debris"*) oriundas de contatos metálicos cíclicos de rolamento puro e rolamento com deslizamento, Figura 20.

Apresentam-se partículas (“debris”) desprendidas devido à ação do desgaste de rolamento ou de rolamento combinado com deslizamento, como o verificado no contato de dentes de engrenagens. As Figuras 20 a, b, c, d, são descritas por NEALE [1997] como exemplos de tais partículas.

Na Fig. 20(a) apresentam-se partículas atribuídas às superfícies tensionadas e formadoras de pites, através do mecanismo de *microspalling*. As partículas são lamelares planas, têm tamanho máximo de 100 μm e uma relação entre comprimento e espessura da ordem de 10:1.

Na Figura 20(b), as partículas assumem forma esférica de diâmetros inferiores a 3 μm e ocorrem em mancais de rolamento, após microtrincas de fadiga de contato.

Na Figura 20(c), as partículas resultam do contato de rolamento, são lamelares planas, têm tamanho na faixa de 20-50 μm e relação entre comprimento e espessura da ordem de 30:1.

A Figura 20(d) diz respeito a partículas desprendidas dos flancos de dentes de engrenagens, com proporções entre o comprimento e a espessura da ordem de 4:1 a 10:1, com dimensões como 20x2 μm^2 e resultam da combinação entre a fadiga de contato e estados de tensão de tração na zona de contato entre os dentes.

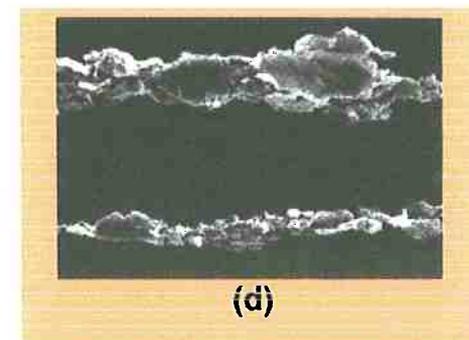
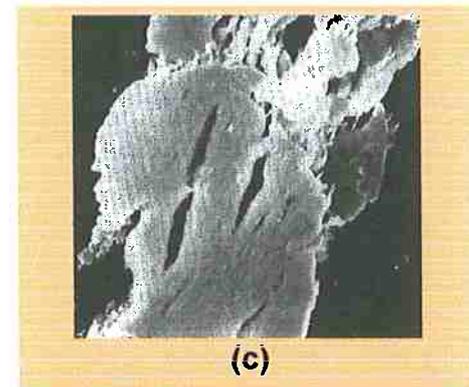
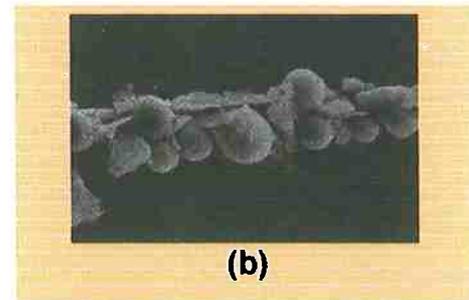
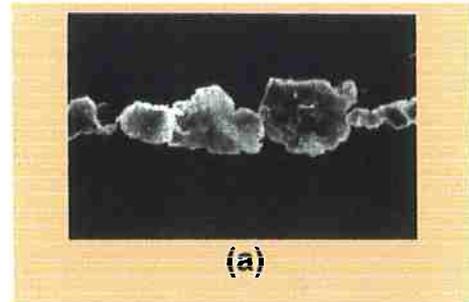


Figura 20. Partículas (“debris”) liberadas em decorrência do desgaste por fadiga de contato de rolamento (a, b, c) e uma combinação de rolamento e deslizamento em dentes de engrenagens (d), conforme NEALE [1997, p. D14]

2.4.2.4. Mecanismos hidrodinâmicos

O campo de pressão na região de contato é influenciado pelo regime de lubrificação decorrente da presença de um filme fluídico entre os corpos rolantes.

Caracterizam esse filme:

- a) Composição química, concentração, viscosidade, temperatura, massa específica, pH, pressão, velocidade, vazão, teor e natureza de contaminantes do fluido;
- b) Relação entre deslizamento e rolamento dos corpos em contato, módulo, direção e sentido da força de atrito entre eles;
- c) Configuração geométrica do espaço que o confina, definida por sua área nominal de seção transversal, sistema de alimentação e fuga de lubrificante e respectivas posições relativamente ao carregamento termomecânico, processo de fabricação, definidor da rugosidade superficial, desvios de forma e posição de cada sólido em contato, massa, rigidez e comportamento dinâmico do sistema, definidores do movimento relativo entre os corpos rolantes.

BOWER [1988] propõe e analisa três mecanismos possíveis de propagação de trincas por pite em fadiga de contato entre corpos lubrificados:

- a) a pressão do fluido não atua nas faces da trinca e o filme fluídico meramente as lubrifica e reduz o coeficiente de atrito entre elas, mantendo-as fechadas durante a maior parte do tempo. Desta forma, acredita-se em uma propagação de trinca de acordo com o modo II, delineado pela mecânica da fratura, provocada pelas tensões cíclicas de cisalhamento e sensível à direção de movimento da carga;
- b) a pressão hidráulica do fluido tem valor limite igual à pressão de Hertz, decorrente da ação da carga e atua nas faces da trinca, mantendo-as abertas e gerando intensidade de tensão segundo os modos I e II da Mecânica da Fratura na ponta da trinca, o que provocaria o seu rápido crescimento;
- c) a trinca, ao ter as suas faces fechadas por ação da carga na área de contato, confina o fluido lubrificante, cuja tentativa de sua expansão no envelope aciona o modo I na ponta da trinca e a leva à propagação, provocando uma equalização na pressão mediante a abertura parcial de suas faces e, dessa forma, gerando intensidade de tensão segundo o modo II da Mecânica da Fratura.

Segundo o modelo teórico desenvolvido, baseado em evidências experimentais, ocorre propagação de trincas por pite em ângulos de cerca de 25° em relação à direção do movimento da carga. Assim, para trilhos, estimou-se uma trinca com um comprimento da ordem de 3,0 mm, enquanto para discos usados em experimentos em laboratório de tribologia esse valor é da ordem de 0,1 mm.

A ação de uma cunha hidrodinâmica de óleo atuando dentro de uma trinca podendo acelerar a sua propagação foi originalmente sugerida por WAY [1935] e ratificada por GALVIN e NAYLOR [1964-5] *apud* TZOU e colaboradores [1985]. De acordo com esses autores, um fluido menos viscoso poderia promover uma maior aceleração devido à sua maior facilidade de penetração na trinca e, por isso, associaram a magnitude da pressão no interior da trinca às propriedades físicas do fluido (viscosidade, coeficiente de viscosidade-pressão e compressibilidade).

TZOU e colaboradores [1985] questionam tal modelo e adicionam à hidrodinâmica da pressão do fluido, sob carregamento cíclico, a cinética de sua penetração na trinca baseada em escoamento no interior de um capilar e aspectos da mecânica da fratura. Reforçam a sua análise teórica com dados experimentais do crescimento de uma trinca em um aço bainítico 2 1/4 Cr - 1 Mo, ensaiado em óleo parafínico à temperatura ambiente, com penetração total e parcial do óleo mediante duas frequências, respectivamente, de 5 e 50 Hz.

NÉLIAS e colaboradores [1998] destacam as diferenças encontradas entre os danos superficiais nas condições de rolamento puro e rolamento com deslizamento e nas condições de lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHL) e microEHL, asseguradas pelos dois acabamentos superficiais adotados. Segundo os seus resultados,

- a) as microtrincas superficiais relacionam-se à direção do atrito e não à direção do rolamento;
- b) as superfícies mais rugosas (EHL) submetidas aos ensaios de rolamento com deslizamento ficaram mais danificadas que aquelas submetidas apenas aos ensaios de rolamento;
- c) sob condições de alta carga normal e rolamento com deslizamento, as microtrincas e microlascamentos (“*microspall*”; “*surface distress*” [ing.]) atuam como precursores para lascamento (“*spalling*”) macroscópico.

2.4.2.5. Mecanismos das pequenas trincas

SPIKES [1986] considera inadequada a aplicação da teoria do desgaste por delaminação no deslizamento às situações de rolamento. Reconhece semelhanças em evidências do desgaste da superfície quanto à deformação plástica, à ocorrência de trincas e à geração de superfícies lisas. Pondera, contudo, que *a teoria da delaminação não explica a presença de microtrincas inclinadas em relação à superfície de contato*, necessitando de modificações consideráveis à sua aplicação à fadiga de contato de rolamento.

De acordo com FLAŠKER e colaboradores [2001], o *pite superficial*, o mais importante mecanismo de falha de elementos mecânicos sujeito a rolamento e deslizamento, origina-se de pequenas trincas iniciais, superficiais ou subsuperficiais, que crescem sob solicitações cíclicas de contato. O pite é um fenômeno tridimensional que depende fortemente de:

- a) *acabamento da superfície de contato*;
- b) *microestrutura do material*;
- c) *condições operacionais*: tipo do contato, pressão Hertziana de contato, atrito entre as superfícies em contato, lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHD), obstrução da boca da trinca pelo lubrificante e temperatura.

A Figura 21 apresenta quatro etapas do crescimento de uma pequena trinca de fadiga de contato de rolamento obtida por simulação numérica, juntamente com a determinação do fator de intensificação de tensão (SIF), cuja taxa de crescimento mostrou-se crescente nos cálculos, corroborados pelos experimentos de FLAŠKER e colaboradores [2001] na medida em que:

- a) a trinca se aproxima da superfície de contato;
- b) a pressão máxima de Hertz cresce;
- c) o raio de curvatura das superfícies de contato $R [R=R_1.R_2/(R_1+R_2)]$ cresce.

De acordo com McCLINTOCK [1966, p. 534-5], sob o efeito da tensão nominal aplicada, o material responde no âmbito do regime elástico a uma distância razoável da trinca. Os parâmetros associados à concentração de tensões e sua história controlam a zona plástica no entorno da trinca. À medida em que se detalha a região da trinca, encontram-se heterogeneidades aos níveis de contorno de grão e subgrãos, discordâncias e átomos.

Efeitos transientes do crescimento das trincas curtas podem ser associados a dois mecanismos, segundo SURESH [1996, p 296-7]:

- Interações contorno de grão - ponta da trinca;
- Intensificação do fechamento da trinca com um aumento de seu comprimento e de sua deflexão.

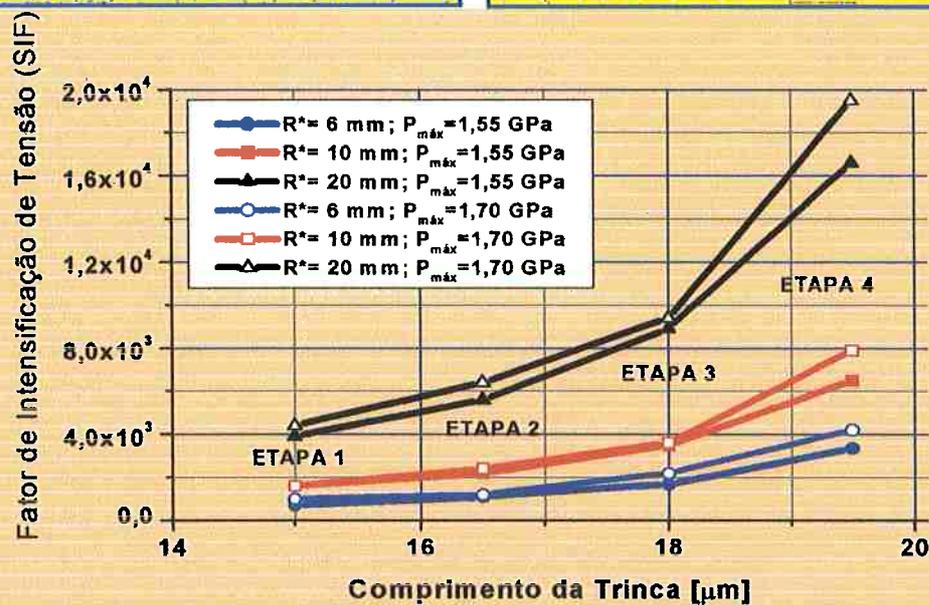
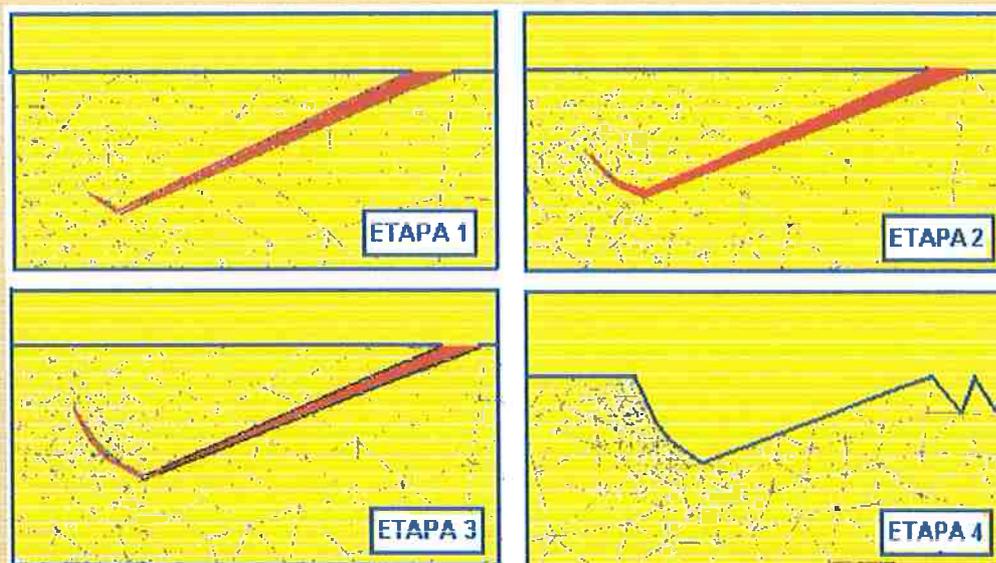


Figura 21. Propagação de pequenas trincas, intensificação de tensão e mecanismo de deformação de pites em contatos de rolamento, baseado na simulação de FLÁŠKER e colaboradores [2001]

De acordo com esse autor, ao interagir com o contorno do grão, a ponta das trincas pequenas pode se submeter a um dos três mecanismos a seguir:

- a) Estagnação no crescimento da trinca enquanto se mantiver uma zona plástica mensurável na vizinhança do grão;
- b) Bandas de escorregamento emanadas da ponta da trinca se entranham no contorno do grão;
- c) Deflexões da trinca associadas à reorientação cristalográfica em sua ponta quando ela trespassa o contorno de um grão e atinge o grão adjacente, provoca uma variação na força de acionamento da ponta da trinca.

2.4.2.6. Mecanismos acústicos do colapso e do desgaste

Em artigo intitulado “Quebrar Pedras” na seção “Tendências/Debates” do jornal Folha de São Paulo (09/09/2001), a psicóloga M. Suplicy relata:

“O canteiro (quebrador de pedras) leva muito tempo batendo com o ponteiro (instrumento próprio para o seu serviço) na pedra, escutando o som das batidas e observando seus veios. Quando ele acerta o ponteiro num veio específico, cujo som é diferente dos outros, a pedra se abre em duas, soltando um canto muito semelhante ao som de uma flauta.... Para o psicanalista, a capacidade de escutar e interpretar na hora exata é que propicia o som, isto é, o ‘insight’, a compreensão transformadora..”

Tais constatações, associando o material, a solicitação e o colapso, requerem um quarto elemento vital à eficácia do conjunto: o sensor acústico humano, enquanto elemento sensitivo primário do sistema “quebrador de pedras”. É nessa conjuntura que importa tecer-se considerações relativas ao “som do desgaste”.

A seguir, será discutido o nível de pressão sonora no contato.

2.5. Emissão acústica e nível de pressão sonora (NPS) do contato cíclico seco de rolamento

“O som não é ainda material. É um elemento abstrato. A vista e o ouvido são, precisamente, os sentidos adequados às manifestações puras e abstratas. O som, em geral, representa esta idealidade do material enquanto vibração, movimento do material; é um elemento ideal, adequado à manifestação do divino: a extensão espacial transforma-se num ponto, e o ponto que se demora não é senão o tempo. A este elemento corresponde à segunda subdivisão da arte romântica: a música”.

HEGEL, G.W.F. (1770-1831) Plano geral da estética. In: _____ [1999] *Estética: a idéia e o ideal*. São Paulo, Nova Cultural, p. 111.

O sistema auditivo humano é um domínio científico bem desenvolvido. Ainda assim, características individuais e de natureza patológica continuam a ser investigadas e instigam a Ciência.

Analogamente, o “som do contato cíclico de rolamento” e, conseqüentemente, o som de suas irreversibilidades, o “som do desgaste”, analisado do ponto de vista sistemático, tem provocado engenheiros e desafiado tribologistas.

De um lado, tem-se uma área de Acústica embasada em métodos e equipamentos cada vez mais sofisticados, caros e sensíveis, cuja complexidade é reconhecida por cientistas de outras áreas. De outro, têm-se novos materiais, processos, tratamentos, reciclagens e fluidos surgindo a cada dia, cuja complexidade é reconhecida inclusive por especialistas, incluídos os da mesma área.

O desafio, no contexto deste trabalho, é o desenvolvimento de uma metodologia universal, de baixo custo, de avaliação do contato de rolamento cíclico. Para isto, é mister a construção de uma base de conhecimento em que se disponham de informações relativas a *padrões acústicos de mecanismos de desgaste* de um ou mais materiais utilizados rotineiramente. Além disso, requer-se um processo de parametrização de tais padrões acústicos. Desta forma, tornar-se-á possível associar-se o processo de desgaste de materiais sob rolamento cíclico a uma trajetória sonora.

2.5.1. O envelope e o sinal acústico no domínio do tempo

“ *De quem são as velas onde me roço ? / De quem as quilhas que vejo e ouço ?*’ Disse o monstrengo e rodou três vezes,/ três vezes rodou imundo e grosso,/ *‘Quem vem poder o que só eu posso,/ que moro onde nunca ninguém me visse/ e escorro os medos do mar sem fundo?’* ” ...

Pessoa, Fernando [1888-1935] O monstrengo. In: *Mensagem*. Lisboa, 1934.

A representação gráfica de um sinal acústico dado pelo nível de pressão sonora (NPS), no domínio do tempo, descreve as relações entre a energia e o tempo desse sinal. A Figura 22(a) mostra esquematicamente um sinal senoidal modulado em que as linhas tracejadas superior e inferior constituem o *envelope* do sinal, ou seja, a trajetória dos limites superiores e inferiores do sinal em análise.

O envelope, ou fronteira, caracteriza-se por uma curva suave que conecta os picos $y(t)$, em função do tempo t , de acordo com OPPENHEIM *et alii* [1983, p. 456].

A área inserida no interior de um envelope que descreve $y = NPS(t)$ define o *sistema sonoro* em análise e a parte externa ao envelope é o ambiente do sistema.

Uma força de acionamento externo que cruza o limite imposto pelo envelope provoca uma *resposta do sistema*, mensurável, ou não. Essa força externa pode ter natureza determinística ou aleatória.

O sinal mostrado pela Figura 22(b) é um gráfico no domínio do tempo composto por funções lineares de entrada. No intervalo de tempo $0-t_1$, tem-se o *silêncio*, ou seja, não houve qualquer resposta do sistema a algum tipo de fonte externa.

O ponto A é o *limiar de sensibilidade* do sistema (“*threshold*”). Atingido esse limiar, o sistema passa a registrar suas respostas como, por exemplo, as da Figura 22(b), desde $0-t_1$ (silêncio) até t_6-t_7 (decaimento), passando por picos (B, D) ou vales locais (C), além de zonas em que o sistema permanece “em regime” (t_5-t_6).

O envelope de um sinal de NPS define faixas ou zonas sonoras, revelando tendências relativas à energia sonora. O sinal de NPS no domínio do tempo apresenta as taxas de transferência de energia ao ambiente e suas flutuações.

A análise da distribuição estatística, em percentis, da energia do sinal acústico no domínio do tempo, ao longo de amostras sucessivas, é exequível e pode contribuir para a formalização de funções capazes de transmitir informações relevantes do desgaste dos materiais cujo contato de rolamento está em processo.

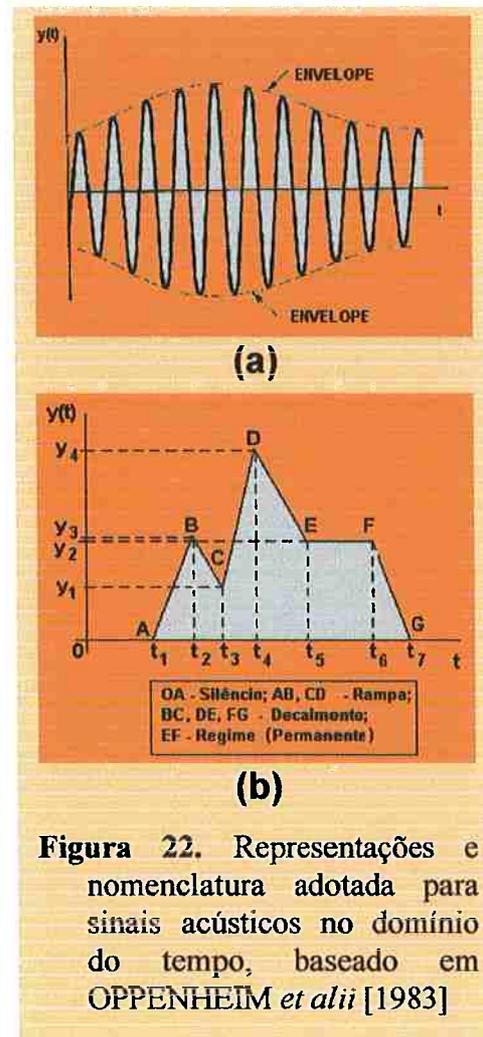


Figura 22. Representações e nomenclatura adotada para sinais acústicos no domínio do tempo, baseado em OPPENHEIM *et alii* [1983]

2.5.2. O sinal acústico no domínio da frequência

2.5.2.1. Contato de rolamento em escala atômica

Um mecânico de manutenção treinado, por exemplo, para detectar falhas em rolamentos ou caixas de câmbio em funcionamento, consegue associar danos nos materiais em contato ao sinal acústico que seu sistema auditivo capta e processa.

Um par de superfícies em contato seco e cíclico de rolamento, sob ar atmosférico, gera um ruído contínuo, perceptível ao ouvido humano – que discerne sons na banda de frequência audível entre 20 Hz e 20 kHz. Isto quer dizer que o ouvido humano é sensível a cerca de *quatro ordens de grandeza* no que diz respeito à banda de frequência de um sinal acústico.

Um contato cíclico entre superfícies de revolução motora e movida, rolando sob compressão, possibilita um número infinito de seqüências permissíveis pico-pico, pico-vale, vale-vale, vale-pico, se tomadas ao nível atômico – da ordem de 10^{-10} m.

Assim, entre duas esferas de ferro *entre a temperatura ambiente* (estrutura atômica cúbica de corpo centrado, ccc, número de coordenação NC = 8, raio atômico $r_{\text{atom}} = 0,1241$ nm e densidade linear $dl_{\text{atôm}} = 4,029 \cdot 10^9$ átomos/metro na direção [111]) e *uma temperatura de 910 °C* (quando a estrutura cristalina do ferro passa de ccc para cfc, cúbica de face centrada, NC = 12, $r_{\text{atom}} = 0,074$ nm e $dl_{\text{atôm}} = 6,757 \cdot 10^9$ átomos/metro na direção [111]), com diâmetros das esferas iguais ao valor nominal dos discos da máquina disco-disco, ou seja, 0,152 m (6 polegadas), rolando por atrito uma contra a outra, ter-se-ia um “círculo perimetral com átomos enfileirados” composto, no máximo, por $1,924 \cdot 10^9$ (ccc) e $3,227 \cdot 10^9$ (cfc) átomos no disco motor prontos a contatarem igual número de átomos no disco movido.

Para um par de discos que role entre 10 e 100 m/s, por exemplo, tem-se uma frequência de contatos atômicos na faixa de 0,013 a 0,220 TeraHertz (THz), requerendo uma frequência de amostragem da ordem de 0,5 THz. Nesse caso, dois *milisegundos* de aquisição de dados demandariam um armazenamento da ordem de 10^9 informações (1 Gigabyte).

Para o acompanhamento do desgaste dessas esferas, não se justificaria, uma vez que o processo de desgaste cíclico de rolamento entre esses sólidos, sob as mesmas condições de processamento e tratamento, sob solicitações de $(p_o)_{\text{máx}}/k$ que não

promovam o primeiro microescoamento, é muito lento. Segundo HUTCHINGS [1992-a, p. 247] e VOSKAMP [2000] os aços comercialmente usados para mancais e respectivos procedimentos de fabricação e montagem proporcionam, minimamente, uma vida atual entre dois e dez milhões de ciclos, atingindo vidas de até 10^9 ciclos.

A ordem de grandeza atômica para o estudo do rolamento cíclico pode se mostrar efetivamente útil quando o interesse principal da investigação for relativo à *gênese dos óxidos* formados e triboquímica envolvida devido às interações entre os materiais em contato e o meio-ambiente.

2.5.2.2. Contato de rolamento em escala micrométrica

Nas últimas décadas do Século XX intensificaram-se, nos países desenvolvidos, os estudos sobre mecanismos e modelagens do contato de rolamento, apresentados por TALLIAN [1992-a, 1992-b] e CHENG e colaboradores [1994], nos Estados Unidos, NÉLIAS e colaboradores [1998] e GLODEZ e colaboradores [1999], na França, VOSKAMP [2000], na Holanda, dentre outros.

Esses tribologistas apresentam em seus trabalhos danos de desgaste representativos com ordem de grandeza micrométrica, a níveis de rugosidade superficial ou tamanho de grão. Nos materiais metálicos estruturais correntes, reportam-se dimensões compreendidas entre 10^{-6} a 10^{-5} m.

Adotando-se uma velocidade de cruzeiro de 144 km/h (40 m/s), por exemplo, captar sinais representativos do processo de desgaste, *em regime*, significa trabalhar-se em frequências de 4 a 40 MHz. Uma ordem de grandeza abaixo dessa faixa, a literatura tem feito menção ao uso de sistemas de emissão acústica.

De acordo com POLLOCK [1996, p. 278-9], equipamentos de emissão acústica são sensíveis a qualquer tipo de movimento em uma faixa de operação entre 20 kHz e 1,2 MHz, podendo detectar crescimento de trinca e deformação do material, atrito, impacto e transformações de fase, dentre outros fenômenos. De acordo com esse autor, apenas *uma combinação de métodos não destrutivos fornece a solução completa* para ter-se uma eficácia econômica e uma adequação técnica aos mecanismos de danos avaliados.

O uso da emissão acústica em sistemas de rolamento cíclico tem sido reportado na literatura por ROGERS [1979], SMITH [1982], TANDON e NAKRA [1992], LI e

LI [1995], de acordo com ALMEIDA [1998, p. 27-28], segundo o qual, *através de emissão acústica consegue-se detectar trincas subsuperficiais, enquanto apenas falhas superficiais são detectáveis no monitoramento por vibrações.*

YOSHIOKA e TAKEDA [1995], utilizando sensores de emissão acústica na faixa de 200 kHz a 400 kHz, identificaram trincas subsuperficiais de fadiga de contato em aço AISI 52100 rolando a 1,16 m/s, *em regime lubrificado*, contra aço AISI D2, iniciadas a partir de inclusões de sulfetos de 24 μm de comprimento e 4 μm de espessura. Em trabalho anterior, YOSHIOKA [1993], utilizando os mesmos sensores, materiais e *lubrificante*, em ensaios a 1,16 m/s, detectou trincas subsuperficiais de comprimento máximo de 200 μm (5,8 kHz) distribuídas a profundidades entre 50 μm e 200 μm .

A utilização de correntes parasitas no monitoramento do início e propagação de microtrincas, decorrentes de fadiga de contato em aços ensaiados em máquina disco-disco especialmente projetada, foi reportada por BEYNON e colaboradores [1996] para simular o contato roda-trilho ferroviário. Esses ensaios são executados sob lubrificação com água e, no equipamento de BEYNON, o sinal oriundo do processo de desgaste acionava um sistema de parada automática da máquina de ensaio *antes* do surgimento de “*spallings*” nas superfícies das pistas em contato.

CLAYTON e HILL [1987] e CLAYTON e SU [1996] usaram máquina disco-disco e *lubrificação com água* para simular pares de roda-trilho ferroviário e parada automática *após* o surgimento de lascamento ([ing.] “*spalling*”) nas superfícies das pistas em contato. Tais paradas são comandadas por um acelerômetro, o qual monitora continuamente a amplitude de vibração de um ponto na estrutura da máquina de ensaio e, atingidos valores pré-ajustados, geralmente uma função da magnitude ou transição do regime de desgaste atuante, o acelerômetro ativa um interruptor, que comanda a parada do ensaio.

MEDEIROS e colaboradores [2002-a, 2002-b] têm verificado associação entre o desgaste a nível micrométrico, as flutuações do nível de pressão sonora [dB] e da temperatura de contato de contatos em máquina disco-disco.

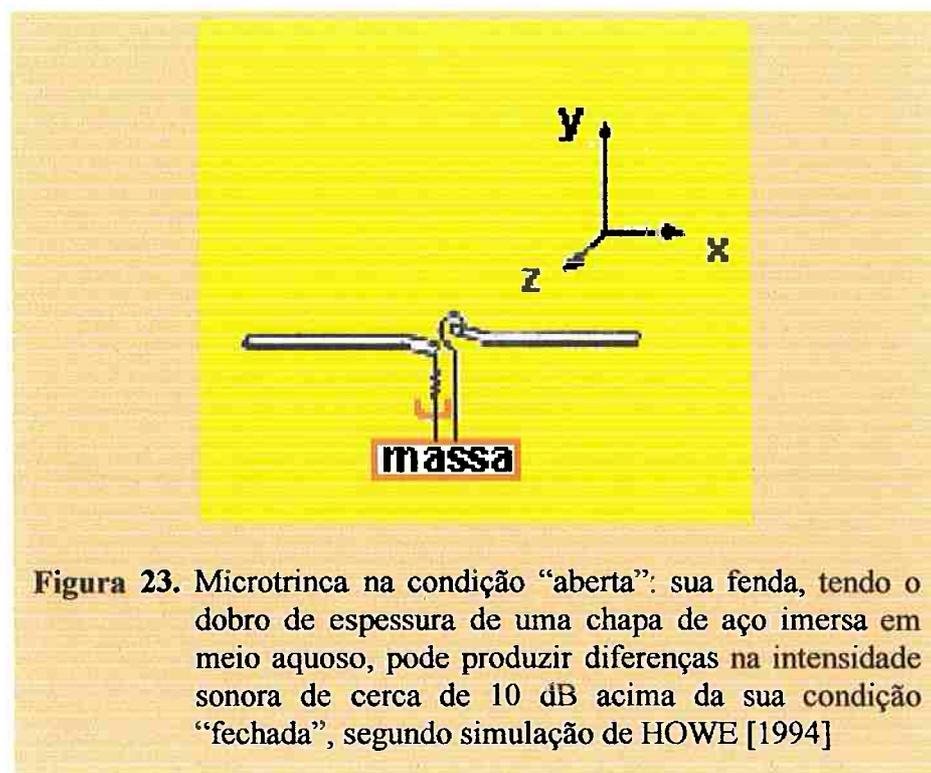
2.5.3. Medida da intensidade do som

“Dos cavalos o estrépito parece / que faz que o chão debaixo todo treme; / o coração, no peito que estremece / de quem os olha, se alvoroça e teme. / Qual do cavalo voa, que não desce; / qual, co’o cavalo em terra dando, geme; / qual vermelhas as armas faz de brancas; qual co’os penachos do elmo açouta as ancas.”

Camões, Luís [1524-1580] *Os Lusíadas*. Canto VI. Lisboa, 1572.

Apesar de uma pequena porcentagem da energia envolvida no contato entre duas superfícies sólidas elásticas dispersar-se sob a forma de som, pequenas flutuações no sinal acústico, devido a heterogeneidades microestruturais ou microtrincas nas pistas de rolamento, podem ser detectáveis desde que os movimentos estruturais não sejam fortemente amortecidos (HOWE [1994]).

Segundo esse autor, a modelagem do sistema dinâmico composto por massa, mola, amortecimento e torção, apresentado na Figura 23, atuando na condição “aberta” da trinca, quando a fenda atingir uma espessura igual ao dobro da espessura da chapa, apresenta diferença no nível de pressão sonora (NPS) de cerca de 10 dB acima do NPS na condição “fechada” da trinca.



Quando o meio varia, por exemplo, de água para o ar úmido, alteram-se as suas propriedades e, assim, as inter-relações existentes entre a vazão e pressão do fluido – com reflexos diretos na resposta do nível de pressão sonora (NPS [dB]).

Para melhor ilustrar esse fenômeno, far-se-á uma modelagem da vazão e pressão de ar em um tubo submetido ao efeito de uma estrição, simulando-se, hipoteticamente, o ar circulante na zona de contato entre asperezas.

2.5.3.1. Modelagem da vazão e pressão de ar em um tubo e efeito da estrição

As definições relativas ao som dizem respeito às flutuações da pressão em um meio fluídico – como o ar atmosférico, no presente estudo. Tem-se, conceitualmente, que

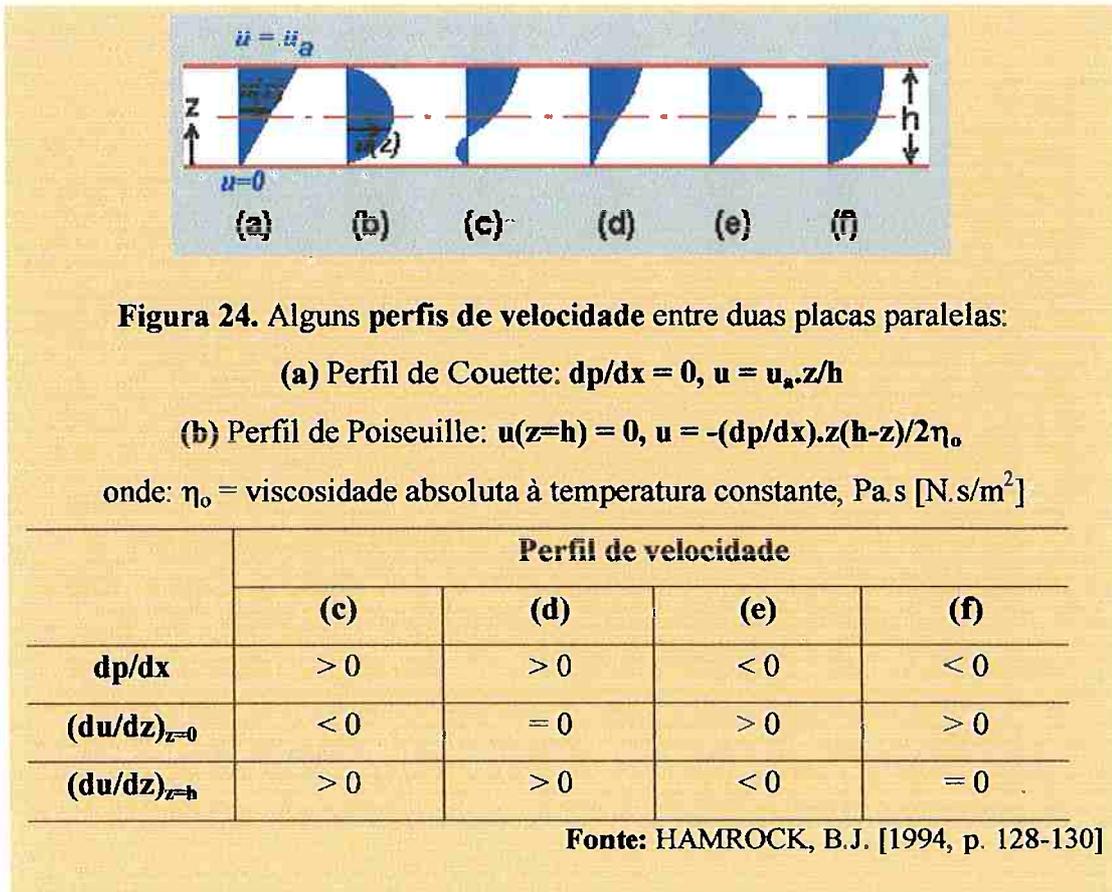
$$\text{Pressão} = \varphi_1 [\text{força, área}] = \varphi_2 [\text{massa, comprimento, tempo}] \quad [2.5]$$

$$\text{Pressão} = \varphi [L, M, T] \quad [2.5a]$$

A Figura 24 apresenta alguns perfis de velocidade de um fluido de viscosidade η_0 escoando entre duas placas paralelas. Considerando-se desprezíveis os efeitos da inércia, constantes a viscosidade e a massa específica do fluido e admitindo-se que a espessura do filme de fluido é muito menor que as dimensões das placas, a equação de Navier-Stokes é deduzida e apresentada por HAMROCK [1994] como

$$\partial^2 u / \partial z^2 = (1/\eta_0) \cdot (dp/dx) \quad [2.6]$$

Considerando-se que o escoamento acontece em *um tubo circular de raio r_t* , tem-se o perfil de velocidade apresentado na Figura 24(b), em que a velocidade u do fluido é zero na parede do tubo e máxima no centro.



Admitindo as hipóteses anteriores e fazendo-se, além disso, $u_z = f(r_t)$, HAMROCK [1994, p. 131-2] mostra que a vazão volumétrica de fluido através do tubo, q_{vol} , é dada por

$$q = [-(\pi \cdot r_t^4)/(8\eta_0)] \cdot (dp/dz) \tag{2.7}$$

isto é, a vazão de fluido é uma função direta do raio do tubo à quarta potência e de um gradiente negativo de pressão, na direção z do escoamento.

Uma estricção no tubo estará associada a um aumento na velocidade do fluido. Mas como definir perfis de vazão $q(r)$ e pressão $p(r)$ do ar na *direção radial* do contato, em um tubo hipotético de ar tangente aos dois discos, durante uma estricção provocada, por exemplo, por deformação elástica ou abrasão por terceiro corpo ?

No caso de um contato de rolamento em regime, em que o fluido é o ar entre as asperezas, seja r_{tm} o raio do tubo a montante do contato e r_{tj} o raio do tubo a jusante do contato. Havendo uma estricção do tubo de ar devido ao contato, $r_{tm} > r_{tj}$.

A resistência ao escoamento de ar, R , pode ser dada por

$$R = k_i \cdot p/q \tag{2.8}$$

onde k_i é uma constante de proporcionalidade e $q > 0$, pois, para um raio do tubo de ar $r_t > 0$, só há sentido físico em se falar de resistência ao escoamento havendo fluxo. Das Equações [2.7] e [2.8], tem-se:

$$R(r_t) = p(r_t)/[q(r_t)] = k_{ii}/r_t^4 \quad [2.9]$$

Baseado em Poiseuille, adotando-se duas leis de variação para a pressão em função dos raios e rigidez do tubo de ar e definindo-se um fator de proporcionalidade f , satisfazendo à relação $0 \leq f \leq 1$, tem-se

$$p(r_t) = f \cdot r_t/2, \quad \text{no caso em que } 0 \leq r_t \leq r_{tm}/2 \quad [2.10a]$$

$$p(r_t) = f \cdot (r_{tm} - r_t), \quad \text{no caso em que } r_{tm}/2 \leq r_t \leq r_{tm} \quad [2.10b]$$

Combinando-se as Equações [2.7], [2.8], [2.9] e [2.10] e utilizando-se o mesmo raciocínio, a vazão volumétrica de ar será dada por

$$q(a) = k_i \cdot p(r_t)/R(r_t) = k_i \cdot f \cdot r_{tm} \cdot r_t^4 / 2 \cdot k_{ii}, \quad \text{se } 0 \leq r_t \leq r_{tm}/2 \quad [2.11a]$$

$$q(a) = k_i \cdot p(r_t)/R(r_t) = k_i \cdot f \cdot (a_m - a_j) \cdot a^4 / 2 \cdot k_{ii}, \quad \text{se } r_{tm}/2 \leq r_t \leq r_{tm} \quad [2.11b]$$

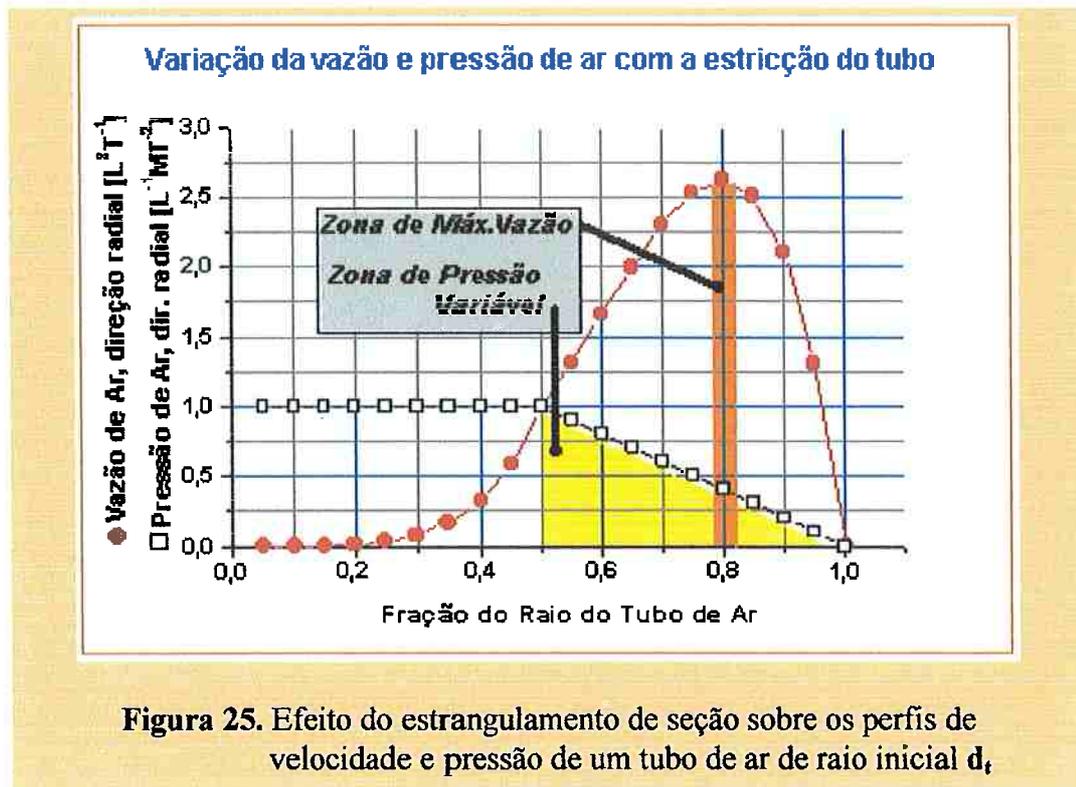
$$q(r_t) = k_{ar} \cdot f \cdot r_{tm} \cdot r_t^4, \quad \text{se } 0 \leq r_t \leq r_{tm}/2 \quad [2.12a]$$

$$q(r_t) = k_{ar} \cdot f \cdot (r_{tm} - r_{tj}) \cdot r_t^4, \quad \text{se } r_{tm}/2 \leq r_t \leq r_{tm} \quad [2.12b]$$

As Equações [2.12a] e [2.12b] são formas possíveis, sob as condições consideradas, de expressar a vazão volumétrica de ar num tubo de ar sob estricção. Para ilustrar as equações [2.10a] e [2.10b], atribuíram-se pontos e esboçaram-se os gráficos da Figura 25, onde se vêem:

- continuidade e pontos de inflexão das funções;
- zona onde a vazão de ar é máxima e faixa de estricção em que a pressão de ar varia.

A idéia é visualizar-se que as relações entre a vazão e a pressão de ar, que sensibiliza um microfone, é modelável e pode ser associada à zona de contato.



2.5.3.2. Interação fluido e superfície de contato

O *direcionamento* das zonas de contato legado pelo processo de fabricação de uma superfície usinada e sua interação com um par de sólidos girando, sob carga e com um *fluido lubrificante* interposto, sob um escoamento de Couette (perfil de velocidade da Figura 24[a]) e com um escoamento de Poiseuille (perfil de velocidade da Figura 24[b]) foram estudadas por PATIR e CHANG [1978], *apud* AKAMATSU [1997].

A Figura 26(a) apresenta a morfologia das estrias de usinagem das superfícies incluídas no estudo de PATIR e CHANG e a posição relativa das linhas de corrente do fluido interposto entre elas. Uma superfície eletroerodida, por exemplo, é considerada como tendo $\gamma = 1$. A superfície de um cilindro de laminação retificado, por exemplo, assume a forma em que $\gamma > 1$ e a de um dente de engrenagem, $\gamma < 1$). A Figura 26(b) apresenta a flutuação da área real de contato, nas condições ensaiadas, para estrias circunferenciais ($\gamma > 1$) e axiais ($\gamma < 1$), podendo-se inferir as flutuações espaço-tempo da pressão de contato entre os discos. Em um contato não lubrificado, esse fluido é o ar atmosférico comprimido entre as superfícies de contato.

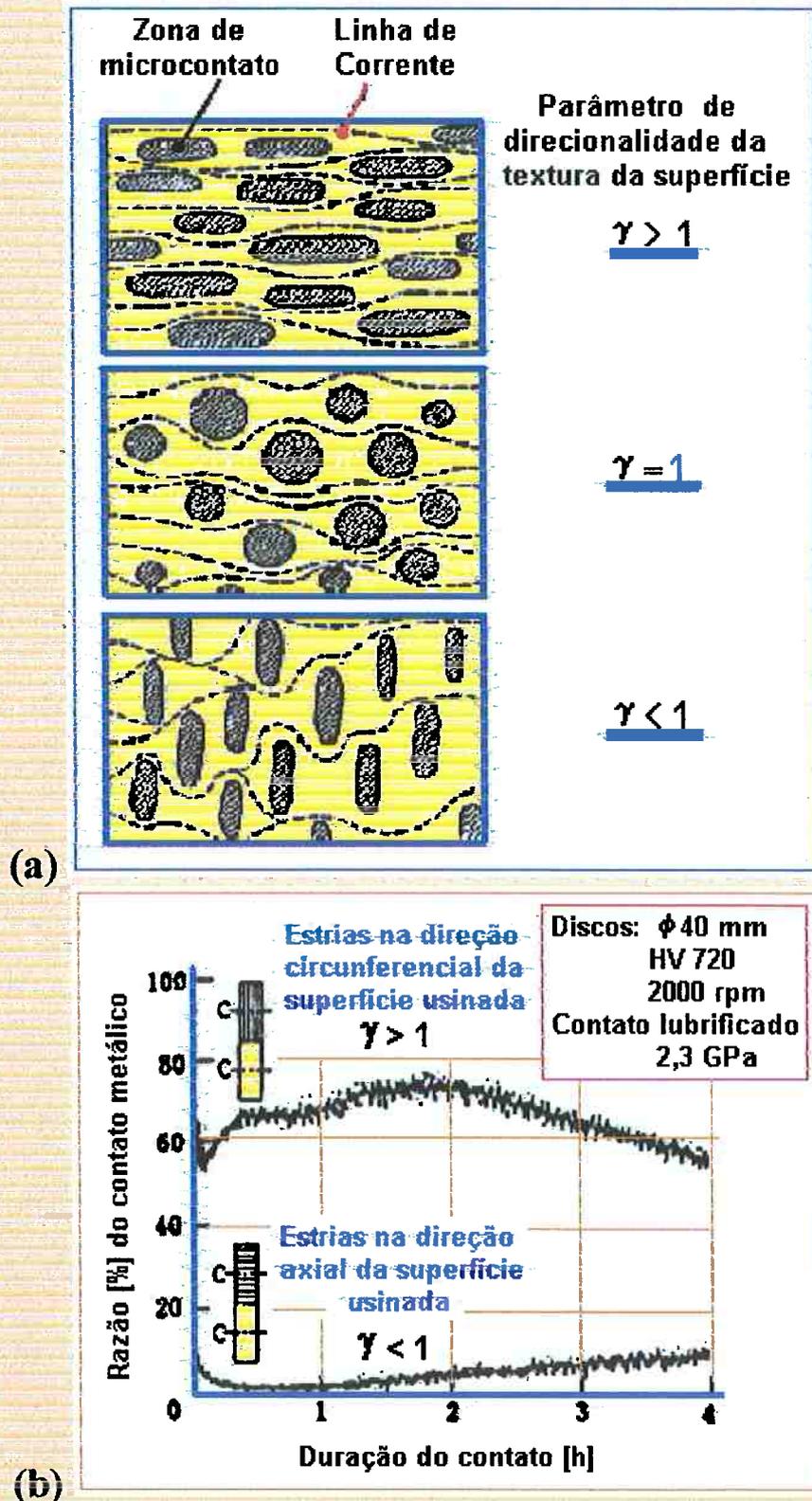


Figura 26. Linhas de corrente de fluido e microzonas de contato efetivo entre as asperezas resultantes dos microsulcos ligados à superfície de contato pelo processo de fabricação, de acordo com PATIR e CHENG, apud AKAMATSU [1997]

2.5.3.3. Modelagem do sinal de pressão de ar em um sistema dinâmico

A propagação da onda sonora no ar atmosférico circundando o contato e o interior de um pite e das respectivas asperezas, na faixa de frequências audíveis, pode ser modelada e representada esquematicamente pela Figura 27, baseada em um sistema dinâmico de segunda ordem apresentado por DOEBELIN [1976, p. 393] e caracterizado por uma frequência natural, ω_n e um fator de amortecimento, ζ .

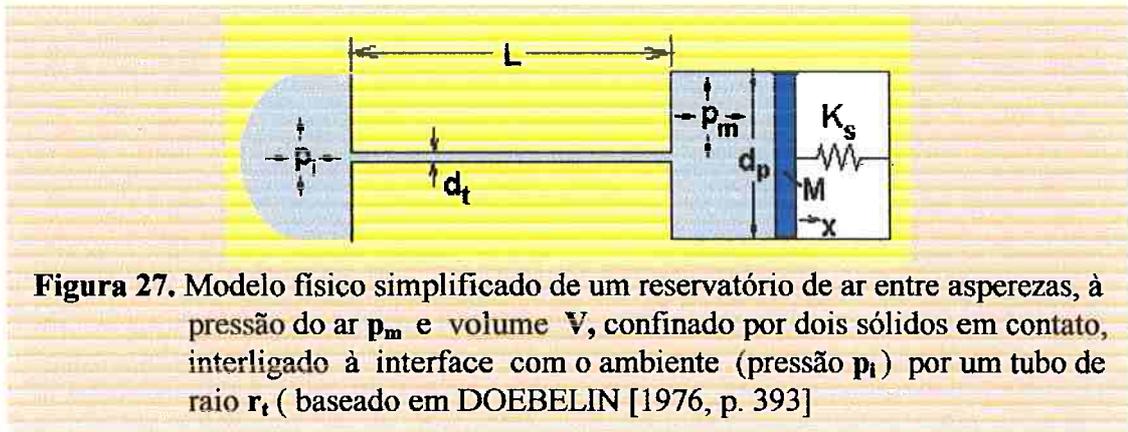


Figura 27. Modelo físico simplificado de um reservatório de ar entre asperezas, à pressão do ar p_m e volume V , confinado por dois sólidos em contato, interligado à interface com o ambiente (pressão p_i) por um tubo de raio r_t (baseado em DOEBELIN [1976, p. 393])

Pode-se admitir que, num determinado instante de tempo, a pressão do ar no interior de um reservatório (por exemplo, constituído fisicamente por um vale entre asperezas ou um pite) de diâmetro d_p é constante e igual a p_m e, através de um tubo de ar de diâmetro d_t , entre as asperezas, gera uma vazão volumétrica $q_{ar (pite)}$ à zona de interface do contato, cuja pressão é p_i , sempre que $(p_i - p_m) \neq 0$.

O tubo é hipotético e tem seção transversal equivalente à soma dos vazios entre as asperezas das pistas de rolamento em contato instantâneo, ou seja, é uma função direta do parâmetro metrológico de avaliação de superfície R_{vk} , considerados o número de ciclos e as superfícies locais em análise.

Na parede do tubo, a velocidade do ar é nula, o que favorece a proliferação e a não-remoção de óxidos nas superfícies laterais das asperezas.

Considerando-se o escoamento de ar no interior do tubo, Figura 27, variações na pressão p_m estão associadas a variações no volume do pite e à relação entre os diâmetros do tubo e do pite. De acordo com DOEBELIN [1976, p. 398-402] (Figura 27 e Tabela 2), pode-se ter duas situações para modelagem:

- (a) volume do tubo muito pequeno em relação ao volume do reservatório de ar;
 (b) volumes do tubo e do reservatório de ar com mesma ordem de grandeza.

Tabela 2. Definição da frequência natural e fator de amortecimento do sistema dinâmico de segunda ordem representado na Figura 27, baseado em DOEBELIN [1976]

	Frequência Natural	Equação	Fator de Amortecimento	Equação
Volume do Tubo muito menor que Vol. Reserv. Ar ($V/V_t \gg 0,5$)	$\omega_n = \frac{\Delta d_t}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot E_a}{L_e \cdot \rho \cdot V}}$	[2.13-a]	$\zeta = \frac{\Delta 32 \cdot \mu_f}{d_t^3} \sqrt{\frac{V \cdot L_e}{\pi \cdot E_a \cdot \rho}}$	[2.14-a]
Volume do Tubo equivalente ao Vol. Reserv. Ar	$\omega_n = \frac{\Delta \sqrt{\gamma \cdot p / \rho}}{L_e \cdot \sqrt{0,5 + V/V_t}}$	[2.13-b]	$\zeta = \frac{\Delta 16 \mu_f \cdot L_e}{d_t^2 \sqrt{\gamma \cdot p \cdot \rho}} \sqrt{0,5 + \frac{V}{V_t}}$	[2.14-b]

V_t = Volume do tubo de ar [m³]
 d_t = Diâmetro do tubo de ar [m]
 p = pressão média do ar [Pa]
 $E_a = -\frac{\Delta dp}{dV/V} = \gamma \cdot p$ = módulo de compressibilidade adiabática [Pa]
 V = Volume do Reservatório de Ar
 γ = relação entre os calores específicos
 $L_e = L_o [1 + (8 \cdot d_t / 3 \cdot \pi \cdot L_o)]$ = comprimento do tubo de ar [m]
 μ_f = viscosidade [Pa.s]
 ρ = massa específica do ar [kg/m³]

No caso (a), em que $V/V_t \gg 0,5$, DOEBELIN [1976, p. 401-2] destaca a importância dos efeitos de compressibilidade do ar e da variabilidade da pressão do ar no tubo, em relação aos valores iniciais, levando a um *sistema não-linear*, haja vista que ω_n e ζ não são constantes.

2.6. Detecção de danos de desgaste em sólidos por SLM

Além das ondas de densidade, existentes nos meios líquidos e gasosos, representa-se na Tabela 3 as classes de ondas de acordo com KURTZE [1969, p. 45-48], em que a geometria do corpo sólido em análise contribui na definição das propriedades dessas ondas. Segundo esse autor, os estados de tensão atuantes, de natureza vetorial, tornam a propagação de campos sonoros nos sólidos mais complicada do que em fluidos, onde os campos de pressão têm natureza escalar.

Tabela 3. Classificação de KURTZE [1969, p. 45] para propagação de ondas em sólidos

Classe de onda (Sólidos com dimensões infinitas)	Velocidade de propagação da onda (c)
Ondas de Rayleigh 	$c = 0,93.(G/\rho)^{0,5}$ G =módulo de elasticidade transversal do sólido
Ondas de densidade 	$c = (E_a/\rho)^{0,5}$ E_a =módulo de compressibilidade= $dp/(dV/V)$ ρ = massa específica
Ondas transversais 	$c = (G/\rho)^{0,5}$
Classe de onda (Sólidos com dimensões finitas)	Velocidade de propagação da onda (c)
Ondas de torção 	$c = 0,898.(G/\rho)^{0,5}$
Ondas de dilatação 	$c = (E/\rho)^{0,5}$ E =módulo de Young do material
Ondas de flexão 	$c = (\omega)^{0,5} .(B/M)^{0,25}$ M =massa por unidade de superfície B =rigidez flexional Para placas: $B=E.h^3/[12.(1-\nu^2)]$ h =espessura da placa; ν =coeficiente de Poisson

De acordo com ROBERGE [1996], danos *possivelmente detectáveis* em materiais empregam geralmente técnicas de avaliação não destrutivas para investigação de

- a) *contornos e sombras*,
- b) uma *densidade* e uma *orientação*,
- c) um *tamanho* e uma *superfície*.

Entretanto, estimar a nucleação e propagação de microtrincas em superfícies e subsuperfícies de contato cíclico de rolamento, durante o funcionamento do sistema, é problemática e onerosa.

A *sensibilidade* de cada técnica atrela-se à *probabilidade de detectar uma falha* relativa ao material, ao tamanho, à orientação ou a um grupo de atributos predeterminados. À sensibilidade associa-se uma frequência de uso da técnica de

modo a assegurar uma confiabilidade e um custo. NAKANO [1995] avalia que as modelagens matemáticas fundadas em transformadas de Fourier e associadas a superfícies de atrito são pertinentes desde que se estejam lidando com superfícies *infinitamente amplas* - o que normalmente não é o caso em Tribologia.

De acordo com esse autor, as transformadas de Fourier são aplicáveis com êxito em fenômenos estacionários e fenômenos locais exigem o uso de um artifício: as *janelas temporais*, em que o intervalo de tempo de extração de dados é determinado artificialmente - fixando-se, assim, a resolução da frequência. O método que usa a transformada Ondaleta ([ing.] “*Wavelet*”) (MORETTIN [1999]) contorna as relações de irregularidade entre as resoluções de tempo e de frequência, otimizando-as no âmbito permitido pelas limitações da instrumentação utilizada (NAKANO [1995]).

A complexidade da modelagem e a respectiva comprovação experimental do modelo do fluxo e pressão de ar entre as asperezas, em um contato cíclico de rolamento, acentuada pela nucleação e propagação de microtrincas, à medida que o desgaste dos materiais se acentua, justifica a simplificação do problema através da utilização de um medidor de nível de pressão sonora (NPS, “*Sound Pressure Level, SPL*” [ing.]), definido por DOEBELIN [1976, p. 416] como:

$$NPS = SPL = 20 \cdot \log \frac{p}{0,002} \quad [\text{dB}] \quad [2.15]$$

onde a pressão p é a raiz média quadrática (RMS) da pressão [Pa] do som.

MEDEIROS e colaboradores [2000-b, 2002-a, 2002b] constataram as evoluções do desgaste por ciclagem térmica e por fadiga de contato, evidenciadas por seus mecanismos, pelo número de ciclos e pela medida da tensão residual. No caso de fadiga de contato entre discos metálicos, correlacionaram-se as medidas de tensão residual à distância de rolamento e ao nível de pressão sonora (NPS [dB]) obtido em um sistema de monitoramento do contato de rolamento cíclico entre discos metálicos em uma sala acusticamente isolada.

Utilizaram em seus experimentos um medidor de nível de pressão sonora (“*Sound Level Meter*”, SLM), configurado em um *decibelímetro* comercial, acoplado a um microcomputador através de uma interface, que apresentou algumas possibilidades e limitações:

- 1) Baixo custo de investimento da instrumentação e recursos computacionais (equivalente ao preço de um microcomputador);
- 2) Boa repetibilidade;
- 3) Sensibilidade em uma ampla faixa de amplitude do nível de pressão sonora;
- 4) Fácil disponibilização do sinal, inclusive em tempo real;
- 5) Baixa taxa de amostragem de aquisição de sinal;
- 6) Banda de frequência limitada e contida no espectro audível pelo ser humano;
- 7) Necessidade de isolamento acústico do sistema em relação ao ambiente externo cujo sinal não seja de interesse registrar;
- 8) Número total de leituras ou tamanho finito do arquivo de dados a armazenar.

Dois trabalhos de MEDEIROS e colaboradores, apresentados e discutidos com pesquisadores em Congressos europeus, após análise por “*referees*”, foram publicados nas revistas suíças indexadas *Materials Science Forum* e *Key Engineering Materials*. Esses artigos, aliados a outras comunicações apresentadas no TRIB2000, na Escola de Engenharia da Universidade do Porto, e nos congressos brasileiros CONEM e COBEM, integravam a presente investigação e foram importantes pelas discussões efetuadas, reflexões suscitadas e na consolidação das etapas parciais de desenvolvimento desta Tese.

3

Reflexões Metodológicas, Materiais e Métodos

“Eu elogio todo ceticismo ao qual posso responder: ‘Tentemos!’ Mas já não quero ouvir falar de todas essas coisas e questões que não permitem o experimento. Este é o limite do meu ‘senso da verdade’; pois ali a coragem perdeu seu direito”.

NIETZSCHE, Friedrich W. (1844-1900) **A Gaia Ciência**.
São Paulo, Companhia das Letras, p. 91.

3.1. Introdução

Os problemas relativos ao contato e seu desgaste não são novos, nem a tentativa de entendê-los ou solucioná-los. Neste sentido, considerando-se relevante a visualização sinóptica da evolução do pensamento humano representativo, elaborou-se a Tabela 4, em que se apresentam pontos metodológicos basilares desde Pitágoras, até Sartre.

Formalismo e misticismo enredam-se em um bloco único até as proposições de Arquimedes, instituindo a associação entre a matemática e a pesquisa experimental, o método dedutivo baseado na formulação de hipóteses, as idéias físicas de alavanca e densidade. Consideradas atérias e, por esta razão, discriminadas, retardaram o pensamento lógico humano por cerca de 1800 anos, até que Leonardo Da VINCI as resgatasse e lhes desse asas, fincando, com a sua geração, a gênese do Renascimento.

Cerca de duzentos anos após Da Vinci, Newton ampliou essas idéias e formalizou o conceito de erro experimental. HEGEL introduziu a idéia de processo, em que importam os mecanismos em que ocorrem as mudanças e as leis que os regem.

NIETZSCHE identificou que é possível haver diferentes interpretações para processos, mecanismos e leis, destituindo a idéia determinística de um mundo-verdade, vigente até então.

SARTRE formalizou as idéias do ser e não-ser, do nada, da percepção do não-lugar, da dissipação. A gênese da complexidade.

Tabela 4. Sinopse de reflexões metodológicas importantes à Ciência, baseado em Dampier [1953] e Abrão [1999]

PITÁGORAS [p. 65-6; 80] Grécia, Séc. V-VI a.C.	DEMÓCRITO [p. 71-6] Grécia, Séc. V a.C.	ARISTÓTELES [p. 23-25] Grécia, Séc. IV a.C.	ARQUIMEDES [p. 99-101] Grécia, Séc. III a.C.	DA VINCI [p. 180-188] Itália, Séc. XV-XVI	GALILEU p. 25-733 Itália, Séc. XVI-XVII	NEWTON p. 26-731 Inglaterra, Séc. XVII-XVIII	HEGEL p. 347-62 Alemanha, Séc. XVIII-XIX	NIETZSCHE p. 411-9 Alemanha, Séc. XIX	SARTRE p. 444-50 França, Séc. XX
“As formas, os números e suas relações são o princípio e a essência de todas as coisas”	“Todas as qualidades das coisas são formas, dimensões e movimentos diversos da mesma substância”	“O mundo real é composto por cores, calor, sons, beleza, bondade e verdade ou, às vezes, força bruta, maldade e erro”	“Dá-me uma alavanca e um ponto de apoio que eu moverei o mundo”	“O Universo é inteligível” “A verdadeira ciência se inicia com a observação; podendo-se aplicar depois o raciocínio matemático, pode-se obter uma maior certeza.”	“O som, a cor e o calor se dissolvem em meras sensações e o mundo real se reduz a partículas de matéria em movimento.”	“Massa é a quantidade de matéria em um corpo, medida pelo produto da sua densidade por seu volume”.	“A realidade se caracteriza por seu aspecto mutável em todos os níveis”. “As transformações podem vir atribuídas apenas ao conceito em si, porque isso apenas é evolução”.	“Não há mais um mundo-verdade; existem apenas diferentes interpretações.”	“Descartes se equivocou, ao fazer da consciência seu próprio objeto. Não me percebo como percebo os objetos”.
Experiência do som: Relação entre o comprimento de uma corda, o som que produz e uma proporção	Explicação das propriedades da matéria por meio de elementos mais simples: concepção da idéia do átomo	Instituição do método indutivo e da pesquisa organizada através da observação e da experiência (biologia). Fêz crítica destrutiva à teoria dos atomistas, retornando a Pitágoras e sua idéia do quente e do frio, do úmido e do seco.	Instituição do método dedutivo, associando a matemática à pesquisa experimental. Introdução de hipóteses associadas às observações e às experiências. Conceituação de densidade relativa e do princípio da alavanca.	Compreensão clara da impossibilidade de do moto perpétuo como fonte de energia. Demonstração da lei da alavanca e das relações entre força e braço. Estudos sobre o som e a luz, eventual base da teoria ondulatória.	Ciência baseada em filosofia mecânica e determinista.	Formulação das Leis do Movimento e da gravitação universal. Determinação do erro experimental. Ruptura total com dogmas aristotélicos até então vigentes.	Considera o aspecto de processo que a mobilidade física encerra. É preciso explicar os mecanismos que as mudanças apresentam e as leis que os regem. A lógica é composta pela afirmação (tese), negação (antítese) e pela síntese.	Formalização do nihilismo como desvalorização dos valores e da existência. Formulação da doutrina do eterno retorno, baseada em dois princípios: 1) o tempo é infinito; 2) as forças são finitas.	“Optar por uma alternativa é, ao mesmo tempo, aniquilar todas as outras.”

(continua)

Tabela 4. (continuação) Síntese de reflexões metodológicas importantes à Ciência, baseado em Dampier [1953] e Abrão [1999]

PITÁGORAS	DEMÓCRITO	ARISTÓTELES	ARQUIMEDES	DA VINCI	GALILEU	NEWTON	HEGEL	NIETZSCHE	SARTRE
Dez é um número perfeito: $10=1+2+3+4$	“Os átomos são eternos, sem princípio e nem fim”	“A Física trata da Natureza, da existência, da matéria, da forma, do movimento, do tempo e do espaço”	“O método deve se despojar do emotivo e depende de instrumentos para tornar a ciência mais precisa, sistemática e objetiva.”	“O Universo é uma máquina celeste que obedece a leis bem definidas e não à natureza divina (como defendia Aristóteles).”	A massa distingue-se do peso e dá à matéria seu caráter inerente. Experimental. Experimentação de corpos em queda livre	“Força é qualquer ação atuante em um corpo que varia ou tende a variar o seu estado de equilíbrio ou de movimento uniforme em linha reta.” I Lei: “Cada corpo mantém o seu estado de equilíbrio ou de movimento uniforme em linha reta, até que uma força aplicada mude tal estado.”	“A realidade é o movimento dos contrários”.	“A existência não vale a pena”.	Compreensão dos fenômenos em toda a sua extensão e complexidade. Negação de uma natureza humana: o ser é aquilo que faz de si.
Música da esfera			“A relação entre a circunferência e seu diâmetro é maior que $3 \frac{10}{71}$ e $3 \frac{1}{7}$.”	“No olho, a imagem formada se na retina”. “O fluxo de sangue circula pelo corpo como a água da colina vai aos córregos, rios, mar, nuvens e volta à colina”	“Sob queda livre, a velocidade de um corpo cresce proporcionalmente ao tempo”.		“Um fenômeno é dado em sua integridade, essência e aparência em continuidade absoluta. O estudo dos fenômenos é o estudo das coisas em sua totalidade e não uma abordagem parcial da realidade”.	“Como o mundo não caminha para um estado final, então tudo retorna eternamente”.	“O mundo é uma combinação de objetos em si, com qualidade e densidade próprias, e consciência – por si – os visa, conferindo-lhes ordem, valor e instrumentalidade”.
Visão mística da Natureza		Ratificado por S. Tomas de Aquino	Redescoberto por Da Vinci			II Lei: “A variação do movimento é proporcional à força motriz aplicada e assume a direção em que ela é aplicada”. III Lei: “A reação é sempre igual e oposta à ação.”	“A liberdade não pode ser desfrutada ao nível do para si. Ela só adquire sentido no plano da intersubjetividade em que os seres interagem”.	“Dois universos se opõem: o dos senhores e o dos escravos e seus valores vão se tecendo em torno de um certo ideal de convivência”.	“Os seres estão condenados a ser livres”.
							“A família é a negação da individualidade e, ao mesmo tempo, a realização do indivíduo na interação”.	“A ausência de conflito é definida como repouso”.	“O ser é livre na exata medida em que introduz o nada no mundo. A existência é definida pelo não-ser, pelo nada”.

O foco central desta Tese é o estudo do desgaste por fadiga de contato entre dois discos metálicos em uma máquina de ensaio disco-disco. À luz da Escola Pitagórica, a este trabalho importariam as formas geométricas envolvidas e o som, oriundo do contato entre os sólidos, no decorrer do desgaste.

Na Escola Atomística, integrada por Demócrito, interessariam, além das formas e dimensões, os movimentos relativos entre os discos – suas velocidades de rolamento e a relação de deslizamento (“*slide ratio*” [ing.]) – o estudo das suas causas na menor escala possível e as explicações relativas às propriedades dos respectivos materiais constituintes.

Na Escola Aristotélica, acrescentar-se-ia uma observação periódica do processo de desgaste ao longo da vida útil das superfícies em contato, e uma análise relativa ao calor trocado entre a zona de contato e o meio, além do registro da variação de umidade.

Já Arquimedes e Da Vinci exigiriam a formulação de hipóteses, a associação de cálculos às constatações experimentais e a instrumentação que possibilitasse a quantificação de algumas grandezas, seguida por conclusões relativas às experiências.

Além disso, Da Vinci apreciaria a explicitação dos procedimentos experimentais com clareza, algumas sugestões relativas a trabalhos futuros, com base na experiência desenvolvida, a inteligibilidade da descrição do processo de desgaste por rolamento cíclico.

Newton determinaria o erro experimental e a modelagem física e matemática da evolução dos esforços durante a vida das superfícies rolantes, admitidas *sem atrito*, as flutuações de volume dos corpos em contato, a sucessão de estados de equilíbrio envolvidos ao longo da história do contato.

Os encadeamentos lógicos aqui assumiriam duas posições, não incluídas na Tabela 4. Dizem respeito à formalização ao conhecimento e são alicerçadas nas visões metodológicas de Bacon e Descartes. Bacon observaria vários ensaios e, com dados em mãos, as evidências experimentais induziriam o estabelecimento de relações e de leis baseadas na experimentação, no empirismo. Descartes, baseado na fundamentação matemática, no racionalismo, faria hipóteses iniciais relativas ao “*elo mais fraco da corrente*”, buscaria informações sobre materiais e naturezas geométricas dos discos e

das superfícies em contato, seus movimentos relativos entre si e interrelações, formularia novas hipóteses, deduziria teoremas e soluções analíticas.

A lógica Hegeliana exigiria a fundamentação dos mecanismos envolvidos no processo de desgaste por fadiga de contato entre corpo e contracorpo, consideraria o atrito, bem como inquiriria se há diferença entre o desgaste, seja dos discos motor e movido, seja de combinações de materiais, formas e dimensões.

Nietzsche proporia a formalização de diversas interpretações para o problema do desgaste por contato de rolamento cíclico, negar-lhe-ia um modelo newtoniano determinístico, solicitando uma abordagem probabilística ao estudo do problema.

Boltzmann seria condenado pelos seus pares de concepção newtoniana e determinística, pois proporia utilizar o conceito de irreversibilidade ao desgaste, recorreria ao nível microscópico ou atômico, ressaltaria a sua natureza estocástica e ergódica (a aleatoriedade depende do sistema e não se repete, ante solicitações iguais).

Sartre procederia a um exame macroscópico nos restritores de graus de liberdade do sistema disco-disco (“*mechanical constraints*”) e microscópico, ao nível dos materiais e suas interações internas (“*internal constraints*”), entre si e com o meio. Desta forma, buscaria uma compreensão para o não-contato, o não-desgaste, o contato e o desgaste.

Fundamentado nesses grandes mestres da Humanidade e em suas convicções filosófico-metodológicas, ressalvadas as limitações do autor, desenvolveu-se o escopo deste trabalho.

3.2. Formalizando o método e a hipótese central

Não é trivial propor uma metodologia para investigar desgaste de rolamento cíclico utilizando máquina convencional disco-disco. Na configuração dos discos cilíndricos sugerida pelo fabricante inglês da máquina disco-disco, um disco tem geratriz de contato reta e, o outro, geratriz curva. Cálculos Hertzianos demonstraram que, para aços, adotando-se tais geometrias, a *máxima pressão de contato* $p_{m\acute{a}x} < 1,9$ GPa entre os discos, à carga máxima e com diâmetros externos iguais. Surgiu, assim, a primeira convicção cartesiana do trabalho: adotar-se-ia a configuração esfera-esfera mostrada na Figura 28, a qual, para aços, proporcionaria $(p_o)_{m\acute{a}x} < 2,9$ GPa .

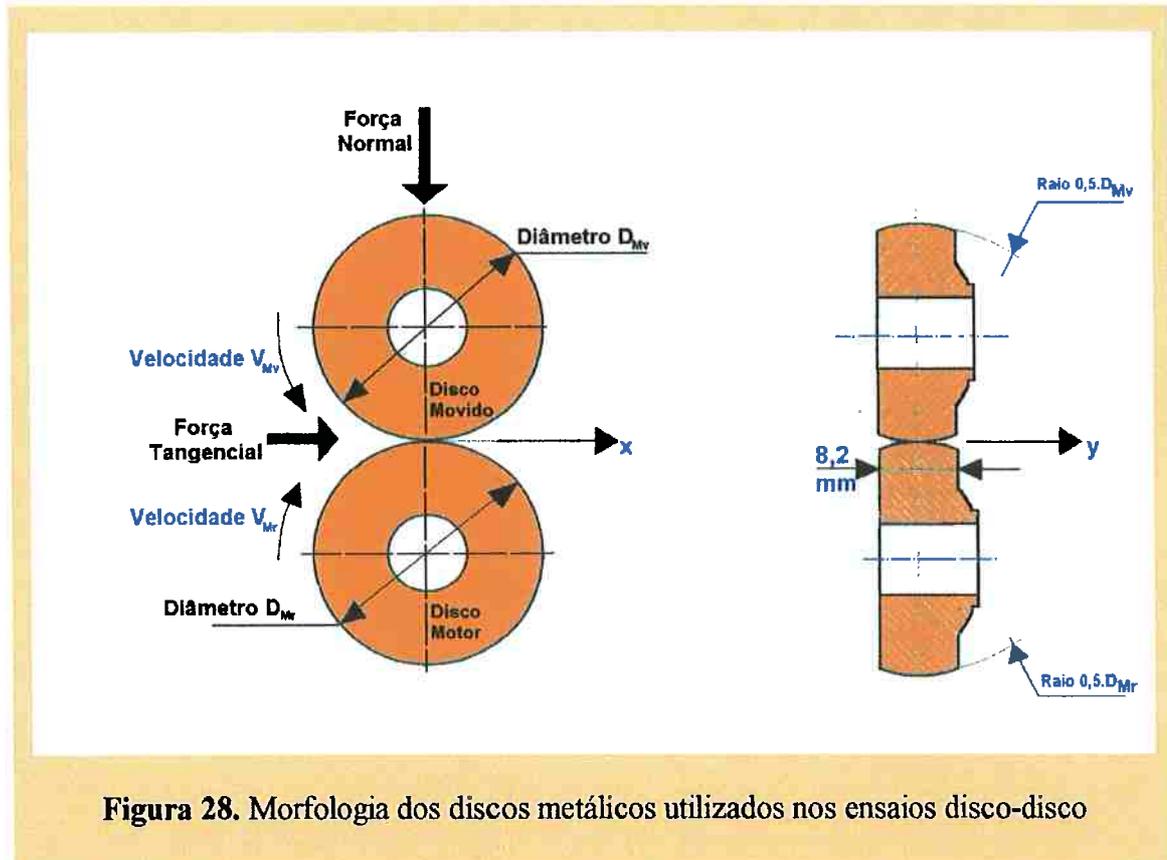


Figura 28. Morfologia dos discos metálicos utilizados nos ensaios disco-disco

À decisão cartesiana seguiram-se duas, de natureza baconiana, fundamentadas:

- 1) na teoria de Coffin-Manson (MEDEIROS e colaboradores [2000-b]), programou-se a experiência piloto número um, relativa ao estudo sistemático de ciclagem térmica em discos de aço, excluído o contato mecânico;
- 2) em cálculos Hertzianos, JOHNSON [1989], DUMONT [1997] e NÉLIAS e colaboradores [1998], executou-se uma experiência piloto, que envolveu dois pares de discos não tratados termicamente de Aço AISI 1045.

A ciclagem térmica envolveu quatro etapas:

- 1) projeto e construção de uma máquina que possibilitasse a ciclagem térmica dos discos, em escala 1:1, entre uma fonte quente (chama de um maçarico cujo combustível era gás de cozinha comercial (propano-butano) e uma fonte fria (água recirculante), em que se obtiveram trincas catastróficas nos discos entre 300 e 3000 ciclos, como a apresentada na Figura 29;

- 2) modificação do projeto inicial, incorporando ao invés de um disco único, seis discos pequenos de aço com faces planas retificadas, equidistantes circunferencialmente de 60° , em escala 1:13, de modo a permitir o tratamento estatístico dos resultados obtidos em uma batelada de ensaios;
- 3) estudo da evolução cíclica de tensões residuais na face dos discos;
- 4) apresentação e discussão dos resultados em Congresso (MEDEIROS e colaboradores [2000-b]).

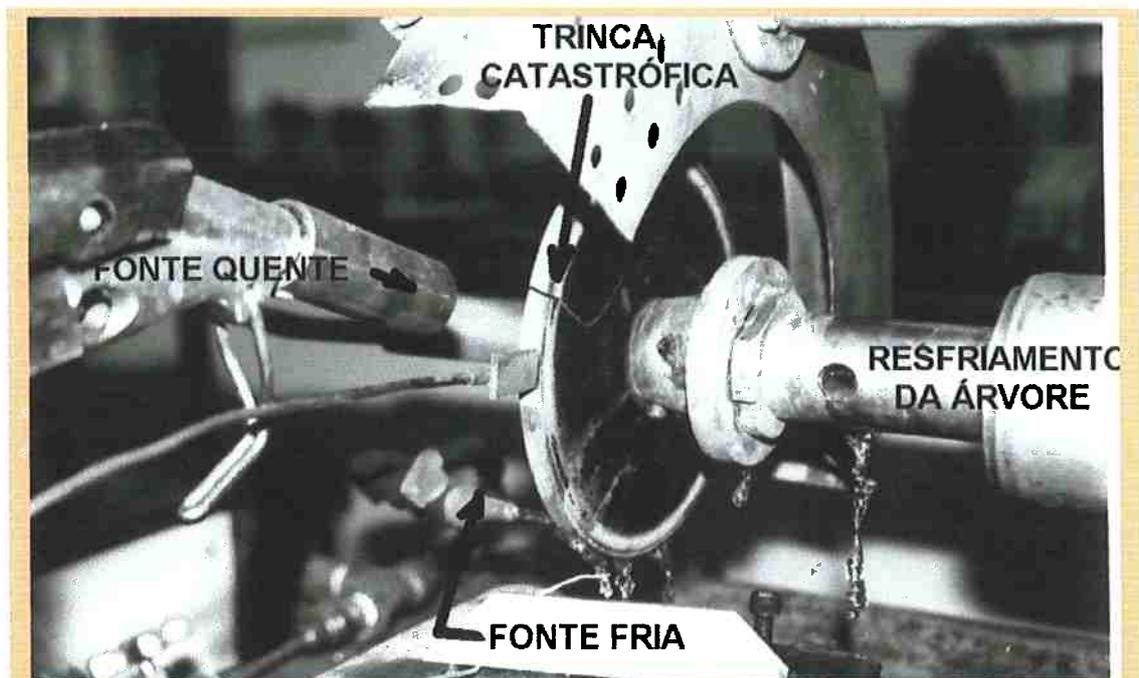


Figura 29. Bancada para a ciclagem térmica em disco único (diâmetro $\phi=152,0$ mm) ou em seis corpos-de-prova simultâneos ($\phi = 11,7$ mm) radialmente equidistantes de um ângulo de 60°

Os objetivos dessa etapa investigativa foram a avaliação de:

- a) os procedimentos, as potencialidades e as limitações da máquina de ensaio disco-disco;
- b) a evolução do estado de tensões residuais devido à ciclagem térmica de pequenos discos retificados de aço AISI 52100;

- c) a qualidade da usinagem dos discos associada à forma e superfície das pistas, bem como desenvolver um método de extração de corpos-de-prova dos discos, permitindo sua análise por microscopia (SEM).

Os resultados foram importantes no reforço às decisões de buscar um novo fornecedor que assegurasse uma melhor qualidade na usinagem dos discos, isolar acusticamente a sala e incorporar a monitoração dos ensaios através do sinal acústico audível, da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar no interior da sala.

Durante os ensaios preliminares, *os mecanismos* de que trata Hegel começaram a ser identificados. De acordo com a concepção Hegeliana, **integram os mecanismos:**

- a) **O objeto mecânico;**
- b) **O processo mecânico formal;**
- c) **O mecanismo absoluto.**

Para HEGEL [1966: 350-366], o *objeto mecânico* não se divide em massa e geometria, mas deve ser entendido como um *compósito* ou um *agregado*. No objeto,

- (a.1) particularidade é simplesmente *refletida* em totalidade e
- (a.2) sua totalidade é *determinada* em outro objeto.

A “relação com o outro”, de que trataria Sartre, é fator *determinante* no material. Na concepção de Hegel, o *processo mecânico*, por sua vez, é integrado pelo

- (b.1) *processo mecânico formal*, (materializado na forma de movimento, calor, magnetismo, eletricidade, som etc.),
- (b.2) *processo mecânico real* (em que o mais fraco pode ser confinado e indentado pelo mais forte até que possam, conjuntamente, constituir uma esfera; a resistência é o momento da superação de um objeto pelo outro) e
- (b.3) *produto do processo mecânico* (o objeto em geral, em sua individualidade, equilíbrio e negação de sua autodeterminação).

O *mecanismo absoluto*, constituído pela

- (c.1) *essência, cerne ou corpo central* (a média real entre muitos objetos que agem mecanicamente sobre os outros e é a sua universalidade objetiva e o seu gênero; o atrito e todas as outras formas de resistência são apenas manifestações de centralidade),
- (c.2) *lei* :

c.2.1. a ordem, em que se distinguem a realidade ideal da objetividade e sua realidade externa;

c.2.2. a uniformidade formal é regra, não é lei;

c.2.3. apenas mecanismo livre tem uma lei;

(c.3) *transição de mecanismo*: o objeto, indeterminadamente, com sua independência essencial na centralidade,

c.3.1. não é independente,

c.3.2. nem se preserva,

c.3.3. nem tem força para resistir a um objeto externo, porque *sua relação é uma tendência*.

Refletindo no escopo da concepção filosófica da Lógica Hegeliana, na fundamentação científica das irreversibilidades de Boltzmann e filosófica da complexidade de Sartre e de Morin, idealizou-se a configuração sistêmica da Figura 30 que, do ponto de vista metodológico, norteou o desenvolvimento deste trabalho.

Ante a complexidade do desgaste por fadiga de contato, expressa pelas interrelações, ainda consideradas incompletas, apresentadas na Figura 30, foram tomadas decisões baconianas e cartesianas, inspiradas em Boltzmann.

Investigações preliminares, envolvendo seis ensaios disco-disco de aço AISI 52100 tratado termicamente, designados por ensaio de rolamento ER81, ER82, ER83, ER84, ER85 e ER86 foram feitas e, através de uma metodologia baconiana, identificou-se o sistema tribológico cujas entradas e saídas macroscópicas (HOLMBERG *et al.* [1998]), mensuráveis durante o funcionamento dos discos, são apresentadas na Figura 31.

Mostraram-se relevantes as *variáveis de entrada* Vida (L [ciclos]), Carga Normal (N [N]), Velocidades dos Discos Motor (V_{MR} [m/s]) e Movido (V_{MV} [m/s]) e as *variáveis de saída* Aquecimento (Q [K/ciclo]), Afinidade (A [K⁻¹]), Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) e Umidade do Ar (H [%]) (MEDEIROS *et al.* [2002-b]).

O acúmulo cíclico de danos microscópicos em um mesmo par de amostras de materiais em contato foi então avaliado por uma *análise de correlação canônica*, correlacionando-se dois grupos sistêmicos de variáveis, um de entrada e um de saída, tomadas sob a forma de *escores reduzidos*, os chamados “*escores-z*”, padronizados estatisticamente com média $\bar{x} = 0$ e desvio-padrão $s = 1$ (MEDEIROS *et al.* [2002-b]).

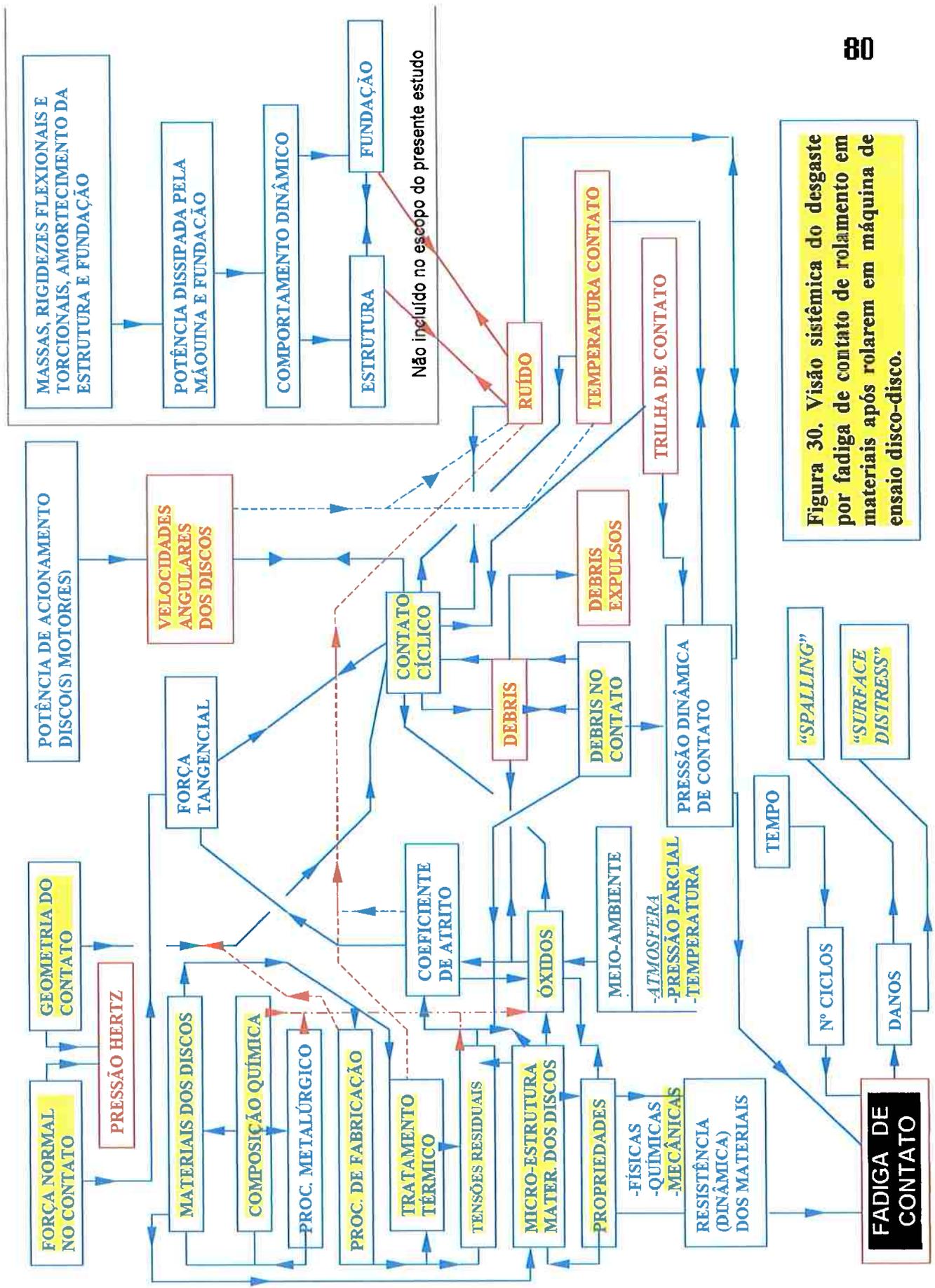
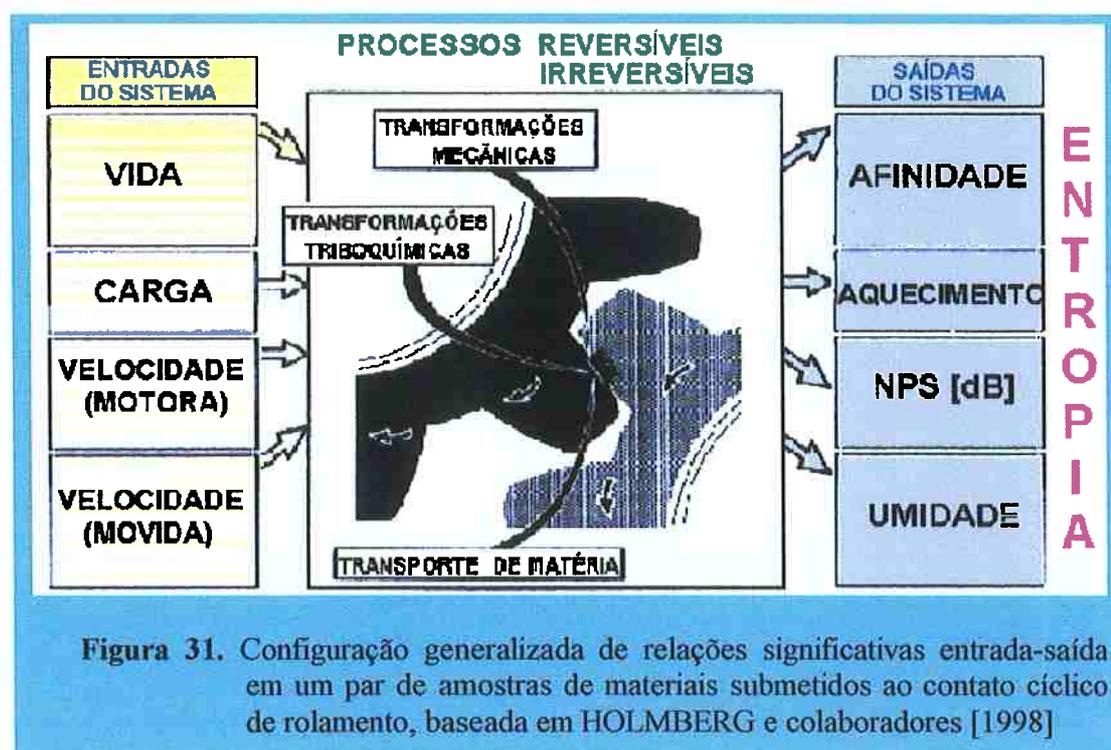


Figura 30. Visão sistêmica do desgaste por fadiga de contato de rolamento em materiais após rolarem em máquina de ensaio disco-disco.



Todo fenômeno irreversível causa perdas de exergia, levando a estados de anergia crescente. A *anergia* é a diferença entre a energia e a exergia de um sistema. A *exergia* foi proposta como sendo a parte da energia que pode ser convertida em outro tipo de energia, em um processo reversível. (SZARGUT; MORRIS; STEWARD [1988]).

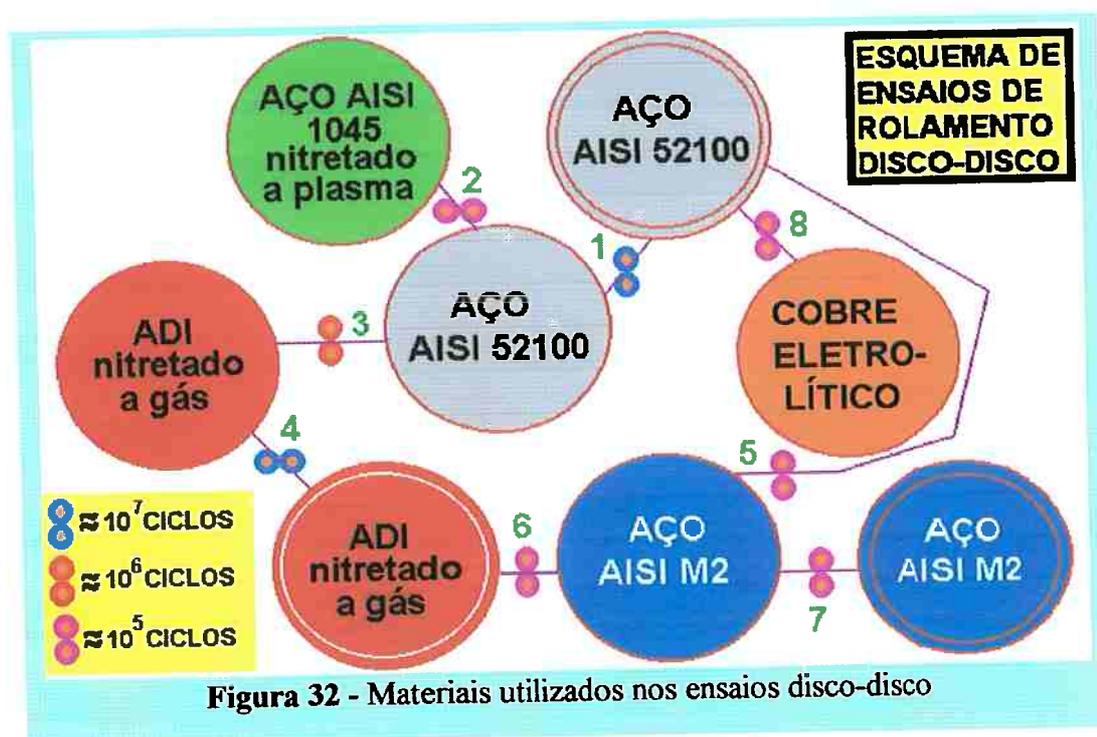
No estabelecimento de uma metodologia adequada ao estudo do desgaste por rolamento cíclico em máquina de ensaio disco-disco, formulou-se a *hipótese investigativa central* desta Tese, de que o dano por desgaste de rolamento associa-se intrinsecamente à relação entre a *energia* de entrada e à *anergia* de saída do sistema:

“Para níveis equivalentes de energia elástica de vibração, a evolução ou a presença de transientes de não-linearidade das variáveis pressão máxima de Hertz, velocidade dos discos, tensão residual nas pistas, nível de pressão sonora e temperatura de contato, admitidas como entrada-saída de um sistema tribológico de rolamento cíclico, é uma medida da progressão das irreversibilidades, da deterioração do contato e, portanto, do desgaste por fadiga de contato das amostras desses materiais.”

3.3. Materiais

Os cinco materiais metálicos usados nos ensaios disco-disco que integram este trabalho estão apresentados na Figura 32. Os números indicam a seqüência de ensaio, enquanto as linhas sinalizam para os pares tribológicos investigados.

Nas famílias de ensaios 5, 6 e 7, observam-se circunferências concêntricas em um dos discos, simbolizando que tais discos foram reutilizados, após ensaio anterior, remoção por eletroerosão de uma coroa circular contendo a pista de contato desgastada e usinagem de nova superfície de contato. Os diâmetros são listados na Tabela 16, p. 118-121.



Adotou-se como material de referência o aço AISI 52100, equivalente ao aço DIN 100 Cr 6, por sua ampla utilização industrial na fabricação de pistas internas, externas e corpos rolantes de mancais de rolamentos.

Em segundo lugar de importância, pelo seu amplo potencial de uso em engrenagens cilíndricas, utilizou-se o ferro fundido nodular austemperado (*"Austempered Ductile Iron, ADI"* [ing.]), nitretado convencionalmente e, como paralelo a esse processo, um aço AISI 1045 recozido, nitretado a plasma.

Em terceiro lugar, pela sua aplicabilidade em ferramentas, notadamente brocas helicoidais, usou-se um aço-ferramenta AISI M2, de procedência alemã, o qual foi

submetido a um esquema de tratamento térmico descrito posteriormente e, no qual, coexistiam 42 corpos-de-prova (C.P.) prismáticos pré-usinados desse aço e 21 C.P. de um seu similar brasileiro, o VM2. Para esses 63 corpos-de-prova prismáticos, idealizou-se uma avaliação comparativa da tenacidade à fratura, através de ensaio de corpos-de-prova entalhados “Chevron”, descritos no Anexo A.

Finalmente, esse cenário foi complementado por um material não ferroso, utilizado em estado recozido, cobre eletrolítico comercial, na expectativa de se investigar as respostas do nível de pressão sonora, temperatura de contato e tensão residual nas pistas de contato, de um metal com 99,3 % de pureza, dúctil, em contato de rolamento contra o aço AISI 52100 tratado termicamente.

Apresentar-se-ão a composição química e caracterização metalográfica das amostras de materiais ensaiados, em que se usaram um Espectrômetro de Emissão Óptica modelo ARL 3460, da Applied Research Laboratories, um Espectrômetro de Descarga por Luminescência modelo GDS 750A, da LECO, e um equipamento Leika para fotos digitais acoplado a um microscópio óptico.

3.3.1. Aço AISI 52100 (DIN 100Cr6)

A composição química do aço AISI 52100 utilizado é apresentada na Tabela 5. É de procedência brasileira e foi adquirido comercialmente na forma de uma única barra cilíndrica laminada, com 1.100 mm de comprimento e diâmetro de 152,4 mm, a partir do qual foram seccionados cilindros (“bolachas”), em serra automática, com espessura $28,0 \pm 0,5$ mm. O diâmetro final desses discos foi de $150,00 \pm 0,05$ mm.

Tabela 5 - Composição química mássica (%) do aço AISI 52100

C	Ni	Mn	Cr	P	Cu	S	Ti	Si	V	Fe
1,00	0,03	0,38	1,46	0,016	0,009	0,015	0,006	0,27	0,005	Bal

As Figuras 33.A e 33.B apresentam fotos obtidas por Microscopia Óptica desse material na condição recebida, após lixamento e polimento convencional e ataque com Nital 1 %, revelando grãos de perlita e ferrita. Ao lado, nas Figuras 33.A1 e 33.B1, apresentam-se as regiões do disco de onde foram extraídos os corpos-de-prova e os respectivos contrastes das Figuras 33.A e 33.B, de modo a se ter um panorama visual das frações volumétricas da microestrutura do aço, através de uso da ferramenta “Desenho animado” do *software* MG PhotoSuite ME®.



Figura 33.A. Aço AISI 52100, na condição recebida, grãos de perlita e ferrita -- Nital 1% 150X

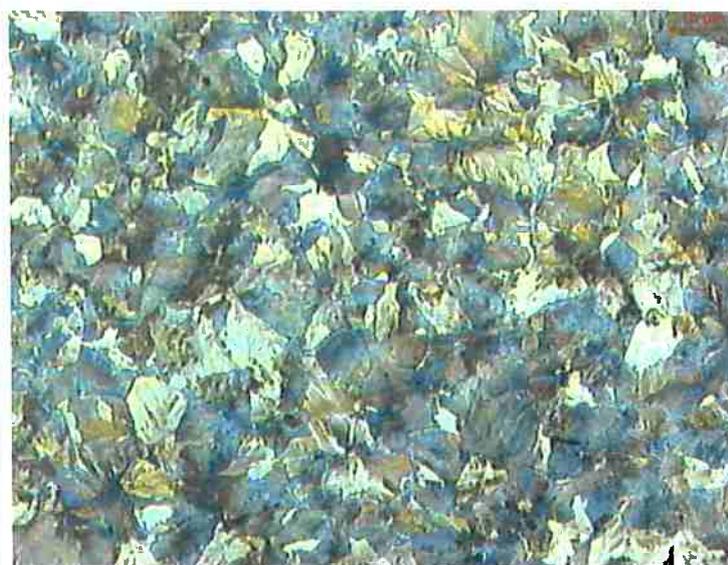


Figura 33.B. Aço AISI 52100, na condição recebida, grãos de perlita e ferrita -- Nital 1% 20 μm

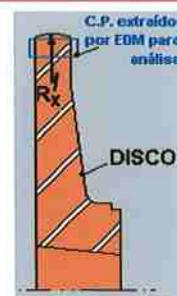


Fig. 33.A1. Contraste de cores da Fig. 33.A, obtido pela ferramenta “Desenho animado” do software MG PhotoSuite ME



Fig. 33.B1. Contraste de cores da Fig. 33.B, obtido pela ferramenta “Desenho animado” do software MG PhotoSuite ME

Na seqüência, as “bolachas” de aço foram encaminhadas à pré-usinagem em torneamento CNC, assegurando-se um sobremetal de 0,2 a 0,5 mm, para retificação.

As Tabelas 6 e 7 apresentam as etapas dos procedimentos desde a pré-usinagem até a inspeção dos danos de desgaste nos discos de aço AISI 52100.

Após a austenitização comum a ambos, utilizaram-se dois esquemas distintos de resfriamento, banho de sais a 220 °C e banho de óleo a 60 °C.

Tabela 6 - Esquemas utilizados para usinagem, tratamento térmico, retificação e caracterização geométrica final dos corpos-de-prova (C.P.)

Etapa	Têmpera em banho de Sais [SBQT]	Têmpera em Óleo [OQT]
1	Usinagem CNC dos discos	Usinagem CNC dos discos
2	Austenização a 850°C durante meia hora	Austenização a 850°C durante meia hora
3	Isoterma a 220°C em banho de sais	Resfriamento rápido em óleo para têmpera ("fast oil" [ing.])
4	Resfriamento ao ar calmo	Revenimento a 170°C durante uma hora
5	Revenimento a 170°C durante uma hora	Retificação final de perfil das pistas
6	Retificação final de perfil das pistas	Balanceamento dos discos
7	Balanceamento dos discos	Caracterização geométrica dos discos
8	Caracterização geométrica dos discos	
Dureza	Média: 66,0 Rc Desvio Padrão: 1,1 Rc	Média: 64,5 Rc Desvio Padrão: 1,3 Rc

Tabela 7 - Procedimentos de ensaio, preparação e inspeção de defeitos nos C.P.

Etapa	Procedimento	Equipamento ou Processo Usado
1	Ensaio dos discos motor e movido	Máquina de Ensaio disco-disco
2	Medição da variação mássica de cada disco ensaiado	Balança semi-analítica, resolução 0,01g
3	Fotografia das pistas de rolamento	Escleroscópio/Câmara Fotográfica
4	Extração de coroas circulares externas (anéis) de cada disco	Usinagem eletroerosiva
5	Inspeção visual e óptica das superfícies ensaiadas	Lupa 2X, 10X
6	Cortes de três setores circulares de cada anel com algum dano	Usinagem eletroerosiva
7	Microscopia óptica e de varredura em alguns corpos-de-prova de (6)	Microsc. Óptica, SEM/EDS
8	Corte, embutimento e polimento de corpos-de-prova das secções transversal e circunferencial e da pista dos discos motor e movido	Disco de corte e bancada metalográfica
9	Microscopia óptica ou de varredura nos corpos-de-prova obtidos em (8)	Microscopia Ótica, SEM/EDS

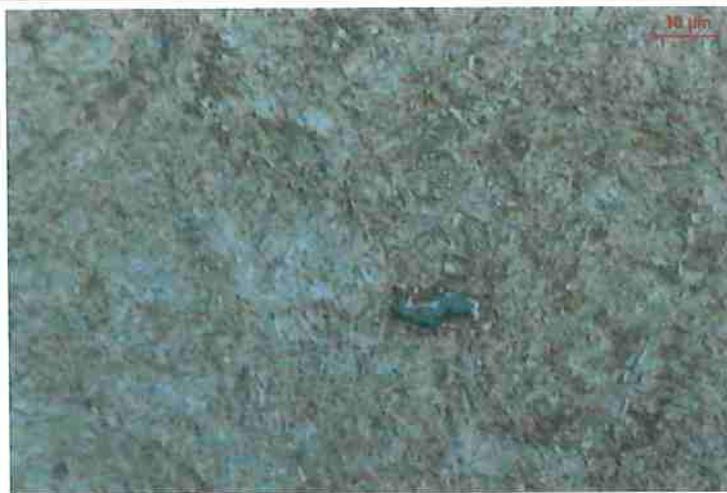


Figura 34.A. Aço AISI 52100OQT
Ataque: **Nital 1%**
Partícula escura na zona central: sulfeto



Figura 34.B. Aço AISI 52100OQT
Ataque: **Nital 1%**
Partícula escura na zona central: sulfeto



Fig. 34.A1. Contraste de cores da Fig. 34.A:
Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)



Fig. 34.B1. Contraste de cores da Fig. 34.B:
Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

A condição microestrutural predominantemente martensítica obtida pelo aço AISI 52100, após austenitização, resfriamento em banho de óleo e revenimento (doravante designada por **OQT**), dos discos para ensaio de rolamento cíclico na máquina de ensaio disco-disco é apresentada pelas Figuras 34.A, 34.B, 35.A, 35.B, 36.A e 36.B, conforme diversos ataques ou ampliações.



30 μm

Figura 35.A. Aço AISI 52100QT
Ataque: **Picral-Nital**



30 μm

Figura 35.B. Aço AISI 52100QT
Ataque: **Picral-Nital**

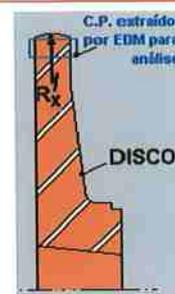


Fig. 35.A1. Contraste de cores da Fig. 35.A:
Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

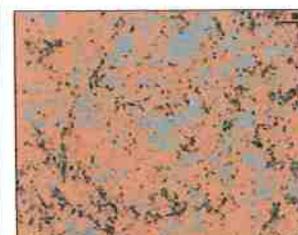


Fig. 35.B1. Contraste de cores da Fig. 35.B:
Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

Crítica: Após sucessivos ataques, seja com Nital, seja com Nital-Picral, não foram satisfatórios os aspectos apresentados pela microestrutura martensítica atacada por esses reagentes para uma temperatura de têmpera de 850 °C. O aço AISI 52100, temperado a 1.020 °C, apresenta de forma clara a martensita, com agulhas visíveis, como obtido por SILVA [2001: 145].



Figura 36.A. Aço AISI 52100QT
Ataque: **Picral-Nital**
Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto



Figura 36.B. Aço AISI 52100QT
Ataque: **Picral-Nital**
Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto



Fig. 36.A1. Contraste de cores da Fig. 36.A:
Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

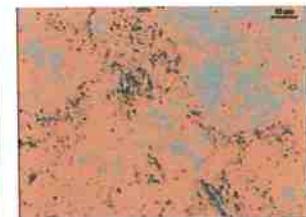


Fig. 36.B1. Contraste de cores da Fig. 36.B:
Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

A condição microestrutural predominantemente martensítica obtida pelo aço AISI 52100, após austenitização, resfriamento em banho de sais e revenimento (doravante designada por **SBQT**), dos discos para ensaio de rolamento cíclico na máquina de ensaio disco-disco é apresentada pelas Figuras 37.A, 37.B, 38.A, 38.B, 39.A e 39.B, conforme diversos ataques ou ampliações.



20 μm

Figura 37.A. Aço AISI 52100 SBQT
 Ataque: **Nital 1%**
 Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto



30 μm

Figura 37.B. Aço AISI 52100 SBQT
 Ataque: **Nital 1%**
 Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto



Fig. 37.A1. Contraste de cores da Fig. 37.A:
 Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

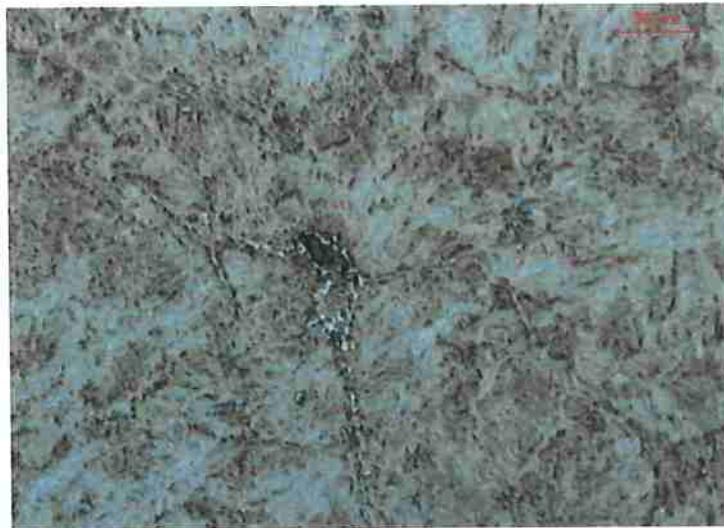


Fig. 37.B1. Contraste de cores da Fig. 37.B:
 Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)



20 μm

Figura 38.A. Aço AISI 52100SBQT
 Ataque: **Picral-Nital**
 Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto



30 μm

Figura 38.B. Aço AISI 52100SBQT
 Ataque: **Picral-Nital**
 Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto

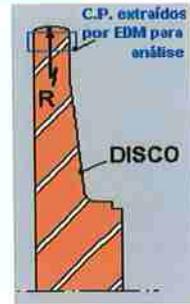


Fig. 38.A1. Contraste de cores da Fig. 38.A:
 Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

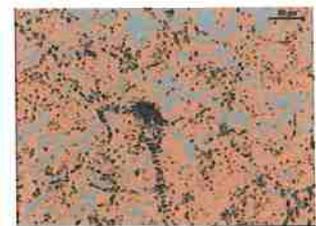
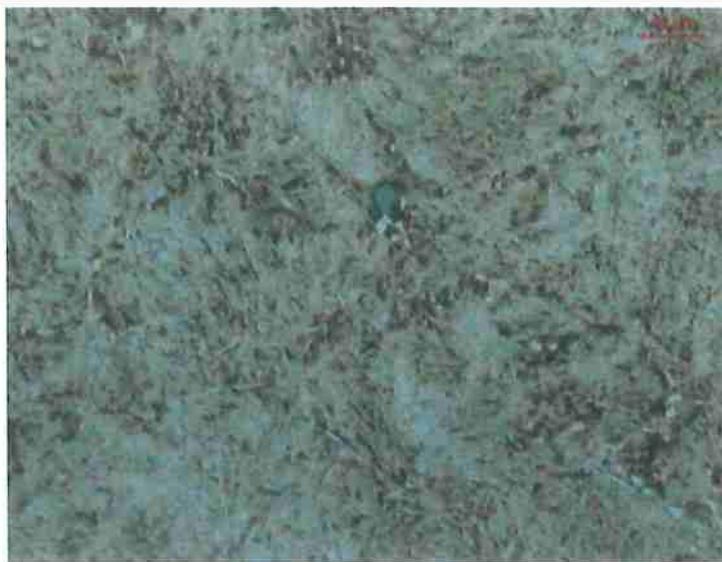
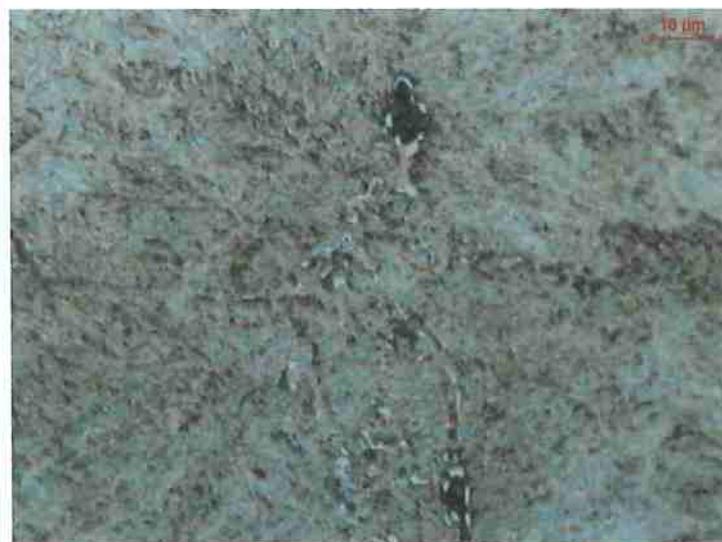


Fig. 38.B1. Contraste de cores da Fig. 38.B:
 Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)



20 µm

Figura 36.A. Aço AISI 52100SBQT -- 780X
 Ataque: **Picral-Nital**
 Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto



20 µm

Figura 36.B. Aço AISI 52100SBQT
 Ataque: **Picral-Nital**
 Matriz martensítica com carbonetos nos contornos de grão e alguns pontos de sulfeto

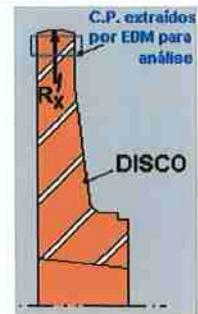


Fig. 36.A1. Contraste de cores da Fig. 36.A:
 Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)



Fig. 36.B1. Contraste de cores da Fig. 36.B:
 Matriz martensítica (ocre), austenita retida e carbonetos (cinza), carbonetos e sulfetos (pontos pretos)

3.3.2. Aço AISI M2

A composição química do aço AISI M2 utilizado na confecção dos discos (diâmetro final de $160,00 \pm 0,05$ mm) é apresentada na Tabela 8. É de procedência alemã (dureza 256 HB S2,5/187,5) e foi importado pela filial brasileira da Thyssen Aços Especiais, especialmente para este trabalho, na forma de uma única barra cilíndrica laminada, comprimento de 500 mm e diâmetro de 165 mm, a partir do qual foram seccionadas, em serra automática, “bolachas” com 28 mm de espessura.

Tabela 8. Composição química mássica (%) do aço AISI M2 importado

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Nb	Al
0,90	0,371	0,253	0,030	0,006	3,952	0,211	0,254	0,004	0,044	0,0414
Mo	W	Co	V	Fe	Dureza média após tratamento térmico: 65,8 HRC (Desvio-padrão: 0,7)					
4,018	6,20	0,255	1,770	bal						

Para acompanhar os efeitos das transformações decorrentes do tratamento térmico, utilizou-se adicionalmente um aço AISI M2 nacional fabricado pela Villares (VM2) em barra cilíndrica (dureza 305 HB S2,5/187,5), com diâmetro 12,7 mm, cuja composição química é apresentada na Tabela 9. Essa bitola justificava-se pelo estudo comparativo da tenacidade à fratura entre vários aços M2 em C.P. “chevron”, em colaboração com SANTANA DA SILVA [2001].

Tabela 9. Composição química mássica (%) do aço AISI M2 nacional

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Nb	Al
0,917	0,451	0,260	0,034	0,005	4,302	0,238	0,242	0,003	0,047	0,052
Mo	W	Co	V	Fe	Dureza média após tratamento térmico: 65,7 HRC (Desvio-padrão: 0,5)					
3,798	5,943	0,128	1,646	bal						

As “bolachas” de aço AISI M2 importado foram submetidas a um torneamento CNC, pré-usinando-se os discos de ensaio, assegurando-se-lhes um sobremetal, de 0,3 a 0,5 mm, para retificação após o tratamento térmico descrito na Tabela 9.

Uma das “bolachas” de aço AISI M2 importado foi empregada na confecção de 42 paralelepípedos de $13,0 \times 13,0 \times 21,5$ mm³, denominados “testemunhas de processo de tratamento térmico, B_i (i=1 ... 42)”, utilizados, após o tratamento térmico, na preparação de corpos-de-prova com entalhe “chevron” para a avaliação de sua tenacidade à fratura nos termos da norma ASTM-1304 / 97 (Anexo 1).

A distribuição dessas testemunhas B_i , ao longo das etapas de tratamento térmico, é descrita pela Tabela 10.

Tabela 10. Esquema utilizado para tratamento térmico dos discos corpos-de-prova (C.P.) de aço AISI M2 importado e testemunhas de processo de aço AISI M2 nacional (A_i) e importado (B_i)

Etapa	Testemunhas de processo M2 nacional	Testemunhas de processo M2 importado	Etapa do Tratamento Térmico dos discos e testemunhas de processo	Temperatura [°C]	Tempo [min]
1			Primeiro pré-aquecimento	550	15
2			Segundo pré-aquecimento	850	15
3			Austenitização	1190	08
4			Isoterma	550	05
5	A1	B6,B7,B8, B9,B10	Resfriamento ao ar calmo	Temp Amb.	15
6	A2,A3,A4, A5,A6	B1,B2,B3, B4,B5, B11,B12,B13, B14,B15	Primeiro Revenimento	550	60
7	A7,A8,A9, A10, A11	B16,B17,B18, B19,B20	Primeiro Subresfriamento	-85	60
8	A12,A13,A14, A15,A16	B21,B22,B23, B24,B25	Segundo Revenimento	550	60
9		B26,B27,B28, B29,B30	Segundo Subresfriamento	-85	60
10		B31,B32,B33, B34,B35	Terceiro Revenimento	550	60
11	A17,A18,A19, A20,A21	B36,B37,B38, B39,B40,B41, B42	Quarto Revenimento	550	60

Analogamente, a partir da barra de aço AISI M2 nacional, prepararam-se 21 paralelepípedos com dimensões $10,5 \times 10,5 \times 15,5 \text{ mm}^3$, denominados “testemunhas de processo de tratamento térmico, A_i ($i=1 \dots 21$)”, usados na preparação de corpos-de-prova com entalhe “chevron” para avaliação de sua tenacidade à fratura em paralelo à família B_i . A Tabela 10 mostra a distribuição dessas amostras de acordo com as etapas de tratamento térmico. O menor número de amostras A_i deveu-se à restrição de custos da investigação.

As Figuras 40.A e 40.B, 41.A e 41.B, 42.A e 42.B, 43.A e 43.B, 44.A e 44.B, 45.A e 45.B, apresentam aspectos microestruturais de algumas testemunhas A_i e B_i .

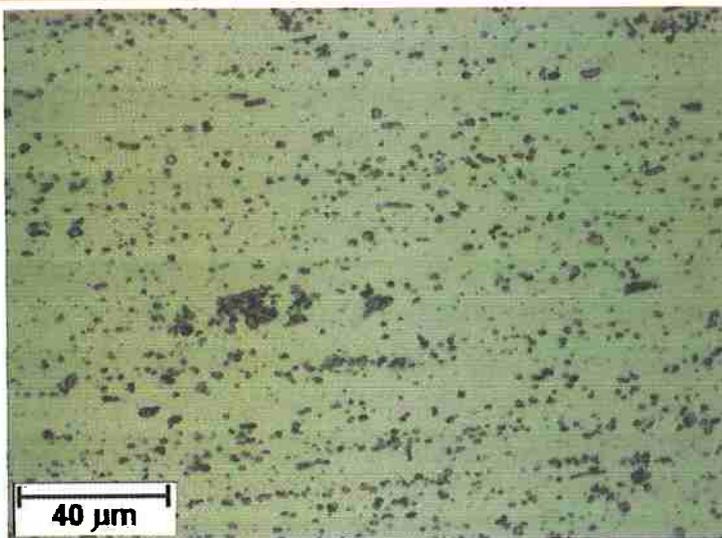


Figura 40.A. Aço AISI M2 nacional (testemunha A16), após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos
 Ataque:-- Nital 2%
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

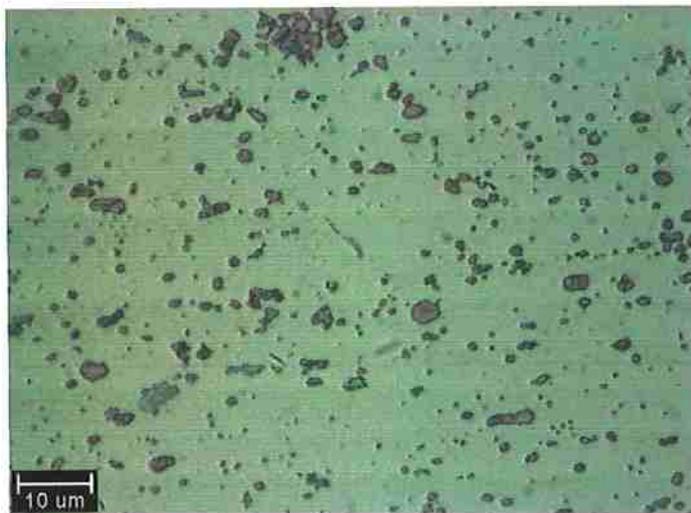


Figura 40.B. Aço AISI M2 nacional (testemunha A16), após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos
 Ataque:-- Nital 2%
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

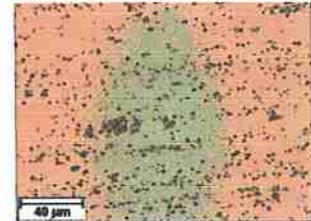
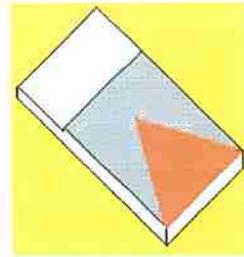


Fig. 40.A1. Contraste de cores da Fig. 40.A: Matriz martensítica (ocre), e carbonetos (pequenas zonas escuras)



Fig. 40.B1. Contraste de cores da Fig. 40.B: Matriz martensítica (ocre), e carbonetos (pequenas zonas escuras)

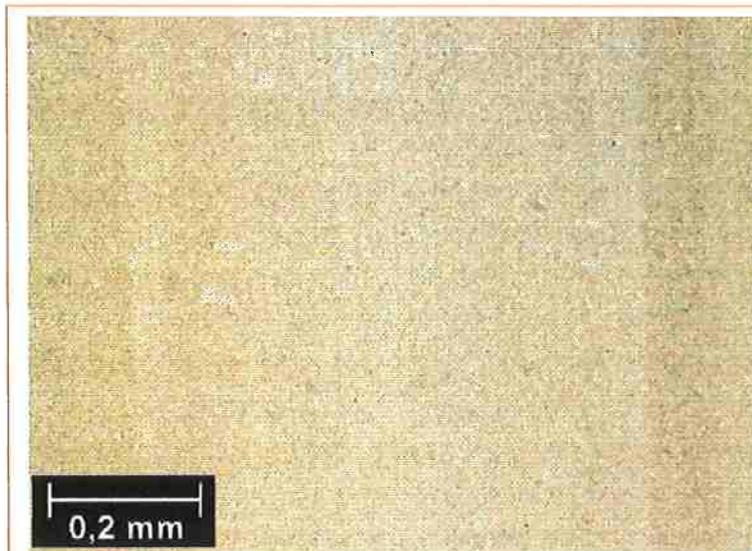


Figura 41.A. Aço AISI M2 nacional, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha A16)
 Ataque:-- **Groensbeck**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos pouco visível

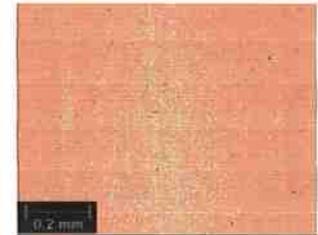
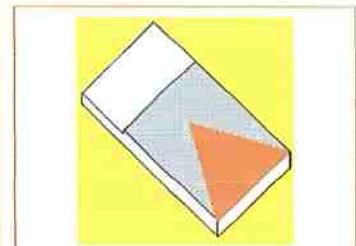


Fig. 41.A1. Contraste de cores da Fig. 41.A: Matriz martensítica (ocre), e carbonetos (zonas verdes e pretas)

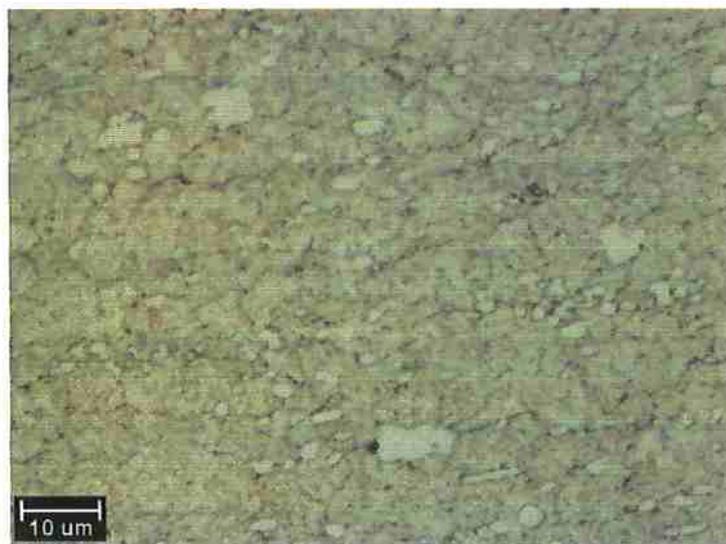


Figura 3.41.B. Aço AISI M2 nacional, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha A16)
 Ataque:-- **Groensbeck**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos



Fig. 41.B1. Contraste de cores da Fig. 41.B: Matriz martensítica (ocre) e carbonetos (zonas verdes e pretas)

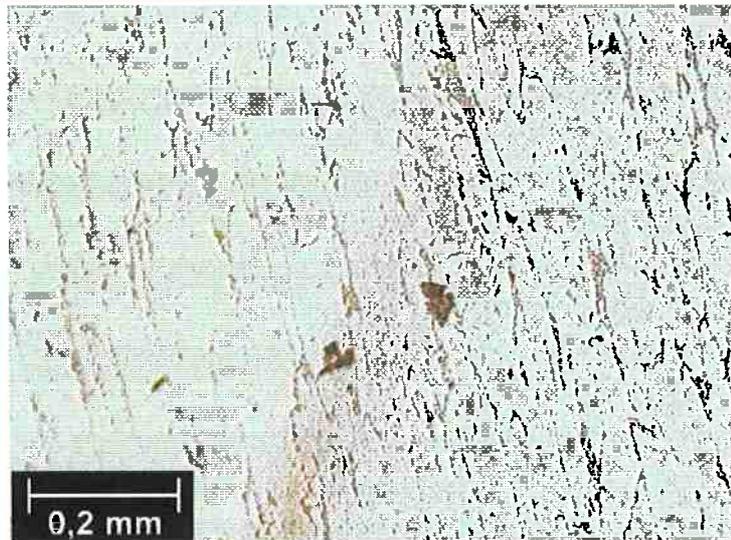


Figura 42.A. Aço AISI M2 importado, após têmpera (testemunha B7)
 Ataque:-- **Nital 2%**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

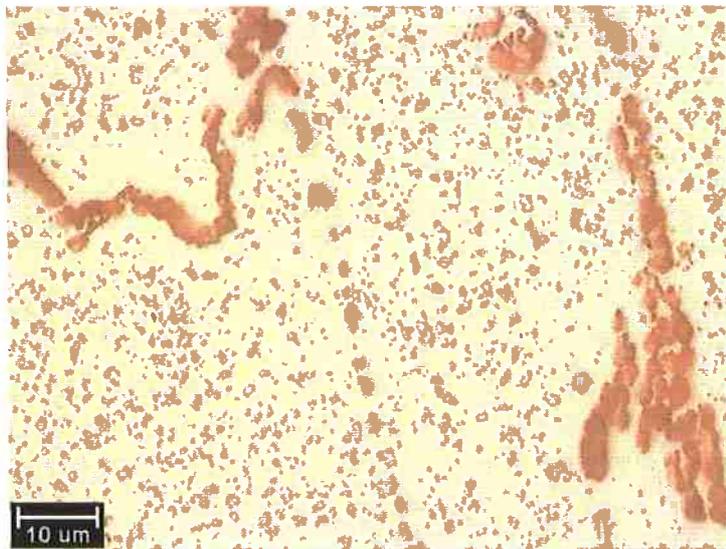


Figura 42.B. Aço AISI M2 importado, após têmpera (testemunha B7)
 Ataque:-- **Groensbeck**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

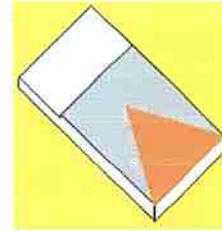


Fig. 42.A1. Contraste de cores da Fig. 42.A:
 Matriz martensítica (ocre), e carbonetos (zonas escuras)

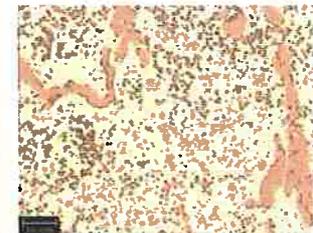


Fig. 42.B1. Contraste de cores da Fig. 42.B:
 Matriz martensítica (amarelada) e carbonetos (zonas ocre e escuras)

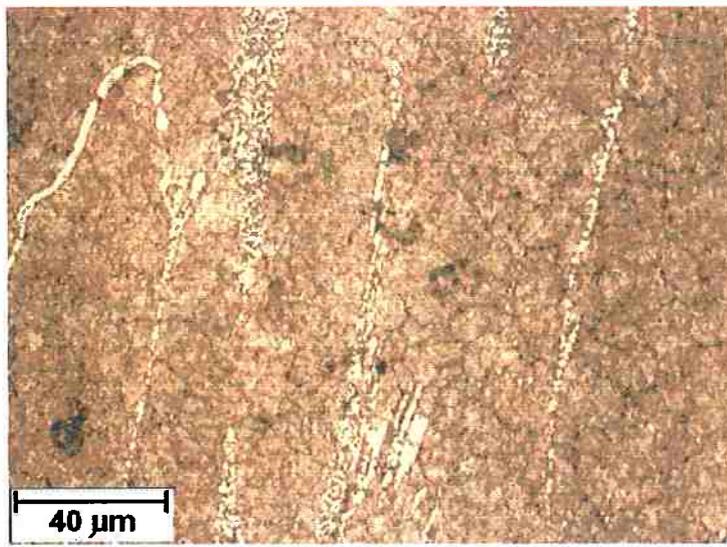


Figura 43.A. Aço AISI M2 importado, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha B37)
 Ataque:-- **Groensbeck**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

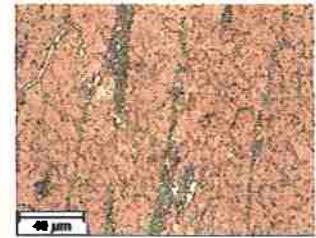
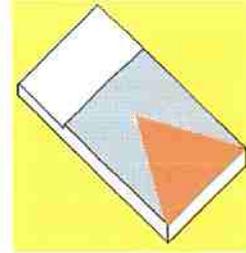


Fig. 43.A1. Contraste de cores da Fig. 43.A: Matriz martensítica (ocre), e carbonetos (zonas escuras)



Figura 43.B. Aço AISI M2 importado, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha B37)
 Ataque:-- **Nital 2%**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

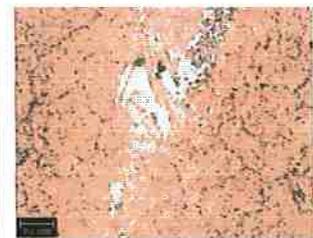


Fig. 43.B1. Contraste de cores da Fig. 43.B: Matriz martensítica (ocre) e carbonetos (zonas mais claras e mais escuras)

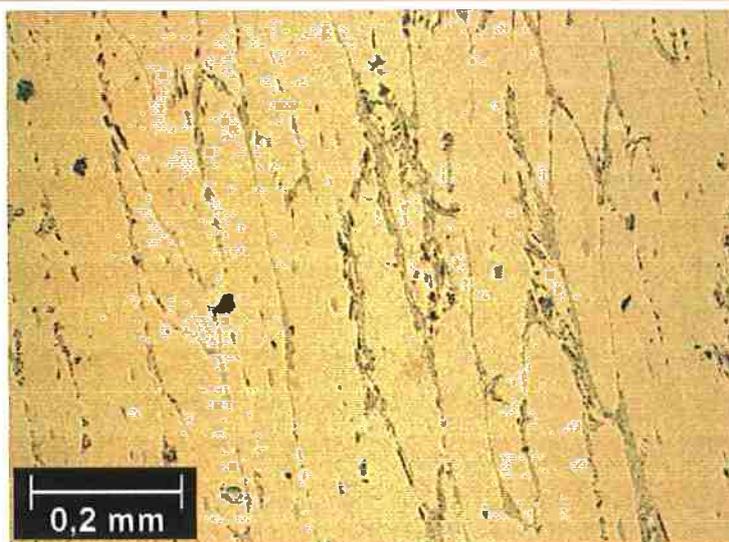


Figura 44.A. Aço AISI M2 importado, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha B42)
 Ataque:-- **Groensbeck**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

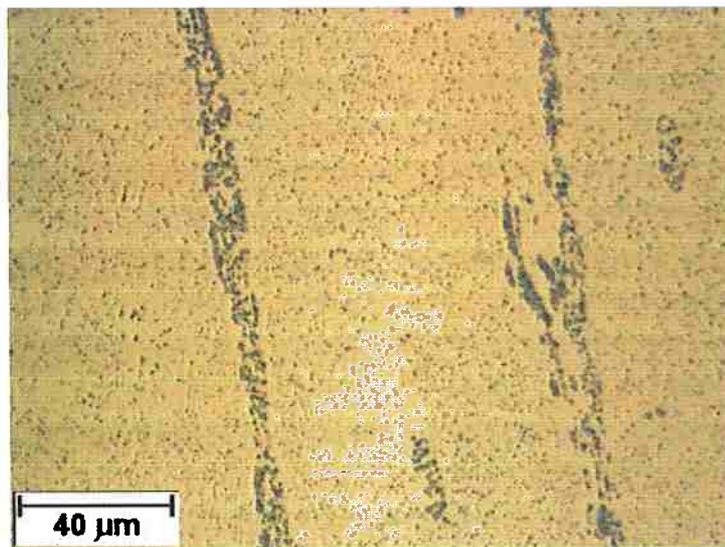


Figura 44.B. Aço AISI M2 importado, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha B42)
 Ataque:-- **Groensbeck**
 Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

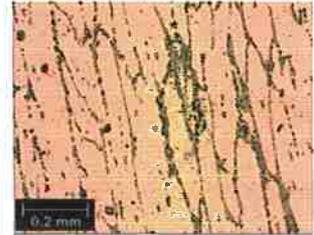
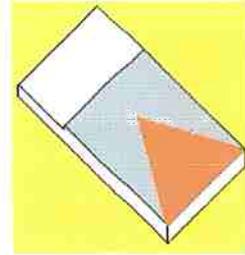


Fig. 44.A1. Contraste de cores da Fig. 44.A:
 Matriz martensítica (ocre) e carbonetos (pontos e zonas escuras)

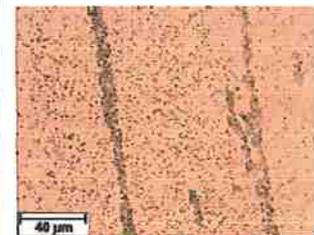


Fig. 44.B1. Contraste de cores da Fig. 44.B:
 Matriz martensítica (ocre) e carbonetos (pontos e zonas escuras)



Figura 45.A. Aço AISI M2 importado, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha B42)
Ataque:-- Nital 2%
Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos



Figura 45.B. Aço AISI M2 importado, após têmpera, dois subresfriamentos e quatro revenimentos (testemunha B42)
Ataque:-- Nital 2%
Matriz martensítica e malha de distribuição de carbonetos

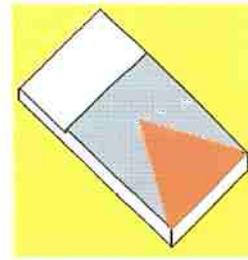


Fig. 45.A1. Contraste de cores da Fig. 45.A: Matriz martensítica (ocre), e carbonetos (zonas escuras)



Fig. 45.B1. Contraste de cores da Fig. 45.B: Matriz martensítica (ocre) e carbonetos (zonas escuras)

3.3.3. Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) Nitretado

A liga de ferro fundido nodular austemperado (“*Austempered Ductile Iron*”, ADI [ing.]) foi fundida em forno de indução, de média frequência, usando sucata de ferro e aço, a quem foram adicionados cobre, molibdênio e silício. Os discos foram fundidos com cerca de 3 mm de sobremetal, torneados e retificados com rebolo de perfil esférico, cujo diâmetro foi de $152,00 \pm 0,05$ mm. A composição química desse material para ensaio é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11. Composição química mássica (%) do ADI nitretado

C	Si	Mn	P	S	Mg	Mo	Cu	Cr	Ni	Fe
3,52	2,94	0,204	0,04	0,011	0,048	0,262	0,99	0,021	0,011	bal.
Microestrutura antes do processo de nitretação: 7% nódulos										
Dureza Brinell HB Média: 280 HBS _{2,5/187,5} Desvio Padrão: 6										
Camada nitretada: HV Média: 670 HV _{0,05} Desvio Padrão: 12										

A seqüência de tratamentos térmicos e usinagem é apresentada pela Tabela 12. A primeira fase de tratamento objetivava assegurar ao ADI uma microestrutura bainítica superior. A segunda, constituída por nitretação gasosa a 570 °C (Tabela 12), asseguraria uma camada branca resistente ao desgaste por rolamento.

Tabela 12. Esquema utilizado para tratamento térmico e usinagem dos discos de ferro fundido nodular austemperado (ADI) e nitretado

Etapa	Etapa dos Tratamentos Térmicos e Usinagem dos discos de ADI	Temperatura [°C]	Tempo [min]
1	Austenitização	900	120
2	Resfriamento em banho de sais	380	120
3	Resfriamento ao ar calmo	Temp. Ambiente	-
4	Torneamento CNC	-	-
5	Retificação, perfil esférico, $\phi 152,00 \pm 0,05$ mm	-	-
6	Nitretação gasosa em amônia (NH ₃) dissociada (30%)	570	360

As Figuras 46 e 47 apresentam as microestruturas resultantes para o ADI, no processo investigativo de ORDOÑES [1998], no LFS-PME-EPUSP, em que se constatou que não há variação microestrutural significativa do ferro fundido nodular austemperado decorrente do processo de envelhecimento a que se submeteria o ADI durante a etapa de nitretação gasosa.

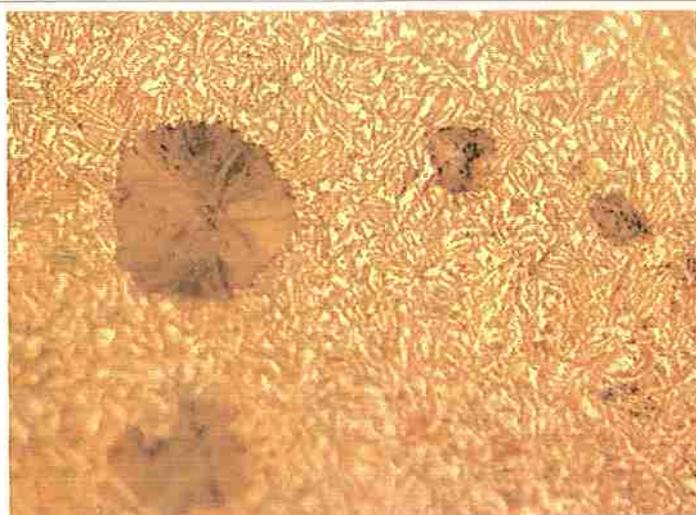


Figura 46. Ferro fundido nodular utilizado nos discos de ADI, após austêmpera **400X**
 Ataque:-- Nital 2%
 Matriz de ferrita bainítica, com austenita retida e nódulos de grafita

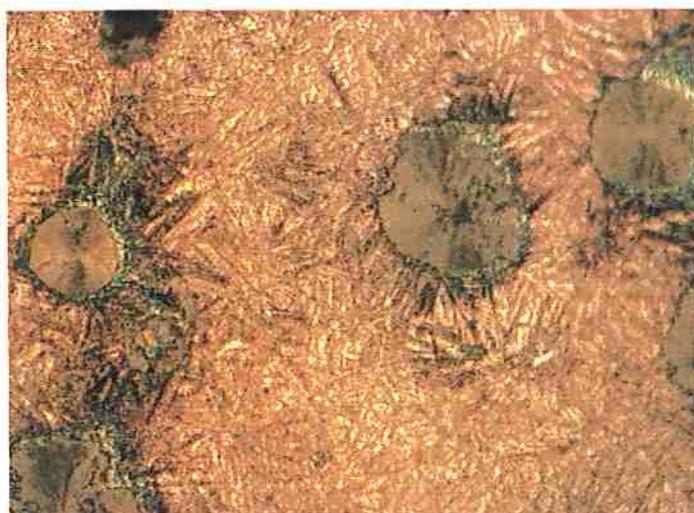


Figura 47. Ferro fundido nodular utilizado nos discos de ADI, após austêmpera e envelhecimento por duas horas **400X**
 Ataque:-- Nital 2%
 Matriz de ferrita bainítica, com austenita retida e nódulos de grafita



Fig. 46.A. Contraste de cores da Fig.46, destacando-se os nódulos de grafite da matriz



Fig. 47.A. Contraste de cores da Figura 47, destacando-se os nódulos de grafite da matriz.

As Figuras 48 e 49 apresentam fotos de microscopia, eletrônica de varredura (SEM) e óptica, da seção transversal abaixo da pista de contato de um dos discos de ADI, vendo-se a camada branca nitretada (HERNANDEZ e colaboradores [2001]).

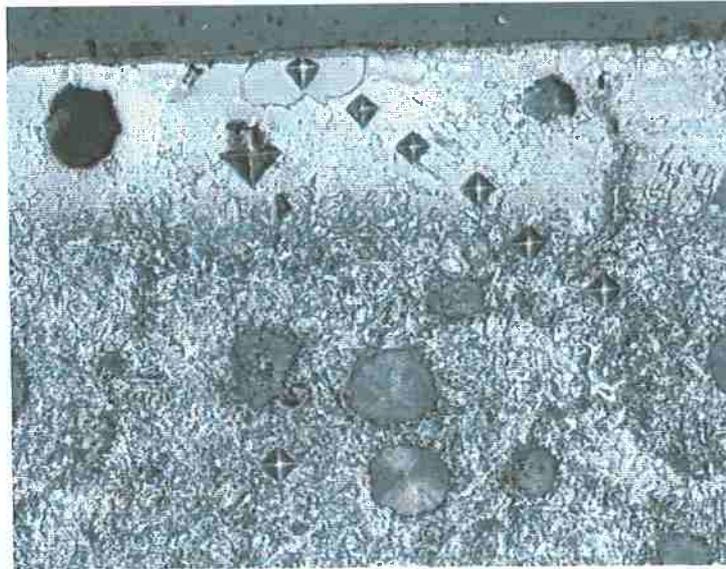


Figura 48. Presença de camada branca e zona de difusão na subsuperfície do disco de ensaio SEM-SE, 200X

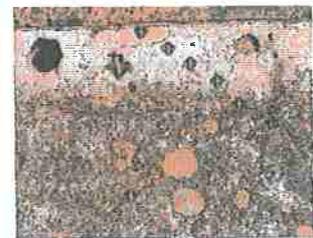
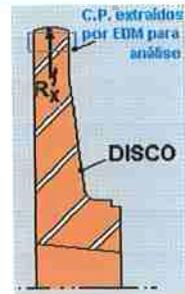


Fig. 48.A. Contraste de cores da Fig. 48, destacando-se da matriz a camada branca e os nódulos de grafite.

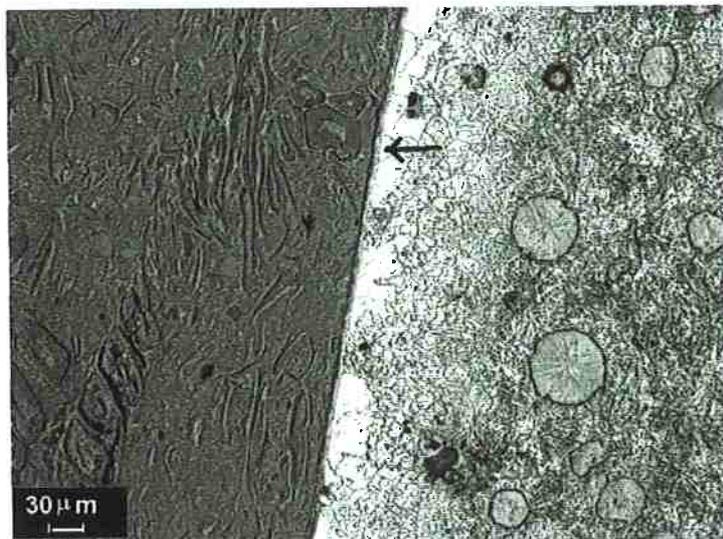


Figura 49. Camada branca (na ponta da seta), composta por nitretos $Fe_{2-3}N$ (fase ϵ) e, mais à direita, zona de difusão e matriz de ADI, em que se vêem os nódulos de grafite
Ataque:-- Nital 2%

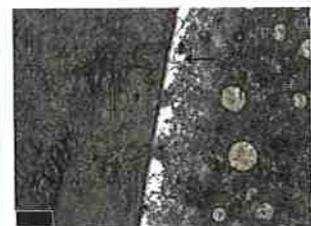


Fig. 49.A. Contraste de cores da Fig. 49, destacando-se a camada branca e os nódulos de grafite

3.3.4. Aço AISI 1045 nitretado a plasma

Os discos (diâmetro de $152,00 \pm 0,05$ mm) de aço AISI 1045 recozido, cuja composição química e dureza estão apresentadas na Tabela 13, foram nitretados ionicamente à temperatura de 500°C , durante duas horas, em atmosfera de 20 %N₂-80 %H₂. Utilizaram-se câmara e tecnologia de nitretação desenvolvidas por ALVES Jr. e colaboradores no período 1985-1999 (ALVES Jr. [2001]).

Tabela 13. Composição química mássica (%) do Aço AISI 1045

C	Si	Mn	P	S	Fe
0,44	0,37	0,618	0,04	0,029	bal.
Microestrutura antes do processo de nitretação:					
Dureza Brinell HB Média: 189 HBS _{2,5/187,5} Desvio Padrão: 6					
Camada nitretada: HV Média: 376 HV _{0,05} Desvio Padrão: 11					

O tratamento assegurou uma camada branca (espessura média de $10\ \mu\text{m}$) de nitretos, contígua à microestrutura perlítica do aço, Figura 50.

3.3.5. Cobre eletrolítico comercial

Os discos, com $160,00 \pm 0,05$ mm de diâmetro, foram usinados a partir de “bolachas” extraídas da barra redonda de $177,8$ mm (7”) de diâmetro. A Figura 51 apresenta a microestrutura hipoeutética observada em seções transversais dos discos de cobre, onde não havia variação microestrutural significativa, Tabela 14.

Tabela 14. Composição química mássica (%) do Cobre eletrolítico

Cu	Impurezas (S, O)
0,993	bal.
Microestrutura antes do processo de nitretação: glóbulos de óxido cuproso (Cu ₂ O) nos contornos de grão e colônias de Cu ₂ O e Cu ₂ S	
Dureza Brinell HB Média: 71 HBS _{2,5/62,5} Desvio Padrão: 2	

Material bibliográfico do curso de metalurgia e metalografia do cobre e suas ligas do CEBRACO (Centro Brasileiro para fomento do uso do cobre), disponível na biblioteca do PMT-EPUSP, ratifica a morfologia da microestrutura e as microanálises qualitativas (EDS-SEM) relativas aos óxidos e sulfetos apresentados.

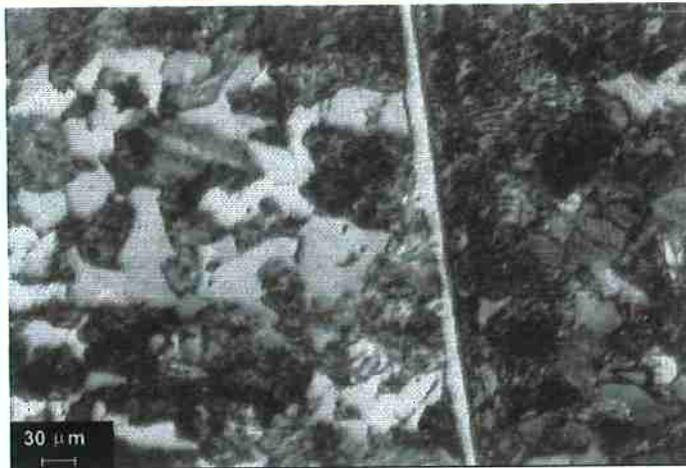


Figura 50. Aço-carbono AISI 1045 em estado recozido, nitretado ionicamente a 500 °C durante duas horas, apresentando grãos perlíticos com precipitados dispersos de Fe₄N (fase γ') e camada branca (espessura média de 10 μm) constituída de Fe₃N (fase ε)
Ataque:-- Nital 1%



Fig. 50.A. Contraste da Fig. 50, obtido pela ferramenta "Desenho Animado" do software MG PhotoSuite ME



Figura 51. Cobre eletrolítico apresentando glóbulos de óxido cuproso (Cu₂O) nos contornos de grão e algumas colônias de Cu₂O e Cu₂S
Sem ataque

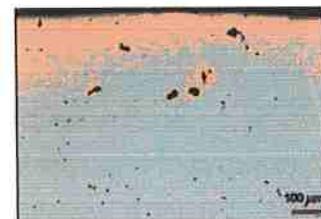


Fig. 51.A. Contraste de cores da Fig. 51, destacando-se os pontos escuros de glóbulos e colônias de Cu₂O

3.4. Métodos desenvolvidos e utilizados

3.4.1. Ensaios tribológicos de rolamento a seco

A bancada experimental utilizada nesta investigação é composta por uma máquina disco-disco PLINT, modelo TE73HS, enclausurada em uma câmara semi-anecóica, juntamente com a instrumentação apresentada na Figura 52.

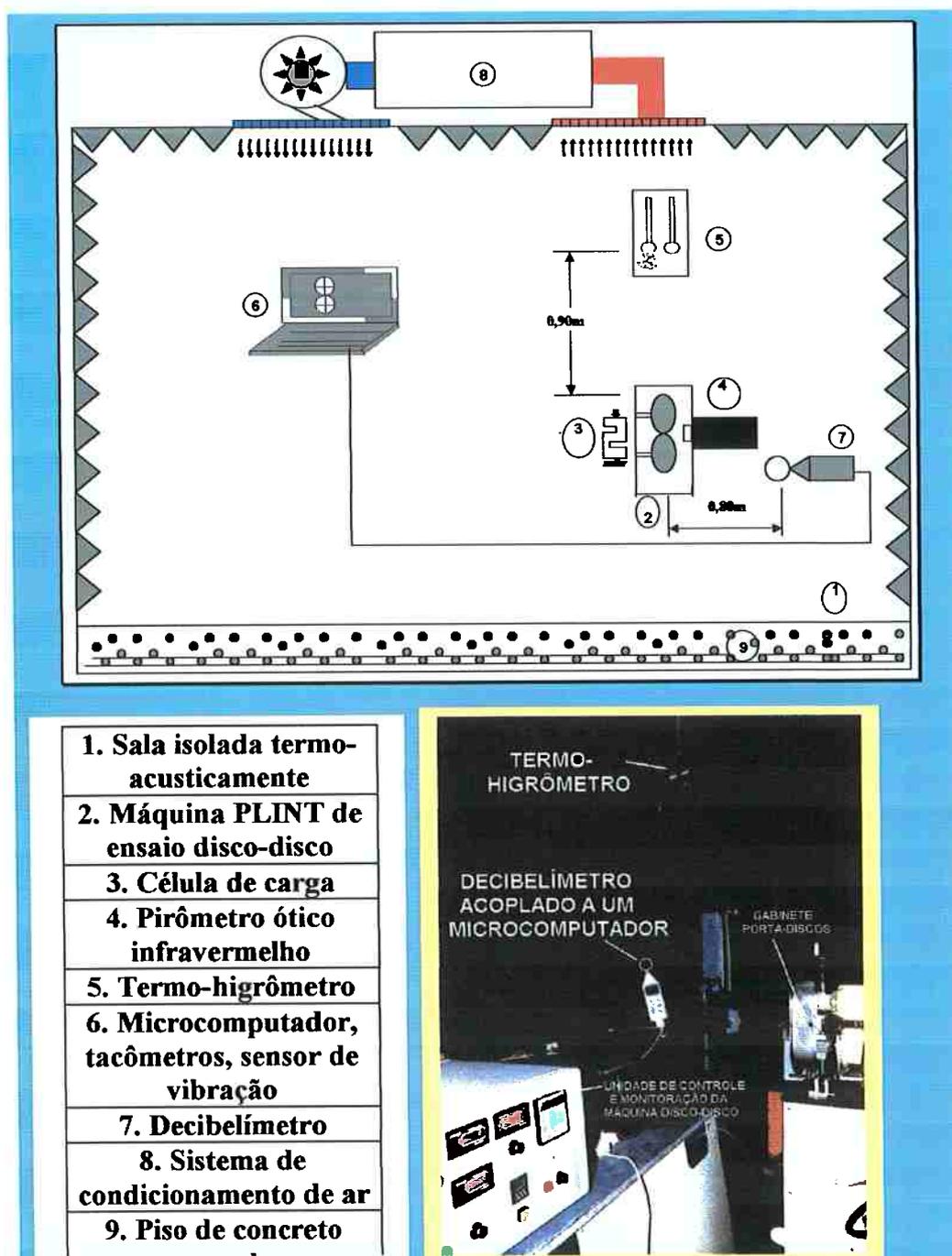


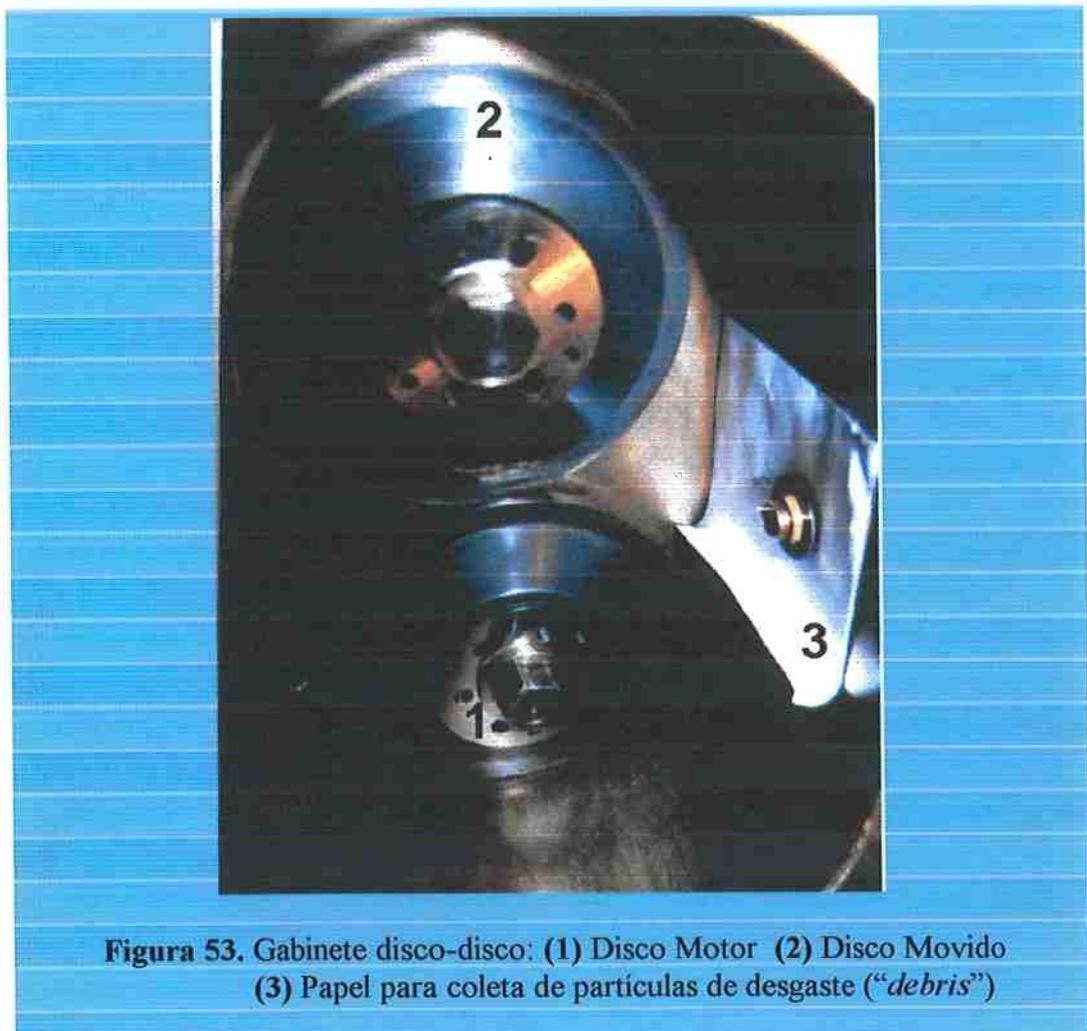
Figura 52. Esboço esquemático da bancada experimental, instalada em sala isolada termoacusticamente, para medir o nível de pressão sonora (NPS), temperatura, umidade do ar, durante ensaios na máquina disco-disco

A sala, com dimensões 5,70 x 5,10 x 2,90 m³, teve as suas paredes e o teto revestidos com espuma de 70 mm de espessura, atenuando 12 a 20 dB, pelo menos, o ruído na faixa de frequências audíveis em relação às paredes externas e o piso superior. O piso da sala era uma viga de concreto armado com 0,35 m de espessura e, sob ela, havia um colchão de ar com cerca de 1,10 m de espessura média.

A Figura 53 apresenta o gabinete de contato da máquina de ensaio disco-disco, modelo TE-73HS, fabricada pela PLINT inglesa.

O disco motor (1), ao rolar no sentido horário (S.H.), aciona por atrito o disco movido (2), no sentido anti-horário (S.A.H.).

Fazendo-se uso da limitação de giro unidirecional dessa máquina disco-disco, desenvolveu-se o dispositivo porta-partículas de desgaste (3).



Assim, a cada parada de máquina, comandada por um sensor de vibração (“*trip sensor*”), o papel porta-partículas era coletado para análise e, a seguir, repostos.

Os ensaios foram monitorados continuamente pelo medidor de nível de pressão sonora (NPS), de modo a permitir a avaliação desse sinal durante a vida do contato, mapeando-o segundo janelas temporais de 2 a 17 minutos, com registro de 2^7 a 2^{10} pontos, (Fig. 54; seção 4.1, p.123), para comparação estatística entre duas amostras, sequenciais ou não, através do método de Kolmogorov-Smirnov.

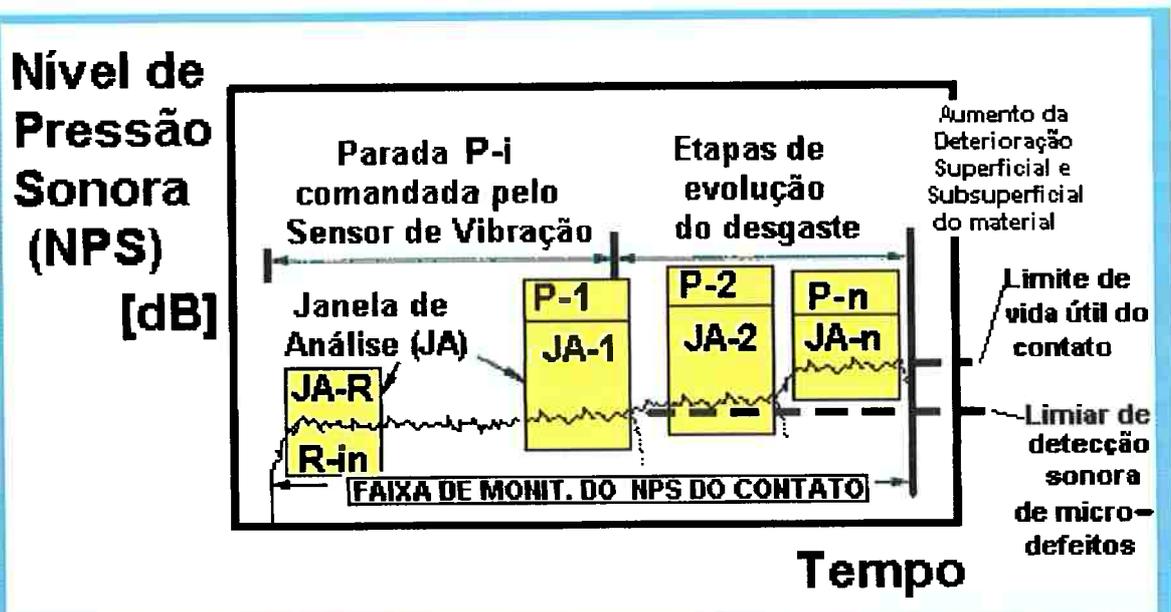


Figura 54. Evolução do dano decorrente do desgaste por contato de rolamento e esquema de registro de janelas temporais do nível de pressão sonora (NPS [dB]) para análise da resposta de irreversibilidades acumuladas pelo material

O teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (ANDRADE *et al.* [2001]) para duas amostras de dados compara as diferenças entre seus momentos estatísticos (tendência central, dispersão, assimetria, curtose). Baseado nas diferenças entre as distribuições de frequência acumulada, o teste compara valores observados e esperados e testa a hipótese H_0 , geralmente ao nível de significância de 95%, de que não há diferença estatística entre as amostras.

O programa estatístico *Statgraphics Plus®* foi usado na aplicação deste e de outros testes pertinentes às hipóteses testadas, à natureza contínua ou discreta das variáveis, ao tipo da distribuição, às análises uni e multivariada, ao ajuste de curvas e à pesquisa de grupos de combinações lineares que guardam entre si a melhor correlação, através de análise de correlação canônica.

A Tabela 15 apresenta as variáveis medidas antes, durante ou após os ensaios de rolamento cíclico dos discos e a seqüência metodológica global utilizada nesta investigação. Buscava-se responder às questões:

Que procedimentos de monitoração e tratamento do sinal termoacústico, medição de tensões residuais, caracterização metroológica de superfícies, análise por microscopia de varredura e ensaios mecânicos reproduzíveis podem ser associados ao desgaste por fadiga de contato de corpos rolantes a partir de materiais ensaiados em máquina disco-disco, de modo sistemático, ágil, simples, estatisticamente significativo e a um custo exequível ?

A Tabela 15 lista também as máquinas, os equipamentos, a instrumentação e os processos utilizados.

As limitações diziam respeito principalmente às dimensões e massas dos discos, cujas medidas extrapolavam em uma ordem de grandeza, pelo menos, as mesas ou os dispositivos empregados para análise microscópica, análise de tensões, microdureza, etc.

Nesse sentido, projetaram-se e se desenvolveram alguns equipamentos, dispositivos e métodos para a consecução deste trabalho.

Tabela 15. Etapas metodológicas utilizadas nesta investigação de desgaste de discos metálicos por fadiga de contato sob rolamento cíclico

ETA-PA :	PROCEDIMENTO	EQUIPAMENTO OU PROCESSO USADO
1	Medição da tensão residual em discos novos	Difratômetro RIGAKU D-Max 2000
2	Avaliação metrológica da superfície de discos novos	Talyrond 252; Formtalsurf PGI: Rank-Taylor Hobson
3	Medição da dureza HRC em discos novos (HBN para o cobre) e em C.P. “Chevron”	Durômetro Testor HT1A Wolpert Süsert
4	Pesagem dos discos antes dos ensaios disco-disco	Balança semi-analítica 0,01 g Chyo MJ-3000
5	Ensaio dos discos até níveis ajustados do sensor de vibração, de acordo com o par de materiais	Máquina disco-disco PLINT TE-73HS
6	Medição do Nível de Pressão Sonora, Temperaturas ambiente e de contato, Umidade relativa do ar ambiente, Força normal, Velocidades dos discos motor e movido durante os ensaios disco-disco	Decibelímetro Minolta Termo-higrômetro Haar Pirômetro óptico Calex Célula de Carga PLINT Tacômetros PLINT
7	Pesagem dos discos após os ensaios disco-disco	Balança 0,01g Chyo MJ3000
8	Avaliação metrológica da superfície de discos desgastados	Perfilômetros Rank-Taylor Hobson – INA - Sorocaba
9	Medição da tensão residual das pistas de discos	Difratômetro RIGAKU D-max 2000
10	Extração de coroas circulares (anéis) para análise dos discos	Máquina de usinagem eletroerosiva (EDM) Engespark
11	Medição da tensão residual nas pistas dos anéis (coroas circulares)	Difratômetro RIGAKU D-max 2000
12	Corte de setores circulares dos anéis para análise	EDM – Engespark
13	Medição da tensão residual nas pistas dos setores circulares dos anéis	Difratômetro RIGAKU D-max 2000
14	Avaliação microscópica dos danos nas pistas e subsuperfícies	SEM (20kV) - EDS Cambridge e Philips
15	Medição de microdureza HV _{0,05} em pistas e subsuperfícies	Microdurômetro de 10 kgf Zwick
16	Extração de C.P. para ensaios de resistência à flexão e tenacidade à fratura de C.P. “Chevron”	EDM - Engespark
17	Preparação dos corpos-de-prova para ensaios de resistência à flexão e tenacidade à fratura	Retificação plana
18	Ensaio mecânicos de flexão e tenacidade à fratura	Instron TT-DML- 10.000 kgf Instron – 4400R- 10.000 kgf
19	Reusinagem do disco para nova ciclagem e reinício do processo	Torneamento e retificação

3.4.2. Dispositivos e procedimentos desenvolvidos para avaliar a resposta do material ao rolamento cíclico

A Figura 54-A mostra a mesa-dispositivo desenvolvida e utilizada em todas as medidas de tensão residual de alguns discos, de modo a assegurar ao disco um posicionamento reprodutível em relação aos feixes incidente e refratado do difratômetro, minimizando-se o erro experimental.

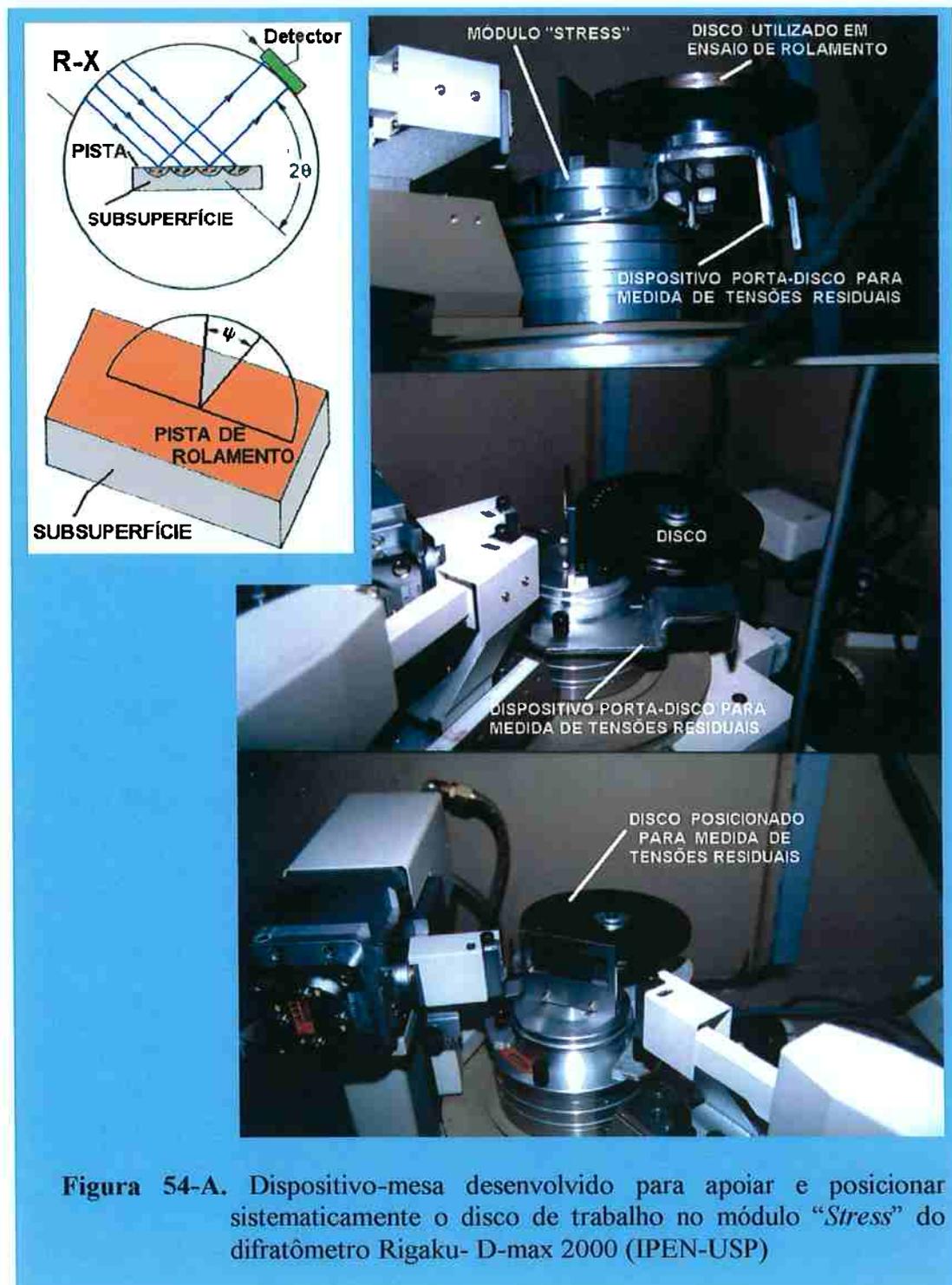


Figura 54-A. Dispositivo-mesa desenvolvido para apoiar e posicionar sistematicamente o disco de trabalho no módulo "Stress" do difratômetro Rigaku- D-max 2000 (IPEN-USP)

A Figura 55 apresenta o procedimento desenvolvido e utilizado na extração de corpos-de-prova para análise do material submetido ao contato de rolamento cíclico. Buscava-se assegurar à superfície e subsuperfície dos discos a integridade dos danos e do estado de tensão residual imposto às zonas desgastadas pelo contato.

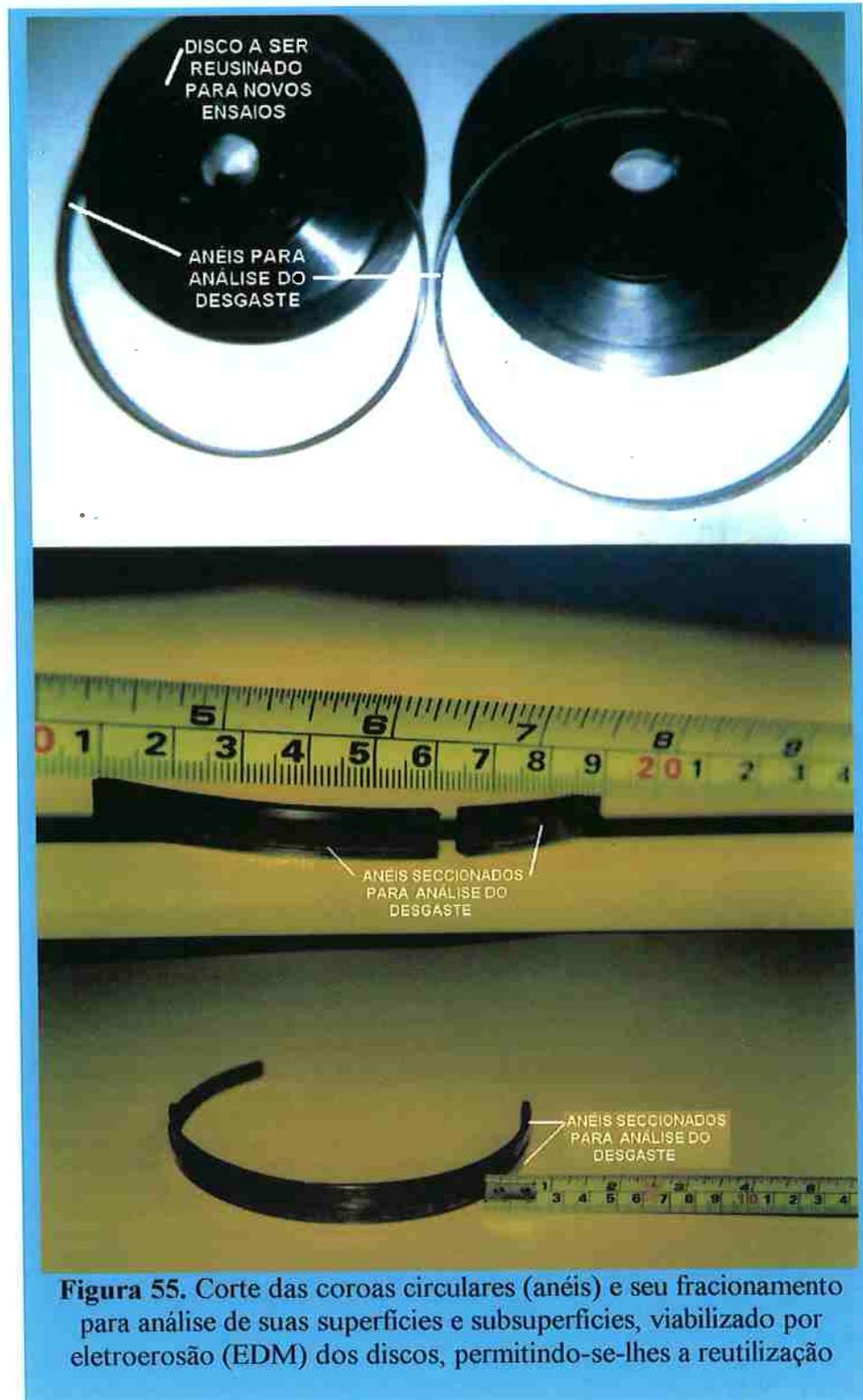


Figura 55. Corte das coroas circulares (anéis) e seu fracionamento para análise de suas superfícies e subsuperfícies, viabilizado por eletroerosão (EDM) dos discos, permitindo-se-lhes a reutilização

A decisão de avaliar a resistência à ruptura transversal (TRS) por flexão transversal (3 pontos) de barras prismáticas, utilizando-se procedimento de ensaio ASTM-B406-96 e ISO 3327-1982, bem como investigar a tenacidade à fratura de corpos-de-prova (C.P.) de amostras do material extraídas dos discos, exigiu o desenvolvimento de um novo procedimento para extração de C.P., apresentado na Figura 56.

Pretendia-se quantificar, de forma sistemática, a magnitude dos danos impostos ao material pelo desgaste cíclico, do ponto-de-vista dessas duas propriedades mecânicas, utilizando-se dispositivo desenvolvido pela pesquisadora Odília C. S. RIBEIRO, do IPEN-USP, Figura 57. Restrições de custos permitiram apenas o início da realização dessa etapa.



Figura 56. Sistematização da retirada de amostras do material dos discos para preparação de corpos-de-prova “Chevron” (tenacidade à fratura) e barras prismáticas (resistência à ruptura transversal [TRS] por flexão 3 pontos)

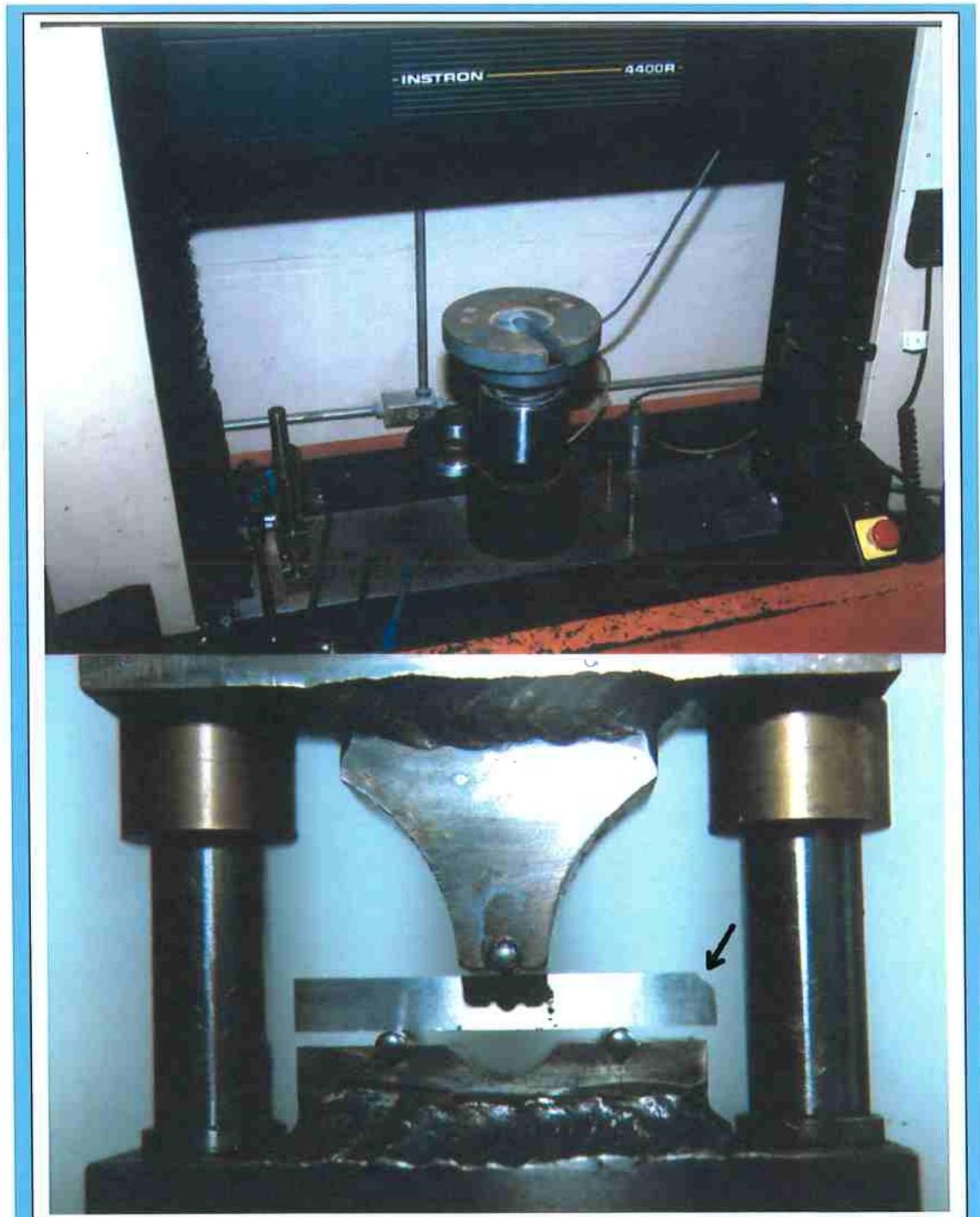
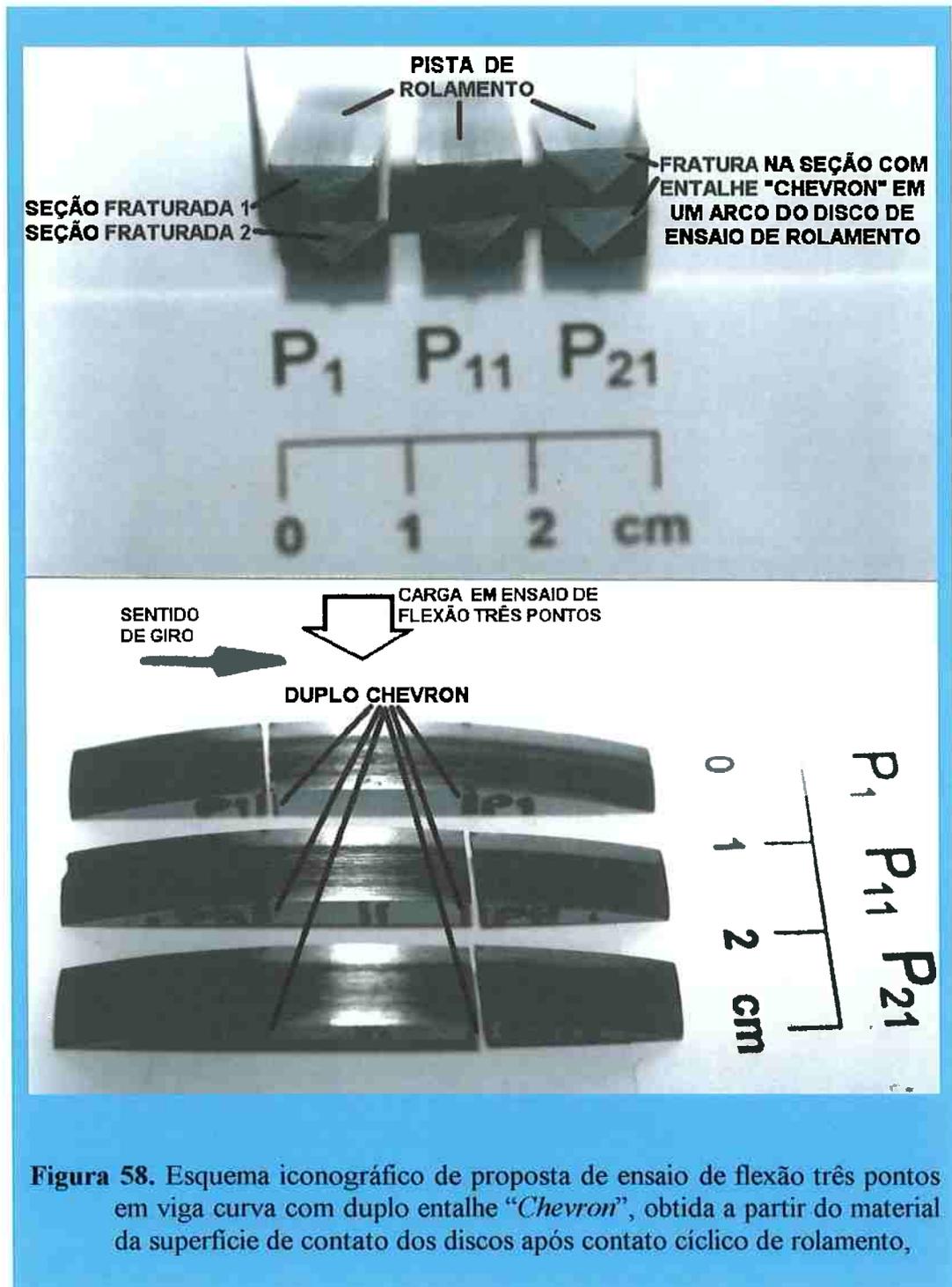


Figura 57. Aferição da célula de carga da máquina INSTRON 4400R (acima) e ensaio (TRS) em processo: observe-se o dispositivo para ensaio de flexão três pontos de barra prismática (abaixo), extraída, por eletroerosão, de um disco – a flecha indica a pista de rolamento, referência relevante nesse ensaio

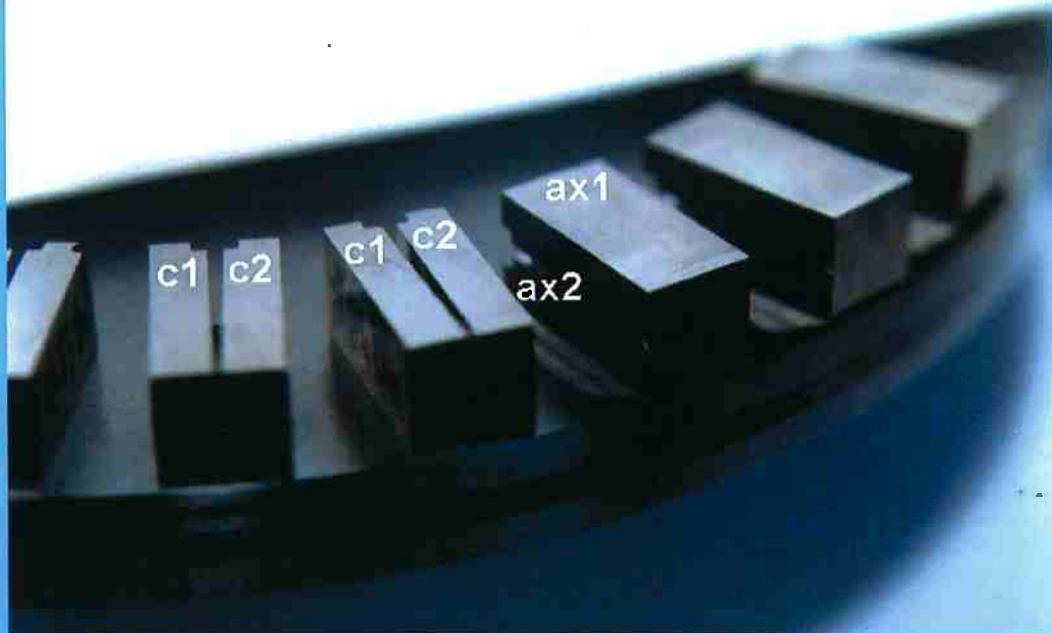
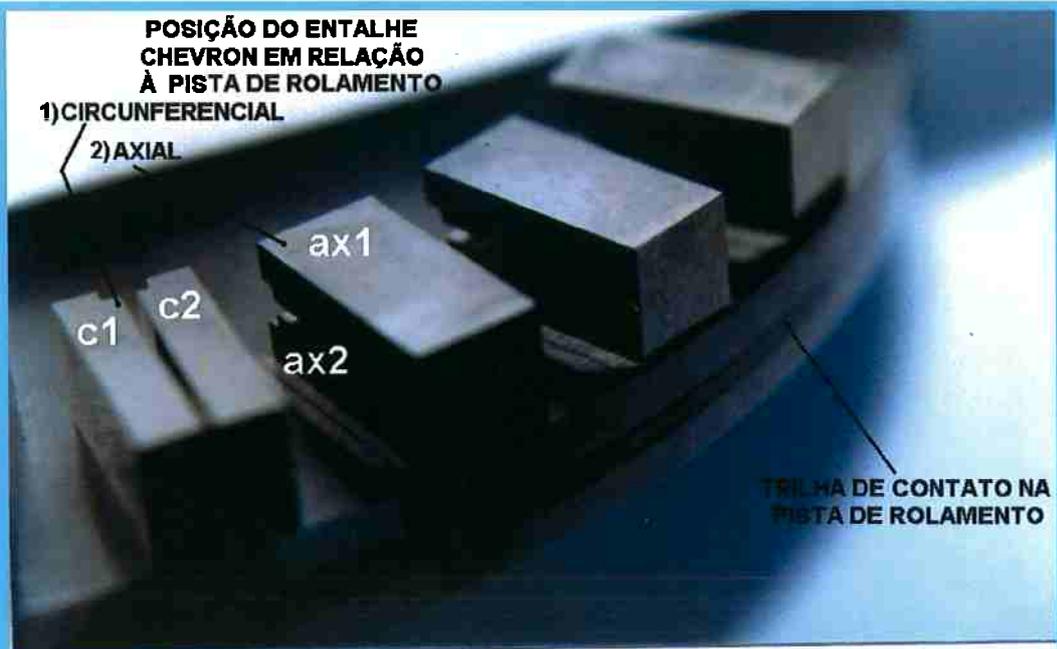
Em relação às Figuras 56, 57, 58 e 59, destaquem-se os seguintes aspectos metodológicos:

- 1) concebeu-se, para C.P. tais como os grupos [P2A, P3A, P4A, P5A], [P12A e P13A] e [P22A, P23A e P24A], Figura 56, a realização de ensaios de resistência à flexão três (incluindo-se uma incursão a quatro) pontos, de modo a avaliar, além de erros experimentais intrínsecos ao processo, medidas de tendência central e dispersão nos resultados obtidos;
- 2) após ensaiados em um esquema de flexão 3 pontos, com uma distância entre apoios de 40 mm e carga concentrada no meio desse vão, as duas metades restantes dos C.P. fraturados foram submetidos a novo ensaio, com distância entre apoio de 25 mm (Figura 57), buscando-se diferenças estatísticas significativas entre os resultados obtidos intragrupos e entre os grupos mais próximo e mais longe do contato;
- 3) foi idealizado para os C.P. **P1**, **P11** e **P21**, um ensaio de flexão três pontos, após serem usinados nesses C.P. dois entalhes “Chevron” equidistantes da borda, de modo a investigarem-se anomalias na simetria e modo de propagação de trincas do material (Figuras 56 e 58);
- 4) após a retirada dos blocos de material para usinagem de C.P. “Chevron” [A, B, C], [D, E, F] e [J, K, L, M, N, O], observou-se um critério de abertura do rasgo para a usinagem do “Chevron” associado à direção de giro, ou circunferencial, e perpendicular a essa direção, denominada axial, de modo que o modo de abertura da trinca pudesse ser avaliado em duas direções ortogonais (Figuras 56 e 59);
- 5) a extração de amostras do material do disco para a usinagem de corpos-de-prova sempre se pautou por uma distribuição uniforme no espaço euclidiano, de modo a se investigar possíveis ingerências de etapas de processamento ou dano acumulado anterior do material em relação às propriedades mecânicas que se buscava medir.

Buscavam-se respostas experimentais às dúvidas inerentes à propagação e morfologia da fratura nas seções entalhadas e acúmulo de danos, tentando-se formalizar um método investigativo para verificar a influência do contato cíclico de rolamento no comportamento dos materiais dos discos.



A morfologia dos corpos-de-prova com entalhe(s) "Chevron" é apresentada nas Figuras 58 e 59. Detalhes geométricos, procedimentos e dispositivos de usinagem desenvolvidos para assegurar repetitividade posicional peça-ferramenta de corte e homogeneizar o estado de tensões residuais devido ao processo de manufatura em um mesmo lote de peças entalhadas, são apresentados no Anexo A.



Direção de abertura da boca da trinca (Modo I da Mecânica da Fratura):

1. Circunferencial
2. Axial

Figura 59. Esquema do critério adotado para a usinagem do entalhe Chevron nas amostras coletadas a partir das pistas de um disco ensaiado

3.5. Planejamento dos ensaios disco-disco

Cumpriu-se, inicialmente, a etapa de ensaios exploratórios desenvolvidos para a familiarização com a máquina de ensaio disco-disco e seu dispositivo de parada automática, ajustado em função do nível da energia de deformação elástica da estrutura, em uma *escala intrínseca* ao comportamento dinâmico do sistema tribológico utilizado – *admitindo-se*, como premissa, *repetitividade no mesmo sistema*, mas não *reprodutividade em outro sistema*.

Isso implica que a generalização dos resultados *quantitativos* relativos ao fim de vida útil das pistas ensaiadas requer, necessariamente, ajustes a outros sistemas. Por esta razão, o conjunto dos referenciais metodológicos foi estabelecido de modo a ser consistente com a hipótese formulada nesta Tese, da associação do desgaste e seus mecanismos às irreversibilidades termoacústicas definidas pela relação entre a energia e a anergia do contato, para níveis vibracionais semelhantes do sistema.

Constatou-se que um disco bem balanceado, girando sozinho na árvore motora entre 5.000 e 5.500 rpm, comandava a parada da máquina quando o “*Trip Sensor*” era ajustado entre 890 e 920, segundo o diâmetro e o material do disco. A essa velocidade de giro, cerca de 40 m/s, 144 km/h, significativo para os atuais sistemas rodo-ferroviários de mobilidade, os ensaios não se prolongavam em demasia, assegurava-se um funcionamento em regime para o sistema tribológico e obtinham-se resultados expressivos em relação a diferentes mecanismos de desgaste.

Quanto menor era o valor numérico do sensor de vibração a comandar a parada de funcionamento da máquina, maiores eram as amplitudes de vibração toleráveis na sua estrutura, e maior a deterioração do contato entre as superfícies.

Associou-se ao valor 750 do “*Trip Sensor*”, para os materiais ferrosos integrantes desta investigação, um limiar ([ing.] “*threshold*”) em que se observaram microtrincas de fadiga de contato nas subsuperfícies das pistas ou nas pistas dos materiais frágeis usados. Abaixo desse valor, notava-se a severidade do desgaste.

Em função dessas constatações e utilizando-se a modelagem de Hertz para o cálculo da pressão de contato máxima entre as superfícies em contato, $(p_0)_{Max}$, e baseando-se nos dados da literatura referendada, estabeleceu-se uma programação inicial, que foi sendo reformulada em processo, ao longo da investigação, ante as respostas fornecidas pela inspeção visual e com lupa (ampliações de 2X, 5X e 20 X)

das superfícies e análises através de microscopia óptica e eletrônica de varredura, SEM-EDS, resultando no planejamento final de ensaios apresentado pela Tabela 16.

Observe-se que na primeira série de ensaios listados, entre discos de aço AISI 52100, tendo-se em vista avaliar o mecanismo de dano desencadeado pelas microtrincas de fadiga de contato ao longo de alguns milhões de ciclos, desligou-se o “trip sensor”, adotando-se como critério de final de ensaio o limiar de intolerabilidade humana ao ruído na sala de ensaio, considerado 120 dB, atingido a 0,80 m, com o medidor de nível de pressão sonora (NPS) instalado defronte ao gabinete porta-discos. Nessa etapa, em que a sala ainda não havia sido isolada, o incômodo acústico levou a que diferentes pessoas solicitassem a interrupção do ensaio pois, mesmo a uma distância de sessenta metros da fonte, o ruído as perturbava. Essa resposta humana foi importante na adoção da medida de NPS [dB], mostrando-se mais sensível ao desgaste dos discos que medidas exploratórias efetuadas com um sensor de emissão acústica na faixa de 100 a 500 kHz.

Tabela 16. Planejamento dos ensaios dos discos metálicos

Ensaio	Discos: Motor Movido	ϕ_{motor} [mm] ϕ_{movido} [mm]	Critério de Parada	Rotação nominal [rpm]	Carga Nominal[N]	(P _o)máx nominal [GPa]
ENSAIOS FRÁGIL-FRÁGIL: Aço 52100-Aço 52100						
ER81 sbqt-oqt (Explora- tório)	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	Trip300 TripZero TripZero	2000 a 5000	6000 a 12000	2,20 a 2,77
ER82 sbqt-sbqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	NPS = 120dB	5000 5000	6500	2,26
ER83 oqt-oqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	NPS = 120dB	5000 5000	6500	2,26
ER84 sbqt-oqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	NPS = 120dB	5000 5000	6000	2,20
ER85 sbqt-sbqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	NPS = 120dB	5000 5000	6500	2,26
ER86 oqt-sbqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	Trip750 Trip300 Trip100	5000 5000	5500	2,14

Tabela 16. Planejamento dos ensaios dos discos de aço AISI 52100 (cont.)

Ensaio	Motor Movido	ϕ_{motor} [mm] ϕ_{movido} [mm]	Critério de Parada	Rotação nominal [rpm]	Carga Nominal[N]	$(P_o)_{\text{máx}}$ nominal [GPa]
ENSAIOS FRÁGIL FRÁGIL: Aço 52100-Aço 52100						
ER87 oqt-oqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	Trip750 Trip600 Trip600 Trip600	5000 5000	7000	2,32
ER88 (pré-trincado) oqt-sbqt (Fig. 241, p. 364)	Aço 52100 Aço 52100	152,00 150,00	Trip750 Trip600 Trip300 Trip600	5200 5250	6000	2,19
ER89 sbqt-oqt	Aço 52100 Aço 52100	152,00 150,00	Trip750 Trip600 Trip300	5150 5200	2500	1,64
ER80 oqt-sbqt	Aço 52100 Aço 52100	150,00 150,00	Trip750 Trip600 Trip300	5000 5000	7000	2,32
ER61 sbqt-sbqt	Aço 52100 Aço 52100	152,00 152,00	Trip750 Trip600 Trip300	5000 5000	14000	2,89
ER62 sbqt-sbqt	Aço 52100 Aço 52100	152,00 152,00	Trip750 Trip600	5000 5000	3500	1,82
ER21 sbqt-oqt	Aço 52100 Aço 52100	152,00 152,00	Trip800 Trip800 Trip750 Trip750	5000 5000	5000	2,05
ENSAIOS FRÁGIL-DÚCTIL REVESTIDO: Aço 52100-Aço 1045 nitretado						
S10 RN1	Aço 52100 Aço 1045	152,00 152,00	Trip750	3000 3000	7000	11,01
S09 RN2	Aço 52100 Aço 1045	152,00 152,00	Trip750 Trip600	5000 5000	11000	12,80
ENSAIOS FRÁGIL-DÚCTIL REVESTIDO: Aço 52100-ADI nitretado						
S03sbqt 03	Aço 52100 ADI	152,00 152,00	Trip740 Trip650 Trip740 Trip650	3000 3000	5000	1,96
S05sbqt 13	Aço 52100 ADI	152,00 152,00	Trip870 Trip850 Trip750	5000 5000	3500	1,74
S07sbqt 18	Aço 52100 ADI	152,00 152,00	Trip750	5000 5000	8000	2,29
S02sbqt 17	Aço 52100 ADI	152,00 152,00	Trip750	5000 5000	11000	2,55

Tabela 16. Planejamento dos ensaios dos discos de aço AISI 52100 (cont.)

Ensaio	Motor Movido	ϕ_{motor} [mm] ϕ_{movido} [mm]	Critério de Parada	Rotação nominal [rpm]	Carga Nominal[N]	$(P_o)_{\text{máx}}$ nominal [GPa]
ENSAIOS ENTRE DÚCTEIS REVESTIDOS: (ADI – ADI) nitretados						
02	ADI	152,00	Trip840	3000	6300	2,04
04	ADI	152,00	Trip800 Trip880 Trip750	3000		
05	ADI	152,00	Trip860	3000	13200	
06	ADI	152,00	Trip835 Trip750 Trip600	3000		
07	ADI	152,00	Trip840	5000	11100	2,46
08	ADI	152,00	Trip750	5000		
09	ADI	152,00	Trip750	5000	14600	2,70
10	ADI	152,00		5000		
11	ADI	152,00	Trip860	5000	4200	1,78
12	ADI	152,00	Trip750 Trip750 Trip750	5000		
14	ADI	152,00	Trip750	5000	3900	
15	ADI	152,00		5000		
ENSAIOS DÚCTIL-DÚCTIL: (ADI – ADI) não nitretados						
19	ADI (*)	152,00	Trip750	5000	7200	2,24
20	ADI (*)	152,00	Trip750	5000		
ENSAIOS DÚCTIL-FRÁGIL: Cobre eletrolítico-Aço 52100						
C01 ER85mrv	Cobre Aço 52100	160,00 140,00	Trip600 Trip300 Trip100	4500 5200	1600	1,45
C02 ER81mrv	Cobre Aço 52100	160,00 140,00	Trip300 Trip100	4500 5200	2000	1,57
C03 ER82mrv	Cobre Aço 52100	160,00 140,00	Trip300 Trip200 TripZero Trip300 Trip600	4500 5200	2400	1,67

Tabela 16. Planejamento dos ensaios dos discos de aço AISI 52100 (cont.)

Ensaio	Motor Movido	ϕ_{motor} [mm] ϕ_{movido} [mm]	Critério de Parada	Rotação nominal [rpm]	Carga Nominal [N]	$(P_o)_{\text{máx}}$ nominal [GPa]
ENSAIOS FRÁGIL-FRÁGIL: Aço-Ferramenta M2-Aço 52100						
M231 ER83mv OQT	Aço M2 Aço 52100	160,00 140,00	Trip700 Trip700	4500 5200	2000	1,54
M232 ER83mrv OQT	Aço M2 Aço 52100	160,00 140,00	Trip700 Trip700	4500 5200	5500	2,16
M233 ER84mrv OQT	Aço M2 Aço52100	160,00 140,00	Trip700 Trip700	4500 5200	11000	2,73
M239 Er84mv OQT	Aço M2 Aço52100	160,00 140,00	Trip600	4500 5200	3500	1,86
ENSAIOS FRÁGIL-DÚCTIL REVESTIDO: Aço-Ferr. M2-ADI nitretado						
M234 ADI201	Aço M2 ADI	160,00 140,00	Trip700 Trip600	4500 5200	2600	1,52
M235 ADI202	Aço M2 ADI	160,00 140,00	Trip700 Trip600	4500 5200	5600	1,96
M236 ADI203	Aço M2 ADI	160,00 140,00	Trip700 Trip600	4500 5200	13000	2,60
M237 ADI204	Aço M2 ADI	160,00 140,00	Trip600	4500 5200	2600	1,52
M238 ADI205	Aço M2 ADI	160,00 140,00	Trip600	4500 5200	7000	2,11
ENSAIOS FRÁGIL-FRÁGIL: Aço-Ferramenta M2 - Aço-Ferramenta M2						
M237 M234mrv	Aço M2 Aço M2	152,00 152,00	Trip750 Trip700 Trip600 Trip300	5200 5200	8000	2,41

4

Resultados

“Tu, lettore, guarderai in una occhiata tutta questa carta scritta, e subito giudicherai, questa essere piena di varie lettere, ma non conoscerai in questo tempo, che lettere sieno, ne che voglian dire; onde ti bisogna fare a parola a parola, verso per verso... se vogli avere vera notizia delle forma delle cose, comincerai alle particule di quelle, e non andare alla seconda, se prima non hai bene nella memoria e nella pratica la prima; e se altro farai, getterai via il tempo e veramente allungherai assai lo studio. E ricordoti ch'impri la diligenza, che la prontezza.”

“Tu, leitor, perceberás com uma olhadela toda esta folha escrita, e imediatamente julgarás que está cheia de diversas letras, mas não as distinguireis de imediato, nem sabereis o que significam; e, para isso, terás que fazê-lo palavra por palavra, frase por frase... se queres ter cabal informação da forma das coisas, começarás por uma parte delas e não passarás à fase seguinte se não tens antes bem na memória e na prática a primeira parte; e se procedes de outra forma perderás o tempo e prolongarás o estudo. E te lembro que debes aprender primeiro o cuidado que a rapidez.”

*Da VINCI, Leonardo (1492-1531) Cod. Ash., I, 28 r. In: MIELI, Aldo [1968] **Leonardo da Vinci, sabio**. Madrid, Espasa-Calpe. p. 89.*

Na percepção de Leonardo da Vinci, integram a compreensão, a dissecação minuciosa de um fenómeno, de uma coisa, de um mecanismo, as suas interrelações e a percepção do seu conjunto. Entre a fragmentação e a totalização, situam-se a complexidade e as irreversibilidades, obtidas, analisadas, perseguidas passo a passo.

As condições de solicitação – *entradas do sistema* – e algumas respostas dos materiais submetidos ao contato e ao meio atmosférico – *saidas* - são retratadas neste Capítulo, em que se busca quantificar variáveis correlacionadas, ou não, ao desgaste por rolamento cíclico dos discos, de modo que se possa, na etapa seguinte, dissecar-lhe os mecanismos e a sua natureza deteriorante.

No volume II, em anexo, apresentam-se os resultados da evolução da umidade relativa do ar na sala, da temperatura de contato, do nível de pressão sonora (NPS),

da carga, das velocidades dos discos motor e movido e respectiva relação de deslizamento, das variações mássicas e fotos do estado de desgaste de alguns discos ensaiados. Tais resultados foram registrados manualmente, ao longo dos ensaios.

4.1. Resposta da aquisição do NPS por microcomputador

4.1.1. Primeiro corpo de aço AISI M2 e antagonista de aço AISI 52100 ou ADI nitretado

Apresentam-se os momentos estatísticos comumente usados na avaliação de um sinal sonoro, quais sejam, média, mediana, variância, desvio padrão, assimetria e curtose. Nos conjuntos de ensaios com duas ou mais ciclagens, apresentam-se análises comparativas entre as distribuições estatísticas do sinal sonoro, utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) que, segundo ANDRADE e colaboradores [2001], adequa-se bem ao problema da detecção de trincas devido à fadiga de contato, por diferenciar com nitidez as assinaturas respectivas do sinal dinâmico.

4.1.1.1. Ensaios M231, M232, M233 e M239 (Aços AISI M2 e 52100 OQT)

A Tabela 17 e a Figura 60 apresentam os resultados obtidos para a distribuição estatística dos dados iniciais do sinal de NPS [dB], adquiridos por computador, a uma taxa de aquisição de 1 Hz (um dado por segundo), durante o ensaio M231.

Tabela 17. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição, Ensaio M231 (Ciclagens 1 e 2, “Trip 700”, “Trip 700”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2
Média dB	93,4	87,7	92,7	87,8	91,8	87,7	90,3	88,1
Mediana dB	93,8	87,6	92,6	87,8	91,8	87,9	89,8	88,0
Variância dB	5,43	0,08	3,41	0,10	2,81	0,08	3,74	0,31
Desvio Padrão dB	2,3	0,3	1,8	0,3	1,7	0,3	1,9	0,6
Assimetria	-16,4	4,8	-16,9	0,9	-8,9	7,5	6,3	80,8
Curtose	39,0	1,2	54,4	-3,1	41,2	31,6	7,7	511,6
K-S	7,7500		11,1369		15,8438		18,1859	
<i>p-Value</i>	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
<i>Diferença ($\alpha=5%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2</i>	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

Referências para análise da Figura 60, ao lado:

Figuras 166, 167, 168 e 169, às páginas 289 a 292, do volume 2 desta Tese, relativas aos dados anotados durante as duas ciclagens efetuadas no ensaio M231.

A Tabela 17 e a Fig. 60 apresentam a sensibilidade do nível de pressão sonora (NPS [dB]) relativos à resposta do contato de acordo com quatro janelas, com 2^7 , 2^8 , 2^9 e 2^{10} leituras, com duração de 128, 256, 512 e 1024 segundos *subseqüentes ao início das duas ciclagens*, ou seja, no período de “*running-in*”.

A janela de 2^7 pontos tem duração de 2,1 min e, a de 2^{10} pontos, tem duração de 17,1 min. O disco de aço M2 girou cerca de 6.500 ciclos, na primeira janela, e 65.000 ciclos, nos 17,1 minutos iniciais da primeira ciclagem.

Na segunda ciclagem, girou 9.000 ciclos, na primeira janela, e 76.000 ciclos, nos 17,1 min iniciais. A variação mássica demonstra que houve *desgaste (acumulado) do contato* à taxa de 5 mg a cada 25.000 ciclos, na primeira ciclagem, e de 6,5 mg, na segunda ciclagem. Utilize-se o mesmo raciocínio para as taxas de flutuação do NPS, da carga normal, da velocidade e da temperatura de contato.

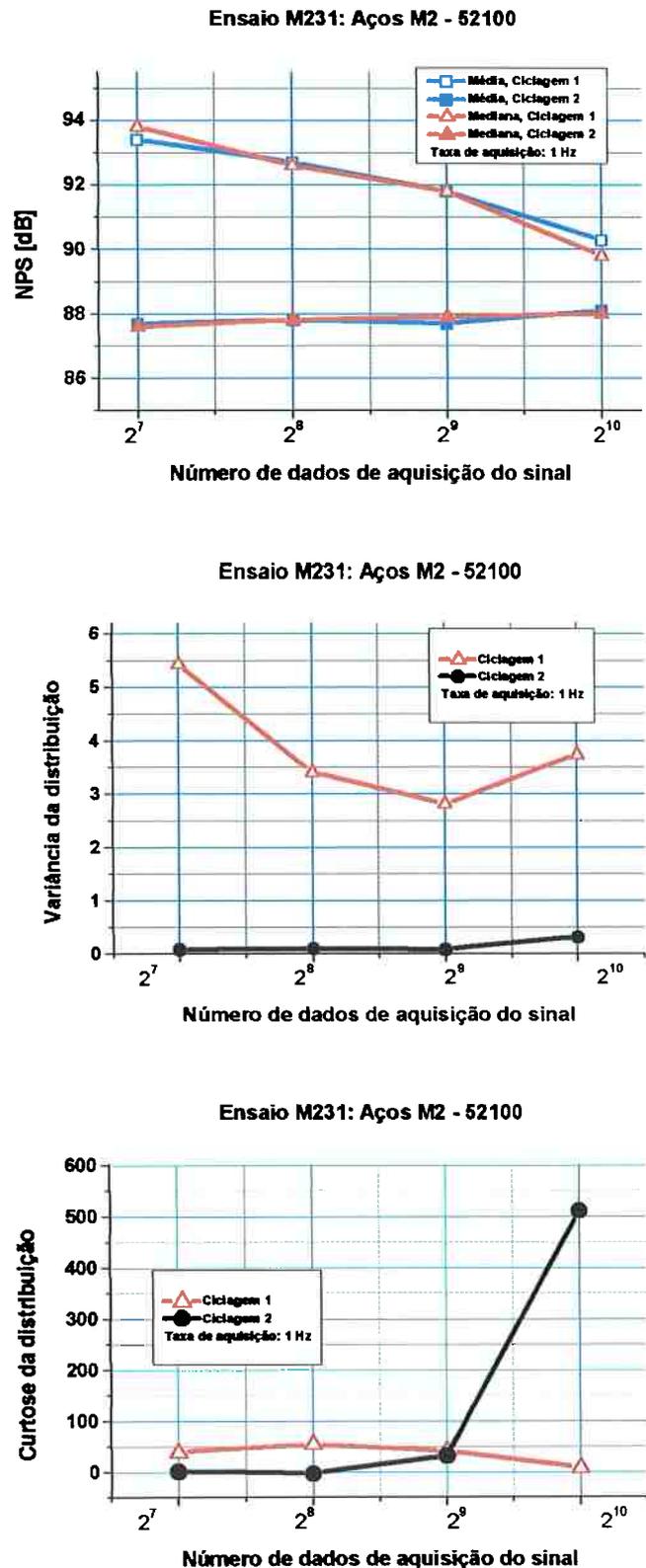


Figura 60. Avaliação icônica dos parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] do ensaio M231

Esses dados são de duas ciclagens efetuadas, ambas com o sensor de vibração (“Trip Sensor”) ajustado para “Trip700”, ou seja, as *duas paradas automáticas das ciclagens subseqüentes deste mesmo ensaio* aconteceram mediante *nível equivalente de energia vibracional* da estrutura da máquina excitada pelo sistema tribológico.

Observa-se que entre 2^9 e 2^{10} pontos, os momentos estatísticos 2, 3 e 4, em ambas as ciclagens, assinalaram, respectivamente, *uma transição* nítida: a *dispersão* inverte a sua tendência de queda e aumenta, a *assimetria* muda de sinal e a *curtose* aumenta em uma ordem de grandeza.

Os testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), comparativos entre ambas as ciclagens, apresentaram significância estatística ao nível de 95 %, ou seja, cada assinatura, adquirida em cada ciclagem de um mesmo ensaio, interrompido ao mesmo nível de energia de vibração, mostrou-se diferente da outra, independentemente do tamanho destas janelas testadas, cujas amostragens representavam 128, 256, 512 ou 1024 segundos. Tamanhos de janelas menores, iguais ou inferiores a 64 segundos, apresentaram resultados diversos, ora apresentando diferenças significativas, ora não.

Analogamente, as Tabelas 18, 19 e 20 e as Figuras 61, 62 e 63, apresentam os resultados da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] dos ensaio M232, M233 e M239 – neste último caso, compararam-se as janelas inicial e final da ciclagem única.

Tabela 18. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M232 (Ciclagens 1 e 2, “Trip 700”, “Trip 700”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2
Média [dB]	85,6	85,2	85,7	85,4	85,6	85,6	85,5	85,5
Mediana [dB]	85,7	85,2	85,8	85,5	85,6	85,6	85,5	85,5
Variância	1,00	0,34	0,55	0,26	0,34	0,20	0,21	0,13
Desvio Padrão [dB]	1,0	0,6	0,7	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4
Assimetria	1,3	-8,2	-0,7	-12,8	3,4	-17,0	8,2	-19,7
Curtose	11,4	14,2	31,4	26,7	63,8	44,0	120,5	70,2
K-S	0,5078		5,0381		2,0		3,7786	
Valor- <i>p</i>	0,0000		0,0000		0,0007		0,0000	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

Tabela 19. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M233 (Ciclagens 1 e 2, “Trip 700”, “Trip 700”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2
Média [dB]	85,4	85,6	85,5	85,5	85,5	85,5	85,5	(*)-
Mediana [dB]	85,4	85,6	85,4	85,5	85,5	85,5	85,5	-
Variância	0,39	0,28	0,23	0,19	0,15	0,14	0,11	-
Desvio Padrão [dB]	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	-
Assimetria	-0,6	6,3	-2,3	10,8	-3,9	14,7	-3,4	-
Curtose	13,9	13,1	31,5	25,2	55,7	42,0	78,0	-
K-S	3,1250		2,0329		3,2188		-	
Valor- <i>p</i>	0,0000		0,0005		0,0000		-	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		-	

(*) Ciclagem foi encerrada por parada automática antes de atingir este número de pontos

Tabela 20. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M239 (Ciclagem única, pontos iniciais e finais da janela, “Trip 600”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais
Média [dB]	86,1	87,4	87,0	87,4	87,9	87,5	87,9	87,7
Mediana [dB]	86,2	87,4	87,2	87,4	88,3	87,5	87,9	87,7
Variância	0,69	0,05	1,20	0,06	1,57	0,05	0,91	0,14
Desvio Padrão [dB]	0,8	0,2	1,1	0,2	1,2	0,2	0,9	0,4
Assimetria	0,4	0,4	-3,1	1,2	-8,3	1,4	-11,5	-1,0
Curtose	-0,9	-0,0	-2,6	-0,0	-0,4	0,2	7,8	20,5
K-S	6,8750		4,8172		9,3125		7,5572	
Valor- <i>p</i>	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

O ensaio M239 teve ciclagem única e parada programada a um nível de energia elástica de vibração da estrutura associado ao “Trip 600”. Assim, comparam-se os 10⁷, 10⁸, 10⁹ e 10¹⁰ dados iniciais e finais de NPS [dB] dessa janela. Retornar-se-á a este procedimento na apresentação dos dados de NPS [dB] do ensaio M238, M2-ADI, na Tabela 25 e Fig. 67, com ciclagem única associada ao “Trip 600”.

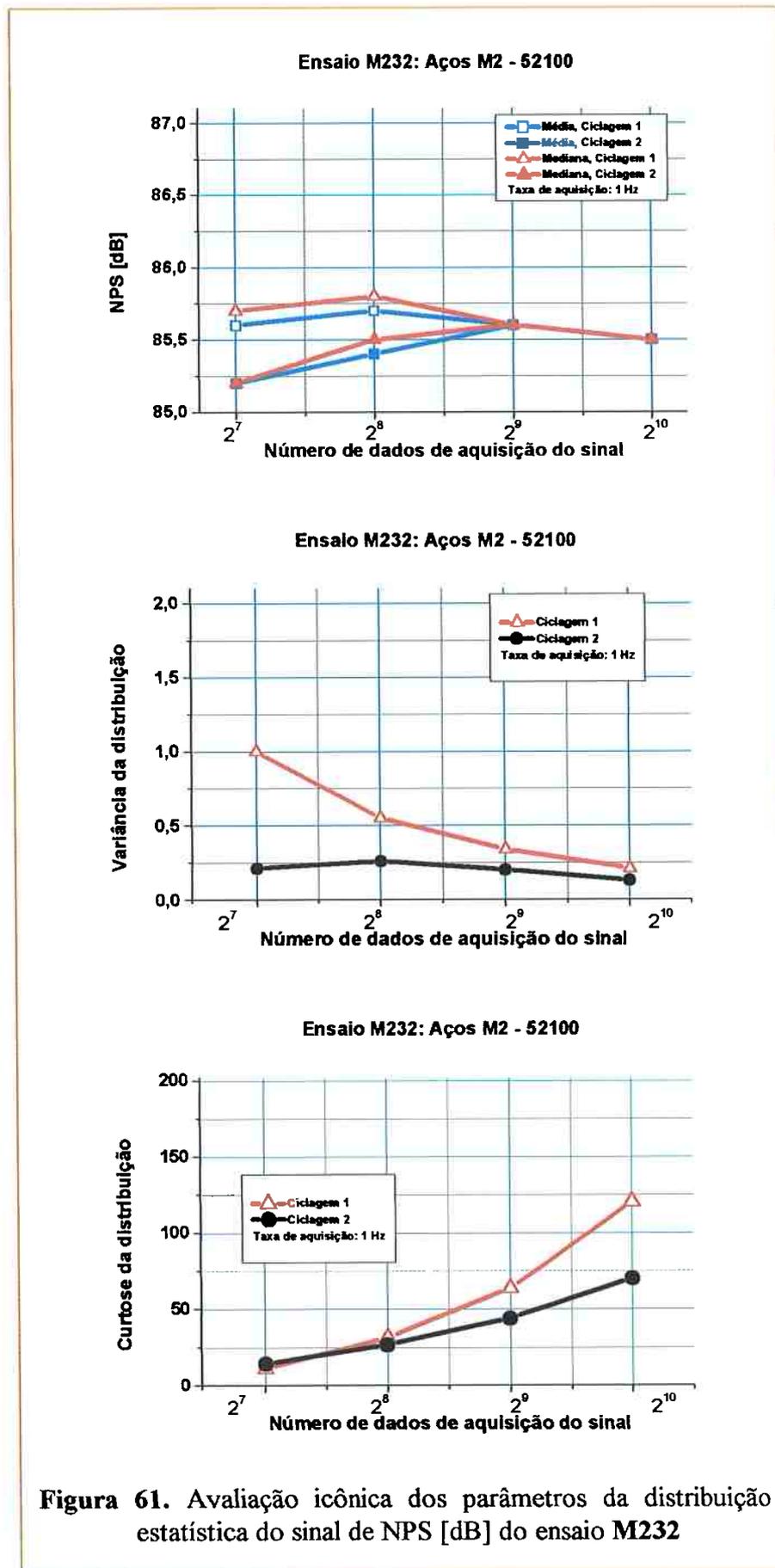


Figura 61. Avaliação icônica dos parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] do ensaio M232

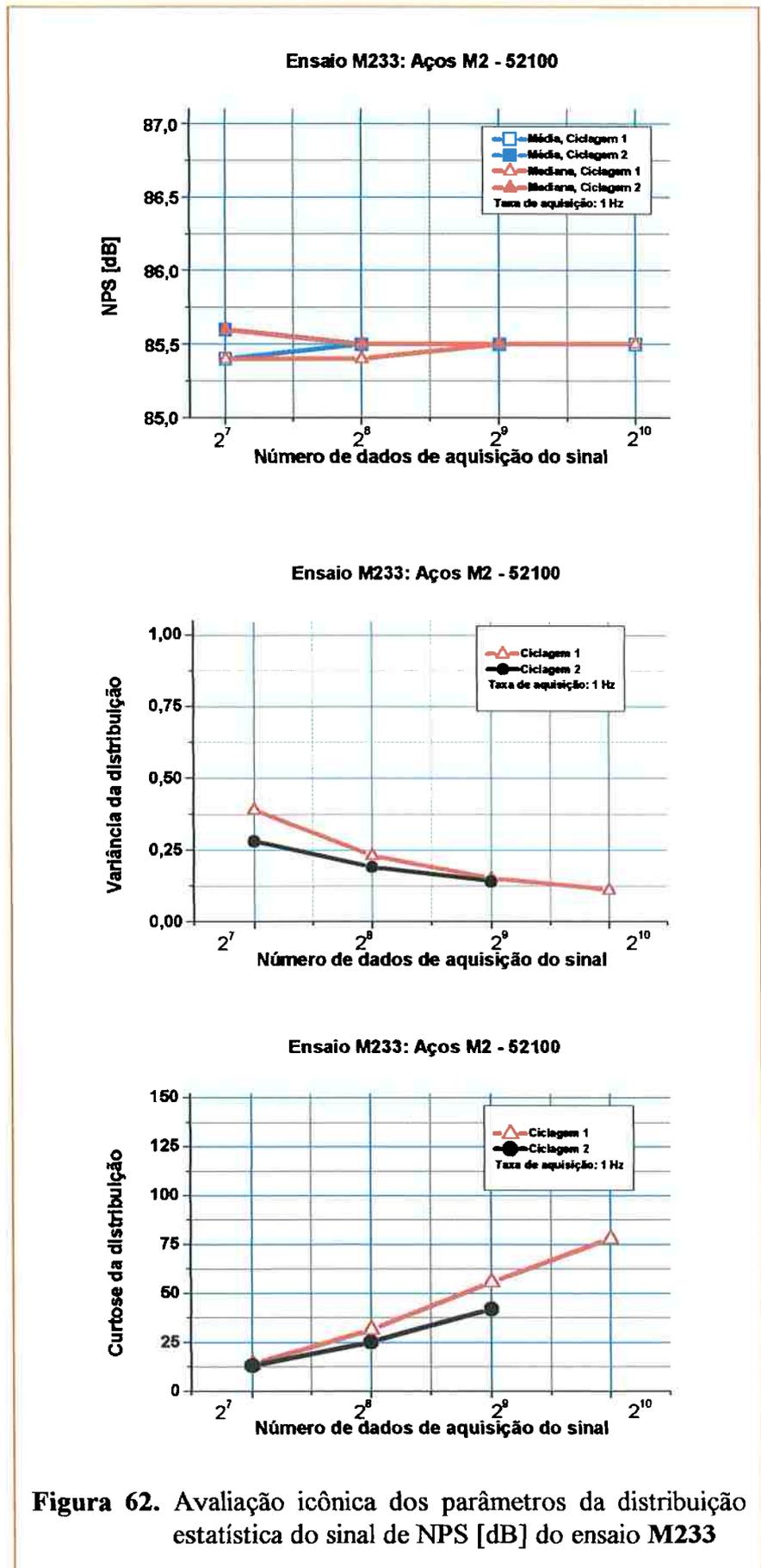
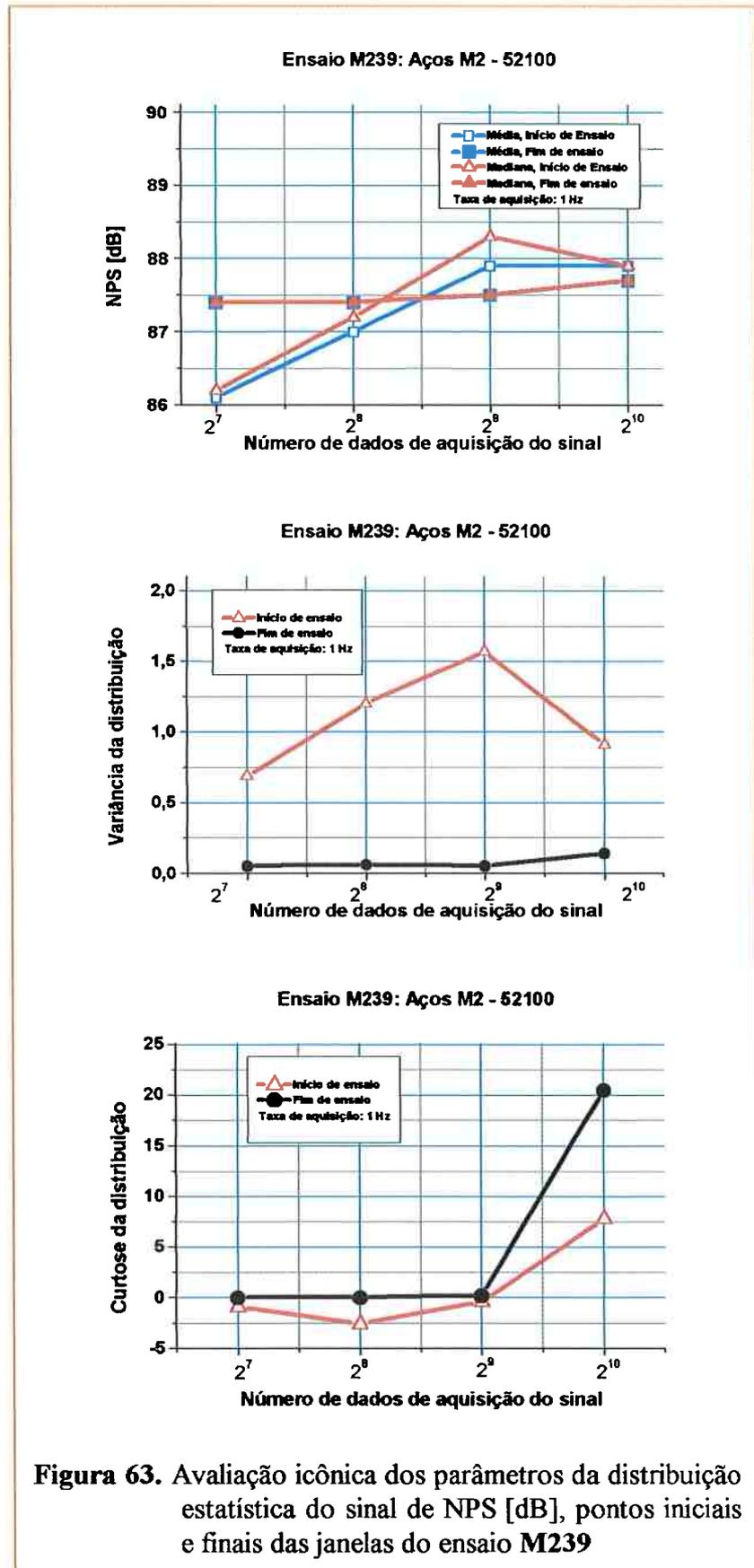


Figura 62. Avaliação icônica dos parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB] do ensaio M233



4.1.1.2. Ensaio M234, M235, M236, M237 e M238 (Aço AISI M2 e ADI nitretado)

As Tabelas 21, 22, 23, 24 e 25 e as Figuras 64, 65, 66, 67 e 68 apresentam os resultados obtidos para a distribuição estatística dos dados do sinal de NPS [dB], adquiridos por computador, a uma taxa de aquisição de 1 Hz (um dado por segundo), durante os ensaios M234, M235, M236, M237 e M238.

Nas famílias de ensaios entre os aços AISI M2 e 52100, repetiram-se níveis semelhantes de energia de vibração associados à parada de ensaio nas ciclagens 1 e 2 (“*Trip 700*”, “*Trip 700*”) e, no último deles, para efeitos comparativos, elevou-se esse nível de energia elástica vibracional e executou-se uma única ciclagem (“*Trip 600*”).

Nos três primeiros ensaios da série *aço AISI M2 e ferro fundido nodular austemperado e nitretado, ADI*, utilizaram-se dois níveis crescentes de energia de vibração, relativos ao “*Trip 700*”, na primeira ciclagem, e “*Trip 600*”, na segunda ciclagem. Nos dois últimos ensaios desta série, M237 e M238, uma única ciclagem (“*Trip 600*”).

Apresentam-se os resultados de NPS [dB] relativos à nova série.

Tabela 21. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M234 (Ciclagens 1 e 2, “*Trip 700*”, “*Trip 600*”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2
Média [dB]	86,6	86,8	87,1	87,8	87,3	89,3	87,0	93,1
Mediana [dB]	86,6	86,7	86,9	88,0	87,4	89,5	86,9	92,2
Variância	0,54	1,15	0,89	1,53	0,66	3,39	0,45	20,96
Desvio Padrão [dB]	0,7	1,1	0,9	1,2	0,8	1,8	0,7	4,6
Assimetria	-1,4	7,0	0,7	-0,9	-3,2	-3,0	7,3	4,1
Curtose	4,4	18,5	-0,1	1,3	1,7	-3,4	7,2	-6,7
K-S	2,125		3,9775		9,9375		18,3406	
Valor- <i>p</i>	0,0002		0,0000		0,0000		0,0000	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

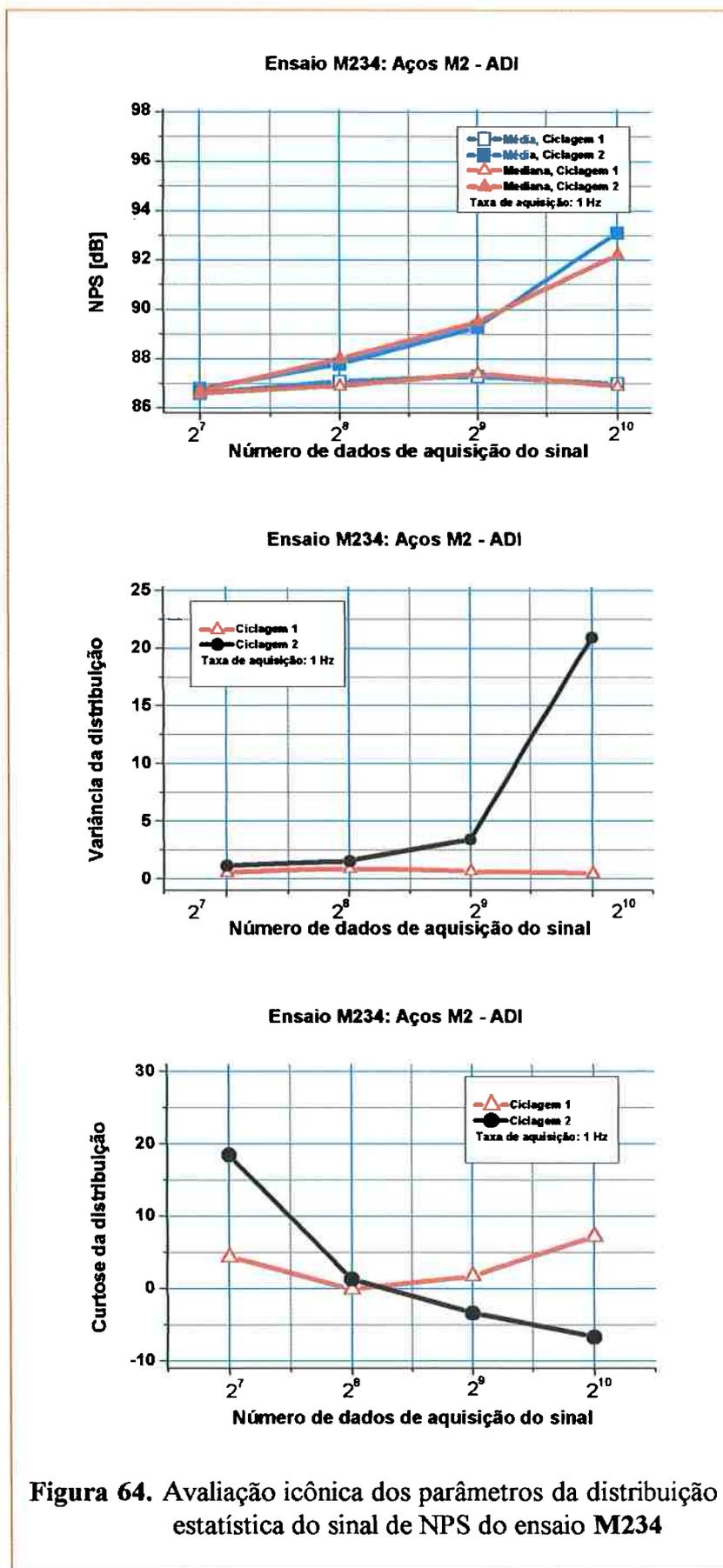


Tabela 22. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M235 (Ciclagens 1 e 2, “Trip 700”, “Trip 600”)

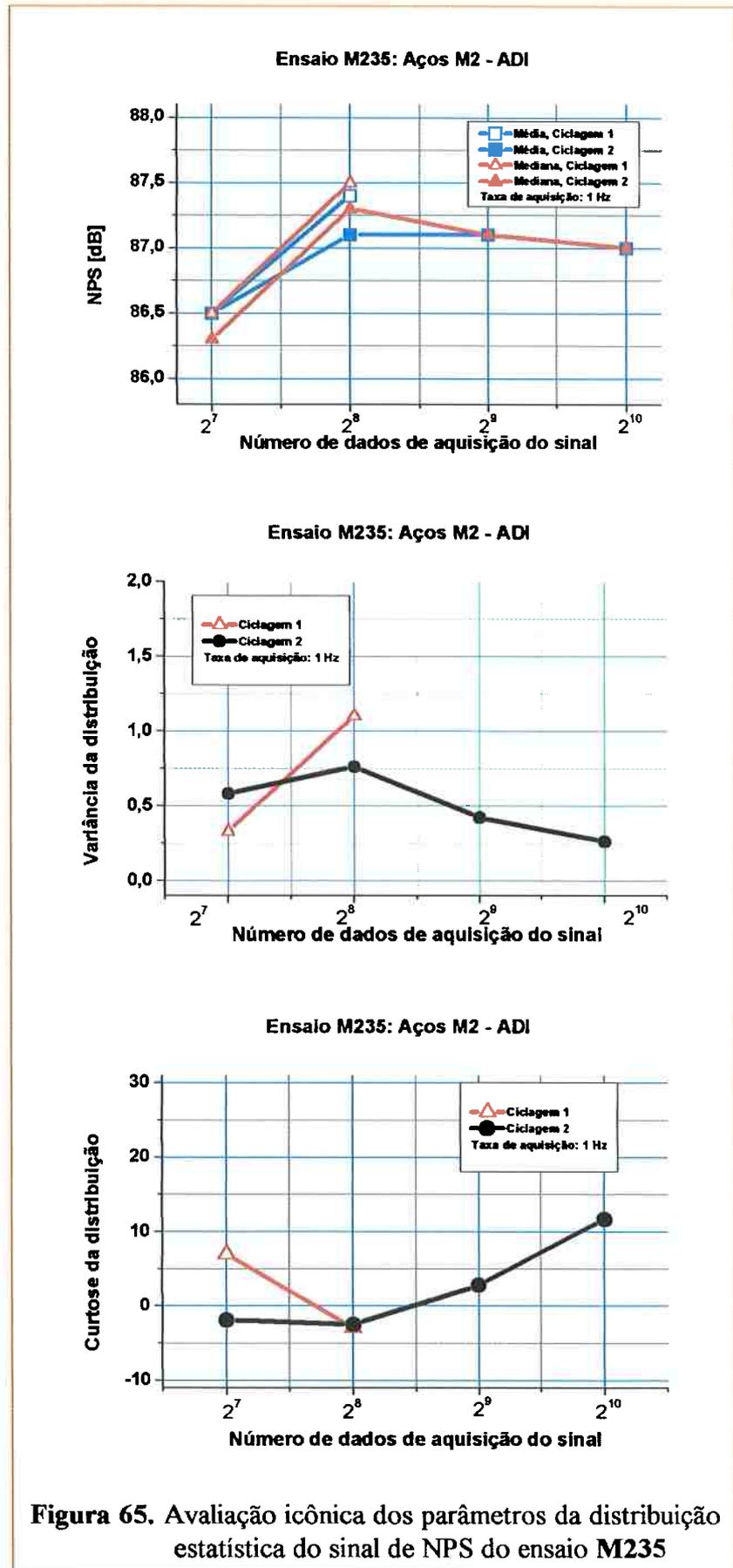
	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2
Média [dB]	86,5	86,5	87,4	87,1	(*)	87,1	(*)	87,0
Mediana [dB]	86,5	86,3	87,5	87,3	-	87,1	-	87,0
Variância	0,33	0,58	1,10	0,76	-	0,42	-	0,26
Desvio Padrão [dB]	0,6	0,8	1,0	0,9	-	0,6	-	0,5
Assimetria	-2,3	1,4	-1,0	-3,1	-	-3,0	-	0,2
Curtose	7,0	-1,9	-2,9	-2,5	-	2,8	-	11,7
K-S	2,1250		3,0936		-		-	
Valor- <i>p</i>	0,0002		0,0000		-		-	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		-		-	

(*) Ciclagem foi encerrada por parada automática antes de atingir este número de pontos

Tabela 23. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M236 (Ciclagens 1 e 2, “Trip 700”, “Trip 600”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2	Cicl.1	Cicl.2
Média [dB]	87,7	89,6	88,1	90,5	88,1	94,6	(*)	(*)
Mediana [dB]	88,2	90,2	88,4	90,6	88,4	93,2	-	-
Variância	2,20	3,07	1,32	2,68	1,0	25,6	-	-
Desvio Padrão [dB]	1,5	1,7	1,1	1,6	1,0	5,1	-	-
Assimetria	-3,2	-6,2	-10,3	-8,6	-14,6	4,8	-	-
Curtose	0,5	1,1	10,4	7,7	14,7	-3,6	-	-
K-S	6,0000		9,8553		14,9063		-	
Valor- <i>p</i>	0,0000		0,0000		0,0000		-	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>			

(*) Ciclagem foi encerrada por parada automática antes de atingir este número de pontos



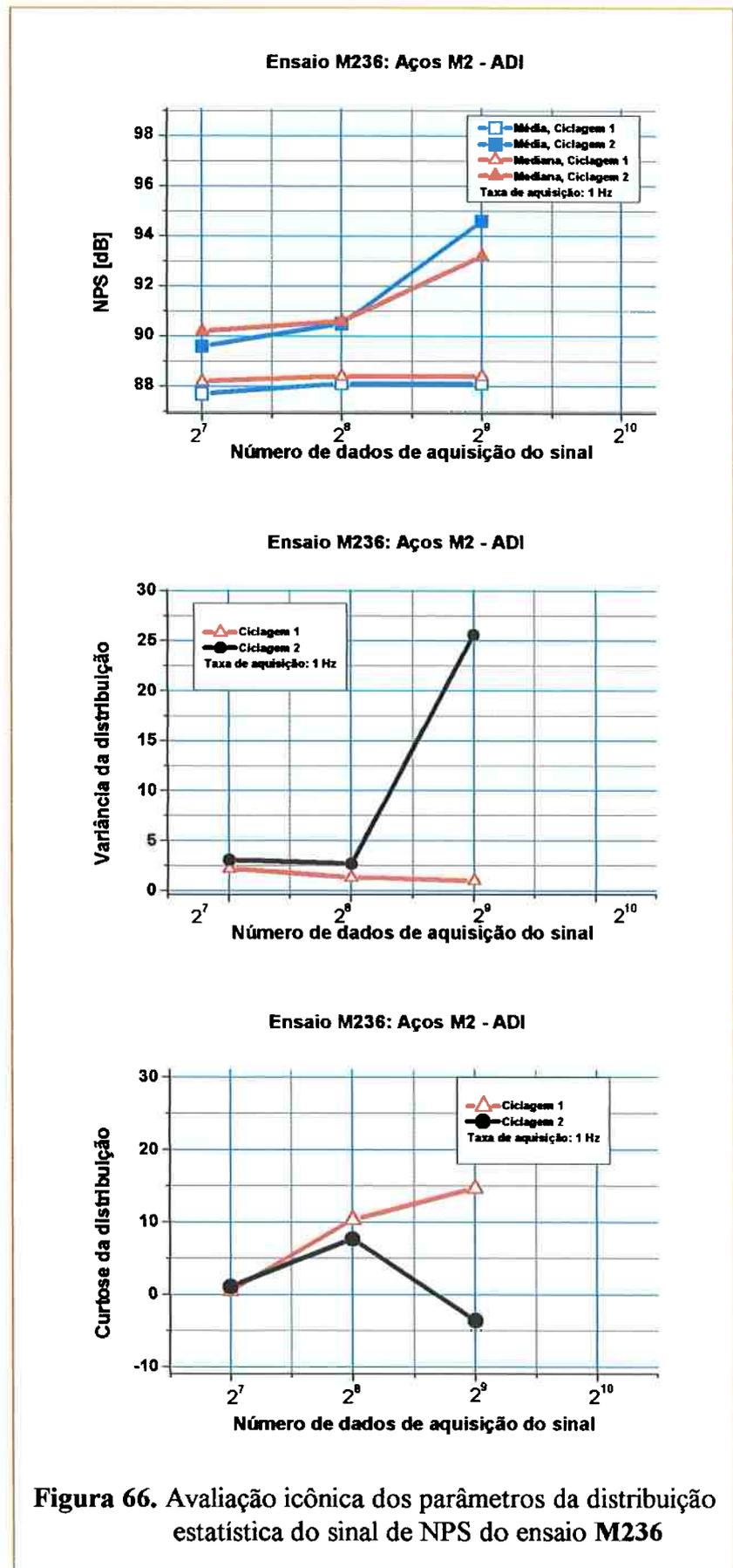


Tabela 24. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M237 (Ciclagem única, pontos iniciais e finais da janela, “Trip 600”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais
Média [dB]	86,9	110,4	87,2	110,2	87,6	108,2	88,4	106,9
Mediana [dB]	87,	111,2	87,3	110,5	87,6	109,15	87,8	106,6
Variância	0,23	17,48	0,29	8,87	0,46	10,09	2,92	7,83
Desvio Padrão [dB]	0,5	4,2	0,5	3,0	0,7	3,2	1,7	2,8
Assimetria	-4,7	-24,9	-6,0	-46,7	-1,5	-22,6	17,2	-14,4
Curtose	3,7	73,2	4,1	197,5	1,6	72,0	5,2	66,9
K-S	7,8750		11,2253		15,9375		22,5832	
Valor- <i>p</i>	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

Tabela 25. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função do tamanho da janela de aquisição – Ensaio M238 (Ciclagem única, pontos iniciais e finais da janela, “Trip 600”)

	2 ⁷ pontos		2 ⁸ pontos		2 ⁹ pontos		2 ¹⁰ pontos	
	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais	Iniciais	Finais
Média [dB]	89,6	101,6	91,3	105,2	92,6	109,5	93,2	111,8
Mediana [dB]	90,4	101,6	91,6	104,8	93,3	112,1	93,1	113,9
Variância	8,26	2,51	8,23	16,29	5,89	26,78	5,15	22,01
Desvio Padrão [dB]	2,9	1,6	2,9	4,0	2,4	5,2	2,3	4,7
Assimetria	-3,9	0,8	-7,4	0,8	-18,0	-6,7	-13,2	-22,0
Curtose	2,8	-2,1	5,7	-4,4	22,0	-4,8	33,3	28,3
K-S	8,0000		11,3137		16,0000		22,4727	
Valor- <i>p</i>	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre Ciclagens 1 e 2	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

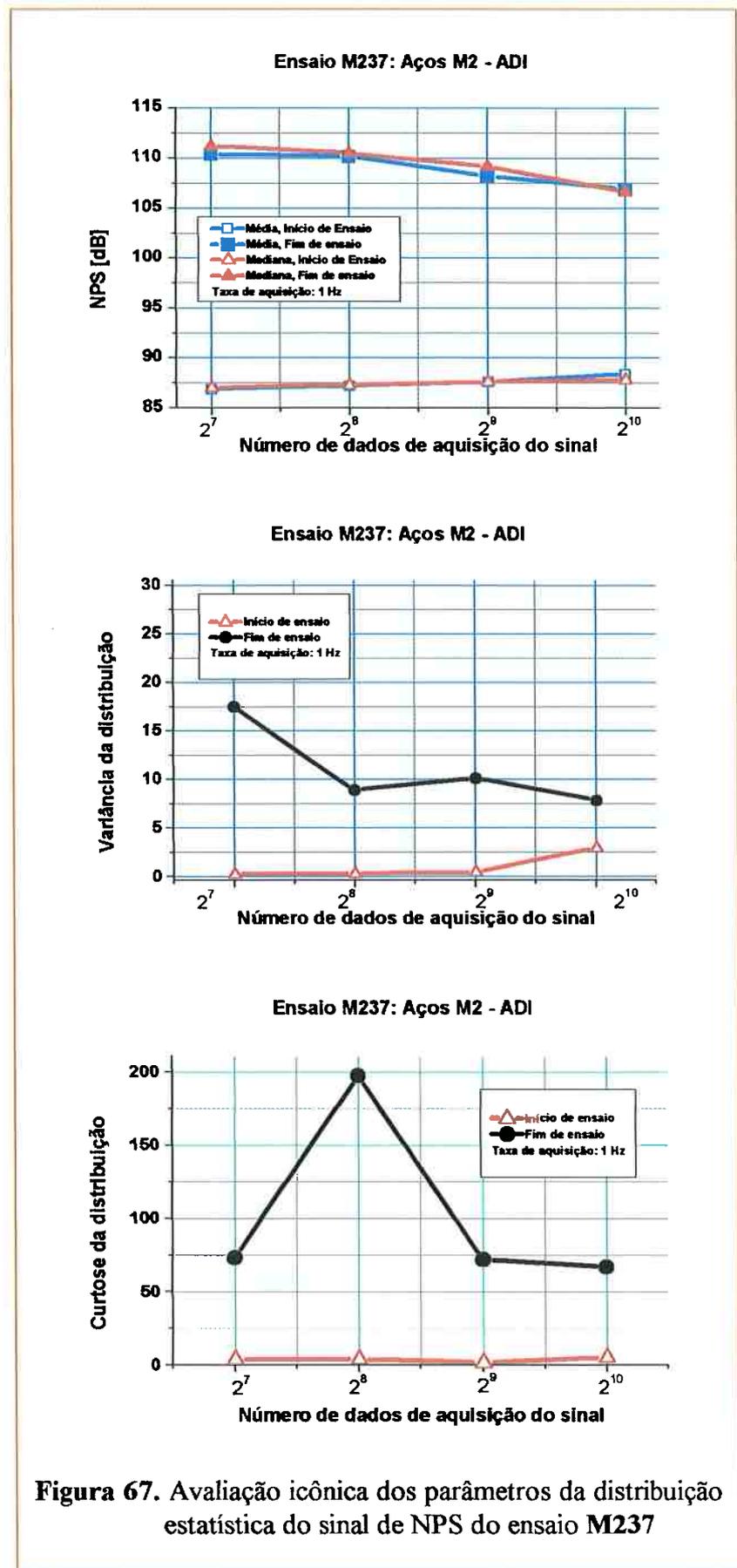


Figura 67. Avaliação icônica dos parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS do ensaio M237

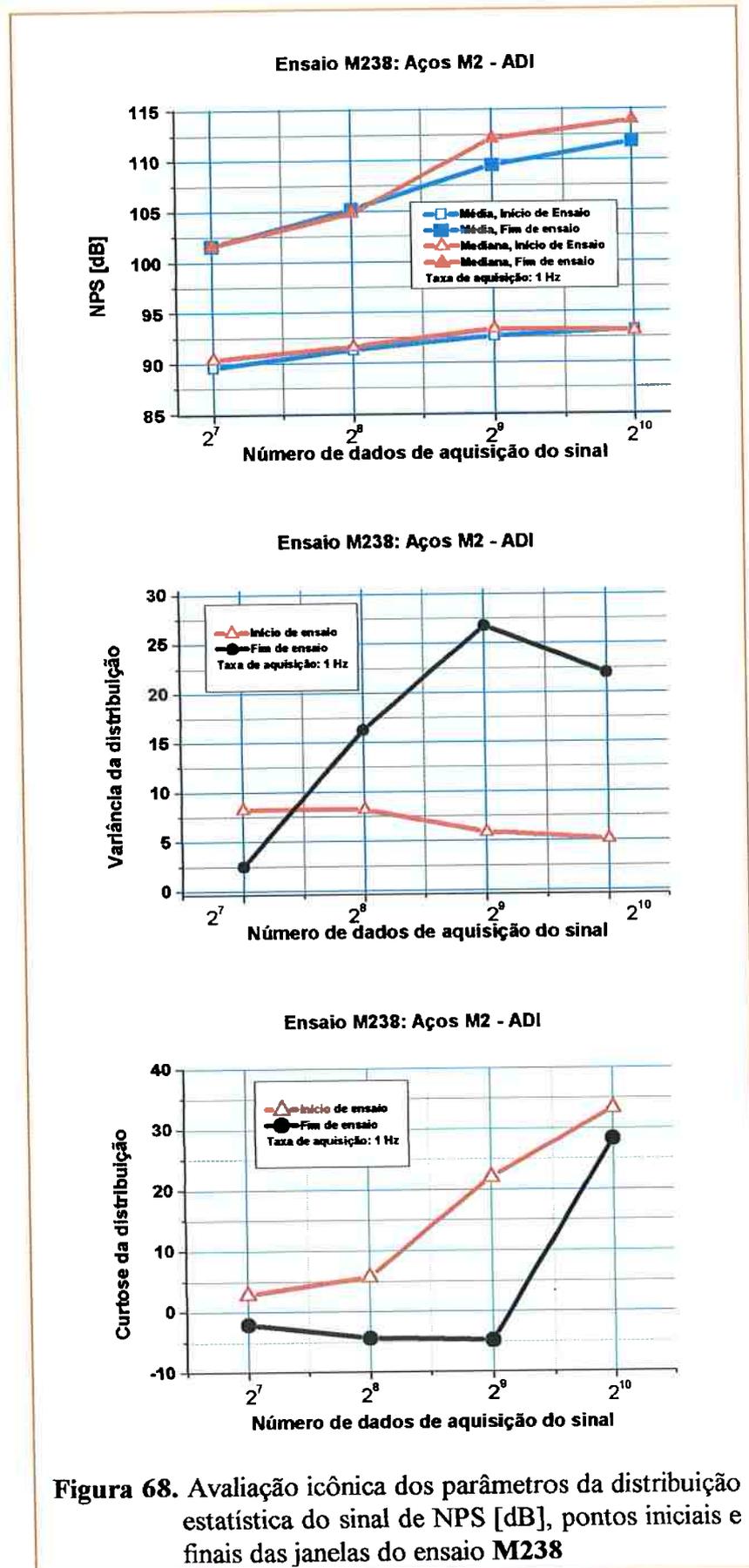


Figura 68. Avaliação icônica dos parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB], pontos iniciais e finais das janelas do ensaio M238

4.1.2. Primeiro corpo e disco antagonista de aço AISI M2

Uma vez ensaiados, extraíram-se as respectivas coroas circulares dos discos M234 e M237 contendo as pistas de rolamento para análise microscópica. Foram novamente torneados e retificados, reassumindo uma nova pista com forma esférica e diâmetro $152,00 \pm 0,05$ mm. Os dados de NPS [dB] são mostrados na Tabela 26 e na Figura 69, constituindo o ensaio M240.

Os níveis de energia elástica de vibração foram associados às paradas de ensaio nas ciclagens de 1 a 5, ajustadas pelo “*Trip 750*”, “*Trip 700*”, “*Trip 600*”, “*Trip 300*” e “*Trip 300*”.

A execução deste ensaio foi executada ao longo de cinco ciclagens, quatro das quais em níveis crescentes de energia elástica de vibração, enquanto a quinta reproduzia a parada ao nível energético semelhante.

A Figura 69 apresenta os valores, no início e fim de cada ciclagem, da mediana, variância e curtose da distribuição dos 128 pontos iniciais e 128 pontos finais do sinal correspondente a cada ciclagem. Os momentos estatísticos revelam, para o par de discos de aço AISI M2 nas condições ensaiadas, que há uma acentuação do NPS [dB] na quarta ciclagem quando o “*Trip Sensor*” está ajustado para o valor 300.

Tabela 26. Distribuição estatística dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função dos pontos iniciais e finais de cada ciclagem do Ensaio M240 (2^7 pontos iniciais e finais)

	Ciclagem 1 (Trip 750)		Ciclagem 2 (Trip 700)		Ciclagem 3 (Trip 600)		Ciclagem 4 (Trip 300)		Ciclagem 5 (Trip 300)	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
Média [dB]	87,3	85,3	86,1	87,0	87,0	88,5	87,5	97,7	97,1	103,0
Mediana [dB]	86,9	85,3	86,0	86,7	86,7	88,5	87,4	97,8	96,6	102,9
Variância	4,29	5,38	1,47	1,56	3,27	0,50	1,95	2,41	29,05	3,76
Desvio Padrão [dB]	2,1	0,7	1,2	1,2	1,8	0,7	1,4	1,5	5,4	1,9
Assimetria	2,8	2,5	2,4	0,3	2,8	-3,6	3,2	-14,1	1,3	-16,5
Curtose	-1,4	0,3	-1,2	-2,0	-0,9	4,9	-0,2	46,3	-1,9	99,2
K-S	4,2500		2,1875		5,0625		7,9375		6,1250	
<i>p-Value</i>	0,0000		0,0001		0,0000		0,0000		0,0000	
Diferença ($\alpha=5\%$) significativa entre início e fim de ciclagem	<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>		<i>sim</i>	

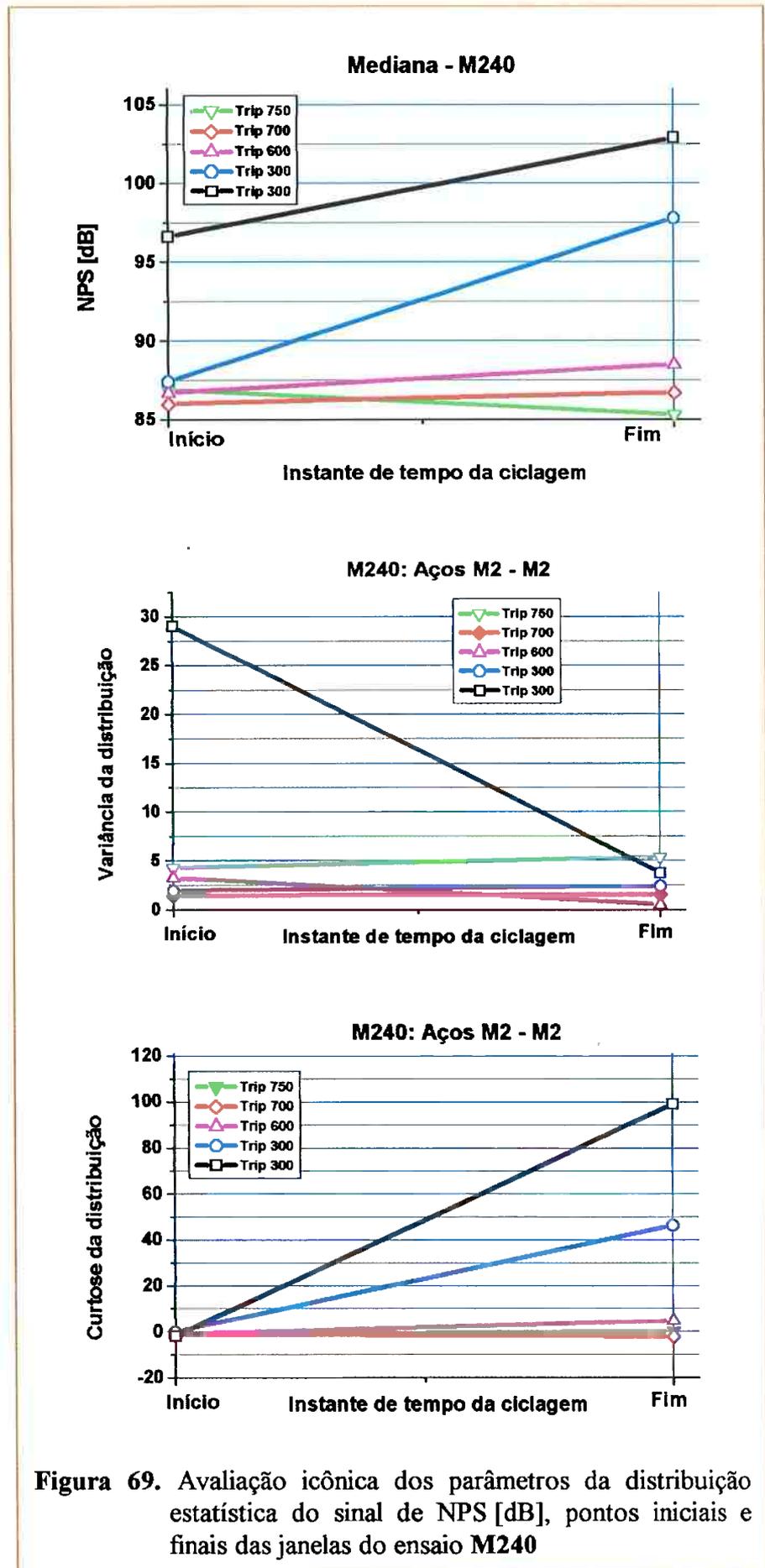


Figura 69. Avaliação icônica dos parâmetros da distribuição estatística do sinal de NPS [dB], pontos iniciais e finais das janelas do ensaio M240

Para responder à questão basilar a respeito da diferença estatística entre as distribuições amostrais entre os 2^7 (128) pontos iniciais e 2^7 (128) pontos finais do NPS [dB] das cinco ciclagens do ensaio M240, em que o material do primeiro corpo e do seu antagonista era o aço AISI M2 importado, procedeu-se a uma série de 44 testes de Kolmogorov-Smirnov, cujo resultado encontra-se na Tabela 27.

A um nível de significância de 95 % verificou-se que 43, dentre os 44 testes, apresentaram unicidade nas assinaturas do sinal temporal de NPS [dB], ou seja, houve diferença estatística significativa em 97,7 % dentre as amostras de 128 segundos iniciais e finais de ensaio, adquiridos a uma taxa de 1 Hz. O teste de Kolmogorov-Smirnov apresentou um valor de $p = 0,3457$ entre os 128 pontos iniciais do sinal de NPS [dB] das ciclagens 1 e 3, como assinalado em negrito na Tabela 27. Nos demais casos, $p < 0,05$, caracterizando diferença entre as amostras. Considerando-se que cada disco girava a cerca de 5200 rpm, cada janela disse respeito a uma aquisição com duração da ordem de 10^4 ciclos, o limiar de sensibilidade dessa medida.

Tabela 27. Análise KS dos dados do Nível de Pressão Sonora (NPS [dB]) em função dos pontos iniciais e finais de cada ciclagem do Ensaio M240 (2^7 pontos iniciais e finais)

Trip	Ciclagem	2		3		4		5		
		Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	
750	1	Início	2,3750 0,0000	1,8750 0,0018	0,9375 0,3457	4,6875 0,0000	2,0625 0,0004	7,9375 0,0000	6,5625 0,0000	7,9375 0,0000
		Fim	2,8750 0,0000	4,2500 0,0000	4,1250 0,0000	7,7500 0,0000	6,0000 0,0000	7,9375 0,0000	7,8750 0,0000	7,9375 0,0000
700	2	Início		2,1875 0,0001	2,0000 0,0007	6,5625 0,0000	3,4375 0,0000	7,9375 0,0000	7,8750 0,0000	7,9375 0,0000
		Fim	2,1875 0,0001		1,3750 0,0456	5,5000 0,0000	2,1250 0,0002	7,9375 0,0000	7,8750 0,0000	7,9375 0,0000
600	3	Início	2,0000 0,0007	1,3750 0,0456		5,0625 0,0000	2,1250 0,0002	7,9375 0,0000	7,1875 0,0000	7,9375 0,0000
		Fim	6,5625 0,0000	5,5000 0,0000	5,0625 0,0000		4,1250 0,0000	7,9375 0,0000	7,6875 0,0000	7,9375 0,0000
300	4	Início	3,4375 0,0000	2,1250 0,0002	2,1250 0,0002	4,1250 0,0000		7,9375 0,0000	7,3750 0,0000	7,9375 0,0000
		Fim	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000		3,1875 0,0000	7,9375 0,0000
300	5	Início	7,8750 0,0000	7,8750 0,0000	7,1875 0,0000	7,6875 0,0000	7,3750 0,0000	3,1875 0,0000		6,1250 0,0000
		Fim	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	7,9375 0,0000	6,1250 0,0000	

Observação: Em cada célula, apresentam-se K-S (acima) e "p-value" (abaixo)

4.2. Resposta do NPS[dB] associado à pressão de Hertz $p_{o(máx)}$ para primeiro corpo de aço AISI M2 e antagonista de aço AISI 52100 ou ADI nitretado

Os valores tabulados a seguir, neste item 4.2, resultam da aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), que trata da aceitação ou rejeição da hipótese de que as distribuições amostrais dos sinais de NPS [dB] são oriundas de uma mesma distribuição, relativos à primeira ou segunda ciclagem dos ensaios do aço AISI M2, como primeiro corpo, e o aço AISI 52100 ou ADI como disco antagonista.

Desta feita, os dados são testados de acordo com valores *semelhantes* ou *diferentes* de pressão máxima de Hertz (Anexo E, p.490) entre os discos.

Ensaaios com *solicitação semelhante* foram considerados aqueles cuja pressão máxima de Hertz está incluída em uma faixa de variação de ± 50 MPa ($\pm 0,05$ GPa).

Para os ensaios efetuados, trata-se de um desvio de $\pm 3,3$ % na magnitude da pressão máxima de contato, o que representa, para discos de aço, uma variação entre ± 5 e $\pm 12\%$ na magnitude da carga compressiva, ± 6 % no raio de contato e $\pm 2\%$ na profundidade em que incide a tensão de cisalhamento máxima, estes não superando três dezenas de μm , ou seja, da ordem de grandeza de um ou alguns grãos.

Questiona-se a unicidade da “*assinatura*” do sinal temporal de NPS [dB].

A Tabela 28 apresenta os resultados dos testes estatísticos para os ensaios de aço AISI M2-52100 e aço AISI M2-ADI cujas pressões de Hertz foram *semelhantes*. Como $p < 0,05$, houve uma diferença estatisticamente significativa entre cada duas distribuições testadas ao nível de confiança de 95 % .

Assim, adotando-se como critério de parada do ensaio, níveis próximos de energia elástica de vibração da estrutura da máquina determinados pelo ajuste do “*Trip sensor*” entre 700 e 600, com máximas pressões de Hertz solicitantes do contato variando dentro de ± 50 MPa, *as assinaturas do sinal de NPS [dB] mostraram-se únicas e estatisticamente diferentes entre si, a um nível de significância de 95 %, independentemente se o disco antagonista ao de aço AISI M2 fosse de aço AISI 52100 ou ADI nitretado, para ambas as ciclagens.*

Quando tais assinaturas foram comparadas em diferentes níveis de pressão de Hertz, entretanto, não se mostraram únicas, Tabelas 29 e 30.

Tabela 28. Comparação da distribuição do sinal de NPS [dB] entre ensaios aço AISI M2-52100 e aço AISI M2-ADI com pressões de Hertz semelhantes

Ciclagem 1 do Ensaio (Ajuste do Trip)	Pressão Hertz (máx.) [GPa]	Ciclagem 1			Ciclagem única		
		M234 T700 M2 - ADI	M235 T700 M2 - ADI	M236 T700 M2 - ADI	M237 T600 M2 - ADI	M238 T600 M2 - ADI	M239 T600 M2 - 52100
M231 (T700)	1,75	2,03067 0,00052			1,79567 0,00316		
M232 (T700)	2,30		2,00000 0,00067			2,98142 0,00000	
M233 (T700)	2,88			1,93649 0,00111			
M234 (T700)	1,74				2,01624 0,00059		
M235 (T700)	2,27					1,95180 0,00098	
M236 (T700)	2,81						
M237 (T600)	1,77	2,01624 0,00059					
M238 (T600)	2,34		1,95180 0,00098				
M239 (T600)	2,00						
Ciclagem 2		M231 T700	M232 T700	M233 T700	M234 T600	M235 T600	M236 T600
M231 (T700)	1,75				1,70084 0,00614		
M232 (T700)	2,30					2,74643 0,00000	
M233 (T700)	2,88						1,73205 0,00496
M234 (T600)	1,74	1,70084 0,00614					
M235 (T600)	2,27		2,74643 0,00000				
M236 (T600)	2,81			1,73205 0,00496			

Cada nível de pressão máxima de Hertz, dentro de ± 50 MPa, está indicado por uma cor

2,03067 0,00052	K-S "p-value"	Sombreamento amarelo: M2-ADI Sem sombreamento: M2-52100
--------------------	------------------	--

Tabela 29. Comparação do NPS [dB] dos ensaios aço M2-52100 e M2-ADI, primeira ciclagem e diferentes pressões máximas de Hertz

Ciclagem 1 do Ensaio (Ajuste do Trip)	(P _o) _{Max} [GPa]	Ciclagem 1							Ciclagem única		
		M231 T700	M232 T700	M233 T700	M234 T700	M235 T700	M236 T700	M237 T600	M238 T600	M239 T600	
M231 (T700)	1,75	M2 - Aço	M2 - Aço	M2 - Aço	M2 - ADI	M2 - Aço					
		2,86972 0,00000	2,41523 0,00002	2,86972 0,00000	2,66398 0,00000	0,63067 0,82126	1,70783 0,00586		2,39096 0,00002	2,65528 0,00000	
M232 (T700)	2,30		0,77460 0,58597	0,77460 0,58597	2,66398 0,00000		3,27073 0,00000			3,88094 0,00000	
M233 (T700)	2,88	2,86972 0,00000	2,41523 0,00002	2,86972 0,00000	2,66398 0,00000	1,82574 0,00254	2,64002 0,00000	2,48069 0,00001		2,88308 0,00000	
M234 (T700)	1,74		0,77460 0,00000	0,77460 0,00000		1,14614 0,44580	1,79124 0,00327	2,55314 0,00000	0,97361 0,30089		
M235 (T700)	2,27	0,63067 0,82126	1,82574 0,00254	1,82574 0,00254	1,14614 0,44580		1,40981 0,03755		1,33211 0,05751		
M236 (T700)	2,81	1,70783 0,00586	2,14834 0,00100	1,70783 0,00586	1,79124 0,00327	0,77067 0,59251	1,51751 0,01999	2,08893 0,00032	2,10735 0,00028		
M237 (T600)	1,77		3,27073 0,00000	2,64002 0,00000		1,40981 0,03755	1,51751 0,01999	1,5359 0,01787	2,84303 0,00000		
M238 (T600)	2,34	2,39096 0,00002	2,48069 0,00001	2,48069 0,00001	2,55314 0,00000		1,5359 0,01787		3,56024 0,00000		
M239 (T600)	2,00	2,65528 0,00000	2,88308 0,00000	2,88308 0,00000	0,97361 0,30089	1,33211 0,05751	2,84303 0,00000	3,56024 0,00000			

Dentro de cada célula apresentam-se os valores de K-S e “p-value” do teste de Kolmogorov-Smirnov, obtido pelo software Statgraphics® Plus 2.1

Diferença não-significativa entre a distribuição das amostras, 95% de significância

Tabela 30. Comparação do NPS [dB] entre ensaios aço M2-52100 e M2-ADI , segunda ciclagem, *pressões máximas de Hertz diferentes*

Ciclagem 2	Pressão Hertz [GPa]	M231 T700	M232 T700	M233 T700	M234 T600	M235 T600	M236 T600
		M2 - Aço	M2 - Aço	M2 - Aço	M2- ADI	M2 - ADI	M2 - ADI
M231 (T700)	1,75		2,22486 0,00010	1,89737 0,00149		1,49241 0,02325	1,89737 0,00149
M232 (T700)	2,30	2,22486 0,00010		0,98518 0,28749	2,39565 0,00002		1,97037 0,00085
M233 (T700)	2,88	1,89737 0,00149	0,98518 0,28749		2,0 0,00067	2,19089 0,00013	
M234 (T600)	1,74		2,39565 0,00002	2,0 0,00067		0,94281 0,33884	1,0 0,27101
M235 (T600)	2,27	1,49241 0,02325		2,19089 0,00013	0,94281 0,33884		1,09545 0,18151
M236 (T600)	2,81	1,49241 0,02325	1,97037 0,00085		1,0 0,27101	1,09545 0,18151	

Diferença não-significativa entre a distribuição das amostras, 95% de significância

Observando-se os resultados das análises estatísticas efetuadas ao nível de 95 % de significância e apresentadas nas Tabelas 29 e 30, tem-se que:

- 1) Na primeira e segunda ciclagem, apresentaram diferença significativa as assinaturas do sinal temporal de NPS [dB] entre as amostras associadas às paradas comandadas por “Trip 600” e “Trip 700”, ou seja, diferentes níveis de energia elástica de vibração da estrutura da máquina, *independentemente dos materiais, mas para diferentes níveis de pressões máximas de Hertz utilizados*;
- 2) Ao nível de energia associado ao “Trip 700”, perceberam-se diferenças estatísticas entre as assinaturas, nas duas ciclagens, para algumas magnitudes da pressão máxima de Hertz, enquanto, para outras pressões, não houve diferença;
- 3) Majorando-se o nível de energia elástica de vibração da estrutura, “Trip 600”, a comparação entre as assinaturas apresentou diferença significativa na primeira ciclagem e não apresentou diferença na segunda ciclagem.

A energia elástica de vibração, o nível de pressão sonora e a pressão máxima de Hertz mostraram-se ser *variáveis necessárias, mas não suficientes*, no processo de avaliação da intensificação do dano por desgaste. O item 4.3 apresenta evidências de mecanismos de dano por desgaste e por métodos quase-estáticos destrutivos do material.

4.3. Danos constatados em algumas pistas desgastadas e colapso em C.P. “Chevron” e C.P. “flexão três pontos”

4.3.1. Evidências de microscopia e ensaios mecânicos

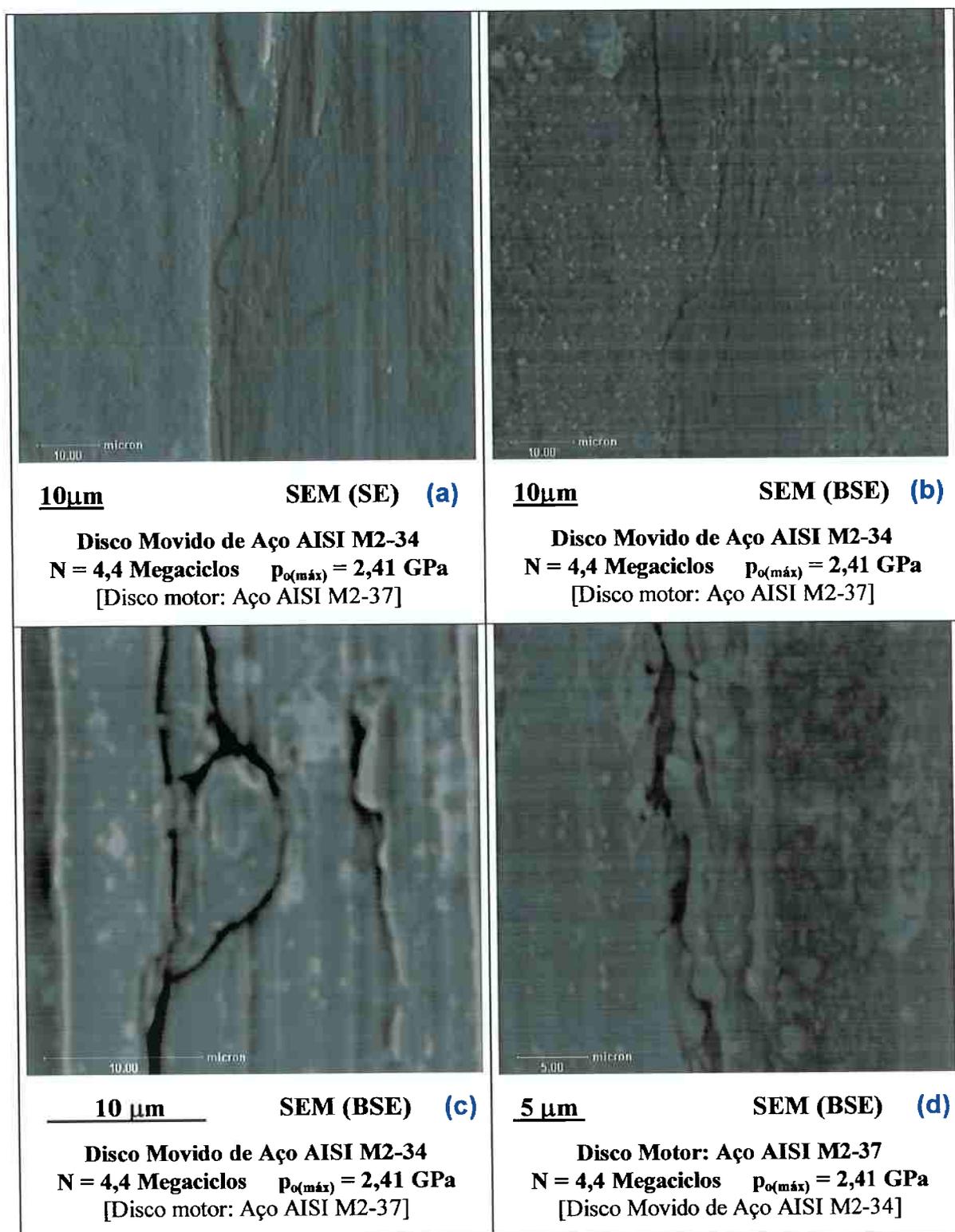


Figura 70. Morfologia de pistas desgastadas após ensaio M240

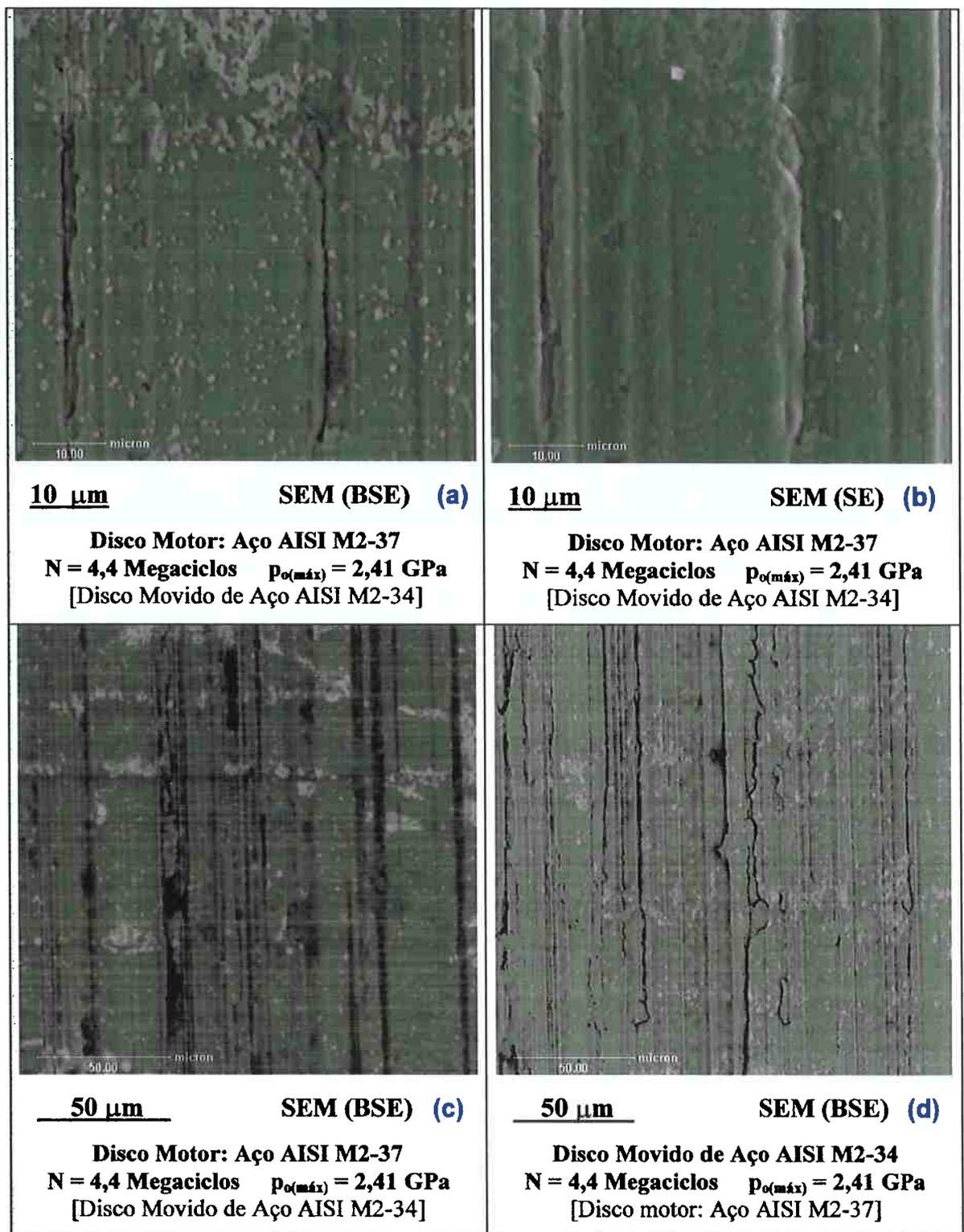


Figura 71. Morfologia de pistas de aço M2 desgastadas após ensaio M240

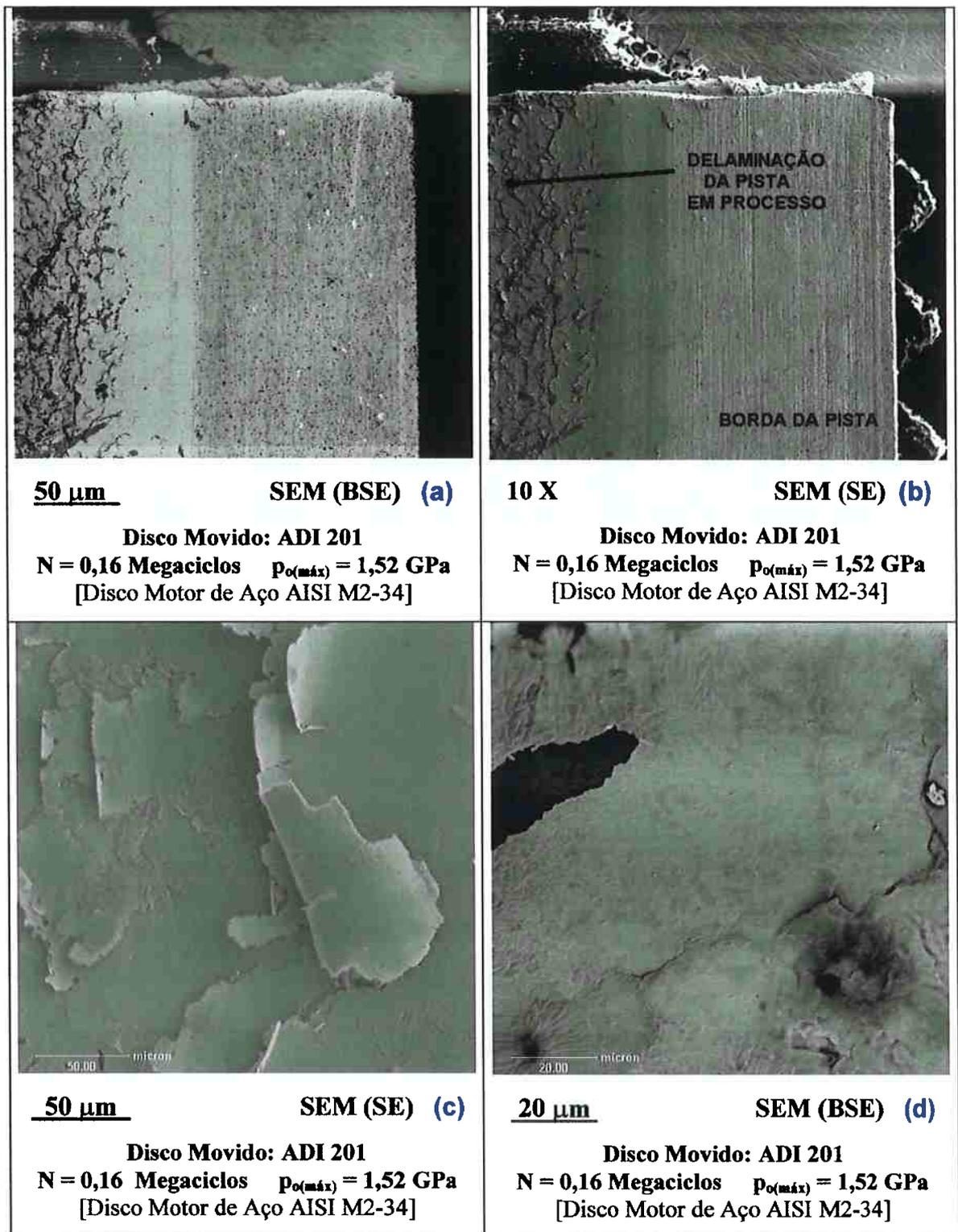


Figura 72. Morfologia de pistas de ADI desgastadas após ensaio M204

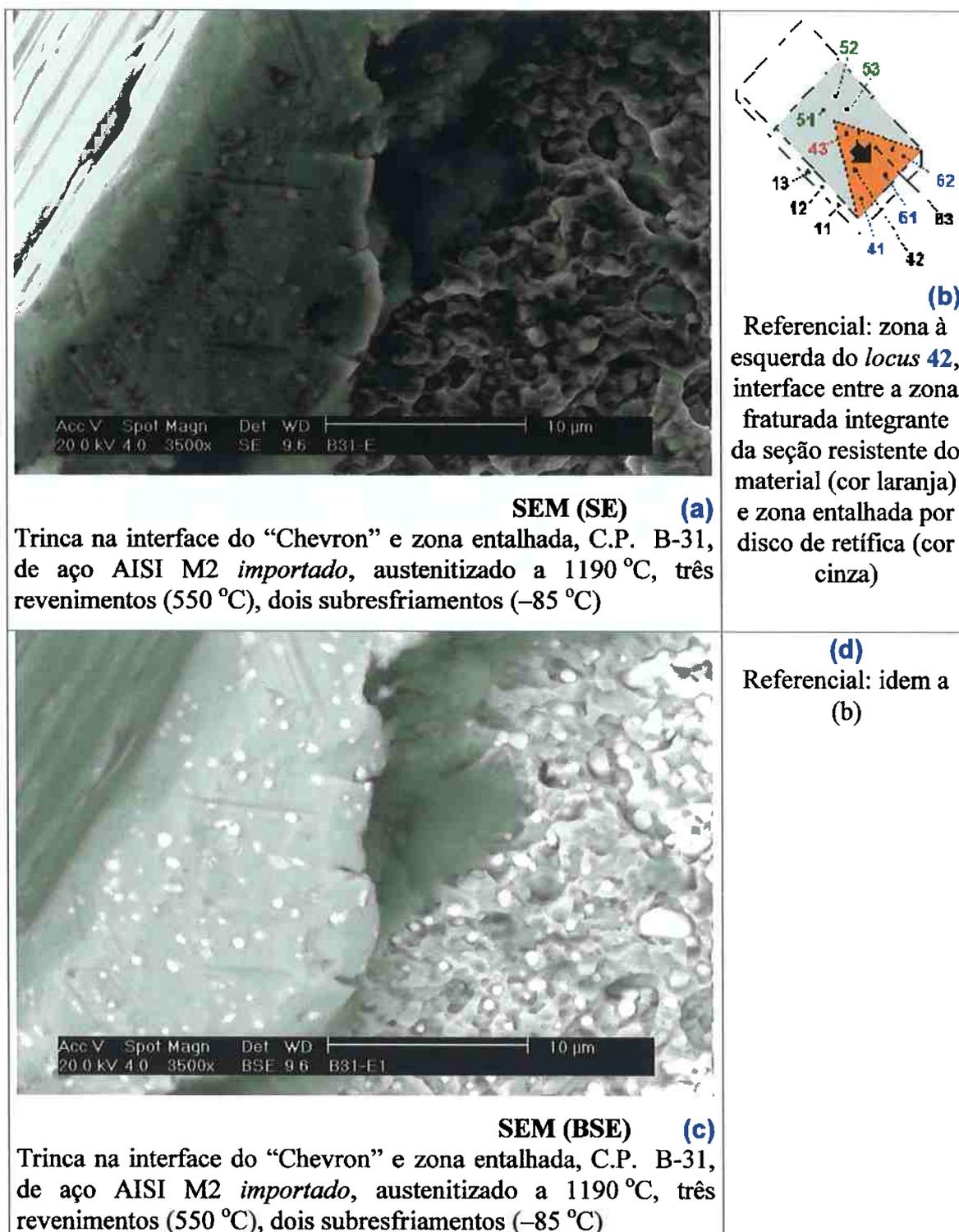


Figura 73. Morfologia de trinca na interface do "Chevron" e zona usinada do entalhe

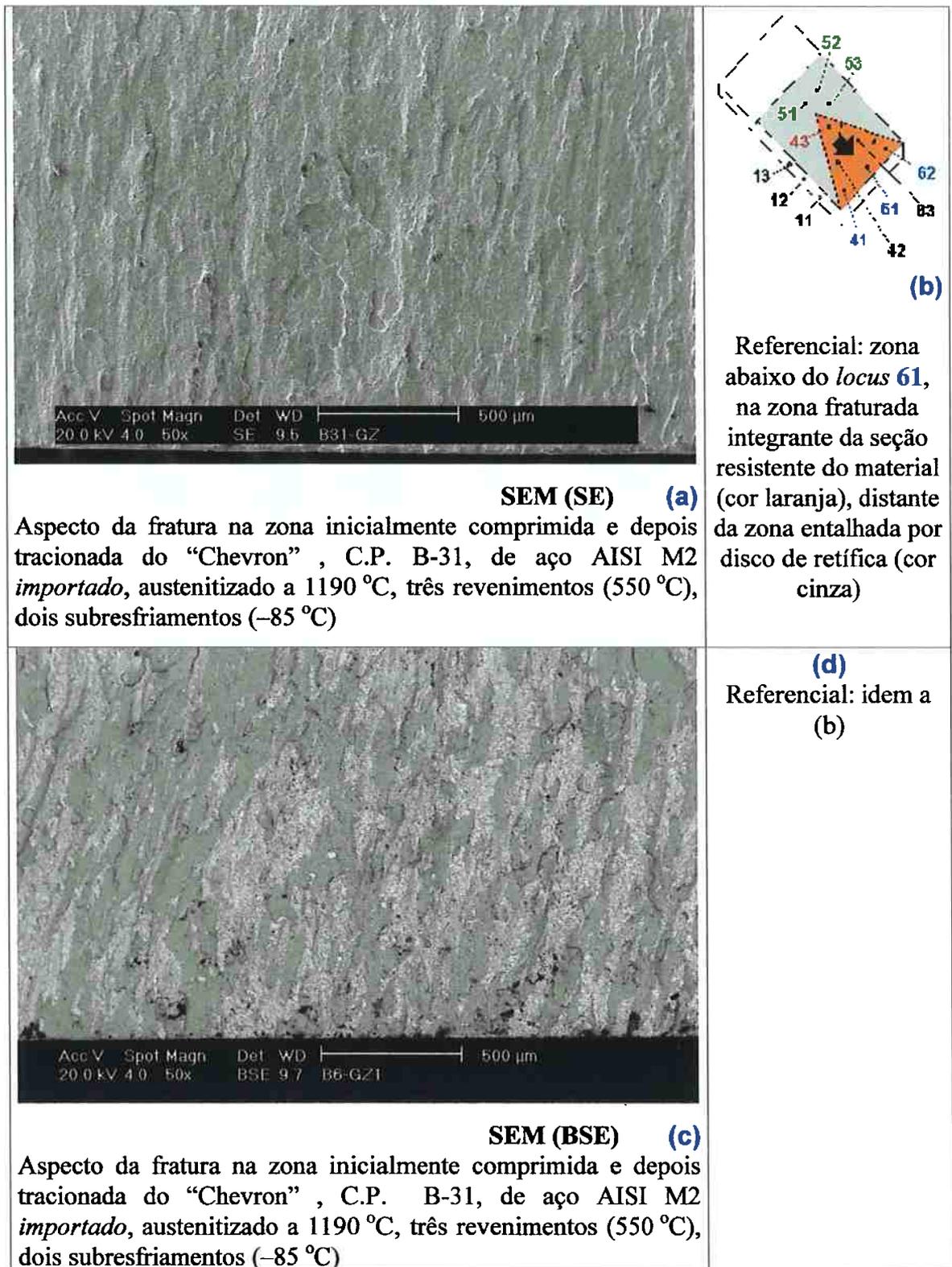
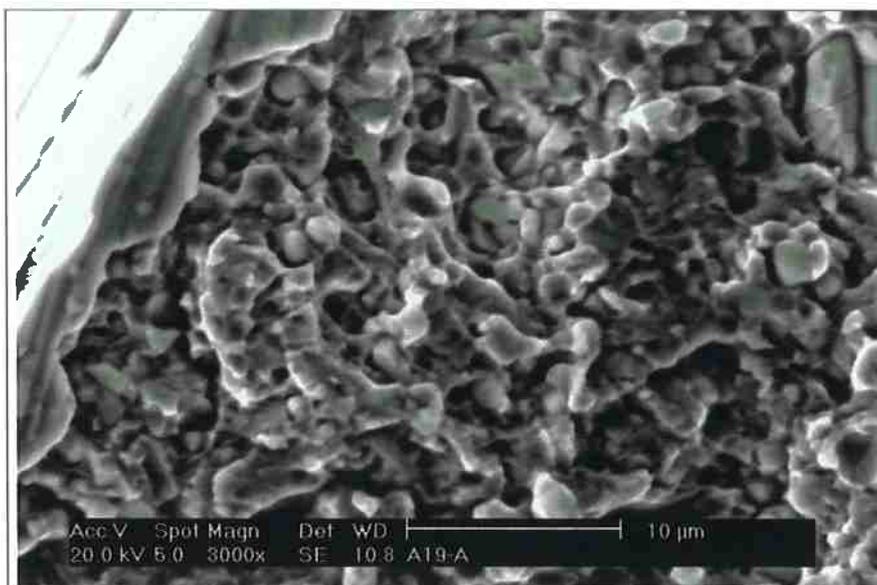
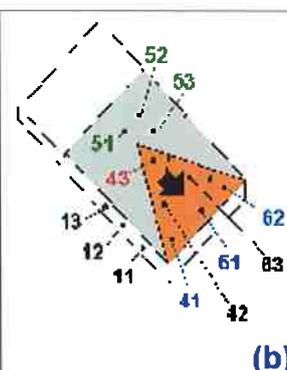


Figura 74. Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe



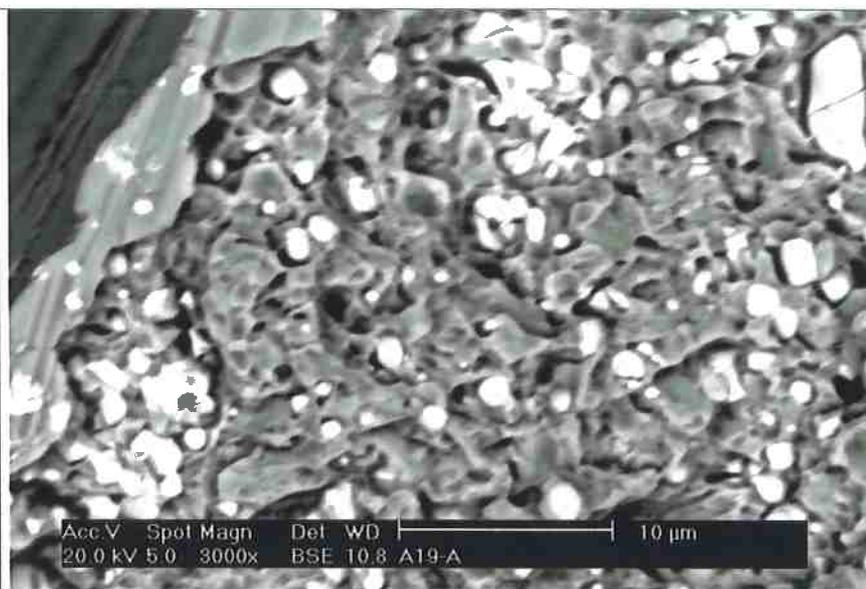
SEM (SE) (a)

Trinca na interface do “Chevron” e zona entalhada, C.P. A-19, de aço AISI M2 nacional, austenitizado a 1190 °C, quatro revenimentos (550 °C), dois subresfriamentos (-85 °C)



(b)

Referencial: zona à esquerda do locus 42, interface entre a zona fraturada integrante da seção resistente do material (cor laranja) e zona entalhada por disco de retífica (cor cinza)



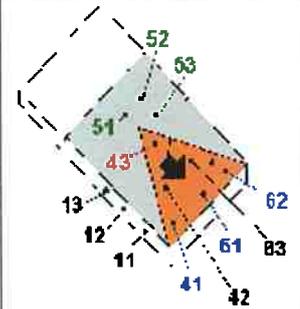
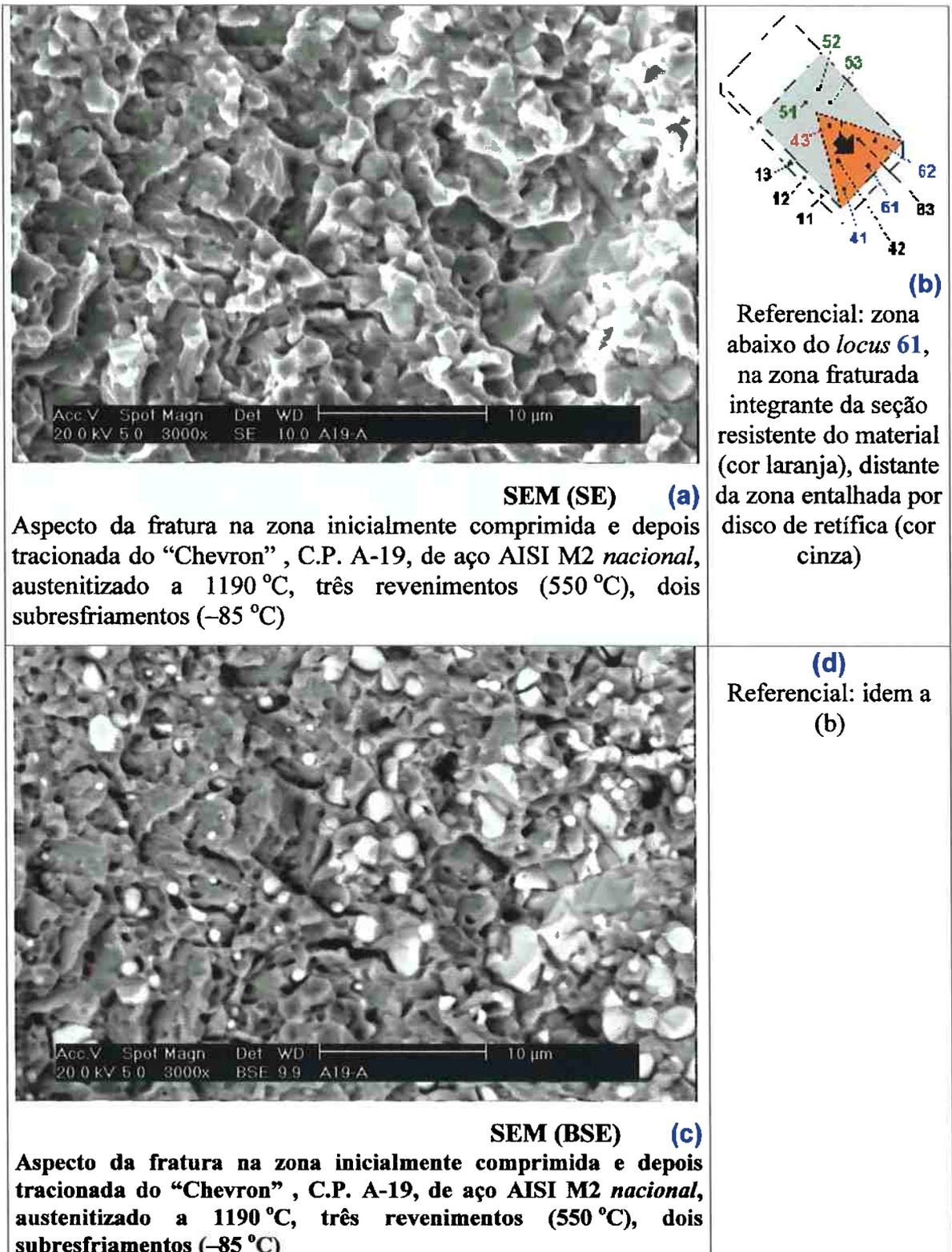
SEM (BSE) (c)

Trincas na interface do “Chevron” e zona entalhada e em partícula de segunda fase, C.P. A-19, de aço AISI M2 nacional, austenitizado a 1190 °C, quatro revenimentos a 550 °C) e dois subresfriamentos à temperatura de -85 °C

(d)

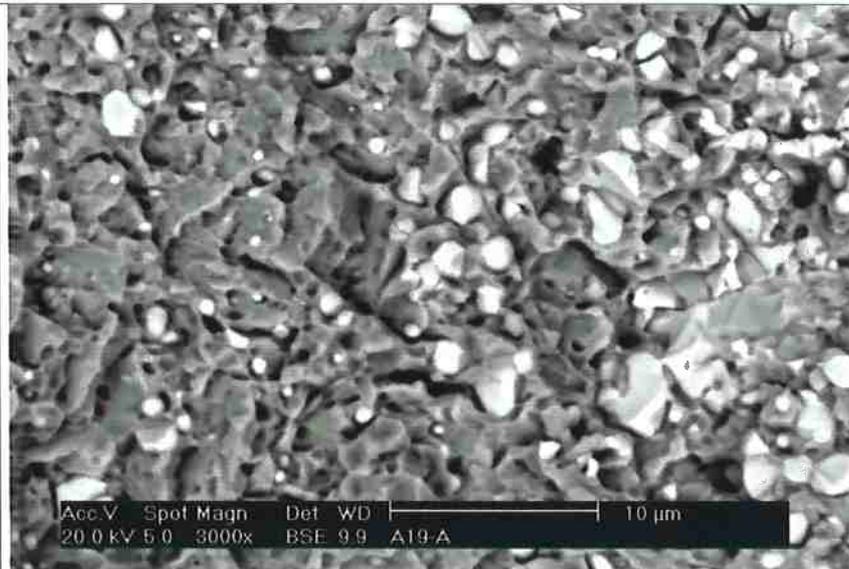
Referenciais: idem (b); Anexo A

Figura 75. Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe



(b)

Referencial: zona abaixo do locus 61, na zona fraturada integrante da seção resistente do material (cor laranja), distante da zona entalhada por disco de retífica (cor cinza)



(d)

Referencial: idem a (b)

Figura 76. Morfologia de trinca na interface do “Chevron” e zona usinada do entalhe

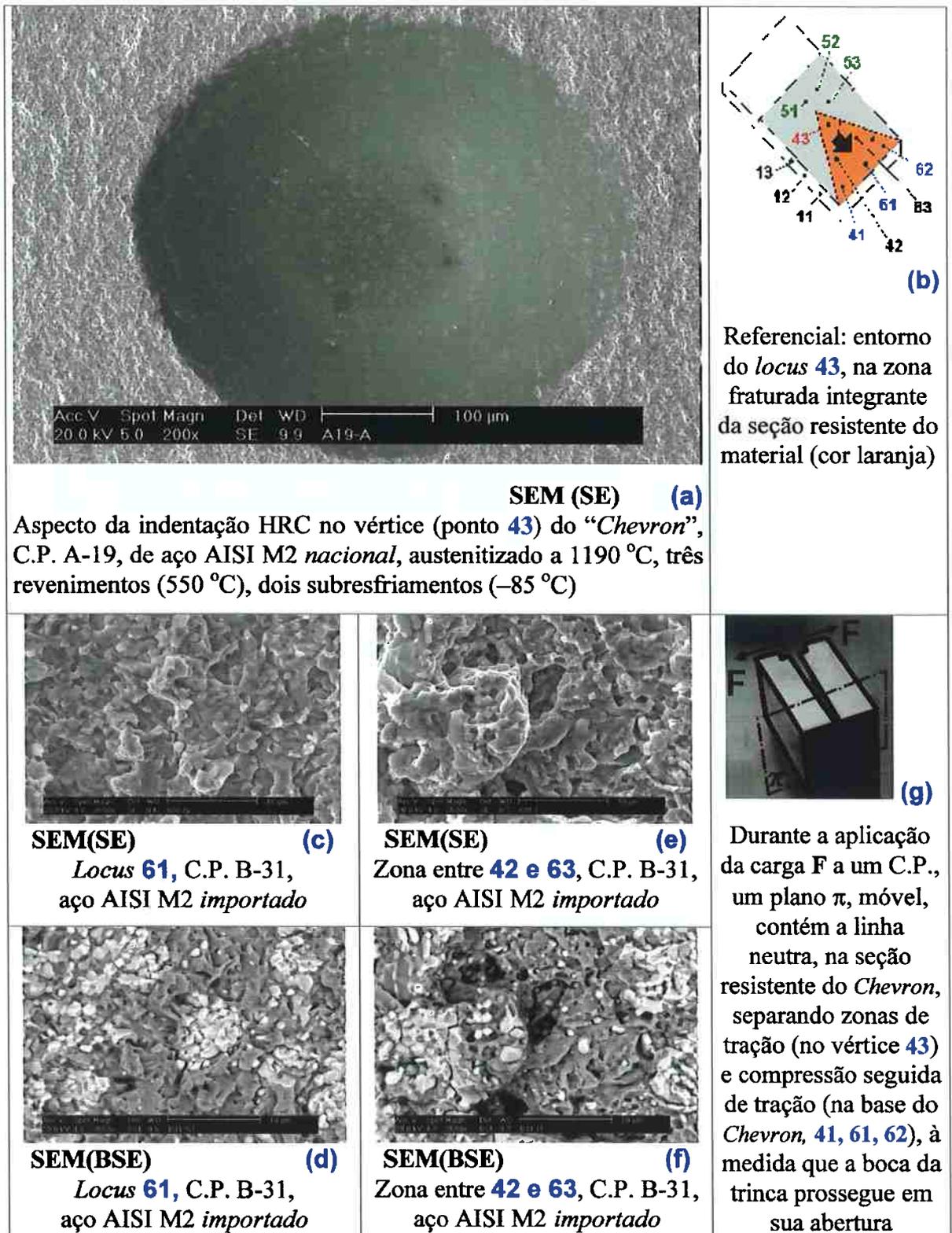
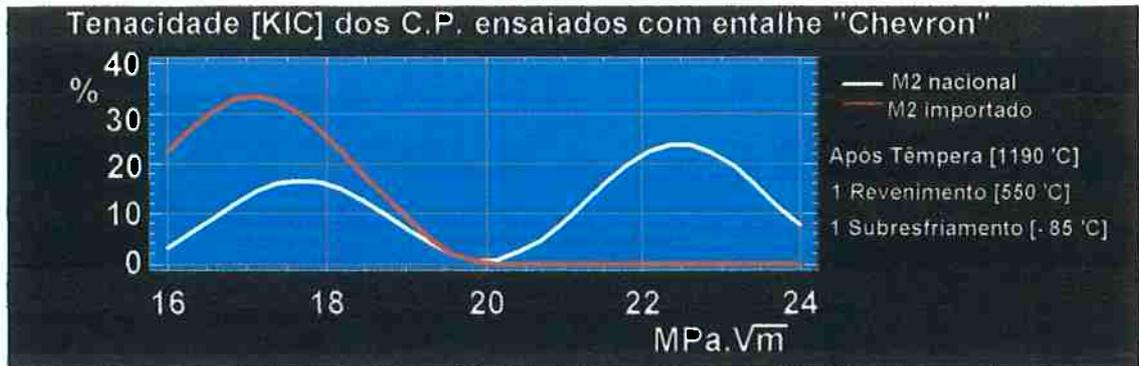


Figura 77. Morfologia da base do C.P. “Chevron” após fratura por ensaio de tenacidade e posterior indentação HRC (penetrador cônico-esférico de diamante, $E \approx 10^3$ GPa, $\alpha = 60^\circ$, carga de 150 kgf ou 1471 N, vide Figura 14, p. 35)



(a) Frequência de distribuição da Tenacidade à fratura



(b) Distribuição em quartis da Tenacidade à fratura



(c) Frequência de distribuição da Tenacidade à fratura



(d) Distribuição em quartis da Tenacidade à fratura

Figura 78. Tenacidade à fratura (KIC [MPa.m^{0.5}]) dos C.P. testemunhas segundo duas condições de tratamento térmico, após ensaio em C.P. "Chevron" novos

Tabela 31. Comparação da Tenacidade à fratura KIC [MPa√m] das testemunhas do Tratamento Térmico ensaiados como C.P. “Chevron” segundo a velocidade de carregamento

Têmpera (1190 °C), 1 ou 2 Revenimentos (550 °C) e um subresfriamento (-85 °C)
Matriz martensítica com presença de carbonetos não dissolvidos

	Velocidade de Carregamento 50 μm/min		Velocidade de Carregamento 200 μm/min	
	M2 Nacional	M2 importado	M2 Nacional	M2 importado
Número C.P.	5	5	5	5
Média (*)	18,4	20,0	21,8	17,6
Mediana (*)	17,8	21,2	22,3	17,5
Variância	1,43	4,67	4,26	2,11
Assimetria	0,8361	-0,4961	-1,7793	0,0929
Curtose	-0,5337	-1,4836	1,8362	-1,3009
KS(**)	0,9487		1,2649	
p	0,3313		0,0815	
Resultado da análise	Diferença não significativa entre as amostras (α = 5%)		Diferença não significativa entre as amostras (α = 5%)	

(*) [MPa√m]

(**) KS – Kolmogorov-Smirnov

Têmpera (1190 °C), 3 ou 4 Revenimentos (550 °C) e um subresfriamento (-85 °C)
Matriz martensítica com presença de carbonetos não dissolvidos

	Velocidade de Carregamento 50 μm/min		Velocidade de Carregamento 200 μm/min	
	M2 Nacional	M2 importado	M2 Nacional	M2 importado
Número C.P.	3	8	3	8
Média (*)	20,6	20,9	17,8	20,1
Mediana (*)	20,6	20,6	17,8	20,0
Variância	0,62	3,17	0,04	0,58
Assimetria	-	0,7107	-	-0,4902
Curtose	-	-0,2228	-	0,3830
KS (**)	0,5539		1,4771	
p	0,9188		0,0255	
Resultado da análise	Diferença não significativa entre as amostras (α = 5%)		Diferença significativa entre as amostras (α = 5%)	

(*) [MPa√m]

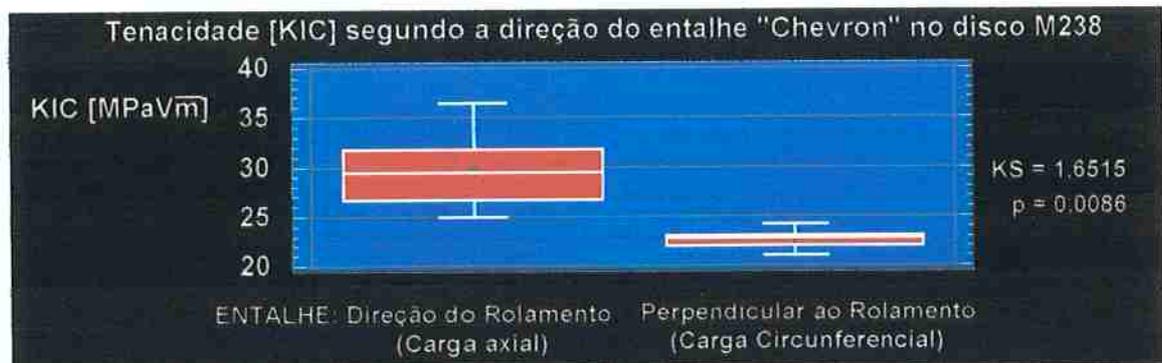
(**) KS – Kolmogorov-Smirnov

Referências para visualização: Disco M238, Figura 56, p. 112 e Figura 59, p.116



A uma velocidade de carregamento $V = 200 \mu\text{m}/\text{minuto}$, desses dois grupos de amostras extraídas do disco M238 *há diferença estatística significativa entre médias* (Hipótese estatística H_0 : Tenacidade média da Amostra 1 = Tenacidade média da Amostra 2, variâncias sem diferença estatística, $p = 0,0109$) e *medianas* ($p = 0,0321$), enquanto *não há diferença estatística entre os desvios padrões* ($p = 0,4585$) dos valores de tenacidade à fratura dos C.P. com entalhe Chevron.

(a)



A uma velocidade de carregamento $V = 200 \mu\text{m}/\text{minuto}$, desses dois grupos de amostras extraídas do disco M238 *há diferença estatística significativa entre médias* (Hipótese estatística H_0 : Tenacidade média da Amostra 1 = Tenacidade média da Amostra 2, variâncias com diferença estatística, $p = 0,0070$) e *medianas* ($p = 0,0081$), bem como *há diferença estatística entre os desvios padrões* ($p = 0,0330$) dos valores de tenacidade à fratura dessas amostras de C.P. com entalhe Chevron.

(b)

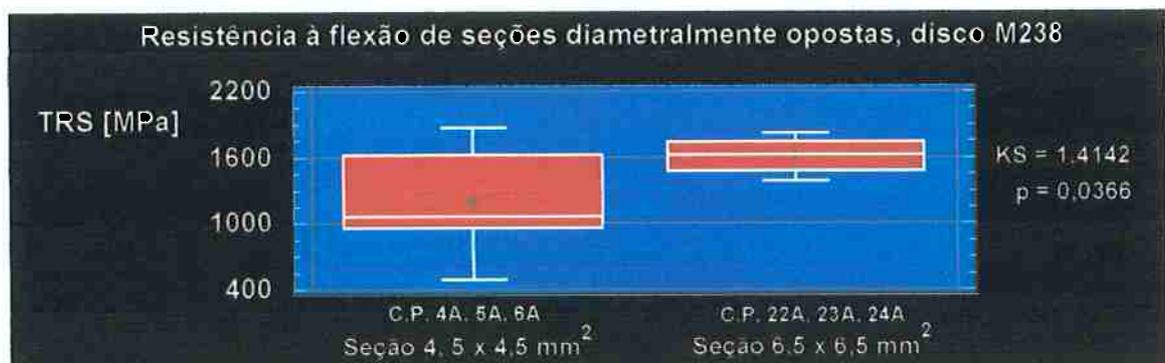
Figura 79. Distribuição em quartis da tenacidade à fratura em ensaios "Chevron" de C.P. extraídos do disco de aço AISI M2 importado, após ensaio de rolamento M238 e sua diferença entre as amostras de acordo com (a) a localização angular dos C.P. no disco e (b) com a direção de abertura do entalhe no C.P.

Referências para visualização: Disco M238, Figura 56, p. 112 e Figura 59, p.116



A uma velocidade de carregamento $V = 200 \mu\text{m}/\text{minuto}$, desses dois grupos de amostras extraídas do disco M238 *não há diferença estatística significativa entre médias* (Hipótese estatística H_0 : Tenacidade média da Amostra 1 = Tenacidade média da Amostra 2, variâncias com diferença estatística, $p = 0,1815$) e é refutada a hipótese de que a *mediana 1 é menor que a mediana 2* ($p = 0,0922$), enquanto *há diferença estatística entre os desvios padrões* ($p = 0,0018$) das amostras de resistência à flexão dos C.P. com diferentes rigidezes (seções transversais de $4,5 \times 4,5 \text{ mm}^2$, vigas P2A, P3A, P4A, P5A e P6A, e $6,5 \times 6,5 \text{ mm}^2$, vigas P12A, P13A, P22A, P23A e P24A).

(a)



A uma velocidade de carregamento $V = 200 \mu\text{m}/\text{minuto}$, desses dois grupos de amostras extraídas do disco M238 *há diferença estatística significativa entre médias* (Hipótese estatística H_0 : Tenacidade média da Amostra 1 = Tenacidade média da Amostra 2, variâncias com diferença estatística, $p = 0,0249$); *a mediana 1 é significativamente menor que a mediana 2* ($p = 0,0318$), e *há diferença estatística entre os desvios padrões* ($p = 0,0105$) da tenacidade à fratura dessas amostras de C.P. com entalhe “Chevron”.

(b)

Figura 80. Distribuição em quartis da resistência à ruptura da seção transversal (TRS) obtida por ensaio de flexão três pontos de C.P. extraídos do disco de aço AISI M2 importado, após ensaio de rolamento M238 e sua diferença entre as amostras de acordo com (a) seção transversal (e rigidez) das vigas ensaiadas e (b) idem, de C.P. subsuperficiais diametralmente opostos no disco.

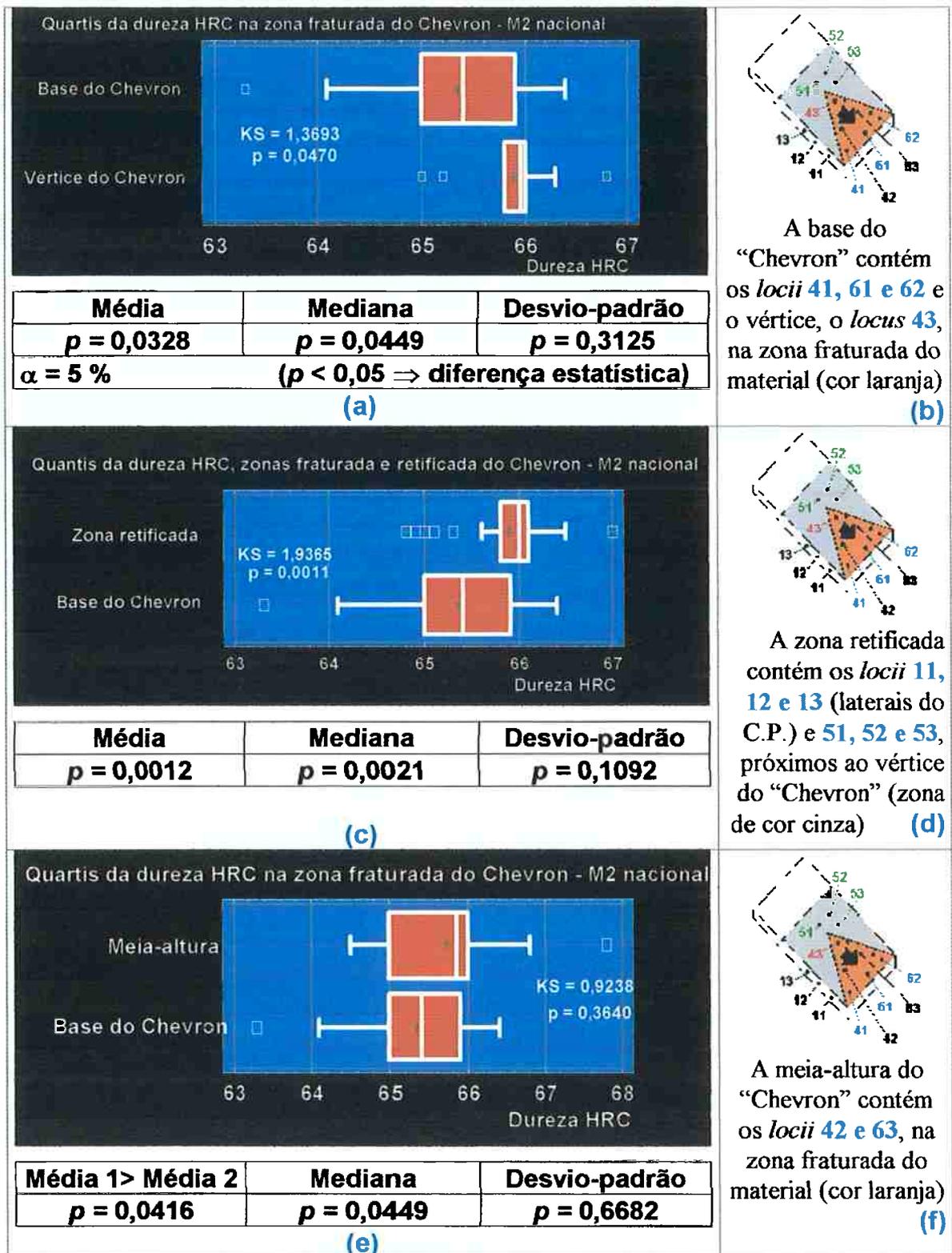


Figura 81. Distribuição em quartis da dureza HRC em diversos pontos da superfície fraturada e da superfície íntegra retificada dos C.P. “Chevron” fabricados por retificação a partir das testemunhas de aço AISI M2 nacional e ensaiados a uma velocidade de 200 $\mu\text{m}/\text{minuto}$

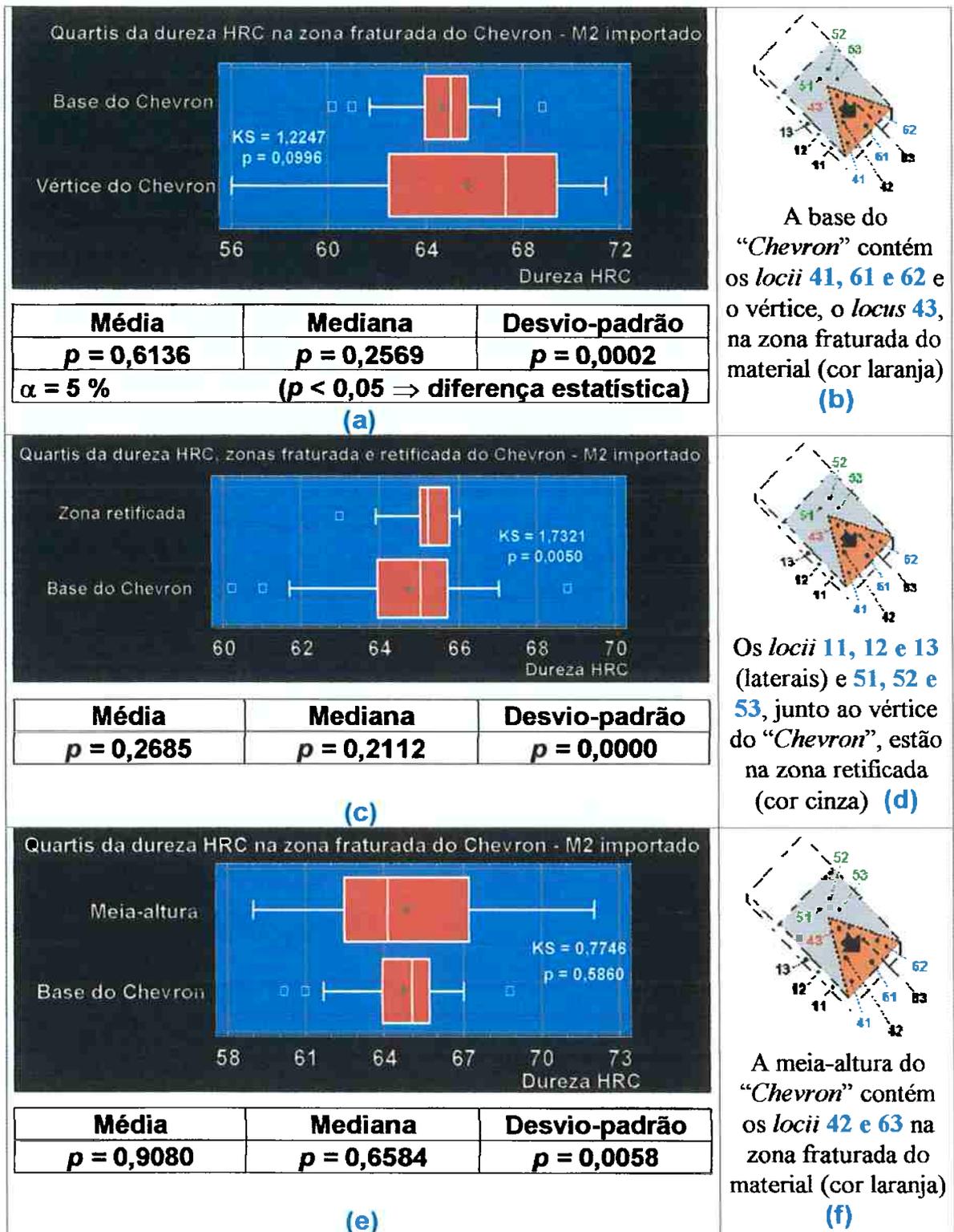


Figura 82. Distribuição em quartis da dureza HRC em diversas zonas da superfície fraturada e da superfície íntegra retificada dos C.P. “Chevron” fabricados por retificação a partir das testemunhas de aço AISI M2 importado e ensaiados a uma velocidade de 200 $\mu\text{m}/\text{minuto}$

4.3.2. Evidências ou gênese de mecanismos de desgaste em discos rolantes sob carga mecânica e/ou térmica

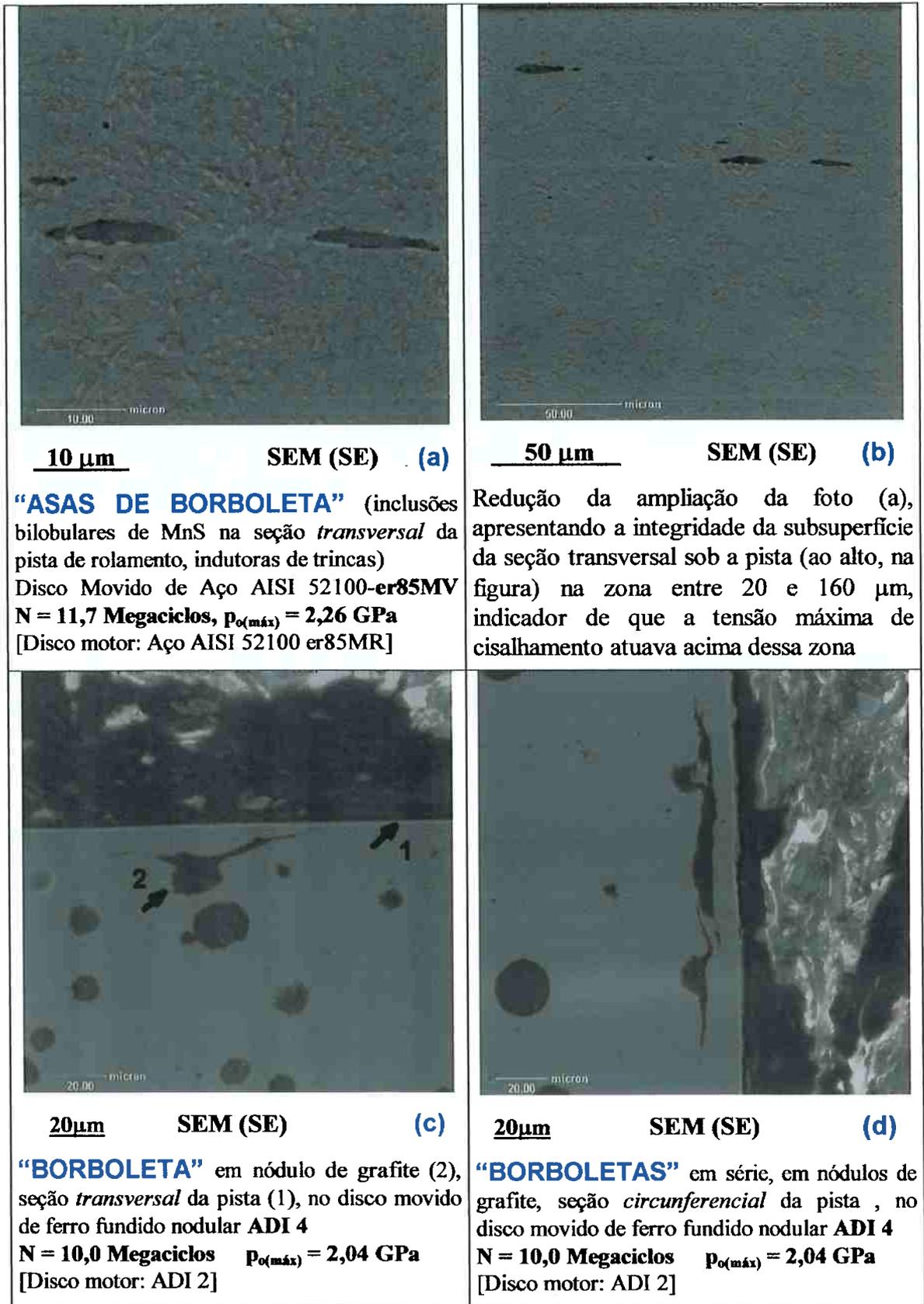


Figura 83. Borboleta em formação (a, b) e firmando dano por fadiga de contato (c, d)

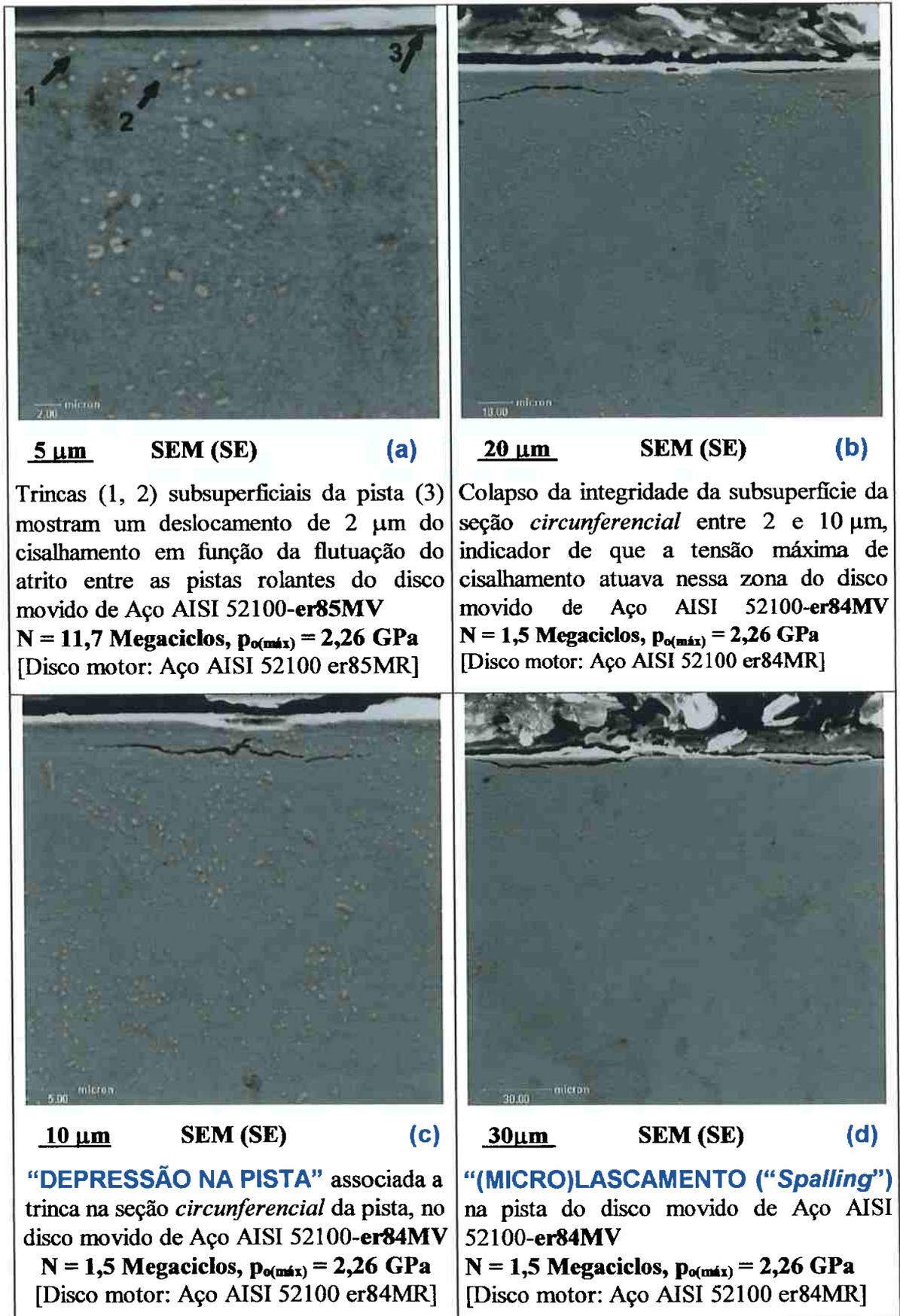
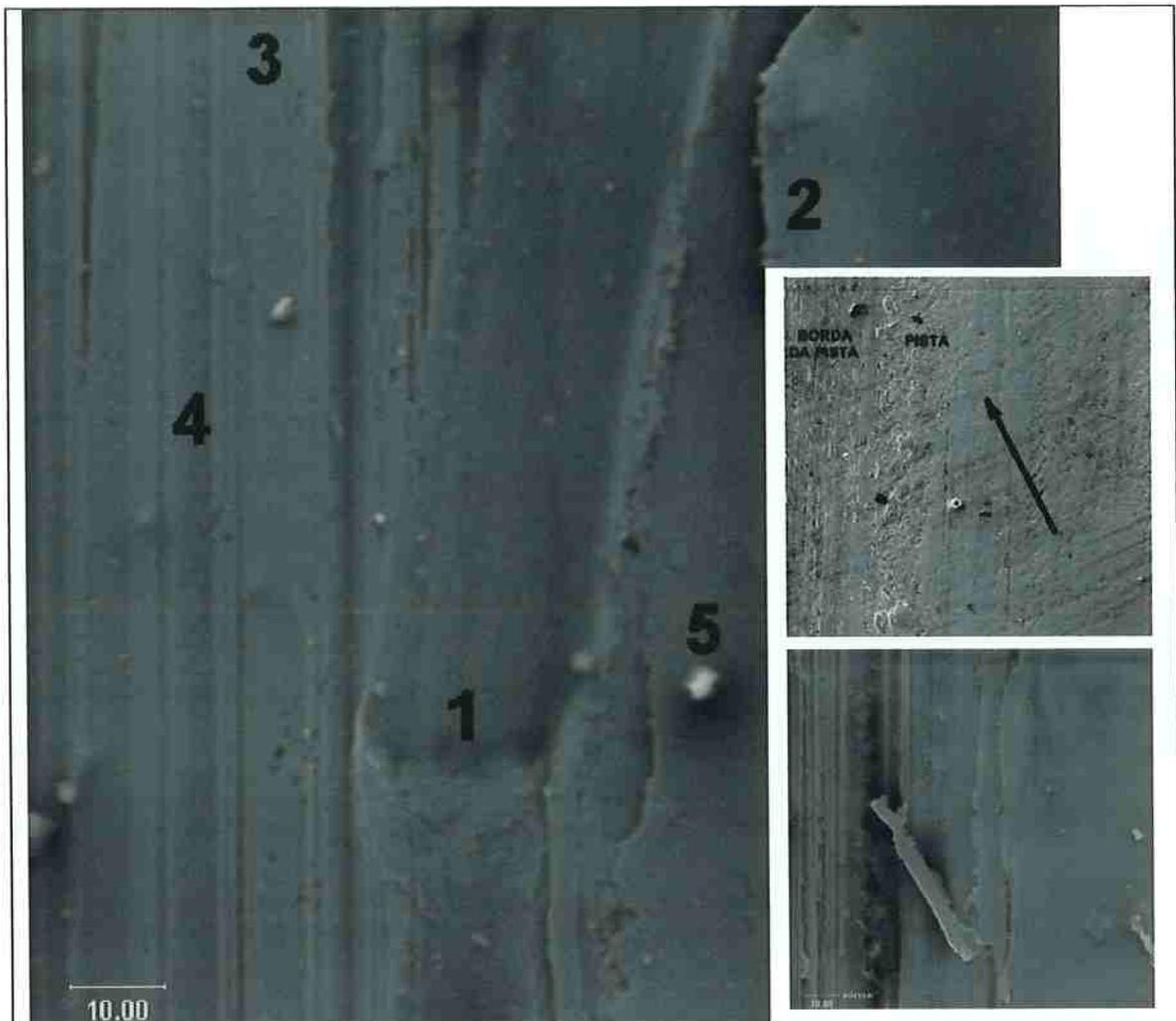


Figura 84. Morfologia de danos em pistas desgastadas após ensaios disco-disco

10 μm

SEM (SE)

“MECANISMO DE FORMAÇÃO DE PROA” (1) promovido pela compressão local, arrastamento de um *terceiro corpo* e cisalhamento da pista de menor resistência, acumulando-se material à sua frente e lateral. Admite-se que a proa apresentada se deveu a um cavaco, 20 μm de comprimento, desprendido da matriz. No detalhe superior, a seta indica a trajetória de partícula(s) expulsa(s) na pista rumo à borda oposta e, no inferior, partícula sendo expelida da pista, em uma ação conjunta da pressão de contato, resposta do material e velocidade dos discos. O rastro da partícula formou o ângulo de saída mostrado, com aproximadamente 10° em relação à direção circunferencial de rolamento. Nesse caminho, produziu a microdeformação plástica apresentada, produzindo uma sobrecarga termomecânica local na zona de contato (2), até atingir a borda do contato, na zona esférica original (3), onde se vêem sulcos verticais (4) paralelos entre si, oriundos da usinagem da superfície de contato esférica por retificação do perfil. A inclusão (5) indentada na pista, caracterizada por SEM-EDS como uma partícula de SiO_2 , talvez deveu-se a desprendimento do rebolo abrasivo durante a fabricação da pista.

Disco motor de Aço AISI 52100-er81MR SBQT

$N = 11,9$ Megaciclos, $p_{o(\text{máx})} = 2,77$ GPa

[Disco movido: Aço AISI 52100 er81MV OQT]

Figura 85. Morfologia de mecanismo de formação de proa em contato de rolamento cíclico em superfícies esféricas de aço 52100 – aço 52100

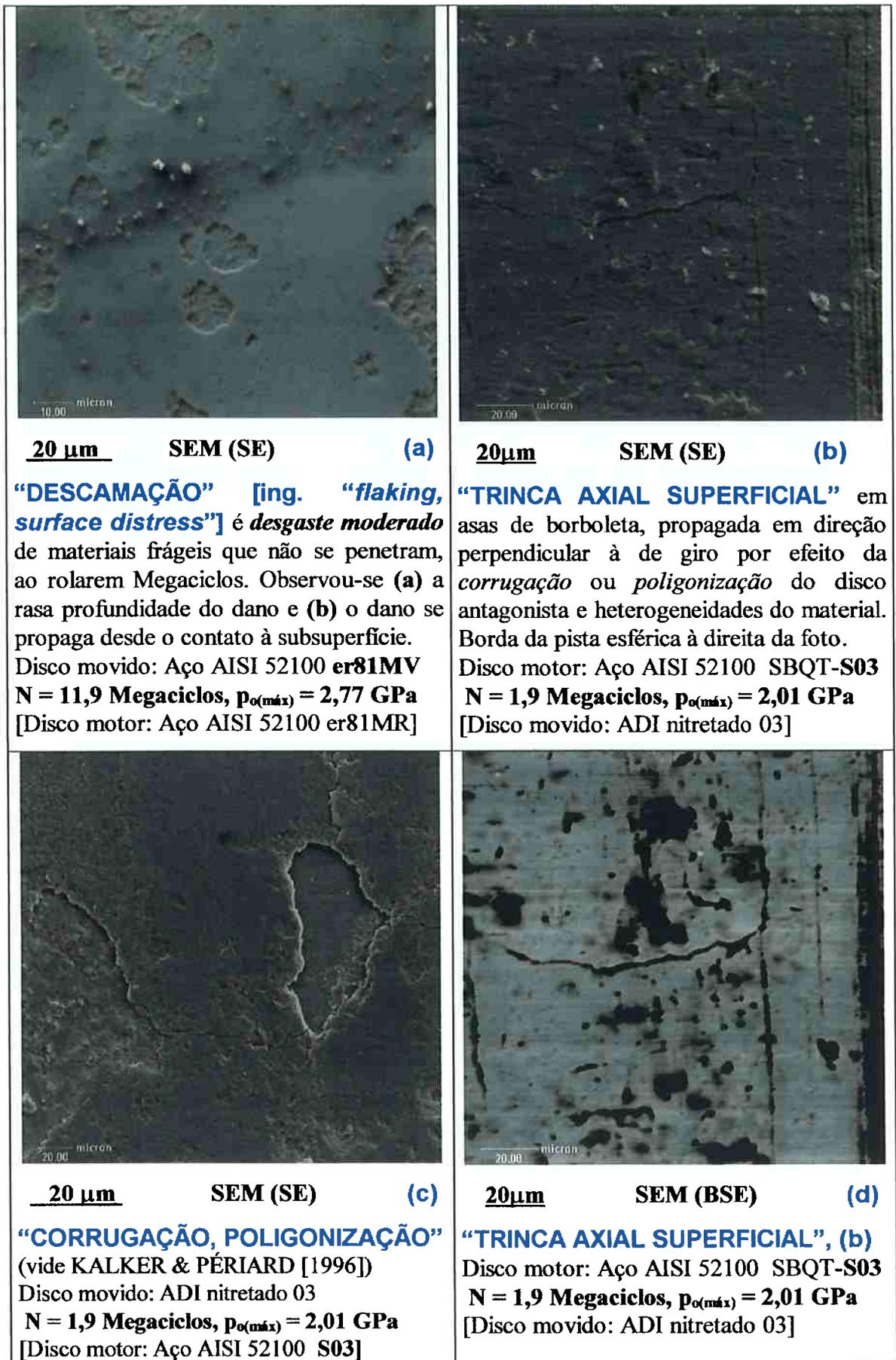


Figura 86. Danos em ADI e aço após ensaios disco-disco

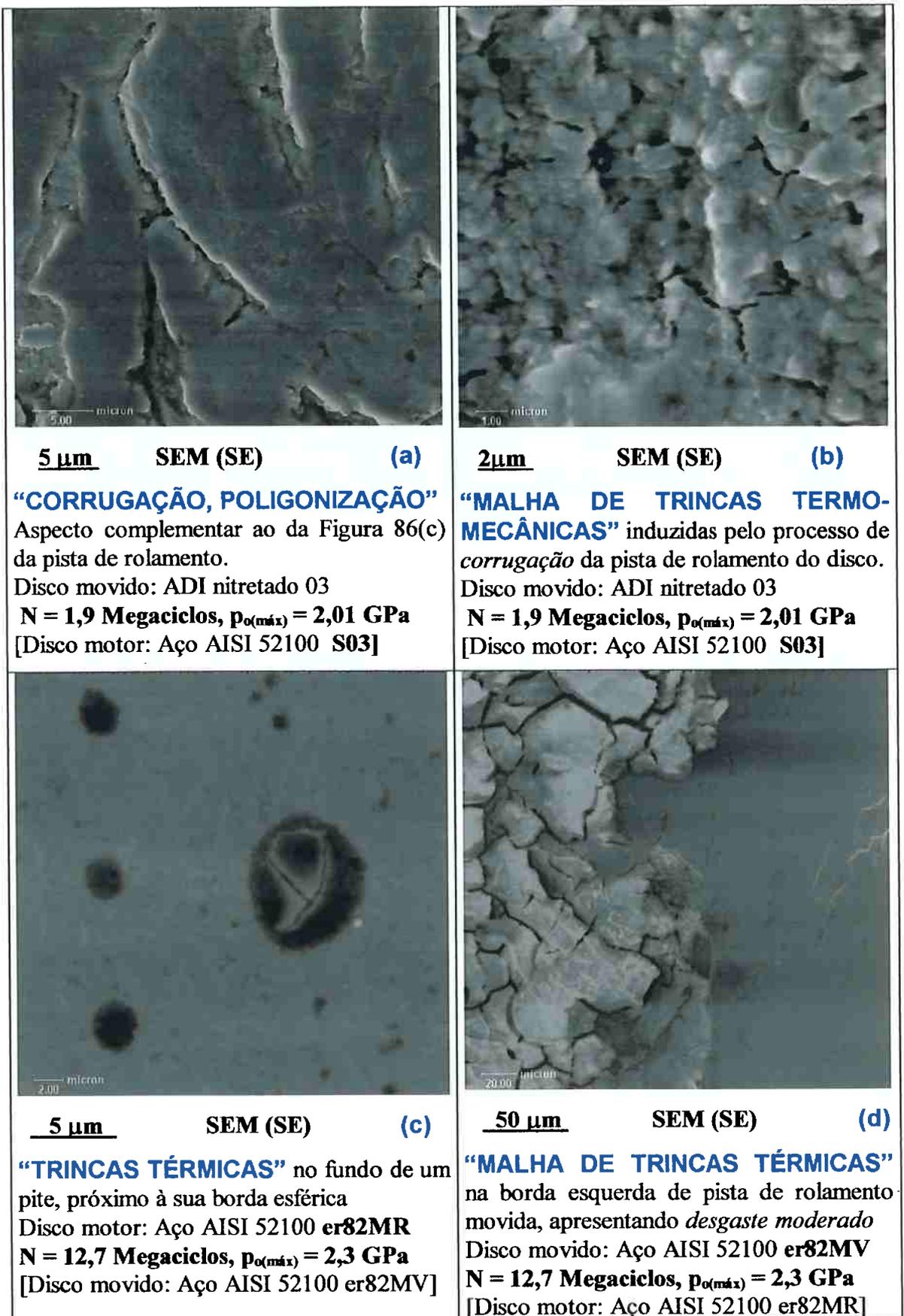


Figura 87. Danos em pistas desgastadas após ensaios disco-disco e de ciclagem térmica

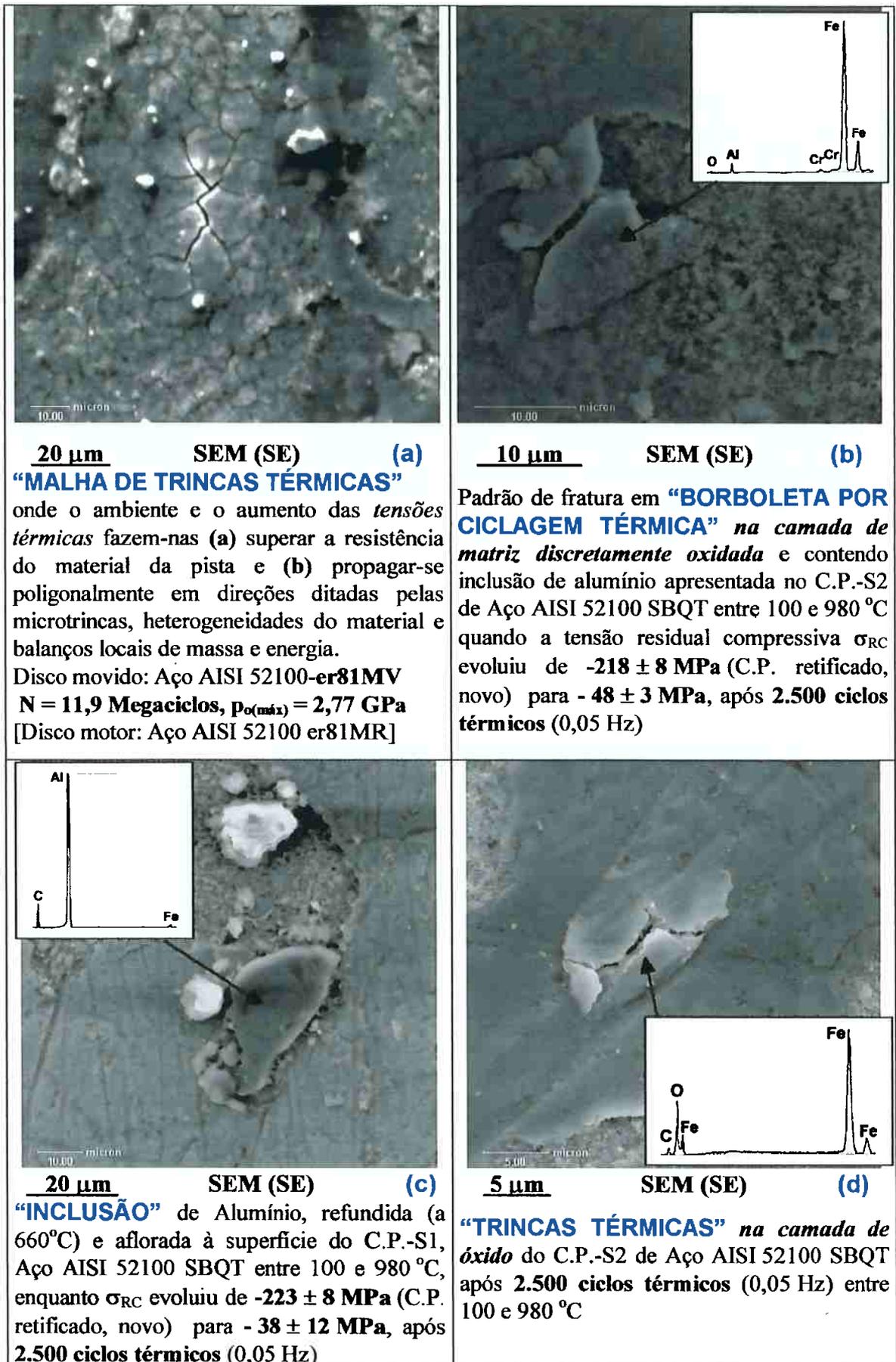


Figura 88. Danos em aço após ensaios disco-disco (a, b) e ciclagem térmica (c, d)

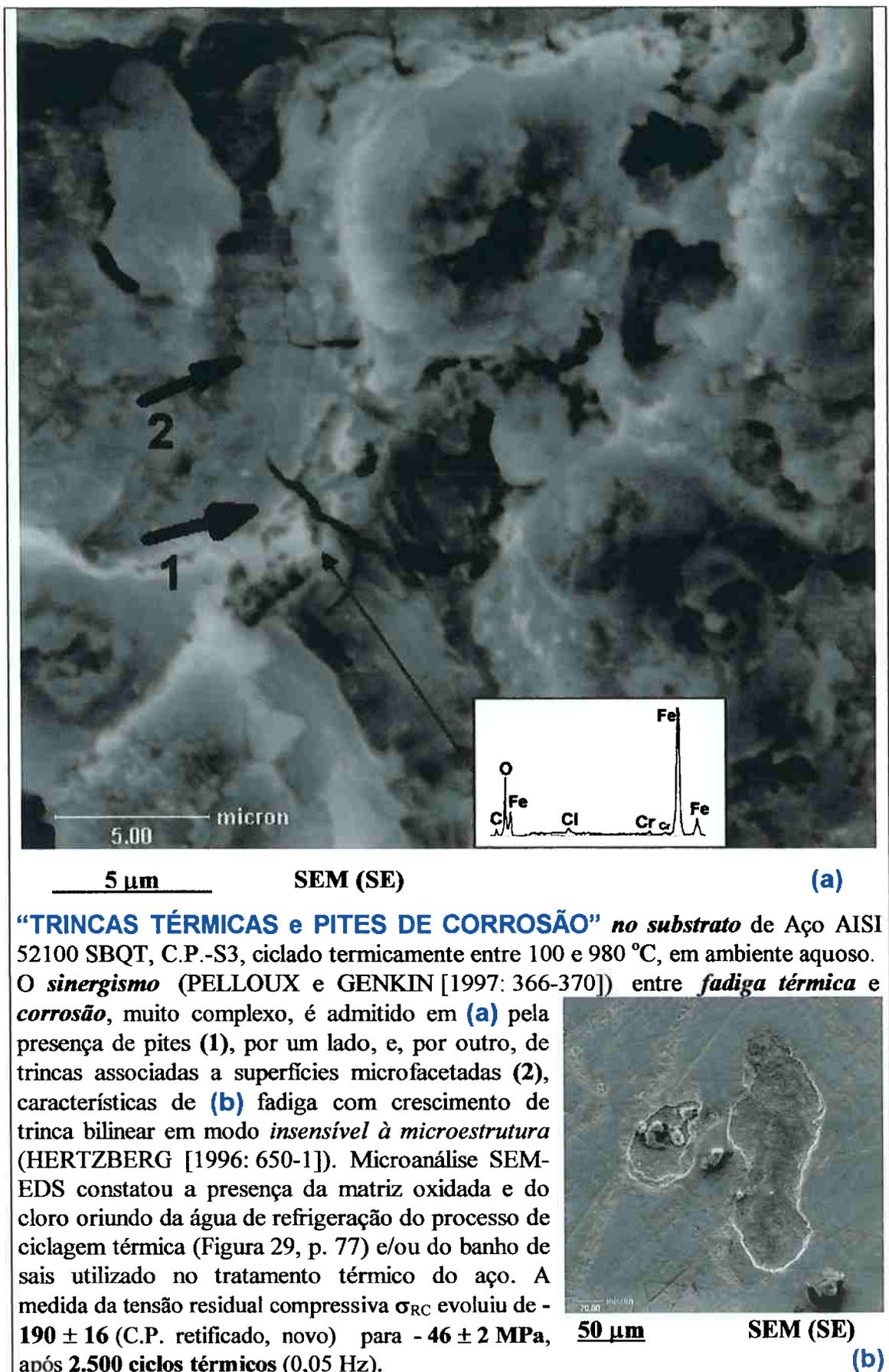


Figura 89. Danos em pistas desgastadas após ensaios disco-disco e de ciclagem térmica

Figura 90. “ADERÊNCIA” de material à pista, ao longo dos ciclos de contato de rolamento, por ação tribológica da pressão, temperatura e propriedades das pistas e, possivelmente, fusão de terceiro corpo durante a sua expulsão da zona de contato

Disco movido: Aço AISI 52100 er81MV

N = 11,9 Megaciclos,

$P_{o(máx)} = 2,77 \text{ GPa}$

[Disco motor: Aço AISI 52100 er81MR]

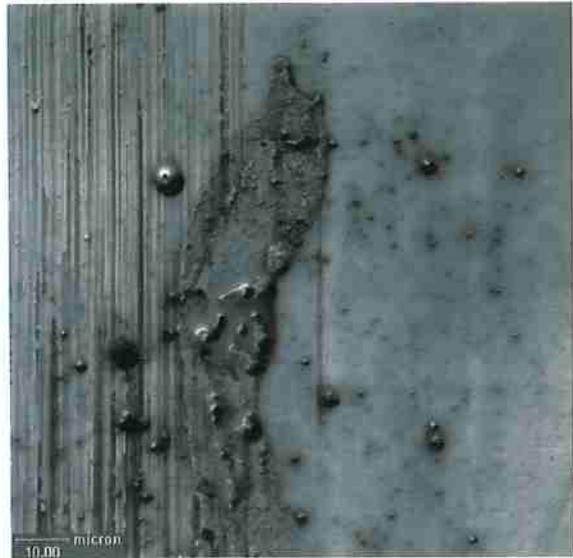


Figura 91. “CORRUGAÇÃO” ou *poligonização* na superfície movida de ferro fundido nodular austemperado (ADI 17) nitretado, enquanto o disco motor de aço (S02-SBQT) apresenta, na parte inferior da pista, evidências de desgaste abrasivo e de *ondulações minúsculas e sucessivas* denotando zona de “**TREPIDAÇÃO**” (“*chatter*” [ing.]) próxima à borda da pista

N = 0,07 Megaciclos

$P_{o(máx)} = 2,61 \text{ GPa}$

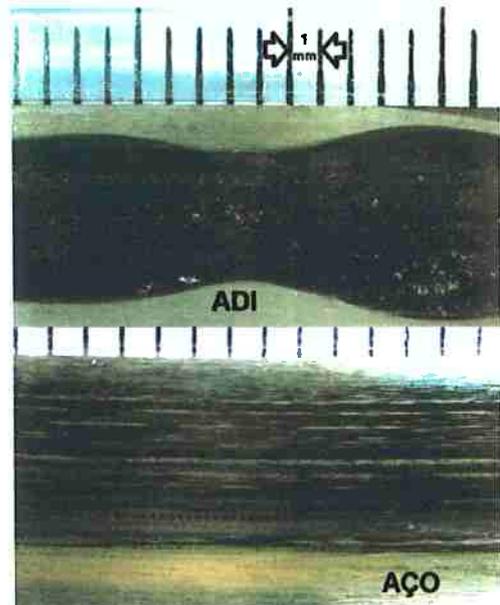
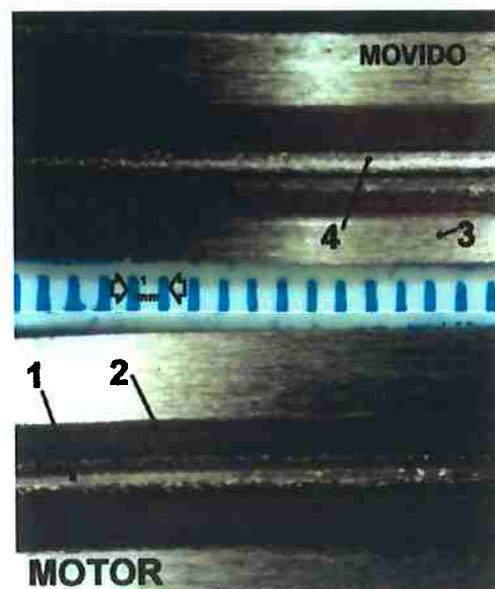


Figura 92. “DESGASTE ABRASIVO” nos discos ADI 19 (motor) e ADI 20 (movido), não nitretados: 1, 4. evidências de desgaste abrasivo no centro das pistas de rolamento; 2. filme de óxido na pista de rolamento; 3. borda da pista esférica, não submetida ao contato entre as pistas

N = 0,49 Megaciclos

$P_{o(máx)} = 2,22 \text{ GPa}$





1 mm

Lupa, 10 X

“SCUFFING”

Em parte da literatura, esse regime de desgaste é reportado ao contato metálico *lubrificado* entre sólidos sob deslizamento que, na ausência total ou parcial de um filme lubrificante, desenvolve desgaste concentrado, espacial, temporal e termicamente, atribuído às altas pressões de Hertz e elevados coeficientes de atrito locais (HUTCHINGS [1991: 108]). Esse dano localizado é reconhecido por ZUM GAHR [1987: 385] em contatos de deslizamento e é causado por “deformação plástica e adesão”. Entretanto, WILLIAMS [1996: 430] reconhece o dano por “*scuffing*” em sistemas rolantes e o atribui à compatibilidade entre as características elásticas dos sólidos em contato e à combinação da pressão, viscosidade e efeitos hidrodinâmicos do fluido lubrificante.

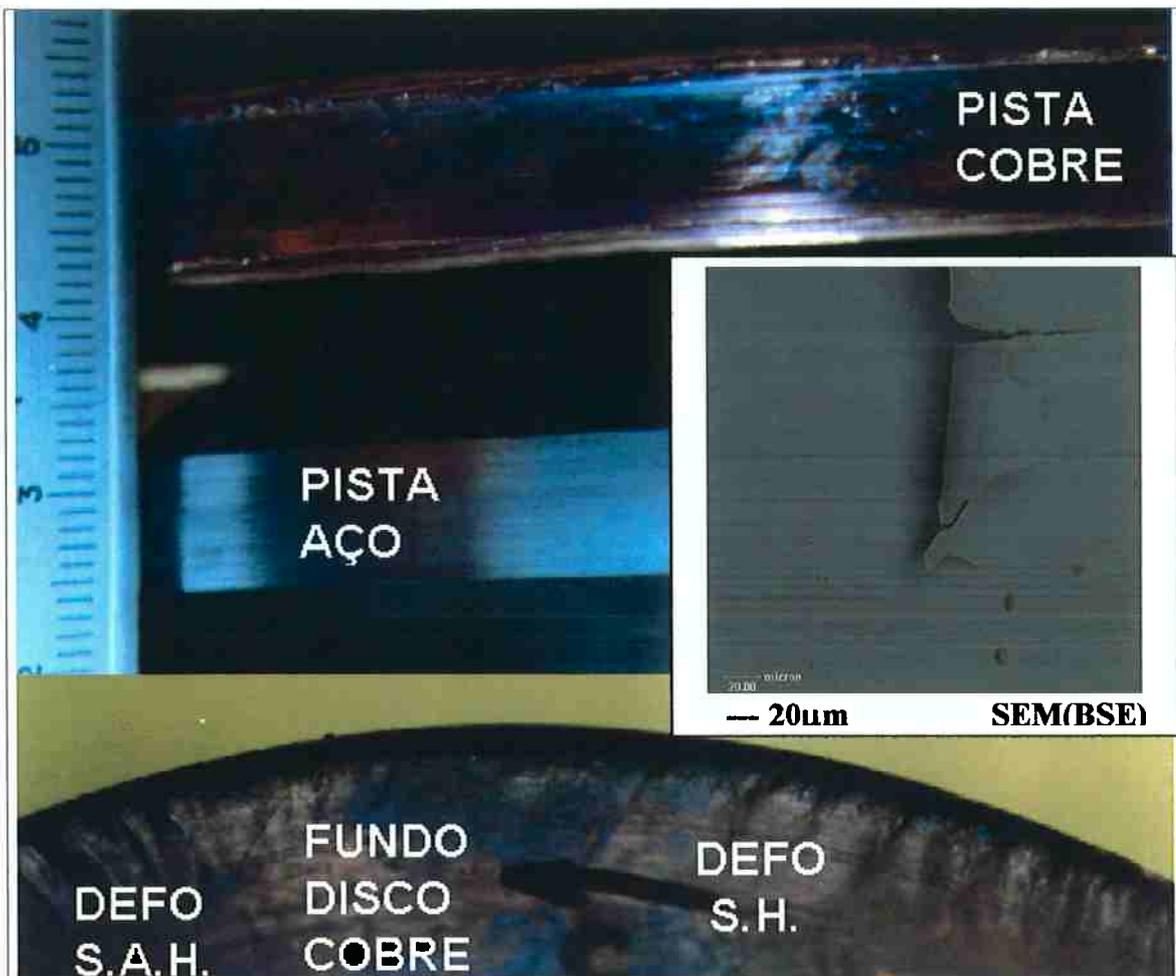
A foto apresenta uma, dentre evidências de “*scuffing*” em algumas pistas ensaiadas sob rolamento cíclico seco integrantes desta investigação, quando, sob rotação e carga constantes em uma faixa de $\pm 5\%$: (a) a taxa de NPS/ciclo elevou-se a valores monotonicamente crescentes e superiores a 2 dB/kilociclo ; (b) a temperatura do contato elevou-se a taxas superiores a $1,8 \text{ K/kilociclo}$; (c) a energia elástica de vibração do contato, embora não quantificada, perceptivelmente foi sendo incrementada crescentemente.

Disco motor: Aço AISI 52100 SBQT S02

$N = 70,0 \text{ kilociclos}$, $p_{o(\text{máx})} = 2,61 \text{ GPa}$

[Disco movido: Ferro fundido nodular nitretado ADI-19]

Figura 93. Aspecto de desgaste por “*scuffing*” em um sistema de rolamento cíclico



“DELAMINAÇÃO”

Mecanismo mostrado na pista de cobre. *As tensões residuais* nas deformações cujos sentidos são, na foto, anti-horário (S.A.H.), horário (S.H.) e misto (S.H. e S.A.H.) nas pistas de cobre, e as de aço novas e cicladas *apresentaram os valores seguintes:*

<i>Locus</i>	σ_R [MPa](neg)	Desvio(MPa)	σ_R [MPa](pos)	Desvio(MPa)	σ_R méd[MPa]
Cobre: nova	42	±29	-31	±28	6±28
Defo S.H.	-49	±28	-56	±18	-52±24
Defo.S.A.H	-44	±22	-75	±17	-60±20
Defo mista	-47	±39	-53	±21	-50±31
Aço: Nova	-21	±27	-245	±13	-133±21
Aço:Ciclado	-80	±73	-259	±28	-170±55

SUH [1973] atribui a delaminação às baixas velocidades de deslizamento e à deformação plástica por cisalhamento do material na superfície, que pode ser acompanhado por adesão entre asperezas. HUTCHINGS [1992: 93] destaca a atuação da tensão máxima de cisalhamento τ no contato cíclico, e sua associação ao coeficiente de atrito local que, se superior a 0,3, poderá acumular deformações plásticas consideráveis na superfície.

$N_{Cobre} = 0,78$ Megaciclos, $N_{Aço} = 0,88$ Megaciclos, $p_{o(máx)} = 1,24 - 1,76$ GPa

Disco motor: Cobre C03, diâmetro 160,00 mm

[Disco movido: Aço AISI 52100 SBQT ER82], diâmetro 141,00 mm

Figura 94. Delaminação em pista de cobre, aspecto do antagonista e tensões residuais

4.4. Evolução do desgaste e variação de parâmetros de Análise de Superfície em ensaios de aços AISI M2 versus AISI 52100

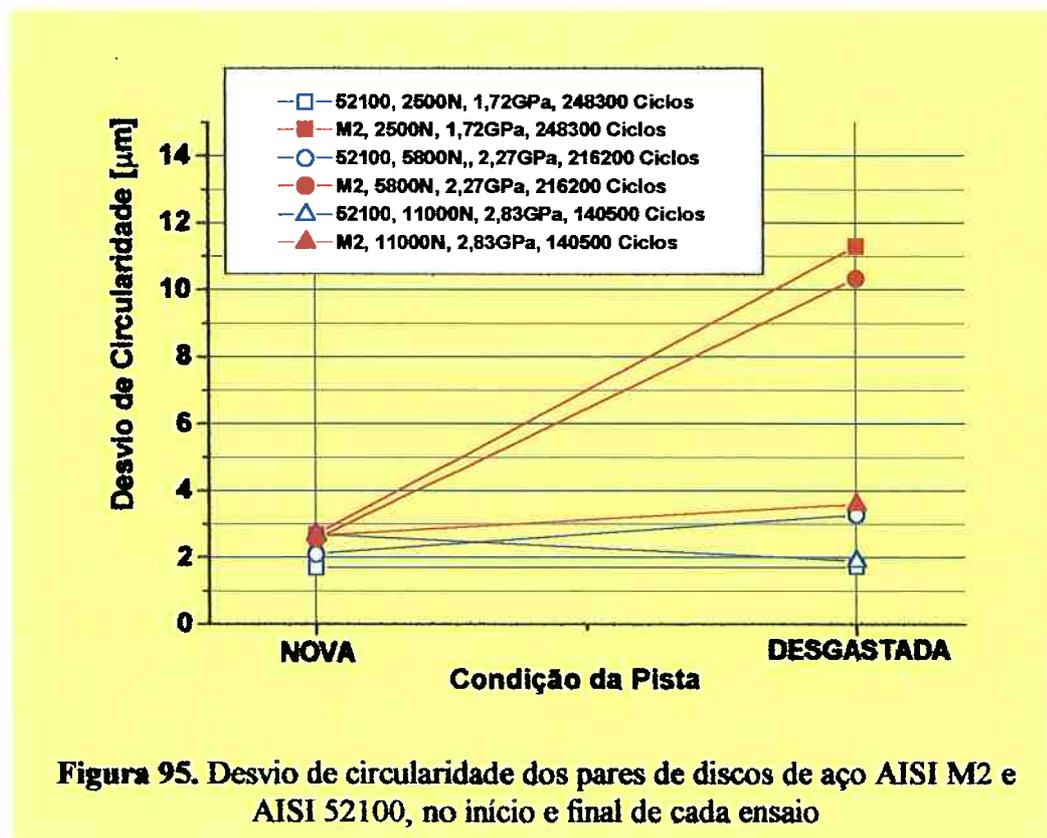
“O Saara era um espetáculo tão vivo quanto o mar. A coloração das dumas mudava ao longo das horas, e segundo a inclinação da luz ...da areia à rocha, os materiais variavam tanto quanto as nuances; sinuosas ou duras, suas formas modulavam interminavelmente a falsa monotonia do erg. De longe em longe palpitava uma miragem de reflexos metálicos, fixava-se, volatilizava-se; simuns elevavam-se, solitários, rodopiavam furiosamente sobre si mesmos, sem abalar a imobilidade do mundo.”

BEAUVOIR, Simone [1908-1986] *A força das coisas*. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1995. p. 186.

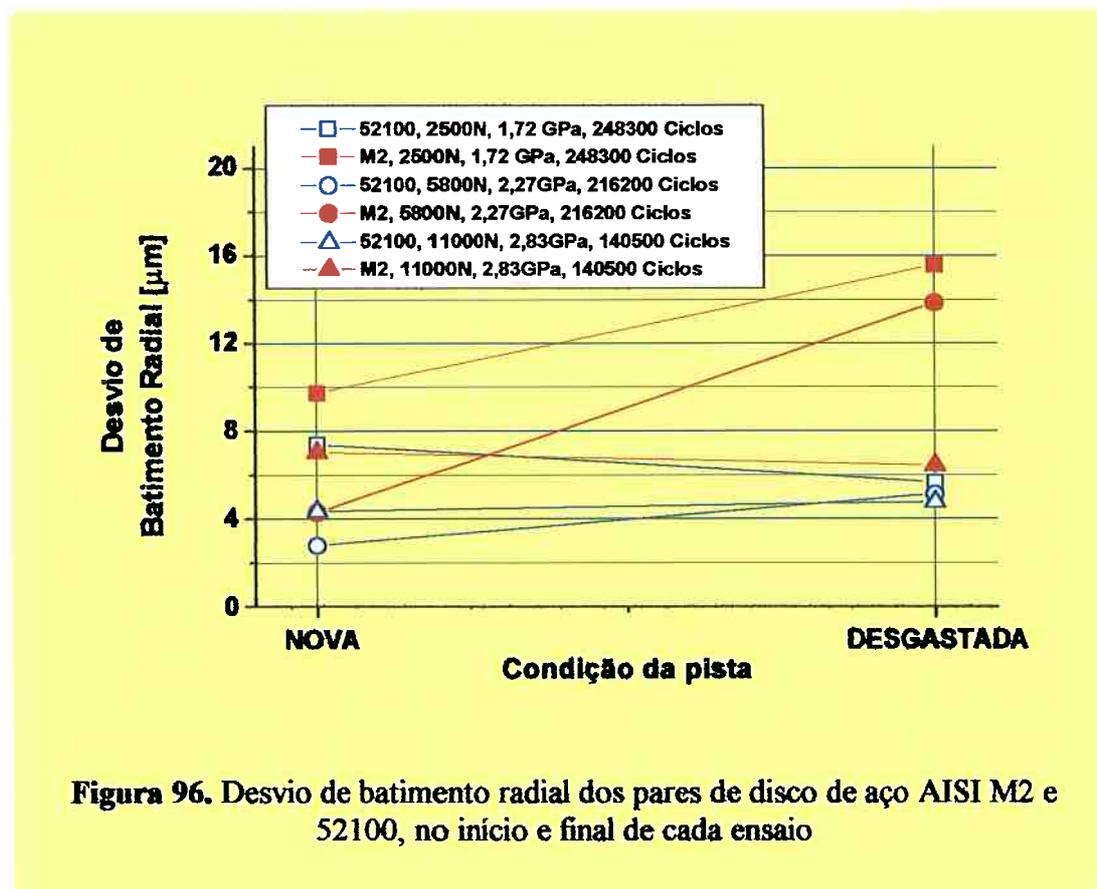
4.4.1. Desvios de circularidade e batimento radial

As medidas dos desvios de circularidade e batimento radial relativos a três pares de discos de aço AISI M2 e AISI 52100 são apresentadas nas Figuras 95 e 96 e dizem respeito aos discos novos e após ensaios efetuados à velocidade de $37,5 \pm 0,5$ m/s e três faixas de cargas normais utilizadas, 2500 N, 5800 N e 11000 N, com pressões máximas nominais de Hertz associadas de 1,72 GPa, 2,27 GPa e 2,83 GPa, respectivamente.

Depreende-se, da leitura da Figura 95, que os desvios de circularidade dos discos de aço-ferramenta M2, sob pressões nominais de Hertz de 1,72 e 2,27 GPa, apresentaram uma variação de cerca de três vezes, quadruplicando o seu valor absoluto



inicial para superfície nova, enquanto essa variação foi insignificante sob pressão nominal de 2,83 GPa. Essa mesma tendência repetiu-se em relação aos desvios de batimento radial dos discos de aço AISI M2, Figura 96.



Ao nível da variação da pressão de contato nos níveis citados, 65%, houve variações inferiores a 40% dos respectivos valores de desvios de circularidade e batimento radial dos discos de aço AISI 52100.

4.4.2. Parâmetros híbridos Rk

O comportamento dos parâmetros híbridos da família **Rk** é apresentado nas Figuras 97 e 98, para os pares de contato constituídos por discos de aço AISI M2 e AISI 52100, respectivamente, motor e movido.

O parâmetro de avaliação de superfície **Rk**, que mede a variação da rugosidade no cerne do contato, em seu apoio efetivo, esboçado na Figura 97, mostrou-se sensível à condição de pressão máxima de Hertz de 2,27 GPa, quando aumentou o seu valor em

duas vezes, triplicando o seu valor absoluto na superfície da pista de rolamento motora do disco de aço M2, enquanto a respectiva pista movida de aço AISI 52100 variou, para maior, apenas em torno de 60%.

Nas condições inferior e superior de pressão nominal de Hertz, para ambos os materiais, aços AISI M2 e 52100, as superfícies das pistas na condição nova apresentaram valores de R_k maiores do que na condição desgastada.

A altura reduzida dos picos e vales, medida pelos parâmetro híbridos R_{pk} e R_{vk} , respectivamente, é apresentada nos dois gráficos da Figura 98. Percebe-se que há uma maior sensibilidade à medida de ambos os parâmetros na resposta propiciada pelo aço AISI M2, no ensaio sob pressão máxima Hertziana de 2,27 GPa. Sob essa condição solicitante, o aço AISI 52100 mostrou-se mais sensível ao parâmetro R_{vk} , isto é, a rugosidade de seus vales foram afetadas efetivamente pelo contato cíclico de rolamento, enquanto a rugosidade dos seus picos, nessa e nas demais condições solicitantes,

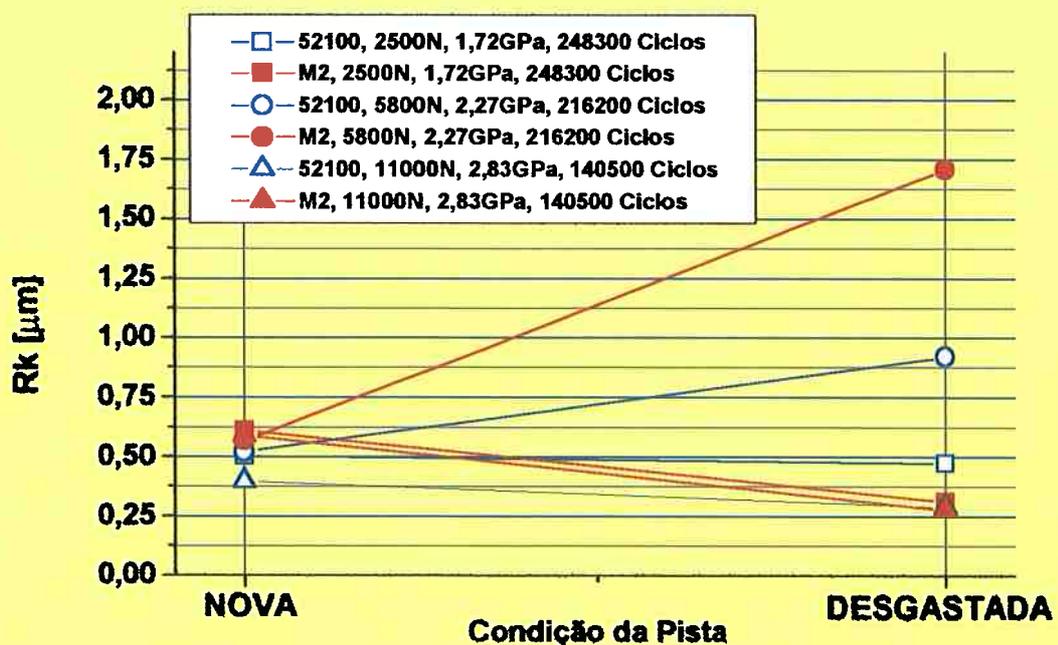


Figura 97. Parâmetro híbrido R_k de análise de superfícies dos pares de disco de aço AISI M2 e 52100, no início e final de cada ensaio

demonstrou uma variação pequena, ora para mais, ora para menos – contribuindo para desfazer alguns mitos entre os estudiosos de avaliação metrológica de superfícies desgastadas.

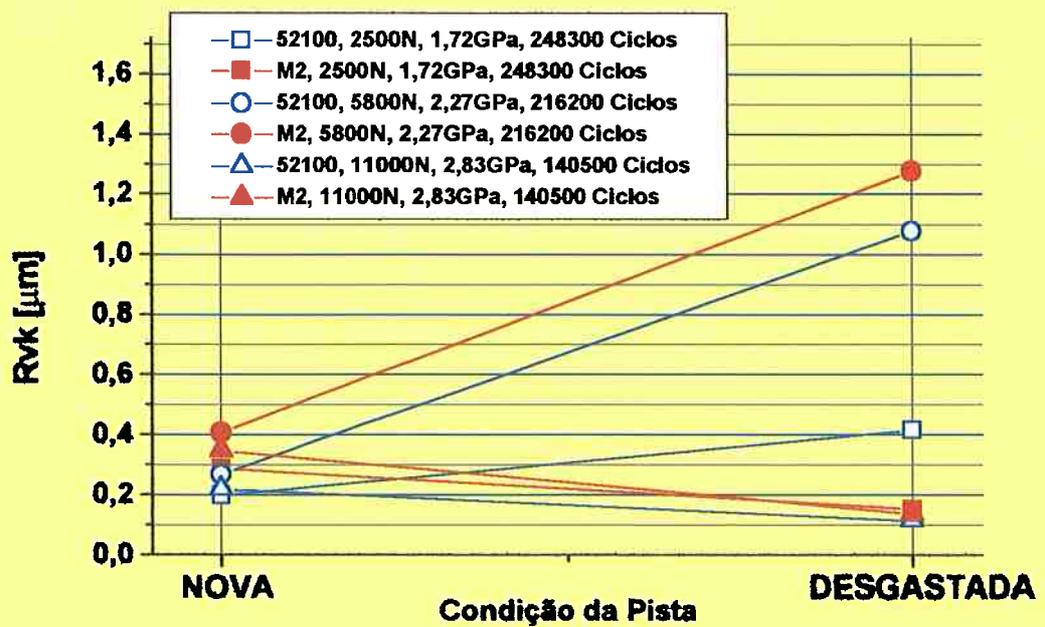
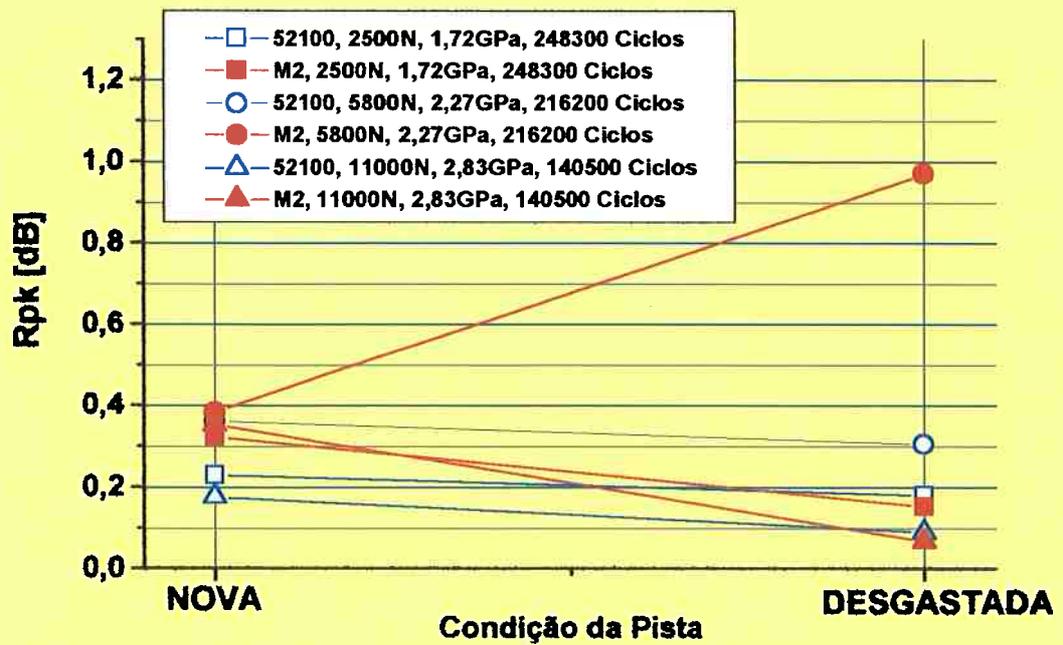


Figura 98. Parâmetros híbridos **Rpk** e **Rvk** de análise de superfícies dos pares de disco de aço AISI M2 e 52100, no início e final de cada ensaio

4.5. Variação da carga normal e resposta do nível de pressão sonora [dB] em ensaios ADI-ADI e aço AISI 52100-ADI

“... dijo don Quijote: - Inadvertidos hemos andado en no habernos proveído de algún esquilón pequeño que fuera atado junto a mí en esta mesma sogá, con cuyo sonido se entienda que todavía bajaba y estaba vivo; pero pues ya no es posible, a la mano de Dios, que me guíe...”

CERVANTES, Miguel de [1547-1616] *Don Quijote de La Mancha*. Barcelona, Instituto Cervantes, 1998. Segunda parte, Capítulo XXII, p. 815.

Apresenta-se, a seguir, de forma gráfica, a história acústica audível em três momentos da vida de um contato de rolamento cíclico, apresentada em janelas temporais do nível de pressão sonora (NPS), medido em dB, a uma taxa de aquisição do sinal de 1 Hz, ou seja, uma medida por segundo.

Cada conjunto de três gráficos dispostos em uma mesma linha diz respeito, portanto, em níveis nominais, à mesma pressão máxima de Hertz, a qual cresce, nos gráficos em linha, subseqüentemente para baixo. Teoricamente, a tensão máxima de cisalhamento $\tau_{\text{máx}}$ atuante no material, predita pela teoria de Hertz, equivale a cerca de um terço do valor da pressão Hertziana tabulada (JOHNSON [1989, p.427-8]).

Desta forma, ao se ler os gráficos apresentados pelas Figuras 99 e 100, por princípio deve-se ter em consideração **(a)** essa ordem de grandeza para $\tau_{\text{máx}}$, **(b)** o caráter cíclico da solitação do material e sua resistência ao cisalhamento sob cargas cíclicas mecânicas e térmicas decorrentes do contato entre as pistas de rolamento.

As janelas temporais apresentam dez minutos de aquisição (600 medidas por janela) do sinal temporal do nível de pressão sonora (NPS [dB]).

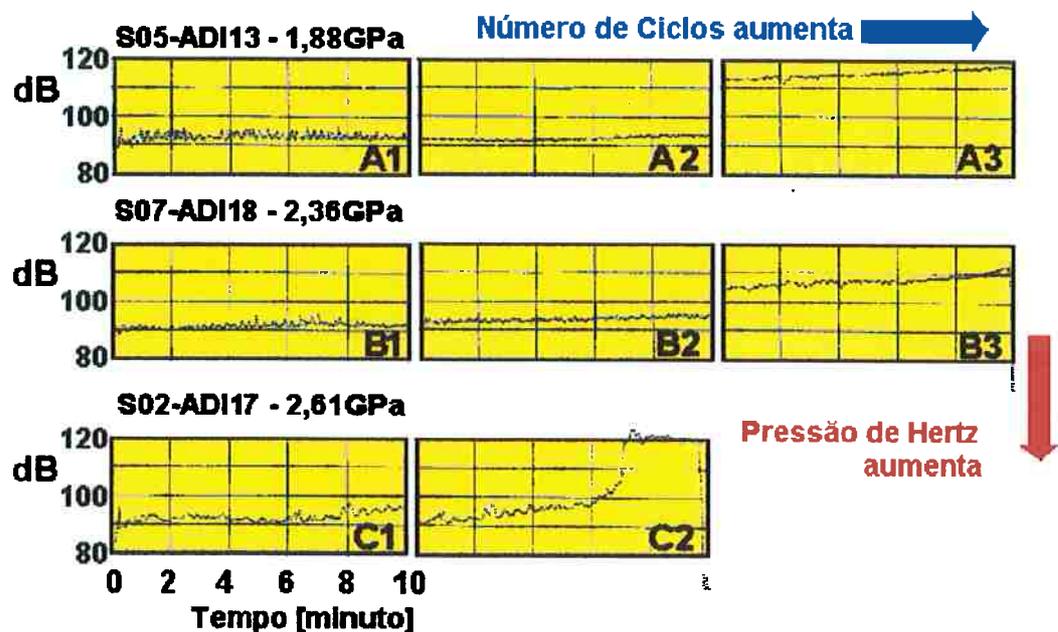
Dentro de uma mesma linha, o primeiro gráfico diz respeito à assinatura do NPS [dB] dos primeiros dez minutos de ensaio, que a cultura mecânica popular batizou como período de “amacramento” (“*Running-in*”).

Nesta etapa, os desvios de forma iniciais, o filme fino resultante do processo de nitretação, as heterogeneidades elásticas das superfícies e subsuperfícies submetidas à zona de influência das tensões Hertzianas são solicitadas mecânica, térmica e quimicamente e, ao fazê-lo, geram óxidos, sofrem deformação plástica e/ou nucleiam microtrincas. As flutuações na amplitude do sinal associam-se a essas causas.

O segundo gráfico, dentro de uma mesma linha, contém uma janela da história acústica do contato em que as acomodações iniciais já haviam se processado e a trilha oxidada do contato desenvolvera-se na pista de rolamento. O terceiro gráfico relata os últimos dez minutos antes da parada comandada pelo sensor de vibração.

Apresentam-se os grupos de ensaios de dois materiais distintos como *primeiro corpo*: (a) aço AISI 52100 SBQT, ou seja, temperado em banho de sais e revenido e (b) ferro fundido nodular austemperado e nitretado, ADI. O material do disco *antagonista* utilizado em ambos os casos mostrados foi o ferro fundido nodular austemperado e nitretado, ADI. Os diâmetros dos discos são iguais a $152,00 \pm 0,05$ mm, ou seja, tem-se uma relação de transmissão de 1:1 entre o primeiro corpo e o disco antagonista.

4.5.1. Ensaios Aço AISI 52100 – Ferro fundido nodular austemperado e nitretado (ADI)



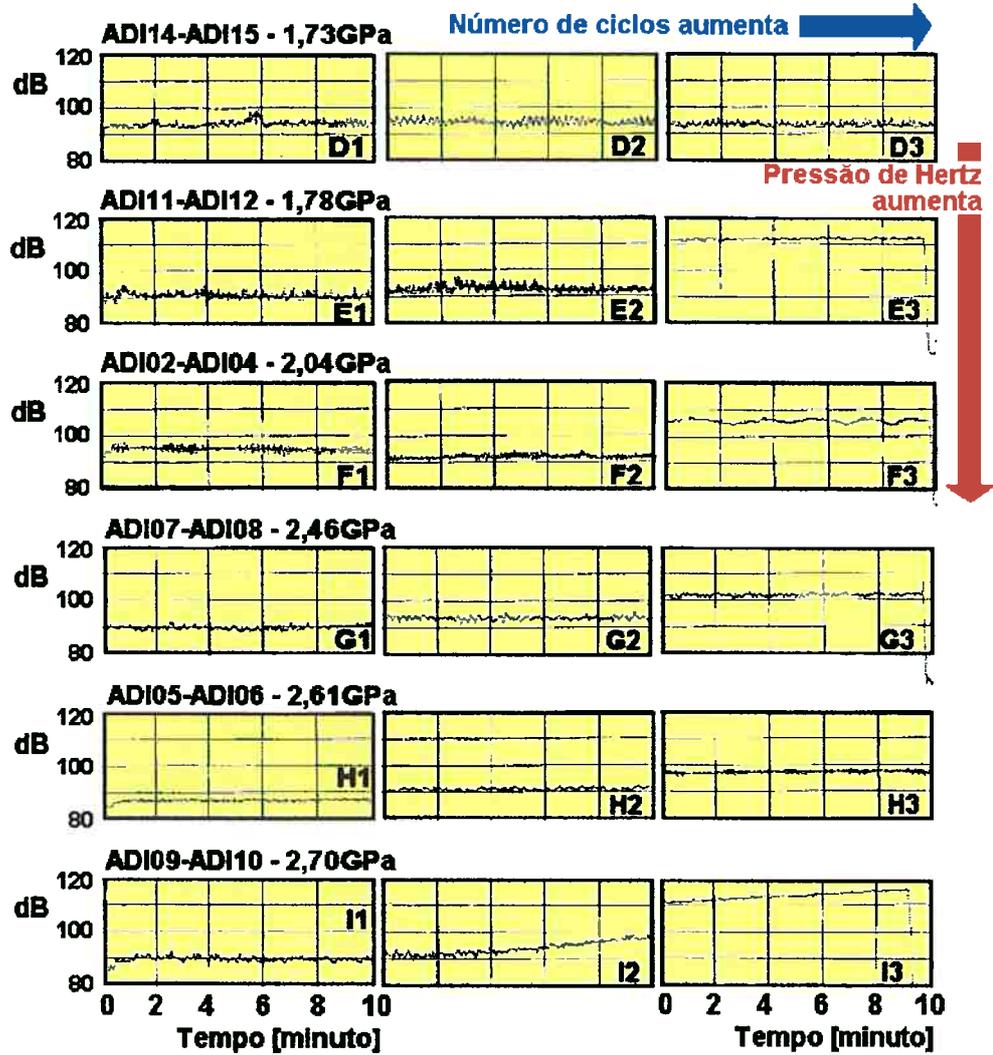
Vida [Megaciclos] da pista analisada na janela de dez minutos de NPS [dB]

Linha →	A	B	C
Coluna ↓	[5000rpm]	[5000rpm]	[5000rpm]
1	Janela de NPS [dB] inicial ("Running-in")		
2	0,13	0,13	0,70
3	0,88	0,37	-

Exemplo de leitura: Ensaio ADI 5 -ADI 13: a) Janela A1, sinal relativo ao "Running-in"; b) Janelas A2 e A3, sinais relativos às vidas de 0,13 e 0,88 Megaciclos, respectivamente

Figura 99. Aspecto de janelas temporais com dez minutos de aquisição (1Hz) do sinal temporal do nível de pressão sonora (NPS [dB]) em contatos de rolamento cujo primeiro corpo era Aço 52100 e o antagonista ferro fundido nodular austemperado e nitretado (ADI)

4.5.2. Ensaio Aço AISI 52100 – Ferro fundido nodular austemperado e nitretado (ADI)



Vida [Megaciclos] da pista analisada na janela de dez minutos de NPS [dB]

Linha →	D	E	F	G	H	I
Coluna ↓	[5000rpm]	[5000rpm]	[3000rpm]	[5000rpm]	[3000rpm]	[5000rpm]
1	Janela de NPS [dB] inicial ("Running-in")					
2	0,13	1,30	1,30	1,30	1,30	0,13
3	0,50	3,30	10,00	4,70	9,60	0,58

Exemplo de leitura: Ensaio ADI 14-ADI 15: a) Janela D1, sinal relativo ao início do rolamento [ing. "Running-in"]; b) Janelas D2 e D3, sinais relativos às vidas no entorno de 0,13 e 0,50 Megaciclos, respectivamente

Figura 100. Aspecto de janelas temporais com dez minutos de aquisição (1Hz) do sinal temporal do nível de pressão sonora (NPS[dB]) em contatos de rolamento ferro fundido nodular austemperado e nitretado (ADI) como primeiro corpo e antagonista (ADI-ADI)

4.6. Partículas desprendidas das pistas



O ideograma chinês à esquerda, “no sentido de trilhar, significa ‘pisar sobre algo’... O trilhar do fraco sobre o forte não é perigoso aqui, pois isso se dá em meio a uma alegria livre de arrogância, que faz com que o forte não se irrite, tudo aceitando de bom grado... O fraco segue a trilha do forte e o provoca. Mas o forte o aceita e não lhe causa nenhum mal, pois o contato se dá de forma alegre e inofensiva... O céu e o lago evidenciam uma diferença de altitude inerente à essência dos dois ...”

WILHELM, Richard [1956] *I Ging – Das Buch der Wandlungen*. Düsseldorf, Köln, Eugen Diedrichs Verlag. traduzido para o português sob o título *I Ching – O livro das mutações*. São Paulo, Editora Pensamento, 2000. p. 56-7.



O ideograma à direita “significa o que se deteriorou ... O significado do hexagrama não é simplesmente ‘o que se deteriorou’ e sim TRABALHO SOBRE O QUE SE DETERIOROU ... O que levou a esse estado de corrupção não foi um destino imutável ... mas sim o uso abusivo da liberdade.”

Idem, p. 76-7.

A coleta de partículas oriundas dos materiais das pistas de rolamento foi feita em papel sulfite fixado ao dispositivo instalado no gabinete disco-disco da máquina de ensaio mostrado na Figura 53, página 106. Na concepção original, pretendia-se coletá-las a cada intervalo de tempo, ou de ciclagem. Entretanto, da forma como foi concebido, o papel só poderia ser trocado desparafusando-se a tampa de fechamento do gabinete, exigindo a parada da máquina e o abaixamento da temperatura dos discos.

Os dois ideogramas chineses apresentados, concernentes a “trilhar” e a “o que se deteriorou”, foram considerados dois símbolos representativos do processo de gênese, formação e expulsão das partículas de desgaste da zona de contato. Aproveitou-se o sentido conceitual em que ambos os hexagramas foram reportados para se apresentar algumas dessas partículas e uma sinopse de dados considerados representativos da história do contato respectivo.

A Figura 101 expõe fotografias caracterizando a morfologia e dimensão de algumas partículas, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, provenientes de ensaios dos pares Cobre-Aço 52100, ADI-ADI, ADI-Aço M2 e Aço 52100-Aço 52100, informando-se, paralelamente, a vida do contato [Megaciclos], a pressão máxima de Hertz [GPa], a temperatura máxima de contato [K], a perda mássica do corpo e do antagonista, e o nível de pressão sonora máximo [dB].

Figura 101. Partículas desprendidas das pistas (“*debris*”) de rolamento durante os ensaios Cobre-Aço 52100, ADI-Aço 52100, ADI-Aço M2 e Aço 52100-Aço 52100

(a) Vida: 0,58 Megaciclos
 Pressão de Hertz: **1,57 GPa**
 Temperatura Máxima de Contato: **340K**
 Perda mássica – Cobre: 700 mg
 (antagonista) - Aço 52100: 30 mg
 Nível Pressão Sonora (max.): **105 dB**

(b) Vida: 0,23 Megaciclos
 Pressão de Hertz: **2,27 GPa**
 Temperatura Máxima de Contato: **372K**
 Perda mássica – Aço M2: 3 mg
 ADI: 290 mg
 Nível Pressão Sonora (max.): **111 dB**

(c) Vida: 16 Megaciclos
 Pressão de Hertz: **2,61 GPa**
 Temperatura Máxima de Contato: **450K**
 Perda mássica (corpo) ADI: 2.300 mg
 (antagonista) ADI: 760 mg
 Nível Pressão Sonora (max.): **100 dB**

(d) Vida: 11,6 Megaciclos
 Pressão de Hertz: **2,33 GPa**
 Temperatura Máxima de Contato: **848K**
 Perda mássica – Aço 52100: 40 mg
 Aço 52100: 80 mg
 Nível Pressão Sonora (max.): **120 dB**

(e) Vida: 10 Megaciclos
 Pressão de Hertz: **2,04 GPa**
 Temperatura Máxima de Contato: **345K**
 Perda mássica (corpo) ADI: 100 mg
 (antagonista) ADI: 190 mg
 Nível Pressão Sonora (max.): **106 dB**

(*) Temperatura ambiente considerada a 0 °C, para uniformização de dados

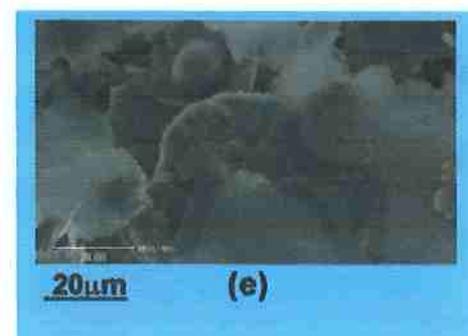
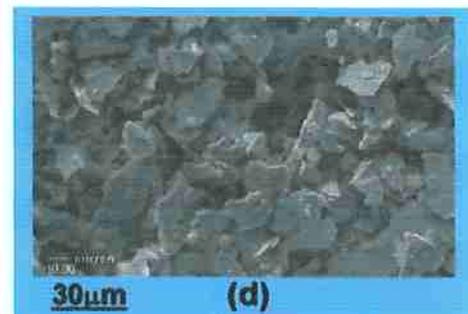
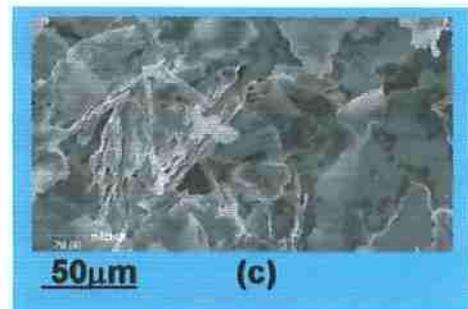
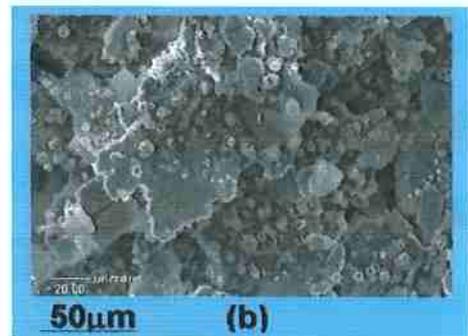
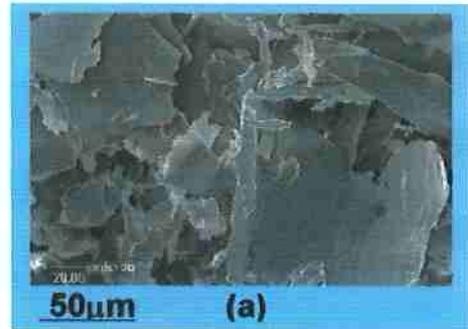


Figura 101. Partículas desprendidas das pistas (“*debris*”) de rolamento durante os ensaios [ADI-ADI, ADI-Aço 52100 e Aço 52100-Aço 52100] (continuação)

(f) Vida: 12,50 Megaciclos

Pressão de Hertz: **2,34 GPa**

Temperatura Máxima de Contato: **382K**

Perda mássica - Aço 52100: 130 mg

(antagonista) - Aço 52100: 160 mg

Nível Pressão Sonora (max.): **120 dB**

(g) Vida: 4,03 Megaciclos

Pressão de Hertz: **2,35 GPa**

Temperatura Máxima de Contato: **360K**

Perda mássica - Aço 52100: 90 mg

(antag. entalhado) - Aço 52100: 380 mg

Nível Pressão Sonora (max.): **104 dB**

(h) Vida: 16 Megaciclos

Pressão de Hertz: **2,61 GPa**

Temperatura Máxima de Contato: **450K**

Perda mássica: Aço 52100: 200 mg

(antagonista) Aço 52100: 260 mg

Nível Pressão Sonora (max.): **100 dB**

(i) Vida: 0,07 Megaciclos

Pressão de Hertz: **2,61 GPa**

Temperatura Máxima de Contato: **430K**

Perda mássica - Aço 52100: -10 mg

ADI: 20 mg

Nível Pressão Sonora (max.): **124 dB**

(j) Vida: 4,7 Megaciclos

Pressão de Hertz: **2,46 GPa**

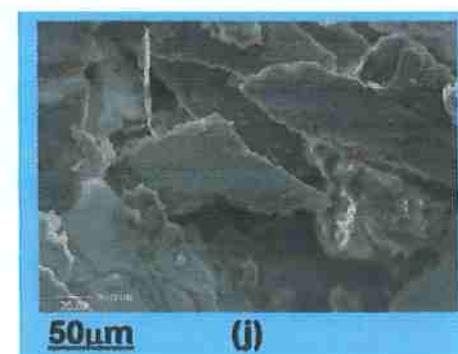
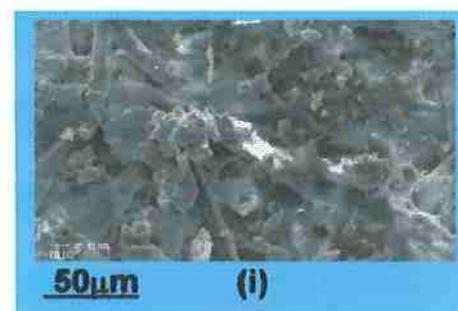
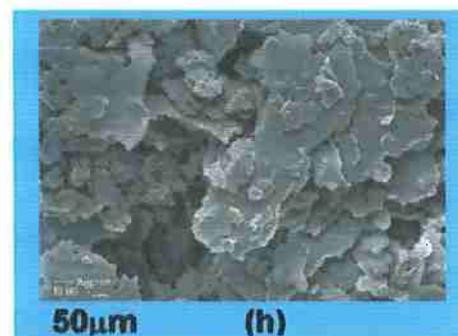
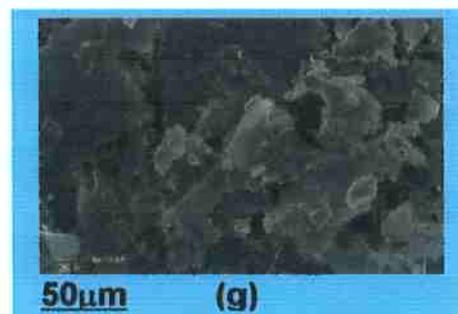
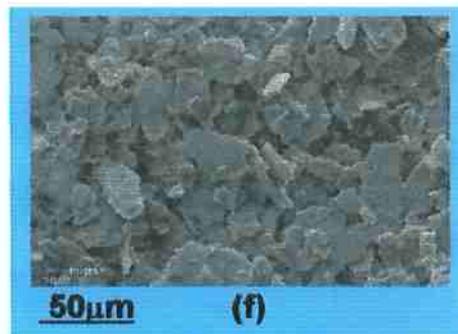
Temperatura Máxima de Contato: **475K**

Perda mássica (corpo) ADI: 1310 mg

(antagonista) ADI: 780 mg

Nível Pressão Sonora (max.): **100 dB**

(*) Temperatura ambiente considerada a 0 °C, para uniformização de dados



4.7. Sinopse das grandezas macroscópicas avaliadas nos ensaios de rolamento cíclico disco-disco

Apresenta-se, na Tabela 32, uma sinopse das medidas de carga normal [N], temperatura máxima de contato [K], faixa de pressão máxima de Hertz [GPa] utilizada e vida do contato [Megaciclos], segundo as paradas programadas e comandadas pelo sensor de vibração (“Trip Sensor”) integrante da máquina.

À medida que os ensaios de rolamento cíclico iam sendo realizados, algumas modificações foram surgindo relativamente ao planejado, por limitações do equipamento, desconhecimento da resposta do sistema tribológico, e/ou de custos.

Ao primeiro ensaio Cobre-Aço, por exemplo, houve uma queda do sistema de suprimento de energia elétrica da máquina disco-disco, ou seja, a potência de atrito demandada para acionamento do par de discos por fricção sobrecarregou-o, fazendo-o entrar em colapso e comandar o desligamento automático da rede, ao serem aplicadas a carga e velocidade programadas.

A resposta dinâmica do sistema tribológico para cargas da ordem de 1.500 N a 3.000 N e velocidades de 4.800 a 5.100 rpm, durante os ensaios dos discos com pistas esféricas de ferro fundido nodular austemperado e nitretado (ADI) e aço, ou ADI e ADI, mostrou-se *interferente* no comportamento do desgaste dos discos durante os ensaios, levando a pequenos ajustes nos valores do sensor de vibração (“Trip sensor”) da máquina de ensaio disco-disco.

As amplitudes de vibração nesses casos foram de tal monta que uma célula de carga configurada segundo a concepção “anel dinamométrico” que havia sido desenvolvida, aferida e instalada para medir a força tangencial, sofreu colapso em pelo menos uma das soldas dos contatos elétricos dos extensômetros em 100% dos ensaios, danificando assim o circuito em ponte de Wheatstone, sistematicamente, inutilizando suas medidas em processo.

Os custos foram a terceira – ou primeira – causa limitadora à série de ensaios disco-disco, extração de corpos-de-prova por eletroerosão a fio CNC, sob a forma de coroas circulares, vigas para ensaio de flexão e sólidos prismáticos para a preparação de corpos-de-prova para ensaios “Chevron” em que os momentos estatísticos das propriedades mecânicas pudessem ser avaliados de acordo com a evolução da ciclagem.

Apesar das dificuldades, normais em experimentação de Engenharia, os resultados obtidos permitiram satisfazer-se aos objetivos desta investigação.

Tabela 32. Sinopse das faixas de carga normal [N], temperatura máxima de contato [K], faixa de pressão máxima de Hertz [GPa] e vida do contato [Megaciclos]

Primeiro Corpo: Aço AISI 52100

Antagonista: Aço AISI 52100

Ensaio	Critério de parada	Vida [Mega-ciclos]	NPS Máximo [dB]	T _{contato} Máxima [K]	Faixa de Carga [N]	(P _c) _{máx} (faixa) [GPa]	
ER81 sbqt-oqt	Trip300	11,90	120	336	5550	2,77	
	Trip Zero				11700		
	Trip Zero						
ER82 sbqt- sbqt	120 dB	12,70	120	347	6200	2,25 a	
					6900		2,33
ER83 oqt-oqt	120 dB	12,50	120	382	6100	2,24 a	
					7010		2,34
ER84 sbqt-oqt	120 dB	1,54	120	382	6000	2,22 a	
					6710		2,31
ER85 sbqt- sbqt	120 dB	11,60	120	848	6000	2,22 a	
					6900		2,33
ER86 oqt-sbqt	Trip 750	12,70	114	349	4970	2,09 a	
	Trip 300				6250		
	Trip 100				2,25		
ER87 oqt-oqt	Trip 750	6,00	120	850	6300	2,23 a	
	Trip 600				7400		
	Trip 600						2,39
	Trip 600						
ER88 (pré- trincado) oqt-sbqt	Trip 750	4,03	104	360	5400	2,14 a	
	Trip 600				7200		
	Trip 300						2,35
	Trip 600						
ER89 sbqt-oqt	Trip 750	2,47	90	338	1880	1,51 a	
	Trip 600				3320		
	Trip 300				1,83		
ER80 Oqt- Sbqt	Trip 750	4,00	102	341	6000	2,22 a	
	Trip 600				8400		
	Trip 300						2,49

Tabela 32. Sinopse das faixas de carga normal [N], temperatura máxima de contato [K], faixa de pressão máxima de Hertz [GPa] e vida do contato [Megaciclos] (cont.)

Primeiro Corpo: Aço AISI 52100				Antagonista: Aço AISI 52100		
Ensaio	Motor Movido	Vida [Mega-ciclos]	NPS Máximo [dB]	T _{contato} Máxima [K]	Faixa de Carga [N]	(P _o) _{máx} (faixa) [GPa]
ER61 sbqt-sbqt	Trip 750	13,80	102	390	12300	2,83 a
	Trip 600				14600	
	Trip 300					
ER62 sbqt-sbqt	Trip 750	0,78	115	379	2300	1,62 a
	Trip 600				4100	
ER21 Sbqt-oqt	Trip 800	3,10	102	850	4300	1,97 a
	Trip 800				5320	
	Trip 750					
	Trip 650					
Primeiro Corpo: Aço AISI 52100				Antagonista: Aço AISI 1045 nitretado		
S10 RN1	Trip 750	0,047	121	376	6400	7,02 a
					7300	
S09 RN2	Trip 750	0,016	123	346	11100	8,43 a
					Trip 600	
Primeiro Corpo: Aço AISI 52100				Antagonista: Aço AISI 52100 (ADI)		
S03sbqt ADI03	Trip 740	1,88	120	495	4600	1,91 a
	Trip 650				5350	
	Trip 740					
S05sbqt ADI13	Trip 870	0,88	123	417	2700	1,58 a
	Trip 850				4550	
	Trip 750					
S07sbqt ADI18	Trip 750	0,37	115	432	7100	2,21 a
					8670	
S02sbqt ADI17	Trip 750	0,07	124	430	10700	2,53 a

(continua)

Tabela 32. Sinopse das faixas de carga normal [N], temperatura máxima de contato [K], faixa de pressão máxima de Hertz [GPa] e vida do contato [Megaciclos] (cont.)

Primeiro Corpo: Ferro Fundido Nodular (ADI)

Antagonista: ADI

Ensaio	Trip	Vida [Mega-ciclos]	NPS Máximo [dB]	T _{contato} Máxima [K]	Faixa de Carga [N]	(P _o) _{máx} (faixa) [GPa]
02	Trip 840	10	106	345	5670	1,95 a 2,04
04	Trip 800				6410	
	Trip 880					
	Trip 750					
05	Trip 860	16	100	450	10500	2,40 a 2,6
06	Trip 835				13200	
	Trip 750					
	Trip 600					
07	Trip 840	4,7	100	475	8900	2,27 a 2,46
08	Trip 750				11100	
09	Trip 750	0,59	110	533	12000	2,52 a 2,68
10					14600	
11	Trip 860	3,3	112	385	2600	1,51 a 1,77
12	Trip 750				4250	
	Trip 750					
	Trip 750					
14	Trip 750	0,51	98	378	2750	1,53 a 1,69
15					3900	
19 (*)	Trip 750	0,49	99	391	6400	2,14 a 2,22
20 (*)	Trip 750				7200	

(*) ADI não nitretado

Tabela 32. Sinopse das faixas de carga normal [N], temperatura máxima de contato [K], faixa de pressão máxima de Hertz [GPa] e vida do contato [Megaciclos]

Primeiro Corpo: Ferro Fundido Nodular (ADI)				Antagonista: ADI		
Ensaio	Motor Movido	Vida [Mega-ciclos]	NPS Máximo [dB]	T _{contato} Máxima [K]	Faixa de Carga [N]	(P _c) _{máx} (faixa) [GPa]
C01 ER85m rv	Trip 600	0,58	105	340	1280	1,35 a 1,58
	Trip 300				2060	
	Trip 100					
C02 ER81mrv	Trip 300	0,29	113	363	1250	1,34 a 1,69
	Trip 100				2500	
C03 ER82mv	Trip 300	0,83	104	373	1000	1,24 a 1,76
	Trip 200				2850	
	Trip 0					
	Trip 300					
	Trip 600					

Primeiro Corpo: Aço AISI M2

Antagonista: Aço AISI 52100 (ADI)

M231 ER83mv OQT	Trip 700	0,25	93	339	1580	1,48 1,75
	Trip 700				2600	
M232 ER83mrv OQT	Trip 700	0,22	86	335	5220	2,21 a 2,30
	Trip 700				5900	
M233 ER84mrv OQT	Trip 700	0,14	86	334	10500	2,78 a 2,89
	Trip 700				11600	
M239 Er84mv OQT	Trip 600	0,54	89	352	2800	1,79 a 2,00
					3920	

Primeiro Corpo: Aço AISI M2

Antagonista: Aço AISI M2

M240 M237mr M234mrv	Trip 750	4,25	105	387	7400	2,38 a 2,48
	Trip 700				9200	
	Trip 600					
	Trip 300					

Tabela 32. Sinopse das faixas de carga normal [N], temperatura máxima de contato [K], faixa de pressão máxima de Hertz [GPa] e vida do contato [Megaciclos] (continuação)

Primeiro Corpo: Aço AISI M2

Antagonista: Ferro Fundido Nodular (ADI)

Ensaio	Motor Movido	Vida [Mega-ciclos]	NPS Máximo [dB]	T _{contato} Máxima [K]	Faixa de Carga [N]	(P _o) _{máx} (faixa) [GPa]
M234	Trip 700	0,16	103	337	2180	1,56 a
ADI201	Trip 600				3020	1,74
M235	Trip 700	0,23	111	372	5300	2,10 a
ADI202	Trip 600				6750	2,27
M236	Trip 700	0,11	115	382	11500	2,71 a
ADI203	Trip 600				12800	2,81
M237	Trip 600	0,20	112	361	2130	1,54 a
ADI204					3120	1,77
M238	Trip 600	0,15	115	410	6400	2,23 a
ADI205					7410	2,34

5

Discussão

“Minha curiosidade é menos rude do que na minha juventude, mas quase tão exigente: nunca se acaba de aprender porque nunca se deixa de ignorar.”

BEAUVOIR, Simone [1908-1986] *A força das coisas*.
Editora Nova Fronteira, 1995. p. 244.

5.1. Introdução

O estudo do desgaste de um par de corpos metálicos submetido ao contato de rolamento cíclico sob carga foi desenvolvido neste trabalho a partir de três vertentes:

- a) Ensaios de sólidos sem lubrificação com pistas esféricas ao contato de rolamento cíclico em máquina disco-disco e estabelecimento da sua sistematização, incluindo-se as etapas de fabricação, tratamento térmico, caracterização metrológica, medição de tensões residuais nas pistas, coleta de partículas expulsas da zona de contato e análise microscópica dos danos e das partículas;
- b) Medição de parâmetros macroscópicos de *energia* (entrada) do sistema tribológico, representada pela geometria do contato, propriedades elásticas, carga normal e velocidades dos discos motor e movido, e de suas irreversibilidades acumuladas, ou *anergia* (saída) do sistema, configurada pela temperatura de contato e nível de pressão sonora ao longo do número de ciclos de vida do contato;
- c) Observação da resposta de alguns materiais utilizados a solicitações mecânicas *quase estáticas* de penetração por um indentador de ensaio de dureza convencional, de resistência à flexão três pontos e tenacidade à fratura em vigas curtas prismáticas com entalhe “Chevron”.

Em artigo publicado e integrante da presente investigação, MEDEIROS e colaboradores [2002-a] constataram que o desenvolvimento do desgaste, ao longo da vida, na zona Hertziana de discos de aço AISI 52100 submetidos a rolamento seco em

máquina de ensaio disco-disco, 2,22 a 2,49 GPa e $40 \pm 0,5$ m/s, está associado à *evolução e dispersão* das tensões residuais σ_R [MPa] nas pistas de rolamento e ao nível de pressão sonora, NPS [dB], medido durante os ensaios, Figura 102 e Quadro 6.

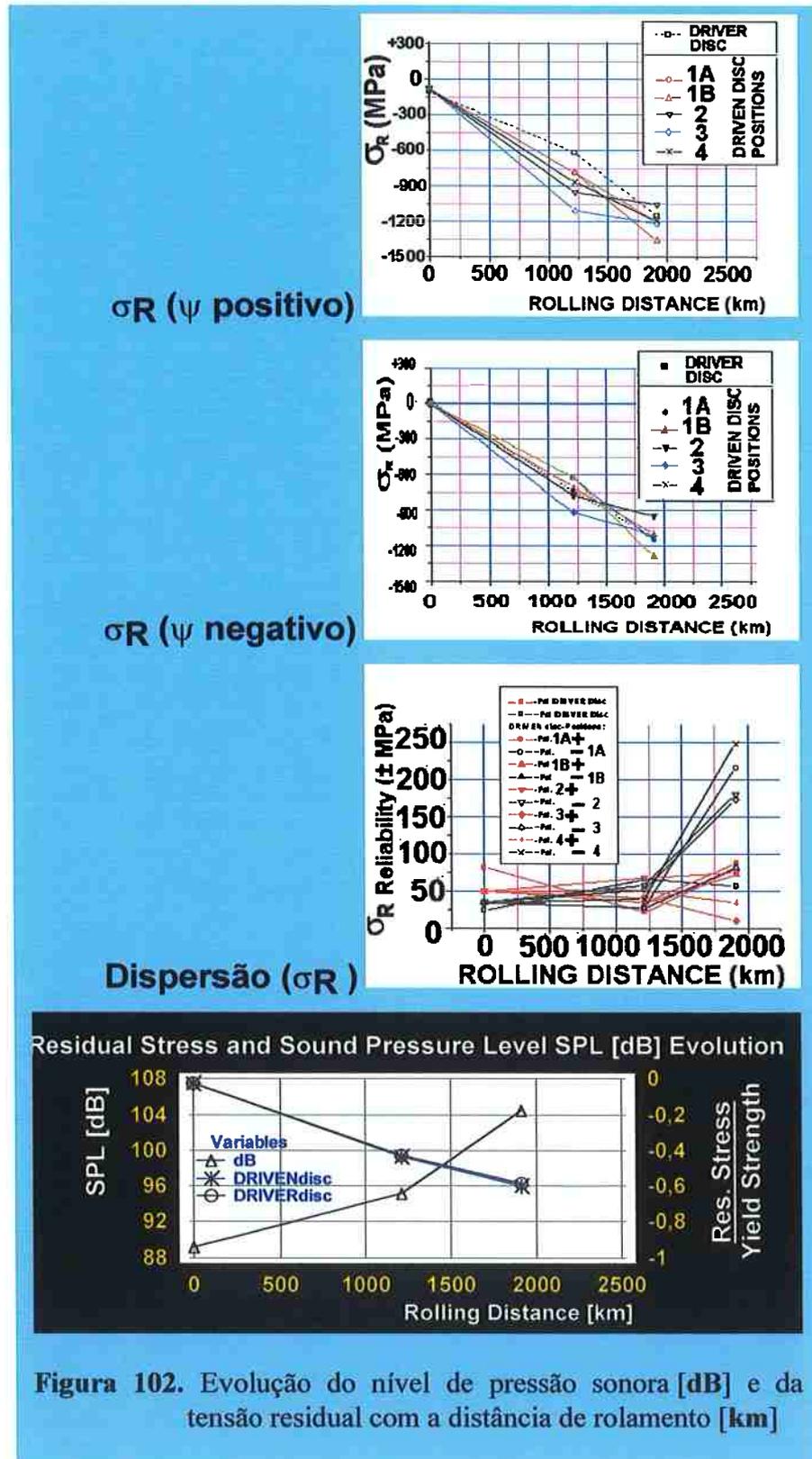
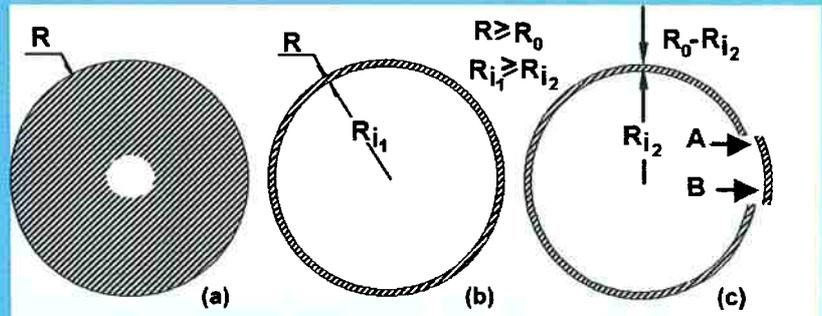


Figura 102. Evolução do nível de pressão sonora [dB] e da tensão residual com a distância de rolamento [km]

QUADRO 6 – Tensões Residuais σ_R [MPa] e nível de pressão sonora [dB] decorrentes do desgaste por rolamento cíclico



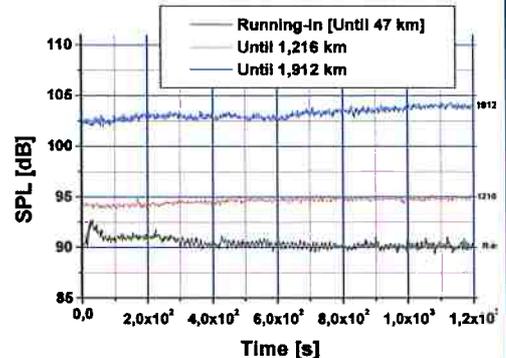
Disco Motor, MR
Disco Movido, MV



- (a) Disco íntegro;
- (b) Anel, contendo a pista, extraído do disco por EDM (foto);
- (c) Corte do anel, relaxando a tensão circunferencial e gerando o arco AB

R = raio externo do disco, com pista esférica de rolamento
 $(R_i)_1$ = raio interno da coroa circular (anel)
 $(R_i)_2$ = raio interno da viga curva oriunda do anel, após removido o arco AB

DISCO ou ANEL	P_{Hertz} [GPa]	Vida L[km] (Mega-ciclos)	$\sigma_R(\psi \text{ pos.})$		$\sigma_R(\psi \text{ neg.})$		σ_R		Relação $\frac{P_{Hertz}}{\sigma_R}$	
			Média [GPa]	Desvio [GPa]	Média [GPa]	Desvio [GPa]	Média [GPa]	Desvio [GPa]		
PISTA NOVA	-	-	-0,24	$\pm 0,02$	-0,06	$\pm 0,02$	-0,15	$\pm 0,02$	-	
MV-Ciclagem 1	2,22 a	1.139	-1,58	$\pm 0,22$	-1,14	$\pm 0,15$	-1,36	$\pm 0,19$	1,7	
MR-Ciclagem 1	2,39	(2,4)	-1,09	$\pm 0,05$	-1,01	$\pm 0,02$	-1,05	$\pm 0,04$	2,2	
MR-Ciclagem 2	2,35 a	1.881	-1,24	$\pm 0,06$	-1,18	$\pm 0,00$	-1,21	$\pm 0,04$	2,0	
MV-Ciclagem 2			(4,0)	-1,42	$\pm 0,17$	-1,18	$\pm 0,24$	-1,30	$\pm 0,21$	1,9
MV-C2-Anel (b)			-1,53	$\pm 0,22$	-1,25	$\pm 0,18$	-1,39	$\pm 0,20$	1,7	
MV-C2 Anel (c)			-1,45	$\pm 0,17$	-1,24	$\pm 0,22$	-1,34	$\pm 0,20$	1,8	
MV-C2- Anel AB	2,49		-1,22	$\pm 0,17$	-1,19	$\pm 0,07$	-1,21	$\pm 0,13$	2,0	



FONTE: MEDEIROS e colaboradores [2002-a]

A medida de NPS [dB] do rolamento entre superfícies metálicas secas, a velocidades da ordem de 40 m/s, utilizando o sistema e a metodologia para aquisição de janelas temporais do sinal e a análise estatística K-S (ratificando ANDRADE *et al.* [2001]) adotados neste trabalho, portanto, demonstrou poder captar variações da distância interplanar da rede cristalina decorrentes do desgaste cíclico, o que vale dizer, *microdeformações*, uma das formas de irreversibilidade de um material.

As medidas de σ_R na pista movida (Mv), antes e após ciclagem, Quadro 6, demonstram que σ_R assume valores médios e de dispersão similares na pista do disco movido, na coroa circular (anel) removida do disco por eletroerosão, no anel aberto em “C” e no pequeno arco. Esta é forte evidência de que o método de extração e seccionamento das pistas e o dispositivo-mesa usado no difratômetro asseguraram medidas tão ou mais consistentes que as obtidas por VOSKAMP [2000]. Para pista esférica nova, retificada, $\sigma_R = 150 \pm 20$ MPa, NPS (“*Running-in*”) tinha média e mediana de 90,3 dB. Após 2,4 milhões de ciclos, em parada “Trip 600”, σ_R da pista motora era cerca de 30% inferior à da pista movida, ultrapassando 1 GPa, e NPS $\approx 94,6$ dB.

Tais valores de tensão residual [GPa], NPS [dB], pressão máxima de Hertz [GPa], temperatura do contato, velocidade e vida das pistas [Megaciclos] se reproduziram dentro de ± 1 a 5 %, nos ensaios ER88 e ER80, assegurando relações entre a pressão máxima de Hertz e σ_R $(p_o)_{\max}/\sigma_R \approx 2$, a magnitude das tensões residuais em que se constatou a deterioração dessas pistas de acordo com um regime de *desgaste moderado* por rolamento cíclico. A análise (SEM) do fundo da seção pré-entalhada não evidenciou trincas. Assim, *sob rolamento puro*, esse entalhe teve efeito pouco danoso até essa vida.

Essas irreversibilidades acumuladas se acentuam na continuidade do movimento, sob carga, entre as pistas de rolamento dos corpos rolantes. A interveniência de um meio com propriedades físico-químicas variáveis acelera ou retarda essa evolução, a diversas taxas.

A Figura 103 apresenta quatro fotos, ao nível macroscópico, do cerceamento à integridade estrutural do material de uma pista e, assim, ao rolamento cíclico, pelo aumento progressivo de dano de fadiga de contato por *lascamento* (“*spalling*” ou “*flaking*” [ing.]), reconhecido pelos crescentes níveis de ruído e vibração (STEVENS [2002]), caracterizando um regime de *desgaste severo* por rolamento cíclico.

Em sistemas em que a exatidão de giro admite desvios de forma com máxima amplitude de alguns décimos de micrometro, como em mancais de máquinas ferramentas, por exemplo, esse regime e a magnitude dos danos apresentados é inaceitável.

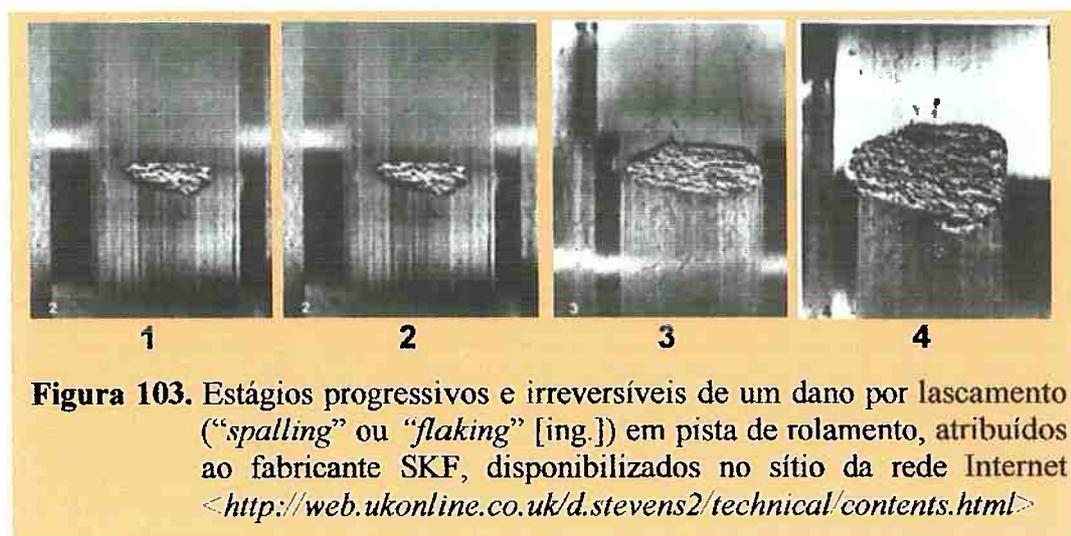


Figura 103. Estágios progressivos e irreversíveis de um dano por lascamento (“*spalling*” ou “*flaking*” [ing.]) em pista de rolamento, atribuídos ao fabricante SKF, disponibilizados no sítio da rede Internet <<http://web.ukonline.co.uk/d.stevens2/technical/contents.html>>

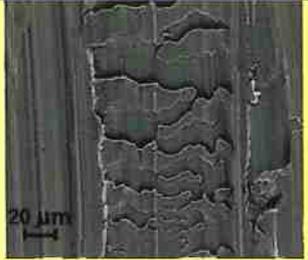
Atingido tal nível de dano por fadiga de contato, as *unidades adjacentes* integrantes dos materiais das pistas, sob a forma de fragmentos ou partículas visíveis a olho nu, possivelmente terão promovido a formação dos chamados “*terceiros corpos*” e, sob ação de mecanismo de *abrasão a três corpos*, intensificado localmente a temperatura e o ruído durante o funcionamento cíclico sob carga e as irreversibilidades do contato, deteriorando-o.

5.2. Regimes de desgaste por contato de rolamento cíclico

Dentre os mecanismos de desgaste por rolamento cíclico dos *materiais* que, à luz das definições Hegelianas, p. 78 e 79, são *compósitos ou agregados que não são independentes, nem se preservam, dadas as tendências de relações irreversíveis com o outro*, apresentam-se seis agrupamentos distintos no Quadro 7.

O Quadro expõe, de modo sistemático, conciso e panorâmico, resultados obtidos ao longo dos ensaios, críticas de SPIKES [1986] ao modelo de SUH [1973], reflexões dos autores. Por ser inédito, representa uma contribuição ao desgaste de rolamento.

QUADRO 7. Mecanismos de desgaste por Rolamento cíclico

I	<p>Desgaste severo – I, em que $[(p_o)_{max}/k] > 4$ e a vida útil do contato é regida por um nível de pressão Hertziana cuja magnitude conduz rapidamente um dos materiais em contato ao seu limite de escoamento, reportado na literatura como “<i>seizure</i>” (HUTCHINGS [1992: 95]), em que há transferência de material de uma pista à outra, por adesão ou aderência.</p>	
II	<p>Desgaste severo – II, aqui caracterizado como “<i>scuffing</i>”, apesar do contato seco, caracterizado a taxas normais, seguido por uma elevação abrupta e contínua nos gradientes temporais térmico $\partial T_{contato}/\partial t$ [K/s] e acústico $\partial NPS/\partial t$ [dB/s] durante o ensaio, às vezes queimando porções de uma ou ambas as pistas de rolamento e, geralmente, associado aos modos de desgaste severo - III e IV, Figura 93, página 167</p>	
III	<p>Desgaste severo – III, denominado de <i>corrugação</i> ou <i>poligonização</i>, em que flutuações na pressão Hertziana, provocadas por variação significativa em propriedades elásticas radiais e circunferenciais de uma pista, combinadas com uma diferença de dureza entre setores circulares dos discos motor e movido, provocam um desgaste irregular em setores de uma das pistas de rolamento, como um perfil senoidal ou similar da pista</p>	
IV	<p>Desgaste severo – IV, caracterizado por um mecanismo dinâmico de trepidação, provocado por rotações superiores a 3.000 rpm e uma baixa sollicitação mecânica, $[(p_o)_{max}/k] < 2$; ER82</p>	
V	<p>Desgaste por delaminação, como definido pela teoria de SUH [1973], relativamente a contatos de deslizamento e ratificado por SPIKES [1986], em relação a contatos de rolamento, Figura 94, p. 168</p>	
VI	<p>Desgaste moderado, caracterizado pela baixa taxa de desgaste, formação de filmes e liberação de partículas (“<i>debris</i>”) de óxidos ou autolubrificantes do próprio material das pistas (como nódulos de grafite, por exemplo, no caso de ferro fundido nodular austemperado, ADI).</p>	

5.3. Vida de um par tribológico de rolamento cíclico

5.3.1. Modelagem determinística da vida de um contato

Embora reconhecendo a consistência da *teoria da delaminação* (SUH [1973]) com evidências experimentais do desgaste de metais a baixas velocidades de deslizamento, SUH e TURNER [1976, p. 508] atentaram para os diversos aspectos controversos dos fenômenos de superfície, “*bem menos estudados do que as propriedades dos materiais, e envolvendo mecanismos complexos, ... que têm possibilitado a manifestação de diferentes pontos-de-vista*”.

Por razões como essa, pesquisadores e associações de fabricantes de alguns elementos de máquinas fabricados em altas séries padronizadas, como mancais de rolamento e engrenagens, em sua maioria de uso automotivo, têm procurado identificar mecanismos, padronizar a terminologia e, tentando satisfazer ao mercado, prever a vida nominal desses componentes.

A modelagem da vida de pistas de mancais de rolamento e pares de engrenagens tem sido baseada nos estudos e formulações de Lundberg-Palmgren [1947], segundo NÉLIAS [1989, p. 16], DUMONT [1987, p. 43-45] e TALLIAN [1992], constituindo-se o modelo “LP” para cálculo da vida.

O modelo LP trata da zona Hertziana de volume *Vol* e admite a hipótese de que há uma probabilidade de sobrevivência real, *ln (1/Sobreviv)*, quando um contato de rolamento é submetido a um colapso por formação de “*spalling*” em torno de uma inclusão, após *N* ciclos, sob carga normal. Isto acontece quando a tensão máxima de cisalhamento, $\tau_{m\acute{a}x}$, atuante em uma profundidade z_o , supera o limite de resistência ao cisalhamento do material em uma, ou ambas as pistas. Assim definiram que

$$\ln\left(\frac{1}{Sobrev}\right) = A \cdot \frac{\tau_o^c \cdot N^e \cdot Vol}{Z_o^h} \quad [5.1]$$

onde **A** é um fator que depende do par de materiais em contato;

c, **e**, **h** constituem os chamados expoentes de Lundberg e Palmgren, por eles determinados experimentalmente para aços de rolamentos comerciais.

A principal limitação desse modelo é a suposição inicial de que o contato acontece na *ausência de atrito*, ou seja, a força tangencial é nula e não há tração, por definição. As principais vantagens são a sua simplicidade e fácil adaptabilidade a situações reais.

A partir dessa modelagem e considerando-se o aço AISI 52100 como material de ambas as pistas, grassou entre todos os projetistas o uso do modelo LP incorporado ao cálculo de vida L_{10} , que representa a vida, expressa em Megaciclos, de 90 % de um mesmo lote de mancais comerciais de rolamento :

$$L_{10} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad [5.2]$$

onde: a_1, a_2, a_3 = fatores relativos (**a**) à confiabilidade, (**b**) aos materiais e processos de fabricação, (**c**) à montagem e funcionamento, respectivamente

C = capacidade de carga dinâmica [N], característico de cada mancal;

P = carga normal solicitante do contato ou carga equivalente [N];

p = expoente que depende do corpo rolante de um mancal : **p=3** (esfera)

p=10/3 (rolo, agulha)

Diversas ramificações dos estudos relativos ao modelo LP resultaram na formulação de novos modelos patrocinados principalmente por fabricantes de rolamentos SKF, FAG e TIMKEN, e de engrenagens, notadamente a AGMA, a associação americana de fabricantes de engrenagens, conforme sintetizou TALLIAN [1992] em artigo de revisão, cuja sinopse está apresentada no Quadro 8.

Cinco famílias de parâmetros são consideradas nesses modelos, concernentes à:

- 1) *vida útil* dos materiais em contato, ou seja, ao número limite de ciclos de rolamento sob carga;
- 2) *geometria* das superfícies de contato dos sólidos;
- 3) *natureza, condição superficial e propriedades dos materiais* em contato;
- 4) *solicitação de carga e velocidade*;
- 5) *condição tribológica* do par.

As irreversibilidades, no âmbito desses modelos determinísticos, incluem-se no último agrupamento de parâmetros. Observe-se que a discussão levada a efeito no item 5.1 não é contemplada quantitativamente pelos parâmetros listados no Quadro 8, embora seja uma lista expressiva, que também não inclui a temperatura de contato nem tampouco qualquer expectativa sobre o ruído em funcionamento.

Quadro 8. Sinopse dos parâmetros considerados na modelagem da vida de sólidos sujeitos à fadiga de contato de rolamento, baseada em TALLIAN [1992]

Designação dos Parâmetros	Número do Modelo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1) De Vida												
Probabilidade de sobrevivência	*	*	*	*	*	*	*					*
Vida em ciclos de tensão	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Vida em percentis, 90% sobrevivência	*	*	*	*	*	*						
Vida mínima, primeira fase de vida		*						*	*	*		
Parâmetro de dispersão de vida	*	*	*	*	*	*	*					*
2) De Geometria												
Volume sob tensão	*	*	*	*	*	*			*			*
Profundidade sob a superfície de contato	*	*	*					*	*	*		*
Parâmetros da geometria de contato	*	*	*	*	*	*	*					*
3) Do Material												
Susceptibilidade da matriz à fadiga	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*
Limite de fadiga		*	*	*			*			*	*	*
Severidade do defeito de superfície, aspereza		*								*		*
Medida da agudeza da aspereza		*										
Severidade do defeito da superfície, manufatura		*						*	*	*	*	*
Severidade do defeito na subsuperfície		*	*									*
Severidade do defeito na superfície, contaminação		*	*	*								
4) De carga e velocidade												
Tensão ou carga típica	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Expoente de (carga ou tensão) - vida	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*
Taxa de ciclagem					*							
5) Tribológicos												
Razão rugosidade/espessura do filme elasto-hidrodinâmico (EHD) ou viscosidade crítica	*			*		*				*		*
Coeficiente de tração-aspereza		*		*						*		*
Coeficiente de tração efetivo		*								*		*
Direção de tração versus rolamento								*				
MODELOS	Comum a todos os modelos											
1) Lundberg-Palmgren () [1947]	2) Tallian [1988]											
3) Ioannides-Harris-SKF [1985]	4) Schlicht et al-FAG [1986]											
5) Timken [1989]	6) Townsend et al [1978]											
7) AGMA/ANSI () [1988]	8) Keer and Bryant [1983]											
9) Hanson and Keer [1991]	10) Zhou, Cheng and Mura [1989]											
11) Bhargava et al [1990]	12) Blake and Chang [1990]											

Há claras dificuldades em se desenvolver um modelo para fadiga de contato de um par de materiais submetido ao rolamento cíclico. A principal é a seleção de uma ou mais famílias de variáveis que conduzam a uma convergência, a partir de um número necessário e suficiente de dados coletados, os quais permitam o estabelecimento das respectivas distribuições estatísticas.

A confiabilidade desejada – associada a um custo e tempo limitados – vincular-se-á ao tamanho de cada amostra, à frequência e duração da coleta (e tratamento) de dados, de mensuração ou monitoramento não-trivial. Em inúmeras vezes, isso demanda interrupção, interferência ou modificação no rolamento cíclico em processo e, pois, uma possível representação imperfeita do processo cíclico em investigação.

A avaliação do erro experimental em que se incorre pela adoção de (a) um modelo de correlação entre alguns desses parâmetros, (b) os mecanismos de desgaste e a vida do contato, complica-se face às relações de ordem-desordem mecânica, físico-química, metalúrgica, presentes ao longo desses contatos e sua interação com o meio.

5.3.2. Critérios de colapso do contato de rolamento

A adoção de um *critério de colapso para o desgaste por rolamento cíclico* deve ser uma função das relações ordem-desordem. Neste trabalho, o critério adotado para o fim de ensaio e parada de máquina foi uma função da energia de vibração elástica.

Energia de vibração elástica, em amplitude e frequência, é definida intrinsecamente pelo sistema, mas também por sua interação com o meio sendo, portanto, dificilmente previsível ao nível de 100% de significância. O mesmo acontece com as *energias de deformação plástica, térmica, química, acústica, ...*, presentes e/ou interagentes na maioria dos fenômenos tribológicos.

A influência exercida pelo modelo LP se conserva forte entre fabricantes de rolamentos, que tendem a adotar como critério de colapso a evolução da falha por *spalling*, como mostrada na Figura 103, em função do número de horas de funcionamento contínuo sob determinada carga. Segundo os manuais dos principais fabricantes mundiais, oligopolizados, essa metodologia para cálculo de vida tem respondido a 90% dos casos de aplicação “graças à evolução dos materiais e processos”, como salienta DUDRAGNE [1998]. Constituiu-se em uma etapa importante no desenvolvimento tecnológico da área.

PIOT e colaboradores [1998] integraram equipe composta por pesquisadores do INSA-Lyon e de duas fábricas francesas, SNR, de rolamentos e a outra, ASCOMÉTAL, fornecedora de materiais. Trabalhando em cooperação, desenvolveram uma modelagem estatística preditiva de “*spalling*” em pistas de rolamentos baseada em suas características elastoplásticas e distribuição da população de inclusões em um volume significativo da matriz metálica. Apesar da idéia ser intrínseca à formação dos engenheiros metalurgistas e já ocupar espaço na literatura citada no presente trabalho e relativa aos anos 1960, resultados foram observados e assumidos formalmente.

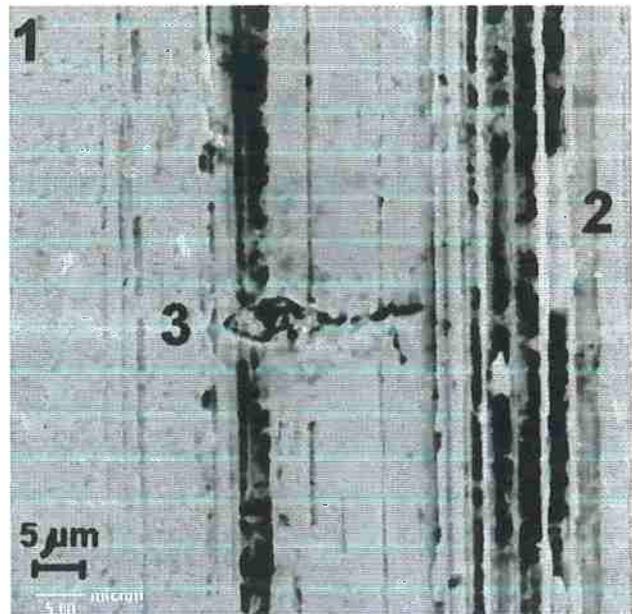
Esses autores constataram que (a) a lei estatística de Weibull e o modelo LP não representam a totalidade da distribuição de duração de vida dos rolamentos e (b) o limiar inferior da pressão máxima de Hertz associada a problemas de inclusões em esferas de aço AISI 100Cr6, que as leva a uma vida de 10^8 ciclos, considerada infinita, L_{∞} , situa-se no entorno de 1,6 GPa, enquanto $L_{0,2}$ e L_{50} foram observadas, respectivamente, a 3,0 GPa e 4,5 GPa.

Duas observações, extraídas de evidências obtidas na presente investigação, devem ser explicitadas, por haverem sido consideradas decisivas no estabelecimento da vida à fadiga dos materiais em contato de rolamento cíclico:

- a) A rigidez dinâmica flexional do par disco-disco integrante do sistema de ensaio utilizado, por sua concepção construtiva, é algumas ordens de grandeza maior na direção normal ao contato do que na direção axial, percebida pela espessura da trilha oxidada pelo contato em ensaios de desgaste severo ou de longa duração, como se depreende da foto do Quadro7, à página 190, por exemplo. Desta forma, a rigidez mostrou-se estar associada a um comportamento dinâmico do disco em contato que sugere a ocorrência paralela de um fenômeno de “*fretting*” na direção axial, devido a movimentos relativos micrométricos entre as pistas no plano horizontal que contém a área de interseção do contato entre ambas, sugerido pelo movimento da partícula indentada pelo proceso de retificação de manufatura das pistas mostrada na foto SEM da Figura 104, resultante do contato entre discos de aço AISI 52100 temperado e revenido em banhos de sais;
- b) A contribuição do que se poderia chamar de “*fretting*” termomecânico, indutor de irreversibilidades nos materiais em contato e resultante da associação entre o aspecto citado em (a) e a geração local de fontes quentes cíclicas pela interseção eventual de partículas constituintes de terceiro corpo, Figura 105.

Figura 104. Aspecto de uma *microtrinca propagada na direção axial*, normal à direção de giro de pista *esférica* motora (1) de aço AISI 52100, temperado e revenido em banho de sais, sua borda (2) e partícula indentada (3) na zona limite do contato entre as pistas e sua interface

N = 12,7 Megaciclos,
 $(p_o)_{\text{máx}} = 2,25$ a $2,33$ GPa;
 $T_{\text{contato}} (\text{máx}) = 347\text{K}$
 $(\text{NPS})_{\text{máx.}}: 120 \text{ dB}$
Carga normal: 6200-6900 N

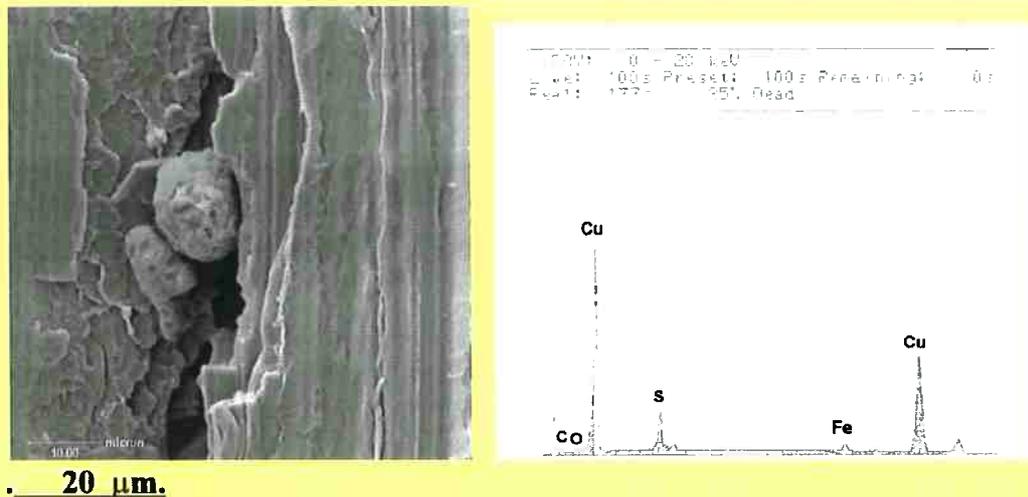


Retomando as evidências dos danos locais apresentados na Figura 105, do ponto de vista da vida do contato, determinada pela parada final da máquina e comandada pelo sensor de vibração, um maior nível de energia elástica de vibração, admitido para o par cobre-aço (“Trip100”) do que para aço-aço (“Trip300”), não evitou que suas vidas, em número de ciclos de rolamento sob carga, ficassem defasadas em uma ordem de grandeza. Os níveis médios de pressão sonora e temperatura de contato praticamente se equivaleram. A resposta dos materiais associou-se diretamente à relação entre a máxima pressão de Hertz e a menor resistência ao cisalhamento dentre os materiais do par de discos. Isso foi substanciado em aço 52100-aço 52100, em relação $1 < [(p_o)_{\text{máx}}/\sigma_R] < 2$ e na pista de cobre, antagonista aço 52100, numa relação $[(p_o)_{\text{máx}}/\sigma_R]$ uma ordem de grandeza acima, Fig. 94, p. 168, Tabela 32, p. 183 – ratificada pelas medidas de tensão residual investigadas por MEDEIROS e colaboradores[2002-a; 2002-c].

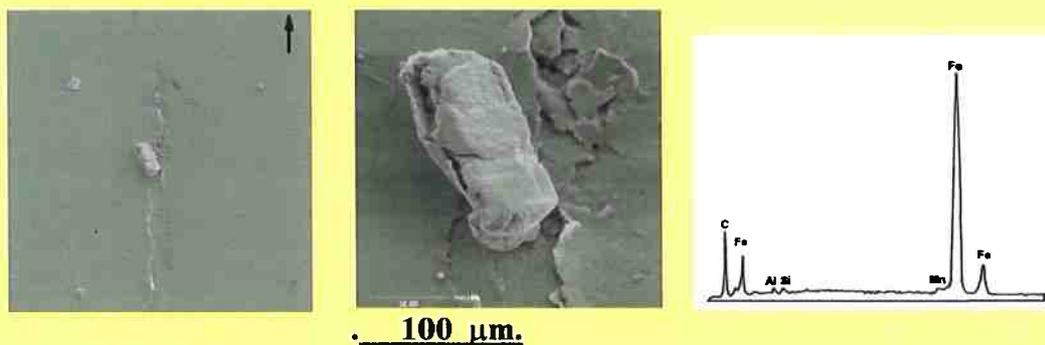
Os discos motores de aço que apresentaram sinais de abrasão como os apresentados nas fotos registraram *dispersões* maiores, ou eventualmente iguais, nos valores da tensão residual σ_R , do que seus respectivos discos antagonistas.

JACQ e colaboradores [2002], ao proporem um novo método semi-analítico que leva em conta as irreversibilidades da plasticidade, criticam os *modelos*:

- a) *estatísticos* de Archard e Greenwood e Williamson, baseados em parâmetros metrológicos e de plasticidade, considerados insensíveis a intensificações locais e transientes da pressão de Hertz por contatos pontuais;



- (a) Partícula globular constituída por cobre e traços de Fe, C, S, O, inserida em microtrinca, na direção circunferencial de pista de cobre, em pista de disco de cobre eletrolítico, após rolar 580.000 ciclos (Trip100) contra disco de aço AISI 52100. NPS(max), pressão nominal de Hertz de 1,45 GPa, 105 dB, $T_{\text{contato}}(\text{max}) = 67^\circ\text{C}$ acima da temperatura ambiente



- (b) Partícula de segunda fase provocando mecanismo de desgaste por *abrasão a três corpos* em pista pré-entalhada, movida, pressão nominal de Hertz de 2,20 GPa, em que as pistas esféricas desse par de discos de aço AISI 52100, com diâmetros de 150,02 mm (movido) e 152,00 mm (motor), possuía relação de transmissão 1:1,01 (MEDEIROS e colaboradores [2002-c]); Vida de 4,0 Megaciclos (“Trip300”), $T_{\text{contato}}(\text{max}) = 87^\circ\text{C}$ acima da temperatura ambiente, NPS(max) = 104 dB

Figura 105. Aspecto de danos localizados e partículas encontradas na circunvizinhança em pistas de cobre e de aço

- b) *numéricos*, como os de Hahn e colaboradores, Gupta e colaboradores e Dang Van e Maitournan, os quais são consumidores de tempo quando a malha de elementos finitos necessita ser refinada para considerar microindentações;
- c) *que utilizam a transformada rápida de Fourier (FFT)*, por se basearem na teoria do meio-espaço elástico, conduzindo análises confiáveis apenas a situações e problemas de natureza puramente elástica e cujo domínio realmente esteja biunivocamente associado a um meio-espaço elástico, como definido pela teoria do potencial de campo de pressão de Hertz.

Assume-se, assim, a complexidade da quantificação da vida do contato por um *único critério de falha* dinâmico, ou acústico, ou mecânico, ou térmico, ou físico-químico, ou baseado em energia de deformação elastoplástica.

Como em outros fenômenos, a busca cartesiana por uma lei única tem sido suprida pela atual tendência de abordagem de problemas por ordens de grandeza seletivas e associadas ao custo e tempo de resposta aos problemas investigados, no âmbito de cada uma delas e vinculada às respectivas leis vigentes.

De acordo com SOMMERFELD [1966: v], “em contraste à Mecânica Clássica, a Termodinâmica tem lidado com a revolução quântica sem sobressaltos em seus fundamentos... Nós consideramos que a Termodinâmica de processos irreversíveis se constitua em uma extensão promissora da termodinâmica clássica do equilíbrio”.

Por razões como esta é que o desgaste por rolamento cíclico por fadiga de contato entre superfícies metálicas pode ser explicitado ao recorrer-se às evidências como os mecanismos de desgaste apresentados no Quadro 7, p. 190, e à termodinâmica associada às irreversibilidades.

A combinação da *pressão Hertziana máxima*, imposta pela carga normal, geometrias e propriedades elásticas de ambos os materiais, com a *velocidade das superfícies em contato*, constitui o par *pV vinculado*, no rolamento entre dois corpos sólidos, à *energia fornecida ao seu movimento cíclico sob carga e às irreversibilidades (onde se vincula a carga tangencial)* na relação entre esses sólidos, cumulativas, linearmente ou não, e monotonicamente *crescentes com o número de ciclos*.

Um exemplo de perturbação termomecânica provocando intensificação de tensão e flutuações de volume, gênese da nucleação e propagação de microtrincas é apresentado

na Figura 106, na pista do disco de aço AISI M2-(37) que rolou $1,97.10^5$ ciclos contra um disco antagonista de ferro fundido nodular austemperado e nitretado.

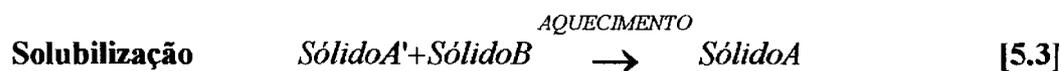
A matriz martensítica de aço AISI M2, sob efeito da compressão Hertziana cíclica, foi indentada por uma partícula constituinte de terceiro corpo. Durante a conformação local, em consequência do afundamento da partícula, as paredes laterais da zona indentada foram solicitadas à tração, segundo uma pressão *não homogênea* devido à geometria irregular da partícula, atuando como terceiro corpo.

Nas fotografias obtidas com elétrons secundários (SEM-SE), Figuras 106 (a) e 106 (c), constata-se um efeito de *enrugamento multidirecional* da pista de contato em torno dessa partícula indentada.

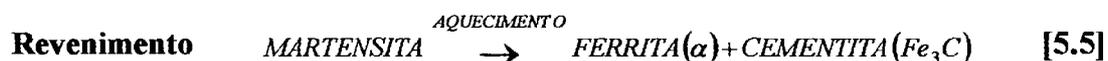
À heterogeneidade da pressão de contato, corresponde uma distribuição de temperatura não uniforme e irreversibilidades locais. Observando-se mais detalhadamente, vê-se, nas fotografias obtidas com elétrons retroespalhados (SEM-BSE), os gradientes de concentração representados pelas tonalidades de cinza associadas à matriz, aos carbonetos, aos sulcos originários do processo de retificação das pistas esféricas, e às “rugas” devido à indentação.

Tais rugas inserem-se em uma “*elipse de enrugamento*” cujo diâmetro maior, no sentido circunferencial de giro, neste caso, equivale a quatro vezes o valor da dimensão maior do terceiro corpo indentado.

Esses gradientes exercem uma ação difusiva no material, de acordo com as Equações 5.3 e 5.4 e, ciclo após ciclo, considerando-se hipoteticamente uma liga bifásica, dependendo do binômio tempo e temperatura, esse material pode se submeter às reações clássicas de solubilização e precipitação, definidas por VanVLACK [1970: 269-287] como sendo



VAN VLACK [1970: 287] destaca também que a reação da martensita no processo de revenimento abaixo da temperatura eutetóide *não é reversível*:



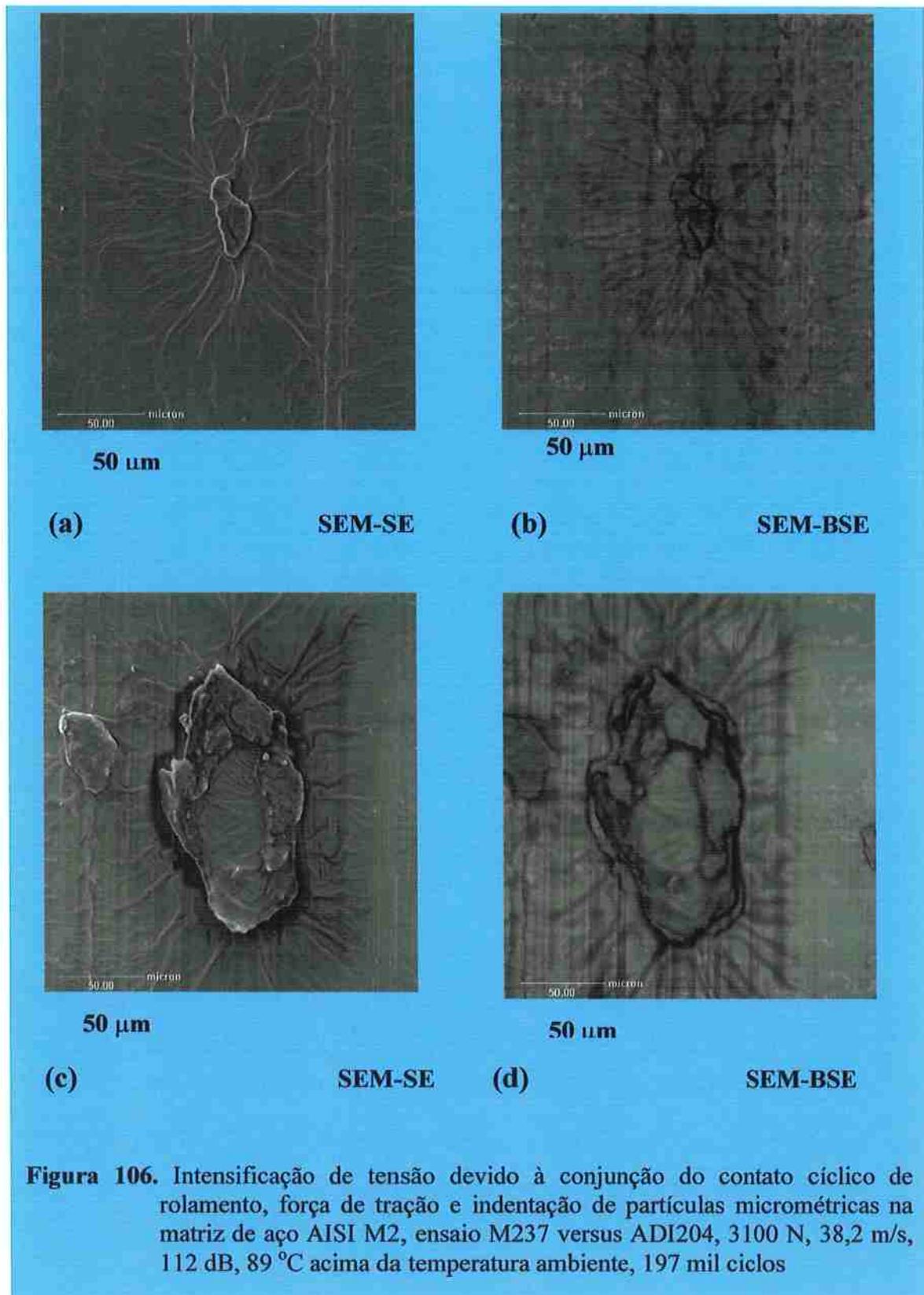


Figura 106. Intensificação de tensão devido à junção do contato cíclico de rolamento, força de tração e indentação de partículas micrométricas na matriz de aço AISI M2, ensaio M237 versus ADI204, 3100 N, 38,2 m/s, 112 dB, 89 °C acima da temperatura ambiente, 197 mil ciclos

No caso do aço-ferramenta M2, a presença de elementos de liga interfere na sua resposta às flutuações térmicas, se comparado a uma liga binária Ferro-Carbono mas, de forma semelhante, o processo de difusão mencionado pode contribuir decisivamente para a migração de carbono por *caminhos preferenciais* no entorno *do fenômeno local*.

VOSKAMP e MITTEMEIJER [1996], da SKF holandesa, identificaram e caracterizaram experimentalmente, após ensaios em pistas de rolamento e análises subseqüentes (microscopias eletrônicas de transmissão e varredura por microsonda) um *mecanismo de difusão do carbono induzido pelas tensões cíclicas*. Lento, cumulativo, esse mecanismo demandou entre 10^7 e 10^8 ciclos para atuar, diferentemente do dano evidenciado pelo mecanismo de extrusão da foto da Figura 107. Ressaltaram que **(a)** as tensões residuais subsuperficiais associaram-se à textura e **(b)** deformações plásticas intensificadas vincularam-se a picos transientes de temperatura locais muito elevadas.

O contraste entre zonas mais claras e escuras na “*zona de enrugamento*”, nas fotos SEM-BSE das Figuras 106 (b) e (d), pode-se atribuir a um indício de migração atômica, possivelmente devido a um *mecanismo termomecânico de extrusão*.

Esse mecanismo pode ser visualizado na zona subsuperficial sob a seção transversal da pista de rolamento de um ferro fundido nodular austemperado (ADI) nitretado, como apresentado na Figura 107.

Investigando aço AISI 52100, compartilha da hipótese desse mecanismo de extrusão, o tribologista SPIKES [1986], um dos pioneiros na sua proposição e no questionamento ao emprego indiscriminado do mecanismo de delaminação de SUH [1973] aos sistemas de rolamento.



Os contextos dos mecanismos de dano e das *irreversibilidades em processo*, sugeridos pelas Figuras 106 e 107, trazem à tona a teoria elaborada há meio século por ARCHARD [1953], que associou a dureza da superfície de contato de metais *em deslizamento*, sob baixas velocidades relativas, à sua resistência ao desgaste.

Em uma escala microscópica, essa teoria deixou de considerar, por exemplo, as unidades adjacentes de um mesmo material que, embora apresentem a mesma dureza macroscópica, são integradas por diferentes combinações da matriz a partículas de segunda fase e inclusões, após processo de deformação plástica a que hajam sido submetidas. Em escala macroscópica, tem sido usada na quantificação do desgaste de sistemas mecânicos de deslizamento, como destacam HUTCHINGS [1992: 82-6] e WILLIAMS [1996: 167-9].

Em colaboração com SANTANA da SILVA [2001: 55; 75-83], foram investigadas a tenacidade à fratura em duas velocidades de carregamento, 50 e 200 $\mu\text{m}/\text{minuto}$, de 63 corpos-de-prova “Chevron” (Anexo 1) de aços AISI M2 nacional e importado utilizados como testemunhas de diversas etapas do tratamento térmico efetuado em condições industriais e simultaneamente em todos os discos de aço M2 importado, bem como ensaios “Chevron” e de resistência à ruptura transversal (TRS), por meio de ensaios à flexão três pontos, de C.P. com duas rigidezes extraídos de disco de aço M2-(38), *após ensaio de rolamento*, cujos aspectos considerados relevantes foram apresentados nas Figuras 73 a 82 e Tabela 31, às páginas 148 a 158.

Considerado um intervalo de confiança de $\alpha = 5\%$, as análises estatísticas comparativas entre as duas amostras, compostas por C.P. de aço AISI M2, nacional e importado, respectivamente, tratadas termicamente, retificadas com entalhe “Chevron” e ensaiadas à fratura, Figura 78, p. 153, demonstraram que

- (a) após a têmpera a vácuo [1090 °C], **um** revenimento [550 °C] e **um** subresfriamento [-85 °C], as duas amostras de aço M2 nacional e importado *não apresentaram diferença estatística significativa* em suas distribuições de tenacidade KIC, avaliadas pelo teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K-S), ou seja, mostraram-se como se houvessem sido extraídas de uma mesma população;
- (b) após a têmpera a vácuo [1090 °C], **quatro** revenimentos [550 °C] e **dois** subresfriamentos [-85 °C], as amostras *apresentaram diferença estatística significativa* em suas distribuições de tenacidade KIC, avaliadas pelo teste

não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K-S), indicando que a tenacidade à fratura do aço importado, cerca de 10% superior, aproveitara melhor os benefícios da dupla estabilização da martensita, inclusive apresentando uma menor dispersão nos valores de KIC.

Essa melhor resposta do aço M2 importado foi atribuída à sua condição inicial de menor encruamento no fornecimento, como pode ser inferido a partir de suas distribuições de carbonetos, Figuras 40 a 45, p. 94 a 100.

O teste K-S, comparativo da tenacidade à fratura de C.P. “Chevron” integrantes das duas amostras de aço M2, nacional e importado, ensaiados a duas velocidades, 50 e 200 $\mu\text{m}/\text{minuto}$, sintetizado na Tabela 31, p. 154, demonstrou diferença significativa ($\alpha = 5\%$) apenas à maior velocidade de carregamento, entre o M2 nacional e o importado submetido a dois subzeros.

Os dados da Tabela 31, relativos ao “*p-value*”, permitem ressaltar-se um detalhe: quando ensaiados a 200 $\mu\text{m}/\text{minuto}$, assumindo-se um intervalo de confiança $\alpha = 10\%$, o aço M2 nacional assume uma condição privilegiada, em relação ao importado: após um tratamento de têmpera, um subzero e um ou dois revenimentos, sua tenacidade à fratura é 23,8% superior à do aço importado.

A programação de ensaios de tenacidade à fratura teve seqüência e C.P. foram extraídos do disco M2-38, após 0,15 Megaciclos de rolamento a uma pressão Hertziana máxima de 2,3 GPa, nas configurações apresentadas na Figura 56, p. 112, e Figura 59, p. 116. Os resultados, sintetizados na Figura 79, p. 155, mostraram, a um nível de significância de 95 %, que a tenacidade média à fratura KIC apresentou uma sensível diferença (31%) entre as direções axial e circunferencial, ou seja, quando os entalhes “Chevron” foram abertos na direção de giro do disco, KIC [MPa. $\sqrt{\text{m}}$]= 31,8 (mediana), 32,1 (média), 4,3 (desvio padrão); entalhes “Chevron” na direção axial, perpendicular à de giro, [KIC [MPa. $\sqrt{\text{m}}$]= 23,7 (mediana), 24,5 (média), 3,2 (desvio padrão)].

A aplicação do teste K-S, a um nível de significância de 95 %, aos resultados de resistência à ruptura transversal (TRS), obtidos através de ensaios de flexão três pontos, mostrou que há diferença estatística entre as médias e os desvios padrões das amostras extraídas de posições do disco diametralmente opostas e usinadas com seções transversais diferentes (4,5x4,5 mm^2 e 6,5x6,5 mm^2).

Com os corpos-de-prova para medida da tenacidade à fratura ensaiados e executados ensaios de dureza HRC nas superfícies fraturadas e em sua circunvizinhança, aplicaram-

se testes de Kolmogorov-Smirnov às amostras de aço M2, nacional e importado, compostas pelos grupos de medidas executadas na base do “Chevron”, na meia-altura, no vértice e na zona retificada constituinte do entalhe. As medidas de dureza *na base* do C.P. “Chevron” de aço M2 nacional apresentaram valores de média e mediana diferentes daquelas obtidas para o *vértice*, *meia-altura* e *zona retificada*, enquanto essas diferenças de dureza nessas posições não apresentaram diferenças significativas para o aço M2 importado, Figuras 81 e 82, p. 157 e 158.

Esses ensaios de dureza na zona fraturada e retificada do “Chevron” foram executados para visualizar-se fisicamente e compreender-se a seqüência do dano imposto a uma zona já fraturada de um aço M2.

Utilizou-se o processo quase-estático de indentação HRC por um diamante cônico-esférico ($E = 1.140\text{GPa}$, $\nu = 0,07$, de acordo com JACQ e colaboradores [2002]), sob carga padrão de 150 kgf, pré-carga de 10 kgf ($\alpha=120^\circ$) e pressão máxima de Hertz de 18,88 GPa, com história de irreversibilidades materializadas na presença de textura e trincas desenvolvidas por ensaio anterior de tenacidade à fratura.

A opção pelo ensaio Rockwell C sobreposto à zona fraturada “Chevron” buscava uma associação dos fundamentos de três teorias disseminadas entre tribologistas:

- a) *do desgaste* de Archard, relativamente à *dureza* e a um método sistemático de *deformação plástica*;
- b) *da resistência ao rolamento* de Reynolds, Tabor e equipe e BENTALL e JOHNSON [1967] indicadora da *semi-largura do contato*;
- c) *do potencial de campo de pressão* de Hertz, que indicava uma faixa de variação milimétrica do raio de contato ou semi-largura de trilha para as cargas sobre os pares aço-aço nas dimensões das pistas esféricas utilizadas.

Através da produção de indentações HRC em superfícies já fraturadas de corpos-de-prova “chevron”, como esquematicamente mostradas na Figura 77, p. 152.

Apesar dos custos crescentes haverem interrompido este veio investigativo, os resultados preliminares são alvissareiros e recomendam a sua retomada.

Fotos obtidas através de microscopia SEM de três indentações de dureza Rockwell C são apresentadas na Figura 108, concernentes a uma testemunha do tratamento térmico do aço AISI M2 importado, temperado, revenido quatro vezes e subresfriado duas vezes, conforme descrito na metodologia.

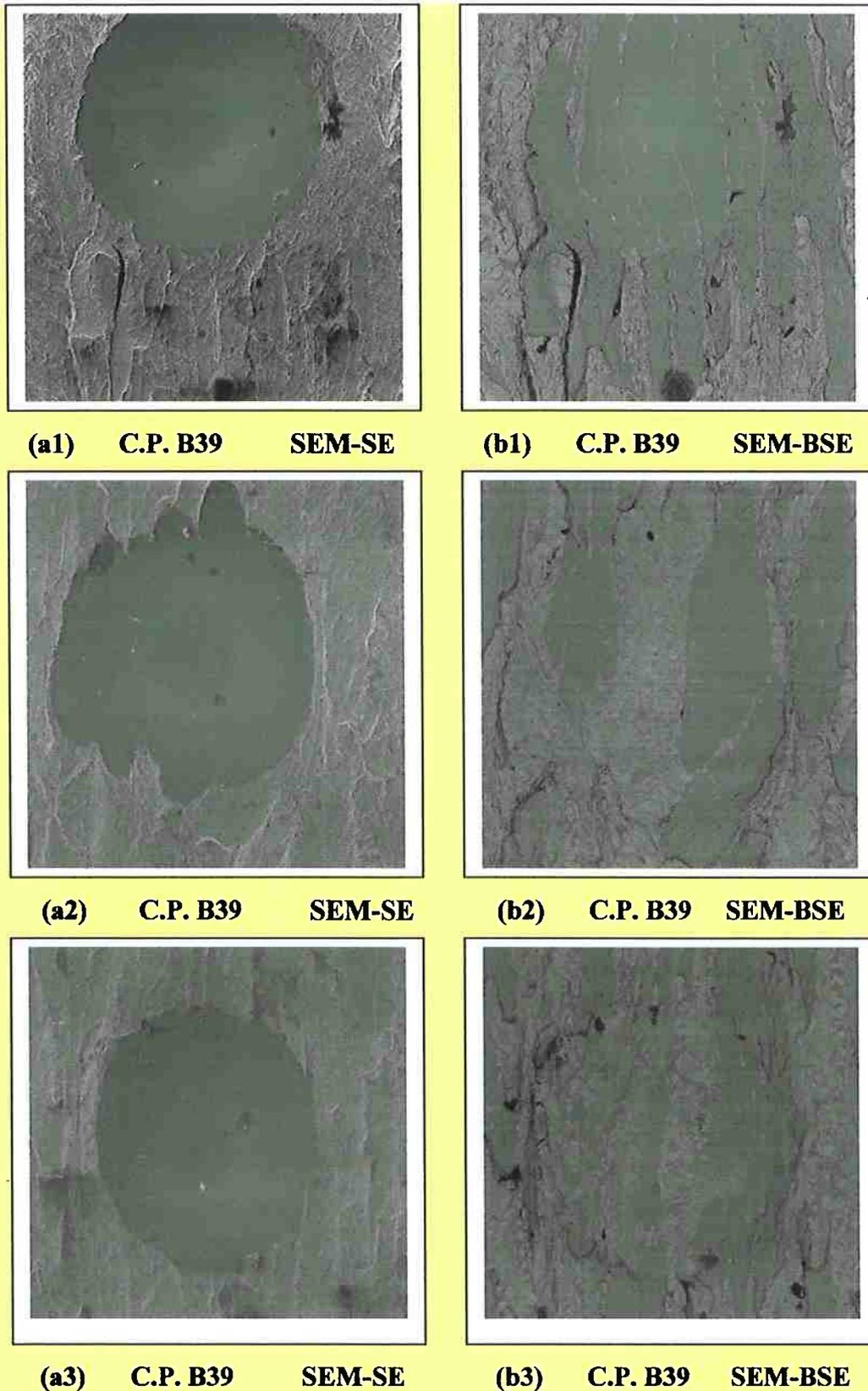


Figura 108. Diferentes impressões obtidas através de ensaios de dureza HRc em superfícies fraturadas “Chevron” de aço AISI M2. [(a1), (a2), (a3)] resultam em diâmetros de $431 \pm 5 \mu\text{m}$, e [(b1), (b2), (b3)] revelam *unidades adjacentes* com evidências de diferenças morfológicas, de composição química e *irreversibilidades* acumuladas

As impressões foram feitas em seções fraturadas após ensaio de tenacidade à fratura em corpo-de-prova (C.P. B39, $KIC = 22,44 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, carga = 1373 N) pré-entalhados com geometria “Chevron”.

Na coluna da esquerda, as fotos dizem respeito a imagens obtidas com elétrons secundários (SEM-SE), enquanto as da direita utilizaram-se de elétrons retroespalhados (SEM-BSE). As fotos SEM-BSE mostram que, sob o efeito da pressão de Hertz associada à deformação plástica da indentação superposta à zona fraturada do “Chevron”, zonas contendo partículas de carbonetos dispersos na matriz metálica do aço AISI M2 deformam-se ora linear, ora não linearmente, em relação ao entorno, quando sujeitas à ação quase-estática do penetrador de diamante durante o ensaio.

Demonstram que respondem diferentemente à mesma pressão de Hertz solicitante, de acordo com os efeitos das *tensões residuais e deformações plásticas* oriundas da zona fraturada devido à abertura progressiva da boca da trinca.

A polidez do diamante se reproduz na impressão ([ing.] “*footprint*”) resultante da indentação (pressão média de Hertz $p_m = 12,6 \text{ GPa}$, tensão de cisalhamento atuante $\tau = 6,3 \text{ Pa}$, raio do contato $a = 193 \mu\text{m}$) e o ângulo de geratriz do indentador ($\alpha = 60^\circ$), levam a um $p_m/k \approx 6,05$ na Figura 14(b), página 35. Os diâmetros das indentações foram medidos (SEM-SE) e têm dimensão de $431 \pm 12 \mu\text{m}$.

As evidências dessas impressões resultantes de indentações em superfícies anteriormente fraturadas e mostradas na Figura 108, entretanto, fornecem um lastro experimental modesto, mas real, à complexidade do problema prático do desgaste de rolamento de ligas metálicas em que, geralmente, uma matriz martensítica compartilha volumes micrométricos com carbonetos e inclusões constituintes do material sob diferentes texturas, submetidos a solicitações termomecânicas variáveis, e ao longo de até centenas de milhões de ciclos.

Os recursos de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (SE), comparados aos de elétrons retroespalhados (BSE), lados esquerdo e direito da Figura 108, reforçam a percepção do que se está expondo. As *unidades adjacentes* componentes das áreas de contato apresentadas, ao nível micrométrico, sugerem indicativos para a determinação das áreas aparente e real de contato a partir das fotografias obtidas, respectivamente, por (SEM-SE) e (SEM-BSE).

Embora na indentação por ensaio padronizado HRC tenha-se um processo quase-estático, a praticidade, tempo de execução e repetitividade da utilização dos dois

métodos superpostos ao material podem ser úteis e redutores de custos na avaliação de esquemas de tratamentos térmicos e no fomento de modelos numéricos com dados concernentes **(a)** à semi-largura de um contato de rolamento, **(b)** à interface impressão-borda, **(c)** à resposta da microestrutura do material às faixas de carga, e pressão Hertziana, desejadas a um contato de rolamento.

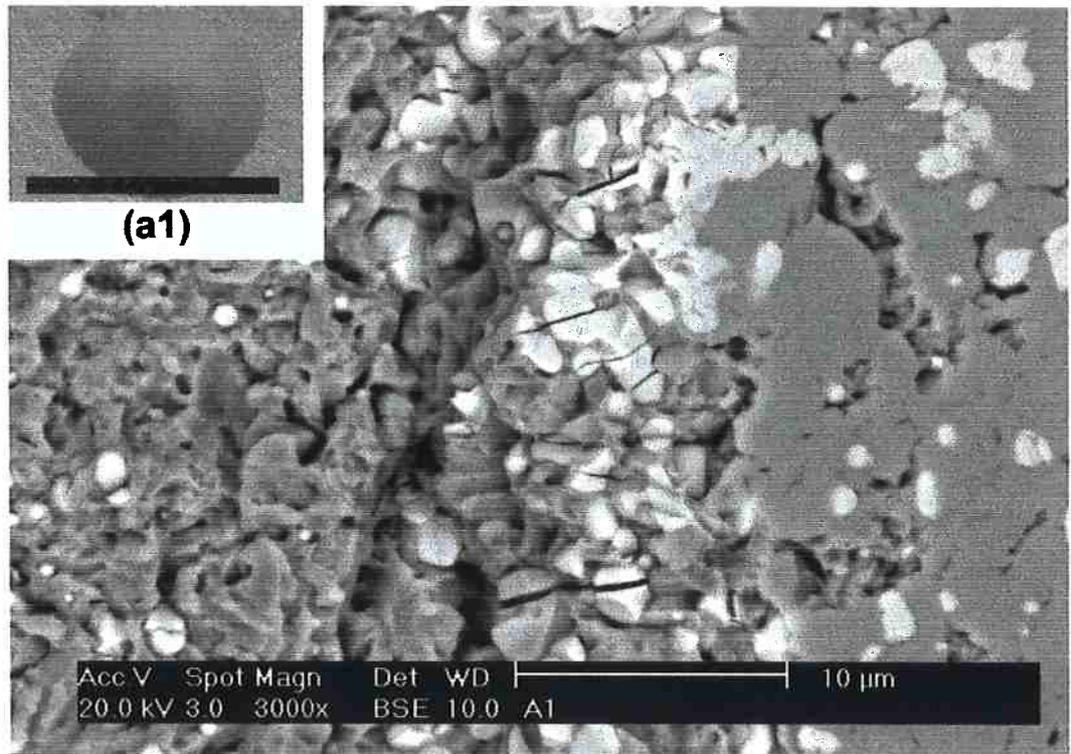
As Figuras 109 (a) e (b) exemplificam o exposto. Elas apresentam fotos de microscopia SEM(SE) e SEM(BSE) de indentações realizadas no C.P. A1, de aço M2 nacional, na *condição temperada* [$KIC = 19,96 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$] que, para $p_m/k \approx 6$, (Fig. 14(b), página 35) onde se obteve uma indentação com diâmetro $425 \mu\text{m}$ [Fig. 14(a1)]. Constatam-se, também, na interface borda-circunvizinhança da indentação, a ocorrência de *microtrincas radiais* na matriz e em partículas de segunda fase, antecipando a ocorrência de trincas na interface pista-borda da pista de rolamento [Fig. 109(b1)].

A fadiga de contato de sólidos em rolamento cíclico é caracterizada pelo surgimento e propagação de trincas superficiais ou subsuperficiais no material solicitado ciclicamente. Para se ter uma noção de como a resistência à flexão e a rigidez de algumas vigas extraídas de um aço M2 ensaiado respondem às solicitações do rolamento cíclico, executaram-se ensaios e análise dos resultados obtidos, Figura 80, página 156, para duas seções transversais, com momentos de inércia de $34,2$ e $148,8 \text{ mm}^4$, respectivamente, com uma relação de $1 : 4,35$, entre esses momentos.

As medidas de tendência central indicaram uma resistência à flexão entre $1,4$ e $1,7 \text{ GPa}$ para as vigas M238, mas não houve diferença estatística significativa ($\alpha = 5 \%$) entre as duas amostras. Entretanto, as amostras apresentaram dispersões estatisticamente diferentes.

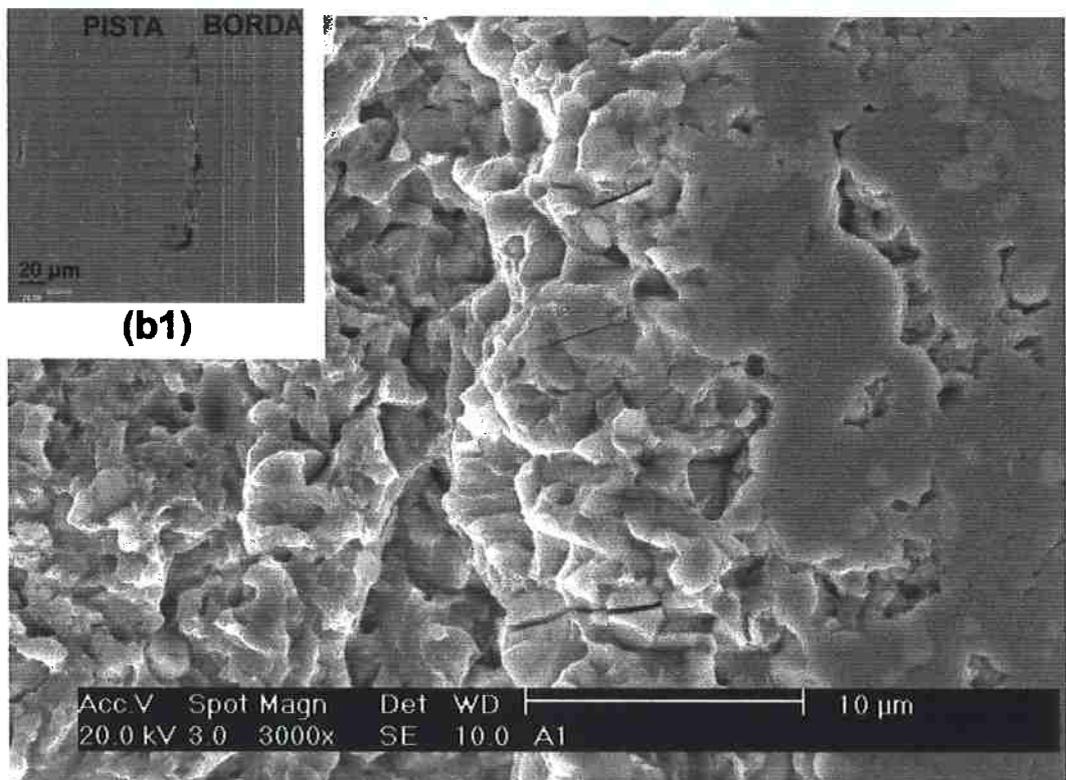
Em uma segunda análise, agruparam-se as vigas extraídas do disco de aço M238 de acordo com a rigidez e a localização no disco, em *locii* diametralmente opostos, como se vê na Figura 56, p. 112. Dessa forma, a resistência à flexão média da amostra de menor rigidez caiu para $1,1 \text{ GPa}$, em uma das amostras, houve diferença estatística significativa entre suas médias e desvios-padrões, e a mediana da amostra de menor rigidez mostrou-se ser estatisticamente menor que a de maior rigidez ($\alpha = 5 \%$).

Fisicamente, isto sugere que a *dimensão e a localização* de componentes mecânicos, submetidos ao rolamento cíclico, devem ser consideradas na avaliação e quantificação de propriedades mecânicas de um material em análise.



(a)

foto SEM (BSE)



(b)

foto SEM (BSE)

Figura 109. Trincas radiais na interface “indentação-borda”

Esses fundamentos de Engenharia foram utilizados na concepção geométrica da viga curva da Figura 58, p. 115, composta por uma calota esférica truncada, extraídas a cerca de 120° do disco M238, Figura 56, p. 112, contendo a pista de rolamento e em cuja base foram usinados, por retificação, dois entalhes “Chevron”, submetendo-se a viga ao ensaio de ruptura transversal (TRS) por resistência à flexão três pontos. Buscavam-se respostas à indagação: há associação entre a rigidez, a simetria e o modo de propagação de trincas em vigas extraídas de materiais integrantes de superfícies rolantes?

As fotos da Figura 110 apresentam seções circunferenciais e radiais (transversais) das pistas dessas vigas de aço AISI M2, com evidências de:

Fig.110(a): zona comprimida (Z.C.) central da viga de aço, com vestígios de *bifurcação, ramificação e desbordamento de trincas*, originadas em torno de *fatores de intensificação de tensão*, como zonas de transição de carga e sulcos:

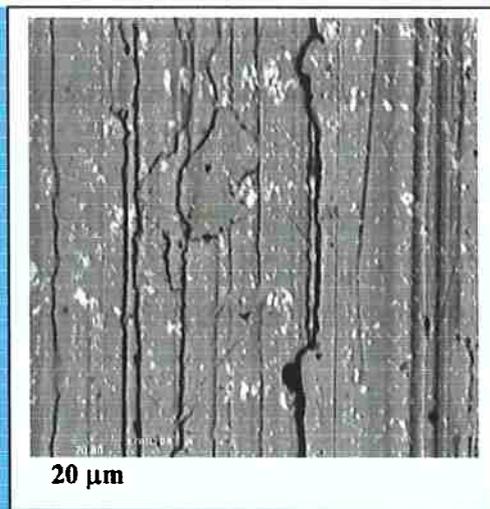
- a.1) longitudinais, impressos durante a retificação das faces da viga;
- a.2) em torno de colônias de carbonetos ou interfaces carbonetos-matriz;
- a.3) em torno de interfaces inclusões-matriz.

Fig.110(b): fratura por concentração de tensão na borda da viga submetida à compressão, na zona identificada na Figura 110(d) com o número 3, próxima a um dos entalhes “Chevron”, demonstrando assimetria no colapso associada à tensão maior em uma das bordas da pista do que na outra, motivada seja por uma diferença de tensão residual decorrente da resposta dessa seção axial, perpendicular ao rolamento, seja por um desvio de paralelismo entre a base da viga e o cilindro de aplicação de carga;

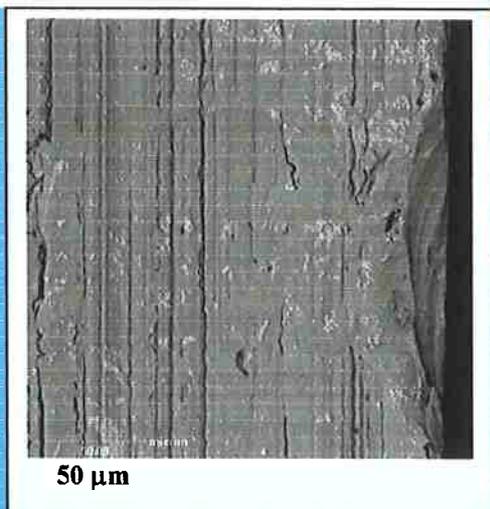
Fig.110(c): superfície da fratura na seção transversal da viga, no meio da pista de rolamento, intensificada por um entalhe “Chevron”, com indício de fratura em plano de quase clivagem, nas bordas da pista nas Figuras 5.4.(e) e (f) ;

Fig.110(d): esboço esquemático do ensaio de flexão três pontos dos C.P. P1, P11 e P21, vigas providas de duplo “Chevron”, contendo a pista esférica de rolamento desgastada.

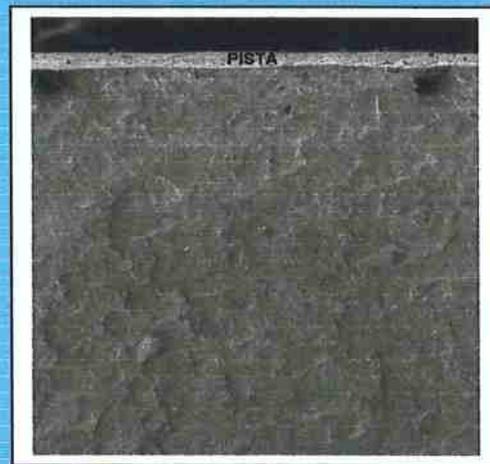
Nas Figuras 111 e 112 apresentam-se fotos das pistas, bordas da pista e seção transversal da zona fraturada dos corpos-de-prova C.P. P11 e P22, de idênticas dimensões, material, número de ciclos e entalhes do C.P. P1, mas cujas cargas de colapso foram 68,5 % e 12,0 % superiores à de P1, respectivamente.



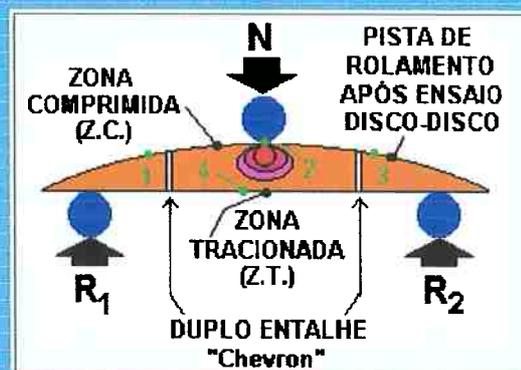
(a) P1 (SEM-BSE)
borda da pista de rolamento (Z.C.)



(b) P1 (SEM-BSE)
limiar da borda da pista (Z.C.)



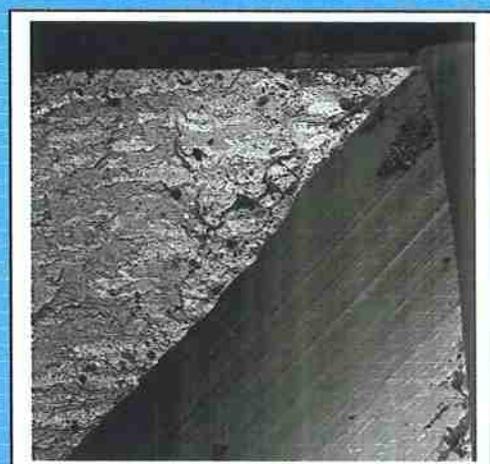
(c) P1, SEM-SE 318X



(d) Ensaio de resistência à ruptura transversal (TRS) por flexão três pontos com duplo entalhe "Chevron"

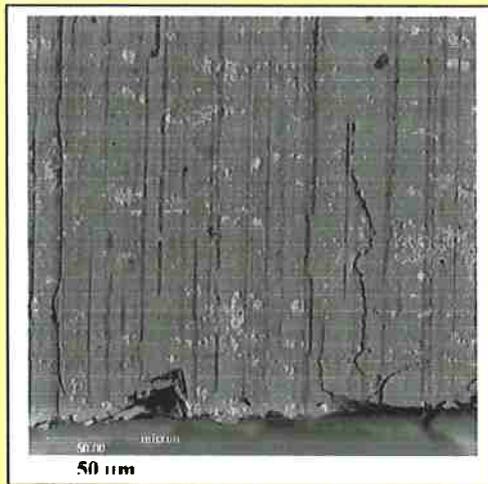


(e) P1, SEM-SE 316X

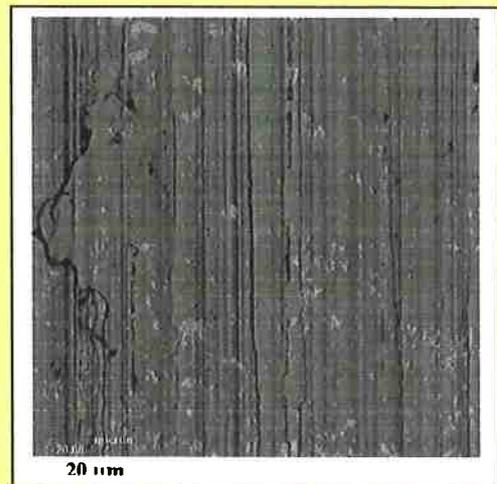


(f) P1, SEM-BSE 294X

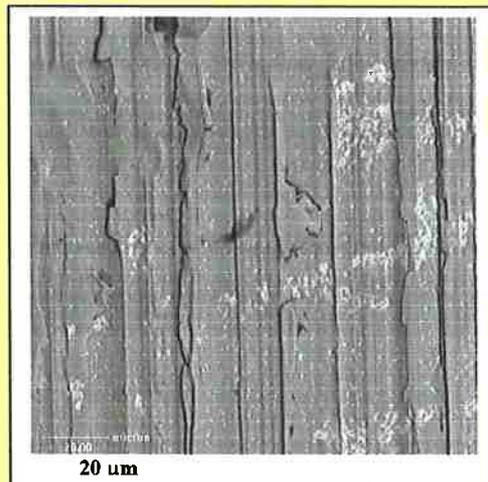
Figura 110. Morfologias do meio e da borda da parte comprimida da pista e seção transversal do entalhe fraturado da viga P1 de aço AISI M2, após ensaio TRS com duplo "Chevron" esquematizado em (d), cuja rigidez no colapso foi de 15,8 N/μm



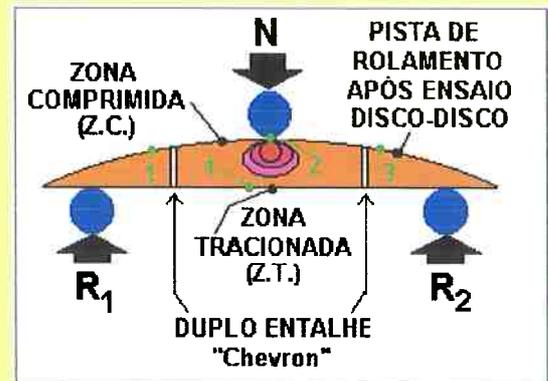
(a) P11, pista SEM-BSE



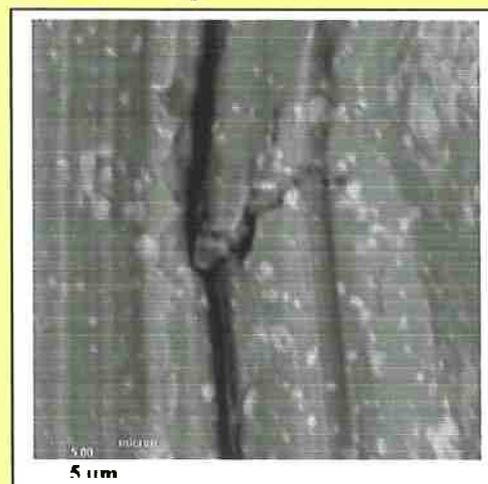
(b) P11, borda da pista SEM-BSE



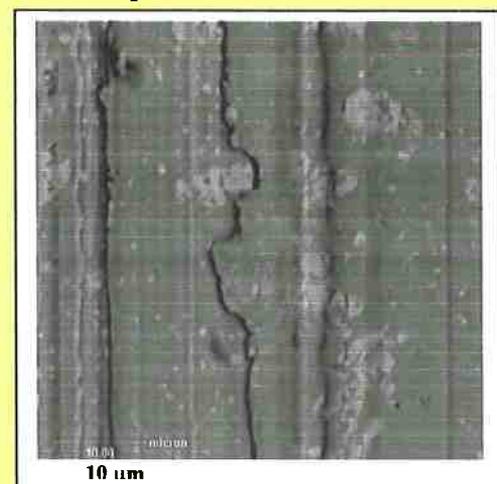
(c) P11, pista SEM-BSE



(d) Ensaio de resistência à ruptura transversal (TRS) por flexão três pontos com duplo entalhe "Chevron"

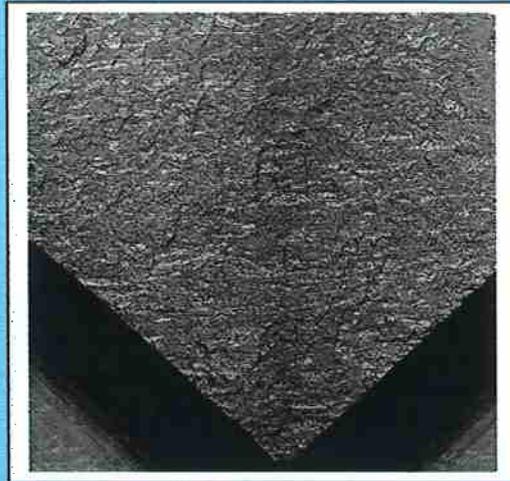


(e) P11, pista SEM-BSE



(f) P11, pista SEM-BSE

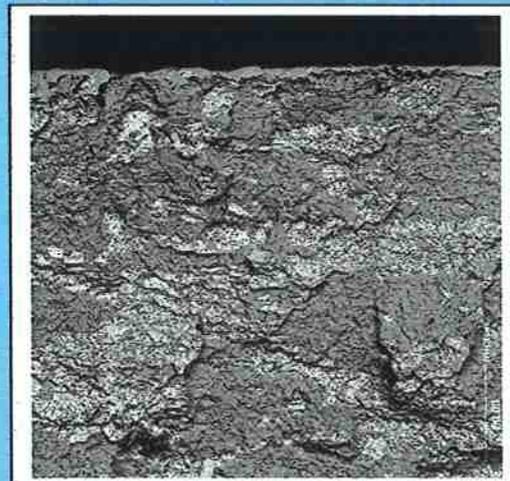
Figura 111. Morfologias do meio e da borda da pista da viga P11 de aço AISI M2, após ensaio TRS com duplo "Chevron" esquematizado em (d), cuja carga de colapso foi 68,5 % superior à de P1, cuja rigidez no colapso foi de 5,6 N/μm



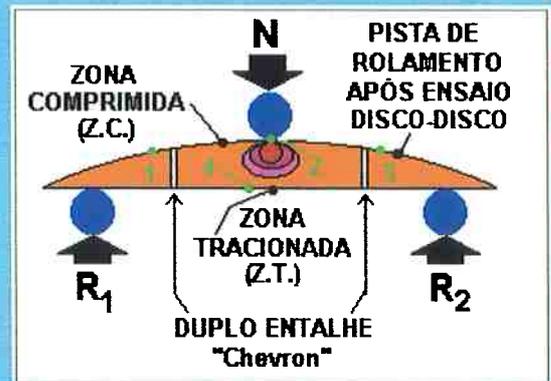
(a) P21, SEM-BSE, 20X



(b) P21, SEM-SE, 20 X



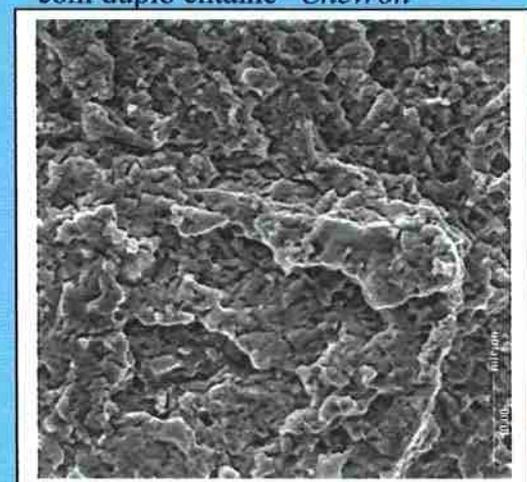
(c) P21, SEM-BSE, 200 X



(d) Ensaio de resistência à ruptura transversal (TRS) por flexão três pontos com duplo entalhe "Chevron"



(e) P21, SEM-BSE, 1000X



(f) P21, SEM-SE, 1000X

Figura 112. Morfologias da seção transversal fraturada na zona entalhada da viga P21 de aço AISI M2, após ensaio TRS com duplo "Chevron" esquematizado em (d), carga de colapso 12,0 % superior à de P1, rigidez no colapso 4,9 N/μm

Na condição de carregamento mais elevado suportado por **P11**, observou-se que houve uma intensificação na *ramificação, bifurcação ou desbordamento* das trincas em torno de inclusões e carbonetos, quando comparada àquela relativa aos sulcos de retificação.

A constatação de que há um panorama de deformação ou microtrincas nas direções circunferencial, axial e radial, sensível às flutuações na sollicitação, ratifica a condição de triaxialidade do estado de tensões sollicitantes através do ensaio desenvolvido de resistência à ruptura transversal (TRS), por flexão três pontos em viga com duplo “Chevron”.

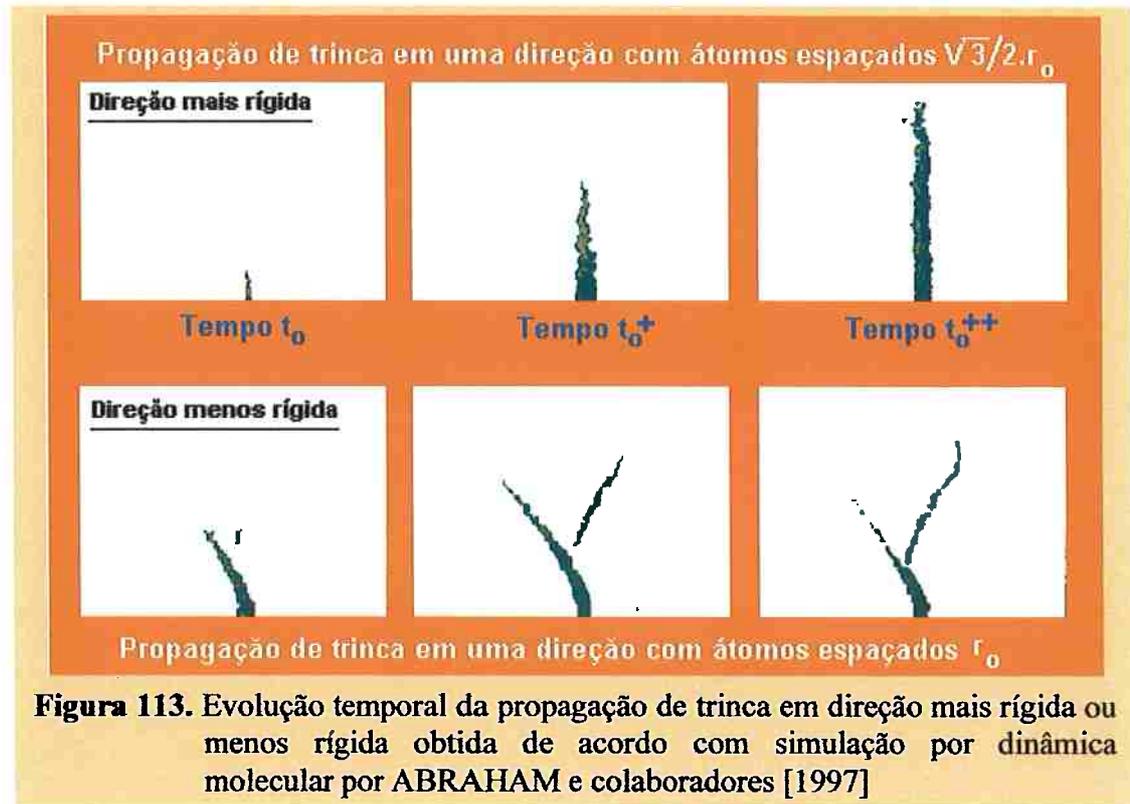
A viga **P1**, que apresentou maior rigidez durante o ensaio e tendência às trincas circunferenciais na pista que **P11** e **P22**, tende a confirmar o modelo de ABRAHAM e colaboradores [1997], representado na Figura 113, mesmo em se tratando de fraturas distando algumas ordens de grandeza das estudadas nos ensaios de **P1**, **P11** e **P22**.

Esses autores têm utilizado simulações em computador para investigar a *dinâmica molecular da fratura* em pequenas porções de materiais dúcteis e frágeis compostas por milhões de átomos, algo da dimensão de uma ou algumas asperezas. Este tipo de estudo considera as irreversibilidades concernentes à nucleação e crescimento de trincas com dimensão nanométrica, em uma escala temporal da ordem de femtosegundos, e se baseia no movimento de um determinado número de átomos submetido a mútuas interações sob potenciais interatômicos contínuos.

Nas simulações efetuadas, ABRAHAM e colaboradores [1997] constataram que, *no seu modelo*, os efeitos de elasticidade anisotrópica são mais representativos do que os associados à energia de superfície. Assim, elaboraram mapas de propagação de microtrincas segundo direções mais rígidas e menos rígidas, considerando variações no módulo de elasticidade longitudinal associadas às distâncias interatômicas compreendidas entre $\sqrt{3}/2$ (0,866) e um raio atômico r_0 , ilustrados na Figura 113.

Associaram, desta forma, a ramificação de nanotrincas, em ângulos de $\pm 30^\circ$, a direções menos rígidas, em que as distâncias entre os átomos são mais espaçadas. Verificaram, também, que a ponta da nanotrincas em sólidos dúcteis e frágeis se propaga a uma velocidade limite de 0,43 e 0,57 da velocidade da onda de Rayleigh, respectivamente.

DMITRIEV e colaboradores [1999] propuseram método computacional que admite o material composto por elementos denominados de *autômatos celulares*, caracterizados por dois estados possíveis (*conectados* ou *desconectados*, através de ligação química).



Os autômatos celulares que compunham um material foram descritos por esses autores *por seis parâmetros*:

1. Vetor posição;
2. Velocidade translacional;
3. Velocidade angular;
4. Ângulo de giro;
5. Massa;
6. Momento de inércia.

DMITRIEV e colaboradores [1999] consideraram que, ao nível nanométrico, o comportamento dessas unidades adjacentes solicitadas por uma carga constituía um *processo não linear complexo* que não poderia ser explicado pela mecânica do contínuo (macronível) nem pela dinâmica molecular, que permitiria estudos sobre um ou alguns

grãos apenas, no âmbito da física de estado sólido (nanonível), demandando novos métodos a um mesonível para a investigação da deformação e fratura de sólidos.

A modelagem desenvolvida por DMITRIEV e colaboradores [1999] predizia o cálculo da irreversibilidade devido à *geração de calor na zona de contato e à dinâmica da fratura durante o deslizamento* entre dois sólidos. Sendo cerâmicos, devido ao atrito gerado pelo deslizamento de 20 *autômatos celulares* móveis sobre 20 fixos, com área aparente total de $20 \times 0,45 \text{ mm}^2$, sujeitos a uma pressão normal de 800 MPa e tangencial de 300 MPa, seus cálculos estimaram um gradiente térmico máximo na superfície de contato de 140°C e, à aceleração que propiciasse a *pelo menos um autômato celular* do sólido superior móvel atingir a velocidade de 300 m/s, fê-lo quebrar-se em duas partes.

Esses conceitos, nessa escala, começaram a se integrar às Engenharias Mecânica e dos Materiais de vanguarda nas duas últimas décadas do século XX. Entretanto, alguns fenômenos físicos do desgaste por contato de rolamento já demonstravam evidências de irreversibilidades por malhas térmicas como as abordadas por DMITRIEV e equipe.

A título de exemplo, ao se observar um pedaço de madeira cilíndrico em processo de combustão em um fogão a lenha, ou um cilindro curto de carvão vegetal em brasa (oriundo da combustão parcial de madeira íntegra, não sinterizada), pode-se detectar, com facilidade, malhas de trincas térmicas como as apresentadas na Figura 114, no fundo da parte central de uma pista de aço AISI 52100.

No primeiro caso, o processo de difusão que tem lugar por gradiente de concentração dos materiais minerais constituintes das cinzas, considerada a porosidade do substrato, ante à temperatura adiabática de chama, gases e o ar atmosférico presente no processo e a frente de combustão, ensejam um fenômeno de transporte concentrador de cinza na interface madeira-ar, como acontece na ponta de um cigarro.

Era menos trivial a compreensão do fenômeno termomecânico que solicitava a superfície de corpos-de-prova de aço AISI 52100 SBQT e gerava danos com o aspecto da Figura 114. Para isso, isolou-se o componente de carregamento do contato mecânico, enfatizando-se a ciclagem térmica, na etapa inicial desta investigação.

Dessa forma, em colaboração com o grupo de medição de tensões residuais por difração de raios-X do IPEN-USP, MEDEIROS e colaboradores [2000-b] desenvolveram a máquina de ciclagem térmica apresentada na Figura 29, p. 77. O campo de temperaturas foi medido e as tensões térmicas cíclicas foram calculadas, variando em ciclos de duração de 20 segundos, entre uma fonte quente e uma fonte fria,

segundo os dados mostrados na Tabela 33. Cada conjunto de seis C.P. em forma de disco (diâmetro 14,8 mm, altura 5,0 mm), dispostos circunferencialmente na periferia de um disco de amianto de 150 mm, e eqüidistantes a 60°, foi ensaiado simultaneamente.

Estabeleceu-se um programa de ciclagem e medição de tensões residuais nas superfícies dos C.P. de aço, cujo aspecto de algumas microtrincas detectadas por microscopia eletrônica de varredura (SEM) está apresentado na Figura 89, p. 165. Após cuidadosa remoção do filme fino de óxido, decorrente da ciclagem térmica, para a medição das tensões residuais por difração de raios-X, o substrato apresentou trincas e o estado compressivo de tensões residuais na superfície dos C.P. decresceu de duas centenas de MPa, na condição de novos e recentemente retificados, para quatro e meia dezenas de MPa, após 2.500 ciclos, girando a 3 Hz. Um indicativo de que tensões subsuperficiais de tração era responsável pelo colapso do material.

Tabela 33. Valores medidos da temperatura no centro das faces anterior e posterior do corpo-de-prova e calculados para a tensão axial em um ciclo térmico (chama GLP - água gotejando)

Tempo em um ciclo, t [s] →	0 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s	20 s
Temperatura (*) da face anterior [°C]	100	200	600	980	620	210	100
Temperatura (*) da face posterior [°C]	120	200	420	560	440	220	120
$\sigma_{zz}(t)$ [MPa]	- 49,4	0	+444,9	+1038	+444,9	- 24,7	- 49,4
$\Delta\sigma(t)$ [MPa]	- 8	0	+ 72	+ 168	+ 72	- 4	- 8
$\sigma_{axial}(t) = \sigma_{zz}(t) = E(\theta) \cdot \alpha \cdot \Delta\theta(t) / (1 - \nu)$							
$E(t) = 1,73 \times 10^{11}$ MPa, $\alpha = 2,2 \times 10^{-5}$ °C ⁻¹ , $\nu = 0,3$							
(*) medida por termopar de Cromel-Alumel soldado por descarga elétrica ao C.P., e sinal adquirido a 1 Hz, em sistema de aquisição de dados por microcomputador							

Fonte: MEDEIROS e colaboradores [2000-b]

Com a percepção do fenômeno de ciclagem térmica aprimorada pelo desenvolvimento teórico-experimental proporcionado pelos ensaios, medidas de DRX ([ing.] XRD) executadas, análises através de microscopia eletrônica de varredura, apresentação e discussão do trabalho e seus resultados em congresso, começou-se a melhor compreender o mecanismo de dano apresentado e descrito na Figura 114.



DIREÇÃO DE ROLAMENTO DA PISTA: ASCENDENTE

Figura 114. Surgimento de malha de trincas térmicas no meio da pista de rolamento de disco antagonista de Aço AISI 52100 SBQT, após $N = 12,70$ Megaciclos (5.688 km); 114 dB; 349 K; 2,25 GPa.

[Primeiro corpo, Aço AISI 52100 OQT]

1. Pista de rolamento submetida a regime de desgaste moderado, intensificado pela longa ciclagem, integrante da área de contato real;
2. Zona de ocorrência de malhas de trincas térmicas, fortemente oxidada, no meio da pista, em que há ilhas de contato físico compondo a pista em processo de deterioração, sobrecarregando a área real de contato, crescentemente menor, expandindo as irreversibilidades;
3. Zona em que malhas de trincas térmicas iniciais foram removidas da zona de contato por ação das tensões termomecânicas locais, acelerações do disco e contato mecânico com partículas integrantes de terceiro corpo, numa espécie de *delaminação de malhas térmicas*.

As irreversibilidades nas unidades adjacentes dos materiais em contato, *vinculadas ao desgaste por rolamento cíclico*, são monotonicamente crescentes e associadas à deterioração do material, em *combinações espaço-tempo distintas*, por sobrecargas termomecânicas externas ou internas e vinculadas a mecanismos paralelos de desgaste (a exemplo da microabrasão), nucleação e propagação de microtrincas, encruamentos em processo, discordâncias, microdeformações plásticas, formações de óxidos.

A *desordem molecular*, a *homogeneização macroscópica*, a *impossibilidade de transformação* e o *equilíbrio térmico em processo*, configuram essas deteriorações, de acordo com MORIN [1977: 34-5].

5.4. Irreversibilidades na relação com o outro

*“Triste, a escutar pancada por pancada,/ a sucessividade dos segundos,/ ouço, em sons subterrâneos, do Orbe oriundos,/ o choro da Energia abandonada !
É a dor da Força desaproveitada/ – o cantochão dos dinamos profundos,/ que, podendo mover milhões de mundos,/ jazem ainda na estática do nada !.”*

Dos ANJOS, Augusto C. R. [1884-1914] O lamento das cousas. In: _____
Eu e outras poesias. 17ª. ed. Rio de Janeiro, Bedeschi, s.d., p. 203.

5.4.1. Unidades adjacentes compondo um material

Solicitado ciclicamente, um mesmo material, fabricado em um mesmo lote e constituído por subconjuntos compostos por unidades adjacentes, extraídos de um único conjunto de elementos químicos, apresenta respostas aleatórias. Tais respostas geralmente são admitidas compondo a distribuição desenvolvida por Weibull e divulgada após a Segunda Guerra Mundial: *“A resposta de um material a uma solicitação mecânica é probabilística, não determinística”* (WEIBULL [1951]).

Um material estrutural utilizado em Engenharia é integrado por um conjunto de unidades adjacentes, geralmente diferentes entre si que, sob certos limites e durante uma determinada vida, comporta-se confiavelmente como um todo contínuo.

A ampliação de diferenças entre unidades adjacentes de um material, ua_{11} , ua_{12} , ..., ua_{1a} , em contato cíclico com outro, com unidades adjacentes ua_{21} , ua_{22} , ..., ua_{2b} , ocorre sob uma combinação de cargas normais N_1 , N_2 , ..., N_c , velocidades motoras e movidas V_{MR1} , V_{MR2} , ..., V_{MRd} , V_{MV1} , V_{MV2} , ..., V_{MVd} e *irreversibilidades*

(a) *intrinsecas*, devido ao seu processamento em um certo meio, ii_1 , ii_2 , ..., ii_i

(b) *decorrentes do uso por solicitações mecânicas contínuas ou intermitentes*, iu_1 , iu_2 , ..., iu_j , e

(c) *atreladas à interação de seu uso em um ou mais meios, im_1, im_2, \dots, im_k , culminando com um ou mais colapsos localizados.*

O número de combinações possíveis entre essas variáveis cresce e tende a infinito à medida que se amplia a escala adotada: *macroscópica, microscópica, molecular*. As irreversibilidades nessas unidades adjacentes e no seu conjunto são uma função de cada uma, dentre tais combinações. A interconexão entre escalas é uma condição necessária, pois, à majoração da confiabilidade sistêmica – mas a um custo que se eleva a taxas monotonamente crescentes. A evolução da capacidade computacional tem permitido um trânsito e uma compatibilização de algoritmos entre escalas, ainda complexo, neste início de século XXI, inviável duas décadas antes do final do século XX.

5.4.2. Trincas em série e em paralelo

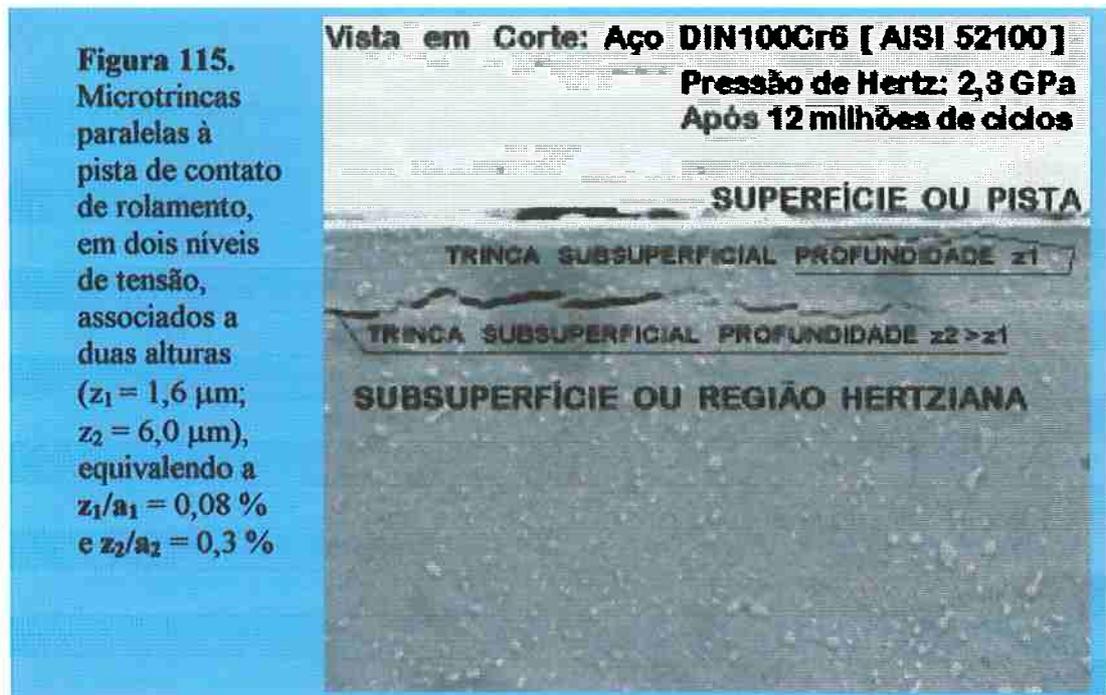
Uma fotografia (SEM-SE) de uma seção transversal à direção circunferencial de giro, típica do processo de fadiga de contato cindindo unidades adjacentes, é mostrada pela Figura 115, em que há flutuação da variável distância da trinca à pista e onde se apresentam trincas subsuperficiais em série e em paralelo à superfície.

Tais danos materializam as irreversibilidades concernentes ao processo de degradação por cisalhamento e, como apresentado no Capítulo 2, são uma função da relação $p_{m\acute{a}x}/k$, entre a pressão máxima de Hertz e o limite de escoamento do material.

Na investigação das trincas associadas à fadiga de contato, constatou-se que há três variáveis *morfológicas* significativas a serem consideradas:

- 1) A relação entre a distância, z , entre as microtrincas subsuperficiais e a superfície, e a semi-espessura da trilha de contato, a ;
- 2) a morfologia da distribuição dessas microtrincas (*em série*, quando se distanciam uniformemente da superfície da pista e *em paralelo*, quando as microtrincas subsuperficiais ocorrem a distâncias diferentes da pista);
- 3) a distância entre as microtrincas subsuperficiais.

A concentração de tensões associada ao aquecimento friccional em um contato cíclico de rolamento puro e com pequenos deslizamentos, na presença de microtrincas subsuperficiais de fadiga de contato, em série e em paralelo, foi simulada em computador por GOSHIMA e colaboradores [2001], na Universidade de Toyama, após criticarem a hipótese isotérmica geralmente assumida nas modelagens anteriores.



Houve resultados diferentes para os arranjos em série e em paralelo: os fatores de concentração de tensão na ponta da trinca aumentaram com a aproximação entre duas trincas em série mas diminuíram, com a aproximação entre duas trincas em paralelo, devido a um efeito de interferência mútua entre essas trincas.

Nos resultados de sua simulação, para o caso de duas trincas paralelas à superfície e em série, quando o coeficiente de atrito varia desde $\mu = 0,1$ até $\mu = 0,5$ e $0,7$, o fator de concentração de tensões aumenta entre 100 e 240%, para trincas próximas à superfície ($z=10\%a$, a =semi-espessura da trilha de contato) e entre 7 e 75%, para trincas afastadas da superfície ($z=50\%a$).

No caso de duas trincas paralelas à superfície e paralelas entre si, quando o coeficiente de atrito variou de $\mu = 0,1$ para $0,5$ e $0,7$, e, conseqüentemente, intensificaram-se os seus efeitos térmicos, o fator de concentração de tensões aumentou entre 7 e 70%, na ponta da trinca mais próxima, e entre 10 e 36% na ponta da trinca mais afastada ($z=50\%a$) à superfície. (GOSHIMA e colaboradores [2001])

A quantificação dos efeitos térmicos e friccionais de trincas subsuperficiais, e seu papel como concentrador de tensões, compõe um tipo de modelagem por simulação computacional cuja comprovação experimental é bastante complexa. É incluída neste

contexto para ilustrar os avanços na visualização e compreensão dos mecanismos de dano e produção de irreversibilidades no campo da mecânica do contato.

5.4.3. Delimitação de campo de modelagem do desgaste por rolamento cíclico

Após investigar o desgaste de rolamento cíclico de alguns conjuntos de materiais sob condições pré-determinadas do contato, pode-se propor uma delimitação de domínio da modelagem do fenômeno de desgaste de sólidos por rolamento cíclico pelo esquema representado pelas interconexões no espaço da Figura 116. Três zonas delimitam a modelagem do fenômeno de fadiga de contato no âmbito dessa Figura:

- 1) A zona amarela central, dos modelos determinísticos, como os citados no Quadro 8, baseados no modelo inicial de cálculo de vida de componente de Lundberg-Palmgren, que satisfazem 90% das aplicações de rolamentos e engrenagens comerciais, conforme os dados dos fabricantes, em seus respectivos manuais embora, segundo NÉLIAS [1987], não se apliquem, por exemplo, aos rolamentos de turbomáquinas que funcionam a rotações entre 10^4 e 10^5 ciclos;

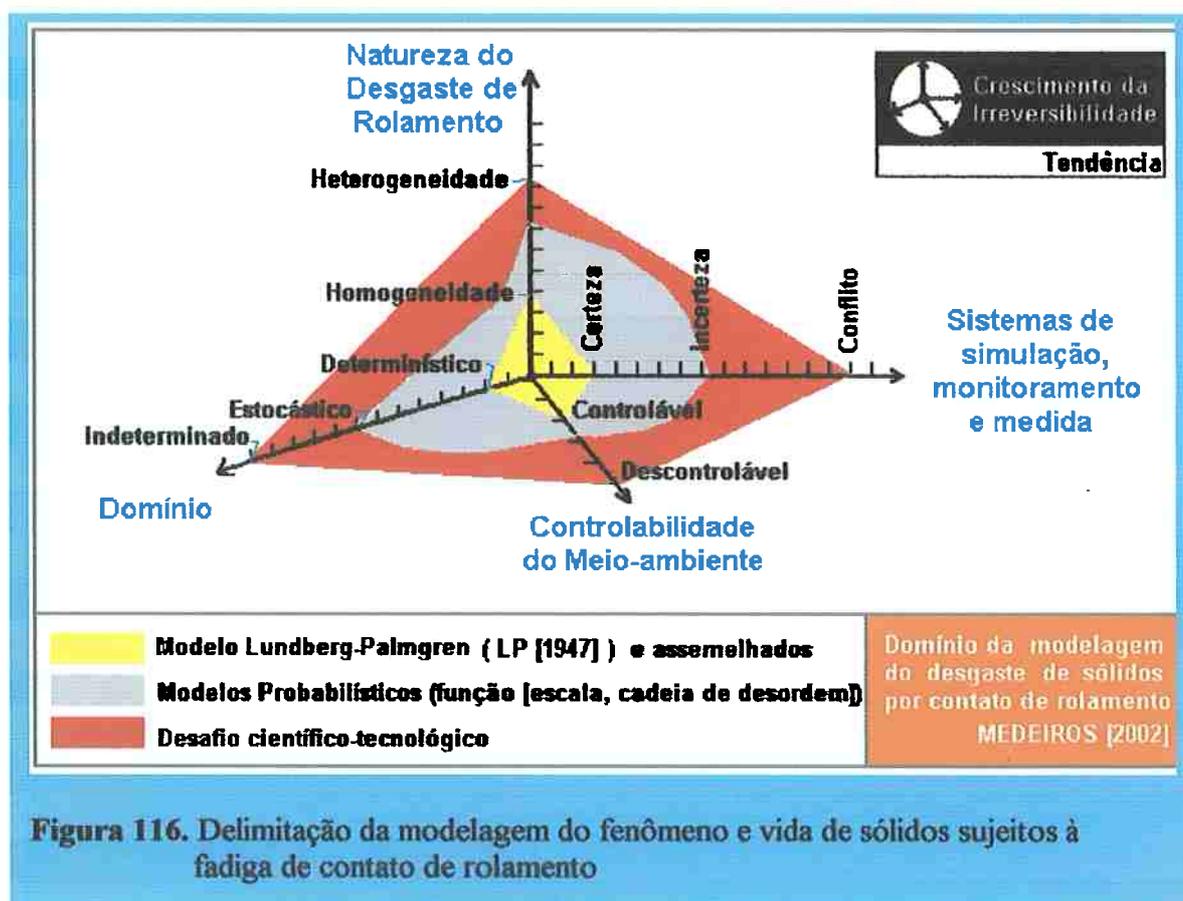


Figura 116. Delimitação da modelagem do fenômeno e vida de sólidos sujeitos à fadiga de contato de rolamento

- 2) A zona cinza intermediária, que incorpora parâmetros estocásticos do ambiente (temperatura e umidade, por exemplo), da aplicação (temperatura de contato, carga real, velocidades absolutas e relativas entre os corpos rolantes) e da instrumentação utilizada (com avaliação do erro experimental);
- 3) A zona vermelha externa, baseada na teoria da complexidade, dos sistemas longe do equilíbrio, intrinsecamente não-lineares.

5.5. Perturbações no contato de rolamento

Os sistemas em equilíbrio caracterizam-se por manter estados de equilíbrio mesmo ante as perturbações, minimizando-as ou anulando-as. Nos sistemas desequilibrados, ao contrário, as perturbações ampliam-se até modificar o estado macroscópico do sistema. Sistemas físicos reais assumem estados *perto* ou *longe do equilíbrio*. São entrópicos e susceptíveis às perturbações. [PRIGOGINE e KONDEPUDI, 1999]

Nas perturbações *mecânicas*, há flutuações de volume. Nas perturbações *térmicas*, há flutuações de temperatura e nas perturbações *devido às concentrações*, há fenômenos de transferência de massa e de quantidade de movimento, como a difusão, podendo incluir-se, ou não, reações químicas. [PRIGOGINE e KONDEPUDI, 1999]

Após investigações através de microscopia SEM e microanálise por EDS, verificou-se neste trabalho que reações químicas geralmente significativas ao desgaste por contato cíclico de rolamento a seco, e ao dano dos materiais em contato, dizem respeito ou estão associadas à formação de

- 1) filmes nanométricos (o rolamento cíclico remove-os além desta ordem) de óxidos, distribuídos na zona de osculação ou contato cíclico das pistas, ou
- 2) partículas de óxidos, sejam oriundas de inclusões remanescentes do processamento e síntese do material, sejam devidas às interações entre os pares tribológicos em estudo, como as mostradas na Figura 105(a), p. 197, na Figura 114, p. 217, intensificando a tensão local, nucleando e propagando a microtrinca mostrada em pista de cobre eletrolítico ou a malha de trincas térmicas em plena pista de rolamento.

Os critérios clássicos de resistência da Mecânica Clássica, newtoniana, baseada na hipótese do contínuo, nos fenômenos sem atrito, não incorporam efeitos locais nos

contatos de rolamento cíclico desencadeados por tais óxidos ou malhas de trincas térmicas, que podem ser responsabilizados, sob determinadas circunstâncias, por aproximar ou afastar esses sistemas tribológicos do seu equilíbrio.

Resultados interessantes foram proporcionados pelo rolamento entre pares de discos de ferro fundido nodular austemperado e nitretado. Sua microestrutura, composta por ferrita bainítica, possui nódulos de grafite, que são redutores da resistência mecânica e intensificadores de tensão. Paralelamente, os nódulos foram redutores do coeficiente de atrito e exerceram função de lubrificante sólido, atenuando a *anergia* do sistema tribológico, abaixando a temperatura de contato e o ruído.

A morfologia da apresentação do grafite no ferro fundido austemperado (ADI), assumindo as formas esferoidal ou nodular, lamelar e vermicular e seu comportamento ao desgaste por fadiga de contato de rolamento entre 1,2 e 1,4 m/s, 800 rpm, com 9,0% de deslizamento, foram investigados por HATATE e colaboradores [2001] em máquina disco-disco, com disco antagonista de aço AISI 1090 OQT (temperado a 900 °C, resfriado em óleo e revenido a 200 °C).

Esses autores adotaram como critério para a vida útil do material em contato, *na condição lubrificada com óleo para engrenagens*, o número de ciclos em que surgia uma trinca de 1,0 mm ou um pite de 1,0 mm de raio na pista de ferro fundido. Na condição seca, com final de vida não especificado, verificaram um primeiro estágio, não quantificado, de aumento na rugosidade e no desgaste das pistas, em que suas microprotuberâncias removiam-se e o contato se harmonizava, no estágio seguinte. Havia uma tendência de nucleação e propagação de trincas entre as lamelas, nesse estágio, responsável pela menor vida dentre os três ferros fundidos ensaiados.

Dos ensaios *a seco*, HATATE e colaboradores [2001] verificaram que *o ferro fundido*:

- a) **nodular** associou-se a vidas entre um e vinte Megaciclos a 2,25 GPa, e a microtrincas inferiores a 100 µm;
- b) **vermicular** apresentou trincas
 - b1) inferiores a 50 µm, em vidas entre 0,400 e dez Megaciclos, e superiores a 1,0 mm, após essa vida, a 1,76 GPa, e
 - b2) trincas inferiores a 400 µm, em vidas entre 0,400 e um Megaciclo e superiores a 1,6 mm, após essa vida, em ensaios a 2,37 GPa;
- c) **com grafite lamelar** apresentou trincas

- c1) inferiores a 300 μm , em vidas entre 0,005 e 0,010 Megaciclo, e superiores a 1,2 mm, após essa vida, a 0,97 GPa, e
- c2) inferiores a 400 μm , em vidas entre 0,001 e 0,005 Megaciclo, e superiores a 1,2 mm, após essa vida, em ensaios a 1,19 GPa.

Os ensaios lubrificados de HATATE e colaboradores [2001] seguiram essa tendência. Assim, inferiram que a *diminuição da esfericidade do grafite atrela-se ao aumento do desgaste, na condição seca, e à diminuição da resistência à fadiga de contato, na condição lubrificada*.

TERHECI e colaboradores [1995] ao ensaiarem por deslizamento sistemas pino sobre disco, ambos de ferro fundido cinzento G-3500, perlítico, verificaram que o aumento na velocidade do disco correlacionou-se com o aumento no desgaste principalmente causado por vibração. Constataram que “os resultados experimentais às vezes não representam o comportamento dos materiais em uso real porque a máquina de ensaio usada não simula com exatidão o ambiente de trabalho”.

LAZAN [1959] representa um marco importante nos estudos relativos aos espectros de amortecimento característicos de um material cristalino, que apresenta muitos picos a diferentes frequências de ressonância, como destaca PERSSON [2000, p. 490]. McCLINTOCK [1966, p. 474] já descartava a utilização de modelos viscoelásticos a níveis de tensões elevadas, os quais se distanciavam muito da realidade.

Os estudos de MURAV'EV [1975] mostraram que *o decremento logarítmico de vibrações sônicas é diretamente proporcional à taxa de amortecimento* em ligas ferro-carbono. Para variações na concentração de carbono entre 2,1 % e 3,9 %, enquanto a taxa de amortecimento aumentou três vezes, o decremento logarítmico aumentou oito vezes. Essa variação mostrou-se desprezível, entretanto, nessas concentrações, nas ligas com grafite esferoidal. Baseado nesses estudos, observou que os fenômenos difusivos motivados pela ciclagem termomecânica das pistas de contato de rolamento, constituindo-se em *forças de acionamento* para a migração do carbono, exerceram pouca influência sobre o comportamento dinâmico dos discos desses materiais.

Entretanto, na presente investigação entre discos ADI-ADI, a pressão de Hertz demonstrou ser o acionador de um efeito de extrusão dos nódulos, na faixa de 1,78 GPa a 2,61 GPa e, enquanto o desgaste mássico deteriorava a superfície, o mecanismo lubrificante dos nódulos atuava como inibidor das irreversibilidades, caracterizando o que seria um desgaste severo, caso fosse considerado o critério da variação mássica, em

um desgaste moderado, se considerados os aspectos da suavidade do contato, baixa temperatura e ruído e, pois, uma baixa *anergia* do sistema tribológico.

Em compensação, ao rolar contra discos de aço AISI M2 ou 52100, o ferro fundido nodular austemperado e nitretado demonstrou desenvolver um efeito oposto, gerando irreversibilidades através de mecanismos de desgaste de *corrugação* ou *poligonização* e, em alguns casos, desenvolvendo evidências de “*scuffing*” e *corrugação* combinados, à pressão máxima de Hertz de 2,61 GPa. Tais pares de materiais não se constituíram em sistemas recomendáveis de rolamento, embora houvesse uma aparente compatibilidade entre as durezas da camada nitretada nova (620 HV_{0,05}), na pista de ferro fundido nodular, e a dureza das pistas de aço (66 HRC), composta por martensita e carbonetos.

A Figura 117 apresenta a microdureza da camada subsuperficial de uma pista de ferro fundido nodular austemperado (ADI) nitretado, antes e após rolar 3,3 Megaciclos, sob uma pressão máxima de Hertz de 1,78 GPa. O colapso da camada nitretada é sugerido pela distribuição da medida de microdureza após o ensaio, haja vista essa distribuição na condição de pista nova.

Admite-se haver sido esse colapso da camada nitretada, com uma conseqüente iniquidade entre as durezas do disco constituinte do primeiro corpo e do disco antagonista, o promotor do aumento das irreversibilidades e migração do regime de desgaste para desgaste severo por corrugação entre os discos de aço e ADI.

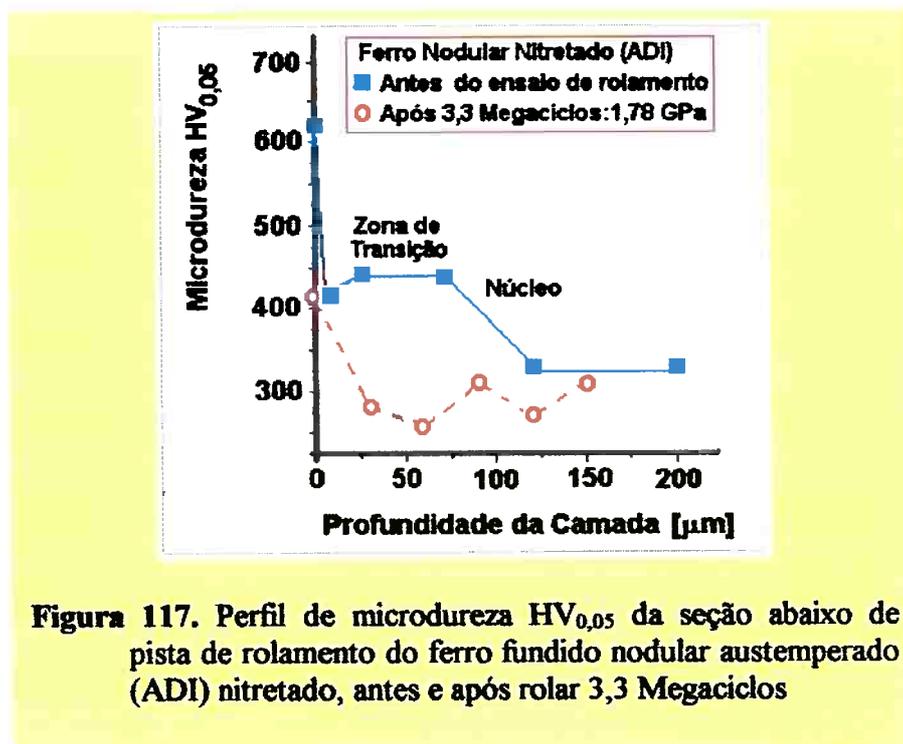


Figura 117. Perfil de microdureza HV_{0,05} da seção abaixo de pista de rolamento do ferro fundido nodular austemperado (ADI) nitretado, antes e após rolar 3,3 Megaciclos

Com a remoção gradual da camada nitretada, a microdureza $HV_{0,05}$ da pista de ADI migrou de seis para quatro centenas, enquanto a pista de aço manteve sua dureza, as irreversibilidades do contato majoraram a amplitude do sinal de NPS [dB] ao final da segunda janela, Figura 99, p. 174.

Vibrações elásticas no ferro fundido nodular são absorvidas pelos nódulos de grafite, não sendo afetadas pelo teor de carbono. A taxa de amortecimento de vibrações sônicas no ferro fundido aumenta entre 140 a 155 dB/s, no nodular, e entre 100 e 300 dB/s, no lamelar, quando o tamanho e a densidade de inclusões de nódulos de grafite aumentam, de acordo com MURAV'EV [1975], para quem defeitos de quaisquer tipos, que distorceram o reticulado cristalino e induziram tensões residuais, aumentaram a taxa de amortecimento de vibrações sônicas.

Dependendo da *energia* de entrada fornecida ao par de sólidos em rolamento, constituído pelo primeiro corpo e pelo disco antagonista, e da *anergia* de saída, tais sistemas tribológicos, como mostrado pelos dados coletados durante os ensaios disco-disco, constituem sistemas *perto* ou *longe* do equilíbrio.

LUZZI [2000: 68] apresenta o esquema da Tabela 34 para visualização de situações experimentais relativas às respostas de um sistema a uma perturbação externa.

As *taxas de variação* dessas perturbações definem o comportamento do sistema, para *perto*, ou *longe*, do equilíbrio. São essas taxas que definem os caminhos percorridos, entre estados, pelo sistema e, portanto, delineiam as *taxas de produção de entropia* de um sistema físico de rolamento.

Tabela 34. Esquemas de resposta de um sistema a uma perturbação externa

Magnitude da perturbação	ESTADO DO SISTEMA	
	<i>Perto do Equilíbrio</i>	<i>Longe do Equilíbrio</i>
<i>Fraca</i>	Resposta linear	Resposta linear de sistemas desequilibrados
<i>Forte</i>	Respostas não-lineares	Interferência entre perturbação mecânica e térmica

Fonte: LUZZI [2000, p. 68]

5.6. Taxa de produção de entropia associada à fadiga de contato e outros mecanismos de dano por contato

A expansão do ar atmosférico, de V_1 para V_2 , no entorno do contato de rolamento, mediante uma flutuação de pressão Δp nesse ar, a uma temperatura de contato T_c [K], admitida constante nessa microzona, realiza um *trabalho de fronteira* W_{ar} quantificado por

$$W_{ar} = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \quad [5.6]$$

e, considerando válida, nesse caso, a equação dos gases perfeitos $p = (R_{air} \cdot T)/V$, tem-se

$$W_{ar} = R_{ar} \cdot T_c \cdot \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{dV}{V} \right) = R_{ar} \cdot T_c \cdot \log \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = K \cdot T_c \cdot dB \quad [5.7]$$

onde K é um fator de proporcionalidade e, sendo o nível de pressão sonora NPS [dB] dado por

$$dB = 20 \cdot (\log p_e / p_o) \quad [5.8]$$

onde p_e é a raiz media quadrática do NPS [dB] e p_o é a pressão efetiva de referência, geralmente admitida como sendo 20 μ Pa (DOEBELIN [1976]) e, portanto,

$$K = 20/R_{ar} \text{ [J/K]} \quad [5.9]$$

O nível de pressão sonora [dB] e a temperatura de contato T_c [K] dependem diretamente da solicitação, da natureza e morfologia da zona de contato dos discos. As flutuações desses sinais, sabe-se das medidas de tensão residual e inspeção visual e microscópica da condição superficial das pistas e suas subsuperfícies, são fortemente influenciadas pela deterioração dos materiais por fadiga de contato em processo. Assim, é razoável admitir-se que são essas flutuações as responsáveis pelo trabalho W_{ar} produzido pela expansão do ar próximo à zona de contato.

Na zona de contato, cada material é local e ciclicamente comprimido, numa aproximação, de acordo com a teoria do potencial de Hertz. Entre dois estados 1 e 2, subseqüentes, mas não necessariamente contíguos, obedecendo a uma hipotética condição de processo quase-estático, com variação mássica e do calor específico de

cada material desprezível entre esses dois estados, há uma variação de entropia desse volume de controle dada por

$$\Delta.S = S_2 - S_1 = m.c. \int_1^2 \frac{1}{T} dT = m.c. \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad [5.10]$$

e, sob tais condições, *a variação macroscópica da entropia* de um contato cíclico de rolamento sem deslizamento, ou com deslizamento e perda mássica desprezível, entre sólidos sob compressão, pode ser considerada como *uma função apenas do campo de temperatura* entre os dois estados 1 e 2.

Seja, agora, o contato entre um par de discos de rolamento em uma máquina disco-disco confinada em uma sala isolada, como dois volumes de controle, cujas temperaturas são T_{contato} e T_{ambiente} , respectivamente. De acordo com a primeira Lei da Termodinâmica, $dU_{\text{contato}} - dU_{\text{ambiente}} = 0$, dentro da sala, isto é, a energia total se conserva no interior da sala isolada. Sempre que o desgaste por fadiga de contato tender a deslocar o equilíbrio, de modo irreversível, haverá sempre uma força propulsora na direção de um novo equilíbrio, de modo que uma nova distribuição do nível de energia assegurará uma entropia máxima local, onde a *taxa de produção de entropia*, ds/dt , pode ser definida por uma afinidade e um fluxo

$$\text{Taxa de produção de Entropia} = (\text{Afinidade}) \times (\text{Fluxo de Calor}) \quad [5.11a]$$

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{1}{T_{\text{ambiente}}} - \frac{1}{T_{\text{contato}}} \right) \frac{dU_{\text{contato}}}{dt} \quad [5.11b]$$

Pode-se afirmar, feitas tais considerações, que *o desgaste por fadiga de contato pode ser visualizado, termodinamicamente, como um processo de produção de entropia próximo ao equilíbrio*, segundo um processo quase estático, e seus mecanismos atrelam-se a trocas de energia e entropia entre o meio e o contato, como resultado da geração de:

- a) *Energia acústica*, a partir do contato cíclico entre os materiais dos discos e uma propagação de onda com *perturbação sensível no ar da circunvizinhança*, que, como hipótese simplificadora de modelagem, em relação ao fenômeno tratado, é

a primeira variável a compor a saída do sistema tribológico de rolamento, ou sua anergia, no parâmetro RW , sendo quantificada pelo nível de pressão sonora, NPS [dB];

- b) *Energia calorífica*, governada pela energia do contato e microdanos dos materiais, com propagação através da cadeia materiais em contato – máquina de ensaio – meio-ambiente e que, no desgaste devido ao rolamento cíclico, associa-se à *anergia* através da Temperatura de contato, T [K], segunda variável a compor o parâmetro RW ;
- c) *Ondas elásticas*, a partir das ondas geradas pelo comportamento dinâmico resultante dos movimentos relativos entre as microestruturas das superfícies em contato, os óxidos formados e intervenientes localmente e os microdanos, com propagação através dos membros estruturais da máquina de ensaio e sua fundação, associando-se à *anergia* do sistema tribológico através de um *mecanismo de desgaste* proeminente, vinculado a uma energia de vibração elástica por um sensor de vibração (“Trip sensor”, no presente estudo) a que se correlaciona a vida do contato, n , medida em Megaciclos de rolamento, constituinte da terceira variável de quantificação da *anergia*.

Sendo uma função de estado, diferentes valores de entropia – de irreversibilidades, portanto - estarão *necessariamente* correlacionados com caminhos diferentes percorridos e assumidos pelas energias acústica e calorífica, a que denominamos *história termoacústica do contato*.

À medida que a nucleação de microtrincas, sua propagação e presença de terceiro(s) corpo(s) na zona de contato forem interferindo nos efeitos de concentração de tensões, aumentar-se-á a probabilidade do surgimento de não-linearidades na história termoacústica do contato, nas irreversibilidades e na entropia e o processo de desgaste se agudizará, *podendo ser visualizado termodinamicamente como um processo de produção de entropia longe do equilíbrio*.

Dada a natureza probabilística da evolução dos danos nos materiais em contato (WEIBULL [1962]), entre dois níveis de energia elástica estabelecidos pelo sensor de vibração de uma máquina disco-disco (“Trip sensor”), como aquela utilizada nesta investigação, há infinitos caminhos possíveis, com diferentes combinações de respostas

térmicas e acústicas durante um ensaio, de acordo com o comportamento de cada material e a relação entrópica das suas interações.

5.7. Hipótese das elipses limites e o mapa RW de desgaste por rolamento cíclico

“O primeiro grau da consciência ... é o perceber... Parte-se de certezas sensíveis [provindas] de apercepções ou observações singulares, que devem ser elevadas à verdade ... ao se tornarem experiências.”

HEGEL, G.W.F. [1770-1831] A filosofia do espírito. In: _____ *Enciclopédia das ciências filosóficas*. São Paulo, Edições Loyola, 1995. p. 191.

A observação e a mensuração de algumas grandezas relativas ao conjunto de experimentos executado em máquina de ensaio disco-disco sugeriram associação entre o aumento do ruído e da temperatura, o mecanismo de desgaste - caracterizado pela morfologia do dano, apresentado no Quadro 7, p.190, e a redução de vida útil dos materiais em contato.

Baseado nas evidências experimentais resultantes do desgaste de diversas combinações de materiais e nas irreversibilidades discutidas, definiu-se um parâmetro de avaliação do desgaste de rolamento, a que se denominou parâmetro **RW** (“*Rolling Wear*”), estabelecendo-se uma relação entre uma variável energética de entrada e uma variável *anergética* de saída, no sistema tribológico considerado.

O modelo conceptual associa cada um dos mecanismos de desgaste do Quadro 7 a um parâmetro mensurável de desgaste por rolamento cíclico, **RW**, no qual:

- a. O numerador caracteriza a **entrada** do sistema tribológico, quantificada pela *energia específica* associada ao desgaste, dentro de um determinado intervalo de vida **n** do contato de rolamento, definido pela (s):
 - a.1. *Energia*, como uma função da *carga normal* e *velocidade máximas* solicitantes;
 - a.2. *Propriedades elásticas* dos materiais em contato;
 - a.3. *Geometria*, através da área aparente do contato;
 - a.4. A geometria do contato, a carga normal e as propriedades elásticas dos materiais estão consideradas no parâmetro $(p_o)_{\max}$, a pressão máxima de Hertz, expressa em MPa.

- b. O denominador caracteriza a *saída* do sistema tribológico, através de sua resposta em termos da *anergia* :
- b.1. *Térmica*, representada pela máxima temperatura de contato, incorporando respostas das irreversibilidades vinculadas à entrada do sistema, aos desvios de forma das pistas, às morfologias dos danos, ao atrito e ao limite de escoamento k de um ou ambos os materiais em contato;
 - b.2. *Acústica*, medida pelo máximo NPS (nível de pressão sonora), associando-se as irreversibilidades supracitadas em (b.1) à resposta do meio atmosférico circundante;
 - b.3. *De vida do contato*, representada por n , o número de milhões de ciclos sob carga, até a ocorrência de um determinado mecanismo de desgaste.

Seja, agora, a relação *entrada/saída* entre a pressão Hertziana máxima de contato e o nível de pressão sonora, $[(p_o)_{max}/NPS]$. BORESI e colaboradores [1993: 708] salientam que, diferentemente da abordagem clássica da fadiga dos materiais, níveis mais elevados de pressão Hertziana de contato associam-se a estados mais elevados de tensão de compressão e *aumentam* a resistência à fadiga do material das pistas. Entretanto, proporcionalmente à pressão máxima de Hertz, cresce a tensão de cisalhamento máximo solicitante do material e responsável pelo surgimento das trincas subsuperficiais mostradas na Figura 107, p. 201 e Figura 115, p.220.

Desta forma, a relação entre as pressões de entrada $[(p_o)_{max}]$ e de saída NPS [dB] constitui-se no *primeiro parâmetro de controle* que leva a um comportamento não-linear, com bifurcações na resposta do material ao desgaste cíclico de rolamento. Este parâmetro é, em princípio, adimensional, por se tratar de uma relação entre pressões. Expressa em unidades MPa/dB, esta relação apresenta uma faixa de variação cuja percepção é facilmente assimilável pelo senso humano comum.

Como modelado no Capítulo 2, os estudos de GREENWOOD, MINSHALL e TABOR [1961] e BENTALL e JOHNSON [1967] evidenciaram que a *resistência ao rolamento* é uma função da *perda de energia, distância de rolamento e carga normal* (expressões 2.1 e 2.4).

As expressões 2.10 a 2.12, baseadas em Poiseuille, mostraram uma variação da pressão e vazão de ar em um tubo de ar com diâmetro e rigidez definidos; na Eq. [2.13] foram fornecidas as expressões para a determinação da frequência natural e do fator de

amortecimento desse tubo de ar. Ora, o sinal da vazão de ar deslocado a partir da área real de contato define o sinal do nível de pressão sonora, NPS, a qual, como evidenciou a Figura 100, p. 175. Assim, a relação $[(p_o)_{\max}/NPS]$ é uma descritora importante do desgaste em processo.

Na equação 5.11, a taxa de produção de entropia mostrou-se ser uma função direta do fluxo de calor gerado no contato, que é uma função da energia fornecida aos sistema, e inversa da temperatura de contato, T_{contato} [K].

Feitas essas considerações e ajustando-se a faixa de variação do parâmetro a valores compreendidos entre pelo menos duas ordens de grandeza, define-se o parâmetro de desgaste por rolamento cíclico, RW , como sendo

$$RW = 30 \cdot \log \left(\frac{(p_o)_{\max} \cdot V_{\max}}{T_{\text{contato}} \cdot NPS \cdot n} \right) \quad [5.10]$$

onde cada parâmetro é considerado maior que uma unidade, com a seguinte simbologia e dimensões:

$(p_o)_{\max}$ = pressão máxima de Hertz [MPa]

V_{\max} = rotações por minuto do disco mais veloz [rpm]

T_{contato} = temperatura do contato [K]

NPS = nível de pressão sonora [dB]

n = número de ciclos [Megaciclos]

A Figura 118 associa valores de RW aos mecanismos de desgaste e pares de materiais investigados neste trabalho.

A cada regime de desgaste, associa-se uma elipse, caracterizada por um mecanismo principal de desgaste. Cada elipse possui uma fronteira dinâmica, definida pela energia elástica de vibração da estrutura da máquina de ensaio.

No presente estudo, esse sinal foi controlado pelo sensor de vibração (“trip sensor”) integrante da máquina de ensaio disco-disco, que definiu o limite de vida dos pares tribológicos, associando-os aos mecanismos de desgaste do Quadro 7.

Um relógio comparador, isolado da estrutura da máquina, com resolução suficiente para medir as amplitudes de vibração em um ponto específico da estrutura, ou um LVDT (transdutor de deslocamento linear variável) ou um acelerômetro, por exemplo,

pode exercer esse papel em sistemas mecânicos convencionais onde se deseje monitorar o desgaste de rolamento cíclico, a cada um associado um limiar e um erro inerentes.

As elipses limites no mapa da Figura 118 mostram uma tendência de *comportamento linear* ao desgaste por rolamento cíclico, estatisticamente significativa, ao nível de 95%, no âmbito dos pares tribológicos de materiais metálicos frágil-frágil e dúctil-frágil ensaiados.

Entretanto, em diversas instâncias de suas respectivas vidas, a maioria dos materiais metálicos assume um comportamento não-linear, decorrente das irreversibilidades intrínsecas, associadas ao sistema e ao meio em que se insere.

Essas não-linearidades, não incluídas no gráfico da Figura 118, apresentam-se, por exemplo, quando uma partícula de desgaste (“*debris*”), como uma dentre as mostradas nas Figuras 104, 105 e 106, respectivamente, às páginas 196, 197 e 200, desprende-se de uma das pistas de rolamento e, em função da dissociabilidade entre a natureza, geometria, propriedades e dureza dela e das matrizes que compõem as pistas, passa a exercer uma influência direta e local nas irreversibilidades associadas às unidades adjacentes do material, através de *dissipação por variação de volume, flutuação térmica* ou *cisalhamento*.

A cada uma dessas *fontes de dissipação de energia* pode se associar pelo menos um parâmetro de controle, uma não-linearidade, uma bifurcação.

Assim, a partir do esboço do parâmetro **RW** e das zonas de desgaste mapeadas no gráfico da Figura 118, pode-se formular a *hipótese das elipses limites*, as quais compõem o mapa dos regimes de desgaste por fadiga de contato no rolamento cíclico.

A curva de decaimento logarítmico que descreve a relação estatisticamente significativa [χ^2 (Qui-quadrado) = 19,49309] entre os valores de **RW** e **n** (vida em milhões de ciclos), foi ajustada através do “*software* Microcal Origin® 5.0” como sendo

$$RW = (-82,4 \pm 45,0) + (224,55689 \pm 42,39433) \cdot e^{\{-[100 \log(n) + 180] / (466 \pm 134)\}} \quad [5.11]$$

e, em termos nominais,

$$RW = \left[\frac{(p_o \cdot V)_{máx}}{T_{contato} \cdot NPS \cdot n} \right] = -80 + 220 \cdot e^{\{-[100 \log(n) + 180] / 460\}} \quad [5.11-a]$$

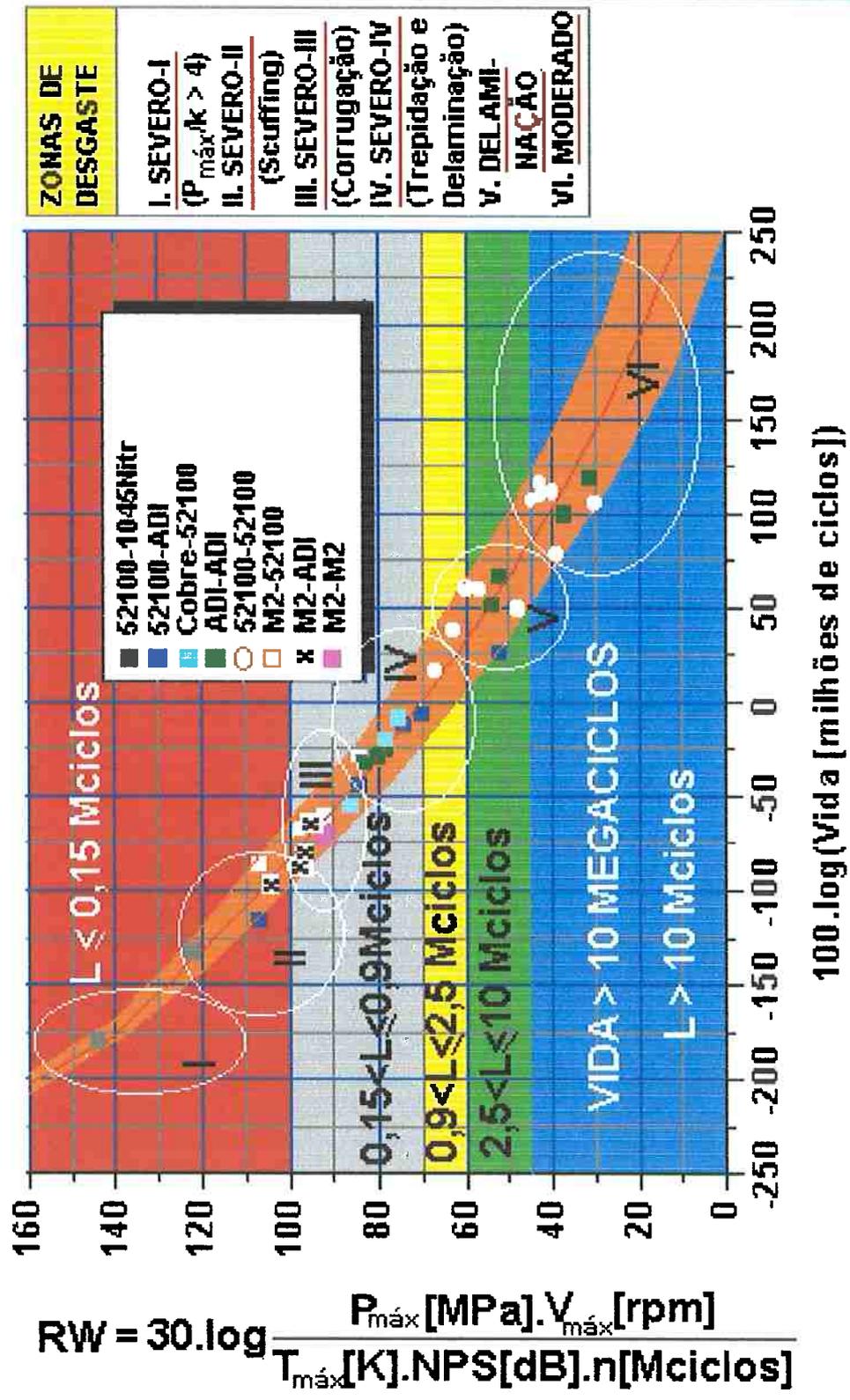


Figura 118. Mapa do parâmetro de desgaste por rolamento cíclico RW e mecanismos de desgaste associados à vida do contato

Não se tem a pretensão de estabelecer um novo paradigma, mas perseguiu-se uma convicção popular, intimamente ligada ao senso comum do oficial mecânico tradicional, desde a antiga Grécia, de que o desgaste e o colapso estão intimamente ligados “ao ruído de funcionamento, ao superaquecimento, ao uso em condições limites de carga e velocidade”.

Estabelece-se, com esta investigação, uma primeira metodologia direcionada a um início de trabalho, em que se associaram fenômenos, sistemas e conhecimento aparentemente díspares, com o objetivo de se quantificar o desgaste por fadiga de contato de materiais submetidos a contato de rolamento e associá-lo a alguns mecanismos considerados importantes à sua vida em serviço.

6

Conclusões

“...Esse novo fenômeno poderá permitir a construção de bombas extremamente potentes. Uma única bomba desse novo tipo, transportada por uma embarcação e explodindo em um porto, poderá destruir inteiramente o porto e grande parte do território adjacente... seria interessante e oportuno um contato permanente entre a alta administração do governo e o grupo de físicos que está estudando a ‘reação em cadeia’ na América... Podemos explicar a decisão de agir rapidamente desta forma pelo fato ... ”

EINSTEIN, Albert (*) [August, 2nd, 1939] Carta ao Presidente F.D. Roosevelt relativa à bomba atômica. In: MARTINS, J.B.[1987] Einstein, Fermi, Drummond e a bomba. *Matraga*, v.11 (1). Instituto de Filosofia e Letras, UERJ, maio 1987. p.58-59.

(*) Prêmio Nobel de Física

“...Você liga a motosserra, eu planto flor no cerrado. Você só anda calçado, eu piso com o pé na terra. Você quer vencer a guerra, eu quero ganhar a paz. Você busca sempre mais, eu só quero o que é meu...”

NÓBREGA, Antonio; TAVARES, Bráulio [2002] *O rei e o palhaço*. CD-rom, Faixa 1, *Antônio Nóbrega apresenta Lunário Perpétuo*. Produção independente, disponibilizada no sítio eletrônico www.trama.com.br

O desgaste por rolamento cíclico dos corpos sólidos metálicos foi investigado, teórica e experimentalmente, após se constatarem algumas variáveis e etapas sequenciais importantes produzidas por suas irreversibilidades.

Através deste estudo, desenvolveu-se:

1. Um *mapa de desgaste de rolamento* entre dois corpos sólidos metálicos, a partir de um parâmetro proposto para a quantificação da irreversibilidade termoacústica do dano decorrente do desgaste de rolamento cíclico, RW , que, associado a seis mecanismos de desgaste identificados morfologicamente, definiu a vida do contato, em Megaciclos;
2. Uma *metodologia para ensaio de pares de discos metálicos não lubrificadas*, em máquina disco-disco termoacusticamente isolada, consistindo de:

- a) Esquema de usinagem, caracterização metrológica, programação de ensaios, critério de final de vida, extração por eletroerosão, de coroas circulares (anéis) contendo as pistas de rolamento em que fica impressa uma parte importante da história de desgaste do contato, segunda usinagem da nova pista;
 - b) Critério de dano do material das pistas em seu sistema de rolamento, baseado na energia acústica da resposta do contato ao meio e análise estatística de janelas temporais do sinal, adquirido a 1 Hz, do nível de pressão sonora, NPS [dB], através do teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov;
 - c) Procedimento de coleta e análise (SEM) das partículas expelidas (“*debris*”) da zona de contato entre o primeiro corpo e o disco antagonista;
 - d) Procedimento de medição de tensões residuais nas pistas de rolamento;
 - e) Procedimento de extração, na direção radial e contendo a pista de rolamento, por eletroerosão, de pedaços de material dos discos, para constituir os corpos-de-prova para ensaios de tenacidade à fratura com entalhe “Chevron”, com entalhes nas direções de rolamento e perpendicular ao rolamento;
 - f) Procedimento de extração de vigas curvas contendo as pistas de rolamento para usinagem de entalhe com duplo “Chevron” e ensaio de flexão três pontos;
3. Um *equipamento desenvolvido para ensaio de ciclagem térmica*, a 3 rpm, de corpos-de-prova entre uma fonte quente e uma fonte fria e um procedimento associado de medição de tensões residuais para avaliação da deterioração progressiva das superfícies do material;
 4. Um *dispositivo-mesa* para apoio e posicionamento do disco no difratômetro de raios-X, assegurando-se medidas comparativas pertinentes às mesmas microzonas das pistas.

Estabelecido o método e configuradas algumas reflexões metodológicas, este estudo permitiu concluir que:

- a) As variáveis que se associaram à *vida do contato de rolamento cíclico entre duas pistas não-conformes* e a um *mecanismo prioritário de desgaste* foram a **pressão máxima de Hertz**, $(p_o)_{\max}$ [MPa], que quantifica a carga normal, a geometria e as propriedades elásticas dos materiais em contato e se associa à máxima tensão de cisalhamento atuante no material, e suas **velocidades de giro** [rpm];
- b) A *anergia do contato*, configurada pela parcela da energia mecânica solicitante do contato transportada ao meio e que acumula as irreversibilidades dos materiais do par, é representada pelos fluxos de energia *térmica, acústica e elástica* do contato ao meio, e captada pela medida da **temperatura de contato T** [K], **nível de pressão sonora NPS [dB]** e pela *energia elástica de vibração da estrutura*, detectada pelo sensor de vibração “Trip sensor”, que comandou a parada da máquina;
- c) Houve seis *mecanismos*, associados a *regimes diferentes de desgaste*:
 1. **Desgaste severo I**, contemplando indícios de “*seizure*”, em que a energia fornecida ao contato supera a sua resistência, quantificada pela relação $(p_o)_{\max}/k \gg 4$;
 2. **Desgaste severo II**, com evidência de “*scuffing*”, caracterizado por uma elevação abrupta nos gradientes temporais térmico, $\partial T/\partial t$, e acústico, $\partial \text{NPS}/\partial t$;
 3. **Desgaste severo III**, denominado de *corrugação* ou *poligonização*, em que flutuações na pressão de Hertz, em decorrência da heterogeneidade do material e suas propriedades elásticas e durezas relativas à temperatura do contato, promovem mudanças geométricas das pistas, na zona Hertziana;
 4. **Desgaste severo IV**, caracterizado por um mecanismo dinâmico de trepidação (“*chatter*”), uma função do sistema

tribológico, da amplitude e frequência da solitação e do par de materiais em contato;

5. **Desgaste por delaminação**, nos termos definidos por SUH [1973], para o desgaste dos contatos de deslizamento e ratificado por SPIKES [1986];
6. **Desgaste moderado**, em que há uma baixa *anergia do contato ao longo de sua vida*, configurada por uma temperatura de contato entre 40 e 80 °C acima da temperatura ambiente e um nível de pressão sonora entre 85 e 100 dB, medidos a uma distância de 0,80 m do contato.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

1. Estudo do desgaste por rolamento cíclico entre discos de materiais poliméricos e entre discos cerâmicos, elaborando mapas RW de desgaste para esses pares de materiais;
2. Investigação da associação entre a vida ao contato, a tenacidade à fratura em corpos-de-prova “Chevron” e a resistência à ruptura transversal em ensaios de flexão três pontos em vigas curvas extraídas das pistas, com duplo “Chevron”, de acordo com a metodologia proposta;
3. Implementação na máquina de ensaio disco-disco de um sistema de aquisição que armazene e processe, em tempo real, os sinais da carga normal, velocidades dos discos motor e movido e das energias elástica de vibração da estrutura, acústica e térmica;
4. Desenvolvimento de novos materiais e filmes finos resistentes ao desgaste cíclico de rolamento que respondam às solitações crescentes por miniaturização dos membros estruturais de máquinas e sistemas de mobilidade, maiores esforços e velocidades mais rápidas.