THAÍS DE FÁTIMA ARAÚJO

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM MACROESCLERÔMETRO PARA ANÁLISE DE REVESTIMENTOS TRIBOLÓGICOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2008

THAÍS DE FÁTIMA ARAÚJO

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM MACROESCLERÔMETRO PARA ANÁLISE DE REVESTIMENTOS TRIBOLÓGICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco
Co-orientadora: Profa. Dra. Vera Lúcia D. S. Franco

UBERLÂNDIA – MG

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A663i Araújo, Thaís de Fátima, 1983-
Instrumentação e controle de um macroesclerômetro para análise de revestimentos tribológicos / Thaís de Fátima Araújo. - 2008.
79 f. : il.

Orientador:.Sinésio Domingues Franco.
Co-orientadora: Vera Lúcia D. S. Franco.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Desgaste mecânico - Teses. 2. Tribologia - Teses. I. Franco, Sinésio Domingues. II. Franco, Vera Lúcia D. S. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 620.178.16

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

A Deus, minha força e minha inspiração.
À minha família.
Aos meus amigos.

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado o maior de todos os dons: a vida.

À minha família, pelo carinho e apoio constante.

Ao meu esposo, pelo companheirismo e incentivo nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco, pela orientação segura e motivação diária.

À Profa. Dra. Ing. Vera Lúcia D. S. Franco, pelos ensinamentos, apoio e confiança desde o período de minha iniciação científica.

Aos engenheiros Camila Monteiro Formoso, Valdir Borges Sousa Júnior, Henry Fong Hwang, Juliano Oséias Moraes, e Raphael Rezende Pires, pela inestimável colaboração e incentivo.

Ao aluno de iniciação científica, Fernando Inaoka Okigami, pela dedicação e auxílio nas fases mais complicadas do projeto.

Aos técnicos de laboratórios, Flávio Alves dos Santos e Jhonathas Ferreira Santos, que tanto contribuíram para o bom andamento deste projeto.

À equipe de trabalho do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, pela amizade e incentivo.

Aos meus amigos, que sempre me incentivaram e acreditaram em meu potencial.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

ARAÚJO, Thais F. **Instrumentação e Controle de um Macroesclerômetro para Análise de Revestimentos Tribológicos.** 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Pesquisas realizadas em países desenvolvidos indicam que de 1 a 5 % do PIB são gastos direta ou indiretamente no reparo de peças e componentes devido à ação do desgaste. O desgaste abrasivo é responsável por 50% dessas falhas, o que lhe confere grande importância econômica. Isso tem motivado o desenvolvimento de inúmeras técnicas, equipamentos e procedimentos de teste, que simulem situações de campo, visando à diminuição das perdas com o desgaste. No presente trabalho são apresentadas as etapas da instrumentação, controle e validação de um desses equipamentos, o macroesclerômetro. Este equipamento é utilizado na análise do desempenho de revestimentos tribológicos utilizados na construção mecânica. A técnica empregada, a esclerometria, consiste na reprodução da ação de uma única partícula abrasiva. Através dessa técnica, pode-se avaliar a morfologia da deformação devido à interação de partículas duras com superfícies técnicas, o atrito aparente, as mudanças de mecanismos de desgaste, a energia específica de riscamento, a dureza ao risco, bem como a adesividade de revestimentos a substratos. Nesse último caso, revestimentos são riscados com cargas normais crescentes, com o objetivo de se identificar cargas críticas, a partir das quais os revestimentos começam a ser destacados do substrato. A associação do macroesclerômetro a um sistema de emissão acústica permite, ainda, que a identificação de cargas críticas de riscamento se torne mais simples, quando comparada com equipamentos convencionais utilizados para essa finalidade. Os resultados obtidos através de ensaios realizados em amostras revestidas, sendo o principal revestimento o Níquel-Fósforo químico, atestaram a eficácia da técnica na investigação de propriedades de revestimentos tribológicos.

Palavras-chaves: Esclerometria, emissão acústica, macroesclerômetro, instrumentação e controle.

ARAÚJO, Thais. F. **Instrumentation and Control of Macrosclerometer to Analyze Tribological Coantings.** 2008. 76 f. Master Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Researches accomplished in developed countries indicate that from 1 to 5% of the gross domestic product (GDP) is spent direct or indirectly to repair parts and components due to the action of wear. The abrasive wear is responsible for 50% of those failures. That has motivated the development of various techniques, equipment and test procedures to simulate field situations. The objective of this work is to present the development, instrumentation, control and validation of an equipment to simulate the scratching action of an indenter. This technique is called sclerometry. By using this technique, the deformation morphology close to wear events can be evaluated due to the interaction of hard particles with technical surfaces. Additionally, the apparent friction coefficient, changes on the wear mechanisms, specific scratching energy and hardness, as well as the adhesiveness of coatings may determined. In this case, coatings are scratched with increasing normal loads, so that one can identify critical loads, from which the coatings begin delaminate from the substrate. The association of this technique with an acoustic emission system helps to identify these critical loads. Results obtained in these work using electroless nickel and other hardfacing coatings attested the effectiveness of this technique when investigation the tribological behavior of hard coatings.

Keywords: Sclerometry, acoustic emission, macrosclerometer, instrumentation and control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Processos de desgaste abrasivo: (a) Desgaste abrasivo a dois corpos ou por deslizamento (b) Desgaste abrasivo a três corpos ou por rolamento. 5

Figura 1.2: Representação esquemática do Micromecanismos: (a) Microssulcamento, (b) Microcorte ou microriscamento, (c) Microtrincamento (ZUM GAHR, 1987). 6

Figura 1.3: Relação entre a proporção corte/sulcamento e a relação entre o ângulo de ataque e o ângulo de ataque crítico (ZUM GAHR, 1987).....8

Figura 1.4: Alguns tipos de penetradores e suas respectivas áreas de pressão utilizadas no cálculo da dureza ao risco de materiais: a) Penetrador Vickers riscando com a aresta, b) Penetrador Vickers riscando com a face e c) Penetrador Rockwell-C (Williams, 1996). 9

Figura 1.5: Formação de trincas medianas e laterais em materiais frágeis em função da indentação de um penetrador ideal (ZUM GAHR, 1987). 10

Figura 1.6: Princípio de funcionamento do processo de emissão acústica (www.ndt.net/article/az/ae_idx.htm>).....13

Figura 1.7: Esquema da propagação das ondas acústicas em um substrato (<http://www.acousticemission.net/background.asp>). 13

Figura 1.8: Forma de onda de um sinal proveniente de um processo de emissão acústica (http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Signal%20Features.htm). 14

Figura 1.9: Modelagem de um sistema de macroesclerometria (PIOTRKOWSKI et al., 2004). 15

Figura 1.10: Diferentes estágios de evolução de trincas, obtidos através da energia acumulada do sinal de emissão acústica em uma amostra de TiN (PIOTRKOWSKI et al., 2005) 16

Figura 1.11: Sinal acústico em função da carga depositada no filme. Diferenciação desses valores pelo diferente pH (WU; DUH, 2002). 17

Figura 1.12: Curva de um ensaio de desgaste de um substrato de Al_2O_3 com revestimento multicamadas de Au/NiCr/Ta (WU et al., 2004). 18

Figura 2.1: Detalhamento construtivo do macroesclerômetro. 20

Figura 2.2: Motor e unidade de controle utilizados no macroesclerômetro (a) Motor de passo HT23-397 (b) Unidade de controle 3540i (<http://www.applied-motion.com>)..... 21

Figura 2.3: Células de carga utilizadas para mensuração dos valores dos esforços normais e tangenciais. (a) Célula de carga de medição da força normal, (b) Célula de carga de medição da força tangencial. (<http://www.hbm.com/pt/menu/produtos/transdutores-sensores/forcetransducers/>).....22

Figura 2.4: Condicionador dos sinais das forças normal e tangencial. 23

Figura 2.5: Detalhes da montagem das chaves de fim de curso do macroesclerômetro: (a) Chaves de fim de curso localizadas na plataforma superior, (b) Chaves de fim de curso localizadas na plataforma inferior. 23

Figura 2.6: Sensor piezelétrico utilizado para mensurar o sinal acústico e seu porta-sensor. (a) Sensor piezelétrico (b) Porta-sensor (<http://www.pacndt.com/>). 24

Figura 2.7: Pré-amplificador do sistema de emissão acústica, PCI-2 da PAC. 24

Figura 2.8: Placa de aquisição do sinal acústico. 25

Figura 2.9: Gráfico de calibração da distância em relação à força normal máxima. 27

Figura 2.10: Fluxograma do programa de controle do processo de macroesclerometria, em sua primeira etapa. 28

Figura 2.11: Interface provisória do programa de controle do macroesclerômetro. 29

Figura 2.12: Aba do programa de controle, utilizada para o fornecimento de dados para execução de um ensaio de macroesclerometria. 30

Figura 2.13: Aba utilizada para acompanhar e visualizar ensaios de macroesclerometria. 31

Figura 2.14: Interface utilizada para fornecimento de dados para movimentação da mesa superior ou inferior. 33

Figura 2.15: Fluxograma definitivo do programa de controle do macroesclerômetro. 34

Figura 3.1: Geometria das amostras ensaiadas no macroesclerômetro. 37

Figura 3.2: Aspecto dos revestimentos analisados na primeira fase de validação. 38

Figura 3.3: Risers de completação utilizados na extração de petróleo. 39

Figura 3.4: Amostra de Ni-P químico utilizada na validação do macroesclerômetro associado ao sistema de aquisição do sinal acústico: (a) Dimensão da amostra, (b) Amostra revestida. 40

Figura 4.1: Gráfico dos três ensaios realizados na amostra revestida com WC-10Co-4Cr. 43

Figura 4.2: Fotos com os detalhes do ensaio de macroesclerometria realizado na amostra revestida com WC-10Co-4Cr. (a) Vista geral do primeiro risco. (b) Início do primeiro risco. (c) Região central do risco. (d) Final do primeiro risco. (e) Detalhe de uma das trincas no final do primeiro risco.....44

Figura 4.3: Análise da composição química de uma das regiões da amostra revestida com WC-10Co-4Cr. (a) Regiões analisadas. (b) EDS da região.....45

Figura 4.4: Gráfico com as curvas dos esforços normal e tangencial, durante o processo de riscamento da amostra revestida com Ni18Cr6Al. 46

Figura 4.5: Detalhes do terceiro risco produzido na amostra revestida com Ni18Cr6Al. (a) Vista geral do terceiro risco da amostra. (b) Início do terceiro risco. (c) Região central do risco. (d) Final do risco 3. 46

Figura 4.6: Gráficos dos ensaios de macroesclerometria na amostra revestida com Stellite 6. 47

Figura 4.7: Trincas ao longo do terceiro risco realizado na amostra revestida com Stellite 6: (a) Vista geral do terceiro risco, (b) Detalhe do início do risco, (c) Detalhe da região central do risco, (d) Final do terceiro risco. (e) Detalhe do final do terceiro risco. 48

Figura 4.8: Gráfico resultante do processo de riscamento da amostra revestida com Mo. 49

Figura 4.9: Detalhes do segundo risco realizados na amostra revestida com Mo: (a) Vista geral do segundo risco, (b) Início do segundo risco, (c) Detalhe da região central do segundo risco, (d) Final do segundo risco, (e) Detalhe do final do segundo risco. 49

Figura 4.10: Microestrutura da amostra revestida por Mo. 51

Figura 4.11: Análise da composição química de uma das trincas da amostra revestida com Mo. (a) Região 1, dentro da trinca. (b) EDS da região 1. 51

Figura 4.12: Coeficiente de atrito médio das amostras ensaiadas na primeira fase de validação do equipamento 52

Figura 4.13: Variação dos sinais adquiridos durante o ensaio de macroesclerometria: força normal, força tangencial e sinal acústico. 53

Figura 4.14: Trincas ao longo do primeiro ensaio de macroesclerometria realizado na amostra revestida com Ni-P químico. (a) Comportamento do sinal acústico no decorrer do primeiro ensaio. (b) Ampliação da primeira região. (c) Ampliação da segunda região. (d) Ampliação da terceira região. 54

Figura 4.15: Comportamento dos sinais de controle durante o segundo ensaio de macroesclerometria. 55

Figura 4.16: Trincas ao longo do segundo risco produzido pelo ensaio de macroesclerometria. (a) Comportamento do sinal acústico comparado com o

surgimento de trincas durante o ensaio. (b) Ampliação da região 1. (c) Ampliação da região 2. (d) ampliação da região 3. 56

Figura 4.17: Variação dos sinais adquiridos durante o terceiro ensaio de macroesclerometria. 57

Figura 4.18: Trincas presentes no sulco originado a partir do terceiro ensaio de macroesclerometria. (a) Variação do sinal acústico em relação ao surgimento de trincas ao longo do risco. (b) Detalhe região 1 do terceiro risco. (c) Detalhe região 2 do terceiro risco. (d) Detalhe da região 3 do risco. (e) Detalhe da região 4 do risco. 58

Figura 4.19: Variação dos sinais adquiridos durante o quarto ensaio. 59

Figura 4.20: Trincas produzidas através do ensaio de macroesclerometria na amostra revestida com Ni-P químico. (a) Sinal de emissão acústico em relação à vista geral do risco produzido. (b) Ampliação da região 1. (c) Ampliação da região 2. (d) Ampliação da região 3. 60

Figura 4.21: Análise da composição química de uma trinca profunda da amostra revestida com Ni-P. (a) Região analisada. (b) Resultado da análise da região 1 da trinca. ...61

Figura 4.22: Ensaios de macroesclerometria realizados à velocidade de 50 μm/s. 63

Figura 4.23: Ensaios de macroesclerometria realizados a 100 μm/s. 65

Figura 4.24: Ensaios de macroesclerometria realizados a 200 μm/s. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química das amostras ensaiadas. 38

Tabela 3.2: Parâmetros dos ensaios de validação do sistema de macroesclerometria associada à aquisição da emissão acústica. 40

Tabela 3.3: Parâmetros dos ensaios de investigação da influência da velocidade, em ensaios de macroesclerometria. 41

Tabela 4.1: Análise química dos revestimentos de Ni-P químico. 53

Tabela 4.2: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de macroesclerometria com aquisição do sinal acústico. 62

Tabela 4.3: Comparação dos resultados obtidos na análise da influência da velocidade nos ensaios de macroesclerometria. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A/D: Conversão analógica digital

A_{LB}: Largura do risco

Al_2O_3: Óxido de alumínio

ASTM: American Society for Testing and Materials

BNC's: Bayonet Neill-Concelman

c: Comprimento de uma fissura

C: Extensão da trinca lateral

dB: Decibel

E: Módulo de elasticidade

F: Força necessária para abrir ma trinca

FN: Força normal [N]

F_t: Força tangencial [N]

F_{tmin}: Força tangencial mínima

H: Dureza [GPa]

h_i: Profundidade da trinca lateral

H_s: Dureza ao risco [GPa]

H_v: Dureza Vickers [GPa]

H.V.O.F: High Velocity Oxy-Fuel

K: Coeficiente de concentração de tensões

K_c: Coeficiente de concentração de tensões críticos

MEV: Microscópio eletrônico de varredura

V_t: Volume de matéria removida

w: Largura do risco

μ: Coeficiente de atrito

σ: Tensão normal

γ: Constante dependente da geometria e orientação do penetrador

λ: Constante dependente da geometria e orientação do penetrador

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **1**

CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **4**

1.1 A Tribologia 5

1.2 A esclerometria retilínea 7

1.3 A Teoria da emissão acústica 13

1.4 A emissão acústica como técnica complementar à macroesclerometria retilínea 15

CAPÍTULO 2 – INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM MACROESCLERÔMETRO **19**

2.1 Instrumentação do macroesclerômetro 20

2.2 Calibrações do equipamento 25

2.2.1 Deslocamento das plataformas de movimentação 25

2.2.2 Força normal e força tangencial 26

2.2.3 Deslocamento do peso morto 27

2.3 Programa de controle do macroesclerômetro 27

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL **36**

3.1 Ensaios de validação do sistema de macroesclerometria sem o sistema de aquisição do sinal acústico 37

3.2 Ensaios de validação do sistema de macroesclerometria associado ao sistema de aquisição da atividade acústica 39

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES **42**

4.1 Ensaios de macroesclerometria sem aquisição do sinal acústico 43

4.2 Ensaios de macroesclerometria com aquisição do sinal acústico 52

4.3 Investigação da influência da velocidade de riscamento nos ensaios de macroesclerometria 62

CONCLUSÕES **69**

TRABALHOS FUTUROS **71**

REFERÊNCIAS **73**

Introdução

O desgaste é definido, pela O. E. C. D. (Organization for Economic Cooperation and Development), como sendo a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo proveniente do movimento relativo de um outro corpo sobre o primeiro (ROWE, 1976). Pesquisas realizadas em países desenvolvidos apontam que de 1 a 5 % do PIB são gastos na reparação de ações diretas e indiretas provocadas pelo desgaste.

Os principais tipos de desgaste são:

- Desgaste por deslizamento;
- Desgaste por abrasão ou abrasivo;
- Desgaste por erosão ou erosivo;
- Desgaste por fadiga de contato;
- Desgaste por triboreação.

Dentre os vários tipos de desgaste, o abrasivo é tido como o principal responsável pela degradação de peças e componentes em diversos ramos da indústria. Este tipo de desgaste é responsável por cerca de 50% das falhas, o que lhe confere grande importância econômica (EYRE, 1976).

Tais dados motivam o desenvolvimento de inúmeros equipamentos e técnicas que simulem ou reproduzam o que ocorre no ambiente industrial. Dentre as técnicas, destaca-se a esclerometria, e dentre os equipamentos, o macroesclerômetro.

A esclerometria é uma técnica que estuda o desgaste abrasivo através de contatos elementares. Neste caso, as partículas abrasivas são assemelhadas a penetradores duros, de geometria simples e conhecida, que interagem com as superfícies a serem investigadas. Estas condições, muito embora idealizadas, permitem a utilização de modelos simples, podendo contribuir para a compreensão de aspectos fundamentais do processo abrasivo. Assim, pode-se determinar esforços atuantes sobre diferentes fases constituintes do material, a dureza ao risco, a energia específica e o índice de fragilidade, a partir de considerações da mecânica do contato, para cada fase considerada isoladamente.

O macroesclerômetro, equipamento utilizado para realizar ensaios macroesclerométricos, permite o estudo da morfologia da deformação na superfície da amostra com a ação de um penetrador, que realiza um risco na amostra mediante um esforço normal crescente aplicado no elemento que realiza o risco.

A atividade acústica, fenômeno bastante interessante, é descrito como sendo a energia elástica liberada por um material quando este sofre um estímulo externo, como, por exemplo, de formação ou fratura (<http://www.ndted.org/EducationResources/Community College/Other%20Methods/AE/AE_Intro.htm >). Neste trabalho, a aquisição do sinal acústico será utilizada como uma técnica complementar à macroesclerometria, no auxílio da determinação da carga crítica. A carga crítica é o esforço necessário para romper um revestimento de seu substrato.

Para o estudo de um revestimento, em um macroesclerômetro, parâmetros como o esforço normal aplicado na amostra e a atividade acústica da amostra durante o ensaio são de extrema importância. A comparação desses parâmetros permite a determinação da carga crítica.

O presente trabalho tem por objetivo instrumentar, controlar e validar um macroesclerômetro, associado a um sistema de emissão acústica, para análise de revestimentos tribológicos. Esse processo deu ao macroesclerômetro a capacidade de realizar esforços normais com cargas crescentes sobre o penetrador de maneira automatizada, possibilitando o controle de todas as fases do processo, além da capacidade de adquirir e armazenar os sinais da força normal, força tangencial e da atividade acústica.

Para melhor compreensão da metodologia utilizada, é apresentada, a seguir, a descrição dos capítulos subseqüentes desta dissertação.

O capítulo I apresentada a revisão bibliográfica que aborda o processo de macroesclerometria, a emissão acústica e exemplos de aplicação da técnica na análise de revestimentos tribológicos.

O capítulo II apresenta detalhadamente o processo de instrumentação e controle do macroesclerômetro.

O procedimento experimental, com uma completa descrição das amostras ensaiadas e do método de ensaio utilizado, é apresentado no capítulo III.

Os resultados e discussões dos ensaios realizados para validação do equipamento são apresentados no capítulo IV.

Em seguida, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, são enumeradas as referências bibliográficas deste trabalho.

Capítulo I

Revisão bibliográfica

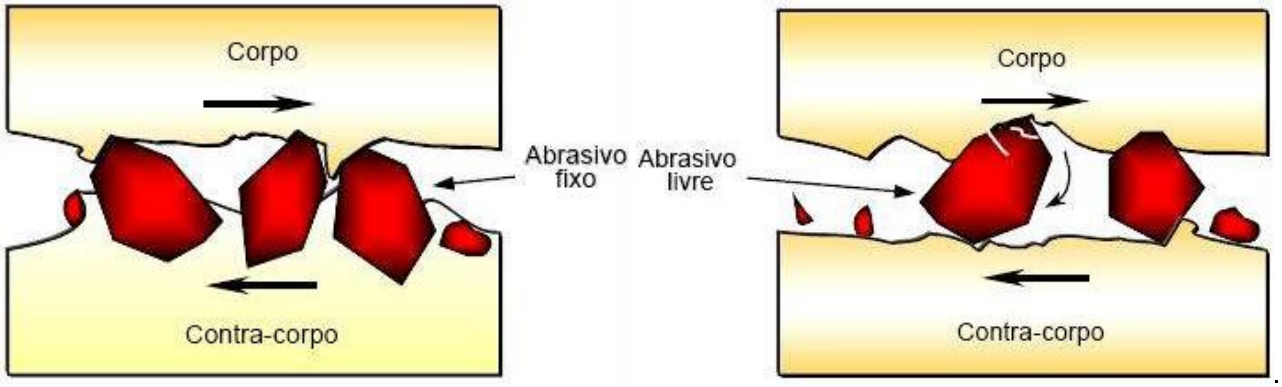
1.1 A tribologia

A tribologia é a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS,1992). Esta ciência é fundamentada em três pilares: o atrito, o desgaste e a lubrificação.

Segundo a O. E. C. D., o desgaste é definido como a perda de matéria na superfície de um corpo proveniente do movimento relativo de um segundo corpo sobre o primeiro.

O desgaste abrasivo é um fenômeno interfacial complexo, no qual partículas ou asperidades duras penetram na superfície do material mais mole, gerando a perda de matéria, quando existe a movimentação relativa entre as superfícies (FRANCO, 1989).

O desgaste abrasivo, grande responsável pela degradação de peças e componentes industriais, pode ocorrer de várias formas. O chamado desgaste abrasivo a dois corpos ou por "deslizamento" é causado basicamente por protuberâncias na superfície de contato, enquanto o desgaste a três corpos ou por rolamento é provocado por partículas duras livres, que rolam e deslizam entre dois corpos (HUTCHINGS, 1992). A figura 1.1 apresenta de forma esquemática esses processos de desgaste abrasivo.



a) Desgaste abrasivo a dois corpos ou por deslizamento.

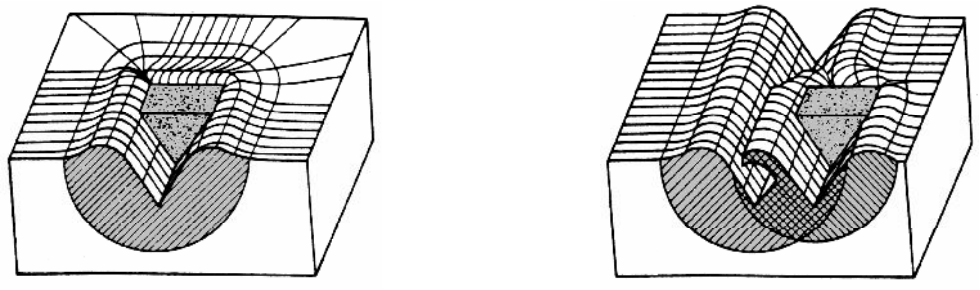
b) Desgaste abrasivo a três corpos ou por rolamento.

Figura 1.1: Processos de desgaste abrasivo.

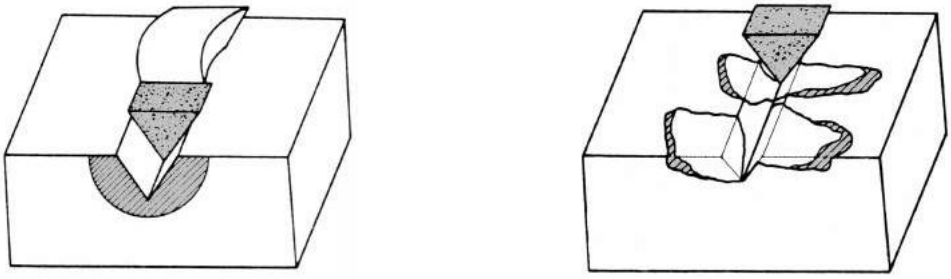
Segundo Hutchings (1992), a taxa de desgaste é normalmente menor no desgaste por rolamento de partículas abrasivas. O processo envolvendo rolamento pode, eventualmente, se transformar em um processo a dois corpos se a partícula dura penetrar e ficar engastada em uma das superfícies, geralmente a mais mole. Neste caso, a taxa de desgaste é maior na superfície de maior dureza (AXÉN; JACOBSON; HOGMARK, 1994, FRANCO, 1996, BOZZI; DE MELLO, 1999).

Em processos de desgaste abrasivo é importante definir os tipos de micromecanismos de desgaste operantes. O tipo de mecanismo define os processos de interação entre o abrasivo ou asperidade dura e a superfície desgastada (BARROS; DE

MELLO, 2006). Os tipos de micromecanismos de desgaste estão esquematizados na figura 1.2, a seguir.



a) Microssulcamento



b) Microcorte ou Microriscamento

c) Microtrincamento

Figura 1.2: Representação esquemática dos Micromecanismos (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Zum Ghar (1987), o microssulcamento ocorre entre a partícula e o abrasivo em condições dúcteis. Esse mecanismo consiste, basicamente, no deslocamento total do volume de material deformado plasticamente para as laterais do sulco formando saliências. Durante o microssulcamento não há perda de material efetivo, conforme observado na figura 1.2 (HUTCHINGS, 1992, STACHOWIAK, 2001, BARROS; DE MELLO, 2006). Porém, se durante a abrasão as condições de desgaste levarem a um regime de sucessivos processos de microssulcamento, poderá haver perda de material durante o processo (ZUM GAHR, 1987).

Quando as condições de desgaste não permitem grandes níveis de deformação plástica, o micromecanismo predominante será o microcorte ou microriscamento.

No mecanismo microcorte, a perda de massa ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo. Se as condições favorecem o microcorte puro, o volume de material perdido é igual ao volume do risco produzido.

Os mecanismos de microcorte e microssulcamento são interações dominantes na maioria das vezes em materiais dúcteis (ZUM GHAR, 1987), caracterizando o regime dúctil da abrasão.

Quando altos níveis de concentrações de tensão são impostas ao material, particularmente na superfície de materiais duros pelas partículas, ocorrerá microtrincamento.

No microtrincamento, a interação entre uma partícula dura e o material leva ao destacamento de grandes fragmentos. Os fragmentos formados são maiores que a dimensão do próprio risco; isso acontece devido à formação e à propagação de trincas durante o evento. Este mecanismo é típico de condições frágeis de desgaste. Quando altos níveis de concentrações de tensão são impostas ao material pelas partículas, particularmente na superfície de materiais duros, ocorrerá o microtrincamento.

Várias são as abordagens possíveis para o estudo do desgaste abrasivo. A análise experimental é feita normalmente por duas formas distintas: a global e a local.

A análise global utiliza técnicas abrasométricas, e o sistema nessa abordagem é avaliado anteriormente e posteriormente ao fenômeno abrasivo, sendo as modificações ocorridas no sistema atribuídas ao ensaio realizado. Na análise local, em que se tenta compreender os aspectos básicos do desgaste abrasivo, são utilizadas duas técnicas: a esclerometria, que procura simular o processo abrasivo pela ação de penetradores duros sobre o material de estudo (FRANCO, 1989), e a indentação instrumentada, sendo a esclerometria a mais importante.

Devido à complexidade do processo abrasivo, não se tem a informação de um dispositivo experimental que permita estudar os fenômenos envolvidos em um processo de abrasão em todos os seus diferentes aspectos. Na verdade, o que existe são vários aparatos ou testes, muitas vezes específicos, para simular algumas situações em que ocorre abrasão (NOGUEIRA, 1988). Dentre estes testes, o objeto deste estudo é a esclerometria retilínea, descrita na seção seguinte.

1.2 A esclerometria retilínea

A esclerometria se baseia no fato de o desgaste abrasivo poder ser considerado como um processo de riscamento múltiplo. Deste modo, seu modelo é baseado na ação de partículas abrasivas isoladas. Essas partículas abrasivas se assemelham a elementos riscantes duros de geometria simples e conhecida. Estas condições, muito embora idealizadas, permitem a utilização de modelos simples, podendo contribuir para a compreensão de aspectos fundamentais do processo abrasivo (FRANCO, 1989).

Basicamente, o esclerômetro, que realiza a esclerometria retilínea, é um dispositivo constituído de um sistema de translação linear de uma amostra que será riscada por um penetrador.

O ângulo de ataque é um parâmetro do elemento riscante ou penetrador que tem grande influência no mecanismo de desgaste. Ele é o ângulo formado entre a superfície

frontal do penetrador e a superfície da amostra (MULHEARN; SAMUELS, 1962, SEDRIKS; MULHEARN, 1964, LAWN; FULLER, 1975). A figura 1.3 correlaciona a proporção corte/sulcamento com o ângulo de ataque de uma partícula dura.

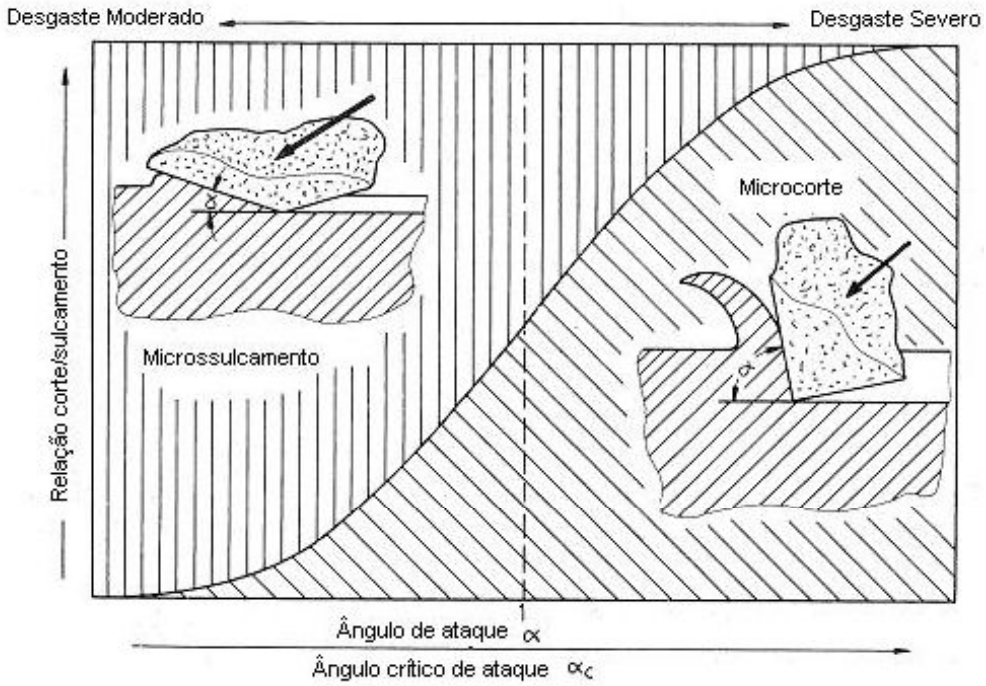


Figura 1.3: Relação entre a proporção corte/sulcamento e a relação entre o ângulo de ataque e o ângulo de ataque crítico (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Mulhearn e Samuels (1962), Sedriks e Mulhearn (1964) e Lawn e Fuller (1975), o material da superfície é removido por microcorte quando o ângulo de ataque da partícula dura é maior que um valor crítico. Por meio da figura 1.3, percebe-se que, quanto menor o ângulo de ataque, maior a tendência de se ter o micromecanismo de microssulcamento e, conseqüentemente, menores taxas de desgaste. Do mesmo modo, nota-se que, quanto maior o ângulo de ataque da partícula abrasiva, maior a probabilidade de se ter o microcorte como micromecanismo de desgaste. A transição entre microcorte e microssulcamento depende das propriedades do material riscado e de condições operacionais.

A fim de se padronizar ensaios de esclerometria, comumente se utilizam penetradores de ensaios de dureza para representar a partícula abrasiva. Os penetradores mais empregados são o Brinell, de formato esférico, o Rockwell-C, de formato cônico, e as pirâmides Vickers (NOGUEIRA, 1988). A figura 1.4 apresenta de forma esquemática os penetradores citados acima.

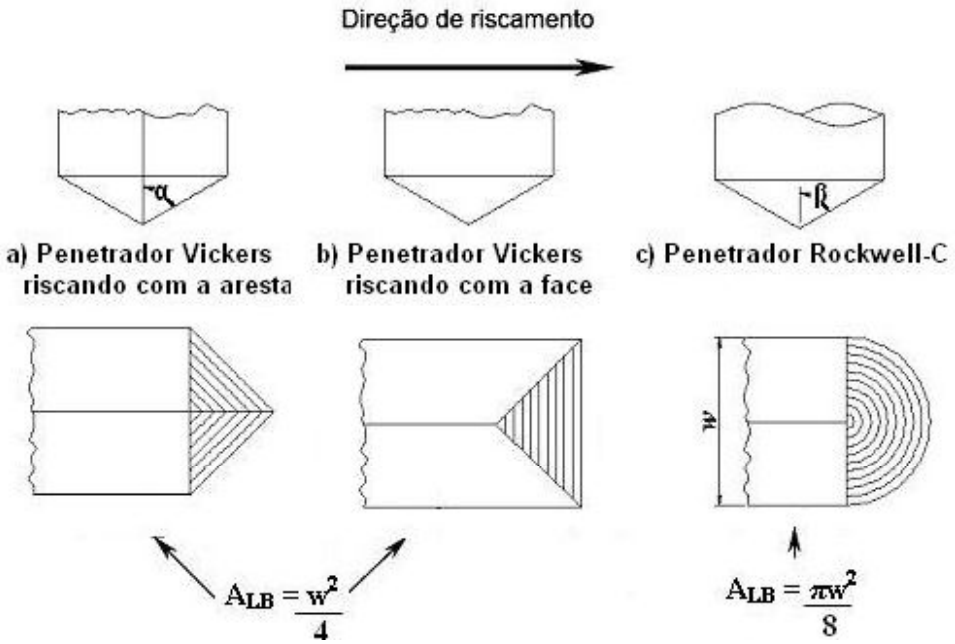


Figura 1.4: Alguns tipos de penetradores e suas respectivas áreas de pressão utilizadas no cálculo da dureza ao risco de materiais (WILLIAMS, 1996).

Segundo Nogueira (1988), os penetradores utilizados em ensaios esclerométricos podem ser separados em duas categorias: a dos penetradores obtusos e a dos agudos. A primeira categoria é representada pelos penetradores esféricos, hemisféricos e cilíndricos. A ação destes penetradores tem seu estudo baseado no campo de tensões de Hertz. Já na segunda categoria, enquadram-se os penetradores cônicos e piramidais.

As situações de contato, em que uma superfície sofre degradação, são mais fielmente representadas pela atuação de penetradores agudos. Nessas simulações, verifica-se que as impressões residuais são semelhantes geometricamente, sendo a pressão de contato independente das dimensões da impressão. Por essas razões, os penetradores agudos são mais adequados no estudo de desgaste e os obtusos no estudo do atrito (NOGUEIRA, 1988).

A figura 1.5 esquematiza diferentes tipos de trincas formadas durante o carregamento e descarregamento durante uma indentação. A compreensão deste mecanismo é importante porque se pode considerar que as trincas laterais, que surgem no riscamento, são semelhantes às radiais formadas ao redor de uma indentação Vickers (NOGUEIRA, 1988).

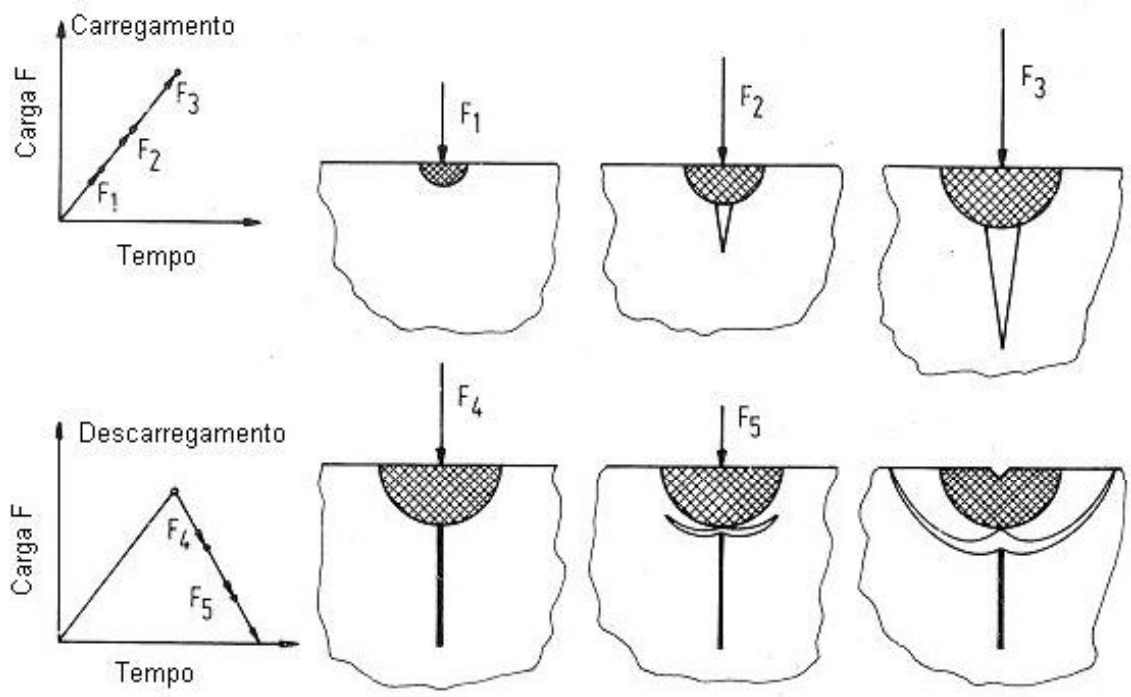


Figura 1.5: Formação de trincas medianas e laterais em materiais frágeis em função da indentação de um penetrador ideal (ZUM GAHR, 1987).

Segundo a figura 1.5, primeiramente um aumento no carregamento provoca um aumento no tamanho da zona de deformação plástica, ao redor e abaixo do local da indentação. A trinca radial é formada quando a carga excede um determinado valor de força. À medida que a força de carregamento vai aumentando, as trincas radiais vão crescendo em profundidade. Durante o descarregamento, as trincas radiais vão fechando e as trincas laterais são formadas e propagadas na superfície. Um recarregamento imediato faria com que trincas laterais fossem fechadas e que trincas radiais reabrissem. O aparecimento de trincas laterais durante o descarregamento está diretamente relacionado com a tensão residual presente na zona de deformação plástica. Essas trincas originam-se na zona de deformação plástica e crescem em direção à superfície da amostra. Se tais trincas chegarem à superfície, podem causar o desprendimento de matéria, fenômeno que pode ser acentuado se essas trincas interagirem com as trincas radiais.

O cálculo da carga crítica, carga necessária para iniciar a formação de trincas, baseia-se nos princípios clássicos da mecânica de fratura (NOGUEIRA, 1988).

A equação (1.1) que define o coeficiente de concentração de tensões K, ao redor de uma fissura de comprimento 2C, presente em uma placa infinita, sob a ação de uma tensão normal, σ é dada por:

$$K = \sigma \, \pi \, C \tag{1.1}$$

Com o aumento da tensão σ, K pode alcançar um valor crítico Kc a partir do qual a fissura se propaga com a velocidade do som e o material se rompe.

Lembrando que as trincas laterais do riscamento são semelhantes às radiais formadas ao redor de uma indentação, pode-se utilizar a relação para Kc no caso estático, de acordo com a equação (1.2):

$$Kc \propto \frac{F}{C^{3/2}} \tag{1.2}$$

Onde F é a força de abertura da trinca.

Sendo o fenômeno progressivo, existe uma força mínima para a formação dessas trincas, F_{min}, que se correlaciona com Kc na equação (1.3).

$$F_{\min} \propto \frac{Kc^4}{H_v^3} \tag{1.3}$$

Nas situações em que a largura da trinca e a largura do sulco são da mesma ordem de grandeza (LAW, 1979), o valor de Kc pode ser expresso segundo a equação (1.4).

$$Kc = \left(\frac{C.H_s}{120}\right)^{1/2} \tag{1.4}$$

Onde H_s é a dureza ao risco.

O conjunto de fenômenos necessários, ou nível crítico, para a formação de fissuras geralmente é atingido de forma localizada em um defeito do material, durante o riscamento. A força tangencial atuante abre as trincas, segundo Veldkamp *et al.* (1978), pode ser expressa segundo a equação (1.5).

$$F_t = \gamma.Kc.C\sqrt{C + 1/2\lambda b} \tag{1.5}$$

Onde λ e γ são constantes dependentes da geometria e orientação do penetrador, e *b* é a diagonal da pirâmide Vickers. Então a expressão da força tangencial mínima é a seguinte:

$$F_{t\min} = C_s(Kc)^4(H_s)^{-3} \tag{1.6}$$

Onde H_s é a dureza ao risco e C_s é determinado pelas constantes λ e γ e pelo coeficiente de atrito μ.

$$C_s = y^4 \ (1+\lambda)^2 \ \mu^{-3} \tag{1.7}$$

Abaixo do limite crítico, a perda de massa é determinada pela expressão 1.1, mas acima desse limite o fenômeno abrasivo é dominado pela extensão das trincas laterais (*C*), parâmetro que depende das características do material, conforme a expressão (1.8):

$$C = \frac{(E/H_v)^{3/5}(F_n)^{5/8}}{(Kc)^{1/2}(H_v)^{1/8}} \tag{1.8}$$

O volume de matéria removida de cada lado do risco é $V_i = 2h_i C_i L_i$, sendo h_i a profundidade da trinca lateral.

Esse volume pode ser expresso pelas características do material segundo a expressão 1.9:

$$\frac{V_i}{l_i} = \frac{(E/H_v)^{4/5}(F_n)^{9/8}}{(Kc)^{1/2}(H_v)^{5/8}} \tag{1.9}$$

O macroesclerômetro, equipamento que aplica a técnica de esclerometria retilínea para investigar cargas críticas em revestimentos tribológicos, tem sua ação efetuada normalmente através de um penetrador cônico, Rockwell C, que risca uma amostra mediante um esforço normal crescente.

Os parâmetros adquiridos durante um ensaio de macroesclerometria – a força normal, a força tangencial ou força de atrito e a atividade acústica –, permitem a determinação do esforço necessário para destacar o revestimento. Estes resultados são ainda freqüentemente associados à imagem do risco/sulco gerado, facilitando sobremaneira a interpretação dos resultados obtidos.

A aquisição da atividade acústica é uma técnica bastante interessante. Posteriormente será feita uma breve explanação sobre o assunto.

1.3 A teoria da emissão acústica

A emissão acústica é caracterizada pela propagação de ondas elásticas, em alta freqüência, liberadas por um material quando neste é aplicado um esforço externo. Essas ondas se devem a um rearranjo interno na estrutura cristalina dos materiais quando estes são sujeitados a um estímulo externo como mudanças de pressão, carga ou temperatura (<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.htm, acesso em 01/01/08 e SOUTO, 2007). A figura 1.6 apresenta esquematicamente o processo de emissão das ondas acústicas.

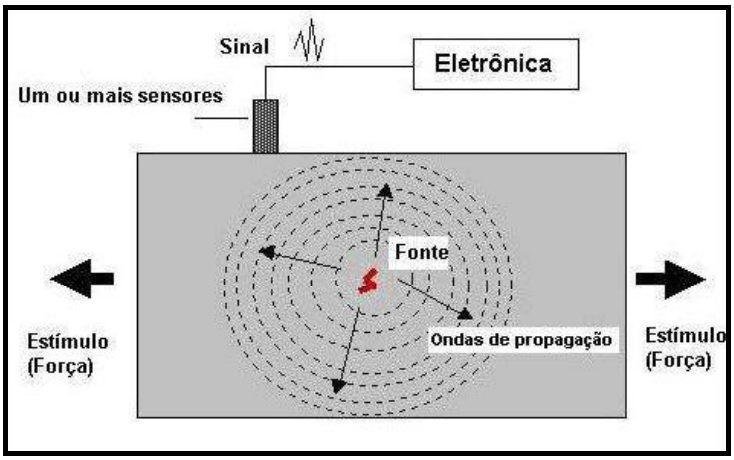


Figura 1.6: Princípio de funcionamento do processo de emissão acústica (Adaptado de http://www.ndt.net/article/az/ae_idx.htm).

À medida que uma trinca se propaga no material, várias frentes de ondas de emissão acústica são liberadas. Quando a frente de onda chega à superfície, ela provoca pequenos deslocamentos nas moléculas ou átomos que ali se encontram. Essa movimentação sensibiliza o sensor piezelétrico, que converte essa energia mecânica em um sinal elétrico (<http://www.ndt.net/article/az/ae_idx.htm>). Veja a esquematização deste fenômeno na figura 1.7, a seguir.

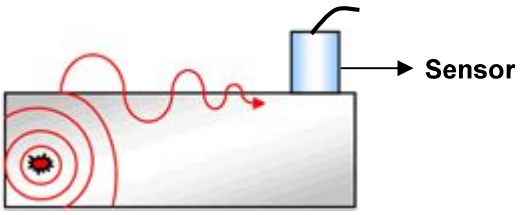


Figura 1.7: Esquema da propagação das ondas acústicas em um substrato (<http://www.acousticemission.net/background.asp>).

O fenômeno de emissão acústica é caracterizado por baixas amplitudes e altas freqüências. Essas freqüências têm geralmente seus valores entre 20 kHz e 1000 kHz (<http://www.ndt.net/article/az/ae_idx.htm>). O sinal desta onda elástica de baixa amplitude é amplificado por um pré-amplificador para depois ser transferida para o computador. A forma de onda gravada pode ser exibida de duas formas: através de parâmetros de onda ou através da forma de onda acumulada. Geralmente, nos ensaios de emissão acústica, apenas os parâmetros de onda são gravados para evitar grande uso de memória computacional (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2004).

Segundo a Physical Acoustics Corporation (2004), os principais parâmetros de uma onda originada através de um processo de emissão acústica são:

- Threshold: limiar de referência. Somente os valores da onda acústica que ultrapassarem este valor serão adquiridos e digitalizados pela placa;
- Amplitude: valor do maior pico, em decibéis, do sinal acústico em relação à referência;
- Marse: é a área sob a curva. Parâmetro utilizado para cálculo da energia do sinal;
- Counts: número de pulsos emitidos pelo circuito de medida do sinal quando a amplitude do sinal ultrapassa o limiar de referência.

A figura 1.8 apresenta um esquema do sinal acústico com seus principais parâmetros.

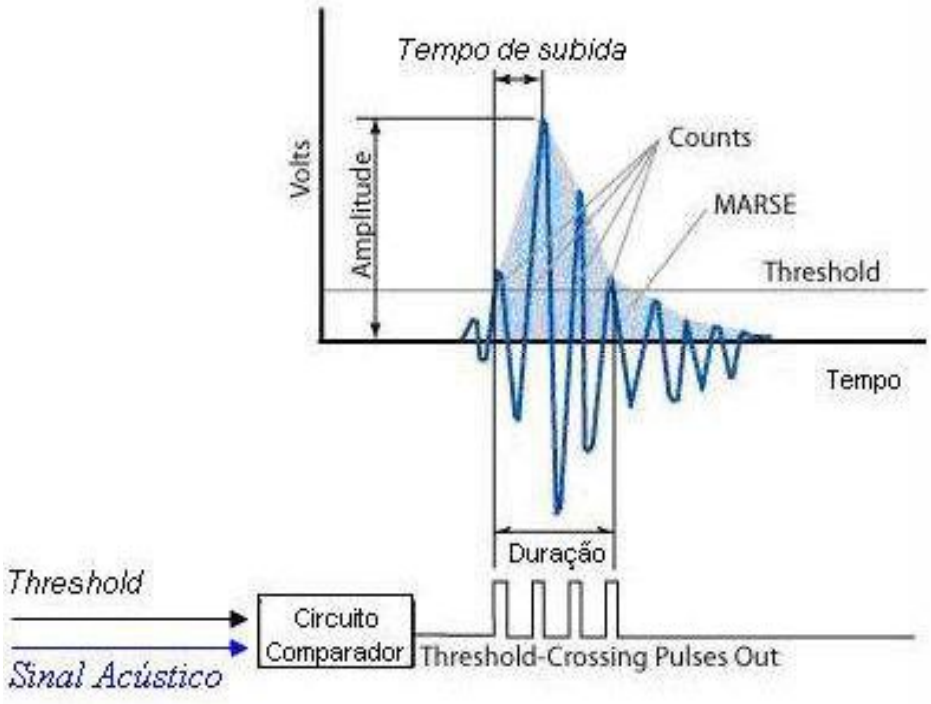


Figura 1.8: Forma de onda de um sinal proveniente de um processo de emissão acústica (<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.htm>).

1.4 A emissão acústica como técnica complementar à macroesclerometria

Em um processo de emissão acústica, o sensor piezelétrico "escuta" as emissões advindas de defeitos ativos no material, como o crescimento de uma trinca, o que justifica a utilidade do método como complementação à macroesclerometria na análise da adesividade de revestimentos tribológicos.

A seguir, alguns processos de análise de revestimentos tribológicos utilizando a aquisição do sinal acústico como técnica complementar à esclerometria serão descritos para melhor compreensão do assunto.

No estudo da adesividade de revestimentos de nitreto de titânio, TiN, e nitreto de Cromo, CrN, Piotrkowski *et all* (2005) utilizaram um sistema de macroesclerometria para determinação da carga crítica destes revestimentos. A figura 1.9 caracteriza tal sistema, cujos ensaios foram realizados a uma velocidade constante de 75 μm/s, com uma força normal crescente, de valor máximo de 100 N. A faixa de freqüência dos sensores piezelétricos utilizados foi de 100 a 1200 kHz. A atividade acústica foi também adquirida neste estudo para a determinação da carga crítica.

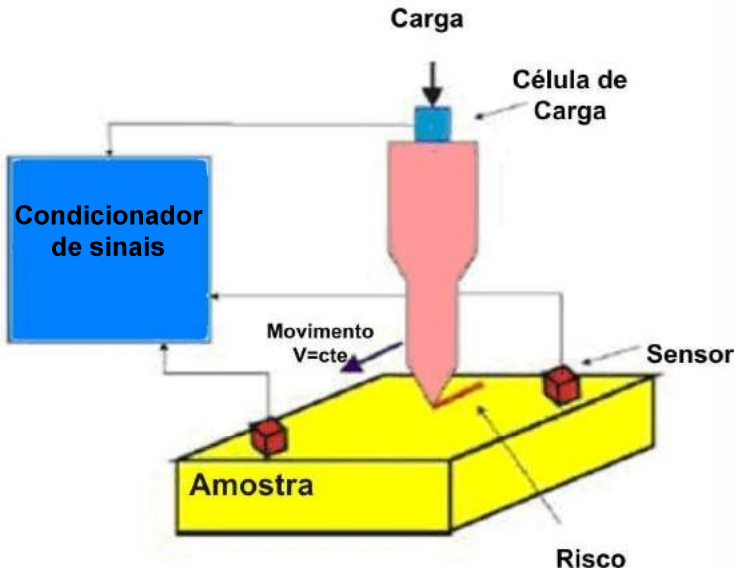


Figura 1.9: Modelagem de um sistema de macroesclerometria (PIOTRKOWSKI *et al.*, 2005).

O aumento crescente do esforço normal aplicado na amostra de TiN e a diferenciação da energia acumulada do sinal acústico, que se inicia por volta de 20% da posição relativa, definem os quatro diferentes estágios de desgaste do revestimento, bem como a carga crítica. O estágio I corresponde à deformação elástica do revestimento, o segundo estágio indica a presença de trincas transversais, o estágio III corresponde ao início do aparecimento de trincas laterais e finalmente o quarto estágio corresponde ao alto

grau de desgaste, com grande número de trincas transversais e laterais. A figura 1.10 apresenta o gráfico com a diferenciação dos estágios de desgaste do revestimento.

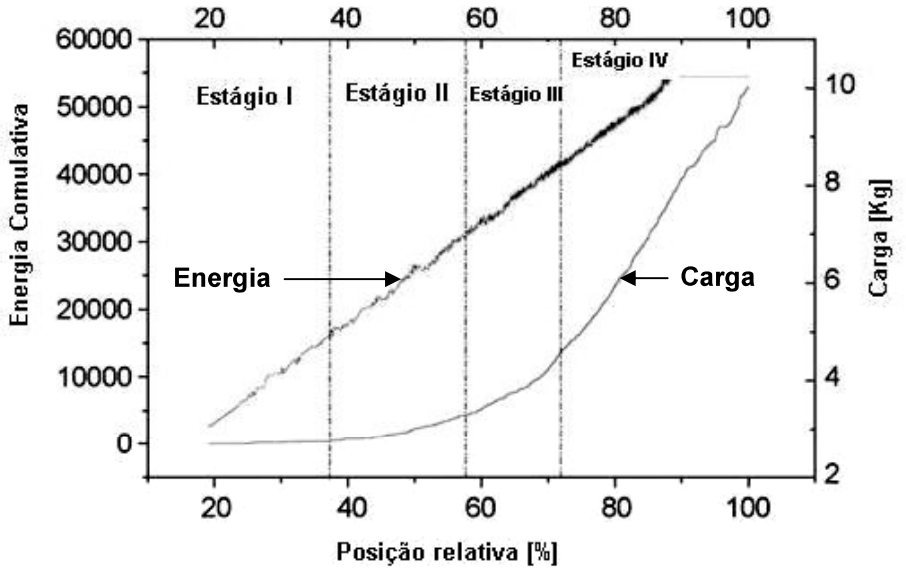


Figura 1.10: Diferentes estágios de evolução de trincas obtidos através da energia acumulada do sinal de emissão acústica em uma amostra de TiN (PIOTRKOWSKI *et al.*, 2005).

Já Wu e Duh (2002) analisaram revestimentos de Nitreto de Cromo, depositados através de diferentes processos. Analisando-se a variação do sinal de emissão acústica em relação ao esforço normal crescente, aplicado em uma de suas amostras, os autores conseguiram determinar a carga crítica e, em conseqüência disso, o melhor revestimento para o substrato utilizado. Na figura 1.11 pode-se ver claramente que, para a amostra com revestimento depositado a pH 5,8, o início da atividade acústica se deu em um valor de carga superior ao da amostra com revestimento proveniente de depósito efetuado a pH 4,0. Os valores das cargas críticas paras essas amostras são, respectivamente, 34 N e 36 N, para os revestimentos depositados a pH 4,0 e pH 5,8. Sendo assim, o revestimento de Nitreto de cromo depositado a pH 5.8 é o que apresentou melhor adesividade ao substrato.

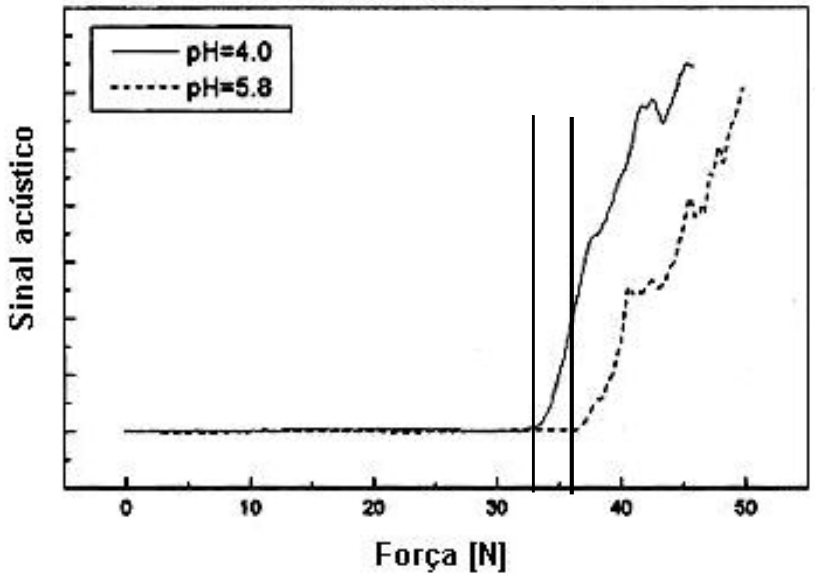


Figura 1.11: Sinal acústico em função carga depositada no filme. Diferenciação desses valores pelo diferente pH (WU; DUH, 2002).

Segundo Wu *et al.* (2004), a macroesclerometria associada à emissão acústica determinou o momento exato de contato do penetrador com o substrato, na análise do substrato de Al_2O_3, revestido com camadas de Au/NiCr/Ta. O ensaio realizado consistiu, basicamente, em adquirir o sinal do esforço normal crescente aplicado e a atividade acústica enquanto a amostra era riscada. O valor da velocidade de riscamento foi de 6 mm/min, com uma velocidade de carregamento de 100 N/min. Na figura 1.12, o aumento da atividade acústica indica o momento exato do contato do penetrador com o substrato. A carga crítica encontrada no ensaio da amostra de Al_2O_3, revestido com camadas de Au/NiCr/Ta, foi de 60 N.

Ainda neste estudo, através do sinal do coeficiente de atrito, é possível diferenciar as diferentes camadas do revestimento da amostra de Al_2O_3. A inclinação do sinal do coeficiente de atrito modifica-se quando o penetrador toca uma camada de revestimento diferente. Observe a diferenciação das camadas de revestimento descrita acima, também na figura 1.12.

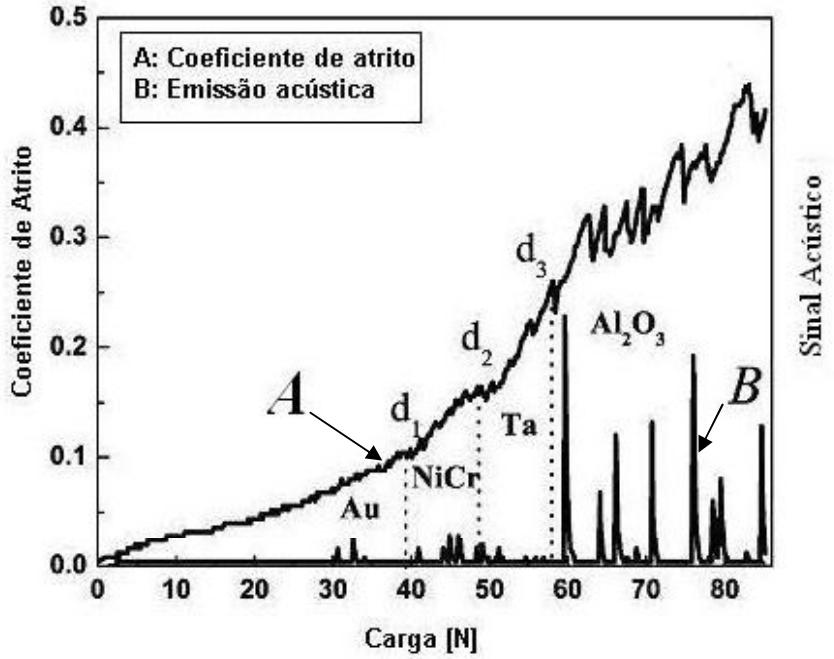


Figura 1.12: Curva de um ensaio de desgaste de um substrato de Al_2O_3 com revestimento multicamadas de Au/NiCr/Ta (WU *et al*., 2004).

A partir do que foi exposto, pode-se dizer que a macroesclerometria é uma técnica eficiente no estudo de revestimentos tribológicos. Sua grande vantagem é que através dela consegue-se observar o comportamento de um revestimento perante um esforço crescente. Pode-se ainda afirmar, que a associação da macroesclerometria a um sistema de aquisição da atividade acústica permite a identificação de danos ao revestimento sem, todavia, interferir no processo de riscamento.

Capítulo II

Instrumentação e controle de um macroesclerômetro

2.1 Instrumentação do macroesclerômetro

O equipamento destinado à realização de ensaios de macroesclerometria foi desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito (LTAD) e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia. O projeto mecânico do equipamento foi elaborado para que este realizasse ensaios de macroesclerometria de maneira simples e eficiente. Este esforço foi para se conseguir um equipamento a um baixo custo, com eficiência análoga aos equipamentos existentes no mercado.

O detalhamento construtivo do equipamento pode ser observado na figura 2.1, a seguir.

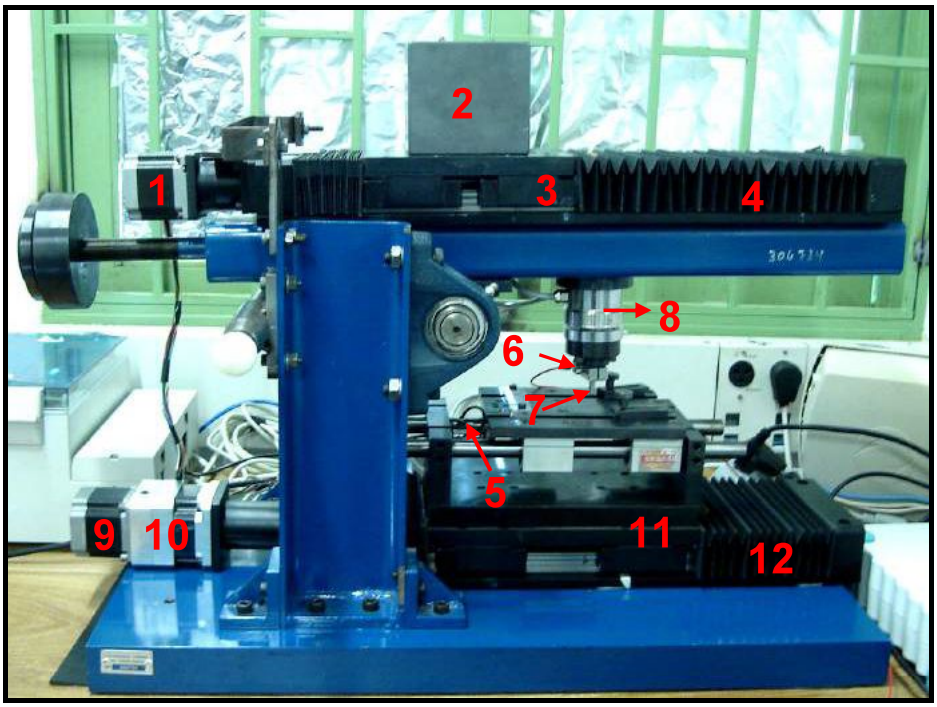


Figura 2.1: Detalhamento construtivo do macroesclerômetro.

Os números da figura 2.1 acima indicam os seguintes componentes do macroesclerômetro: (1) motor de passo; (2) peso morto; (3) plataforma de movimentação superior; (4) proteção sanfonada da mesa superior; (5) célula de carga para medição da força tangencial; (6) porta sensor piezelétrico; (7) penetrador; (8) célula de carga para medição da força normal; (9) motor passo; (10) redutor de velocidade; (11) plataforma de movimentação inferior; (12) proteção sanfonda da mesa inferior.

O macroesclerômetro possui um peso morto, (2), que se movimenta durante o ensaio. A movimentação deste peso é responsável pela variação da força aplicada na amostra, através de um braço de alavanca. Na plataforma superior, (3), estão localizados

um porta célula de carga, um porta sensor, (6), onde o sensor piezelétrico está alocado, e um porta penetrador. Na plataforma inferior, (11), encontra-se a mesa onde a amostra é fixada para realização de ensaios. A célula de carga de medição da força tangencial, (5), que é posicionada na direção do ensaio, também está localizada na mesma mesa. A plataforma inferior movimenta-se durante o ensaio de riscamento da amostra.

As plataformas são movimentadas através de dois motores de passo, (1) e (9), de modelo HT23-397 da Applied Motion Products®. Cada motor suporta uma corrente máxima de 2,8 A. Foram utilizados motores de passo devido sua portabilidade e controle preciso e instantâneo da posição dos motores. Esses motores de passo são controlados por circuitos eletrônicos, que aceitam sinais de comando e fornecem energia ao motor, são as chamadas unidades de controle.

As unidades de controle dos motores de passo configuram e controlam diversos parâmetros desses motores, tais como corrente, velocidade, aceleração, desaceleração e perfil do movimento (distância e sentido do movimento). Esse controle é realizado através de códigos próprios das unidades. Neste trabalho, esses códigos são escritos, lidos e interpretados através do programa de controle desenvolvido via computador.. O modelo das unidades de comando utilizadas neste equipamento é o 3540i, também fabricado pela Applied Motion Products®. O tipo de conexão entre cada motor e sua unidade de controle foi a do tipo paralela, que proporciona um maior torque ao motor em uma velocidade característica baixa.

A figura 2.2 mostra a foto do motor e da unidade de controle utilizados no macroesclerômetro.



a) Motor de passo HT23-397.

b) Unidade de controle 3540i.

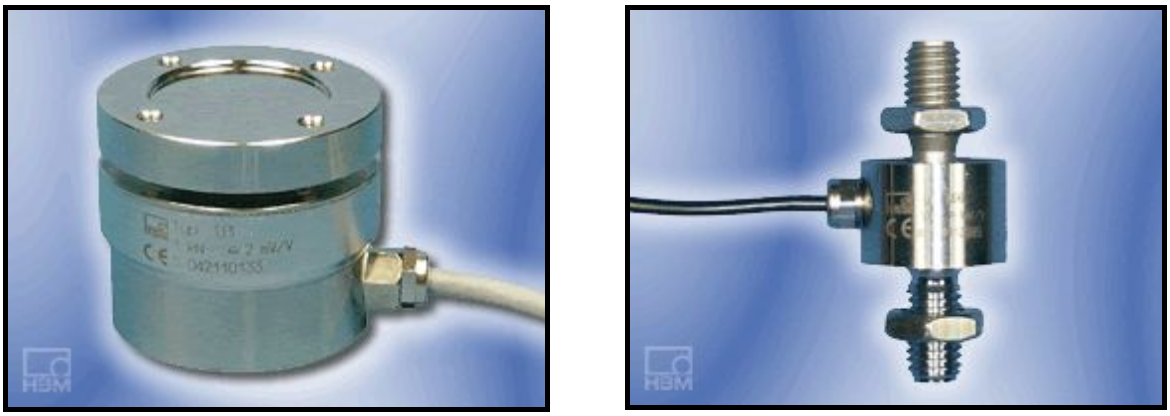
Figura 2.2. Motor e unidade de controle utilizados no macroesclerômetro (<http://www.applied -motion.com>).

Durante os ensaios abrasivos, efeitos provenientes da temperatura podem influenciar os resultados (ZUM GAHR, 1987). Para eliminar esses efeitos em ensaios de esclerometria, é necessário que a velocidade de translação da amostra seja baixa. O valor dessa

velocidade é por volta de 100 μm/s. Observando a curva de torque pela velocidade dos motores de passo, chegou-se à conclusão de que estes trabalham de maneira estável a partir de uma velocidade de cerca de 800 μm/s. Devido a isso, utilizou-se um redutor de velocidade de fator igual a oito.

Para medir os valores correspondentes às forças normal e tangencial, foram necessárias duas células de carga, (5) e (8). A força normal é adquirida através de uma célula de carga modelo U3, fabricada pela HBM®, especial para mensuração de forças normais e protegida contra forças laterais, forças que aparecem durante os ensaios de macroesclerometria. O fundo de escala desta célula de carga é de 500 N e sua classe de precisão é de 0,2 (<http://www.hbm.com/pt/menu/produtos/transdutores-sensores/force-transducers/>).

A força tangencial é mensurada através de uma célula de carga de modelo U9B, fundo de escala de 2000 N, classe de precisão de 0,5, também fabricada pela HBM®. Esta célula de carga pode mensurar valores de tração e compressão. A figura 2.3 apresenta as células de carga utilizadas na instrumentação do macroesclerômetro.



a) Célula de carga de medição da força normal.

b) Célula de carga de medição da força tangencial.

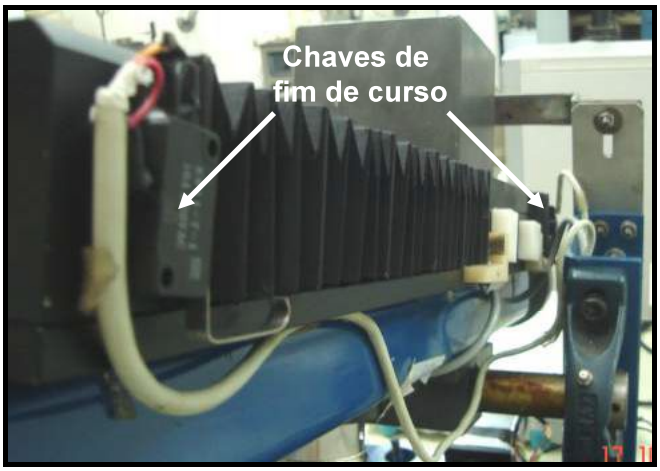
Figura 2.3: Células de carga utilizadas para mensuração dos esforços normais e tangenciais (<http://www.hbm.com/pt/menu/produtos/transdutores-sensores/forcetransducers/>).

Para o condicionamento dos sinais provenientes das células de carga, foi utilizado o Spider8®, também fabricado pela HBM®. Este condicionador de sinais é conectado ao microcomputador através da porta paralela, e é controlado através do computador, dispensando assim a utilização de circuitos que possam somar ruídos ao sinal. A figura 2.4 apresenta o Spider8®.

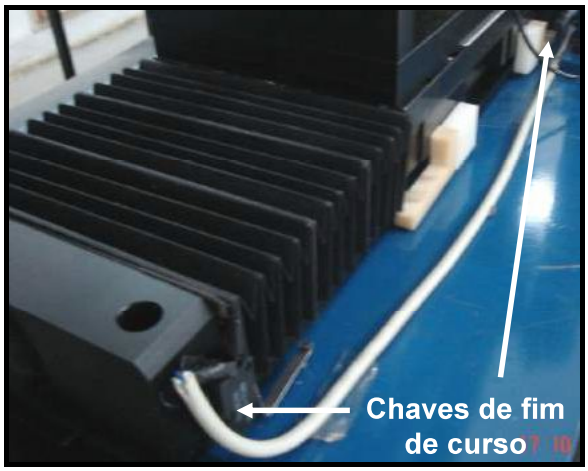


Figura 2.4: Condicionador dos sinais das forças normal e tangencial.

Quatro chaves de fim de curso foram instaladas no macroesclerômetro. Essas chaves impedem que as mesas de movimentação e motores de passo sejam danificados durante ensaios realizados no equipamento. Esse dispositivo de segurança será acionado quando algum erro de comunicação, na interface computador- unidade de controle provocar o disparo dos motores. A figura 2.5 apresenta o posicionamento das chaves de fim de curso nas plataformas de movimentação.



a) Chaves de fim de curso localizadas na plataforma superior.



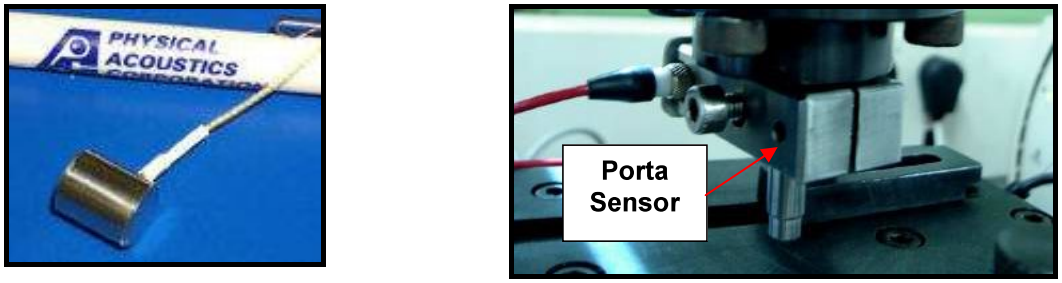
b) Chaves de fim de curso localizadas na plataforma inferior.

Figura 2.5: Detalhes da montagem das chaves de fim de curso do macroesclerômetro.

O equipamento desenvolvido neste projeto, o macroesclerômetro, foi associado a um sistema de aquisição de atividade acústica. A aquisição do sinal acústico é de extrema importância para o macroesclerômetro, visto que esta é uma ferramenta importante na caracterização do comportamento de um revestimento durante o ensaio de macroesclerometria.

O sistema de emissão acústica é constituído por um sensor piezelétrico, modelo µ30, um pré-amplificador de sinal, modelo 2/4/6, e uma placa de aquisição e tratamento do sinal, modelo PCI-2. Todos esses equipamentos foram fabricados pela Physical Acoustics Corporation®.

O sensor piezelétrico é um transdutor responsável em transformar a energia acústica, originada pelo processo de macroesclerometria, em energia elétrica. A faixa de freqüência do sensor piezelétrico, neste trabalho, é de 100 a 600 kHz. O sensor e o porta sensor são apresentados na figura 2.6.



a) Sensor piezelétrico b) Porta-sensor

Figura 2.6: Sensor piezelétrico utilizado para mensurar o sinal acústico e seu porta-sensor (< http://www.pacndt.com>).

O sinal adquirido pelo sensor piezelétrico é de pequena amplitude e freqüência elevada, devendo por isso passar por um pré-amplificador. No caso estudado, o pré-amplificador amplifica o sinal com um ganho de 60 dB e transmite-o para a placa de aquisição. A conexão do pré-amplificador com a placa de aquisição de dados é feita através de conectores BNC's. A figura 2.7 apresenta o pré-amplificador utilizado neste projeto.

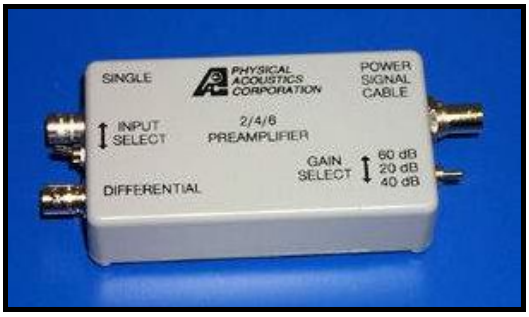


Figura 2.7: Pré-amplificador do sistema de emissão acústica.

A placa de aquisição do sinal acústico possui dois canais de entrada, velocidade máxima de $40x10^6$ amostras por segundo, e utiliza 18 bits para conversão A/D (analógica/ digital) da PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION®. A comunicação desta placa com o

microcomputador permite a aquisição do sinal acústico através do programa de controle do macroesclerômetro. A figura 2.8 mostra a foto da placa de aquisição.



Figura 2.8: Placa de aquisição do sinal acústico, PCI-2 da PAC.

2.2 Calibrações do equipamento

O processo de calibração pode ser definido como a operação em que se estabelece uma correspondência entre as leituras de um instrumento e os valores de uma grandeza física, que é medida, direta ou indiretamente, por um instrumento. Devido a isso, o processo de calibração foi imprescindível para o bom funcionamento do macroesclerômetro.

2.2.1 Deslocamento das plataformas de movimentação

Para a conversão do valor da distância em milímetros para número de passos, unidade reconhecida pelas unidades de controle dos motores de passo, levou-se em consideração o passo do fuso utilizado nas mesas de translação horizontal. O valor desse passo, no macroesclerômetro, é de cinco milímetros. Isso quer dizer que cada rotação do motor corresponde a uma translação horizontal de cinco milímetros.

A resolução de cada rotação de um dos motores passo utilizados neste trabalho é igual a 20000 passos/rotação. Isso quer dizer que cada revolução do eixo do motor corresponde a 20000 micro-passos. Esse valor é utilizado para se fazer a conversão da distância em milímetros para micro-passos.

Dividindo a distância em milímetros, fornecida pelo usuário, pelo passo do fuso, obtém-se o número de revoluções que o motor deve girar para transladar a mesa até a posição correta. Multiplicando esse valor pelo número de micro-passos correspondentes a cada rotação do motor, chega-se ao valor do número de micro-passos que o motor deve movimentar. O número de micro-passos é o parâmetro repassado à unidade de controle de cada motor passo.

Para o motor da mesa superior, a conversão da distância em milímetros para micro-passos é realizada de acordo com a equação (1):

$$Y_{sup} = d/5 \times 20000 \text{ [micro-passos]} \quad (1)$$

onde Y_{sup} é igual ao número de micro-passos que o motor deve movimentar; d é a distância em milímetros, fornecida pelo usuário, 5 é o passo do fuso da plataforma de translação e 20000 é o número de micro-passos por rotação do motor.

Para se calcular a função de transferência, para o motor da plataforma inferior, deve-se levar em consideração, além de todos os parâmetros acima citados, a existência de um redutor de velocidade. A função de transferência, de conversão da distância em milímetros para micro-passos, é apresentada na equação (2):

$$Y_{inf} = d/5 \times 8 \times 20000 \text{ [micro-passos]} \quad (2)$$

onde Y_{inf} é à distância convertida em micro-passos, d a distância em milímetros que deve ser percorrida pela mesa, 5 é o passo do fuso, 8 é o valor da redução, proporcionada pelo redutor de velocidade, e 20000 é o número de micro-passos por rotação do motor.

2.2.2 Força normal e força tangencial

As células de carga, utilizadas para medir os sinais das forças normal e tangencial, foram calibradas segundo os dados fornecidos pela folha de calibração do próprio fabricante.

As equações (3) e (4) representam as funções de transferência dos sinais gerados pelas células de carga de medição da força normal e tangencial, respectivamente. Essas funções convertem o sinal em milivolts para Newtons.

$$Z_{FN} = 500{,}2200X - 0{,}4075 \text{ [N]} \quad (3)$$

$$Z_{FT} = 1999{,}6000X + 0{,}3336 \text{ [N]} \quad (4)$$

onde Z_{FN} e Z_{FT} são os valores das forças em Newtons e X é o valor do sinal proveniente das células de carga, em Volts.

Para confirmar a validade das funções de transferência das células de carga, foram feitos, no equipamento, ensaios de calibração com pesos conhecidos.

2.2.3 Deslocamento do peso morto

O esforço normal, aplicado na amostra durante um ensaio de macroesclerometria, aumenta linearmente. Para isso, o peso morto, situado na plataforma superior, deve movimentar-se de acordo com o valor máximo da carga a ser aplicado na amostra. Tal calibração consistiu em relacionar a distância, movimentada pelo peso morto, com o valor medido pela célula de carga, em Newtons, na posição correspondente.

A curva de calibração e a função de transferência que relaciona o valor da distância com o valor da carga para cada posição do peso morto são apresentadas na figura 2.9. observa-se que o coeficiente de correlação é de 0,999, aproximadamente um.

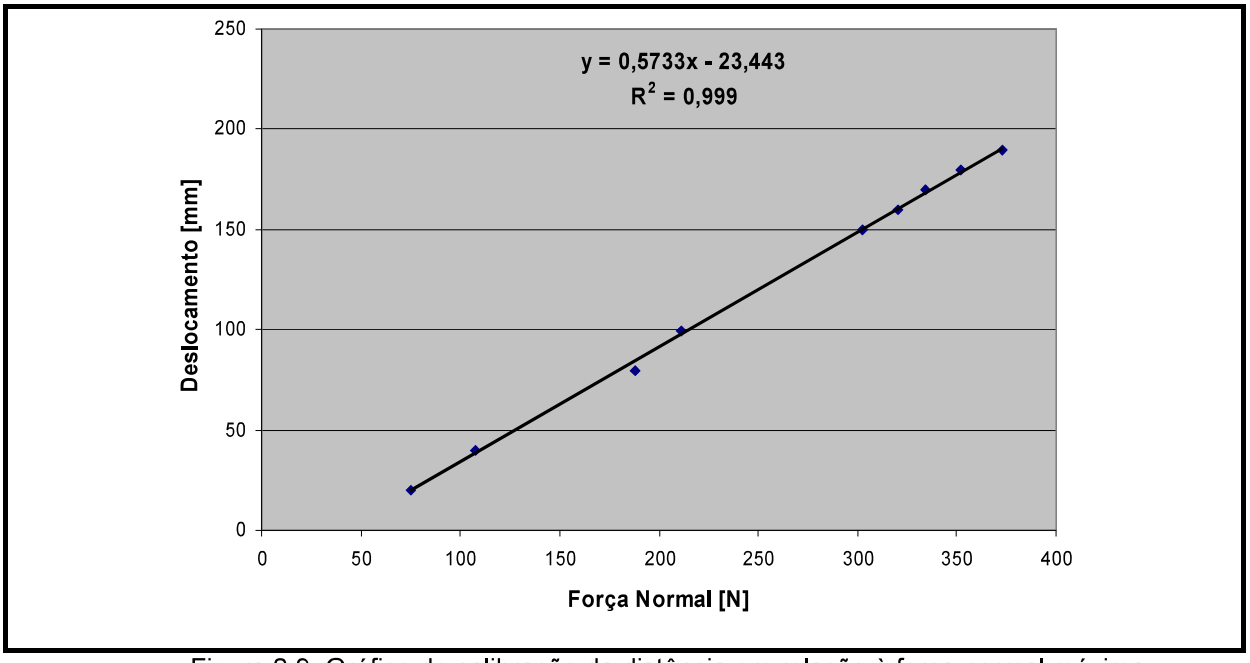


Figura 2.9: Gráfico de calibração da distância em relação à força normal máxima.

O processo de calibração descrito acima é importante para o equipamento, pois, com a função de transferência obtida com a calibração, consegue-se controlar o valor do esforço máximo que deve ser aplicado na amostra, através do programa de controle desenvolvido.

2.3 Programa de controle do macroesclerômetro

O controle do equipamento foi realizado através de um programa implementado no software LabView®, versão 8.2. Este programa tem como função controlar de forma automatizada todo o processo de esclerometria, bem como adquirir e armazenar os sinais da força normal, da força tangencial e do sinal acústico.

As etapas do desenvolvimento do programa de controle são detalhadas a seguir.

O controle do processo de esclerometria foi realizado na primeira fase de desenvolvimento do programa. Nesta etapa, automatizou-se a movimentação das mesas de translação. Foram criadas rotinas para adquirir e armazenar os sinais das forças normal e tangencial. Além disso, foi desenvolvida a opção de importar e tratar estatisticamente dados armazenados pelo programa.

A figura 2.10 apresenta o fluxograma de controle do programa, nesta etapa.

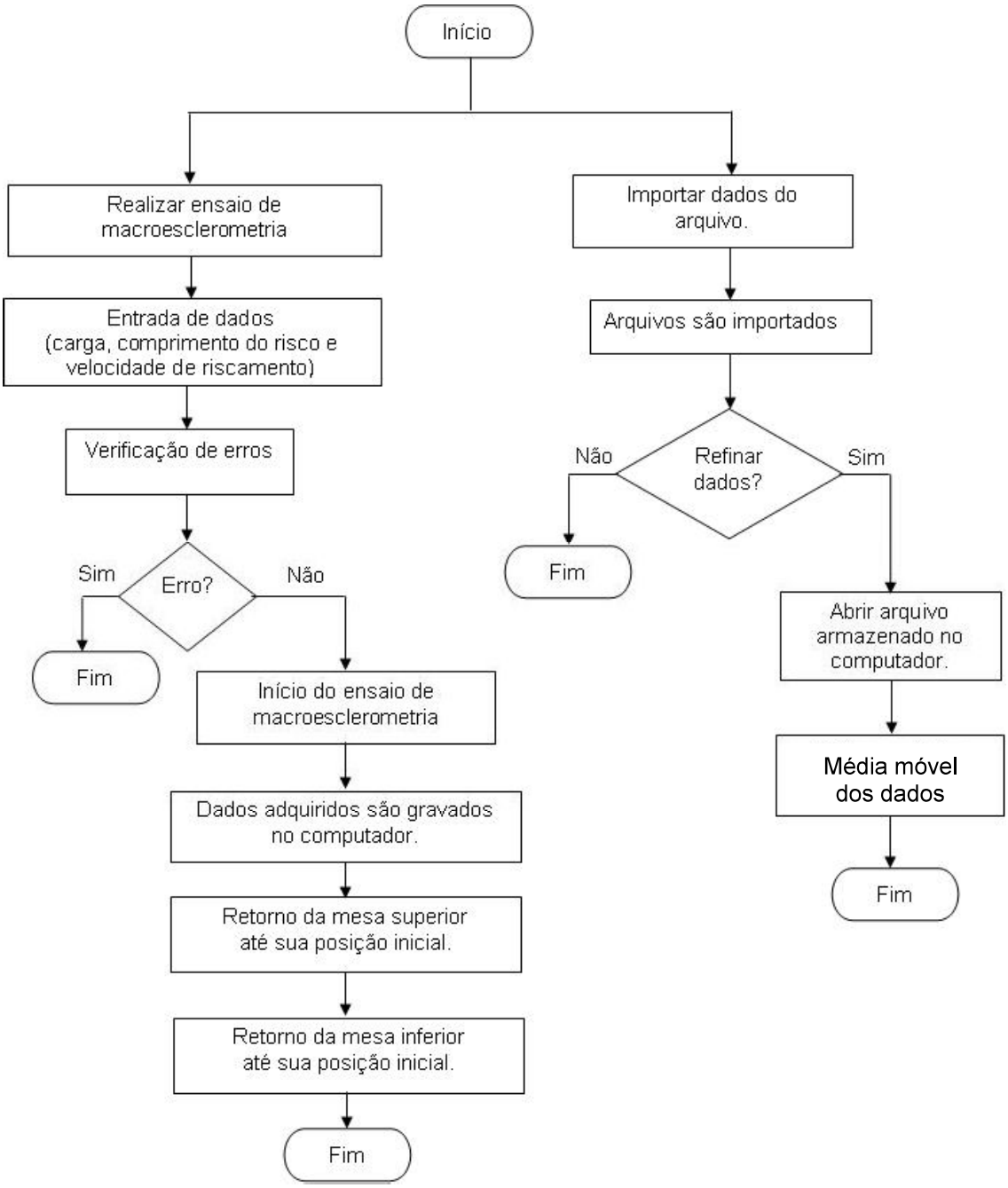


Figura 2.10: Fluxograma do programa de controle do processo de macroesclerometria, em sua primeira etapa.

A figura 2.11 apresenta a interface provisória do programa de controle.

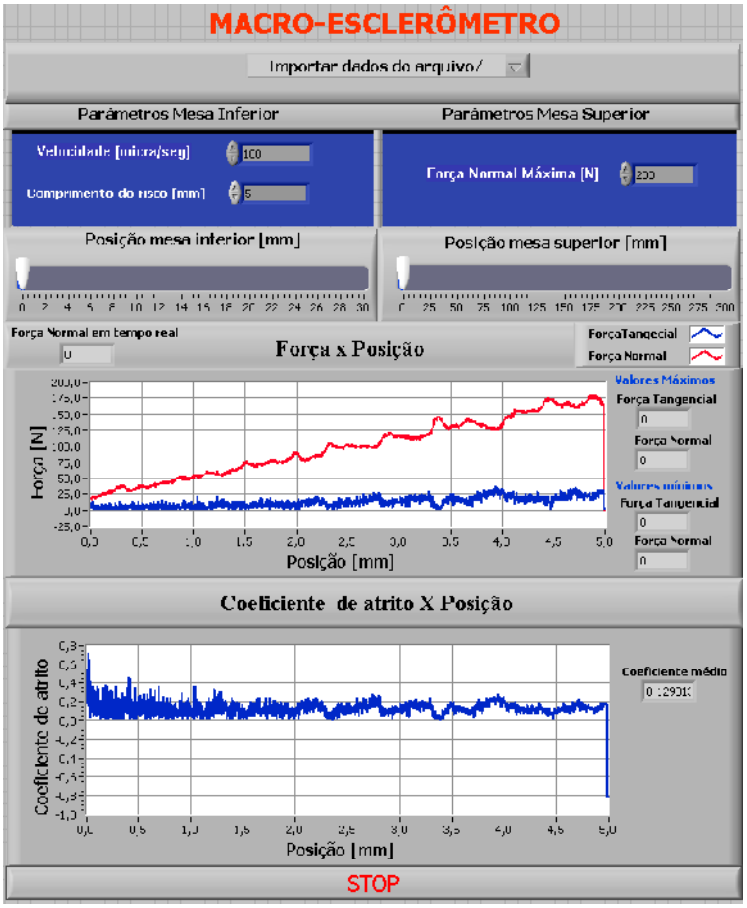


Figura 2.11: Interface provisória do programa de controle do macroesclerômetro.

A eficiência da primeira fase, de automatização do processo de macroesclerometria, foi comprovada através de ensaios realizados em amostras com diferentes revestimentos. Esses ensaios bem como seus resultados são detalhados no capítulo IV.

Em uma segunda etapa, foi desenvolvido o controle da aquisição e armazenamento do sinal acústico. Segundo a Physical Acoustics Corporation (2004), o sinal adquirido e armazenado, através do programa de controle, é proveniente da energia absoluta da atividade acústica, cuja unidade é o attojoule ($1x10^{-18}$ J). Esse sinal é medido entre pequenos intervalos de tempo, pré-determinados no programa de controle.

Nesta etapa, a interface do programa foi modificada para tornar o processo de macroesclerometria funcional.

Ao iniciar a execução do programa, o usuário pode escolher entre três opções: realizar e gravar os resultados de um ensaio de macroesclerometria, importar um ensaio arquivado ou ainda movimentar uma das plataformas.

Se o usuário decidir realizar um ensaio de macroesclerometria, os dados de entrada devem ser impreterivelmente preenchidos. Esses dados são enumerados a seguir: velocidade de translação da amostra, comprimento do risco e força normal máxima. A força inicial é igual a 40 N. Logo após o preenchimento destes parâmetros, o programa irá verificar se estes se encontram dentro da faixa de valores especificada para cada um. Se os dados fornecidos não estiverem dentro da faixa preestabelecida, o usuário deve corrigi-los. O botão “Executar”, utilizado para iniciar o ensaio, só será habilitado quando os dados de entrada forem digitados de forma correta. Caso o botão “Executar” seja acionado e algum erro de inicialização, de algum dos hardwares envolvidos, for detectado, o usuário será informado e o programa será abortado automaticamente. É importante ressaltar que o ensaio de macroesclerometria é sempre visualizado através da segunda aba de navegação do programa. Na figura 2.12 pode-se visualizar a primeira aba do programa de controle.

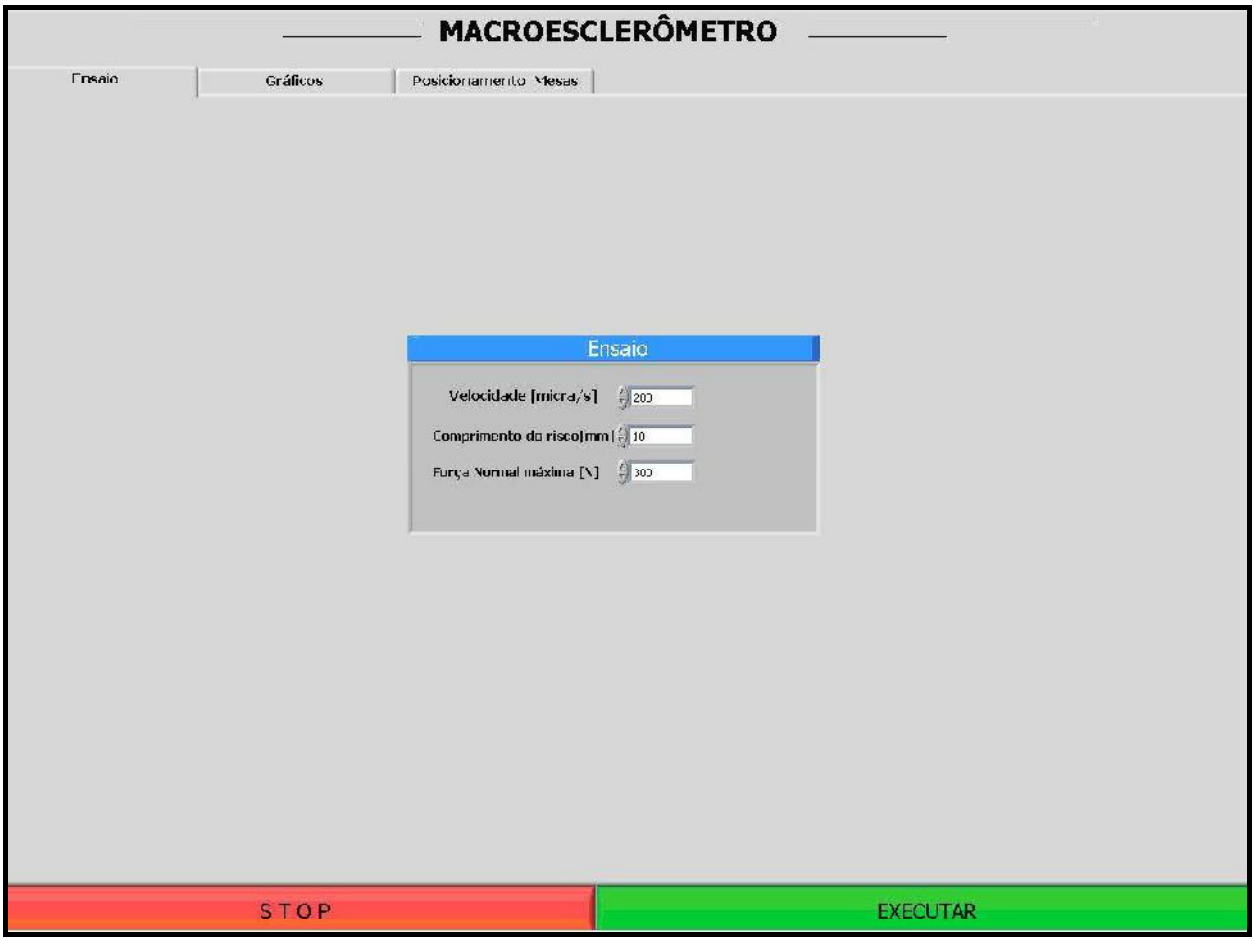


Figura 2.12: Aba do programa de controle, utilizada para o fornecimento de dados para execução de um ensaio de macroesclerometria.

Logo após o encerramento da rotina que controla o processo de macroesclerometria, os sinais são armazenados no computador em um arquivo de formato ASCII, que pode ser facilmente trabalhado computacionalmente para averiguação de maiores detalhes do ensaio.

Depois que esses dados são gravados, o programa executa outra rotina que retorna as plataformas, superior e inferior, até a posição inicial de cada uma. O retorno das plataformas para suas respectivas posições iniciais se inicia quando o usuário do programa confirmar que a amostra foi retirada. Esse procedimento visa à proteção da amostra durante a movimentação das mesas. Tudo isso é realizado sem que o usuário tenha que definir quaisquer parâmetros de movimentação para as plataformas.

Ainda com o programa em execução, o usuário pode escolher importar dados de ensaios arquivados através do programa. Para iniciar esse processo, deve ser escolhida a opção “Importar” da aba nomeada como “Gráfico”. Assim que o usuário executar tal procedimento e que os dados do arquivo escolhido forem carregados, o programa pergunta se o usuário deseja refinar esses dados. Tal opção dá ao usuário a possibilidade de visualizar os gráficos a partir de uma média móvel, realizada em um conjunto de dados escolhido. Para melhor observar os dados importados, a interface possui cursores que permitem a verificação dos valores das coordenadas.

A figura 2.13 apresenta detalhadamente a interface da segunda aba do programa de controle do macroesclerômetro. Essa aba de navegação possibilita que o usuário acompanhe, em tempo real, a realização de um ensaio macroesclerométrico ou visualize os gráficos e parâmetros de entrada de um ensaio arquivado. As réguas que indicam a movimentação das mesas, os parâmetros de entrada de um ensaio, os valores máximos e mínimos da força normal e tangencial, o gráfico dos sinais adquiridos e do coeficiente de atrito, os botões de comando IMPORTAR, EXECUTAR e STOP, podem ser observados na figura 2.13, a seguir.

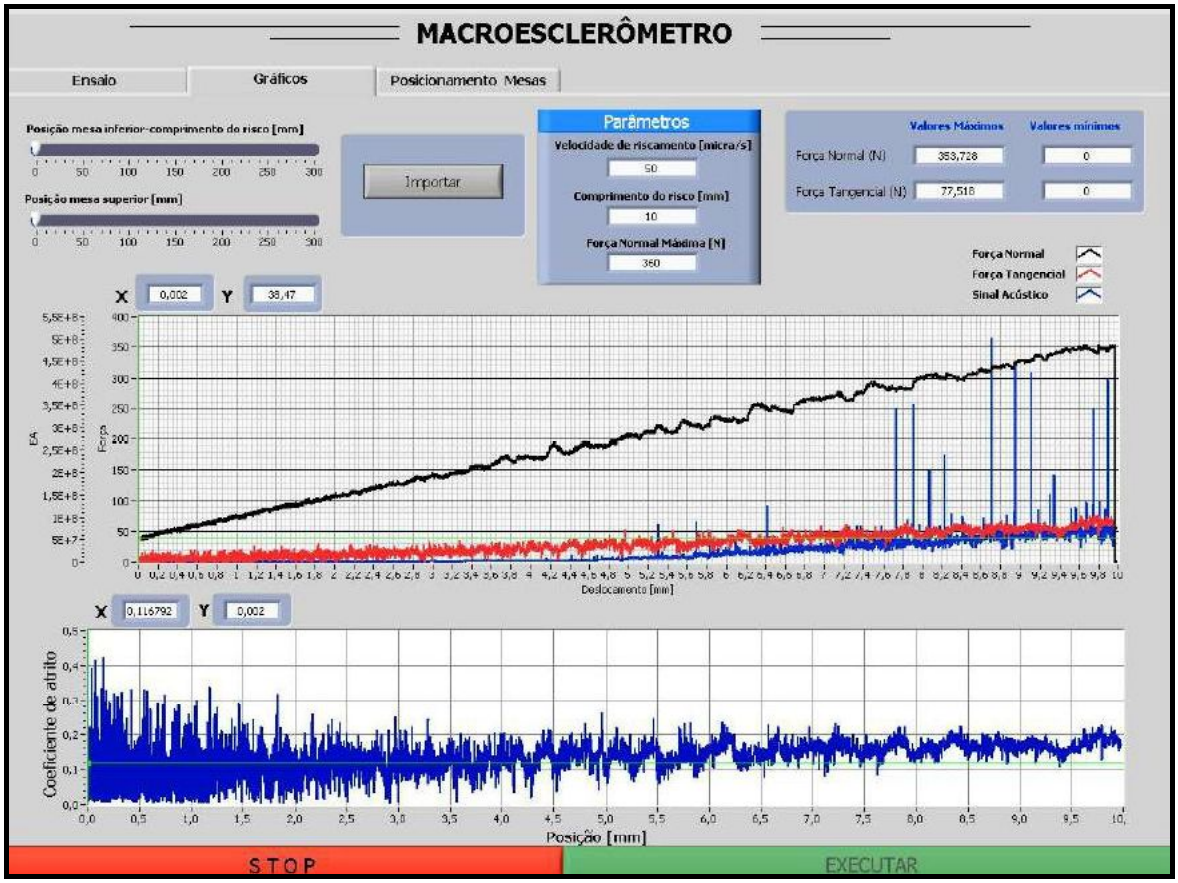


Figura 2.13: Aba utilizada para acompanhar e visualizar ensaios de macroesclerometria.

O usuário pode ainda escolher a terceira aba de navegação, nomeada como “Posicionamento Mesas”, para movimentar uma das plataformas de translação. Para posicionar a amostra de maneira adequada em relação ao penetrador, antes de executar um ensaio de esclerometria, deve-se movimentar a mesa inferior. A movimentação da mesa superior só será necessária se houver algum erro na execução no programa, que faça o peso morto parar em uma posição incorreta. Caso isso ocorra, o usuário deve recuar o bloco, até que a chave de fim de curso seja acionada, e depois avançar três milímetros para que o bloco retorne à sua posição inicial correta. Como medida de segurança, a movimentação da mesa escolhida, superior ou inferior, somente iniciará depois que os dados estiverem dentro da faixa de valores predeterminados e que o botão EXECUTAR for acionado. A movimentação individual das mesas também é acompanhada através da segunda aba de navegação do programa. A figura 2.14 apresenta a terceira aba do programa de controle.



Figura 2.14: Interface utilizada para fornecimento de dados para movimentação da mesa superior ou inferior.

É importante ressaltar que sempre depois do término de um dos processos descritos acima o programa não é finalizado. Assim, o usuário pode continuar trabalhando, com uma das três opções do programa, sem ter que iniciá-lo novamente. O programa de controle somente será finalizado quando o botão STOP for acionado ou quando houver algum erro de inicialização de um dos hardwares.

A figura 2.15 apresenta a lógica do programa de controle, descrita através de seu fluxograma.

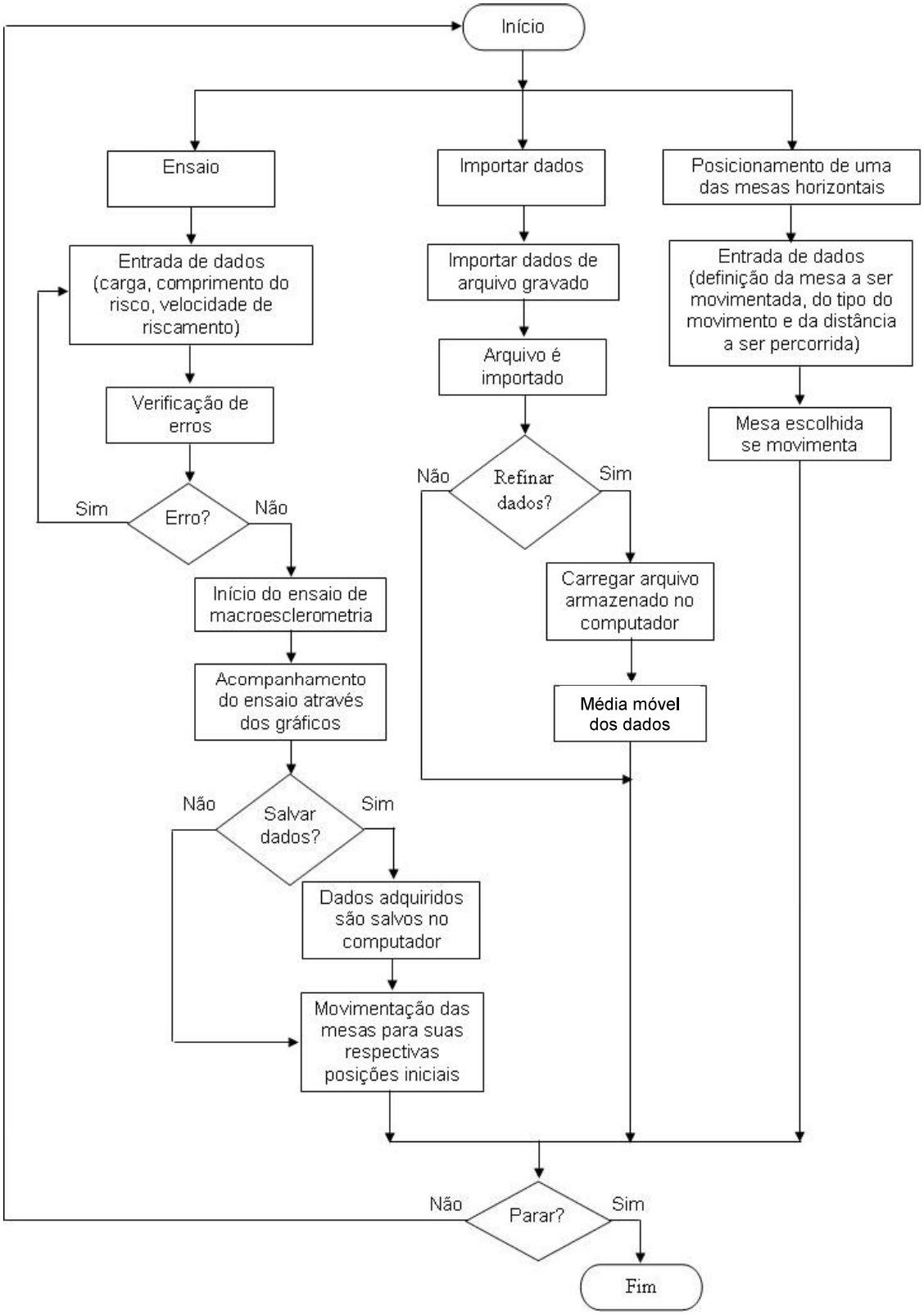


Figura 2.15: Fluxograma do programa de controle do macroesclerômetro.

Após a instrumentação e controle do macroesclerômetro, as seguintes características técnicas devem ser destacadas:

- Variação da velocidade de translação da amostra: de 15,625 μm/s até 31250,000 μm/s.
- Carga normal aplicada: 40 N a 365 N, com precisão de 0,5 N.
- Penetrador utilizado nos ensaios de macroesclerometria: Rockwell C.
- Monitoração e registro dos esforços normal e tangencial, bem como do sinal da atividade acústica.
- Cálculo do coeficiente de atrito dinâmico médio, μ, durante a realização de ensaios.
- Dispositivos de segurança contra erros durantes os ensaios. As chaves de fim de curso utilizadas nas mesas e o monitoramento do valor da carga aplicada em relação ao valor máximo suportado pela célula de carga exemplificam esses dispositivos.

Capítulo III

Procedimento experimental

3.1 Ensaios de validação do sistema de macroesclerometria sem o sistema de aquisição do sinal acústico

Na primeira etapa de validação do equipamento testou-se a eficácia do sistema de macroesclerometria. Para isso foram realizados ensaios de macroesclerometria sem o sistema de emissão acústica.

Foram escolhidas amostras de aço de baixo carbono, ASTM A-36, com variados revestimentos, protegidos termicamente, já existentes no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, LTAD.

Os revestimentos das amostras ensaiadas foram as seguintes:

- A - WC-10Co-4Cr
- B - Ni18Cr6Al
- C - Stellit 6
- D - Mo

A figura 3.1 apresenta a geometria das amostras ensaiadas.

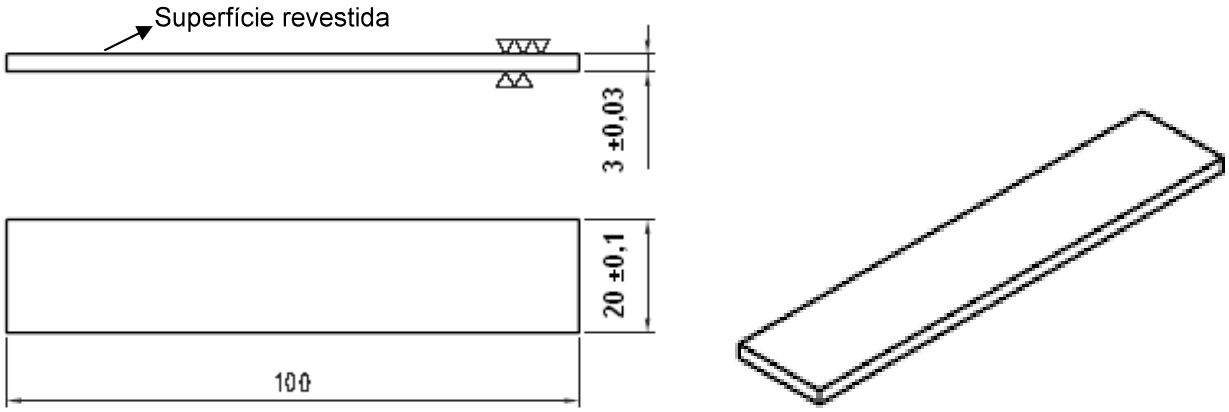


Figura 3.1: Geometria das amostras ensaiadas no macroesclerômetro.

As amostras com seus respectivos aspectos de revestimentos são apresentados na figura 3.2.



Figura 3.2: Aspecto dos revestimentos analisados na primeira fase de validação.

A tabela 3.1 apresenta a composição das amostras ensaiadas, fornecida pelos fabricantes.

Tabela 3.1 - Composição química das amostras ensaiadas (% em peso), EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, ou Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X).

Amostras	Descrição fornecida pelo fabricante	W [%]	C [%]	Co [%]	Ni [%]	Cr [%]	Fe [%]	Mo [%]	Al [%]	Si [%]	O [%]
A	WC-10Co-4Cr, HVOF	**75,2**	N.D.	13,4		5,3					6,1
B	Ni18Cr6Al, arco elétrico, 95HRB		N.D.		**53,8**	15,4			12,6	0,6	17,6
C	Stellit 6, arco elétrico, < 42HRC	2,7	N.D.	**47,3**	0,65	29,0	2,7				17,7
D	N.F.		N.D.					**82,1**			17,9

N.D. – não determinado e N.F. – não fornecido.

Para cada amostra, foram realizados três ensaios. Os parâmetros dos ensaios foram os seguintes:

- A faixa de variação da força normal foi de 4 N até 360 N.
- O comprimento do risco foi de aproximadamente 10 mm.
- Velocidade de translação da amostra foi de aproximadamente 100 µm/s.

3.2 Ensaios de validação do sistema de macroesclerometria associado ao sistema de aquisição da atividade acústica

Na segunda fase de validação do equipamento, necessitava-se de amostras cujos revestimentos apresentassem destacamentos da ou na camada. Tendo isso em vista, foram escolhidas amostras de aço ABNT 4140, revestidas com Ni-P químico.

Os revestimentos de Ni-P foram obtidos através de banhos químicos em solução de sulfato de níquel e hipofosfito de sódio. Nestes banhos de deposição, o catalisador da reação química é o próprio níquel. Por isso, os nomes geralmente utilizados para estes revestimentos são Ni-P químico ou autocatalítico.

Estes revestimentos apresentam ótima combinação de resistência à corrosão e à abrasão (ABBOTT, 1996). Além dessa importante característica, apresentam a capacidade de produzir espessuras homogêneas e baixos níveis de porosidade, bem como de revestir uniformemente descontinuidades geométricas e produzir revestimentos menos magnéticos. Pelos motivos supracitados, são revestimentos amplamente utilizados na indústria petroquímica.

Como exemplo de aplicação dos revestimentos de Ni-P químico na indústria do petróleo e gás, cita-se a aplicação destes revestimentos em risers de completação. A figura 3.3 ilustra essa aplicação.



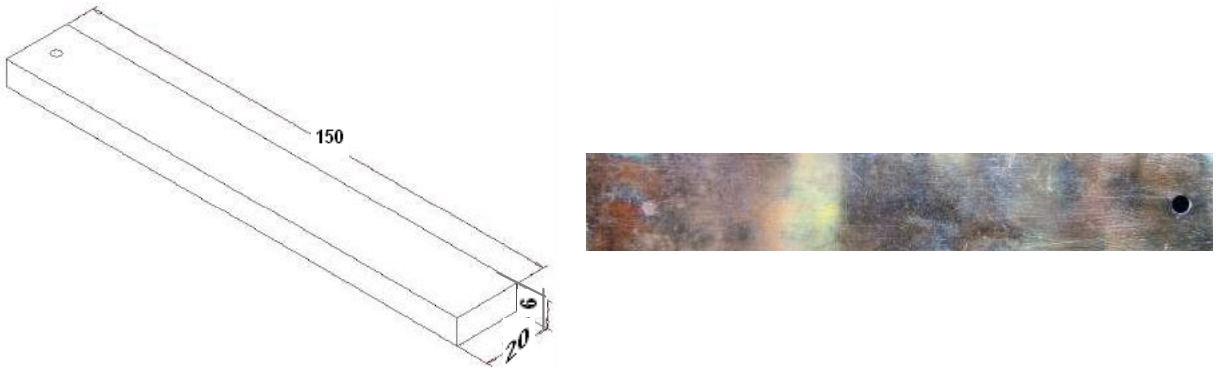
Figura 3.3: Risers de completação utilizados na extração de petróleo.

A amostra ensaiada possui as seguintes características:

- Substrato de aço ABNT 4140, temperado e revenido à dureza de 300HV10.
- Espessura do revestimento: 75 µm;
- Teor de fósforo do revestimento: cerca de 9% do peso;
- Tratamento térmico de endurecimento por precipitação: 400°C/1 hora, realizado com o intuito de precipitar fosfeto de Níquel.

Para averiguação da qualidade do revestimento, foi realizada uma análise de composição química da amostra ensaiada. A composição foi obtida através da análise de três regiões superficiais da amostra, escolhidas aleatoriamente.

A figura 3.4, apresenta as dimensões da amostra utilizada para a validação do macroesclerômetro associado ao sistema de aquisição da atividade acústica.



a) Dimensão da amostra. b) Amostra revestida.

Figura 3.4: Amostra de Ni-P químico utilizada na validação do macroesclerômetro associado ao sistema de aquisição do sinal acústico.

Foram realizados ensaios para validar e comprovar a capacidade do sistema de emissão acústica, utilizado neste trabalho, de captar a diferenciação do sinal acústico durante os ensaios de macroesclerometria. A força normal aplicada na amostra foi de 40 N a 360 N, e o comprimento do risco foi de 10 mm.

A tabela 3.2 apresenta a descrição dos parâmetros dos ensaios de validação do equipamento.

Tabela 3.2. Parâmetros dos ensaios de validação do sistema de macroesclerometria associada à aquisição da emissão acústica.

Ensaio	Velocidade de riscamento [µm/s]
1 - 2	200
3 - 4	50

Os resultados obtidos através da análise dos ensaios em um Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV, foram posteriormente comparados com os resultados obtidos através do programa de controle. Tudo isso para verificação da posição exata do destacamento e comprovação da eficácia do equipamento.

Durante os ensaios descritos acima, observou-se um comportamento diferenciado do sinal acústico, nas diferentes velocidades de ensaio. Em virtude deste acontecimento, optou-se por investigar a influência da velocidade nos ensaios de macroesclerometria. Para cada velocidade foram feitos três riscos. Esses ensaios foram realizados na mesma amostra. A carga normal aplicada na amostra foi de 40 N a 360 N e o comprimento dos riscos foi de 10 mm.

Tabela 3.3: Parâmetros dos ensaios de investigação da influência da velocidade, em ensaios de macroesclerometria.

Ensaio	Velocidade de riscamento [µm/s]
1 - 3	50
4 - 6	100
7 - 9	200

Os resultados dos ensaios referidos acima são apresentados no Capítulo IV.

Capítulo IV
Resultados e discussões

4.1 Ensaios de macroesclerometria sem o sistema de aquisição do sinal acústico

Os primeiros ensaios realizados no macroesclerômetro foram destinados à validação da funcionalidade do sistema de macroesclerometria.

Foram realizados três riscos em cada amostra e os parâmetros dos ensaios obedeceram aos parâmetros definidos no procedimental experimental. Todas as amostras foram analisadas em um MEV, para caracterizar com maior nível de detalhes os fenômenos que ocorreram durante os ensaios.

A seguir, na figura 4.1, é apresentado o gráfico com a variação da força normal aplicada e da força tangencial, durante o riscamento da amostra revestida com WC-10Co-4Cr.

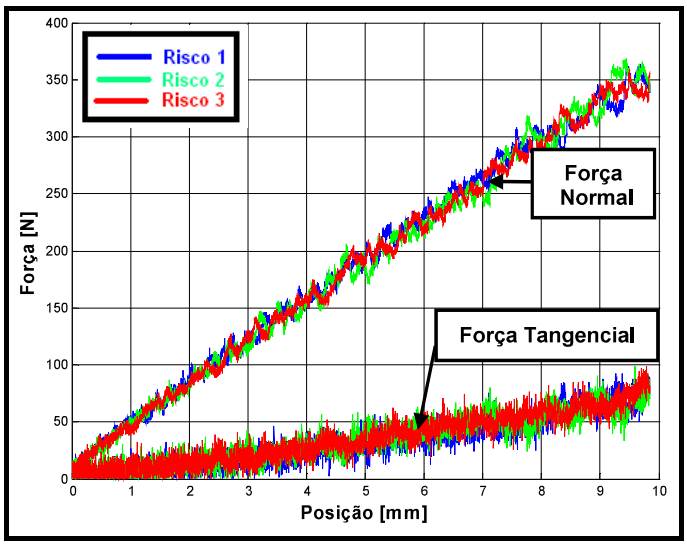
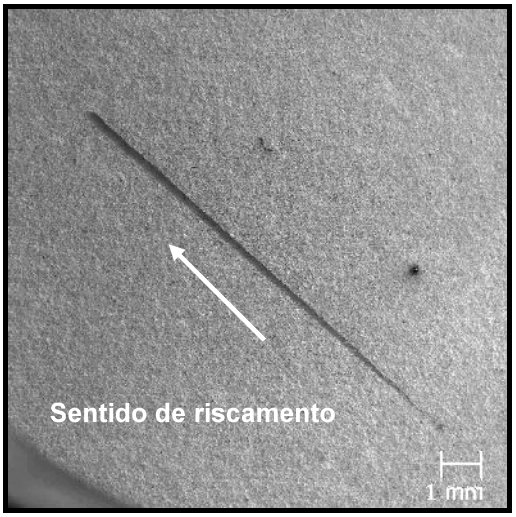


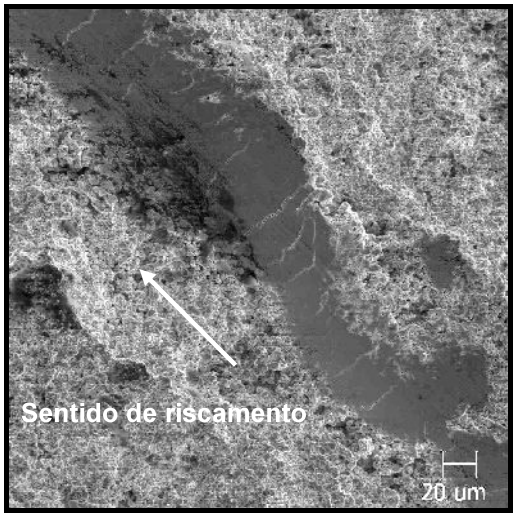
Figura 4.1: Gráfico dos três ensaios realizados na amostra revestida com WC-10Co-4Cr.

Observando-se o gráfico dos sinais adquiridos, durante o ensaio, percebe-se a reprodutibilidade do sistema. A carga crítica não foi atingida neste ensaio como mostra as fotos realizadas no MEV. Além disso, percebe a presença de trincas Hertzianas em todo o risco.

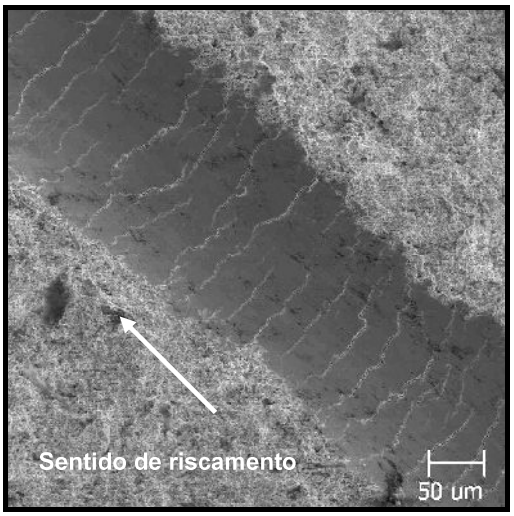
A figura 4.2 mostra os detalhes mais relevantes dos riscos realizados na amostra revestida com WC-10Co-4Cr.



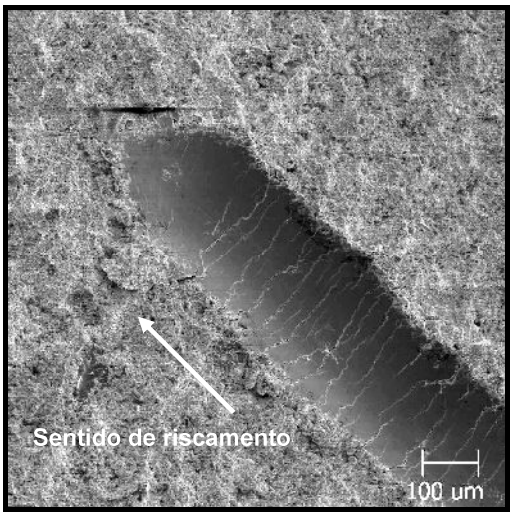
a) Vista geral do primeiro risco.



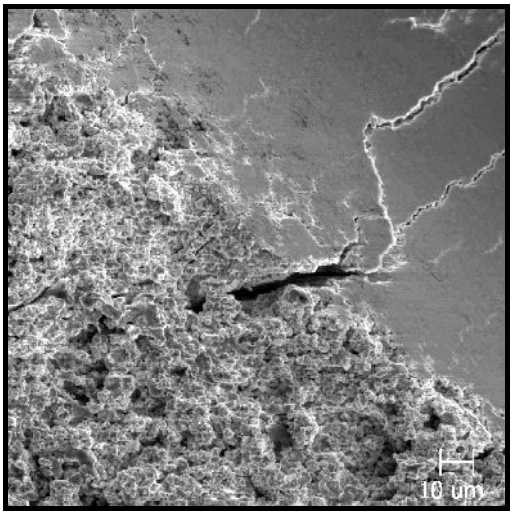
b) Início do primeiro risco.



c) Região central do primeiro risco.



d) Final do primeiro risco.



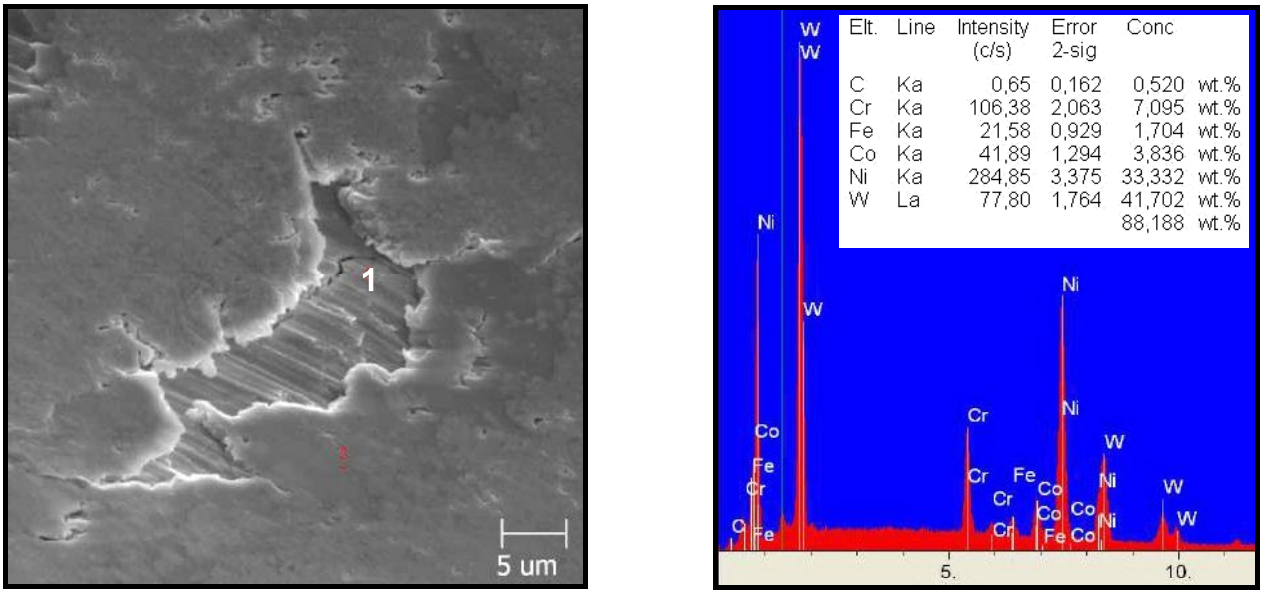
e) Detalhe de uma das trincas do final do primeiro risco.

Figura 4.2: Fotos com os detalhes do ensaio de macroesclerometria realizado na amostra revestida com WC-10Co-4Cr.

Pode-se observar, na figura 4.1, que a carga aplicada na amostra aumentou continuamente no ensaio. Devido ao aumento da carga sobre o penetrador, a superfície de contato do penetrador durante o risco também aumentou, provocando o aumento progressivo da largura do risco (esse detalhe é apresentado na figura 4.2 a).

Através da análise realizada no MEV, na amostra revestida com WC-10Co-4Cr, verificou-se que o revestimento não foi destacado apesar da severidade do ensaio. É nítida a presença de trincas Hertzianas, isto é, trincas perpendiculares à direção de riscamento. Mesmo no estágio inicial do ensaio, em que as cargas são baixas, essas trincas estão presentes. Através da figura 4.2 e), pode-se observar que algumas dessas trincas se estenderam para fora da largura do risco. É importante notar que nenhum destacamento lateral foi observado.

Para identificar a extensão do riscamento, ou seja, se o substrato foi atingido durante o processo, foram realizadas análises de composição química na maior profundidade de uma das trincas e no revestimento da amostra. A análise foi feita por EDS, em um equipamento montado em um MEV. O resultado é apresentado na figura 4.3.



a) Região analisada. b) EDS da região 1

Figura 4.3: Análise da composição química de uma das regiões da amostra revestida com WC-10Co-4Cr.

O baixo teor de Fe na composição química na região indicada por 1 na figura acima indica que o substrato da amostra não foi atingido.

A figura 4.4 apresenta o gráfico com a variação dos sinais da força normal e tangencial, durante os três processos de riscamento da amostra revestida com Ni18Cr6Al.

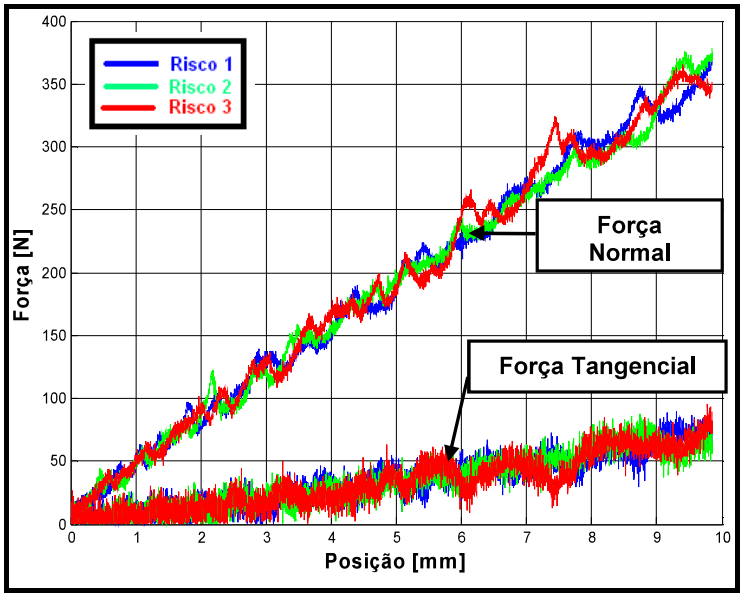
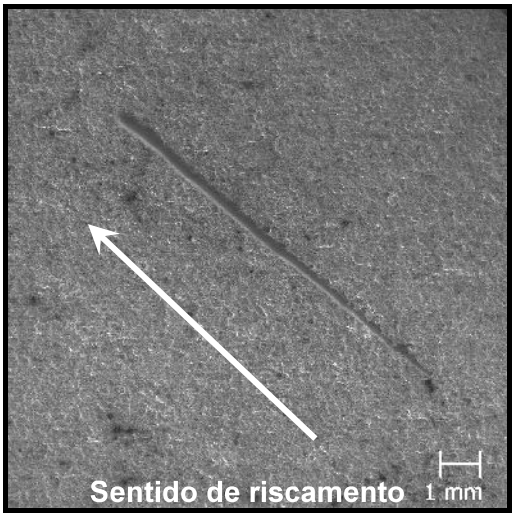
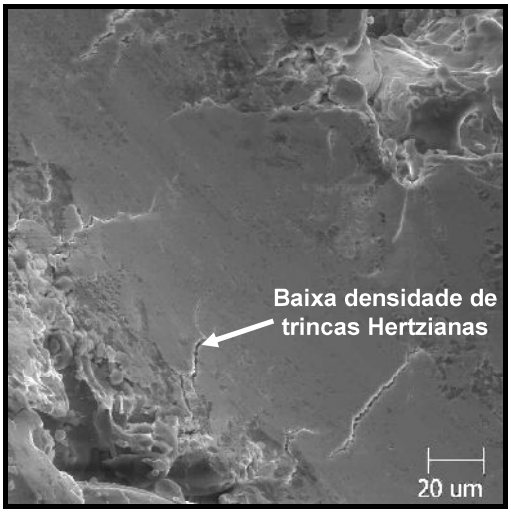


Figura 4.4: Gráfico com as curvas dos esforços normal e tangencial, durante o processo de riscamento da amostra revestida com Ni18Cr6Al.

As fotos com os detalhes do risco que melhor representa os ensaios realizados na amostra revestida com Ni18Cr6Al são apresentadas na figura 4.5.

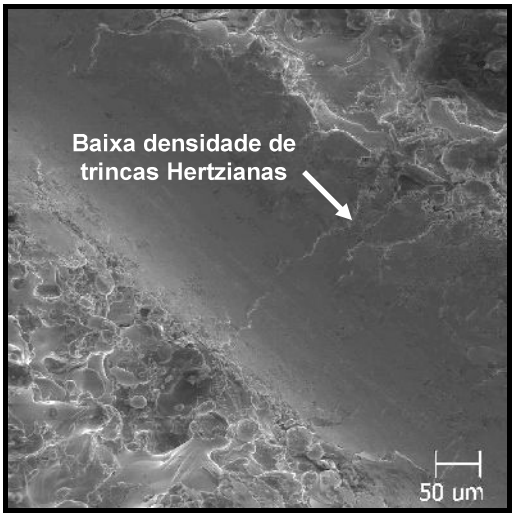


a) Vista geral do terceiro risco da amostra.

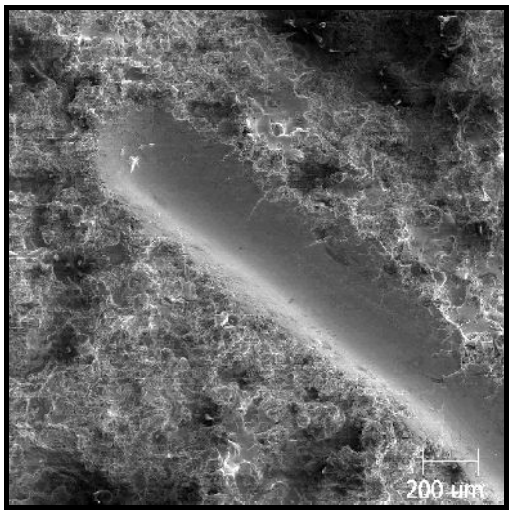


b) Início do terceiro risco.

Figura 4.5: Detalhes do terceiro risco produzido na amostra revestida com Ni18Cr6Al.



c) Região central do risco 3.



d) Final do risco 3.

Figura 4.5: Continuação.

A amostra revestida com Ni18Cr6Al, por sua vez, apresentou um comportamento dúctil. Em conseqüência disso, a quantidade de trincas Hertzianas no sulco foi muito reduzida, como mostrado na figura 4.5.

O gráfico com o comportamento das forças normal e tangencial, durante os três processos de riscamento, da amostra revestida com Stellite 6, é ilustrado na figura 4.6.

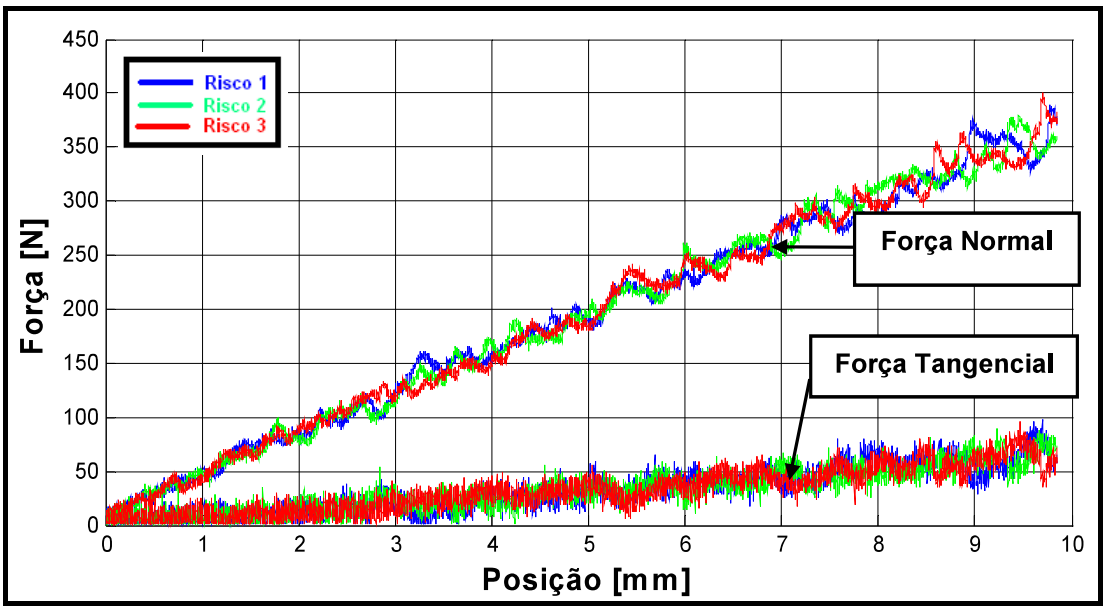
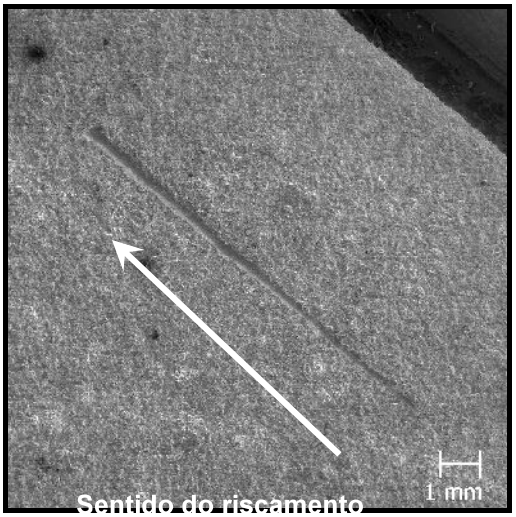
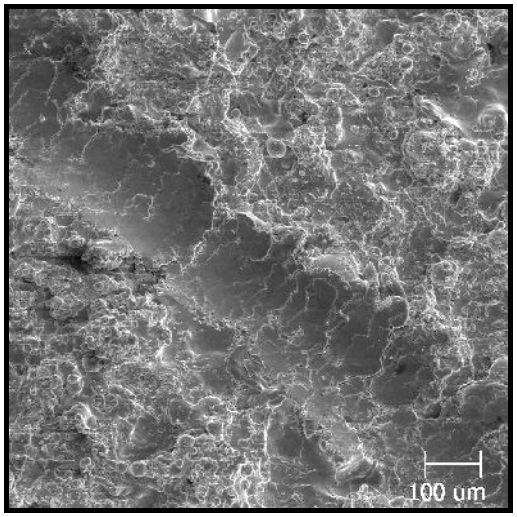


Figura 4.6: Gráficos dos ensaios de macroesclerometria na amostra revestida com Stellite 6.

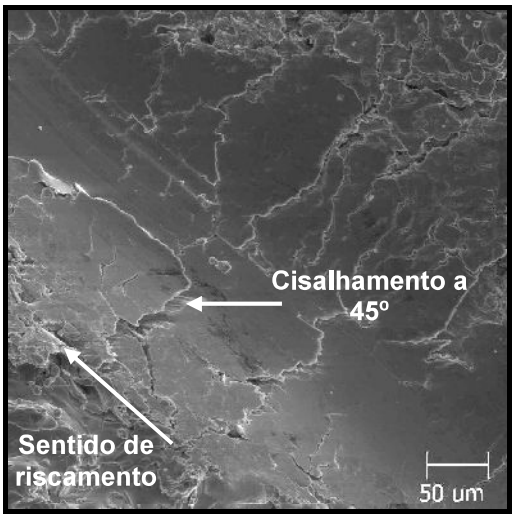
As fotos que detalham o terceiro risco da amostra revestida com Stellite 6, são apresentadas na figura 4.7.



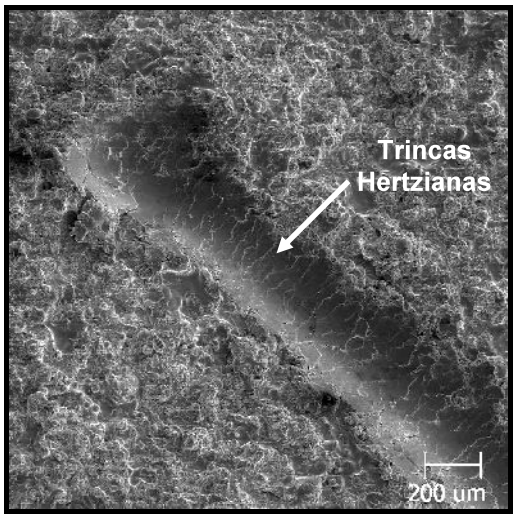
a) Vista geral do terceiro risco.



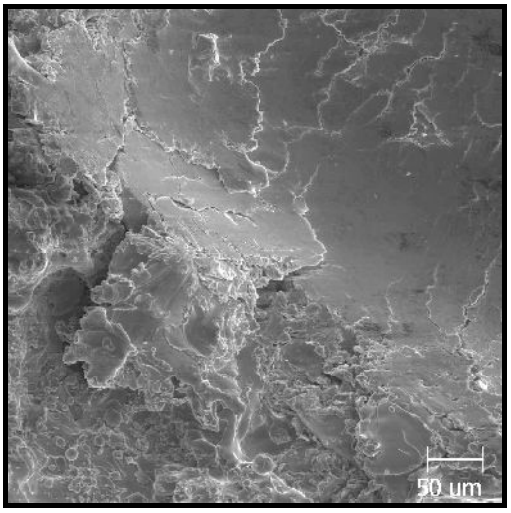
b) Detalhe do início do risco.



c) Detalhe da região central do risco.



d) Final do terceiro risco.



e) Detalhe do final do terceiro risco.

Figura 4.7: Trincas ao longo do terceiro risco realizado na amostra revestida com Stellite 6.

A amostra, cujo revestimento é constituído por Stellite 6, apresentou trincas, geradas pelas tensões de contato, que evoluem para uma forma com cisalhamento a 45 graus, como mostrado na figura 4.7 c). Na figura 4.8 e), percebe-se que algumas trincas evoluíram para fora da largura do sulco. As trincas deste revestimento são de profundidade inferior às observadas no metal duro da amostra revestida por WC-10Co-4Cr.

A figura 4.8 apresenta o gráfico com o comportamento da força normal e tangencial durante os três processos de riscamento da amostra revestida com Mo.

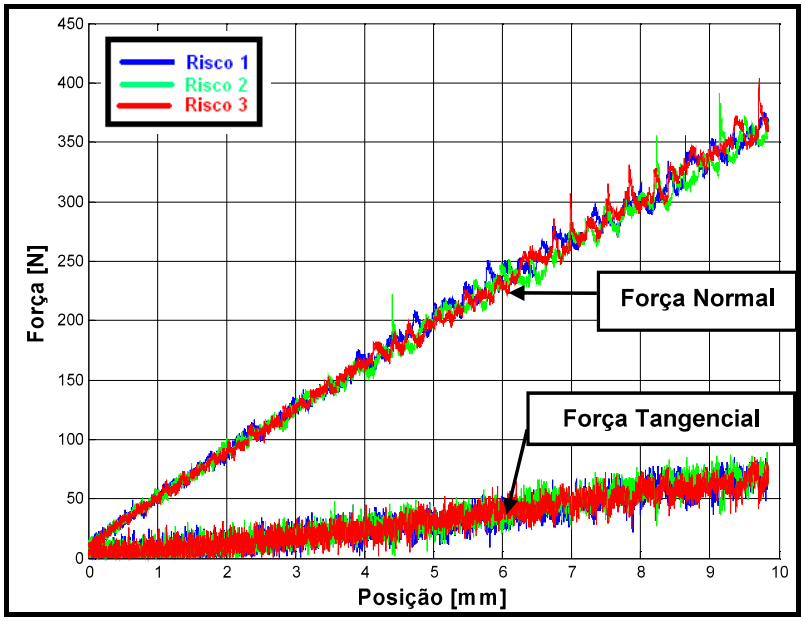
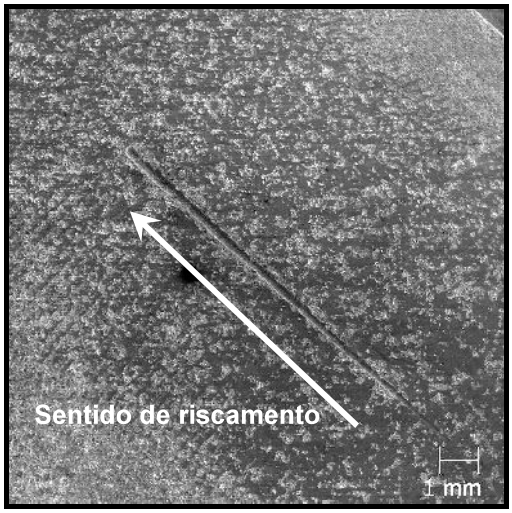
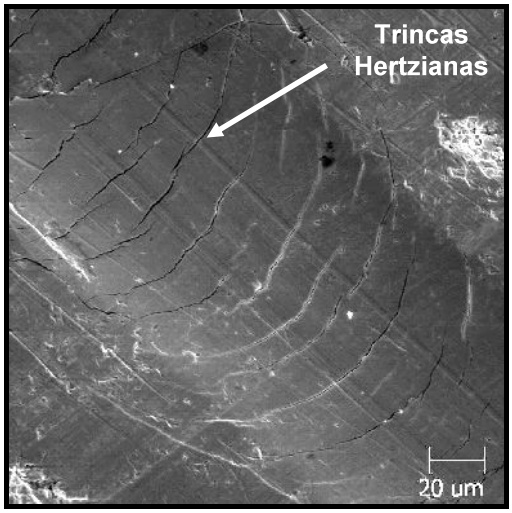


Figura 4.8: Gráfico resultante do processo de riscamento da amostra revestida com Mo.

As fotos que detalham o segundo risco, realizado na amostra revestida com Mo, são apresentadas na figura 4.9.

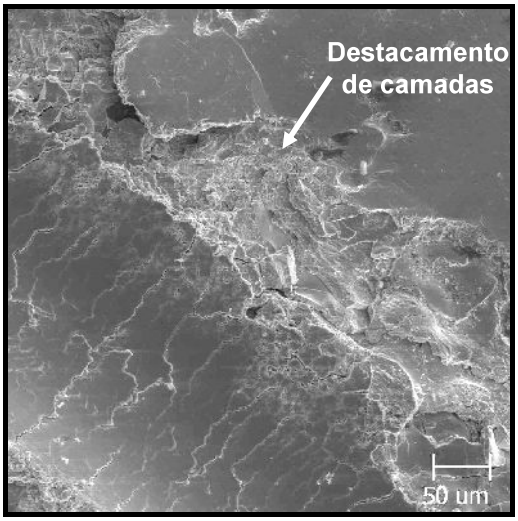


a) Vista geral do segundo risco.

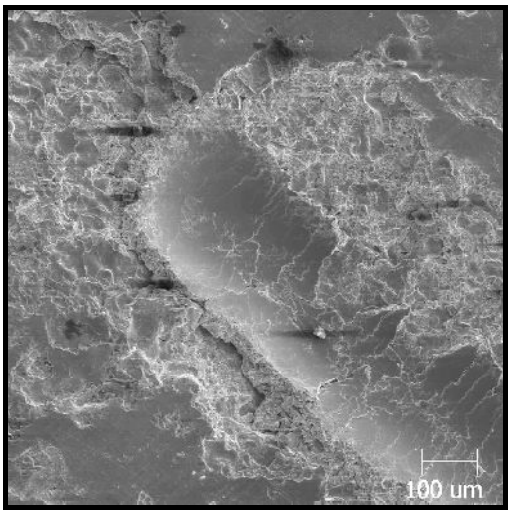


b) Início do segundo risco.

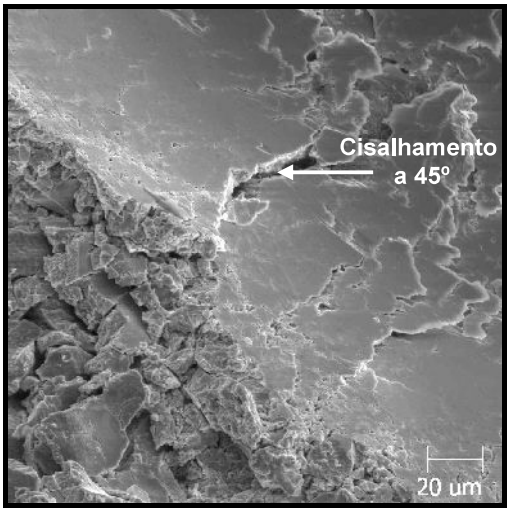
Figura 4.9: Detalhes do segundo risco realizados na amostra revestida com Mo.



c) Detalhe da região central do segundo risco.



d) Final do segundo risco.



e) Detalhe do final do segundo risco.

Figura 4.9: Continuação.

Através da análise da amostra revestida por Mo, percebe-se um intenso destacamento do revestimento no final do ensaio, isto é, quando a carga normal aplicada aproximou-se de seu valor máximo. Isso pode ser observado na figura 4.9 d). Além disso, no final do risco, algumas trincas evoluíram para uma forma de cisalhamento a 45 graus. O destacamento/delaminação nesta amostra também está presente na região central do risco. As trincas hertzianas estão presentes em praticamente todo comprimento do risco. Isso evidencia que o revestimento deve ser utilizado em situações com baixas pressões de contato. Esses resultados referem-se ao comportamento da camada de revestimento, caracterizando um problema de coesão da própria camada.

A microestrutura do revestimento de Molibdênio apresenta-se sob a forma de panquecas, com microdureza média de 630HV0,05. Essa morfologia ajuda a explicar o

aparecimento de pontos com cisalhamento a 45 graus. A presença de óxido de Mo entre as lamelas ajuda a justificar o destacamento de camadas do revestimento. A presença de óxido na microestrutura provoca problemas de coesão no revestimento. A morfologia da microestrutura da amostra revestida por Mo é apresentada na figura 4.10.

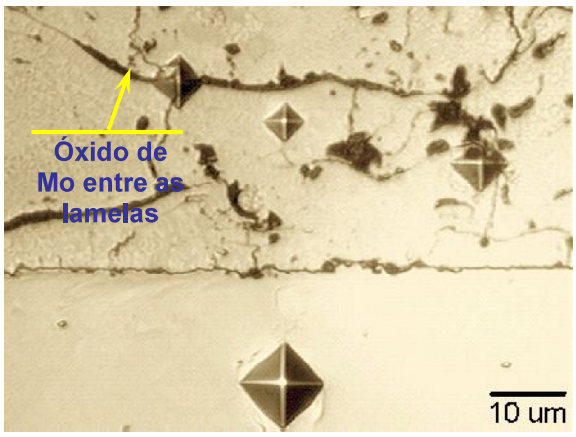
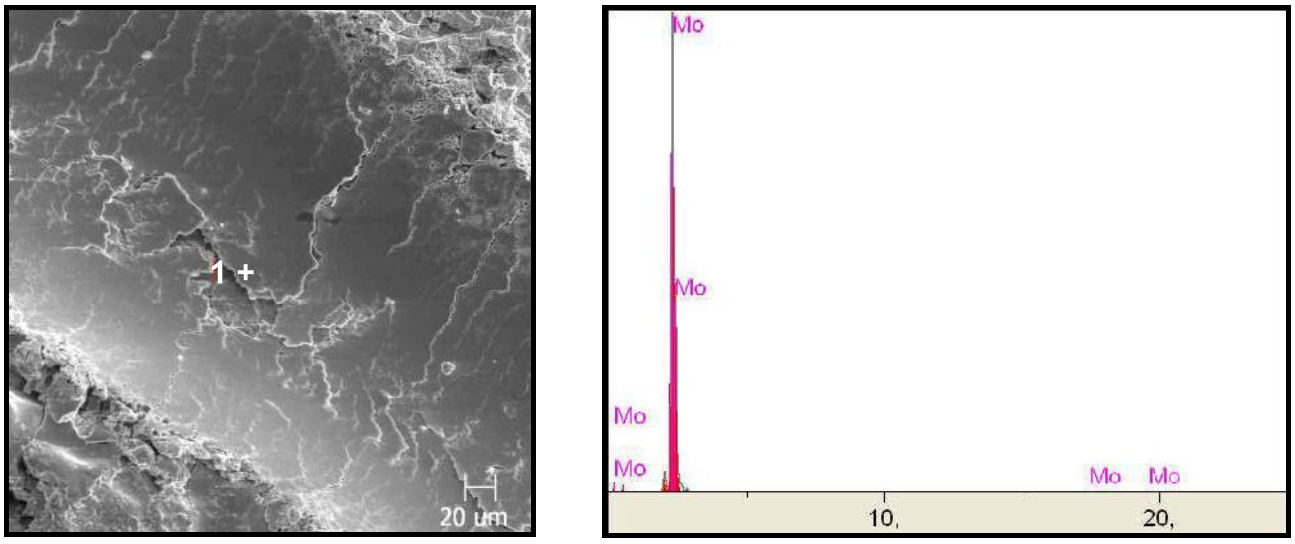


Figura 4.10: Microestrutura da amostra revestida por Mo.

Com intuito de comprovar que as trincas provocadas pelo ensaio de macroesclerometria, na amostra revestida com Mo não atingiram o substrato, foi realizada uma análise química por EDS de uma das trincas. A figura 4.11 apresenta a região analisada e o resultado.



a) Região 1, dentro da trinca. b) EDS da região 1.

Figura 4.11: Análise da composição química de uma das trincas da amostra revestida com Mo.

Através do resultado apresentado, conclui-se que o substrato não foi atingido.

É importante ressaltar que nenhuma das amostras acima analisadas teve seu revestimento rompido, isto é, o revestimento não foi destacado do substrato. Através dos ensaios apresentados, percebe-se claramente o aumento da carga normal aplicada na amostra através do aumento gradativo da largura e da profundidade dos riscos.

Além disso, por meio dos gráficos apresentados, verifica-se o aumento linear da força tangencial em paralelo com a carga normal. Isso resulta num coeficiente de atrito aparente praticamente independente da força normal (NOGUEIRA, 1988). Os valores aqui obtidos são apresentados na figura 4.12.

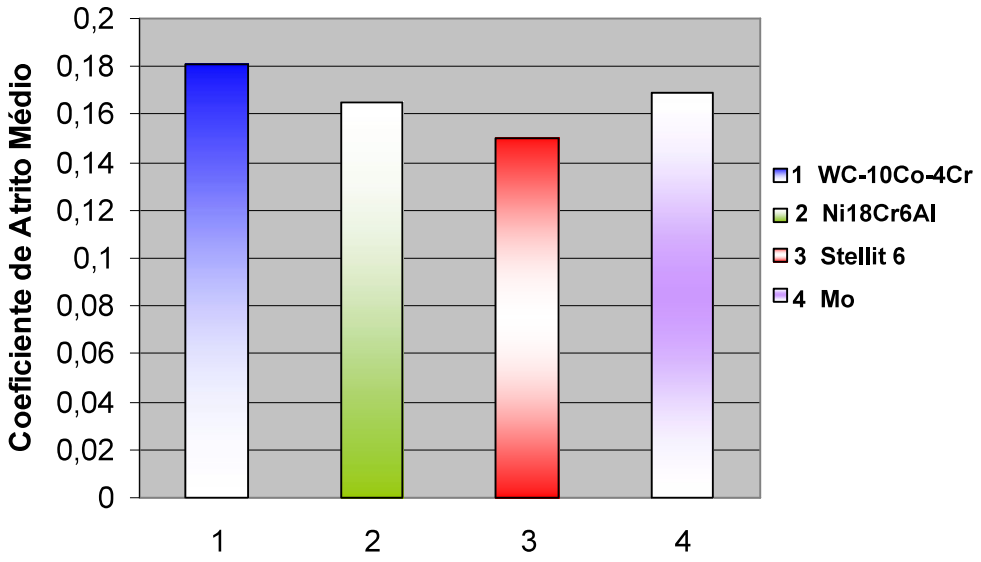


Figura 4.12: Coeficiente de atrito médio das amostras ensaias na primeira fase de validação do equipamento.

4.2 Ensaios de macroesclerometria com aquisição do sinal acústico

A segunda etapa da fase de verificação do equipamento consistiu, basicamente, em comprovar a eficiência da aquisição do sinal acústico. Esse sinal resulta dos diversos fenômenos que estão acontecendo no revestimento no decorrer de um ensaio de macroesclerometria. O início da atividade acústica não implica necessariamente no aparecimento de trincas externas e sim indica o início dos fenômenos que darão origem a essas trincas.

Para averiguação da qualidade do revestimento, foi realizada análise de sua composição química em três regiões diferentes. O resultado da análise química do revestimento de Ni-P químico é apresentado na tabela 4.1. Como a análise foi realizada na superfície da amostra, o oxigênio está presente devido à oxidação do revestimento durante o tratamento de endurecimento por precipitação a 400ºC/1h.

Tabela 4.1: Análise química dos revestimentos de Ni-P químico.

Região	Oxigênio (O) [%]	Fósforo (P) [%]	Níquel (Ni) [%]
1	8,350	10,234	81,417
2	8,105	10,144	81,751
3	6,467	10,395	83,138
Composição química média:	**7,641**	**10,258**	**82,102**

Os ensaios realizados na amostra revestida com Ni-P químico obedeceram aos parâmetros definidos no procedimento experimental, apresentado no capítulo **III**.

A figura 4.13 apresenta o gráfico com o comportamento da força normal, da força tangencial e do sinal acústico, do primeiro ensaio realizado a uma velocidade de 200 µm/s.

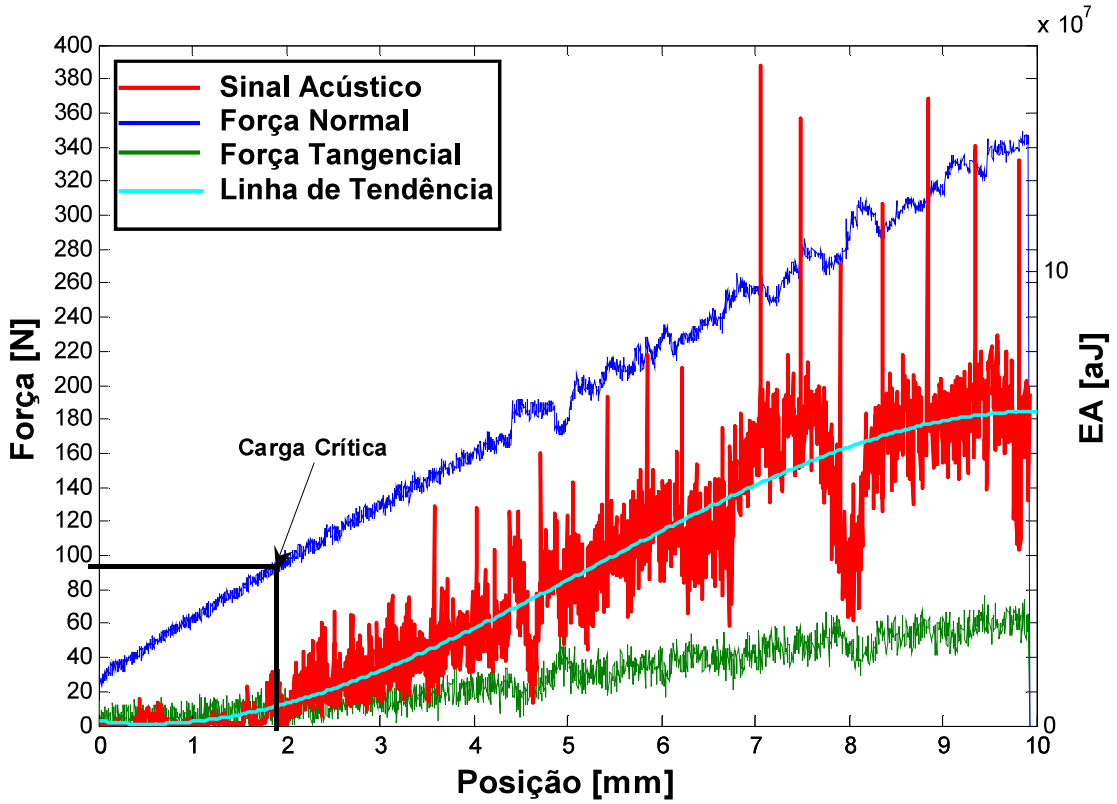
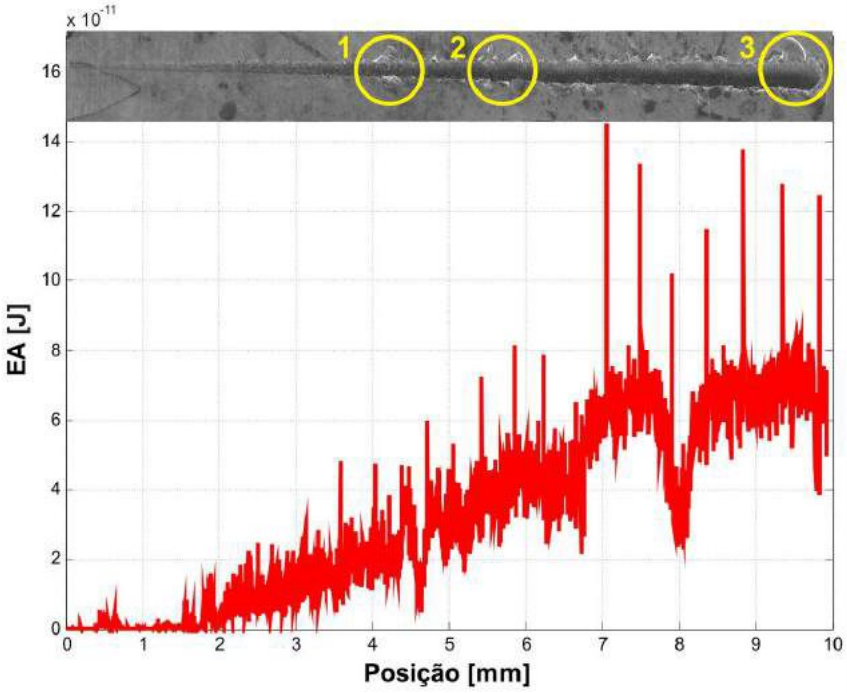


Figura 4.13: Variação dos sinais adquiridos durante o ensaio de macroesclerometria: força normal, força tangencial e sinal acústico.

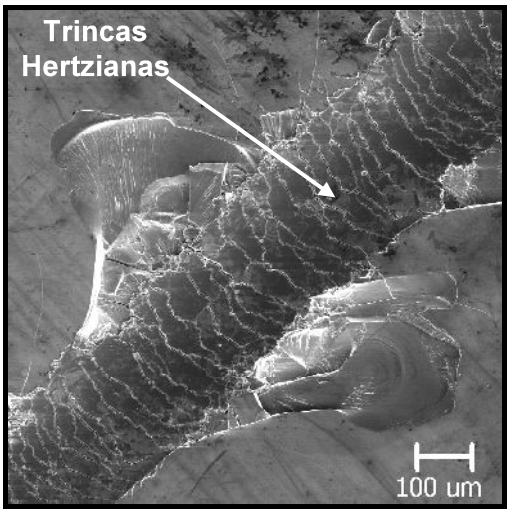
No primeiro ensaio realizado, os sinais de força normal e tangencial se comportaram da maneira esperada, linearmente. O crescimento do sinal acústico se inicia por volta de 2 mm após o início do processo de riscamento. O valor da carga normal aplicada na amostra, nesta posição, é de 96 N. Pode-se afirmar, então, que o valor da carga crítica do revestimento é de aproximadamente 96 N. A linha de tendência do sinal acústico indica o

aumento da atividade acústica em paralelo ao aumento da carga aplicada na amostra. Devido ao esforço aplicado, o número de trincas no decorrer do risco também deve aumentar.

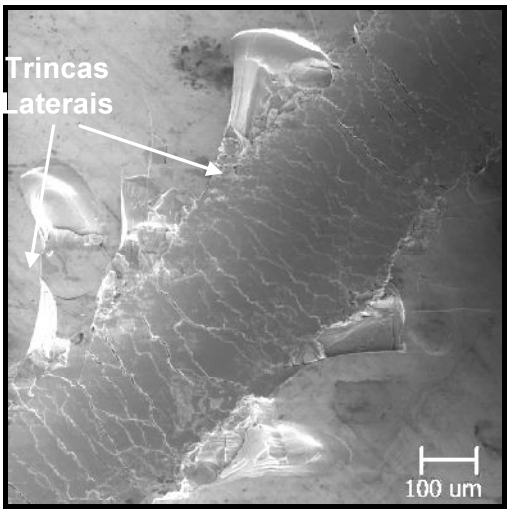
A figura 4.14 apresenta os detalhes do risco construído a partir do primeiro ensaio de macroesclerometria na amostra referida. Na vista geral do risco (ver figura 4.14a, topo), três regiões foram circuladas em amarelo. Essas regiões são ampliadas posteriormente para melhor visualização dos fenômenos que ocorreram na amostra durante o riscamento.



a) Comportamento do sinal acústico no decorrer do primeiro ensaio.

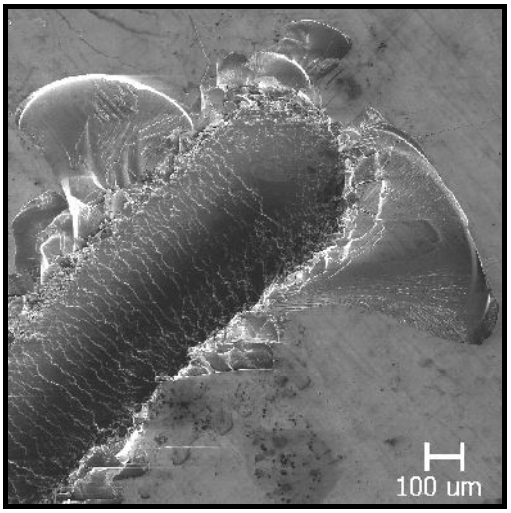


b) Ampliação da primeira região.



c) Ampliação da segunda região.

Figura 4.14: Trincas ao longo do primeiro ensaio de macroesclerometria realizado na amostra revestida com Ni-P químico.



d) Ampliação da terceira região.

Figura 4.14: Continuação.

Na figura 4.14, percebe-se a presença de trincas hertzianas durante praticamente todo o risco. Trincas laterais de dimensões maiores se iniciam por volta da posição de 4 milímetros após o início do processo de riscamento.

O segundo ensaio foi realizado com os mesmos parâmetros do ensaio anterior, e por isso o resultado foi similar ao primeiro ensaio. O sinal acústico começa a crescer, de forma praticamente linear, por volta de 1 mm ou a 82 N. A figura 4.15 apresenta o gráfico com o comportamento dos sinais adquiridos durante o ensaio.

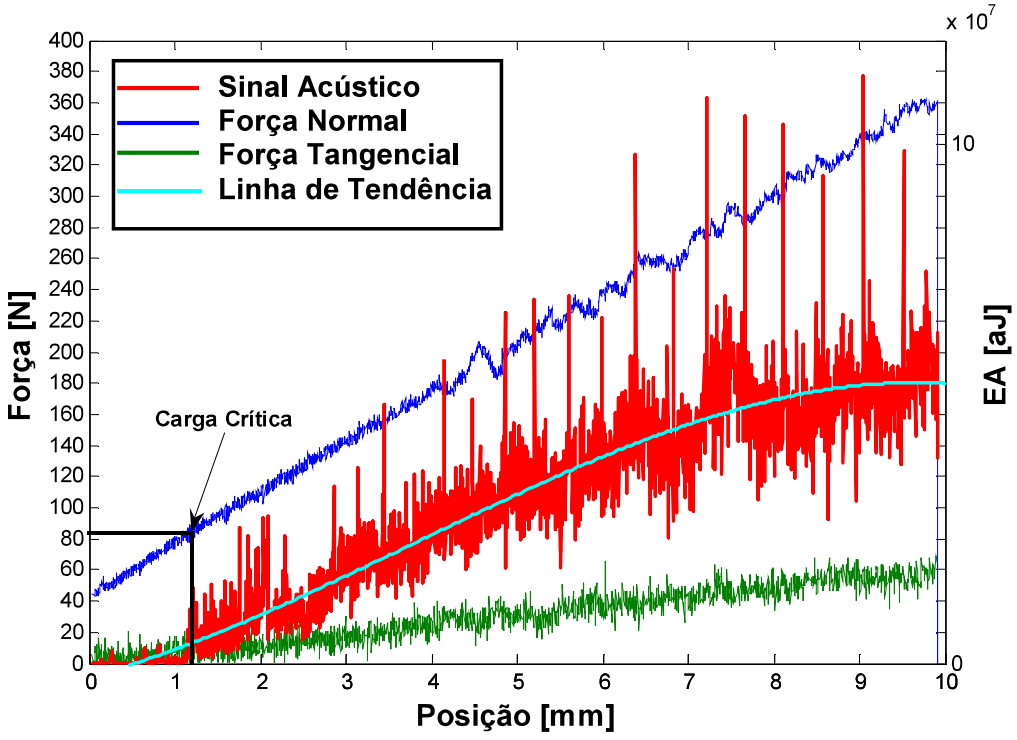
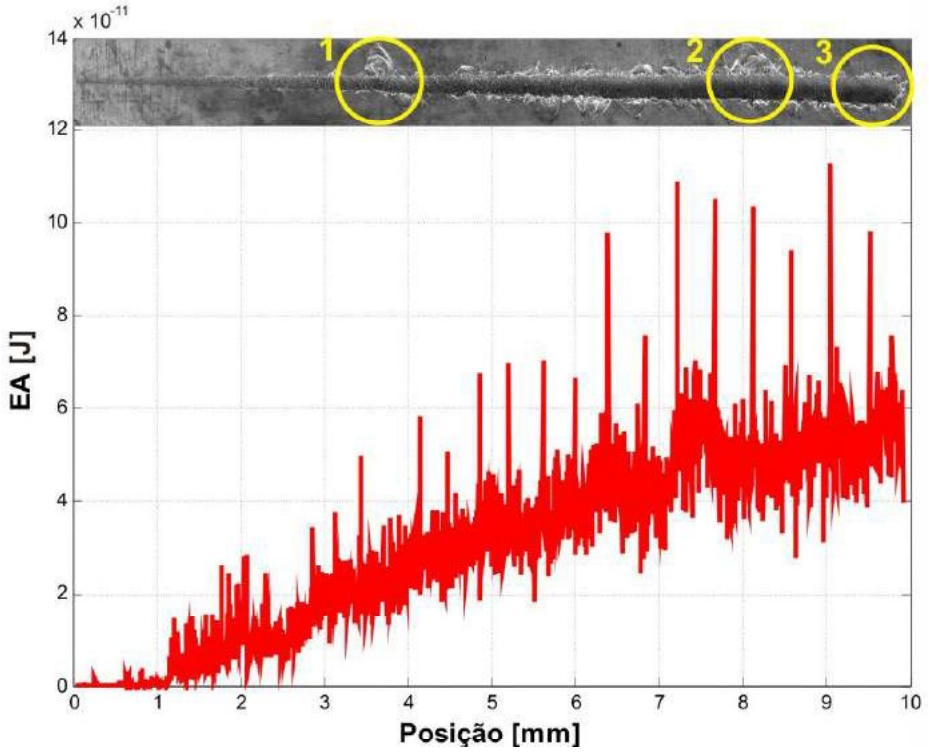
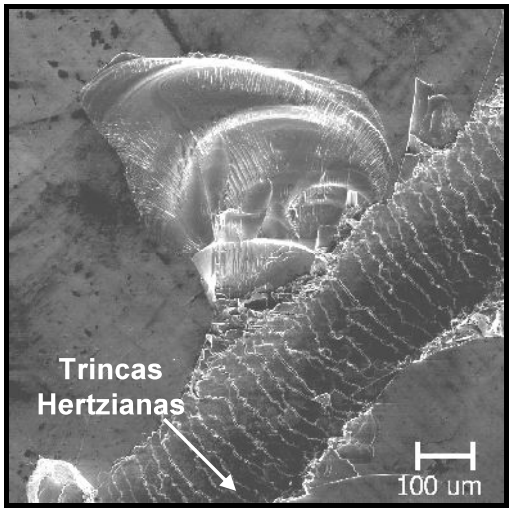


Figura 4.15: Comportamento dos sinais de controle durante o segundo ensaio de macroesclerometria.

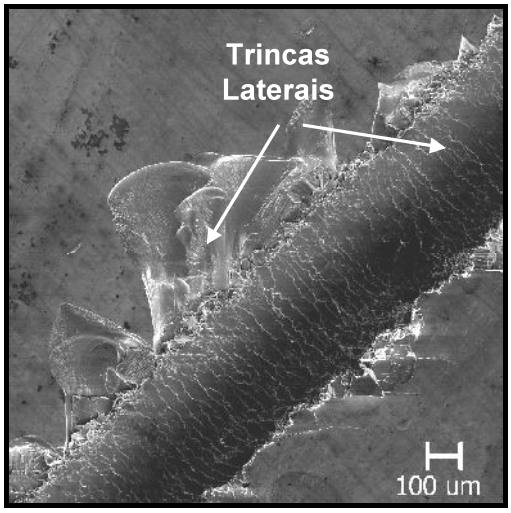
Na figura 4.16 a), o sinal acústico pode ser comparado ao surgimento de trincas no decorrer do processo de riscamento. Algumas das principais trincas foram ampliadas para melhor visualização do fenômeno. O resultado é apresentado na figura 4.16.



a) Comportamento do sinal acústico comparado com o surgimento de trincas durante o ensaio.

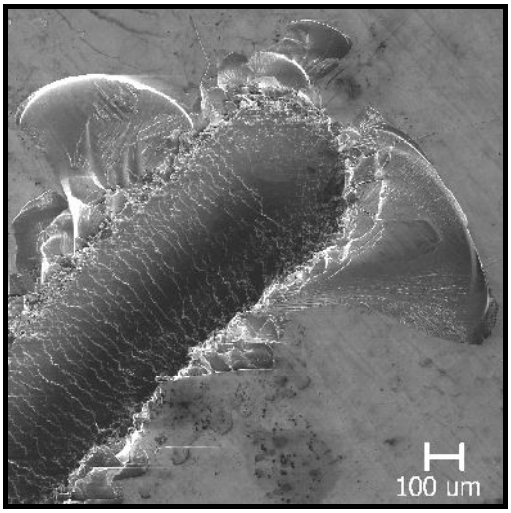


b) Ampliação da região 1.



c) Ampliação da região 2.

Figura 4.16: Trincas ao longo do segundo risco produzido pelo ensaio de macroesclerometria.



d) Ampliação da região 3.

Figura 4.16: Continuação.

O terceiro ensaio foi realizado a uma velocidade de 50 µm/s, considerada baixa. Através deste ensaio, percebeu-se que o nível do sinal de emissão acústica começa a ficar significativo a partir do aparecimento das trincas, por volta da posição de 3,7 mm após o início do riscamento. Pode-se afirmar que a carga crítica tem valor de aproximadamente 160 N. O gráfico com o comportamento dos sinais adquiridos é apresentado na figura 4.17.

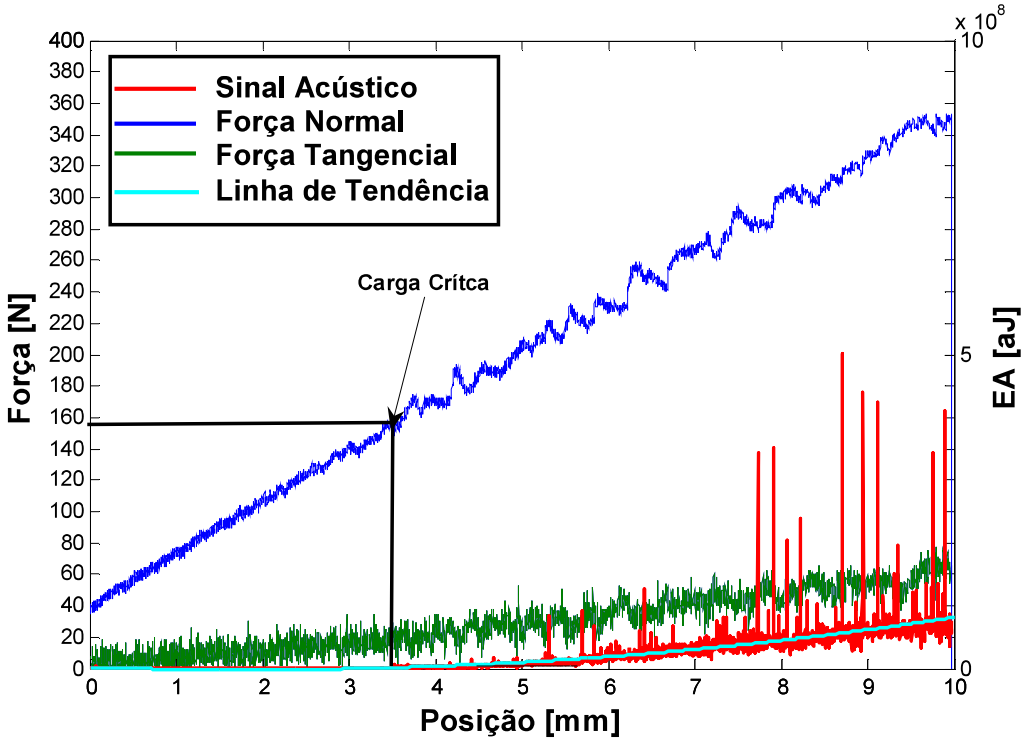
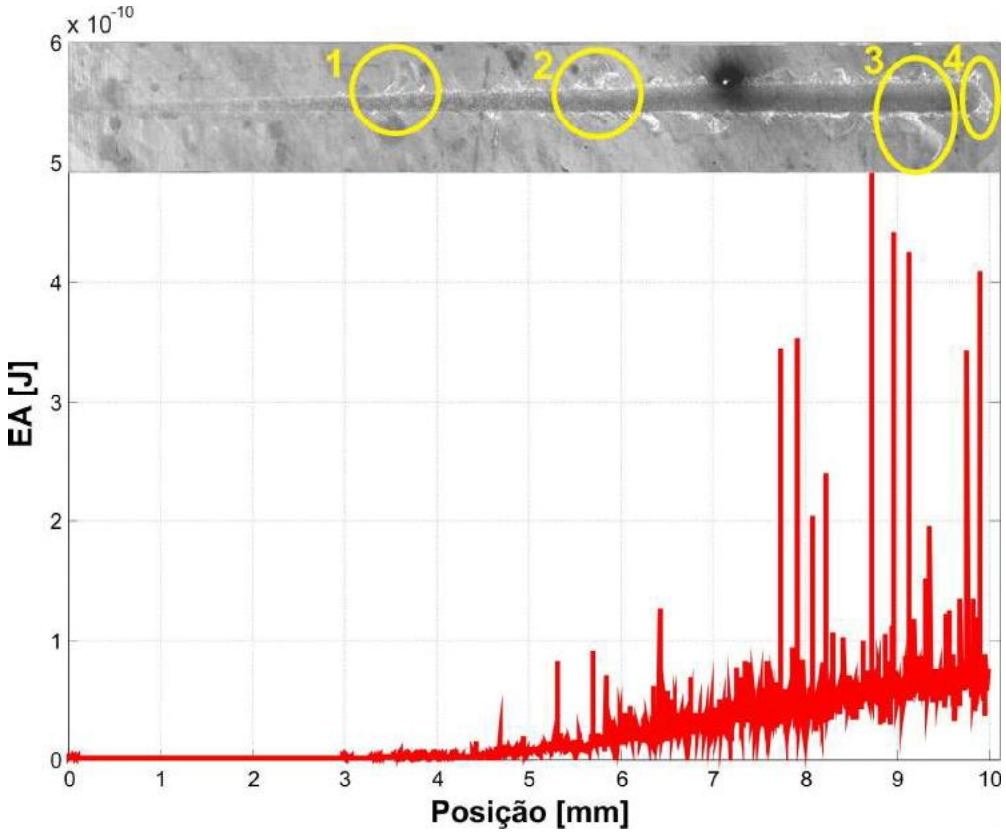
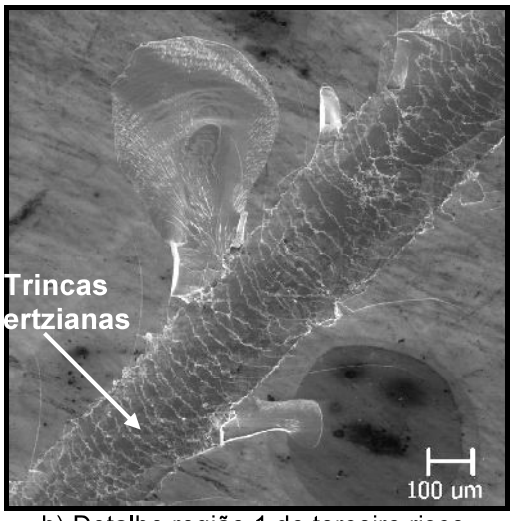


Figura 4.17: Variação dos sinais adquiridos durante o terceiro ensaio de macroesclerometria.

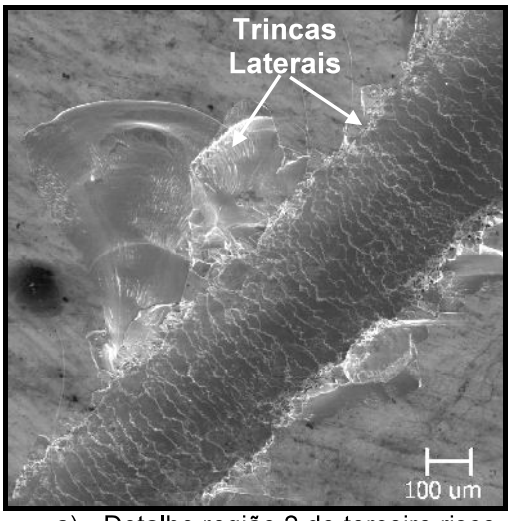
As trincas observadas neste ensaio são, em sua maioria, hertzianas. As trincas laterais presentes no risco, coincidem com a diferenciação do sinal acústico. A figura 4.18 ilustra bem os fenômenos que ocorreram na amostra.



a) Variação do sinal acústico em relação ao surgimento de trincas ao longo do risco.

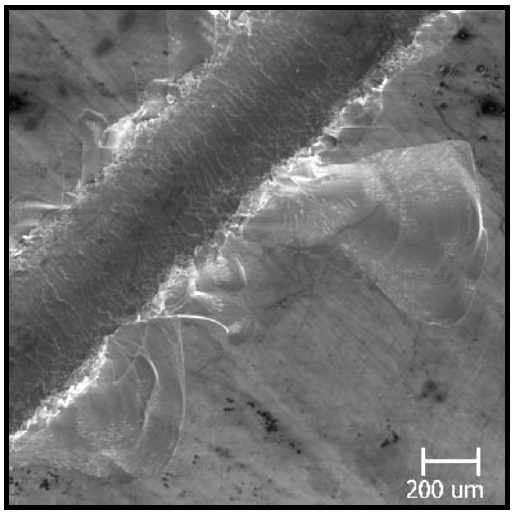


b) Detalhe região 1 do terceiro risco.

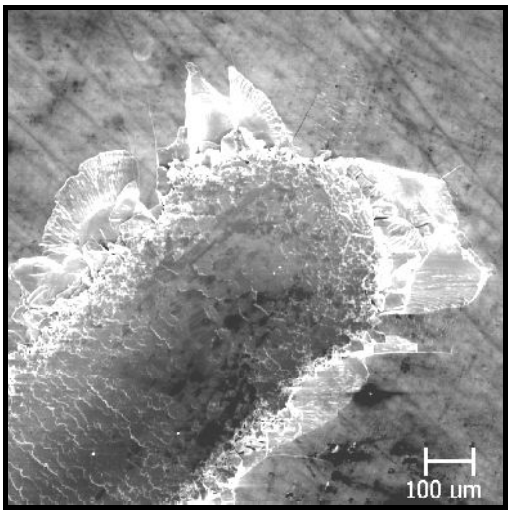


a) Detalhe região 2 do terceiro risco.

Figura 4.18: Trincas presentes no sulco originado a partir do terceiro ensaio de macroesclerometria.



d) Detalhe região 3 do risco.



e) Detalhe região 4 do risco.

Figura 4.18: Continuação.

O quarto ensaio, detalhado a seguir, também foi realizado em uma velocidade baixa. Devido a isso, o resultado foi bem parecido com o ensaio anterior. O crescimento do sinal acústico inicia-se por de 4 mm, após o início do processo de riscamento. A carga normal aplicada, nesta posição, tem valor aproximado de 160 N. A figura 4.19 apresenta o gráfico com o comportamento dos sinais adquiridos.

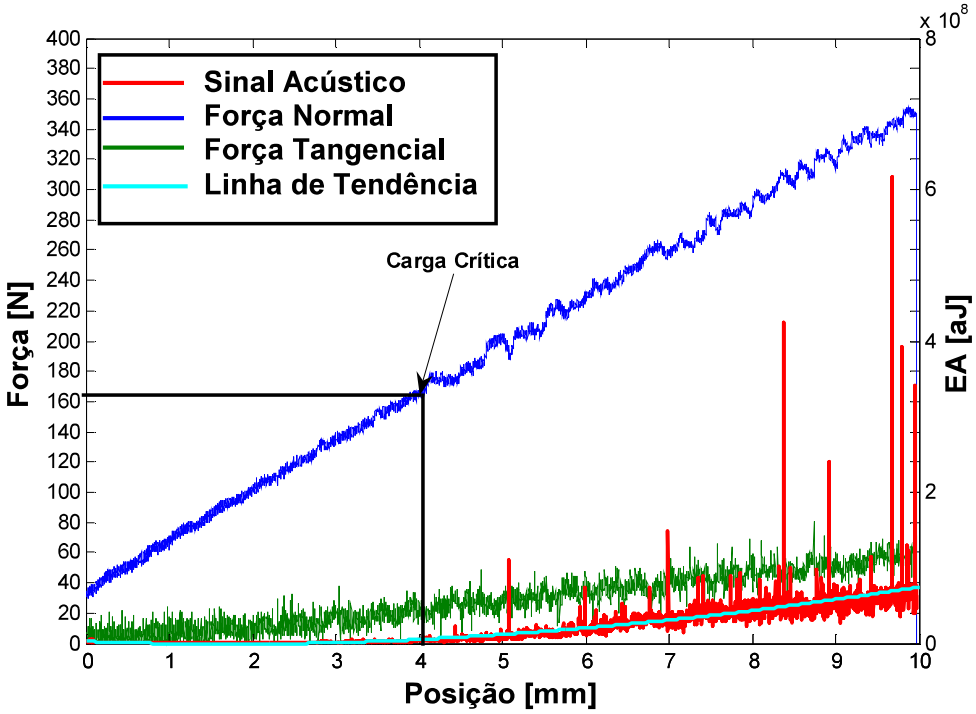
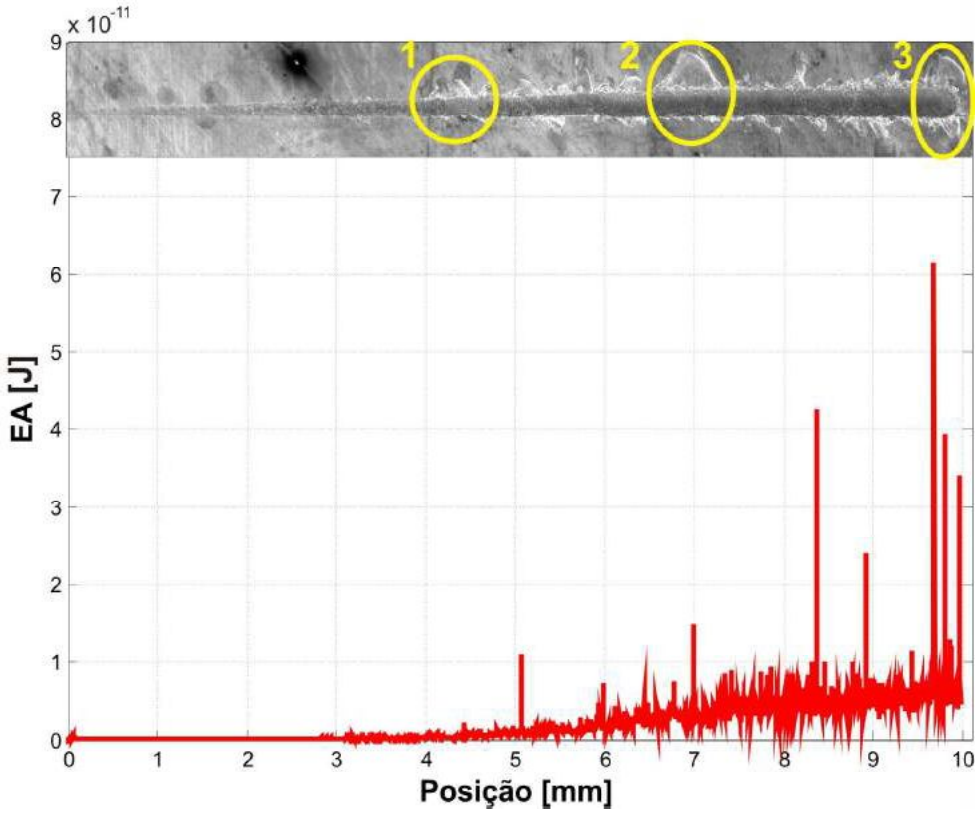
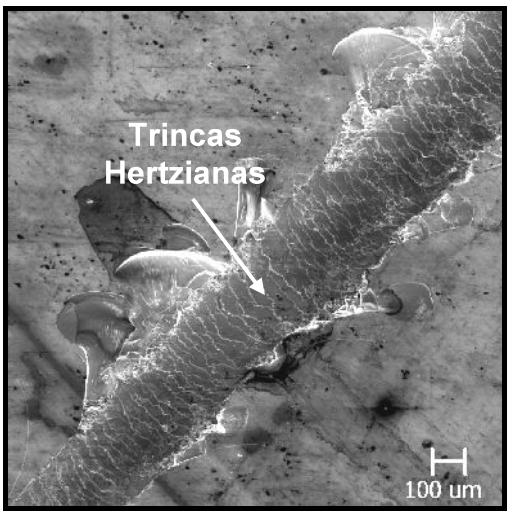


Figura 4.19: Variação dos sinais adquiridos durante o quarto ensaio.

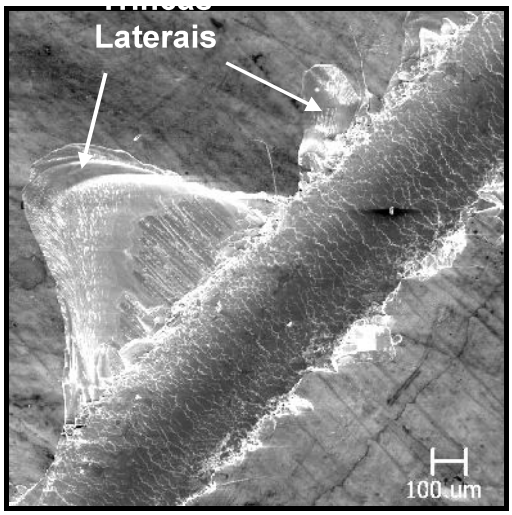
Também no quarto ensaio, percebe-se a presença de trincas hertzianas em todo o risco. As trincas laterais estão presentes no risco a partir da posição de aproximadamente 4 mm. A figura 4.20 apresenta a vista geral do risco e suas principais regiões.



a) Sinal de emissão acústico em relação à vista geral do risco produzido.

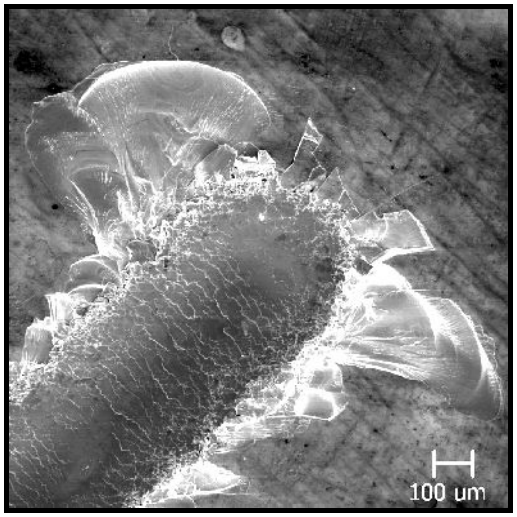


b) Ampliação da região 1.



c) Ampliação da região 2.

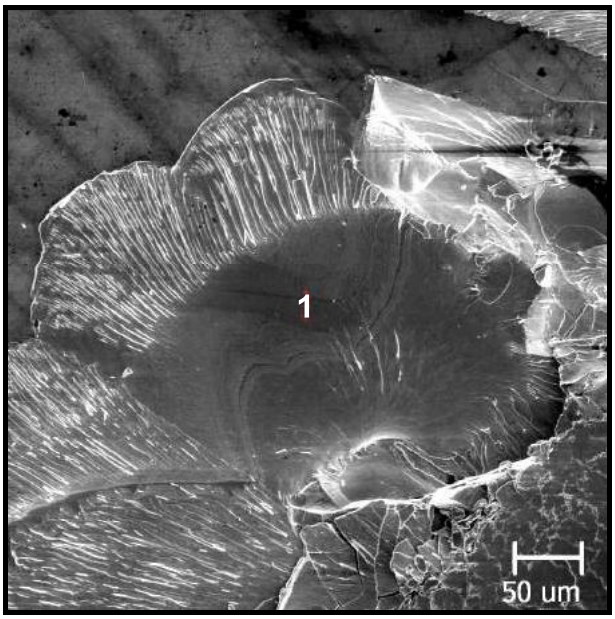
Figura 4.20: Trincas produzidas através do ensaio de macroesclerometria na amostra revestida com Ni-P químico.



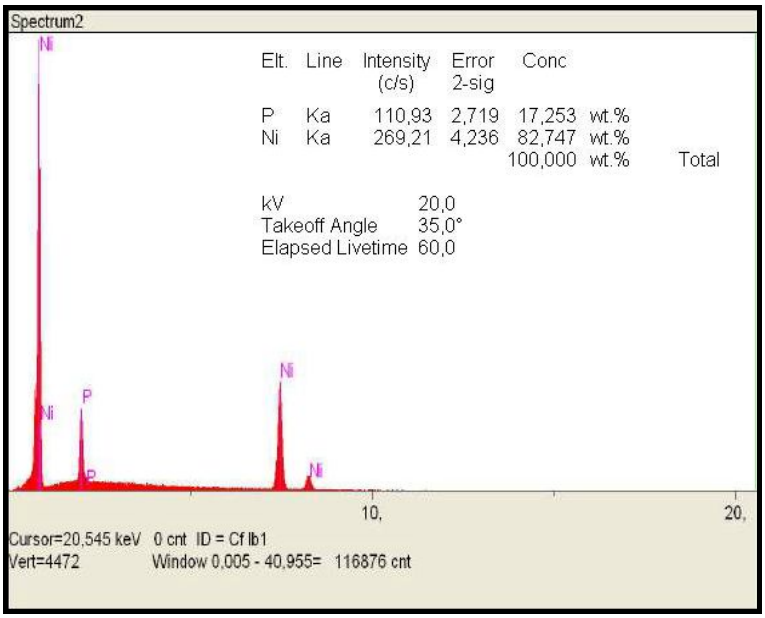
d) Ampliação da região 3.

Figura 4.20: Continuação

Para comprovar efetivamente que as trincas produzidas na amostra ensaiada não atingiram o substrato, foi realizada a análise da composição química da região 1, da trinca apresentada na figura 4.21 b), por EDS. A figura 4.21 apresenta o resultado.



a) Região analisada.



b) Resultado da análise da região 1 da trinca.

Figura 4.21: Análise da composição química de uma trinca profunda da amostra revestida com Ni-P.

Pela análise da composição química da trinca apresentada na figura 4.21 b), comprova-se que a região mais profunda da trinca ainda pertence ao revestimento de Ni-P químico. Portanto, o revestimento não foi arrancado do substrato, isto é, o microtrincamento não atingiu o substrato.

Comparando-se o resultado dos estudos dos ensaios realizados no macroesclerômetro, desenvolvido no LTAD, com os ensaios realizados por Piotrkowski *et al*. (2005), apresentados no Capítulo I, percebe-se que as curvas de tendência dos sinais obtidos se assemelham. Tal fato indica o funcionamento correto do sistema de macroesclerometria.

Analisando-se os ensaios apresentados anteriormente, confirma-se a que a aquisição da atividade acústica, durante o ensaio de macroesclerometria, é uma importante ferramenta na complementação das técnicas destinadas à análise de revestimentos. Isso facilita a determinação da carga crítica, tornando mais exata a caracterização tribológica de revestimentos. A tabela 4.2, a seguir, apresenta uma comparação dos resultados obtidos nessa etapa.

Tabela 4.2: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de macroesclerometria com aquisição do sinal acústico.

Ensaio	Velocidade de riscamento [µm/s]	Carga crítica [N]
1	200	96
2	200	82
3	50	158
	50	162

De acordo com a tabela apresentada, verificou-se que, a velocidades superiores, a diferenciação do sinal acústico se inicia em valores de carga mais baixos, indicando que as trincas se originam com esforços menores. Para comprovar tal fenômeno, analisou-se a influência da velocidade nesses ensaios.

4.3 Investigação da influência da velocidade de riscamento nos ensaios de macroesclerometria

A velocidade de translação da amostra é um importante parâmetro em um ensaio de macroesclerometria. Como foi dito anteriormente, esta velocidade deve ter valor relativamente baixo, para que não provoque nenhuma alteração devida à temperatura no ensaio. O que se observa é que, mesmo dentro de uma faixa de baixas velocidades, de 50 µm/s a 200 µm/s, um pequeno acréscimo já provoca alterações na resposta de uma determinada amostra a um ensaio de macroesclerometria.

Tendo em vista a investigação da influência da velocidade de translação nos ensaios de macroesclerometria, foram realizados ensaios cujos parâmetros foram definidos no capítulo III. Para cada velocidade foram feitos três ensaios.

Na figura 4.22 são apresentados os ensaios realizados na amostra revestida com Ni-P químico, a uma velocidade de 50 µm/s.

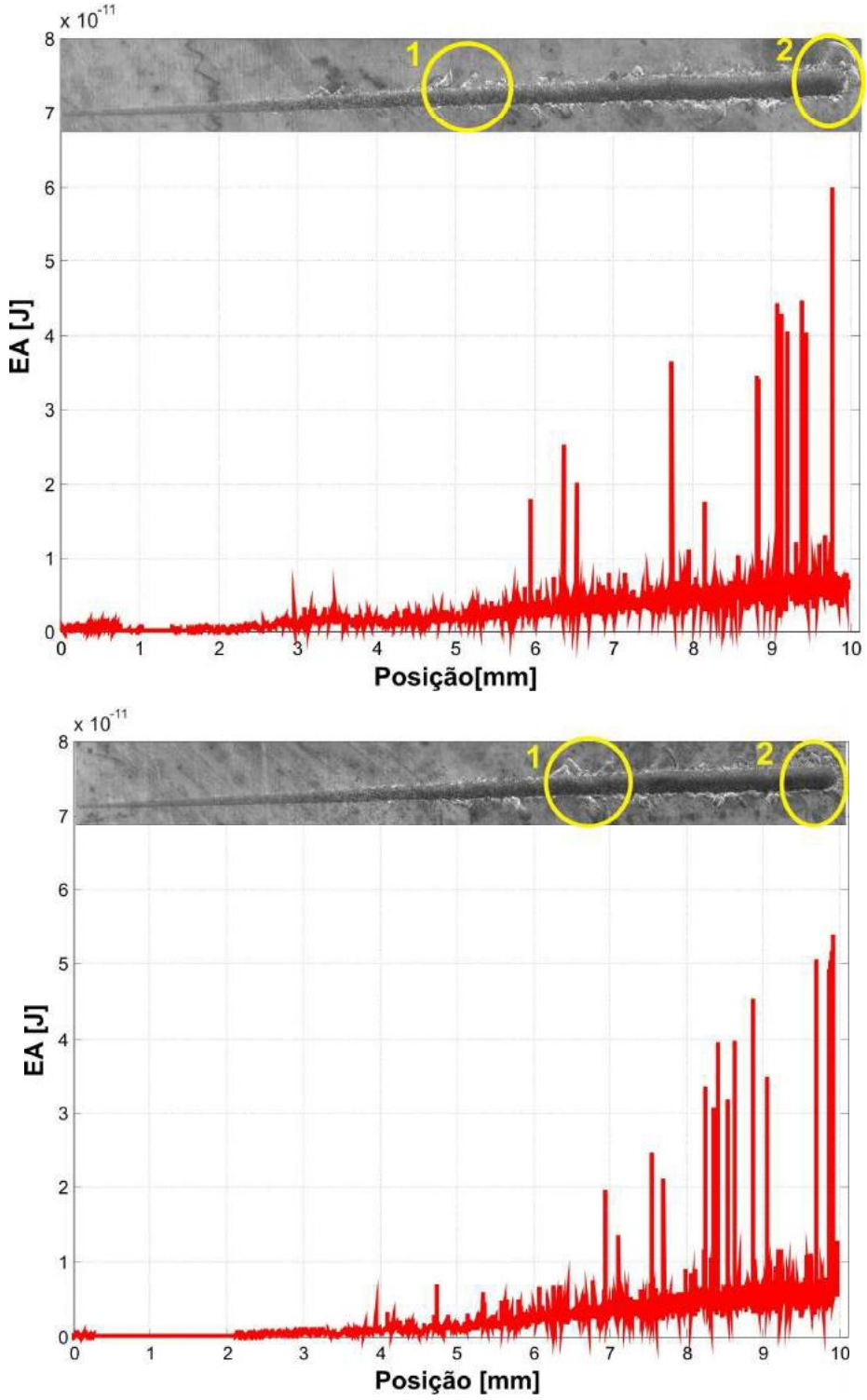


Figura 4.22: Ensaios de macroesclerometria realizados à velocidade de 50 µm/s.

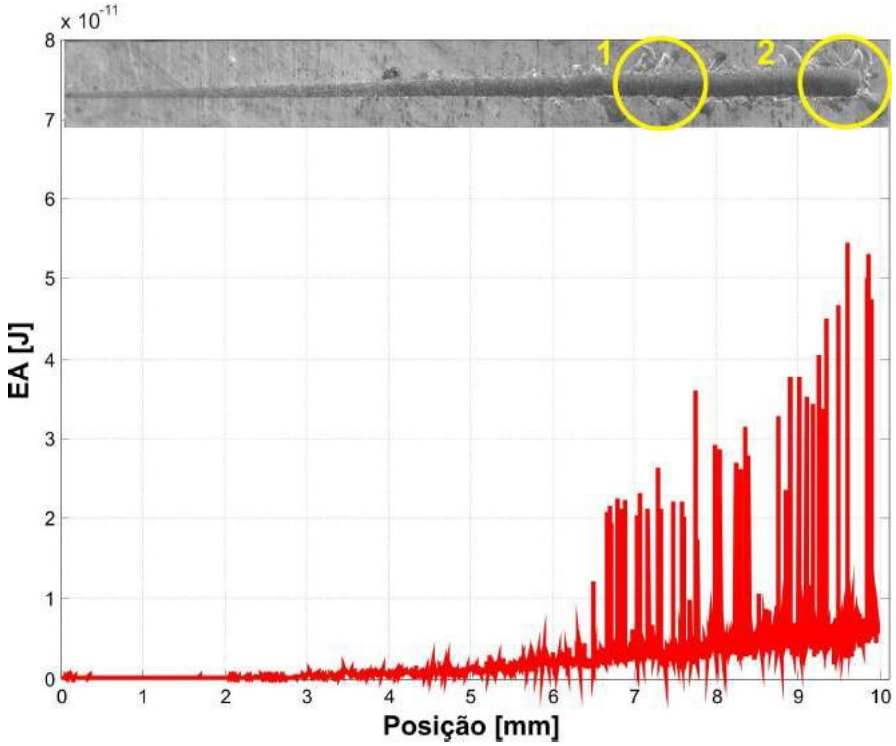


Figura 4.22: Continuação.

Analisando as três curvas obtidas nos ensaios com velocidade de translação de 50 µm/s, conclui-se que as trincas que aparecem no início do ensaio não são tão significativas quanto as trincas que aparecerem ao final. Isso pode ser observado também através do sinal acústico, que se apresenta praticamente igual a zero até a posição de quatro milímetros. O nível de energia máximo atingido foi de $6x10^{-11}$ J.

A segunda velocidade analisada foi de 100 µm/s. Observou-se o aumento das trincas no início do ensaio, e um nível maior que o anterior, de energia absoluta de aproximadamente $9x10^{-11}$ J, durante todo o ensaio. Foram realizados três ensaios consecutivos, na mesma amostra. A figura 4.23 apresenta os resultados.

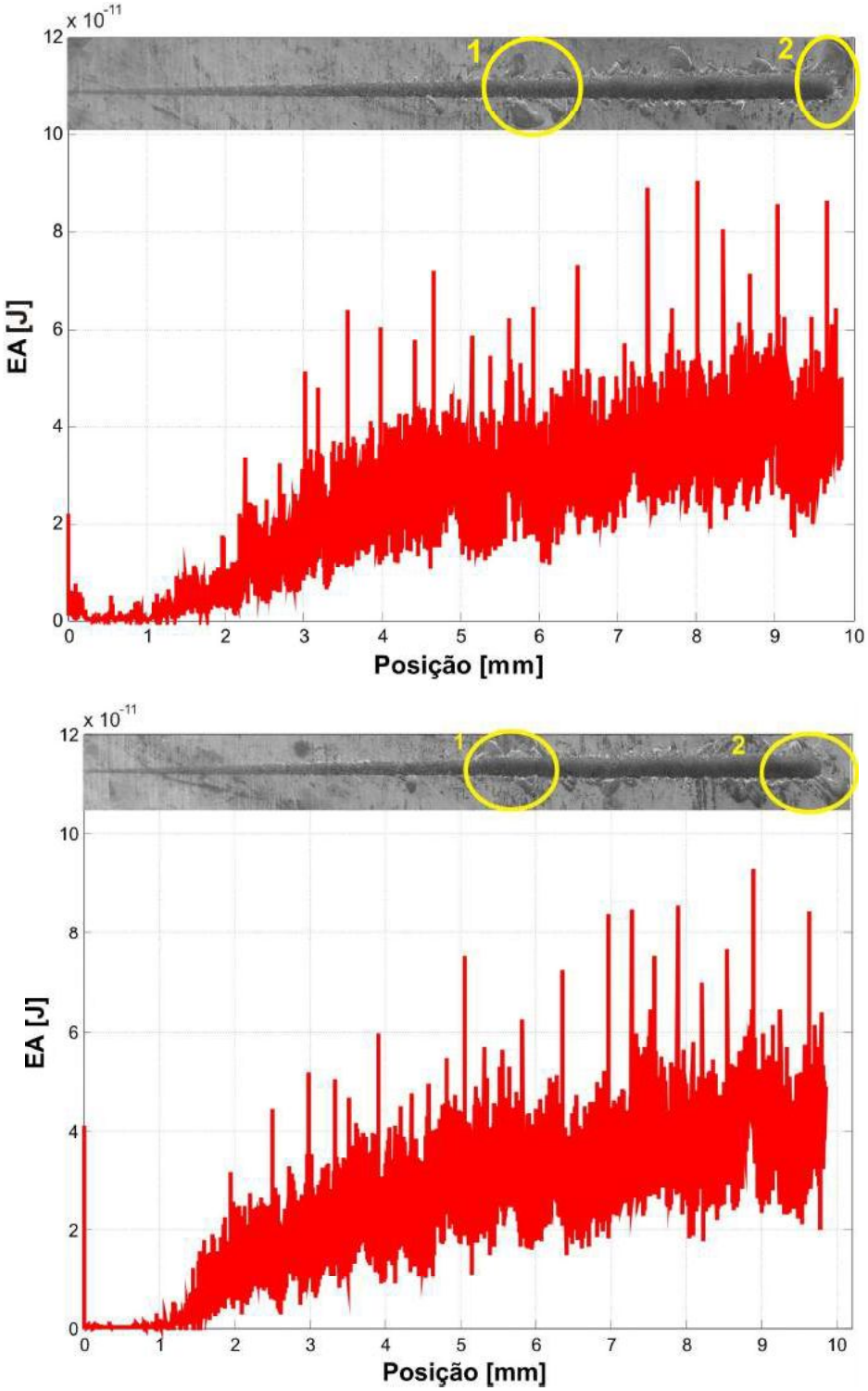


Figura 4.23: Ensaios de macroesclerometria realizados a 100 μm/s.

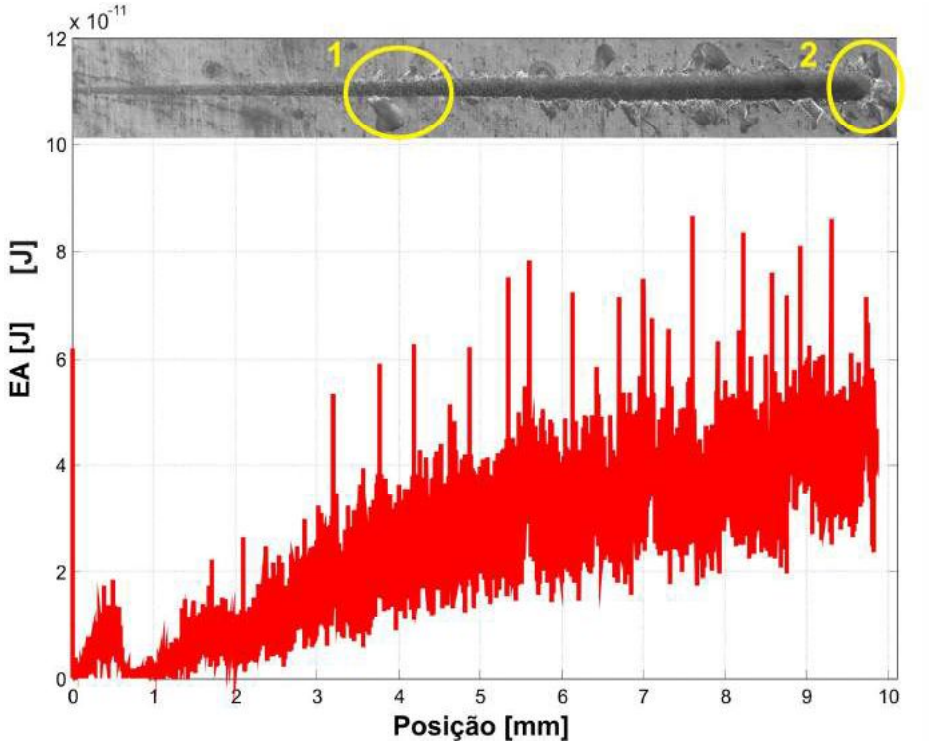


Figura 4.23: Continuação.

A última velocidade analisada foi a de 200 µm/s. Com esta velocidade há uma produção de trincas mais significativa e o nível de energia, como se esperava, aumentou em relação aos anteriores. Os gráficos da figura 4.24 apresentam os resultados.

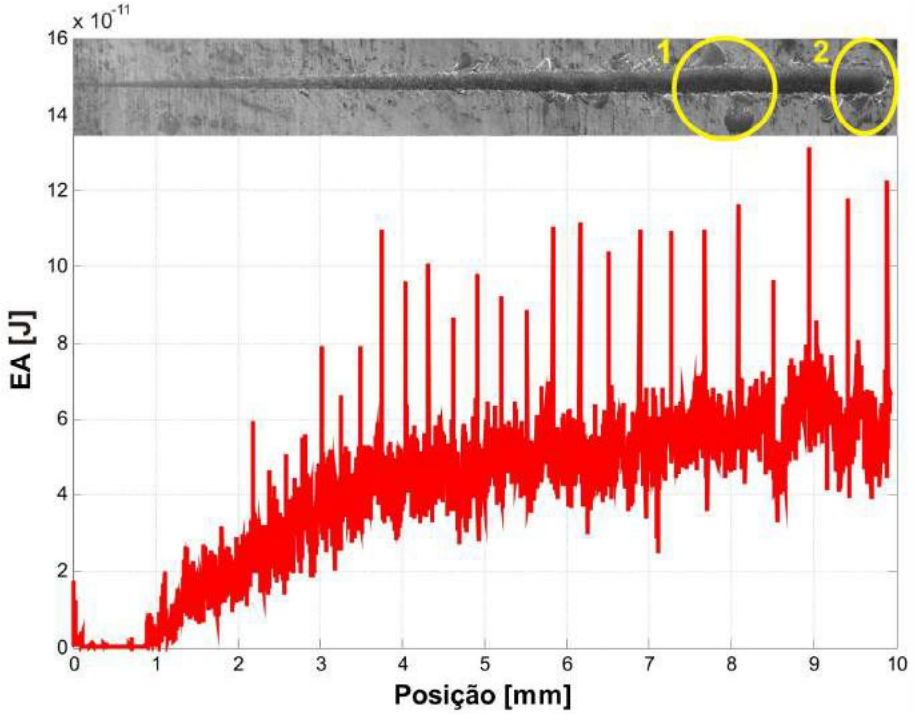


Figura 4.24: Ensaios de macroesclerometria realizados a 200 µm/s.

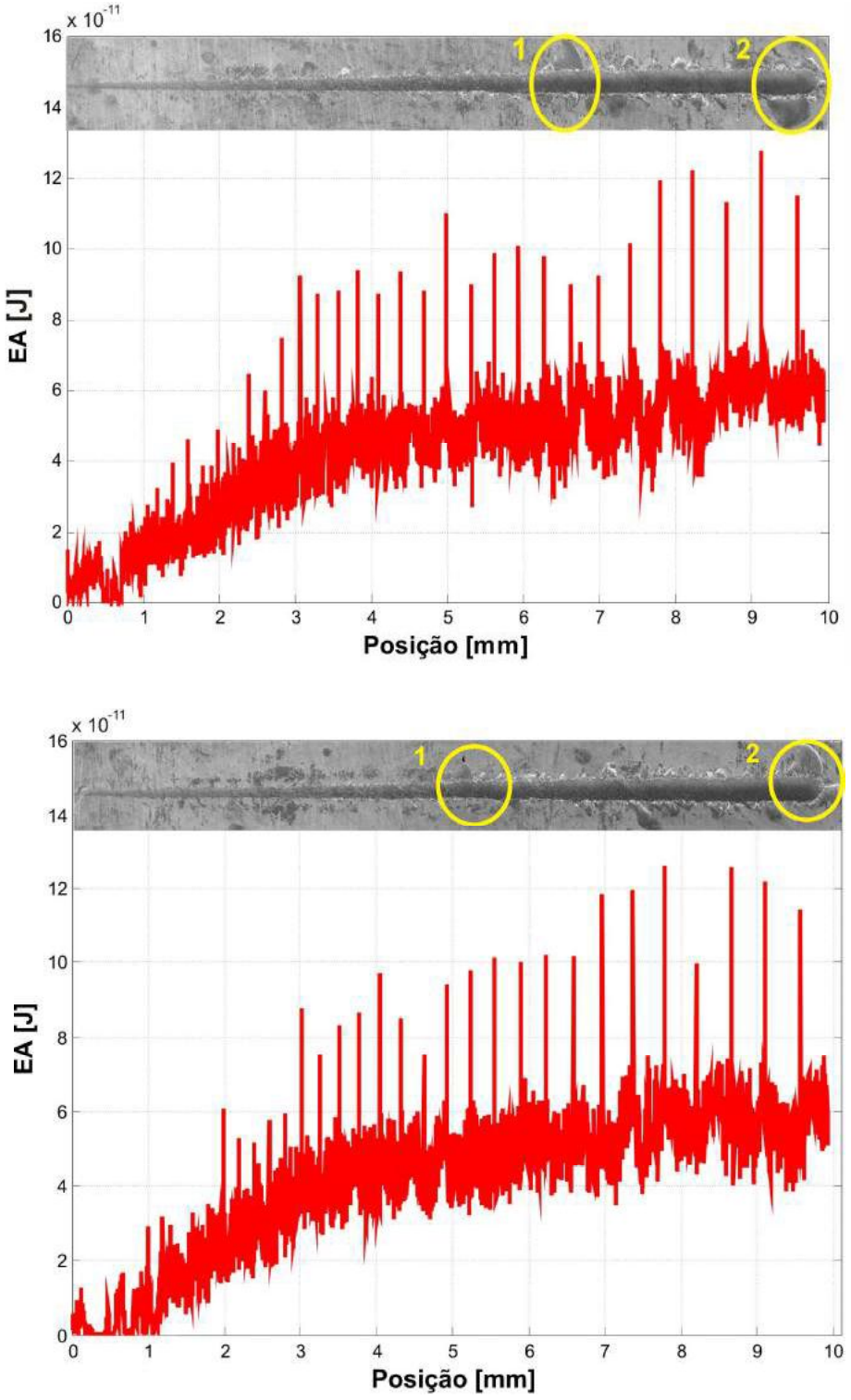


Figura 4.24: Continuação.

A tabela 4.3 apresenta a comparação dos resultados.

Tabela 4.3: Comparação dos resultados obtidos na análise da influência da velocidade nos ensaios de macroesclerometria.

Ensaio	Velocidade de riscamento [µm/s]	Nível de Energia [J]
1-3	50	$6x10^{-11}$
4-6	100	$9x10^{-11}$
7-9	200	$12x10^{-11}$

De acordo com os ensaios apresentados, conclui-se que, com o aumento da velocidade, as trincas nas amostras se iniciam a um valor de carga normal cada vez menor. Além disso, o número de trincas produzidas através do processo de riscamento também aumenta. Essas afirmações podem ser claramente observadas através dos gráficos que apresentam o desempenho do revestimento, através da atividade acústica, durante os ensaios.

É importante ressaltar que os níveis de energia produzidos durante esses ensaios também aumentaram com o aumento da velocidade de translação da amostra.

Conclusões

No presente trabalho, foram implementados o controle e a instrumentação de um macroesclerômetro visando a avaliação de revestimentos e filmes tribológicos. Dos resultados obtidos pode concluir que:

a) O equipamento instrumentado tem um funcionamento relativamente simples, bastando ao usuário fornecer os valores dos parâmetros de teste. Além disso, a interface de comunicação do programa de aquisição e controle é de fácil manuseio, possibilitando a visualização *on line* de todas as etapas de um ensaio de macroesclerometria.

b) O programa de controle permitiu um aumento linear da força normal aplicada sobre o penetrador, tornando possível a avaliação das características tribológicas de revestimentos.

c) A variação da atividade acústica está diretamente associada ao aparecimento de trincas nos revestimentos, tornando-se uma ferramenta importante na identificação de cargas críticas. Essas cargas não seriam facilmente identificadas usando apenas o registro da força tangencial.

d) O número de trincas produzidas nos revestimentos de Ni9%P através do processo de riscamento foi observado ser proporcional à velocidade. Adicionalmente, os níveis de energia do sinal acústico produzidos durante esses ensaios foram diretamente proporcionais à variação da velocidade de translação da amostra.

e) Trincas hertzianas foram observadas em todos ensaios, mesmo em baixas cargas. Nas cargas mais elevadas, em alguns revestimentos, foram detectadas trincas laterais. Todas essas trincas foram percebidas pelo sensor utilizado.

f) No caso do Molibdênio, as camadas destacadas indicaram problemas de coesão deste revestimento, que devem estar associados à estrutura lamelar da mesma.

Desta forma, conclui-se que a instrumentação, o controle do macroesclerômetro e sua associação a um sistema de aquisição de emissão acústica foram eficientes. A automatização do equipamento tornou mais simples a análise do desempenho de revestimentos tribológicos, através da identificação da carga crítica. Tudo isso, principalmente, quando esse equipamento é comparado a equipamentos convencionais utilizados para essa finalidade.

Trabalhos futuros

Para dar continuidade a este trabalho, sugere-se:

a) Reduzir o valor da carga normal inicial, para que o equipamento seja capaz de realizar ensaios de macroesclerometria em revestimentos com carga crítica inferior a 40 N.

b) Adicionar ao programa de controle uma opção para a realização de esclerometrias com carga normal constante.

c) Estudar a relação das trincas com os picos na amplitude do sinal acústico, durante os ensaios de macroesclerometria.

d) Analisar o sinal acústico no domínio da freqüência.

e) Submissão de revestimentos tribológicos comumente utilizados nas indústrias, aos ensaios de macroesclerometria.

Com a realização das modificações propostas, o macroesclerômetro tornar-se-á um equipamento capaz de realizar ensaios de macroesclerometria com várias opções para análise do desempenho de revestimentos tribológicos.

Referências

ABBOTT, J. S. Autocatalytic nickel processes. **Advanced Materials and Processes**, 12, p. 21-23., 1996.

ARAÚJO, T. F. , **Relatório de Estágio Supervisionado**, Instrumentação e controle de um Macroesclerômetro, Faculdade de Engenharia Elétrica, relatório interno, 2007. 48p.

AXÉN, N., JACOBSON, S. AND HOGMARK, S. Influence of Hardness of the Counterbody in Three-Body Abrasive Wear - an Overlooked Hardness Effekt, **Triblogy International**, vol. 27-4, p. 233-241, 1994.

BARROS, M. B., DE MELO, J. D. B., Efeito dos parâmetros de teste sobre o Mecanismo de desgaste predominante em Ensaios de desgaste abrasivo. **Revista Eletrônica Horizonte Científico**, Uberlândia, v.1, n.6, 2006. Disponível em: http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/ Edicao%202006_1/C/murilo_borges.pdf. Acesso em: 10 maio de 2008.

BOZZI, A. C. AND DE MELLO, J. D. B., Wear resistance and wear mechanisms of WC-12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion. **Wear**, vol.233-235, p. 575-587, 1999.

BROESE van GROENOU, A., VELDKAMP, J. D. B., Grinding Brittle Materials. **Phillips Tech. Rew**, v.38, n.4/5, p. 105-118, 1978/1979.

DE MELLO, J. D. B., **Structures Metallurgiques et Caracterization de L'abrasion des Fontes Blanches au Chrome**, Tese de Doutorado, INPG, Grenoble, 1983.

EYRE, T. S.; Wear Characteristics of metals, **Tribology International**, vol. 10, p. 203-212, 1976.

FRANCO, S. D., **Contribuição ao Estudo do Desgaste Abrasivo de Materiais Polifásicos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1989.

FRANCO, S. D., **Wechselwirkung zwischen Matrix und Hartphasen beim Warmverschleiß**, Dr.Ing. Thesis Ruhr-Universitaet Bochum, Bochum, 1996.

<http://www.acousticemission.net/background.asp>. Acesso em: 24 jan. 2008.

<http://www.applied-motion.com >. Acesso em: 24 março 2008.

<http://www.hbm.com >. Acesso em: 08 maio 2008.

<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.htm >. Acesso em: 01 jan. 2008.

<http://www.ndt.net/article/az/ae_idx.htm>. Acesso em: 24 jan. 2008.

<http://www.pacndt.com > Acesso em: 23 março 2008.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and wear of engineering materials**, CRC Press, Boca Raton,1992. 273 p.

JÚNIOR, W. M. S., DE MELLO, J. D. B. Superposição de indentações na simulação do desgaste abrasivo, **16º POSMEC da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia**, p. 3, 2006.

LAWN, B. R. , FULLER, E. R. Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture. **Jour. of Mat. Sci**., v. 10, p. 2016-2024, 1975.

NOGUEIRA, R. E. F. Q. **Eclerometria aplicada ao estudo do desgaste abrasivo**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1988.

MULHEARN, T. O., SAMUELES, L. E. The abrasion of metals: a model of the process. **Wear**, v. 5, p. 478-498, 1962.

PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION. **PCI-2 Based AE System User's Manual**, Princeton Junction, NJ. 2004.

PIOTRKOWSKI, R., GALLEGO, A., CASTRO, E., GARCIA-HERNANDEZ, M.T. , RUZZANTE, J.E., Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis, **NDT&E international**, v.38, p. 260-267, 2005.

ROWE, G., **Wear and Lubrification Terms and Definitions**, Paris, Friction, O.E.C.D, 1966.

SEDRIKS, A. J. AND MULHEARN, T. O. The effect of work-hardening on the mechanics of cutting in simulated abrasive processes. **Wear**, v. 7, p. 451-459,1964.

SOUTO, U. B., **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica**, Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SOUZA, R. J., **Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito**, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** Butterworth–Heinemannn, 2ª edition, 2001. 744 p.

VELDKAMP, J. D. B., HATTU, N., SNIJDERS, V. A. C. Crack Formation During Sratching of Brittle Materials. **Fracture Mechanics of Ceramics**, v.3, p. 278-301, 1978.

WU, F. B., DUH, J. G., Scratch behavior and in situ acoustic emission analysis of PVD chromium nitride coatings on mild steel with electroless nickel interlayers, **Surface & Coatings Technology** , v.162, p. 106-112, 2002.

WU, T., KEWEI, X., PING, W., XIAN, L., Scratch behavior of multi-layered metallic thin films on Al_2O_3 substrates, **Surface & Coatings Technology** , v.182, p. 143-148, 2004.

ZUM GAHR, K. H., **Microstructure and wear of materials,** New York, Elsevier, 1987, 590 p.