WASHINGTON MARTINS DA SILVA JUNIOR

SIMULAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO VIA INTERAÇÕES MÚLTIPLAS



Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Mecânica

2008

WASHINGTON MARTINS DA SILVA JUNIOR

SIMULAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO VIA INTERAÇÕES MÚLTIPLAS

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello.

UBERLÂNDIA

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586s Silva Junior, Washington Martins da, 1977-
Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas / Washington Martins da Silva Junior..- 2008.
177 f. : il.

Orientador: José Daniel Biasoli de Mello.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Tribologia - Teses. 2. Desgaste mecânico - Teses. 3. Simulação (Computadores) - Teses. I. Mello, José Daniel Biasoli de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 620.178.162

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

"Para que serve um recém-nascido?"

("What is the good of a newborn baby?" - Michael Faraday)

Com amor a

Juliana Tavares Peres Gracelli,

Joana Lemes de Siqueira,

Washington Martins da Silva (em memória)

e

Rafael Gustavo Martins Siqueira

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor José Daniel Biasoli de Mello pela competente orientação no trabalho, e pelo fundamental apoio e incentivo que ajudaram a elucidar nos momentos decisivos deste doutorado.

Agradeço ao Professor Francisco Paulo Lépore Neto pelo brilhantismo, fonte de inspiração nas discussões e no andamento desta tese.

À Professora Henara Lillian Costa pela amizade e por ensinar que caminhar é fundamental.

Aos Professores Alberto Arnaldo Raslan, Sinésio Domingues Franco e Rafael Ariza Gonçalves, pelo apoio incondicional.

Aos estudantes de Tribologia: Flávio José da Silva, Júlio César Giubilei Milan, Antonio César Bozzi e João Luiz Teixeira Mendes pelas diversas colaborações que vieram a enriquecer este trabalho.

Aos amigos Felipe Antonio Chegury Viana, Patrick Magalhães Cardoso, Prof. Marcelo Braga dos Santos e Maria Alzira Araújo Nunes, pela ajuda direta nesse projeto.

À Ângela Maria da Silva Andrade e Eunice Helena Nogueira pela indispensável dedicação, atenção e competência.

Ao programa CAPES pelo apoio financeiro.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar esse curso.

Aos estudantes do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

DA SILVA, W. M. **Simulação do Desgaste Abrasivo via Interações Múltiplas.** 2008. 177 f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O desgaste abrasivo pode ser classificado em função do movimento das partículas atuantes na interface de desgaste: rolamento e deslizamento das partículas abrasivas entre as superfícies. O predomínio de uma dessas dinâmicas é função dos parâmetros tribológicos. O presente trabalho propõe uma nova abordagem para simular o desgaste abrasivo em laboratório: o rolamento das partículas abrasivas é representado por seqüências de indentações e o deslizamento por seqüências de riscos/sulcos. Os equipamentos utilizados nesta simulação foram especialmente desenvolvidos para reproduzir a atuação de um único grão abrasivo. São eles: macro-simulador e micro-simulador. Estes equipamentos consistem em um sistema de mesas coordenadas de alta resolução, que movimentam a amostra no plano horizontal e o indentador no eixo vertical. Sensores de força permitem o controle da intensidade durante a realização de cada evento (indentação ou deslizamento). O macro-simulador opera até 500 N e o micro-simulador até 18 N. A topografia de uma superfície desgastada real é a referência para a simulação. Essa topografia é acessada usando interferometria laser, enquanto a morfologia é visualizada via microscopia eletrônica de varredura. A análise da morfologia da referência permite determinação do tipo de mecanismo de desgaste predominante. De acordo com o tipo de mecanismo encontrado na referência, define-se a configuração da simulação, a saber: somente indentações; somente riscos/sulcos; ou uma mistura de indentações e riscos/sulcos. Em uma etapa preliminar buscou-se avaliar efeito dos parâmetros de simulação na morfologia da superfície gerada na simulação. As amostras foram confeccionadas em aço ferramenta, e o equipamento utilizado foi o macro-simulador. Os resultados preliminares mostraram que a simulação não é viável nesse equipamento, pois o sensor de força não permite a correta medição na faixa de força normal pretendida. No micro-simulador foi estudada a simulação do rolamento puro das partículas abrasivas para os materiais aço ferramenta, vidro e aço carbono. Utilizou-se a configuração indentação com posicionamento aleatório. As variáveis de controle estudadas foram: força normal (0,29; 0,44; 0,49; 0,59; 0,98; 1,47 e 1,96 N) e número de eventos (1000; 1500; 2000; 3500 e 5000). A interação entre os eventos afetou consideravelmente a morfologia e a topografia das superfícies obtidas. Foi desenvolvido um método para medir a profundidade média dos eventos em função da distância entre os mesmos. A relação entre a distância entre os eventos e sua dimensão foi denominada superposição. Esse método mostrou que a profundidade média dos eventos é afetada por valores positivos de superposição. Foi identificado que ocorre desgaste para valores acima de 50% de superposição. A variação da profundidade média dos eventos foi equacionada em função da superposição e da força normal nas condições que levam ao desgaste. Essa relação matemática foi utilizada para definir os parâmetros de simulação em função da topografia da referência para em dois casos: rolamento puro e deslizamento paralelo das partículas abrasivas. Em ambos os casos foram obtidas superfícies topográfica e morfologicamente semelhantes às respectivas referências. No processo de simulação são armazenadas as informações relativas ao posicionamento e às forças de interação associadas a cada evento. Estas informações abrem uma grande perspectiva para a simulação computacional do desgaste abrasivo.

Palavras chave: Desgaste abrasivo. Mecanismos de desgaste. Simulação. Eventos múltiplos. Indentação. Deslizamento.

DA SILVA, W. M. **Using Multiple Interactions to Simulate Abrasive Wear.** 2008. 177 f. Doctorate Theses, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Abrasive wear is currently classified according to different particle dynamics: a) the sliding of active particles on the sample surface and b) the rolling of abrasives between the surfaces. The prevailing particle dynamics depends on the system features. In this thesis, instrumented laboratory tests are used to present a new methodology for the simulation of abrasive wear. The rolling of the abrasives is represented by a sequence of indentations, and the sliding of the active particle by a sequence of scratches. Two new equipments were especially developed to reproduce the action of an abrasive particle: a macro-simulator and micro-simulator. Two high resolution sliders drive the sample horizontally while the indenter is moved vertically by another slider. A 3D load cell controls the intensity of the process. The load limit of the macro-simulator is 500 N and that of the micro-simulator is 18 N. A high resolution piezoelectric translator is used to control the indenter movement in the micro-simulator. A worn surface produced in an abrasive test was used as a reference for the simulation. Its topography was assessed using laser interferometry and scanning electron microscopy. The morphology of the wear surface is defined by the predominant abrasive wear mechanism, and this defines the simulation configuration as follows: indentation alone, scratches alone and a mixture of indentations and scratches. The effect of the simulation parameters on the morphology was studied in the preliminary tests. The macro-simulator and tool-steel samples were used for the tests. The preliminary results showed that the simulation process was not possible when using the macro simulator because the load cell is out of range for the required loads. The micro-simulator was used to simulate the rolling of the particles on tool steel, glass and 1010 steel. The indentations were randomly positioned. The controlling variables were the normal load (0,29; 0,44; 0,49; 0,59; 0,98; 1,47 and 1,96 N) and the quantity of interactions (1000; 1500; 2000; 3500 and 5000). The results showed that the superimposition of indentations has a great effect in the morphology and topography of the simulated surfaces. A special method to describe the average depth of the indentations/scratches in function of the distance between them was developed. The ratio of the distance between the events to the size of a single event defined the value of superimposition. These tests showed that positive values of superimposition affect the average depth of the events. Wear occurs when superimposition is greater than 50%. The average depth of the deformation marks increased according to an elevation in the degree of superimposition and to the augmentation of normal load. The study of superimposition was used to relate the topography of the reference to the control parameters in two cases of simulation: a) the rolling and b) parallel sliding of the abrasive particles. In both cases, the simulation methodology produced surfaces topographically and morphologically similar to these of the respective references. The simulation process produces information relative to the position and to the interaction forces associated with each event. This information opens up great possibilities for a computational simulation of abrasive wear.

Keywords: Abrasive wear. Wear mechanisms. Simulation. Indentation. Scratching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modos de desgaste abrasivo: a- Dois corpos, b- Três corpos. 6
Figura 2.2 - Efeito da relação D/h no desgaste abrasivo do bronze fosforoso. Abrasivo: diamante. 8
Figura 2.3 - Partícula abrasiva em função dos parâmetros D e β. 9
Figura 2.4 - A partícula rola entre as superfícies devido à ação do binário mostrado em a e b, levando a um dano na superfície relativamente pequeno. 9
Figura 2.5 - a-d- Quando $D/h>(D/h)_1$ a partícula rotaciona até que uma posição de equilíbrio; e- Situação similar quando a dureza das superfície são diferentes; f- Partícula alojada na superfície mole. 10
Figura 2.6 - Deslizamento da partícula abrasiva. a- Seqüência de fotos laterais; b- Impressão resultante na superfície superior. 13
Figura 2.7 - Rolamento da partícula abrasiva. a- Seqüência de fotos laterais; b- Impressão resultante na superfície superior. 14
Figura 2.8 - Mapa de desgaste na microabrasão. a- Efeito da força normal e da concentração do abrasivo na interface; b- Efeito da severidade do contato, S, e da razão de durezas, H_s/H_b. 15
Figura 2.9 - a - Efeito da mudança de abrasivo no comportamento da abrasão com o aumento da pressão de contato; b - Desgaste abrasivo em função da razão de dureza da partícula e do material desgastado (H_A/H_M). 16
Figura 2.10 – Microabrasão do ferro sinterizado e oxidado a vapor. Abrasivos: a- Alumina (Al_2O_3); b- Hematita (Fe_2O_3). Posicionamento das partículas na interface de desgaste. Abrasivos: c- Alumina; d- Hematita. MEV. 17
Figura 2.11 - Parâmetros tribológicos que interferem no tipo de mecanismo de desgaste atuante. 19
Figura 2.12 – Microsulcamento. a- Atuação de uma partícula; b- Interação de sulcos. 20
Figura 2.13 - a- Microcorte; b- Microtrincamento. 20

Figura 2.14 - Faces de contato no deslizamento.....21
Figura 2.15 - Mecanismos de desgaste e o ângulo de ataque. a- Microcorte; b- Misto; c- Microsulcamento. 22
Figura 2.16 – Esquema do perfil transversal do deslizamento dútil.....22
Figura 2.17 - Tensões de Hertz, contato esférico. 23
Figura 2.18 - Deslizamento em regime frágil e contato esférico. a- Esquema das tensões de Hertz; b- Marca originada do deslizamento de uma esfera sobre uma superfície de vidro. Seta indica o sentido do movimento da partícula. 24
Figura 2.19 - a- Distribuição de tensões não Hertizianas; b- Zonas de deformação decorrentes do contato. 24
Figura 2.20 – a- Esquema d formação de fissuras laterais associadas ao movimento isolado do indentador anguloso; b- Deslizamento frágil no vidro sodo-cálcico, força normal 1 N. Seta indica o sentido de deslizamento. 25
Figura 2.21 - Indentação. 26
Figura 2.22 - Esquema de seções indentações esféricas em regime dútil mostrando a transição gradual de a- Empilhamento até d- Rebaixamento. 27
Figura 2.23 – Indentador esférico: a- Cobre encruado; b- Cobre recozido; Indentador piramidal: c- Cobre encruado; d- Cobre recozido. 27
Figura 2.24 - Modelo do processo de indentação em regime frágil. 28
Figura 2.25 - Superfície desgastada do a- aço AISI 1006 e lixa de alumina (600 mesh) e b- aço AISI 52100 e lixa de vidro (80 mesh). 30
Figura 2.26 - Esquema do deslizamento paralelo. 31
Figura 2.27 - Diagrama de mecanismos de desgaste para deslizamentos paralelos sobre a superfície de cobre na condição a seco. 32
Figura 2.28 - Fluxograma do processo de simulação do desgaste abrasivo. 33
Figura 2.29 - Indentações em laboratório: a- Vidro, força normal 2,9 N, Vickers, MEV; b- Aço 1010, força normal 2,9 N, Vickers, MEV; c- Vidro, força normal 14,7 N, Rockwell C, MO; d- Aço 1010, força normal 2 N, Rockwell C, MEV. 35
Figura 2.30 - Deslizamentos em laboratório: Vidro; a- força normal 1 N, Vickers, MEV; b- força normal 2,9 N, Vickers, MEV; c- Vidro, força normal 2,5 N, Rockwell C, MO; d- força normal 9,8 N, Rockwell C, MEV. 36
Figura 2.31 - Deslizamentos em laboratório; Aço 1010; força normal 2,9 N; a-, Vickers; b- Rockwell C. MEV. 37

Figura 2.32 – Interações entre eventos, amostra de aço ferramenta. a- indentações eqüidistantes, 100 eventos, 20% de superposição, 2,3 N. b- indentações em posições aleatórias, 5000 eventos de 0,35 N. c- deslizamentos paralelos, 1000 eventos, área 1 x 1,3 mm; d- deslizamentos aleatório, 2700 eventos, área 2 x 2 mm. MEV. 38
Figura 3.1 - Abrasômetro LTM. a- Esquema; b- Equipamento. 40
Figura 3.2 - Topografias obtidas no abrasômetro LTM. a- Força normal: 9,25 N, abrasivo: areia normal brasileira número 50 (peneira 0,3 a 0,6 mm), contra-corpo: ferro fundido; b- Força normal: 6,94 N, abrasivo: areia normal brasileira número 30 (peneira 0.6 a 1.2 mm), contra-corpo: borracha. MEV. 41
Figura 3.3 - Abrasômetro roda de borracha. a- Esquema; b- Equipamento. 42
Figura 3.4 – Resultado de um ensaio roda de borracha. a- Força normal: 18,75 N, abrasivo: areia normal brasileira número 50 (peneira 0,3 a 0,6 mm), contra corpo: borracha; b- Ampliação. MEV. 43
Figura 3.5 - Macro-simulador. a- Esquema; b-Equipamento. 44
Figura 3.6 - a- Esquema do micro-simulador; b- Equipamento. 45
Figura 3.7 - Esquema do posicionamento da amostra para o reconhecimento da superfície. .. 46
Figura 3.8 – Algoritmo da sub-rotina de geração das posições x e y. 47
Figura 3.9 - Distribuição uniforme. 48
Figura 3.10 - Esquema do posicionamento dos eventos na configuração indentação aleatória. 49
Figura 3.11 - Posicionamento dos eventos na configuração deslizamento aleatório. 49
Figura 3.12 - Esquema do posicionamento dos eventos na configuração deslizamento paralelo. 50
Figura 3.13 - Esquema da configuração deslizamento paralelo e indentação aleatória. 50
Figura 3.14 - Esquema do posicionamento dos eventos na configuração deslizamento aleatório e indentação aleatória. 51
Figura 3.15 – Fluxograma simplificado do programa da simulação. 52
Figura 3.16 - Tela de comunicação com o operador do programa de controle do macro-simulador. 54
Figura 3.17 - Interface de comunicação com o operador no micro-simulador: a- Tela do processo de aproximação; b- Tela principal. 56
Figura 3.18 - Processo de execução de uma indentação 57
Figura 3.19 - Indentação. a- Aquisição da força normal; b- Evento isolado. MEV. 58

Figura 3.20 – Simulação no aço 1010; 1500 indentações; força normal constante 0,29 N: a- Área de trabalho; b- Ampliação. MEV. 58
Figura 3.21 - Algoritmo do programa de avaliação do percentual da área descoberta na área de trabalho. 59
Figura 3.22 – a- Representação do posicionamento de 500 indentações na área de trabalho; b- Percentual de área descoberta. 60
Figura 3.23 - Processo de deslizamento do indentador sobre a amostra. 61
Figura 3.24 - a- Aquisição das forças normal, tangencial, lateral e posição do PZT em função da distância deslizada; b- Evento isolado no alumínio, força normal 0,98 N; c- Deslizamento paralelo no aço ferramenta, 1000 eventos, área 1 x 1,3 mm; d- Deslizamentos aleatório no aço ferramenta, 2700 eventos, área 2 x 2 mm. MEV. 62
Figura 3.25 - Indentadores utilizados: a- Rockwell C; b- Vickers. 63
Figura 3.26 - Esquema de composição de um perfil. a- perfil original; b-rugosidade; c- ondulação; d- forma. 65
Figura 3.27 - a- Perfil de uma superfície produzida no ensaio roda de borracha; b- Espectro em freqüência espacial; c- Ondulação e forma ("cut off" = 80 μm); d- Rugosidade. IL. 66
Figura 3.28 - Distância máxima entre picos e vales - Rz. 67
Figura 3.29 - Definição de inclinação média - $\dot{\theta}$. 69
Figura 3.30 – Deslizamento, Vickers, força normal 2,9 N: a- Vidro; b- Aço ferramenta; c- Aço 1010. IL. 70
Figura 3.31 – Indentação, Vickers: a- Aço ferramenta, 9,8 N; b- Aço 1010, 9,8 N; c- Vidro 1,9 N; d- Perfil transversal AA; e- Perfil transversal BB. 71
Figura 3.32 – Esquema sobre a reflexão em uma indentação. 72
Figura 3.33 – Linearização relativa às faces da indentação. 72
Figura 3.34 – Linearização referente à superfície da amostra. 73
Figura 3.35 – Medição da profundidade de uma indentação Vickers, aço 1010, 9,8 N. IL. 73
Figura 4.1 – Etapas realizadas no estudo da simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo. 75
Figura 4.2 – a- Superfície desgastada; b- Ampliação. MEV, inclinação 30°. 76
Figura 4.3 – a- Topografia da superfície desgastada; b- Perspectiva, IL. 77
Figura 4.4 - a- Superfície obtida na simulação; b- Ampliação; Indentador Rockwell C. MEV. 78

Figura 4.5 – a- Superfície produzida na simulação; b- Ampliação. Indentador Vickers. MEV. 79
Figura 4.6 - Componentes da força média adquiridas durante as etapas da simulação..... 79
Figura 4.7 - Superfície produzida na simulação. a- 500 eventos; b- 1000 eventos; c- 1500 eventos; d- 2000 eventos; e- 2500 eventos; f- Referência (Fig. 4.2).MEV, inclinação 30º. 81
Figura 4.8 - a- Massa medida em função da quantidade de eventos; b- Perda de massa. 82
Figura 4.9 - Variação do volume de material retirado da superfície em função da quantidade de eventos. 83
Figura 4.10 – Parâmetro de rugosidade Sq em função da densidade de eventos. 84
Figura 4.11 - Componentes da força resultante média em função da quantidade de eventos. . 84
Figura 4.12 – Curva de calibração do movimento do piezo transladador em função da tensão. 86
Figura 4.13 – Calibração da rigidez do micro-simulador. 87
Figura 4.14 – Mapeamento da simulação para o aço ferramenta. Indentação aleatória. IL. 89
Figura 4.15 – Resultado do mapeamento: a- Volume dos vales; b- Sq. 90
Figura 4.16 – Comparação da referência com o Sq. 91
Figura 4.17 – Mapeamento da simulação para o vidro. Indentação aleatória. IL. 93
Figura 4.18 – Mapeamento da simulação para o vidro em valores menores de força normal e quantidade de eventos. Indentação aleatória. IL. 94
Figura 4.19 – Volume desgastado, mapeamento da simulação no vidro. 95
Figura 4.20 – Mapeamento do vidro: a- Todos os valores de Sq medidos; b- Ampliação na região de baixa força normal – regime dútil. 96
Figura 4.21 – Aspecto visual das superfícies em função dos parâmetros de simulação. Comparação com a referência. Aço 1010 (ASTM). MEV. 97
Figura 4.22 – Mapeamento do aço 1010. a- Superfície de resposta do Sq; b- Curva de nível para o Sq igual a 2,8 μm. 99
Figura 4.23 - Relação entre força normal e lado de indentação. Vickers. Aço 1010. 100
Figura 4.24 – a- Novo algoritmo para determinar a área ocupada por indentações de força normal variável; b- Gráfico gerado nesse programa com 200 eventos. 101
Figura 4.25 – Perfil de força; distribuição uniforme: a- de 0,24 a 0,73 N; b- de 0,49 a 1,47 N. 102

Figura 4.26 – Simulação com 2500 indentações. Área de trabalho 0,5 x 0,5 mm. Força normal: a- de 0,24 a 0,73 N; b- de 0,49 a 1,47 N. MEV. 103
Figura 4.27 – Perfis de força, distribuição normal: a- média 0,98 N entre 0,049 e 1,96 N; b- média 0,49 N entre 0,049 a 3,92 N; c-d- Superfícies resultantes dos perfis a-b respectivamente. MEV. 104
Figura 4.28 – a- Topografia da referência do aço 1010 (ASTM). b- gráfico gerado para o cálculo dos parâmetro bidimensionais de todos os perfis da referência. Mountains Map®. 105
Figura 4.29 – a- Função de transferência força normal x profundidade; b- Perfil de força utilizando as informações referentes ao Rz; c- Superfície resultante na simulação, MEV; d- Referência, ensaio LTM, aço 1010, MEV. 106
Figura 4.30 – a- Simulação com 500 indentações, aço ferramenta, força normal 1,47 N; b- Ampliação. IL. 108
Figura 4.31 – a- Esquema do método de superposição de indentações em linha com quantidade variável de eventos; b- Perfis de eventos superpostos. 109
Figura 4.32 – a- Ensaios de superposição de indentações em amostras de aço ferramenta. b- Perfil AA; c- Perfil BB. IL. 110
Figura 4.33 – Medição da profundidade média dos eventos superpostos. Mountains Map®. 111
Figura 4.34 – Profundidade dos eventos em função da superposição. 112
Figura 4.35 – Medição da área acima e abaixo da superfície. Material: aço ferramenta. a- Perfil AA (Fig. 4.32b); b- Perfil BB (Fig. 4.32c). Mountains Map® 112
Figura 4.36 – Áreas deformadas e profundidade média dos eventos em função da superposição. 113
Figura 4.37 – Relação entre lado da indentação isolada e força normal. Aço ferramenta. 114
Figura 4.38 – Profundidade média dos eventos em função da superposição e da força normal. 116
Figura 4.39 – a- Superposição de indentações em linha no aço ferramenta. b- Perfil AA; c- Perfil BB. IL. 117
Figura 4.40 - Efeito da superposição na profundidade dos eventos. Aço ferramenta. 118
Figura 4.41 – a- Superposição de indentações em área com quantidade fixa de eventos; Detalhe, superposições: b- -50%; c- 40%; d- 80%. IL. 120
Figura 4.42 – Evolução da profundidade média dos eventos em função da superposição..... 120

Figura 4.43 – a- Estudo da superposição em área fixa com quantidade crescente de eventos em amostras de aço ferramenta; Ampliação – superposição: b- -100%; c- 20%; 85%. IL. 121
Figura 4.44 – Profundidade média em função da superposição dos eventos. 122
Figura 4.45 – Efeito da superposição dos eventos no Sq. 123
Figura 4.46a- Posicionamento de 200 eventos na área de trabalho; b- Detalhe. 124
Figura 4.47 – Esquema da superposição em linha para a superposição 20%. 124
Figura 4.48 – Esquema do método de simulação do rolamento das partículas abrasivas. 126
Figura 4.49 – a- Topografia da referência do aço ferramenta; b- Perspectiva. IL. 127
Figura 4.50 – a- Referência do aço ferramenta; b- Ampliação. MEV. 128
Figura 4.51 – Referência filtrada com "cut-off" 80 μm. a- Rugosidade; b- Ondulação; c- Superfície simétrica à ondulação. IL. 129
Figura 4.52 – Mapa de força normal gerada a partir da ondulação da referência. 131
Figura 4.53 – Perfil de força para o ensaio que simula a ondulação. 131
Figura 4.54 – Primeira etapa da simulação. a- Área de trabalho; b- Ampliação. MEV. 132
Figura 4.55 - Topografia do ensaio de simulação. Primeira etapa. a- Área de trabalho; b- Ampliação. IL. 132
Figura 4.56 – a- Ondulação da superfície obtida na simulação ("cut off" = 80μm); b- Ondulação da referência (Fig. 4.44b). IL. 133
Figura 4.57 – Força normal versus a profundidade da indentação isolada. Aço ferramenta. 134
Figura 4.58 – Perfil de força de 5599 eventos. 134
Figura 4.59 – Topografia da segunda etapa do ensaio de simulação. a- Área de trabalho; b- Ampliação; c- Perspectiva. IL. Imagens: d- Área de trabalho; e- Ampliação. MEV. 135
Figura 4.60 – Comparação das topografias filtradas, "cut off" 80 μm. a-b- Simulação. c-d- Referência (Fig. 4.51a-b). IL. 136
Figura 4.61 – Imagens da superfície obtida na segunda etapa da simulação: a- Área de trabalho; b- Ampliação. c-d- Referência. MEV. 137
Figura 4.62 – Referência aço ferramenta, deslizamento paralelo; a- Topografia como adquirida; b- Perspectiva. IL. 139
Figura 4.63 – Mecanismo de desgaste encontrado na referência de aço ferramenta; a- Deslizamento paralelo; b- Ampliação. MEV. 140
Figura 4.64 – Força normal em função da profundidade do deslizamento isolado. 140
Figura 4.65 - Relação entre força normal e largura do deslizamento isolado. 141

Figura 4.66 – Programa para a medição da área ocupada por deslizamentos paralelos. a- Algoritmo; b- gráfico gerado para 30 eventos. 142
Figura 4.67 – Simulação de deslizamentos paralelos com força normal constante. a- Área de trabalho; b- Ampliação. IL. 143
Figura 4.68 – Perfil de força normal relacionado ao λq de referência ("cut off" = 20 μm)... 144
Figura 4.69 – Simulação de deslizamentos paralelos com força normal variável de acordo com o λq. a- Área de trabalho; b- Ampliação; c- Referência (Fig. 4.55a). IL. 145
Figura 4.70 – Esquema. a- Método de superposição de deslizamentos paralelos com quantidade variável de eventos; b- Perfil transversal. 146
Figura 4.71 – a- Área de deslizamentos superpostos a 90% de superposição e Fn=5,9 N; b- Perfil médio. Mountains Map®. 147
Figura 4.72 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. 149
Figura 4.73 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força normal 5,9 N. 150
Figura 4.74 – Fragmentos formados nos ensaios de superposição de deslizamentos paralelos. 151
Figura 4.75 – Profundidade média na superposição de deslizamentos paralelos. 152
Figura 4.76 – Esquema do método de simulação do deslizamento paralelo das partículas abrasivas. 153
Figura 4.77 – a- Referência (Fig. 4.62a); b- Perfil médio; b- Perfil simétrico ao perfil médio. 154
Figura 4.78 – Força normal de 1001 eventos de acordo com o perfil médio da referência. .. 155
Figura 4.79 - Simulação de deslizamentos paralelos com força normal variável de acordo com o perfil médio da referência. a- Área de trabalho e borda; b- Área de análise; c- Perspectiva. IL. 156
Figura 4.80 – a- Mecanismo de desgaste obtido na simulação de deslizamentos paralelos usando o perfil médio da referência; b- Ampliação; c-d Referência. MEV. 157
Figura 4.81 – Etapas da metodologia proposta para a simulação do desgaste abrasivo (adaptado da Fig. 2.28). 159

Figura AI 1- Curva de resposta da célula de carga tridimensional do macro-simulador. Componente da força na direção: a- eixo z; b- eixo x; c- eixo y. 175

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Componentes do sistema macro-simulador. 44
Tabela 3.2 - Componentes do micro-simulador. 45
Tabela 4.1 - Varredura na topografia do aço 1010, "cut off" 80 μm. 105
Tabela 4.2 - Informações de cada linha de eventos dos ensaios de superposição. 115
Tabela 4.3 - Resultados da profundidade média do perfil de eventos. 116
Tabela 4.4 - Varredura na topografia do aço ferramenta. Rugosidade, "cut off" 80 μm. 133
Tabela 4.5 - Varredura na topografia da referência, parâmetro λq, "cut off" 20 μm. 144
Tabela 4.6 - Informações sobre os ensaios de superposição de deslizamentos paralelos. 151
Tabela 4.7 - Resultados de profundidade média na superposição de deslizamentos paralelos. 152

Tabela AI 1 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força x. 172
Tabela AI 2 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força y. 173
Tabela AI 3 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força z. 174

Tabela AII 1 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força z. 177

LISTA DE SÍMBOLOS

h – espessura do filme de fluido entre superfícies móveis;

D – dimensão da partícula, diagonal;

β – maior ângulo da partícula;

R – força de indentação;

θ_1 – ângulo da partícula quando esta desliza entre as superfícies móveis;

Δ – profundidade de um risco/sulco;

θ_2 – ângulo da partícula quando esta desliza contra somente uma das superfícies;

ψ – ângulo de ataque;

ϕ – ângulo da partícula tridimensional;

H_S – dureza da superfície da amostra, microabrasão;

H_B – dureza da esfera usada na microabrasão;

S – severidade do contato calculada empiricamente na microabrasão;

H_A – dureza do grão abrasivo;

H_M – dureza do material em ensaios de desgaste abrasivo;

MEV – microscopia eletrônica de varredura;

Av – área relativa ao material removido na esclerometria;

A1 e A2 – área relativa ao material deformado na esclerometria;

f_{ab} – relação entre material removido/deformado na esclerometria;

Df – região afetada por uma indentação;

M – trinca mediana;

L – trincas laterais;

Pn – carga por abrasivo;

c – comprimento da trinca lateral;

h_{tl} – distância da superfície onde a trinca lateral se origina;

Rz – parâmetro de rugosidade, distância máxima entre pico e vale do perfil;

Ld – distância entre deslizamentos;

2α – ângulo entre as arestas de um indentador piramidal de base quadrada.

hd – profundidade do deslizamento;

hd' – altura do material deformado;

Lq – lado da área de trabalho;

Ad – área não recoberta por indentações;

IL – interferometria laser;

X – amplitude de uma onda senoidal;

f_0 – freqüência de uma onda senoidal por unidade de tempo (Hz);

θ – fase inicial de uma onda senoidal na origem do tempo (rad);

Tp – período de uma onda senoidal (s);

$f_{espacial}$ – freqüência espacial de um perfil de rugosidade (ciclos);

Sz – parâmetro de rugosidade, distância máxima entre pico e vale da superfície;

Rq – parâmetro de rugosidade, média quadrática das amplitudes do perfil;

Sq – parâmetro de rugosidade, média quadrática das amplitudes da superfície;

λq – parâmetro de rugosidade, comprimento de onda quadrático médio do perfil;

Δq – parâmetro de rugosidade, inclinação quadrática média do perfil;

R^2 – coeficiente de determinação;

DE – distância entre ventos (μm);

LI – lado da indentação (μm);

p – profundidade dos eventos superpostos (μm);

LD – largura do deslizamento (μm);

SUMÁRIO

1 Introdução 1
2 Mecanismos de desgaste e o movimento das partículas 5
2.1 Desgaste abrasivo - conceitos 5
2.2 Modelos da dinâmica da partícula no desgaste abrasivo 7
2.2.1 - Síntese dos parâmetros tribológicos que influenciam na movimentação da partícula na interface 18
2.3 Micromecanismos de degradação associados ao desgaste abrasivo 19
2.4 Simulação do desgaste abrasivo 30
2.5 Nova abordagem para simulação do desgaste abrasivo 32
2.6 Representação da dinâmica da partícula 34
2.7 Objetivos 39
3 Instrumentos e Métodos 40
3.1 Ensaios de desgaste abrasivo 40
3.2 Simulação 43
3.3 Controle da simulação 46
3.3.1 - Definição da área de trabalho 46
3.3.2 - Geração das posições dos eventos 47
3.3.3 - Programa principal da simulação 51
3.3.4 - Sub-rotinas de execução dos eventos na simulação 57
3.4 Parâmetros que afetam a simulação do desgaste abrasivo 63
3.5 Métodos de análise da superfície 64
3.5.1 - Ondulação e rugosidade 64
3.5.2 - Parâmetros de rugosidade 67
3.5.3 - Interferometria dos eventos 69
4 Simulação 74
4.1 Resultados preliminares 76

4.1.1 - Conclusões parciais 85
4.2 Indentações múltiplas 86
4.2.1 - Conclusões parciais 107
4.3 Estudo da superposição dos eventos 107
4.3.1 - Superposição em linha com quantidade variável de eventos. 108
4.3.2 - Outros métodos para o estudo da superposição de indentações. 117
4.3.3 - Síntese do estudo da superposição 123
4.4 Simulação do rolamento das partículas usando a superposição dos eventos. 124
4.4.1 - Método de simulação do rolamento das partículas abrasivas 125
4.4.2 - Conclusões parciais 138
4.5 Deslizamento paralelo 138
4.5.1 - Simulação do deslizamento paralelo considerando a superposição. 153
4.5.2 - Conclusões parciais 158
4.6 Estado atual da metodologia de simulação do desgaste abrasivo 158
4.7 Considerações finais. 160
5 Conclusões gerais 161
6 Projetos futuros 162
7 Referências bibliográficas 163

ANEXO I – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA DO MACRO-SIMULADOR 171
ANEXO II – CALIBRAÇÃO DO TRANSLADADOR PIEZELÉTRICO DO MICRO-SIMULADOR 176

CAPITULO I

1 INTRODUÇÃO

Tribologia foi definida como "a ciência e a tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e assuntos correlacionados" (Jost; 1966). Esse conceito foi criado nos anos 1960 com o intuito de combinar campos de estudos, até então distintos, que tratavam dos fenômenos do desgaste, atrito e lubrificação, de maneira interdisciplinar.

Economicamente, Jost (1966) mostrou que o custo devido ao desgaste, atrito ou falhas associadas está na ordem de meio bilhão de libras anuais, estimado em 1965 no Reino Unido. Vinte e cinco anos depois, esse autor observou que a devida atenção à tribologia, especialmente na educação, pesquisa e aplicação, representam uma economia anual na ordem de 1,3% a 1,6% do PIB de nações desenvolvidas (Jost, 1990).

Dentre os vários tipos de desgaste, o desgaste abrasivo destaca-se por sua relevância uma vez que é responsável por cerca de 50% das falhas por desgaste (Eyre, 1991).

O desgaste abrasivo é um processo interfacial complexo, em que a interface apresenta-se como geradora e reatora de fenômenos irreversíveis e evolutivos de difícil caracterização. Nesse contexto, a previsão do estado final do sistema tribológico é impossível, e o estudo dos parâmetros isolados, delicada. Desse modo, a experimentação e o empirismo ainda são as ferramentas básicas para o estudo desse fenômeno (Nogueira; de Mello,1988b).

Devido ao grande número de fatores influentes no processo de desgaste, várias são as possibilidades experimentais para o estudo da abrasão. Na análise laboratorial, esse estudo é dividido em dois grupos principais: abordagem global, utilizando técnicas abrasométricas; abordagem local, cuja técnica experimental mais importante é a esclerometria. Essas abordagens são tentativas de reprodução em laboratório do processo de abrasão. Uma visão mais real da correlação entre a situação prática e os ensaios busca identificar os mecanismos atuantes em cada caso, através da análise da superfície desgastada e dos resíduos de desgaste.

A simulação do desgaste em laboratório requer a caracterização dos micromecanismos de desgaste que, por sua vez, são dependentes das características dos materiais e dos abrasivos, bem como da forma de interação dos elementos do sistema. Em última análise, os micromecanismos de desgaste são dependentes do sistema tribológico imposto.

Os micromecanismos de desgaste representam as interações entre partícula e superfície, que levam a remoção de matéria na abrasão. A complexidade do mecanismo de interação partícula-superfície está associada à forma irregular dos grãos abrasivos, diferenças granulométricas e irregularidade da topografia das superfícies. Na abordagem global, as simulações laboratoriais minimizam as variações destes efeitos usando abrasivos com forma e tamanho mais ou menos conhecidos. Na abordagem local, a forma da partícula é representada pela forma do indentador, e o tamanho da partícula está associado à profundidade e/ou força normal da interação.

Os parâmetros tribológicos do processo de desgaste abrasivo determinam dois tipos principais de movimento da partícula na interface de desgaste: o rolamento e o deslizamento. O rolamento das partículas na interface é evidenciado pela presença de indentações na superfície desgastada, enquanto o deslizamento produz riscos/sulcos na superfície desgastada. A dinâmica das partículas atuantes na interface de desgaste está relacionada com o mecanismo de remoção de matéria na abrasão.

Fazendo dessa idéia um alicerce, propõe-se uma nova abordagem para simular o desgaste abrasivo em laboratório: o rolamento das partículas é representado por seqüências de indentações e o deslizamento, por seqüências de riscos/sulcos. A informação de entrada desse método é a topografia da superfície desgastada que serve de referência. A topografia da referência é acessada usando interferometria laser, enquanto a morfologia é visualizada via microscopia eletrônica de varredura. A análise da morfologia da referência permite determinação do tipo de mecanismo de desgaste predominante. De acordo com o tipo de mecanismo encontrado na referência, define-se a configuração da simulação, a saber: somente indentações; somente riscos/sulcos ou uma mistura de indentações e riscos/sulcos. É possível controlar a posição dos eventos (indentações ou riscos/sulcos) e, no caso de riscos/sulcos, a sua direção. Os parâmetros de rugosidade da topografia da referência são associados ao tamanho dos eventos produzidos na abrasão, que definem a intensidade dos eventos nos ensaios de simulação. A quantidade de eventos é suficiente para cobrir a área da simulação. A seqüência de eventos superpostos altera a superfície da amostra, de forma que reproduza o mesmo mecanismo de desgaste observado na referência. A simulação é considerada válida ao

se constatar a semelhança topográfica e morfológica entre a superfície produzida na simulação e a referência (da Silva; de Mello, 2006).

Constatando a validade da simulação, têm-se as principais informações de saída da simulação: a taxa de desgaste, que pode ser medida pela variação de massa, ou volumétrica; e a rugosidade. Estas informações permitem a comparação do ensaio de simulação com outros tipos de ensaio de abrasão.

É importante salientar que a simulação laboratorial é uma simplificação da realidade, possível de ser reproduzida em laboratório. A idéia dessa nova abordagem se justifica porque a método de simulação é capaz de reproduzir, no mesmo equipamento, várias morfologias distintas nas superfícies testadas. A morfologia da superfície está relacionada ao mecanismo de desgaste atuante na abrasão. Nesse método, a correlação entre a simulação e a realidade se baseia na análise comparativa entre as imagens da superfície da referência e da superfície produzida na simulação.

Adicionalmente, o ensaio de simulação guarda informações sobre as forças decorrentes da interação dos eventos. O conhecimento do posicionamento exato do evento, das forças e profundidades associadas à interação da partícula com a superfície abre caminho para a idealização e realização da simulação computacional do desgaste abrasivo.

Nesta tese conclui-se que a simulação do desgaste via interações múltiplas se mostra suficientemente versátil para representar o rolamento e o deslizamento das partículas abrasivas. Essa nova ferramenta de representação do desgaste abrasivo permite o melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem em cada interação.

O segundo capítulo mostra a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao tema desta tese. Nesse capítulo são abordados os principais conceitos sobre desgaste abrasivo e os principais modelos que representam a dinâmica da partícula na interface de desgaste. Definem-se, formalmente, os tipos de micromecanismos de desgaste abrasivo. São apresentados os fundamentos para a nova metodologia da simulação do desgaste.

No terceiro capítulo, apresentam-se as técnicas experimentais e os equipamentos necessários para a realização da simulação. É dada atenção especial às técnicas de análise e quantificação da topografia.

No quarto capítulo, é mostrada a evolução do novo processo de simulação ao longo do andamento da tese. Ressaltam-se as mudanças de estratégia associadas à definição e validação desse novo método.

No quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

Algumas possibilidades de pesquisas futuras nesse tema de estudo são apresentadas no sexto capítulo.

As referências citadas e consultadas durante o desenvolvimento do trabalho são listadas no sétimo capítulo.

CAPITULO II

2 MECANISMOS DE DESGASTE E O MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS

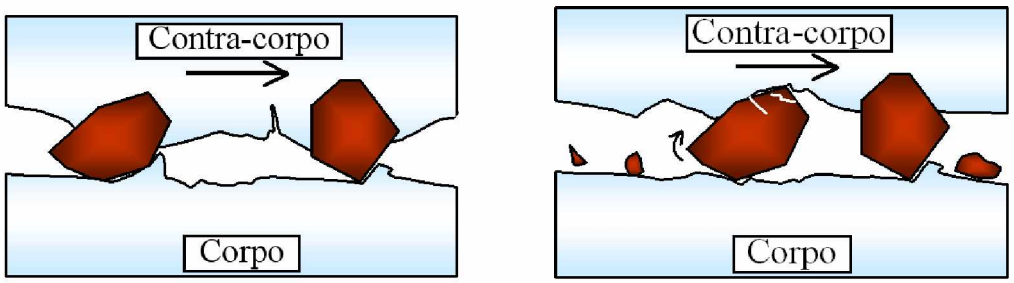
2.1 Desgaste abrasivo - conceitos.

Desgaste abrasivo pode ser definido como a perda de matéria devido ao movimento relativo de duas superfícies e decorrente da ação de: asperidades duras em uma das superfícies; partículas abrasivas livres entre as duas superfícies; partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies (OECD, 1969). Protuberâncias formadas no processo de usinagem podem atuar como partículas abrasivas desde que o material da superfície usinada possua maior dureza que o da superfície antagonista (Zum Gahr, 1987).

Existem duas abordagens principais para o estudo laboratorial do desgaste abrasivo: a abordagem local e a abordagem global. Na abordagem local estuda-se o efeito de uma única interação entre partícula e material. Para isso utiliza-se um indentador instrumentado, que interage com a superfície, deformando-a. As forças geradas na interação são bem conhecidas e o mecanismo de remoção de matéria bem definido. Na abordagem global várias interações ocorrem ao mesmo tempo, devido a ação de partículas abrasivas entre superfícies móveis. Observa-se a dinâmica da partícula, e procura-se aproximar o mecanismo de desgaste dos ensaios com a realidade. Esse método é bem eficiente na comparação relativa do comportamento ao desgaste dos materiais testados (Moore; King, 1980; de Mello, 1983; Nogueira; de Mello,1988a, 1988b; Franco; Zumpano; de Mello, 1989; Williams; Xie,1992).

Seguindo a abordagem global do estudo do desgaste, a literatura classifica o desgaste abrasivo em dois modos principais: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos (Burwell, 1957). Segundo essa definição, a amostra é o primeiro corpo, o contra-corpo é o segundo

corpo e o abrasivo é o terceiro corpo. A Fig. 2.1 mostra, esquematicamente, o desgaste abrasivo a dois e três corpos.



-a- -b-

Figura 2.1 - Modos de desgaste abrasivo: a- Dois corpos, b- Três corpos (esquema adaptado de Bozzi; de Mello, 1999).

Ocorre desgaste a dois corpos quando existem asperidades duras, ou partículas abrasivas rigidamente fixadas no contra-corpo, que geram sulcos/riscos sobre a superfície da amostra durante o movimento (Fig. 2.1a). Um exemplo de abrasão a dois corpos é o desgaste provocado no sistema amostra-lixa. No desgaste a três corpos as partículas abrasivas estão livres, o que permite o rolamento e/ou deslizamento destas entre a amostra e o contra-corpo que, conseqüentemente, gastam apenas parte do tempo atuando sobre a superfície (Rabinowicz; Dunn; Russell, 1961). Testes de desgaste abrasivo a dois corpos produzem taxas de desgaste de pelo menos uma ordem de grandeza maiores que a abrasão a três corpos, quando estão sob condições comparáveis (Rabinowicz; Dunn; Russell, 1961; Rabinowicz; Mutis, 1965; Rabinowicz, 1995).

Rutherford e Hutchings (1996; 1997), correlacionam a dinâmica da partícula abrasiva atuante na interface de desgaste à morfologia da superfície obtida em testes de abrasão. Estes autores mostraram que no desgaste abrasivo a três corpos ocorre a rotação das partículas atuantes, resultando em indentações espalhadas sobre a superfície de desgaste. Riscos/sulcos são associados ao engastamento das partículas no contra-corpo, que deslizam sobre a amostra.

Em um trabalho seqüente, Trezona; Allsopp; Hutchings (1999) propõem uma nova classificação para o desgaste abrasivo em função da dinâmica da partícula atuante. O processo de desgaste abrasivo no qual as partículas são fixadas no contra-corpo e deslizam sobre a amostra é descrito como "desgaste abrasivo por sulcamento" ("grooving abrasive wear"), e o processo em que é possível o rolamento das partículas entre as superfícies é descrito como "desgaste abrasivo por rolamento" ("rolling abrasive wear").

Em uma definição mais completa esses autores (Trezona; Allsopp; Hutchings, 1999) colocam que o desgaste abrasivo por sulcamento é o processo no qual a mesma região da partícula abrasiva, ou asperidade, permanece em contato com a superfície desgastada ao longo do processo. Nesse tipo de desgaste as superfícies são caracterizadas por sulcos paralelos à direção de deslizamento da partícula.

Em contraste, o desgaste abrasivo por rolamento é o processo caracterizado pelo fato de que a região da partícula abrasiva em contato com a superfície de desgaste é continuamente mudada. As superfícies de desgaste produzidas por esse processo são caracterizadas por serem altamente deformadas, com a presença de indentações múltiplas, e com pouca ou nenhuma direcionalidade (Trezona; Allsopp; Hutchings, 1999).

Trezona; Allsopp; Hutchings (1999) também discutem a possibilidade da ocorrência do rolamento e do deslizamento simultâneo das partículas abrasivas.

Estudos recentes (Adachi; Hutchings, 2003) mostram o mapeamento dos parâmetros tribológicos que influenciam o tipo de movimentação da partícula abrasiva no processo de desgaste abrasivo.

2.2 Modelos da dinâmica da partícula no desgaste abrasivo.

Williams e Hyncica (1992a; 1992b) construíram um modelo para o desgaste abrasivo em contatos lubrificados, que relaciona a taxa de desgaste com o movimento da partícula na interface de desgaste. O movimento da partícula define o mecanismo de remoção de matéria, e depende do tamanho, da forma da partícula e da distância entre as superfícies do corpo e do contra-corpo.

Este modelo foi proposto com base em observações do comportamento do desgaste de um mancal lubrificado. Em linhas gerais, quando a espessura do filme (h) é maior do que a dimensão máxima da maioria das partículas ocorre pouco desgaste. O desgaste aumenta rapidamente se uma quantidade razoável de abrasivo (em torno de 20%) é maior do que a espessura do filme lubrificante. A morfologia da superfície também variou com a mudança do tamanho da partícula. Em ensaios com h maior que o tamanho da partícula, a superfície da amostra apresenta indentações em posições aleatórias, com pouco sinal de alguma direcionalidade na deformação. Quando h é pequeno, em relação ao tamanho da partícula, a superfície se apresenta como uma malha de riscos/sulcos paralelos e próximos. O mesmo

comportamento da morfologia da superfície desgasta foi observado ao variar o material da amostra e o tipo de abrasivo (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

A primeira afirmação desses autores (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b) é que a mudança dos mecanismos de desgaste pode estar associada à razão do tamanho da partícula (D) pela espessura do filme (h), onde (Eq. 2.1):

$$\frac{D}{h} = \frac{\text{maior dimensão da partícula}}{\text{menor espessura do filme}} \tag{2.1}$$

A Fig. 2.2 mostra o comportamento do desgaste de uma amostra de bronze fosforoso em função da razão D/h, para dois tamanhos da partícula.

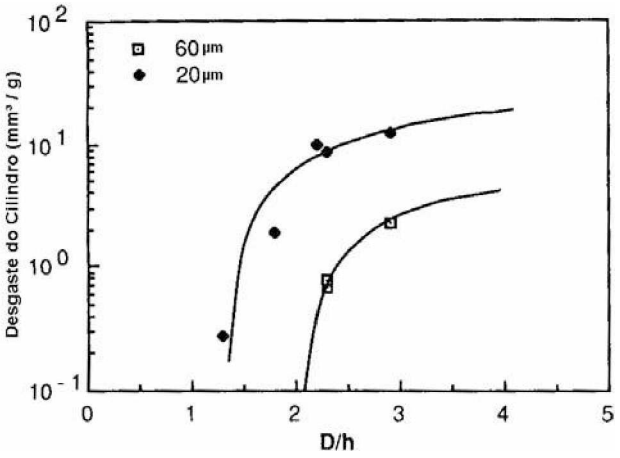


Figura 2.2 - Efeito da relação D/h no desgaste abrasivo do bronze fosforoso. Abrasivo: diamante (Williams; Hyncica, 1992a).

O tamanho das partículas de diamante foi analisado de acordo com a distribuição granulométrica, em que D foi definido como o tamanho maior que 95% das partículas presentes. Observa-se a mudança no mecanismo de desgaste quando a razão D/h é maior que 2 para os dois tamanhos de abrasivo (Fig 2.2). Esta mudança de mecanismo está associada à formação de indentações enquanto D/h < 2, indo para a formação de riscos/sulcos, quando D/h > 2. Ainda que seja possível a existência de milhares de partículas presentes na interface a qualquer momento, é provável que grande parte dessas não participe do desgaste, pois possuem um diâmetro menor que a espessura do filme. É também razoável pensar que elas ajam independentemente umas das outras (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

Uma partícula representativa desse modelo está mostrada na Fig. 2.3.

Inicialmente foi considerado um caso bidimensional, no qual a partícula é um prisma longo com seção transversal de formato anguloso. A maior diagonal da seção transversal é D,

o ângulo β está entre 45° e 90°, e h representa a espessura local do filme. Se D/h < 1 as partículas que passam através da interface produzem somente alguns impactos ocasionais, que representam, relativamente, pouco desgaste nas superfícies.

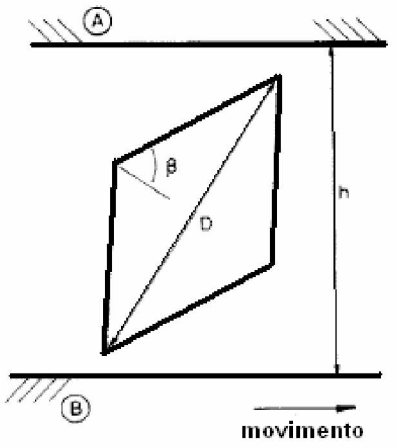


Figura 2.3 - Partícula abrasiva em função dos parâmetros D e β (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

A Fig. 2.4 mostra o esquema da interação de uma partícula com as superfícies móveis (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

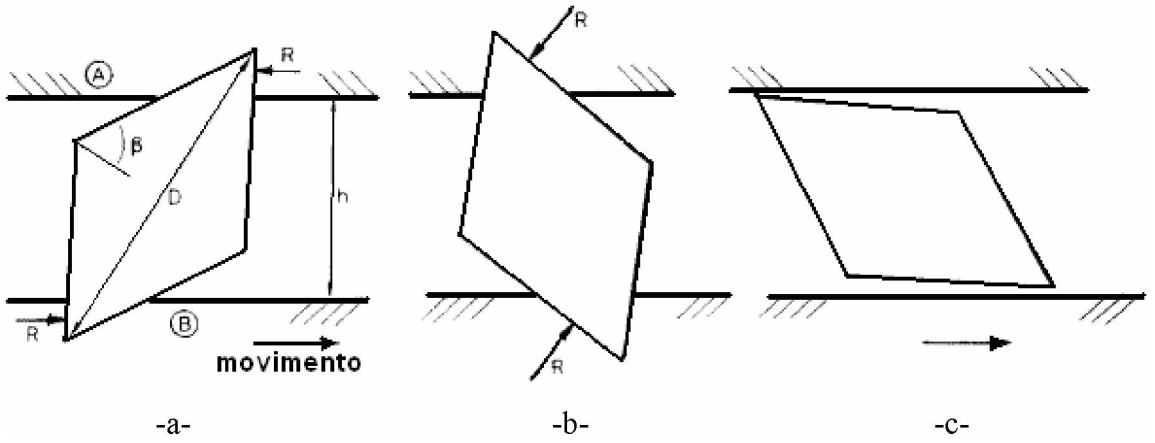


Figura 2.4 - A partícula rola entre as superfícies devido à ação do binário mostrado em a e b, levando a um dano na superfície relativamente pequeno (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

A força de cada indentação, análoga a ensaios de dureza, está associada à resposta mecânica do material. Comparando com o teste de dureza Vickers, espera-se que a força de indentação R seja igual ao produto do valor da dureza pela área projetada, e atue na direção perpendicular à face de indentação, como mostrado nas Fig. 2.4a e b. Se existe outra indentação ocorrendo na extremidade oposta da partícula, duas forças R, que geralmente não

são colineares, formam um binário que tende a rotacionar a partícula (Fig. 2.4). Se a dimensão da partícula não é tão grande, ela pode rotacionar suficientemente até perder o contato com as superfícies, produzindo somente deformações localizadas, associadas às indentações descritas, mas sem a presença de desgaste severo (riscos/sulcos). Este fato está ilustrado na Fig. 2.4c. Esses autores mostram a relação de um tamanho crítico da partícula, $(D/h)_1$, para que ocorra o fenômeno de rotação da partícula (Fig. 2.4).

O tamanho crítico da partícula pode ser correlacionado com o ângulo β, pela relação mostrada na Eq. 2.2 (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

$$\left(\frac{D}{h}\right)_1 = \sec\beta \tag{2.2}$$

A diminuição da espessura do filme, ou o aumento do tamanho da partícula abrasiva, leva ao aumento do valor da razão D/h. A Fig. 2.5 ilustra o comportamento da partícula no caso da razão D/h maior do que $(D/h)_1$.

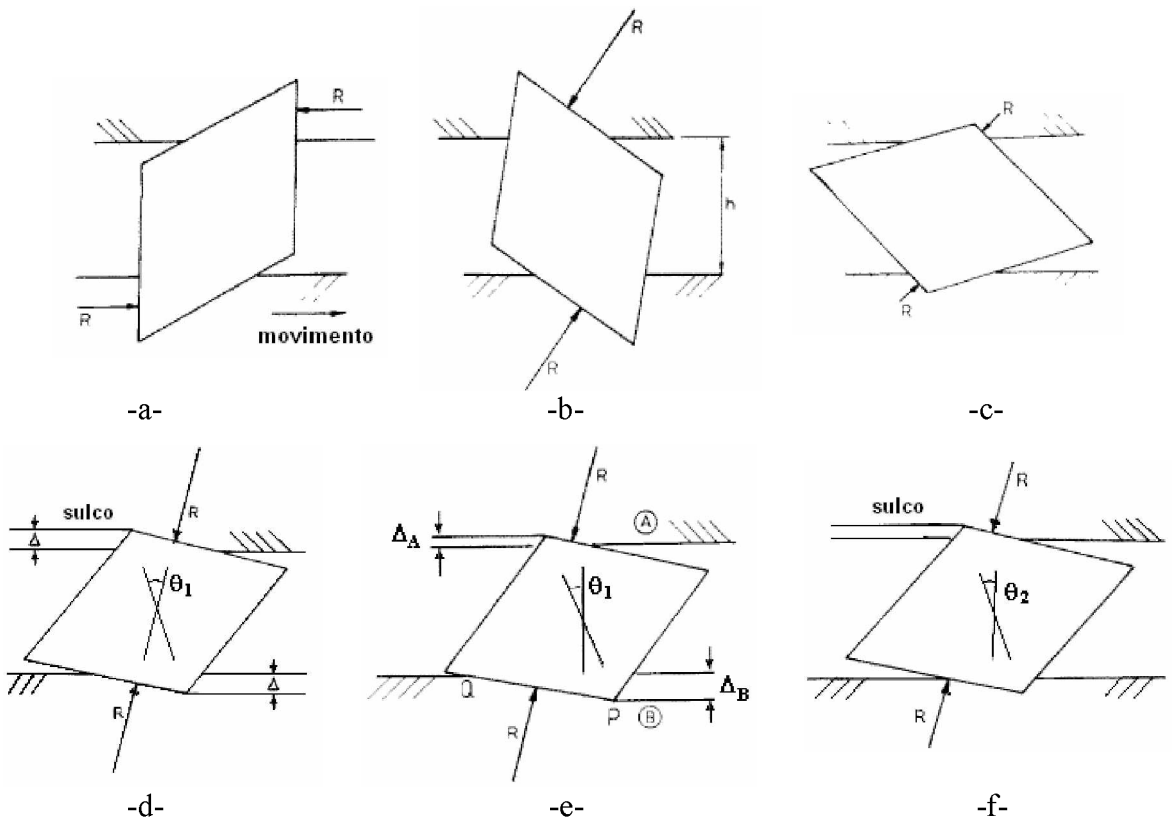


Figura 2.5 - a-d- Quando $D/h>(D/h)_1$ a partícula rotaciona até que uma posição de equilíbrio; e- Situação similar quando a dureza das superfície são diferentes; f- Partícula alojada na superfície mole (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

A situação inicial, Fig. 2.5a, é a mesma mostrada na Fig. 2.4a. Nesse caso a partícula rotaciona devido ao momento causado pela força binária (como no caso anterior), até que o lado de maior ângulo entre em contato com as superfícies, Fig. 2.5 b-c. A partícula continua a rotacionar até que as forças atuantes se tornem colineares (Fig. 2.5d). Nesse momento o binário que provocava a rotação do abrasivo é anulado, deixando a partícula posicionada a uma determinada inclinação, mostrada pelo ângulo θ_1. Por simetria, a linha de atuação das duas forças de indentação (R) passa pelo centro geométrico da partícula (Fig. 2.5d). Nesta espessura de filme espera-se encontrar um conjunto de sulcos/riscos sobre as superfícies da amostra e do contra-corpo, ocasionados pela atuação das partículas (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

De fato, mesmo em superfícies de durezas diferentes o argumento é pouco modificado (Fig. 2.5e). O valor de θ_1 não é alterado, mas a linha de atuação das forças não passa mais pelo centro geométrico da partícula. Nessa situação as duas superfícies continuam sendo sulcadas em profundidades diferentes Δ_A e Δ_B (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

O mesmo argumento sobre o efeito da mudança da razão (D/h) nos modos de degradação da superfície pode ser aplicado, qualitativamente, tanto ao caso tridimensional quanto ao bidimensional. Assim espera-se a transição de rolamento da partícula para deslizamento quando esta seja maior que a espessura do filme de fluido (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

Esses autores (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b) discutem que um ângulo de ataque ψ pequeno favorece o sulcamento, porém se este ângulo aumenta a partir de um determinado valor crítico o mecanismo predominante passa do sulcamento para o corte. O aumento do valor da a razão D/h aumenta também o ângulo de ataque efetivo da partícula. Pode-se, então, antecipar duas conseqüências na mudança do mecanismo de desgaste:

Rolamento ➔ Sulcamento ➔ Corte

Na prática esta transição não é bem definida porque as partículas provavelmente não têm o mesmo tamanho e formato (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

Nesse modelo, ressaltamos a importância dos parâmetros: distância entre as superfícies; tamanho e forma da partícula abrasiva; dureza do corpo e do contra-corpo. O modelo mostrou que esses parâmetros afetam o movimento da partícula na interface.

Trabalhos anteriores mostraram que a distância entre as superfícies guarda relação com o tamanho médio das partículas abrasivas. Philips; Crimes; Wilshaw (1977) estudaram o

desgaste abrasivo, com partículas livres, em materiais frágeis. Eles observaram que para diferentes tipos de abrasivo, misturados com diferentes fluidos, a distância entre as superfícies manteve uma relação aproximada de 2:1 com o tamanho médio das partículas abrasivas. Nesses casos, houve o predomínio do rolamento da partícula abrasiva.

Buijs e Korpel-van Houten (1993a; 1993b) estudaram os mecanismos de desgaste na lapidação de vidros ópticos. Usando a relação mostrada por Philips; Crimes; Wilshaw (1977), esses autores construíram um modelo que relaciona o desgaste com a carga por partícula. A noção de carga por partícula descreve bem o desgaste quando o rolamento das partículas leva a remoção de material devido ao surgimento de trincas laterais. Esses autores (Buijs; Korpel-van Houten, 1993a; 1993b) também mostraram que a dureza do contra-corpo está relacionada com a dinâmica da partícula: no contra-corpo mais mole há a ocorrência de deslizamentos da partícula na interface de desgaste.

Dando continuidade, Verspui e co-autores (1995) analisaram, detalhadamente, a distância entre a amostra e o contra-corpo e a distribuição do tamanho das partículas na abrasão do vidro sodo-cálcico. Esses autores mostram que o rolamento ou o deslizamento das partículas dependem da distância entre amostra e contra-corpo e da distribuição do tamanho dos abrasivos. Eles discutem que o rolamento ocorre quando a razão entre o tamanho das partículas atuantes e a distância entre o corpo e o contra-corpo é menor do que 2. Esse trabalho concorda com os resultados de Williams e Hyncica (1992a; 1992b) – Fig. 2.2.

A distância entre corpo e contra-corpo diminui com o tempo e com o aumento da carga aplicada no ensaio. Esse fenômeno está associado a três fatores principais. Primeiro, altas cargas levam ao aumento da carga por partícula atuante, que acarretam a fratura das partículas durante a abrasão, o que diminui o tamanho médio das partículas. Nesses ensaios não houve a renovação dos abrasivos ao longo do tempo. Segundo, é que altas cargas levam a maior penetração de abrasivos em uma das superfícies. E por último, a altas cargas aplicadas poucas partículas penetram entre a amostra e o contra-corpo (Verspui; With, 1997).

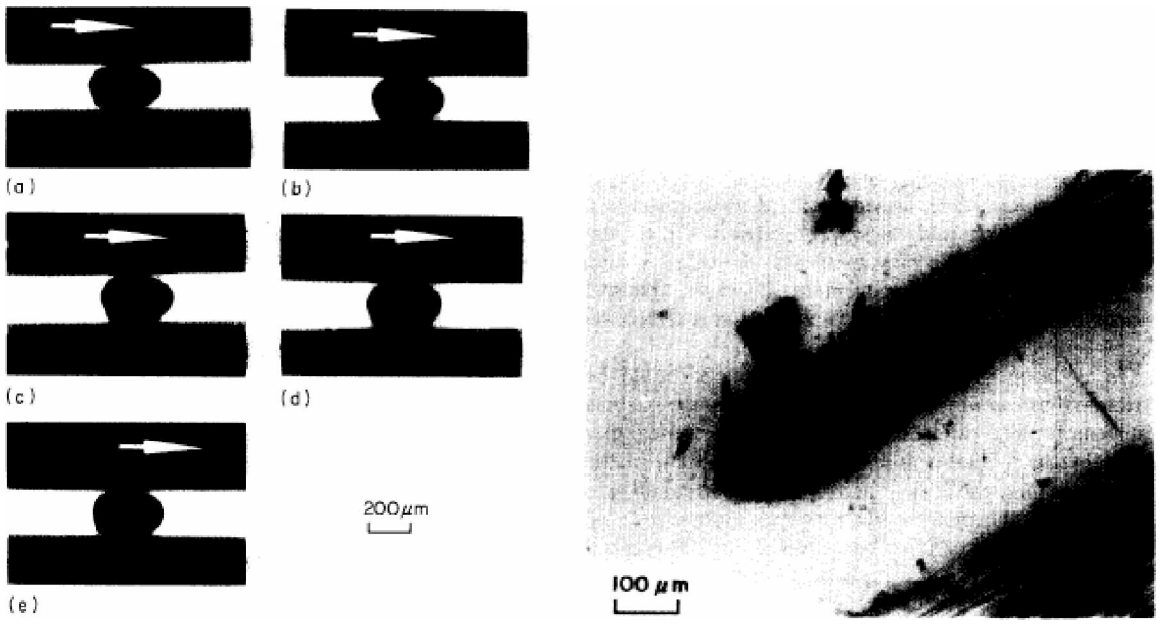
Verspui e With (1997) discutem ainda que análises da distribuição granulométrica da lama abrasiva devem ser consideradas com cuidado. Deve-se manter em mente que durante a abrasão podem ocorrer alterações no tamanho e na forma da partícula.

Outros trabalhos relatam o efeito da mudança de mecanismo em função do tamanho da partícula abrasiva, e efeitos de mudança de forma e fratura do abrasivo durante a abrasão (Misra; Finnie, 1981; 1983; Hutchings, 1992b; Dube; Hutchings, 1999; Santana; de Mello, 1994; Gates, 1998; Bozzi; de Mello, 1999; Williams, 2005). O tamanho da partícula está

relacionado com a quantidade de abrasivos presentes na interface. Quanto maior o abrasivo menor a quantidade de partículas na interface por unidade de área, aumentando a força exercida em cada partícula. Assim, a severidade na abrasão está relacionada ao tamanho da partícula. Altos níveis de carga por partícula aumentam a probabilidade de quebra das partículas, e conseqüente alteração de forma.

Fang e co-autores (1992; 1993) destacam a importância da forma do abrasivo na movimentação da partícula na interface. Esses autores idealizaram um sistema capaz de registrar o comportamento de uma única partícula quando inserida entre duas superfícies que possuem movimento relativo. O equipamento utilizado por esses autores permite a observação do processo abrasivo em uma vista lateral, e o movimento da partícula é arquivado através de fotos sucessivas. Discute-se sobre os parâmetros que afetam o rolamento e o deslizamento das partículas abrasivas com diferentes formas, e propõe-se um critério para esse movimento.

A Fig. 2.6a mostra uma série de fotos sucessivas do processo de deslizamento de uma partícula de sílica. A marca de deslizamento decorrente desse movimento está apresentada na Fig. 2.6b (Fang et al., 1992; 1993).



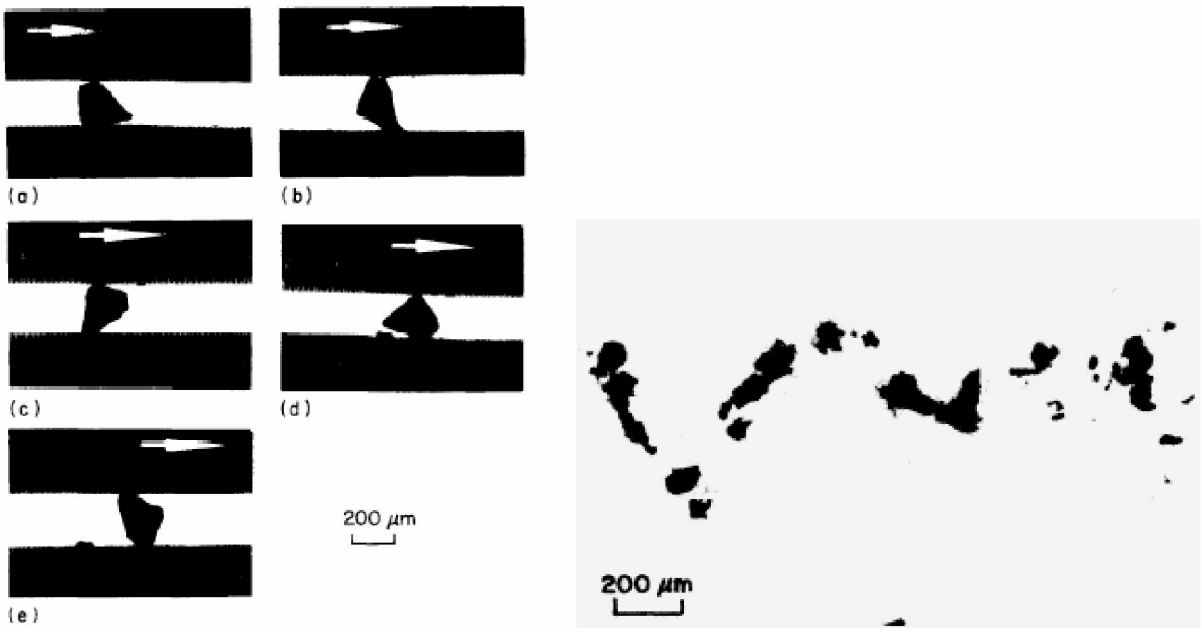
-a- **-b-**

Figura 2.6 - Deslizamento da partícula abrasiva. a- Seqüência de fotos laterais; b- Impressão resultante na superfície superior (Fang et al., 1992; 1993).

O modelo de Williams e Hyncica (1992a; 1992b) mostrou que é possível o deslizamento da partícula em relação às duas superfícies. Entretanto esse fato não foi

observado nos testes de Fang e co-autores (1992; 1993). Mesmo em superfícies de igual dureza, a partícula tende a indentar uma das superfícies e deslizar sobre a outra. Estes autores discutem que esse fenômeno está relacionado à geometria assimétrica da partícula.

As imagens sucessivas da Fig. 2.7-a revelam o processo de rolamento da partícula, e as indentações produzidas (Fig. 2.7-b).



-a- **-b-**

Figura 2.7 - Rolamento da partícula abrasiva. a- Seqüência de fotos laterais; b- Impressão resultante na superfície superior (Fang et al., 1992; 1993).

A Fig. 2.7a mostra que, durante o processo de rolamento, uma das arestas da partícula foi fraturada. Uma trilha de deformações localizadas, decorrentes da ação das asperidades da partícula, foi produzida sobre as superfícies móveis, como mostra a Fig. 2.7b (Fang et al., 1992; 1993).

Esse trabalho mostra que a forma da partícula abrasiva influencia na dinâmica da mesma. A partícula cujo formato tende ao esférico desliza entre as superfícies, enquanto a partícula de formato anguloso tende a rolar entre as superfícies.

Recentemente Adachi e Hutchings (2003) apresentam um mapeamento dos mecanismos de desgaste em ensaios de abrasão. A Fig. 2.8a mostra o mapeamento para amostras de aço ferramenta, contra-corpo de aço inoxidável martensítico e abrasivo carbeto de silício. A Fig. 2.8b sintetiza os mecanismos de desgaste observados em várias condições de testes (Trezona; Allsopp; Hutchings, 1999; Kelly; Hutchings, 2001; Adachi; Hutchings,

2003), em função da razão de durezas da amostra e da esfera (H_s/H_b) e de uma grandeza chamada de severidade do contato (S).

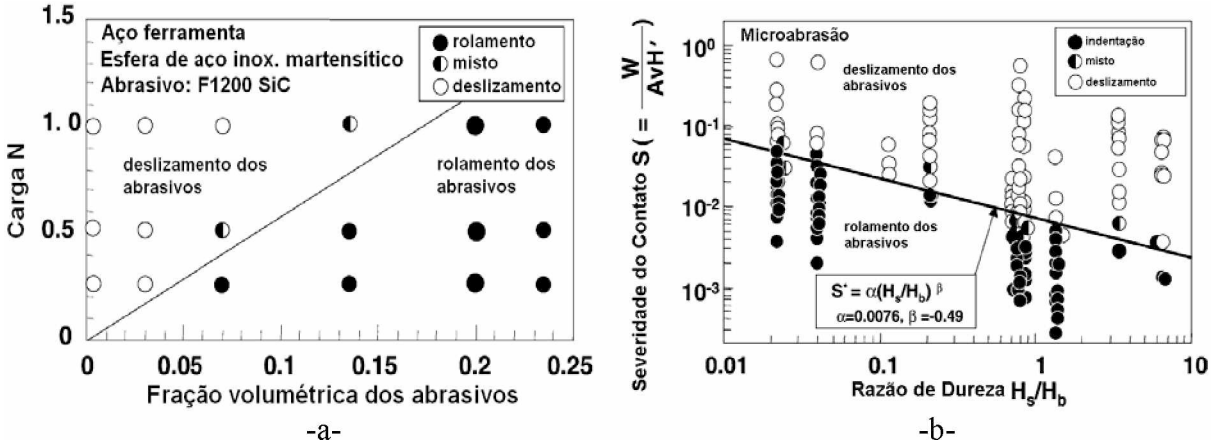


Figura 2.8 - Mapa de desgaste na microabrasão. a- Efeito da força normal e da concentração do abrasivo na interface; b- Efeito da severidade do contato, S, e da razão de durezas, H_s/H_b (Trezona; Allsopp; Hutchings, 1999; Kelly; Hutchings, 2001; Adachi; Hutchings, 2003).

O mecanismo de desgaste muda de rolamento para deslizamento da partícula com o aumento na carga ou com a diminuição na fração volumétrica do abrasivo (Fig. 2.8a). A dependência do mecanismo de desgaste em função da carga e da concentração do abrasivo varia de acordo com as combinações de materiais da esfera e da amostra. A severidade de contato (***S***) é calculada empiricamente, e depende da: área de interação entre amostra e esfera; concentração de abrasivo na interface; dureza das superfícies e da força normal. O mecanismo de desgaste dominante na microabrasão é função destas variáveis. Foram observados poucos casos de ocorrência de riscos/sulcos e indentações na mesma marca de desgaste (Fig 2.8 - misto). Essa condição especial de desgaste pode ser considerada transição entre os regimes de deslizamento e rolamento da partícula na interface. Nota-se que a transição entre os regimes de rolamento e deslizamento dos abrasivos depende da razão da dureza entre a esfera e a amostra. Esses autores (Adachi; Hutchings, 2003) discutem que a razão para esta dependência não é clara, mas é um provável reflexo da razão de dureza sobre o valor crítico D/h (Williams; Hyncica,1992a; 1992b) – Eq. 2.1.

Um trabalho interessante é apresentado por Bozzi e de Mello (1999) sobre o estudo da abrasão de amostras recobertas por aspersão térmica de WC12%Co. Nesse trabalho foram utilizados a alumina (Al_2O_3), a sílica (SiO) e o carbeto de silício (SiC) como abrasivos. A Fig. 2.9a mostra esses resultados.

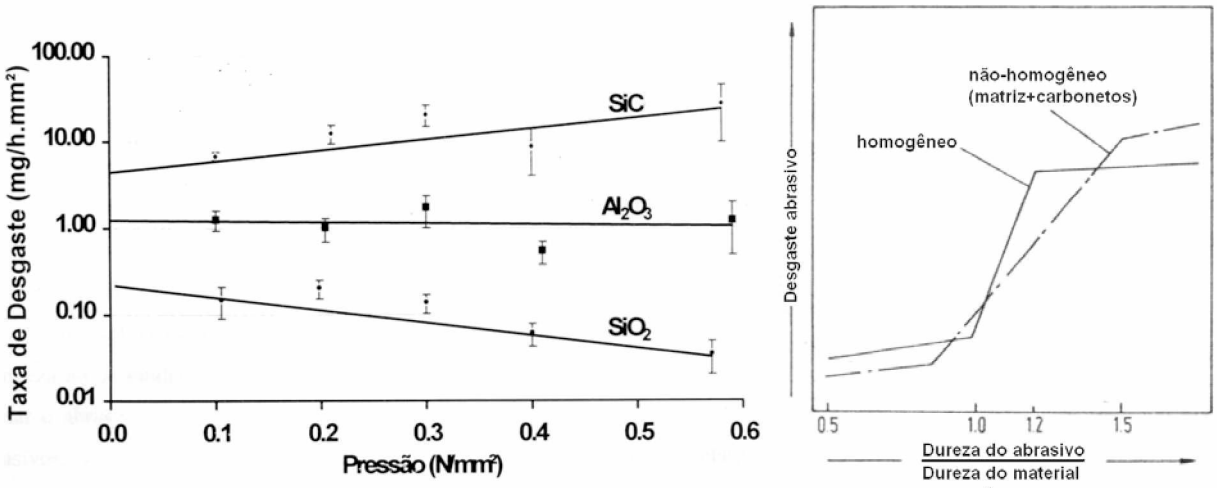


Figura 2.9 - a - Efeito da mudança de abrasivo no comportamento da abrasão com o aumento da pressão de contato (Bozzi; de Mello, 1999); b - Desgaste abrasivo em função da razão de dureza da partícula e do material desgastado (H_A/H_M) (Zum Gahr, 1987).

A mudança do tipo de abrasivo afetou o comportamento da taxa de desgaste em função do aumento da força normal do ensaio. De fato, a relação de dureza dos grãos abrasivos e da superfície do material ensaiado (H_A/H_M) exerce uma considerável influência na taxa de desgaste do material (Zum Gahr, 1987). A Fig. 2.9-b mostra esse efeito para materiais homogêneos e heterogêneos.

Bozzi e de Mello (1999) mostraram que, para a mesma condição de ensaio, a mudança do abrasivo levou a diferentes comportamentos do desgaste, Fig. 2.9a. Usando a sílica como abrasivo, o aumento da pressão de contato leva a diminuição da taxa de desgaste, devido à degradação das partículas. Enquanto que para o abrasivo carbeto de silício (mais duro que a superfície) o comportamento foi oposto, o aumento da pressão de contato levou ao aumento da taxa de desgaste. Usando alumina como abrasivo não foi observada a mudança significativa da taxa de desgaste em função do aumento da pressão de contato.

O esquema apresentado por Zum Gahr (1987), Fig. 2.9b, mostra que a relação de dureza H_A/H_M define o comportamento da abrasão. Dureza do abrasivo menor ou próxima da dureza da superfície, $H_A/H_M \leq 1$, as partículas se degradam e o regime de desgaste é suave. Se a dureza do abrasivo é maior que da superfície, esta última é degradada e o regime de desgaste é severo. No caso de materiais heterogêneos, ou seja, com a presença de fase dura, a transição do regime suave para o severo não é tão acentuada quanto para materiais homogêneos.

A Fig. 2.10 mostra a micrografia da superfície gerada na abrasão do ferro sinterizado e oxidado a vapor usando os abrasivos alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3). Da Silva; Binder;

de Mello (2004; 2005) mostraram que, mantendo a mesma condição de carga, velocidade e concentração de abrasivo, a alteração do tipo de abrasivo pode levar a mudança da dinâmica das partículas na interface.

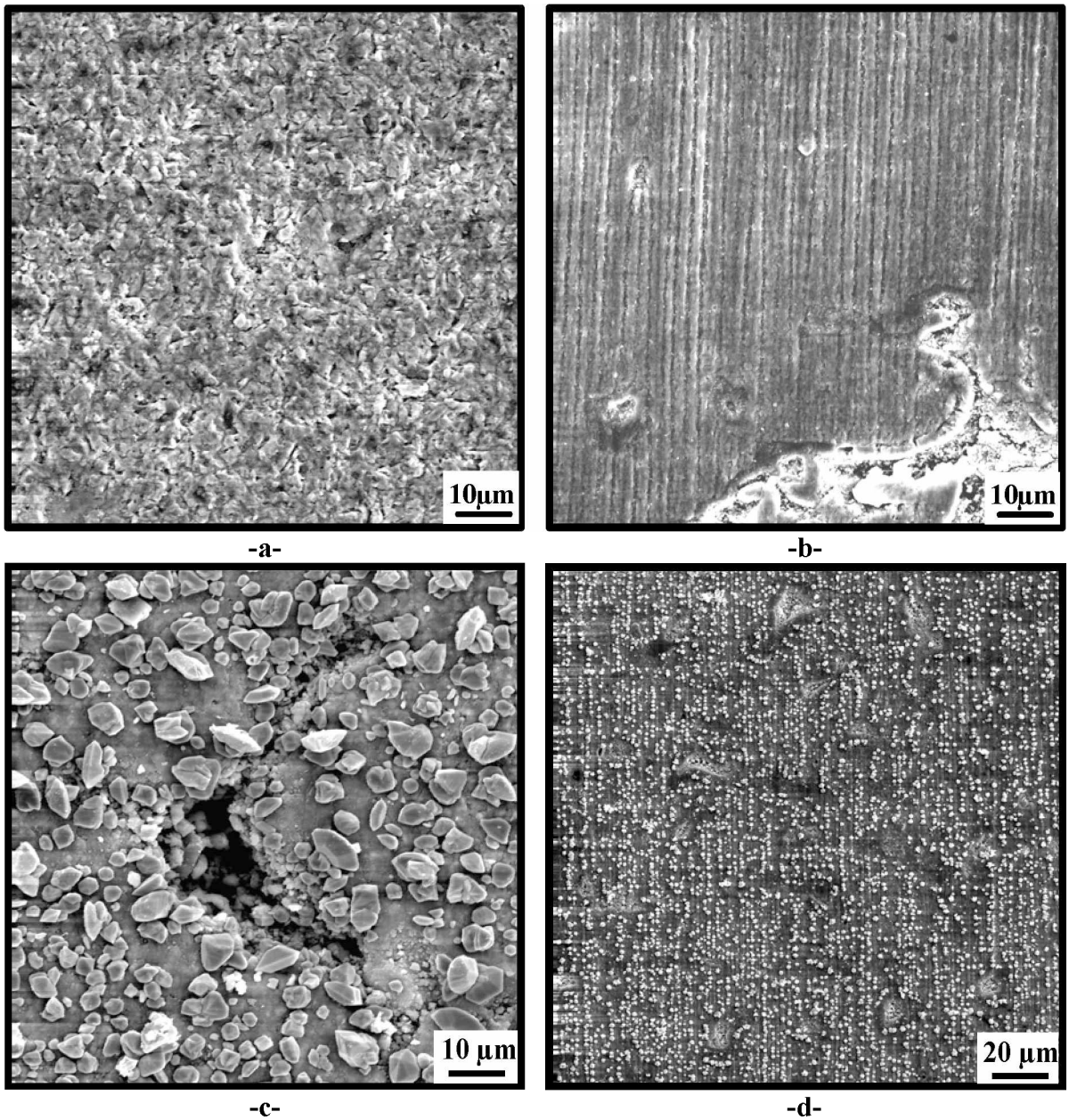


Figura 2.10 – Microabrasão do ferro sinterizado e oxidado a vapor. Abrasivos: a- Alumina (Al_2O_3); b- Hematita (Fe_2O_3). Posicionamento das partículas na interface de desgaste. Abrasivos: c- Alumina; d- Hematita (da Silva, 2003; da Silva; Binder; de Mello, 2004; 2005). MEV.

A mudança do tipo de abrasivo alterou, simultaneamente, a forma, a distribuição granulométrica e a dureza das partículas abrasivas. Essa combinação de fatores levou a alteração do movimento das partículas abrasivas neste sistema de desgaste. As Fig. 2.10a e

Fig. 2.10b mostram que nos ensaios com alumina ocorreu o rolamento da partícula, gerando indentações, enquanto a hematita deslizou entre as superfícies gerando riscos/sulcos (da Silva, 2003; da Silva; Binder; de Mello, 2005).

Usando uma técnica de parada súbita do ensaio de desgaste, esses autores (da Silva; Binder; de Mello, 2004) mostraram o posicionamento das partículas presentes na interface de desgaste, Fig 2.10c-d. Para fixar as partículas na superfície desgastada foi utilizado um método de deposição de uma fina camada de cobre aderente ao ferro, o que possibilitou a observação do posicionamento das partículas. A Fig. 2.10c mostra que a alumina se distribui aleatoriamente na área da interface de desgaste, consequentemente, as indentações originadas das interações entre as partículas abrasivas e superfície não apresentam direcionalidade (Fig. 2.10a). Nos ensaios usando hematita observou-se a forte tendência ao alinhamento das partículas na direção do movimento da esfera sobre a superfície (Fig. 2.10d). O alinhamento das partículas está associado aos riscos/sulcos paralelos encontrados na superfície desgastada (Fig 2.10b). Esse fato sugere que a natureza do abrasivo (dureza, tamanho e forma) afeta seu posicionamento e alinhamento na área da interface de desgaste, que está relacionado ao rolamento ou deslizamento das partículas atuantes no desgaste (da Silva; Binder; de Mello, 2004).

2.2.1 - Síntese dos parâmetros tribológicos que influenciam na movimentação da partícula na interface.

Em síntese, o comportamento do desgaste abrasivo é sistêmico. O micromecanismo de remoção de matéria está associado ao movimento e interação das partículas abrasivas com as superfícies. Essa dinâmica é influenciada por algumas características principais dos sistemas tribológicos. A Fig. 2.11 mostra um esquema simplificado dos fatores que interferem no mecanismo de desgaste.

A força por partícula, ou força efetiva suportada pelas partículas abrasivas atuantes no desgaste, está diretamente associada à força normal aplicada, à concentração do abrasivo no meio e à distribuição do tamanho das partículas. O aumento da carga de teste, para uma mesma concentração, aumenta a força por abrasivo e diminui a distância entre as superfícies, o que favorece o deslizamento das partículas. Por outro lado, o aumento da concentração de abrasivo no meio aumenta a quantidade de partículas atuantes. Mantendo a mesma carga de teste, o aumento da concentração leva à diminuição da força por abrasivo, e em conseqüência, ao aumento da distância entre as superfícies, o que favorece o rolamento dos abrasivos.

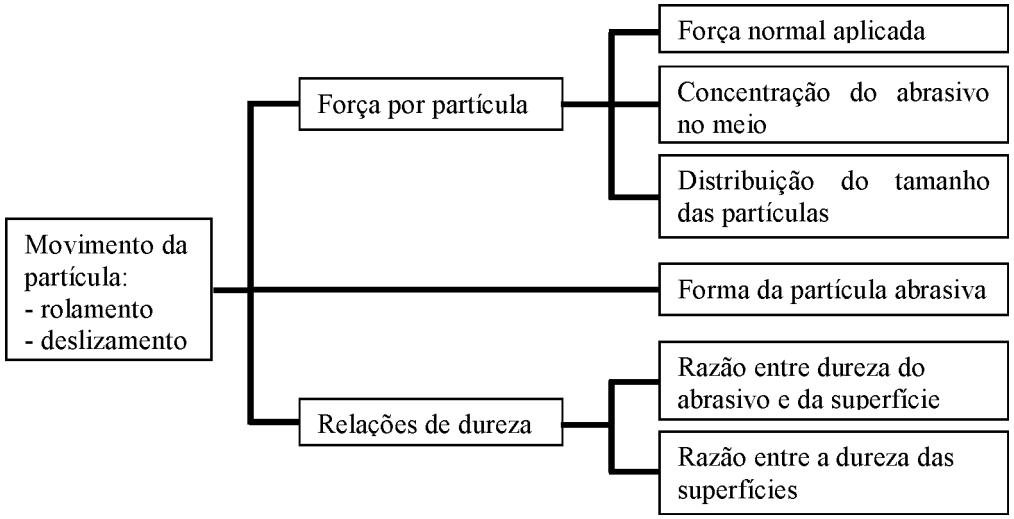


Figura 2.11 - Parâmetros tribológicos que interferem no tipo de mecanismo de desgaste atuante.

A análise da distribuição dos tamanhos das partículas abrasivas permite encontrar o diâmetro das partículas atuantes. Se a condição de carga não induzir a quebra do abrasivo, o aumento do tamanho da partícula leva a diminuição da quantidade total de abrasivos presentes na interface por unidade de área, o que eleva a carga por abrasivo ocasionando aumento na taxa de desgaste. O mecanismo de desgaste predominante se relaciona com a razão do tamanho do abrasivo atuante pela distância entre as superfícies.

A assimetria da partícula abrasiva não permite que a resposta das superfícies, de mesmo material, sejam idênticas, o que favorece o equilíbrio dinâmico somente quando a partícula se mantém engastada em uma das superfícies. As formas angulosas tendem ao rolamento, enquanto que as formas mais esféricas tendem ao deslizamento.

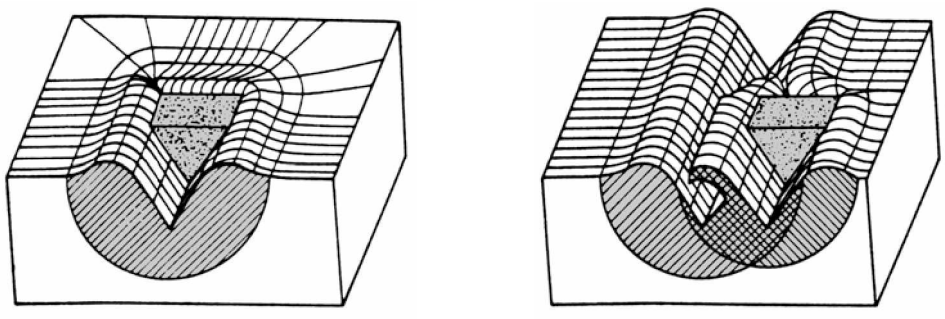
Independente do efeito da forma e tamanho da partícula, a dureza da partícula abrasiva está relacionada à sua capacidade de degradação.

A grande diferença de dureza entre as superfícies móveis leva ao engastamento da partícula sobre o material mais mole, o que facilita o deslizamento do abrasivo sobre a superfície de maior dureza.

2.3 Micromecanismos de degradação associados ao desgaste abrasivo

Micromecanismo de desgaste é o processo de interação entre a partícula abrasiva ou asperidade dura e a superfície desgastada (Mulhearn; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963; Zum Gahr, 1987). A definição da forma de remoção de matéria da superfície que cada mecanismo de desgaste representa é fundamental para o entendimento dos fenômenos

associados à abrasão. A literatura define os mecanismos de desgaste associados ao deslizamento da partícula abrasiva sobre a superfície: microsulcamento, microcorte e microtrincamento. A Fig. 2.12 mostra o mecanismo de desgaste conhecido como microsulcamento.

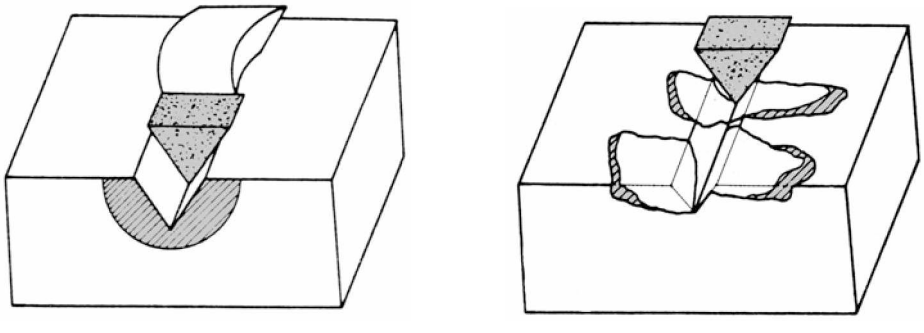


-a- -b-

Figura 2.12 – Microsulcamento. a- Atuação de uma partícula; b- Interação de sulcos (Zum Gahr, 1987).

Esse tipo de interação ocorre devido ao deslocamento da partícula abrasiva sobre a superfície em condições dúcteis. No microsulcamento o material é deformado plasticamente para as laterais do sulco formando saliências. Teoricamente, um único sulco não leva a perda de material efetivo. Entretanto, é possível a ocorrência de vários sulcos (Fig. 2.12b) sobre a superfície, possibilitando a remoção de matéria devido à deformação intensa (Mulhearn; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963; Zum Gahr, 1987).

Na interação entre partícula e superfície, em que as condições tribológicas permitem grandes níveis de deformação plástica localizada, ocorre o mecanismo chamado microcorte ou microriscamento, mostrado na Fig. 2.13a (Mulhearn; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963; Zum Gahr, 1987).



-a- -b-

Figura 2.13 - a- Microcorte; b- Microtrincamento (Zum Gahr, 1987).

No microcorte, uma única interação pode levar a perda de massa devido ao destacamento do material pelo abrasivo. Se as condições favorecem o microcorte puro, o volume de material perdido é igual ao volume do risco produzido (Mulhearn; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963; Zum Gahr, 1987).

O microtrincamento (Fig. 2.13b) ocorre quando altos níveis de tensão são impostos a superfícies de materiais frágeis. Nessa interação ocorre o destacamento de fragmentos maiores que a dimensão do próprio evento. Isso se deve a formação e a propagação de trincas durante o processo. Esse mecanismo é típico de condições frágeis de desgaste (Mulhearn; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963; Zum Gahr, 1987).

A Fig. 2.14 mostra o esquema do contato entre o indentador e a amostra durante o deslizamento.

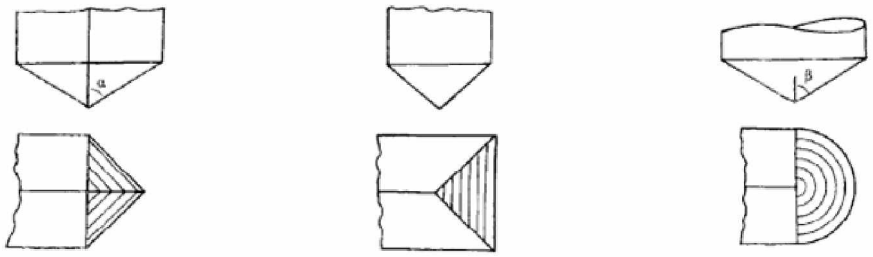
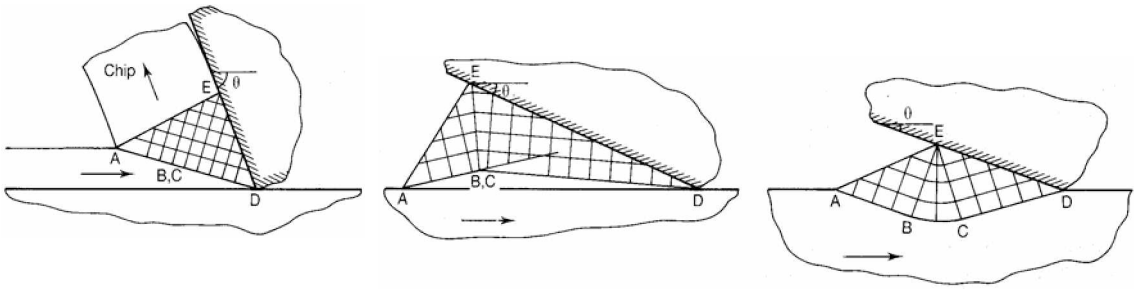


Figura 2.14 - Faces de contato no deslizamento (Williams, 1996).

Enquanto na indentação todas as faces do indentador estão em contato, no deslizamento o contato pode alterar-se de acordo com a forma e a inclinação do indentador. Se a direção de deslizamento coincide com a aresta do indentador piramidal de base quadrada, o contato no deslizamento ocorre em duas faces, como mostrado na Fig. 2.14a. Ao rotacionar esse indentador de 45° somente uma face fica em contato (Fig. 2.14b). No caso de um indentador cônico, independente da direção adotada, metade do cone está em contato, Fig. 2.14c (Williams, 1996).

Em testes de esclerometria (riscamento), a orientação do indentador piramidal é importante porque afeta a forma como o material é removido (Mulhearn; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963, 1964; Maan; Van Groenou, 1977; de Mello; Durand-Charre; Mathia, 1986; Williams, 1996).

Sedriks e Mulhearn (1963) estudaram o efeito do ângulo entre a face atuante do indentador e a superfície da amostra (ângulo de ataque) na esclerometria de metais. Esse autor mostrou que grandes ângulos de ataque determinam a ocorrência de microcorte. Posteriormente, Black; Kopalinsky; Oxley (1988; 1992) detalharam esse estudo, Fig. 2.15.



-a- -b- -c-

Figura 2.15 - Mecanismos de desgaste e o ângulo de ataque. a- Microcorte; b- Misto; c- Microsulcamento (Black; Kopalinsky; Oxley,1988; 1992).

Os esquemas da Fig. 2.15 mostram três modos distintos de deformação decorrentes do deslizamento da direita para a esquerda, de uma partícula ideal, bidimensional, sobre um material rígido-plástico. A Fig. 2.15a mostra o mecanismo de microcorte puro (Fig. 2.13a), onde todo o material deformado é destacado após passar por uma zona plástica, formando um pequeno cavaco. Esse mecanismo é associado a grandes ângulos de ataque. A Fig. 2.15c mostra o comportamento oposto, o microsulcamento puro (Fig. 2.12a). Nesse caso o material que passa pela zona plástica é deformado para a lateral do sulco. O pequeno ângulo de ataque não permite que o material deformado destaque como cavaco, e assim, o mecanismo de microsulcamento não leva a remoção direta de material da superfície. O terceiro modo de deformação ilustrado na Fig. 2.15b representa um comportamento intermediário. Um misto de escorregamento limitado e completa adesão ocorrem entre a face de contado da partícula e o material deformado. Nesse mecanismo intermediário não é possível estabilizar o comportamento de remoção de material. O material ora se acumula na frente do indentador, como mostrado na Fig. 2.15b, ora se destaca. Nesse processo parte do material é deformado para a lateral do sulco e parte é removido (Black; Kopalinsky; Oxley,1988; 1992).

Uma maneira de quantificar a resposta do deslizamento de uma partícula sobre uma superfície quanto a capacidade de sulcar ou cortar é o cálculo do fator f_{ab}. Esse cálculo se baseia na análise das áreas de material removido/movimentado da seção transversal do evento formado durante o deslizamento. A Fig. 2.16 mostra o esquema da seção transversal de um deslizamento dútil.

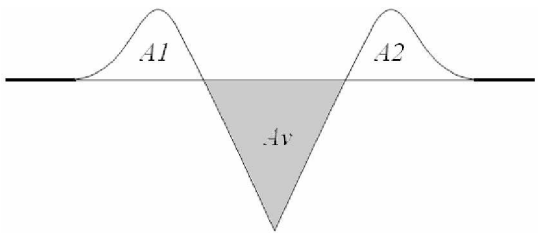


Figura 2.16 – Esquema do perfil transversal do deslizamento dútil (Zum Gahr, 1987).

No deslizamento em regime dútil, Fig. 2.16, a área *Av* correspondente ao material removido pela ação do indentador com a superfície e as áreas *A1* e *A2* representam o material deformado para a lateral do sulco. O fator f_{ab} pode ser calculado de acordo com a Eq. 2.3 (Mulhearn; Samuels, 1962; Zum Gahr, 1987).

$$f_{ab} = \frac{Av - (A1 + A2)}{Av} \tag{2.3}$$

Para o deslizamento dútil um f_{ab} igual a zero significa que toda a área removida pelo indentador foi deformada para a lateral do sulco. O f_{ab} igual a um representa o microcorte ideal. Qualquer valor intermediário representa o percentual de material removido durante o deslizamento (Mulhearn; Samuels, 1962; Zum Gahr, 1987).

No regime frágil, a remoção de material devido a propagação de trincas pode levar a áreas maiores que a dimensão correspondente ao indentador, ou seja, um fator f_{ab} maior do que 1. O fator f_{ab} não é usual para análise do deslizamento no regime frágil (Mulhearn; Samuels, 1962; Barradas; Costa; de Mello, 2001; Stachowiak; Batchelor, 2001).

De fato, tanto indentações quando deslizamentos em regime frágil estão associados a certo grau de deformação plástica combinado com a formação e propagação de trincas superficiais ou sub-superficiais (Johnson, 1985; Williams, 1996).

A formação de trincas no contato esférico é explicável de acordo com a teoria de Hertz. Nesse caso a fratura é produzida pela máxima tensão localizada na superfície livre, que ocorre justamente na borda da área de contato. Isso gera a trinca que pode propagar pelo volume do material seguindo uma orientação cônica. O esquema bidimensional do contato Hertziano é apresentado na Fig. 2.17.

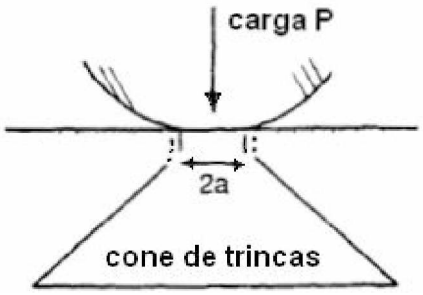
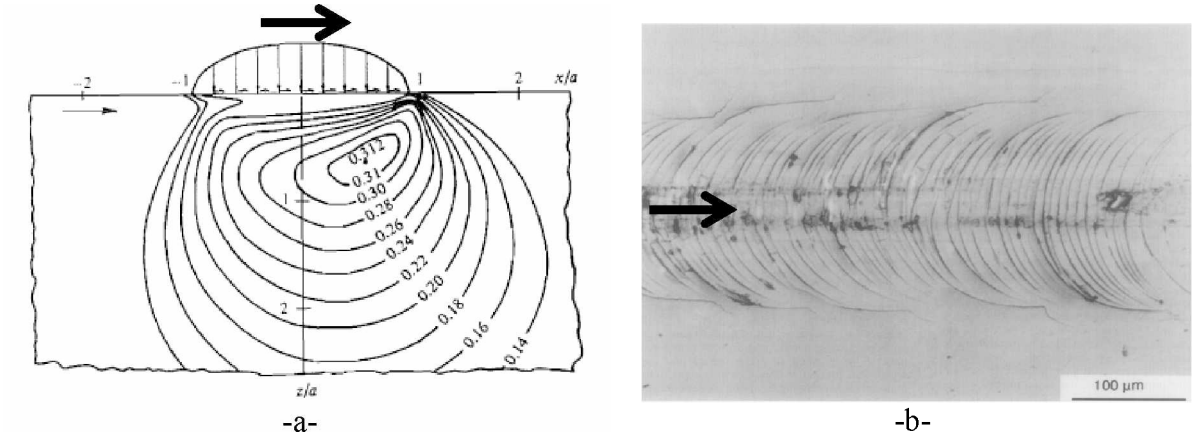


Figura 2.17 - Tensões de Hertz, contato esférico (Johnson, 1985; Williams, 1996).

O movimento do indentador sobre a superfície distorce o campo de tensão sub-superficial no sentido do movimento, como mostrado no esquema da Fig. 2.18a. Esse tipo de

concentração de tensões gera séries de trincas Hertzianas durante o deslizamento. A formação desse tipo de trincas está ilustrada na Fig. 2.18b (Johnson, 1985; Williams, 1996).

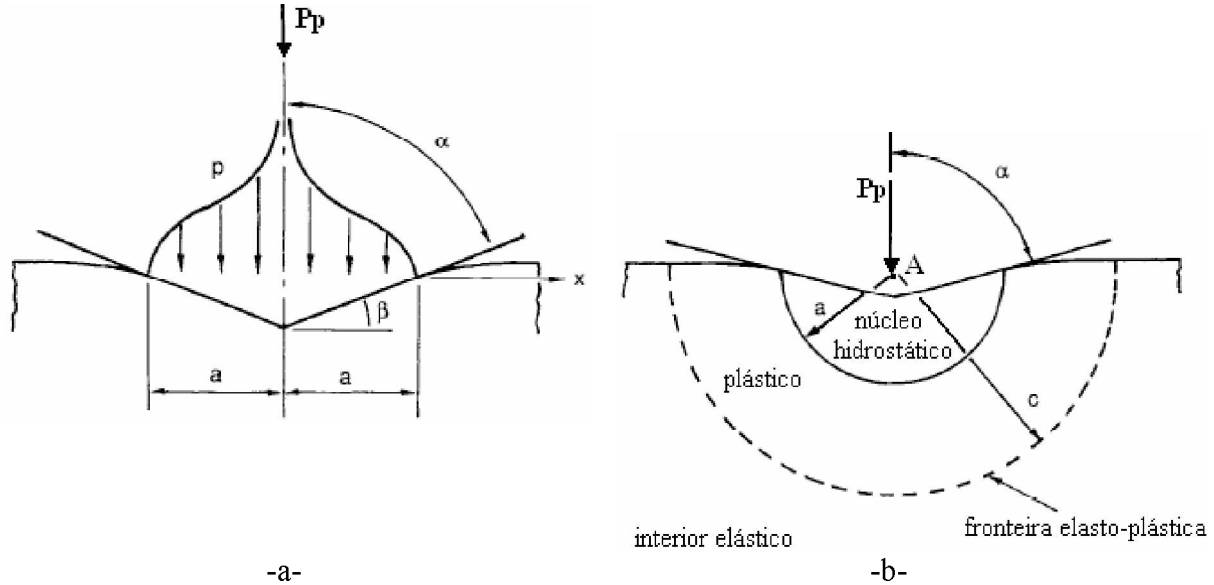


-a- -b-

Figura 2.18 - Deslizamento em regime frágil e contato esférico. a- Esquema das tensões de Hertz (Johnson, 1985); b- Marca originada do deslizamento de uma esfera sobre uma superfície de vidro. Seta indica o sentido do movimento da partícula (Williams, 1996).

As trincas formadas nesse deslizamento não interceptam a superfície em círculos completos, mas em séries arcos, como mostrado na Fig. 2.18b. Em cargas maiores, estas trincas evoluem, estilhaçando a superfície.

O contato não Hertiziano apresenta um comportamento diferente devido à presença de um concentrador de tensão na ponta do indentador anguloso. O esquema bidimensional mostrado na Fig. 2.19a apresenta a distribuição de tensões na região de contato de um indentador cônico sem arredondamento na extremidade.

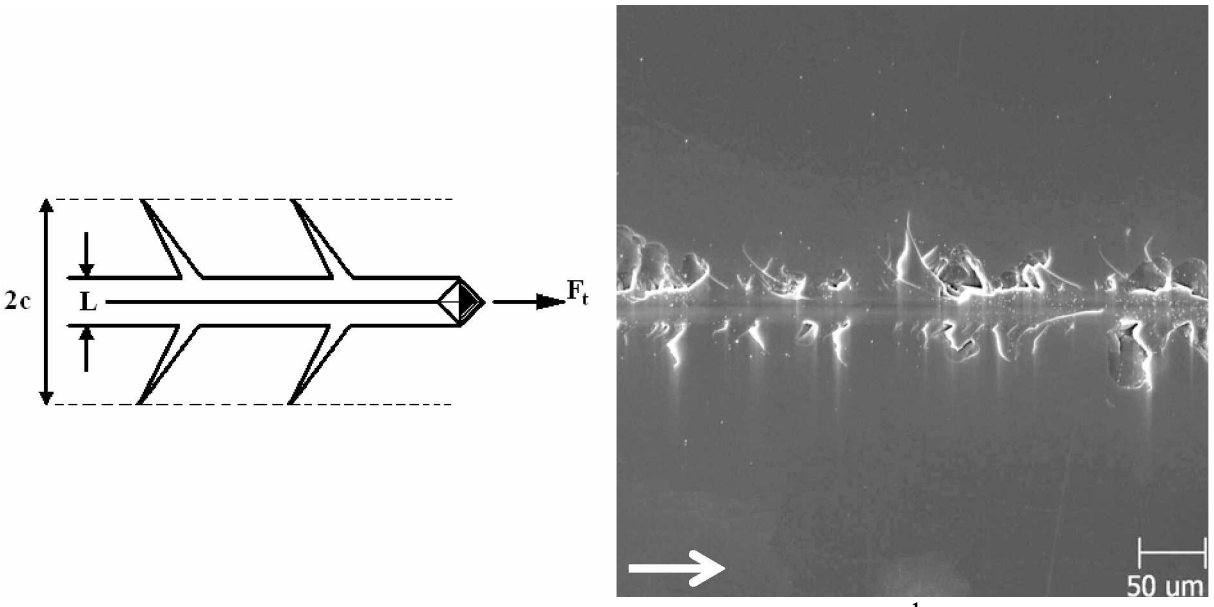


-a- -b-

Figura 2.19 - a- Distribuição de tensões não Hertizianas; b- Zonas de deformação decorrentes do contato (Johnson, 1985; Williams, 1996).

O contato não Hertiziano apresenta uma singularidade causada pela concentração de tensão na extremidade do indentador, como mostrado na Fig. 2.19a. Nesse ponto o valor da tensão tende ao infinito. As zonas afetadas pelo contato têm, aproximadamente, formato radial com o centro no ponto inicial do contato, ponto A - mostrado na Fig. 2.19b. O núcleo hidrostático compreende a região mais próxima à extremidade do indentador e caracteriza-se pela presença de material extremamente deformado devido à tensão compressiva hidrostática. A zona subseqüente tem comportamento plástico e ocupa uma região radial em torno do ponto inicial de contato. O raio da fronteira entre as zonas de comportamento plástico e elástico está relacionado à quantidade de material deformada pelo indentador (Fig. 2.19b).

O movimento do indentador anguloso sobre a superfície de um material frágil leva a formação de fissuras laterais, como mostrada no esquema da Fig. 2.20.



-a- -b-

Figura 2.20 – a- Esquema d formação de fissuras laterais associadas ao movimento isolado do indentador anguloso (Laurent; de Mello,1991; de Mello, 1983); b- Deslizamento frágil no vidro sodo-cálcico, força normal 1 N. Seta indica o sentido de deslizamento.

Em geral, as fissuras formadas aparecem a intervalos constantes e cessam de propagar a um comprimento também constante, como mostrado no esquema da Fig. 2.20a. As fissuras laterais podem evoluir para o estilhaçamento localizado (de Mello, 1983; Laurent; de Mello,1991). A Fig. 2.20b apresenta um exemplo da ocorrência de fissuras e alguns estilhaçamentos.

Estudos mostram que materiais cerâmicos apresentam a transição de comportamento dútil-frágil no deslizamento de partículas (de Mello; Durand-Charre; Mathia, 1986; Nogueira; de Mello, 1988a; 1988b). Se as tensões impostas não são suficientes para gerar e propagar

trincas, o material cerâmico simplesmente se deforma plasticamente. Esses autores colocam que os principais parâmetros que afetam a transição dútil-frágil são a força normal exercida no contato e a velocidade de deslizamento. Nogueira e de Mello (1988a; 1988b) ressaltam que a força normal tem influência significativa na transição de comportamento dútil-frágil, e que a velocidade tem efeito quando varia relativamente de uma ordem de grandeza.

Observam-se alguns pontos importantes no estudo dos mecanismos de desgaste quando a partícula desliza sobre a superfície. A forma do indentador e o ângulo de ataque afetam diretamente o mecanismo de desgaste. O fator f_{ab} pode medir a resposta do sistema quanto ao mecanismo. No sistema frágil de deslizamento, o mecanismo de desgaste está associado à nucleação e propagação de trincas sub-superficiais. A força normal e a velocidade (em menor escala) afetam o comportamento dútil-frágil de materiais cerâmicos.

Os trabalhos apresentados no tópico 2.2 mostram que o deslizamento da partícula abrasiva na interface de desgaste está relacionado aos mecanismos de microriscamento, microsulcamento e microtrincamento.

A literatura é deficitária ao definir o mecanismo de desgaste presente no rolamento da partícula.

Propõe-se que um micromecanismo de remoção de matéria ocorre quando a partícula abrasiva toca na superfície com uma determinada carga sem deslizar, gerando deformação plástica localizada. Esse processo também é conhecido como indentação, e está apresentado na Fig. 2.21.

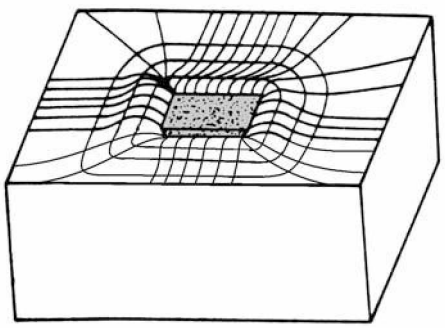


Figura 2.21 - Indentação.

A repetição de indentações sobre a superfície recebe o nome de indentação múltipla. As características do material deformado, a força normal e a forma do indentador determinam o caráter dútil ou frágil da indentação.

O processo de indentação em materiais dúcteis leva a deformação elasto-plástica localizada do material (Johnson, 1985; Taljat; Pharr, 2004). A Fig. 2.22 mostra esquemas da seção transversal da marca causada por um indentador esférico sobre um material mole.

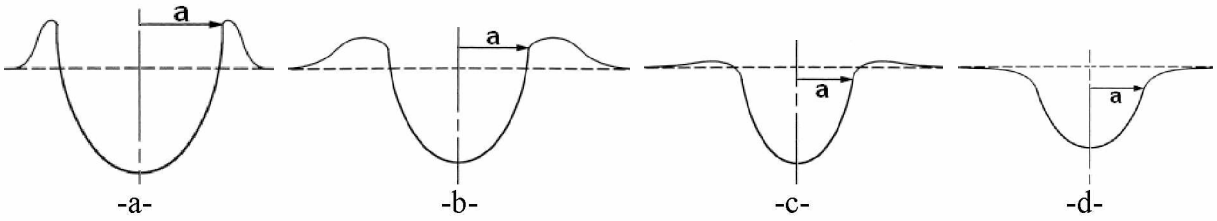


Figura 2.22 - Esquema de seções indentações esféricas em regime dútil mostrando a transição gradual de a- Empilhamento até d- Rebaixamento (Alcalá; Barone; Anglada, 2000).

O esquema mostrado na Fig. 2.22a mostra que o material escoa para a borda da indentação e acumula-se acima do plano da superfície da amostra. Esse tipo de deformação é conhecido na literatura pelo termo "empilhamento" ("pile-up"). O esquema da Fig. 2.22d mostra a deformação como um arredondamento em um nível inferior ao plano da amostra. Esse fenômeno é conhecido como "rebaixamento" (sinking-in). Comportamentos intermediários estão mostrados na Fig. 2.22b-c (Alcalá; Barone; Anglada, 2000).

A Fig. 2.23 mostra a ocorrência do empilhamento e do rebaixamento em indentações esféricas e piramidais em amostras de cobre.

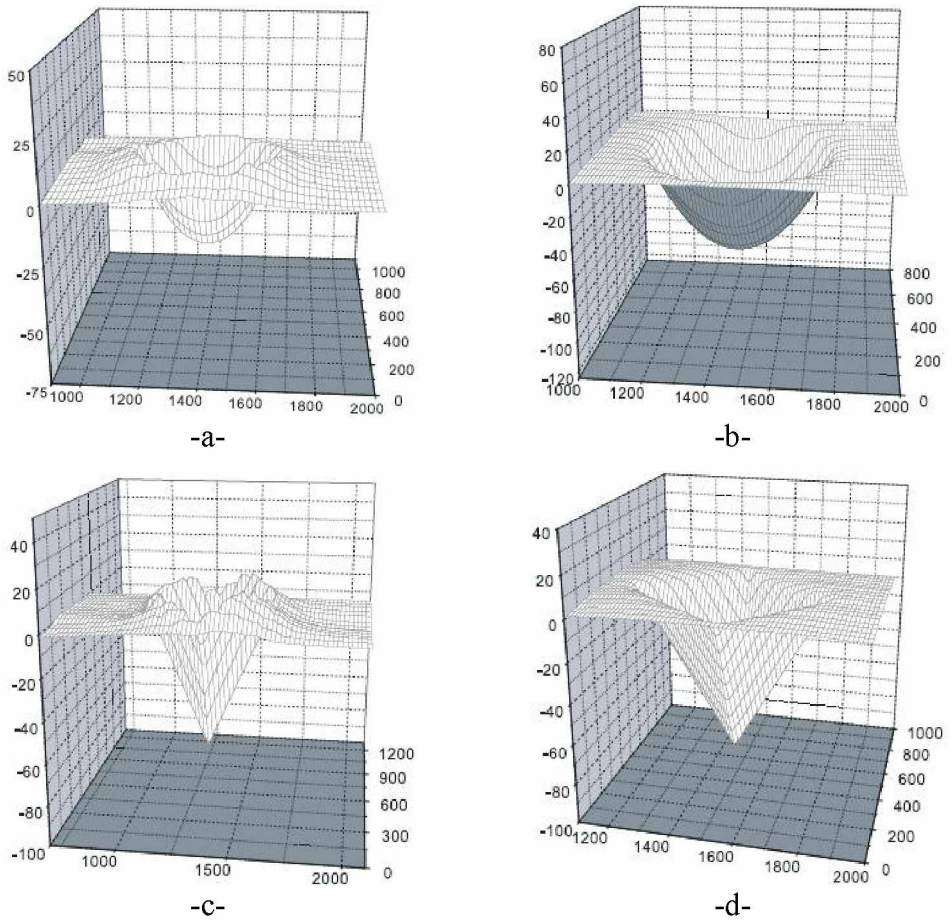


Figura 2.23 – Indentador esférico: a- Cobre encruado; b- Cobre recozido; Indentador piramidal: c- Cobre encruado; d- Cobre recozido (Alcalá; Barone; Anglada, 2000).

A Fig. 2.23 mostra que independentemente do tipo de indentador, o cobre encruado tende a formar empilhamento enquanto as amostras de cobre recozido tendem a formar rebaixamento (Alcalá; Barone; Anglada, 2000).

Na abrasão dútil, a indentação múltipla altera a rugosidade da superfície desgastada devido às sucessivas deformações plásticas localizadas.

Assim como o microtrincamento, a indentação frágil pode levar ao destacamento de material, devido à formação e a propagação de trincas localizadas. Uma única indentação pode remover material. Estudos mostram a ação de indentador anguloso em materiais frágeis (Lawn; Swain,1975; Marshall; Lawn; Evans, 1980, 1982). A Fig. 2.24 apresenta um diagrama explicativo do mecanismo de formação e propagação de trincas nessas condições.

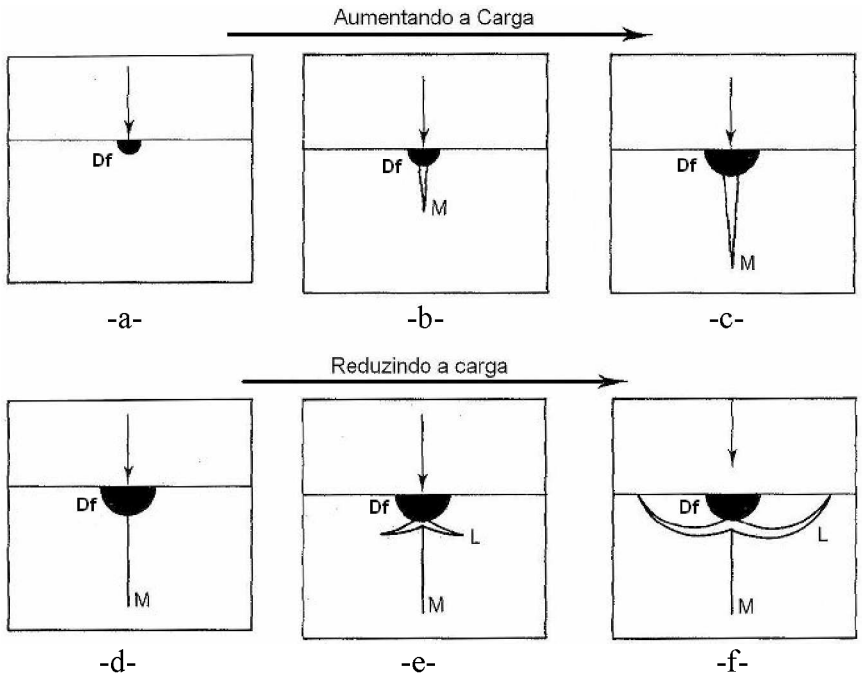


Figura 2.24 - Modelo do processo de indentação em regime frágil (Lawn; Swain,1975).

No ponto inicial de contato, as tensões são muito elevadas. De fato, se o indentador é perfeitamente anguloso, este age como um forte concentrador de tensão, como mostrado no diagrama da Fig. 2.24a. Essas tensões são aliviadas devido ao fluxo plástico ou densificação na ponta do indentador (região Df, Fig. 2.24a). Se as tensões de tração ultrapassam um valor crítico ao longo do plano mediano, inicia-se uma trinca mediana (M, Fig. 2.24b). Aumentando a carga a trinca mediana cresce. A redução da carga interrompe a tensão de tração no plano mediano o que leva ao fechamento da trinca mediana, como mostrado na Fig. 2.24d. Prosseguindo o descarregamento, trincas laterais se formam no ponto de maior concentração de tensões (L, Fig. 2.24e), e devido às tensões residuais causadas pelo alívio na região do

contato. No descarregamento completo (Fig. 2.24f), as trincas laterais prosseguem até a superfície livre. As trincas laterais podem levar diretamente ao desgaste (Lawn; Swain,1975).

Buijs e Korpel-van Houten (1993a; 1993b) estudaram os mecanismos de desgaste na lapidação de vidros ópticos. A análise da topografia das superfícies ensaiadas mostrou que grande parte do material removido se deve a ocorrência de indentações, que foram relacionadas à propagação de trincas laterais subsuperficiais. A base do modelo matemático que esses autores apresentam está relacionada à formação das trincas laterais, que foram extensivamente estudadas em experimentos de indentação quase estática. A remoção de material ocorre tanto pelo destacamento devido ao trincamento lateral, quanto pelo coalescimento de múltiplas trincas laterais não destacadas (Buijs; Korpel-van Houten, 1993a; 1993b).

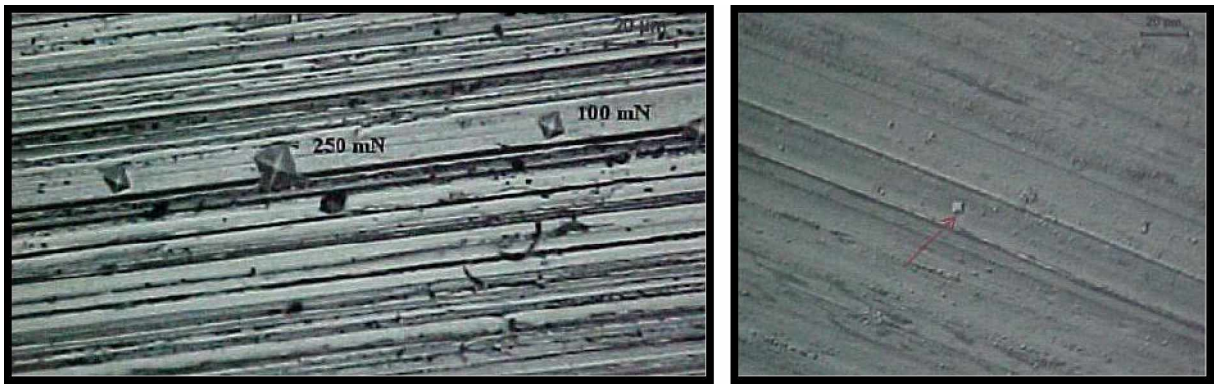
A indentação de uma partícula angulosa deforma a superfície da amostra elastoplasticamente, produzindo uma zona plástica com a presença de tensões residuais de tração, a qual gera e propaga a trinca lateral quando descarregado. Existe um valor limite para as tensões geradas no descarregamento da zona plástica; se esse valor for ultrapassado ocorre a geração de trincas laterais. Essas trincas laterais podem se propagar, com o tempo, até a superfície, levando ao destacamento do material. Esse fato sugere que, nesse sistema, uma única indentação pode remover material. A carga por partícula é um parâmetro importante para o modelo desse sistema de desgaste. A repetição e superposição de eventos afetam no sentido de diminuir a tensão limite, ou seja, contribuem para gerar e propagar trincas laterais (Buijs; Korpel-van Houten, 1993a; 1993b).

Em um trabalho recente, Hutchings (1992a) mostrou um mapa da resposta de materiais cerâmicos ao desgaste abrasivo em função da força normal exercida em cada partícula, e do diâmetro da partícula, ou curvatura de contato equivalente. Na região onde o comportamento ao desgaste é determinado por fraturas, a tenacidade à fratura tem um importante papel no controle da resistência ao desgaste.

Nesta tese foi assumido que a dinâmica da partícula atuante define o mecanismo de desgaste na abrasão. O deslizamento da partícula entre as superfícies móveis leva aos mecanismos microcorte, microsulcamento ou microtrincamento. O rolamento da partícula resulta no mecanismo de indentação, que também pode ter caráter frágil. Dessa forma, definem-se dois modos de desgaste em função da dinâmica da partícula: o rolamento e o deslizamento das partículas.

2.4 Simulação do desgaste abrasivo

Pintaúde (2002) estudou a correlação entre a rugosidade da superfície desgastada e a profundidade média dos eventos encontrados na abrasão (nesse trabalho microsulcamento e microcorte). Esse autor realizou análises sobre parâmetros de rugosidade aplicáveis para a descrição da superfície desgastada, e usou o parâmetro de amplitude conhecido como tamanho máximo do perfil, ou Rz, para definir a profundidade de penetração das impressões resultantes da abrasão. Essa informação permitiu o cálculo da força de penetração correspondente aos eventos do desgaste característicos de cada regime. A Fig. 2.25 mostra duas situações onde foram analisadas essas impressões.



-a- -b-

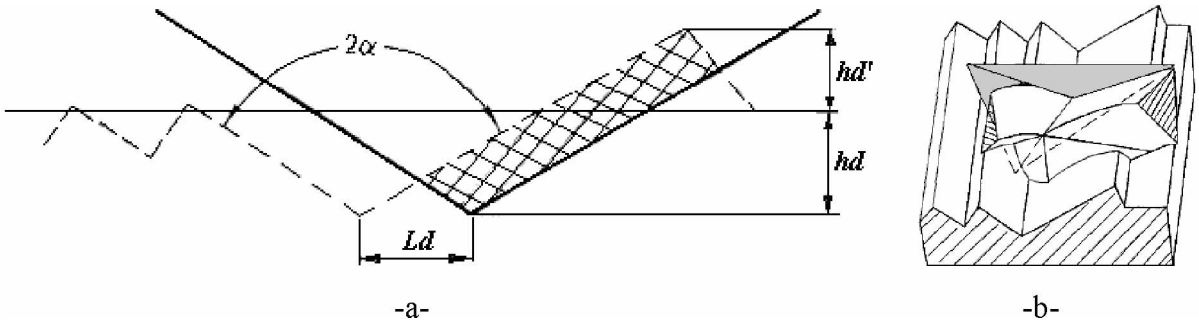
Figura 2.25 - Superfície desgastada do a- aço AISI 1006 e lixa de alumina (600 mesh) e b- aço AISI 52100 e lixa de vidro (80 mesh) (Pintaúde, 2002).

Na metodologia adotada por Pintaúde (2002) a rugosidade fornece informação sobre a força de penetração dos eventos, que, em conjunto com a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito, compõe a análise do regime de desgaste. Utilizando a força de penetração, esse autor definiu o parâmetro dureza verdadeira, como característica do sistema de desgaste, e relacionou este parâmetro com a severidade do desgaste abrasivo.

A dureza verdadeira, encontrada a partir da análise da rugosidade obtida na abrasão, permite a análise do comportamento do desgaste de diferentes materiais (Pintaúde, 2002).

Outra idéia interessante foi exposta no trabalho de Williams e Xie (Williams; Xie, 1992; Williams, 1999), que estudaram a geração de superfícies de desgaste via interação de sulcos paralelos. Esses autores utilizaram um equipamento que interage um indentador sobre uma amostra cilíndrica, com um movimento simultâneo de rotação da amostra e translação do indentador. O espaçamento entre os deslizamentos é controlado com precisão e define o passo

do movimento, ou seja, a distância entre os deslizamentos Ld. A Fig. 2.26 mostra o esquema dos deslizamentos paralelos.



-a- -b-

Figura 2.26 - Esquema do deslizamento paralelo (Williams; Xie, 1992).

O indentador usado é piramidal de base quadrada com ângulo entre arestas 2α, como mostrado no esquema da Fig. 2.26a. Esse indentador tem um raio de ponta definido de 10 μm e a direção de deslizamento é na sua diagonal. O esquema mostra a profundidade do deslizamento hd e a altura do material deformado hd' (Williams; Xie, 1992).

Inicialmente esses autores mapearam os mecanismos de desgaste em deslizamentos isolados. Mostraram que o regime misto de microsulcamento e microcorte inicia-se no ângulo de ataque, ψ, de 32° (2α=116°) e o regime estável de microcorte é atingido a 44° (2α=92°). Ou seja, observa-se a transição microsulcamento, regime misto e microcorte em função do ângulo de ataque (Williams; Xie, 1992).

Quando o espaçamento entre deslizamentos (Ld) diminui, e o material deformado de um deslizamento passa a interferir no deslizamento seguinte (Fig. 2.26), o mecanismo de desgaste muda. A Fig. 2.27 mostra o mapeamento dos mecanismos de desgaste considerando o espaçamento lateral (Williams; Xie, 1992).

Observa-se, na Fig. 2.27, que a superposição dos deslizamentos favorece a ocorrência do regime misto (microsulcamento+microcorte). O esquema da Fig. 2.26a mostra que a área de material que se deforma durante o deslizamento com Ld pequeno é bem diferente da área de atuação quando a superfície é plana e o deslizamento isolado. O indentador interage também com o material deformado do deslizamento anterior (Williams; Xie, 1992).

O gráfico da Fig. 2.27 mostra também a curva definida no modelo matemático que estes autores idealizaram (Williams; Xie, 1992; Williams, 1999). Usando esse modelo foi possível definir, aproximadamente, os campos onde ocorrem o microsulcamento puro e o regime misto (microsulcamento + microcorte).

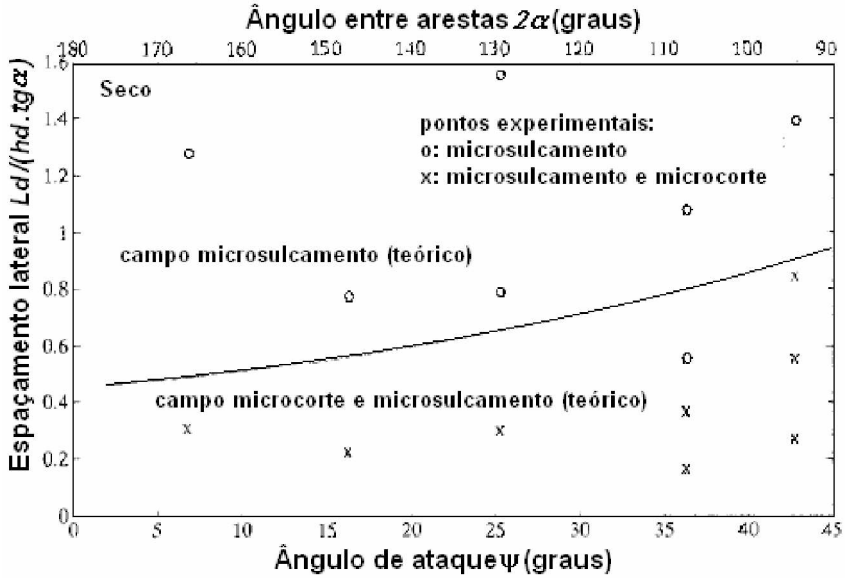


Figura 2.27 - Diagrama de mecanismos de desgaste para deslizamentos paralelos sobre a superfície de cobre na condição a seco. (Williams; Xie, 1992).

Williams e Xie (1992) discutem que, em deslizamentos paralelos e com espaçamento pequeno, a remoção de matéria por microsulcamento pode ocorrer mesmo a pequenos ângulos de ataque. No deslizamento isolado, sobre superfícies planas, somente grandes ângulos de ataque levam a remoção efetiva de matéria. Esse fenômeno ajuda a entender porque ocorre perda de massa na abrasão com partículas com pequenos ângulos de ataque, ou seja, que tendem ao formato esférico.

2.5 Nova abordagem para simulação do desgaste abrasivo

A proposta de uma nova abordagem para simulação do desgaste abrasivo consiste em realizar uma seqüência de deslizamentos e/ou indentações (eventos) sobre a superfície de uma amostra.

O fluxograma apresentado na Fig. 2.28 ilustra a idéia dessa nova abordagem.

Assim como no trabalho de Pintaúde (2002), a topografia de uma superfície abrasonada é a referência da simulação. Além dos parâmetros de rugosidade, é observada a ocorrência de rolamento ou deslizamento da partícula abrasiva, ou seja, se houve o predomínio de indentações ou de riscos/sulcos.

O rolamento das partículas é simulado através de uma seqüência de indentações, assim como o deslizamento da partícula é simulado por uma seqüência de riscos/sulcos. De acordo com a referência, define-se a configuração da simulação, que pode ser somente indentações

ou uma mistura de indentações e riscos/sulcos. É possível controlar a posição dos eventos e, no caso de riscos/sulcos, a sua direção.

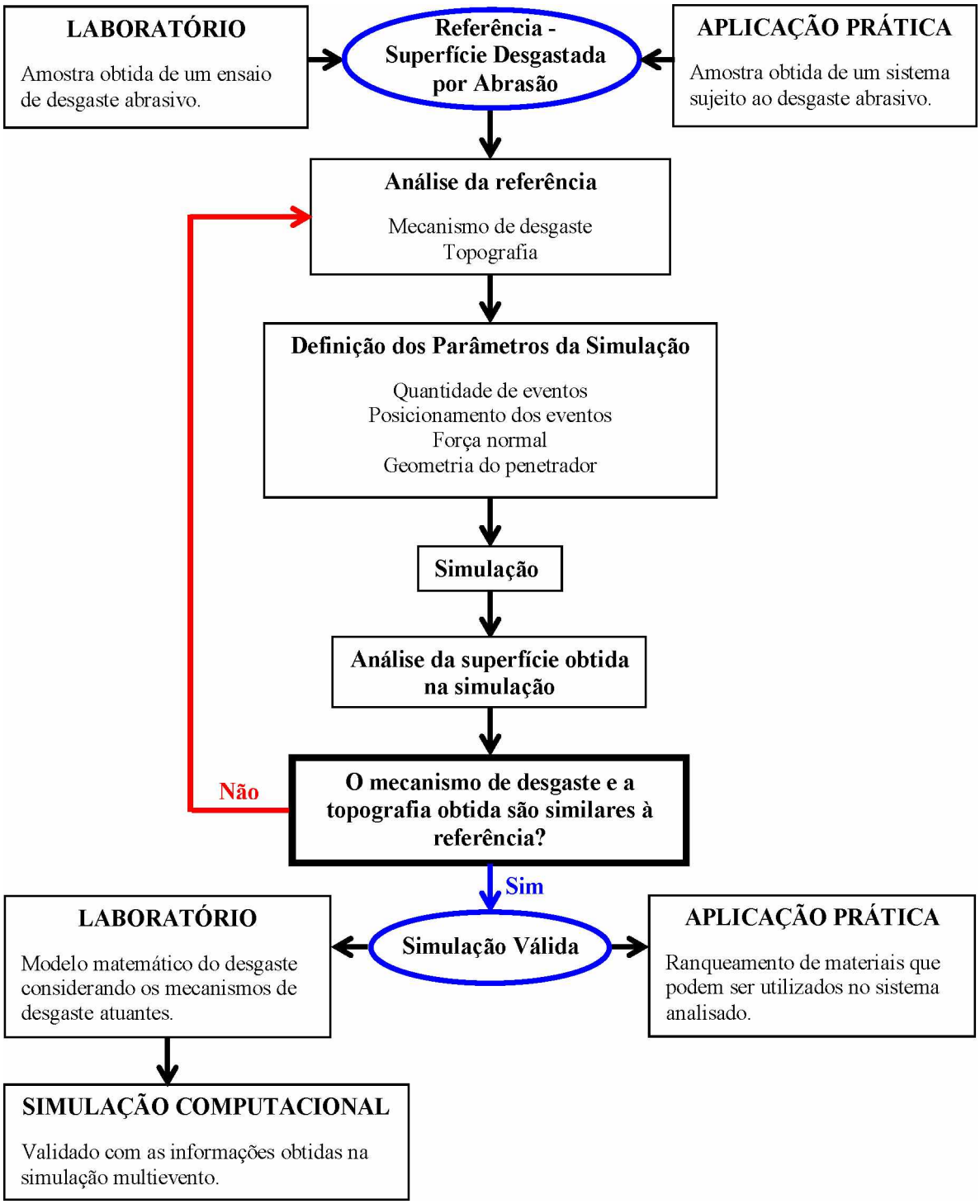


Figura 2.28 - Fluxograma do processo de simulação do desgaste abrasivo.

Da análise quantitativa da topografia da referência, obtêm-se as informações sobre a intensidade de cada evento da simulação. A análise de parâmetros de rugosidade define a profundidade ou a força normal dos eventos. A seqüência de eventos sobrepostos altera a

superfície da amostra, de forma que reproduza o mecanismo de desgaste observado na referência. A simulação é considerada válida ao se constatar a semelhança topográfica e morfológica entre a superfície produzida na simulação e a referência; caso contrário os parâmetros de simulação são redefinidos.

Em síntese, a principal informação de entrada é a topografia da superfície a ser simulada. Analisando essa referência definem-se os parâmetros da simulação. Constatando a validade da simulação, obtêm-se as principais informações de saída: a taxa de desgaste, que pode ser medida pela variação de massa, ou volumétrica; e a rugosidade. Estas informações permitem o ranqueamento de materiais para aplicação em uma determinada situação tribológica.

O ensaio de simulação guarda informações sobre as forças decorrentes da interação dos eventos. O conhecimento do posicionamento exato do evento, das forças e das profundidades associadas à interação da partícula com a superfície abre caminho para a idealização e realização da simulação computacional do desgaste abrasivo.

2.6 Representação da dinâmica da partícula.

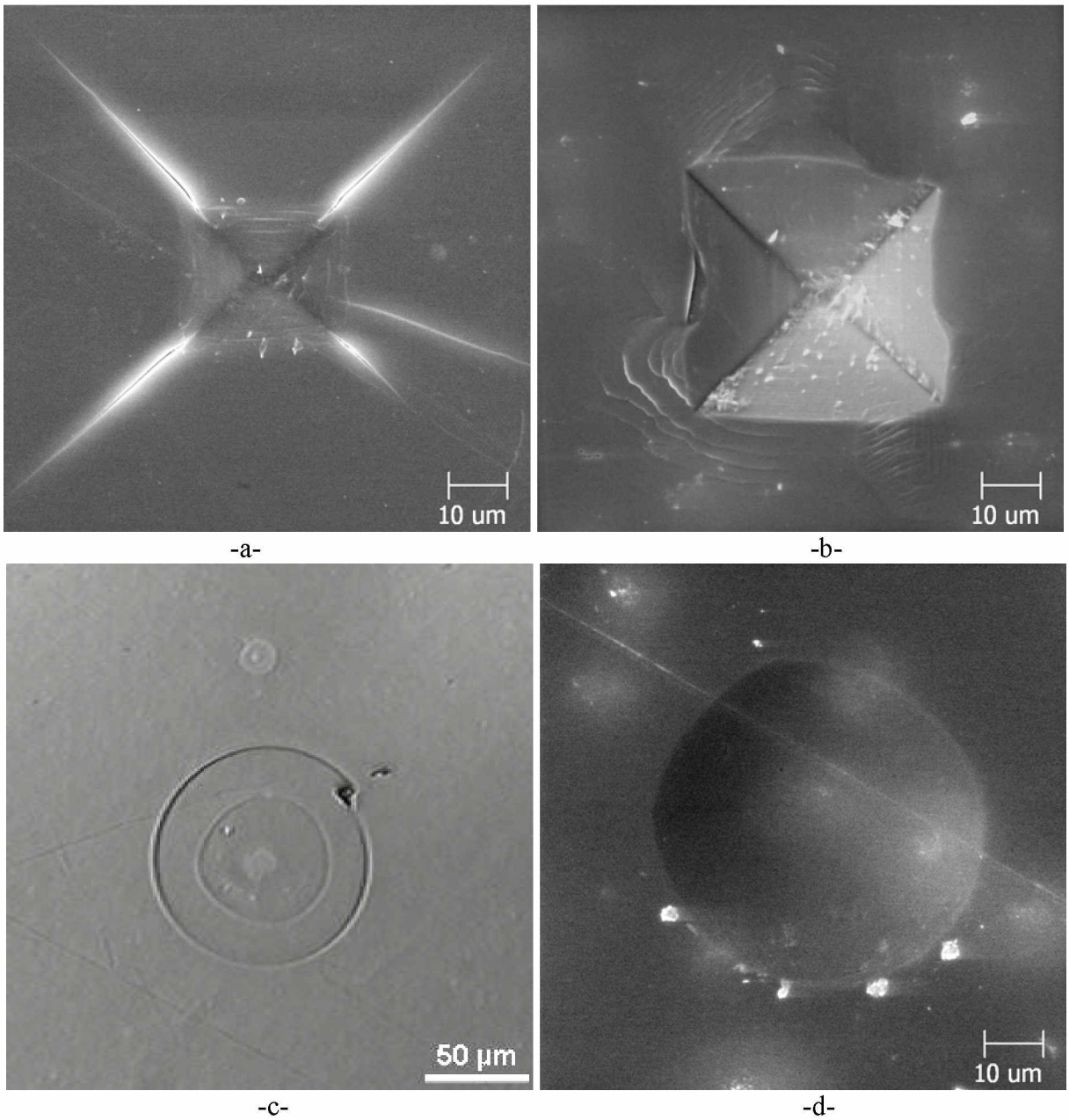
A nova abordagem para a simulação se baseia na representação da dinâmica da partícula abrasiva. Analisando somente a superfície desgastada, a indentação representa o contato de uma partícula que rola durante o processo abrasivo e um risco/sulco representa o deslizamento de uma partícula na interface de desgaste. Dessa forma, o desgaste abrasivo é entendido como uma seqüência de eventos.

Na abordagem local do estudo do desgaste abrasivo a partícula é representada por um indentador de geometria definida. A velocidade de aplicação da força e de movimentação da amostra é controlada para permitir o fluxo plástico do material.

Foi definido que indentação é a interação entre a partícula e a superfície sem movimento lateral, causando deformação localizada e/ou fragilização. Exemplos de indentações produzidas em laboratório são mostrados na Fig. 2.29.

Na indentação usando indentador Vickers mostrada na Fig. 2.29a observa-se a ocorrência de trincas laterais (Fig. 2.21) na amostra de vidro. Essas trincas são características de comportamento frágil. A indentação Vickers no aço 1010, com a mesma carga, apresentou comportamento dútil, caracterizado pelo acumulo de material deformado na borda da impressão – empilhamento. Observa-se, na amostra de aço 1010 (Fig. 2.29c), que a mudança

de forma do indentador manteve o regime dútil, porém é nítida a diferença no comportamento mais uniforme da deformação na borda da impressão. Os vértices do indentador Vickers são elementos de forte concentração de tensão, o que explica a intensa deformação, Fig. 2.29b, e a ocorrência de trincas nessa região, Fig. 2.29a.



-a- -b-

-c- -d-

Figura 2.29 - Indentações em laboratório: a- Vidro, força normal 2,9 N, Vickers, MEV; b- Aço 1010, força normal 2,9 N, Vickers, MEV; c- Vidro, força normal 14,7 N, Rockwell C, MO; d- Aço 1010, força normal 2 N, Rockwell C, MEV.

A Fig. 2.29c mostra a marca de um indentador Rockwell C em contato com o Vidro sodo-cálcico. Observa-se a formação de uma trinca circular concêntrica ao ponto de contato

do indentador. Esse tipo de trinca é característico do comportamento frágil. A indentação usando Rockwell C no aço 1010 é característica do regime dútil. As deformações plásticas são de sentido radial devido ao formato cônico do indentador, e não se concentram como no caso mostrado na Fig.2.29b.

A Fig. 2.30 mostra o resultado do deslizamento controlado de um indentador sobre uma amostra de vidro comum. As setas indicam o sentido do deslizamento.

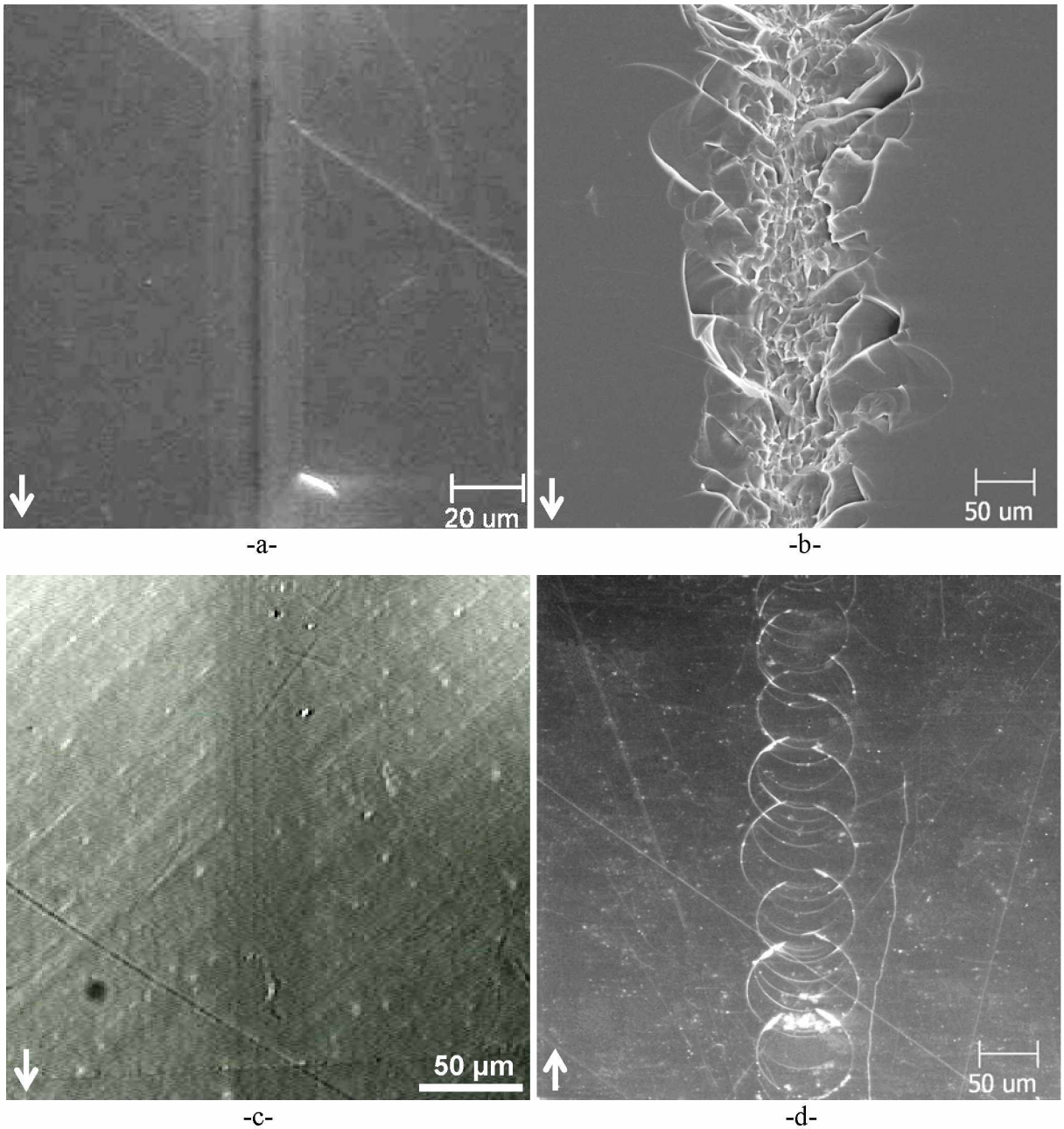
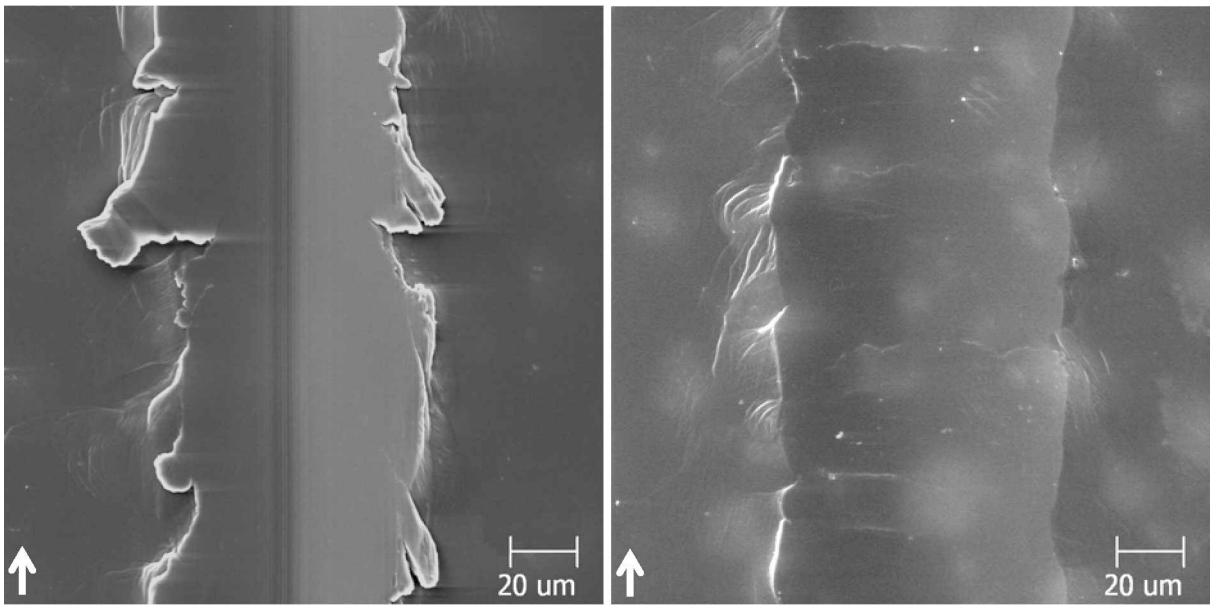


Figura 2.30 - Deslizamentos em laboratório: Vidro; a- força normal 1 N, Vickers, MEV; b- força normal 2,9 N, Vickers, MEV; c- Vidro, força normal 2,5 N, Rockwell C, MO; d- força normal 9,8 N, Rockwell C, MEV.

A variação da força normal no deslizamento do indentador Vickers sobre a amostra de vidro levou a transição de comportamento dútil, Fig. 2.30a, para frágil, Fig. 2.30b. A intensa propagação de trincas e fratura do material é característica de regime frágil. A mesma transição pode ser observada na atuação do indentador Rockwell C. A Fig. 2.30c mostra o comportamento dútil e a Fig. 2.30d apresenta o comportamento frágil do vidro. Nesta última observa-se a formação de trincas Hertzianas no sentido do deslizamento.

A Fig. 2.31 compara o resultado do deslizamento usando diferentes indentadores sobre o aço 1010.



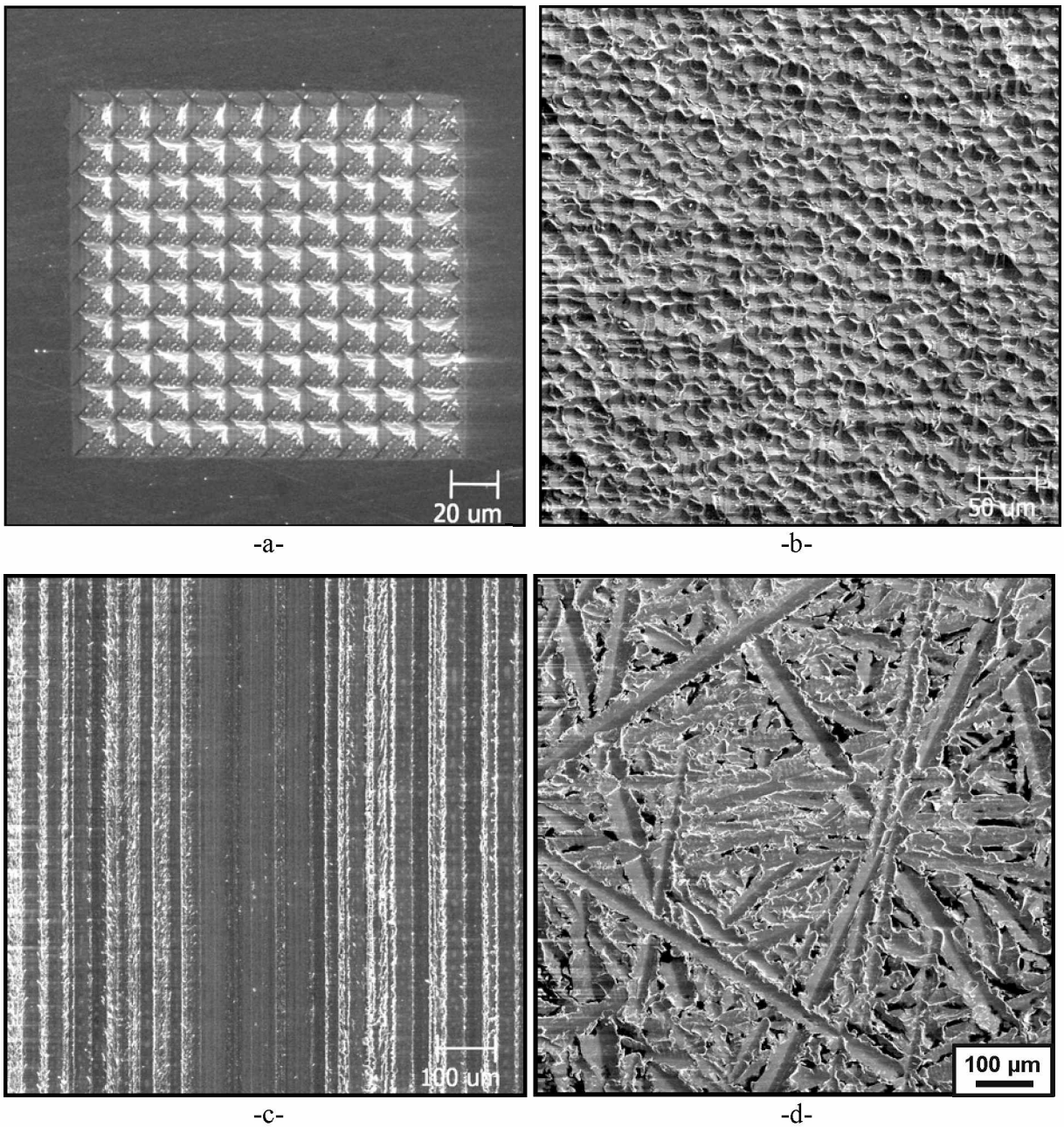
-a- -b-

Figura 2.31 - Deslizamentos em laboratório; Aço 1010; força normal 2,9 N; a-, Vickers; b- Rockwell C. MEV.

A Fig. 2.31 mostra que o deslizamento no aço 1010 se comporta de maneira dútil independentemente da forma do indentador. Observa-se que o mecanismo é diferente, com o indentador Vickers ocorreu um mecanismo entre o microcorte e o microsulcamento, como explicado na Fig. 2.16b. Esse mecanismo se manifesta pela presença de material deformado na borda da impressão, mas com tendência ao destacamento irregular. Utilizando o indentador Rockwell C não são observados os destacamentos de material, o que caracteriza o microsulcamento puro (Fig. 2.31b).

A simulação apresentada no tópico 2.4.1 provoca a interação entre eventos. A Fig. 2.32 mostra o resultado da simulação no aço ferramenta em diferentes condições.

A Fig. 2.32a mostra a interação de 100 indentações sobrepostas de 20% em relação à área de cada evento, ou seja, a deformação de um evento cobre parcialmente os eventos anteriores. Na Fig. 2.32b está apresentada a topografia resultante de 5000 indentações de força normal constante, usando indentador Vickers, dentro de uma área de 0,4 x 0,4 mm. Observa-se que o caráter aleatório do posicionamento dos eventos levou a superposição heterogênea dos eventos.



-a- -b-

-c- -d-

Figura 2.32 – Interações entre eventos, amostra de aço ferramenta. a- indentações eqüidistantes, 100 eventos, 20% de superposição, 2,3 N. b- indentações em posições aleatórias, 5000 eventos de 0,35 N. c- deslizamentos paralelos, 1000 eventos, área 1 x 1,3 mm; d- deslizamentos aleatório, 2700 eventos, área 2 x 2 mm. MEV.

A Fig. 2.32c mostra uma seqüência de deslizamentos paralelos. A simulação permite a interação entre deslizamentos paralelos controlando a distância entre os eventos. O deslizamento aleatório está mostrado na Fig. 2.32d. Observa-se que o controle da direção dos eventos de deslizamento tem forte influência na morfologia resultante.

O estudo da superposição dos eventos é importante tanto no caso de indentações quanto no caso de deslizamento, pois define a profundidade média dos eventos superpostos em função do percentual de superposição e da força normal. O método usado para a realização desse estudo será detalhado no capítulo 4.

2.7 Objetivos

O objetivo deste doutorado é estabelecer uma metodologia capaz de simular, experimentalmente, o desgaste abrasivo. Em tese, uma superfície desgastada por abrasão é decorrente da atuação dos abrasivos que geram eventos na superfície continuamente, alterando sua topografia e levando a perda de matéria. A metodologia proposta consiste em executar, sobre a superfície de uma amostra, uma sequência de eventos controladamente, que sobrepostos, reproduzam o mecanismo de desgaste observado na superfície que se pretende simular (referência). Uma vez delineados os parâmetros da simulação que melhor reproduzam o mecanismo de desgaste abrasivo observado na referência, a simulação pode ser utilizada para avaliar o desgaste decorrente da condição tribológica que gerou a referência. Em laboratório, os dados obtidos na simulação permitem a elaboração de um modelo cumputacional do desgaste abrasivo.

CAPITULO III

3 INSTRUMENTOS E MÉTODOS

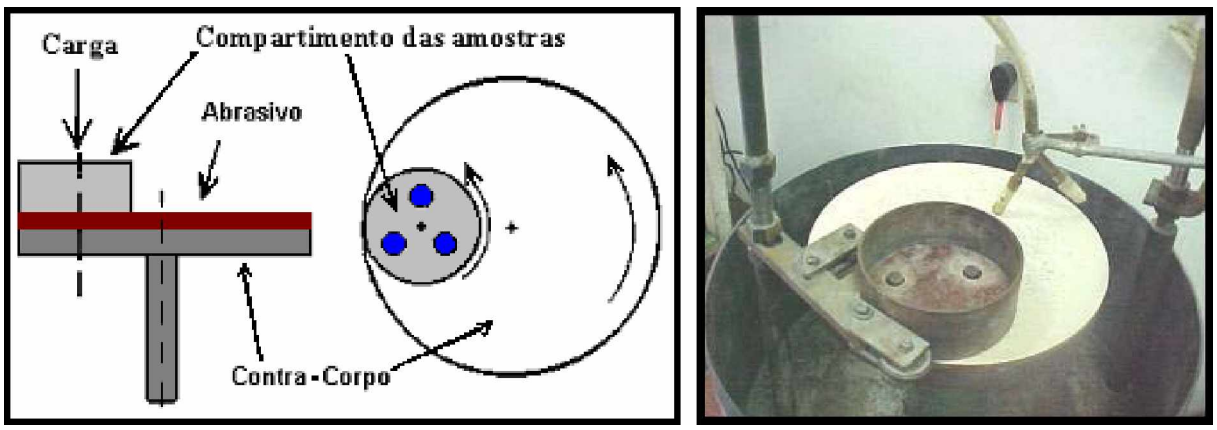
3.1 Ensaios de desgaste abrasivo

Na abordagem global do estudo da abrasão são possíveis diversas configurações de ensaios que reproduzem o desgaste abrasivo. O equipamento laboratorial usado na avaliação da resistência a abrasão é chamado abrasômetro. Nesses ensaios as partículas têm características de forma, dureza e tamanho conhecidas. A dinâmica do sistema, ou seja, o movimento das superfícies da amostra e do contra-corpo, com o abrasivo na interface, leva a mecanismos bem definidos. Alguns abrasômetros possuem sensores que medem a força de atrito associada à abrasão durante o ensaio.

Segue a descrição dos abrasômetros utilizados nessa tese.

- **abrasômetro LTM**

A Fig. 3.1 mostra o esquema de funcionamento do abrasômetro LTM (Costa; de Mello, 2001).



-a- -b-

Figura 3.1 - Abrasômetro LTM. a- Esquema; b- Equipamento (Costa; de Mello, 2001).

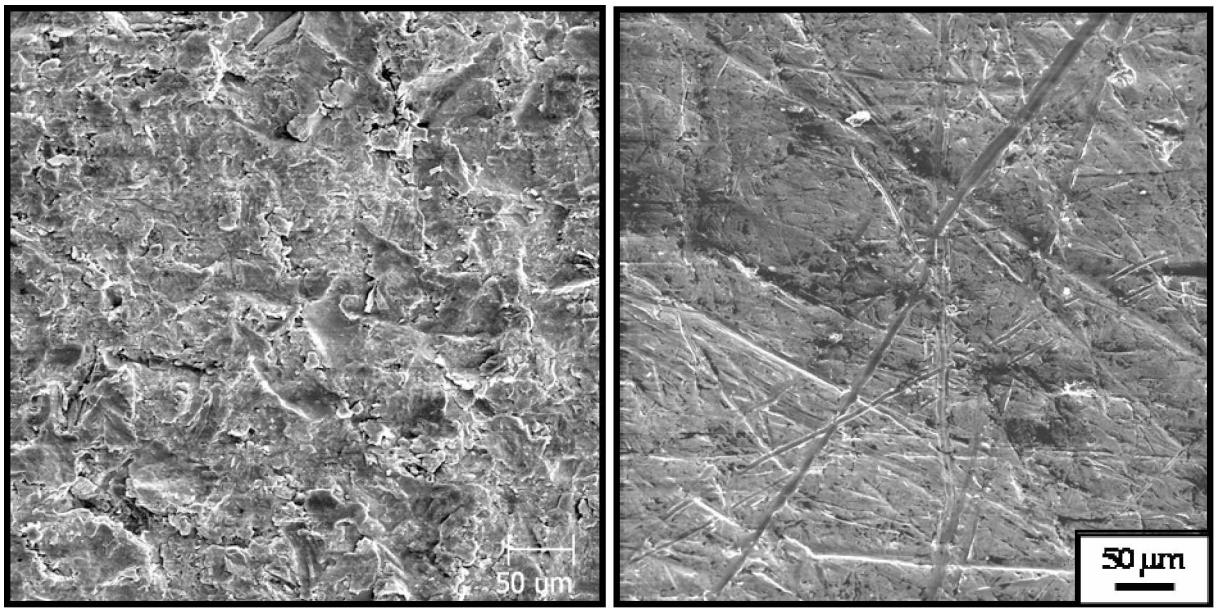
Nesse abrasômetro são testadas três amostras ao mesmo tempo, posicionadas em um compartimento, e sob a ação de um peso conhecido. O contra-corpo (disco) movimenta-se através de um motor elétrico que gira a 35 rpm. O movimento do contra-corpo faz com que o compartimento das amostras gire em relação ao contra-corpo, como indicado na Fig.3.1a.

Foram utilizados dois materiais distintos como contra-corpo: ferro fundido branco (ASTM 532IIIA) temperado e revenido a 250° C por 1h, dureza 751HV e borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore A.

O sistema é alimentado por um fluxo contínuo e uniforme de abrasivo, de modo que a rotação do contra-corpo garanta a renovação do abrasivo na interface de contato. O ensaio pode ser realizado a seco ou úmido.

A quantificação do desgaste é obtida através da determinação da variação da massa da amostra.

Na Fig. 3.2 são mostrados exemplos de superfícies desgastadas no abrasômetro LTM em amostras de aço ferramenta.



-a- -b-

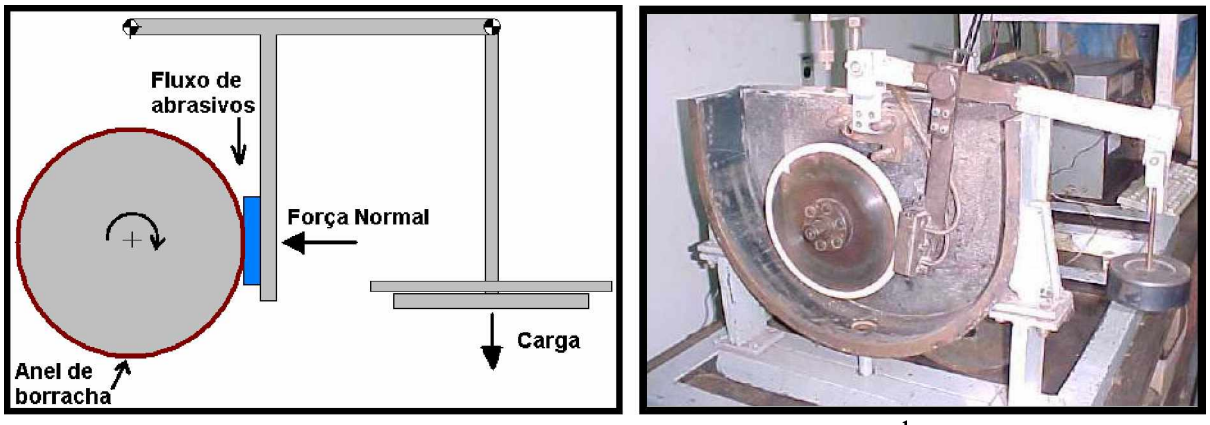
Figura 3.2 - Topografias obtidas no abrasômetro LTM. a- Força normal: 9,25 N, abrasivo: areia normal brasileira número 50 (peneira 0,3 a 0,6 mm), contra-corpo: ferro fundido; b- Força normal: 6,94 N, abrasivo: areia normal brasileira número 30 (peneira 0.6 a 1.2 mm), contra-corpo: borracha. MEV.

A dinâmica deste ensaio de desgaste favorece o rolamento das partículas abrasivas (Fig. 3.2a). Entretanto, para cargas mais altas e contra-corpo de borracha, obtém-se um

regime misto onde o abrasivo rola ou desliza (Fig. 3.2b). Os eventos gerados neste ensaio não possuem tendência ao direcionamento.

- **abrasômetro roda de borracha**

O esquema apresentado na Fig. 3.3 mostra o funcionamento do abrasômetro roda de borracha (ASTM G 65, 1991).



-a- -b-

Figura 3.3 - Abrasômetro roda de borracha. a- Esquema; b- Equipamento.

Nesse equipamento um motor de corrente contínua aciona o contra-corpo, que consiste de um disco metálico recoberto por um anel de borracha (estireno-butadieno - dureza 60 Shore A), como está mostrado na Fig. 3.3. A amostra é fixada a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força normal à amostra via peso morto. É possível a aplicação de altos níveis de carga sobre a amostra.

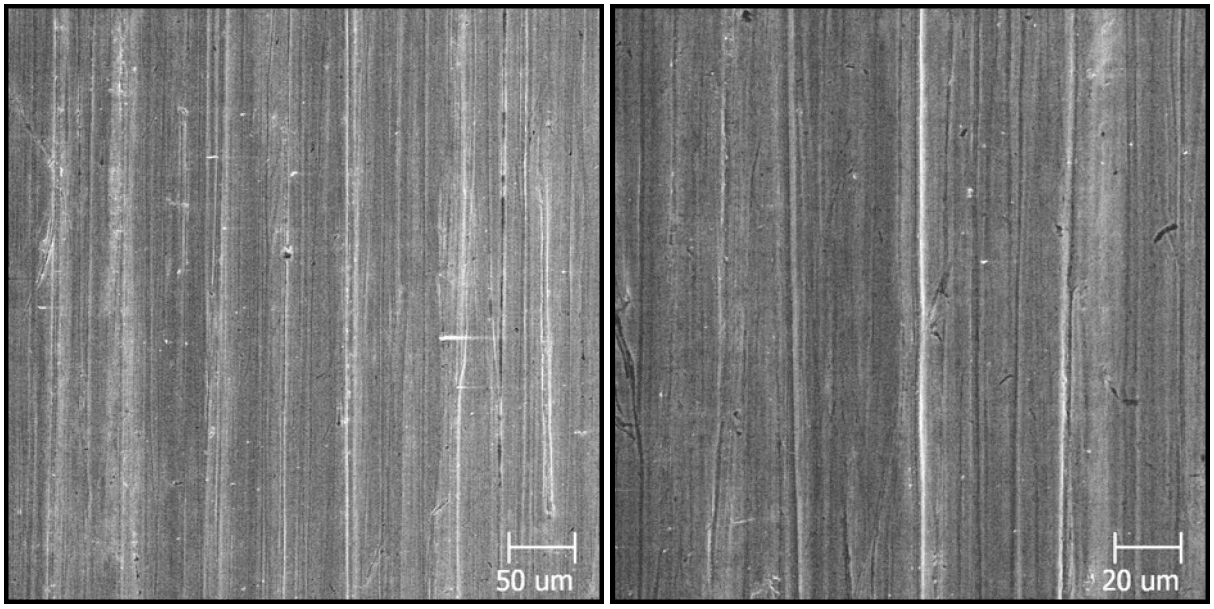
O fluxo de abrasivo escoa por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a presença de abrasivo novo durante a realização do ensaio de desgaste.

Um torquímetro está acoplado ao eixo do motor com a finalidade de medir o torque resultante da atuação da força de atrito sobre o eixo do contra-corpo. Assim, uma vez conhecido o diâmetro do contra-corpo, a força de atrito associada à abrasão pode ser medida.

O desgaste é quantificado através da determinação da variação da massa da amostra.

O resultado do ensaio roda de borracha está mostrado na Fig. 3.4, para uma amostra de aço ferramenta.

A configuração deste sistema, que permite a aplicação de alta carga e utilização de um contra-corpo com baixa dureza, promove o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. Os eventos resultantes da movimentação das partículas abrasivas apresentam um forte direcionamento de acordo com o movimento do contra-corpo.



-a- -b-

Figura 3.4 – Resultado de um ensaio roda de borracha. a- Força normal: 18,75 N, abrasivo: areia normal brasileira número 50 (peneira 0,3 a 0,6 mm), contra corpo: borracha; b- Ampliação. MEV.

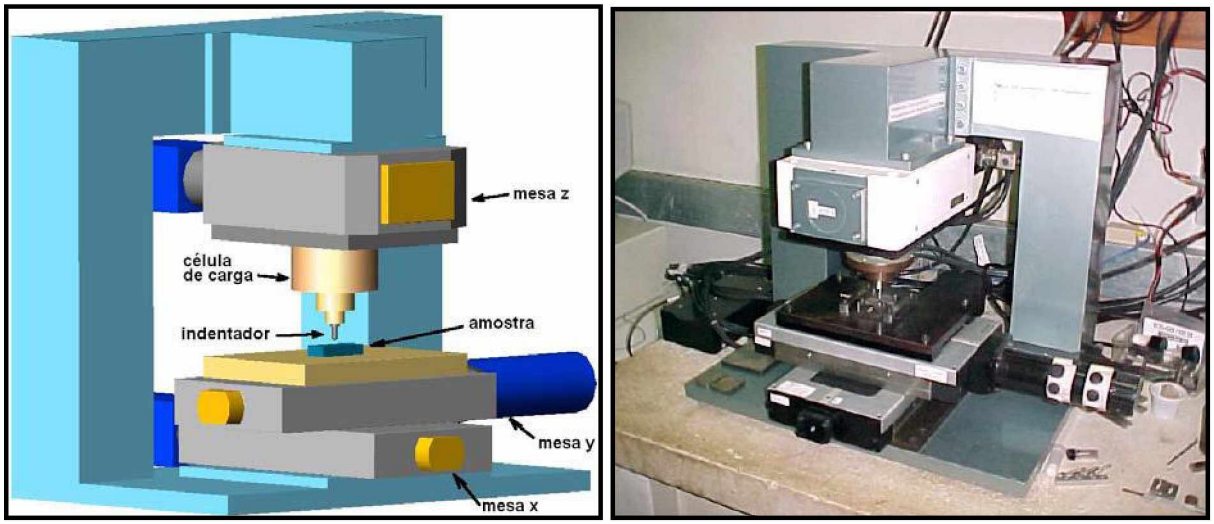
A nova abordagem para a simulação do desgaste abrasivo, apresentada nesta tese (tópico 2.5), parte da análise de uma superfície desgastada por abrasão. As topografias utilizadas como referência foram produzidas nos abrasômetros LTM e roda de borracha.

3.2 Simulação

A simulação foi executada utilizando dois equipamentos análogos, especialmente adaptados: macro-simulador e micro-simulador. Estes equipamentos promovem a movimentação controlada da amostra e do indentador. O macro-simulador está apresentado na Fig. 3.5.

Este equipamento é composto por três mesas coordenadas, que permitem o movimento da amostra no plano horizontal e o movimento do indentador no eixo vertical. Um dispositivo controlador gerencia a movimentação das mesas coordenadas. A comunicação entre o controlador das mesas e o computador se faz através de uma interface de barramento de propósito geral (GPIB), definida pelo padrão ANSI/IEEE 488.2. Trata-se de uma interface paralela digital de 8 bits.

As informações acerca dos componentes que compõem o macro-simulador são apresentadas na tabela 3.1.



-a- -b-

Figura 3.5 - Macro-simulador. a- Esquema; b-Equipamento.

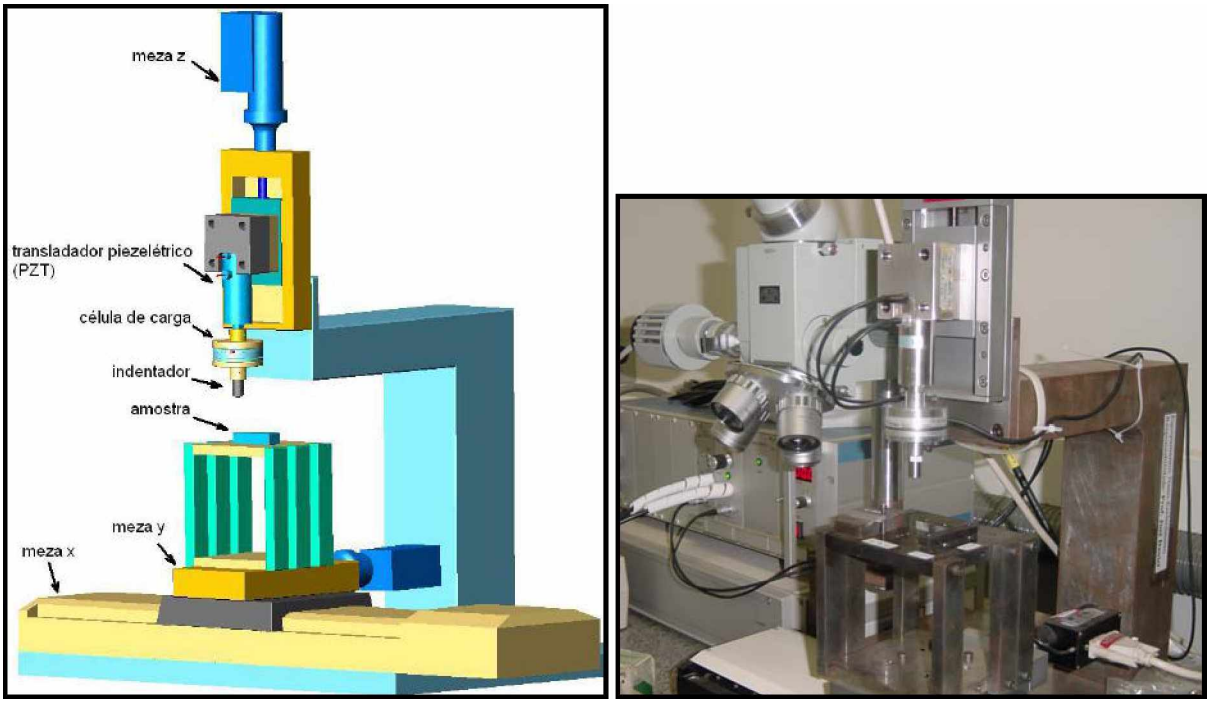
Tabela 3.1 – Componentes do sistema macro-simulador.

Componente	**Resolução**	**Fabricante**	**Modelo**	**Interface**
Mesa x	0,1 μm	Newport	MT160 - motor UE72pp	
Mesa y	1 μm	Newport	MT160 - motor UE511cc	
Mesa z	10 μm	Newport	MT160 - motor UE71pp	
Controlador das mesas		Newport	MM4000	Digital GPIB
Célula de carga	0,35 N 500 N (FE)	Kyowa	LSM-50KBS	Analógica AD/DA

A interação entre o indentador e a superfície da amostra produz um evento, indentação ou deslizamento. Os esforços atuantes são monitorados por uma célula de carga tridimensional, que, associada ao sistema de movimentação, permite o controle da força exercida durante a execução de cada evento. A resposta da célula de carga é um sinal analógico, que é lido via interface analógica-digital. O sistema de aquisição de força foi calibrado para um fundo de escala de 200 N. As tabelas e curvas de calibração da célula de carga do macro-simulador são apresentadas no ANEXO I.

O micro-simulador está apresentado na Fig. 3.6.

Análogo ao macro-simulador, esse equipamento é composto por três mesas coordenadas de alta precisão, que permitem o movimento da amostra no plano horizontal e o movimento do indentador no eixo vertical. O movimento das mesas é coordenado através de um controlador que possui interface digital com o computador (GPIB).



-a- -b-

Figura 3.6 - a- Esquema do micro-simulador; b- Equipamento.

Além da mesa z, o movimento do indentador está associado a um sistema de translação piezelétrico (PZT) que movimenta unidirecionalmente por um percurso de 40 μm com resolução de 5 nm. A comunicação entre o transladador piezelétrico e o computador é via interface analógica-digital. A tabela e curva de calibração do transladador piezelétrico está apresentado no ANEXO II.

Na tabela 3.2 estão listados os componentes que compõem o micro-simulador.

Tabela 3.2 - Componentes do micro-simulador.

Componentes	**Resolução**	**Fabricante**	**Modelo**	**Interface**
Mesa x	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-535.22	
Mesa y	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-150.11	
Mesa z	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-150.11	
Controlador das mesas		Physik Intrumente	C804	Digital GPIB
Transladador Piezelétrico (PZT)	5 nm 40 μm (FE)	Physik Intrumente	P-239.40	
Controlador do PZT		Physik Intrumente	P267 – amplificador de 0-10 V para 0-1000 V	Analógica AD/DA
Célula de carga	0,001 N 18 N (FE)	ATI – Industrial Automation	Nano 43 F/T sensor	Analógica AD/DA

O micro-simulador é equipado com uma célula de carga tridimensional de alta resolução que opera no fundo de escala de 18 N. O sistema da célula de carga, composto de sensor, cabo de comunicação e placa de aquisição, é calibrado de fábrica. Essa célula de carga é rígida (piezoresistiva) e possui seis graus de liberdade, ou seja, mede os esforços e os momentos relativos às três direções.

Em relação ao macro-simulador, o micro-simulador trabalha em uma faixa de força menor. É mais preciso tanto no posicionamento do indentador quanto na medição das forças geradas no processo de interação.

3.3 Controle da simulação

O programa utilizado para controlar a movimentação da amostra e do indentador e para a aquisição das informações fornecidas pela célula de carga foi desenvolvido na plataforma LabView®, versão 8.0.

A simulação consiste de uma seqüência de eventos efetuados sobre a superfície da amostra, dentro de uma área pré-definida (área de trabalho).

3.3.1 - Definição da área de trabalho

Para a realização da simulação instrumentada define-se a área onde ocorrem os eventos como um quadrado de lado Lq. Essa área foi chamada de área de trabalho. A Fig. 3.7 mostra o esquema de como é feito o reconhecimento da superfície da amostra.

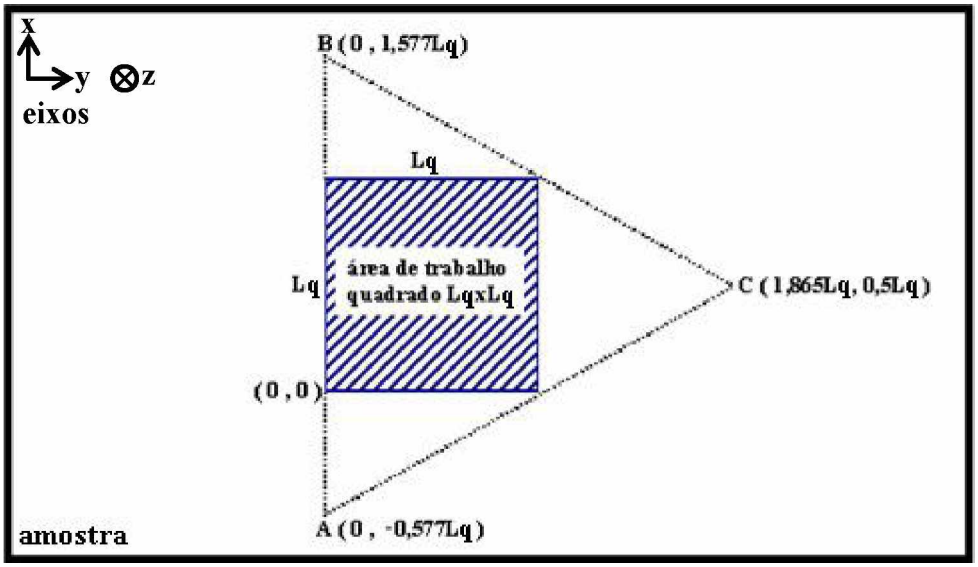


Figura 3.7 - Esquema do posicionamento da amostra para o reconhecimento da superfície.

A posição inferior esquerda da área de trabalho é definida como origem (0,0) do sistema de coordenadas usado para o posicionamento dos eventos. A amostra é movimentada para a posição -0,577Lq no sentido do eixo y (Fig. 3.7 - posição A), em seguida o eixo z se movimenta lentamente até o indentador tocar a superfície da amostra. Essa posição (x,y,z) é armazenada, e o indentador retorna até a posição zero no eixo z. Esse procedimento é repetido nas posições B e C (Fig. 3.7). Estes três pontos de referência permitem o cálculo da equação de um plano que representa a superfície da área de trabalho, uma vez que o triângulo formado pelos pontos A, B e C circunscreve esta área.

O reconhecimento prévio da superfície é utilizado para otimizar o tempo de execução dos eventos durante o processo de simulação. No deslizamento com profundidade constante o reconhecimento do plano da superfície da amostra permite o controle da profundidade efetiva ao longo do deslizamento.

3.3.2 - Geração das posições dos eventos

A posição dos eventos é representada por pares coordenados (x, y) que determinam a movimentação das mesas x e y. No caso de uma indentação define-se somente um par coordenado, que representa a posição da indentação. Para o deslizamento do indentador sobre a amostra definem-se duas posições: início e final do deslizamento.

Foi desenvolvida uma sub-rotina que gera números randômicos entre 0 e 1, segundo uma distribuição uniforme, com semente variável. A Fig. 3.8 mostra o algoritmo do programa que gera um par (x, y) aleatório.

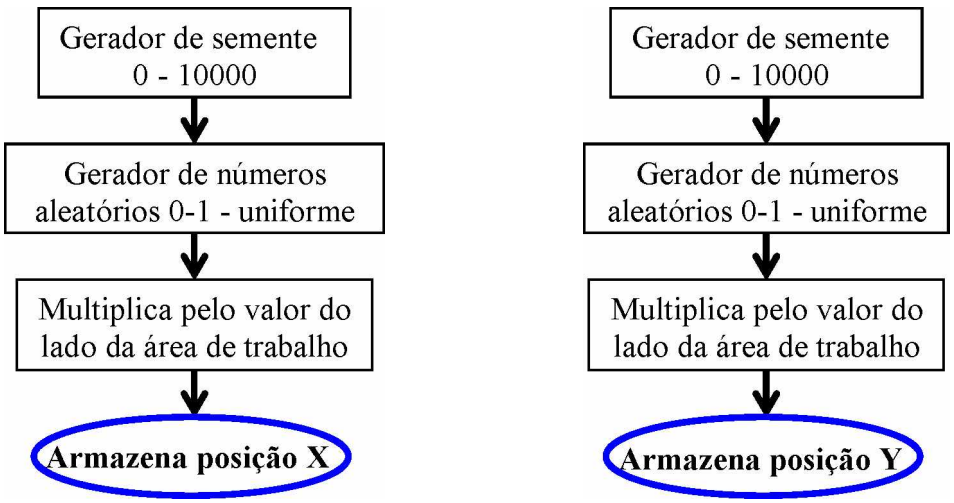


Figura 3.8 – Algoritmo da sub-rotina de geração das posições x e y.

Como mostrado no algoritmo da Fig. 3.8, ao multiplicar um número aleatório entre zero e um pelo valor do lado da área de trabalho obtém-se uma posição aleatória ao longo de um dos eixos. A repetição dessa sub-rotina produz as posições de todos os eventos na simulação.

Os geradores de semente e de números aleatórios são independentes para os valores de x e y. A semente é um número entre 0 e 10000 que alimenta o gerador de números aleatórios. A cada cinco números aleatórios gerados a semente é trocada. A Fig. 3.9 mostra um exemplo da distribuição de 5000 valores gerados aleatoriamente entre 0 e 1 alterando a semente do gerador.

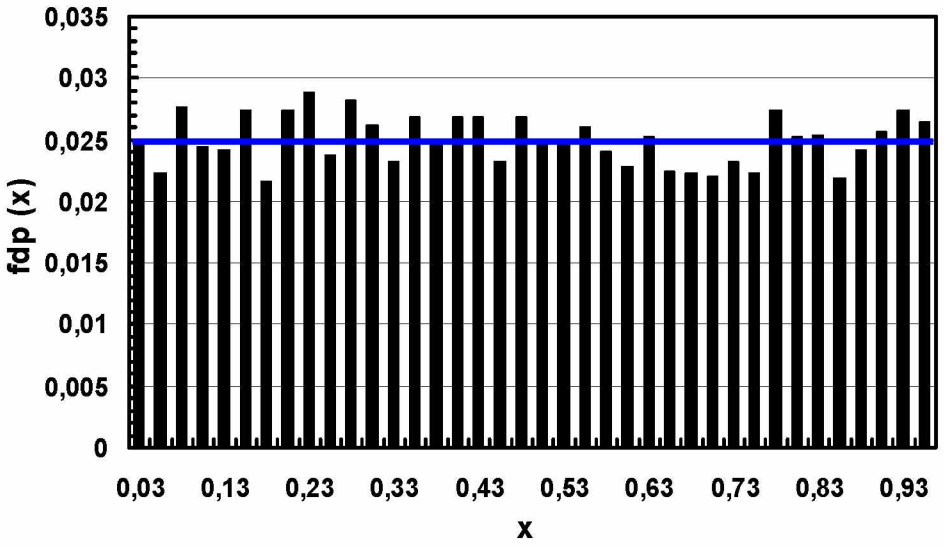


Figura 3.9 - Distribuição uniforme.

Observa-se que a distribuição dessa população tende a ser uniforme, onde a função densidade probabilidade (fdp) é representada por uma linha horizontal no intervalo analisado. Na distribuição uniforme cada intervalo de x tem praticamente a mesma probabilidade de ocorrência (Bendat; Piersol, 1986; Ferreira, 2005). No exemplo mostrado na Fig. 3.9, aumentando a população para milhões de pontos, a tendência é a fdp se aproximar da linha horizontal, em fdp(x) = 0,025, no intervalo de 0 a 1.

São possíveis cinco configurações para a distribuição dos eventos dentro da área de trabalho. A Fig. 3.10 mostra o esquema representativo da configuração indentação aleatória.

O posicionamento das indentações foi definido de acordo com o algoritmo mostrado na Fig.3.8. O caráter aleatório da definição do posicionamento das indentações faz com que existam regiões com maior concentração de eventos que outras (Fig. 3.10). Entretanto, o aumento da quantidade de eventos leva ao preenchimento da área de trabalho. A configuração mostrada no esquema da Fig. 3.10 representa a ocorrência de indentação múltipla.

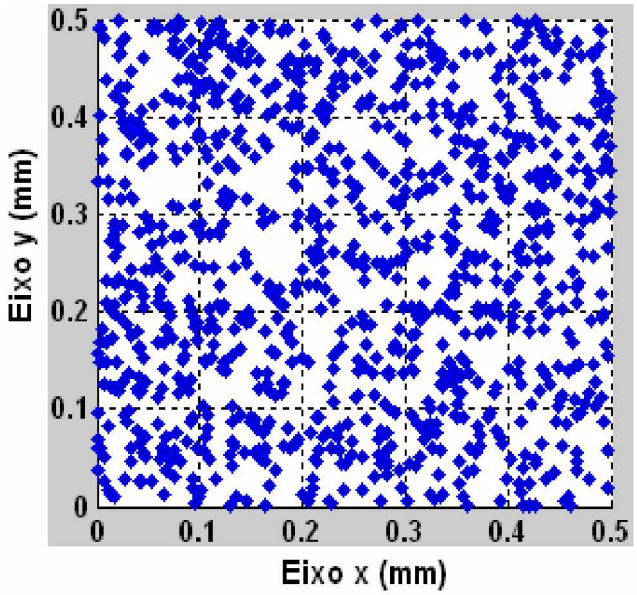


Figura 3.10 - Esquema do posicionamento dos eventos na configuração indentação aleatória.

A Fig. 3.11 apresenta a configuração deslizamento aleatório, impressa em uma área de trabalho de 0,5 x 0,5 mm.

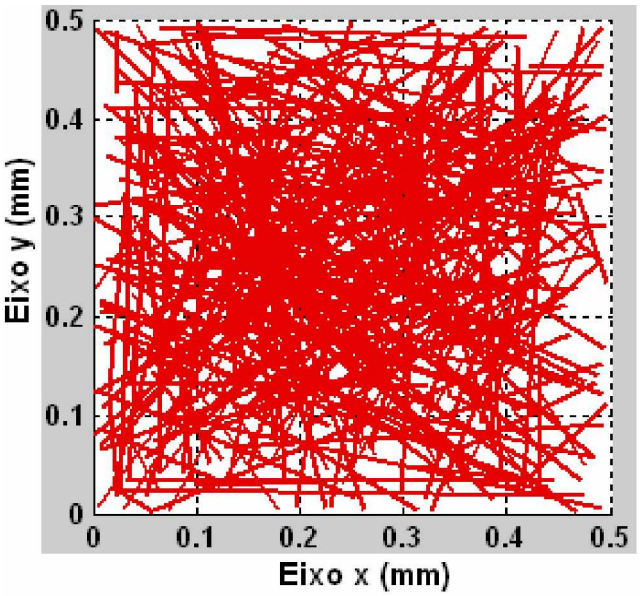


Figura 3.11 - Posicionamento dos eventos na configuração deslizamento aleatório.

Os pares coordenados referentes às posições de início e fim do risco são definidos aleatoriamente de acordo com o algoritmo mostrado na Fig. 3.8. Caso a distância entre as posições de início e fim do risco seja menor do que 5 μm são geradas novas posições. Nessa configuração também é observado que os eventos tendem a concentrar-se em algumas regiões. Quando se realiza um deslizamento diagonal, que é a maioria dos casos, a velocidade das mesas x e y são controladas de forma que a velocidade ao longo do risco seja constante e

definida, independentemente da direção de deslizamento. Essa configuração representa o deslizamento puro dos abrasivos sem direcionamento dos eventos.

O esquema da configuração deslizamento paralelo está apresentada na Fig. 3.12.

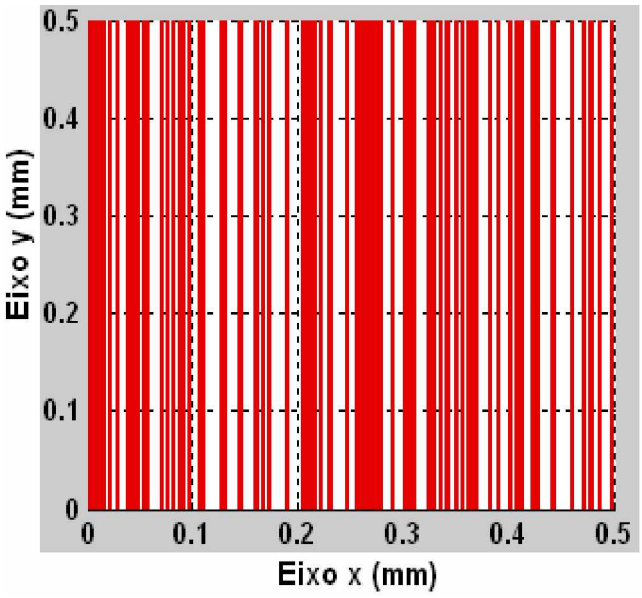


Figura 3.12 - Esquema do posicionamento dos eventos na configuração deslizamento paralelo.

Nessa configuração somente a posição do deslizamento ao longo do eixo x é aleatória. A simulação na configuração deslizamento paralelo representa o deslizamento puro dos abrasivos na interface de desgaste, com o direcionamento bem definido desse movimento.

A Fig. 3.13 mostra a configuração onde ocorre o deslizamento paralelo combinado com a indentação em posições aleatórias.

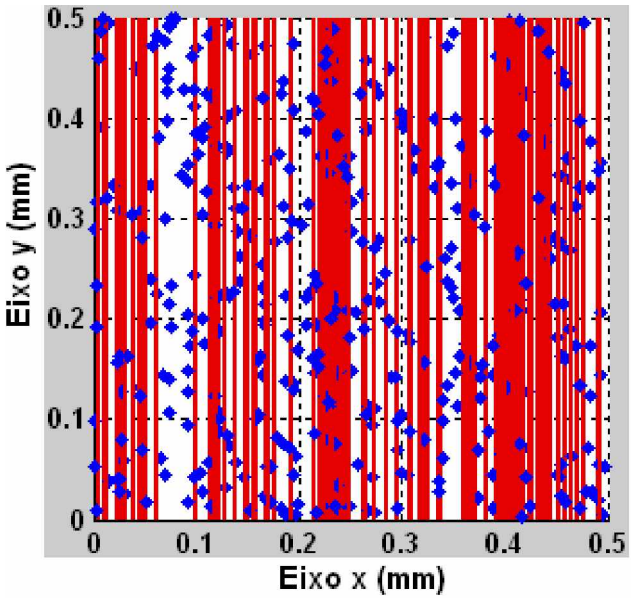


Figura 3.13 - Esquema da configuração deslizamento paralelo e indentação aleatória.

A ordem de ocorrência do deslizamento ou da indentação também é escolhida aleatoriamente. Nessa configuração controla-se a quantidade total de eventos a ser realizado e a proporção (%) de indentações. Essa configuração representa o regime de desgaste misto, onde ocorre o tanto o rolamento das partículas quanto o deslizamento com direcionamento bem definido no movimento das partículas abrasivas na interface de desgaste.

A combinação da configuração indentação aleatória com deslizamento aleatório está apresentada na Fig. 3.14.

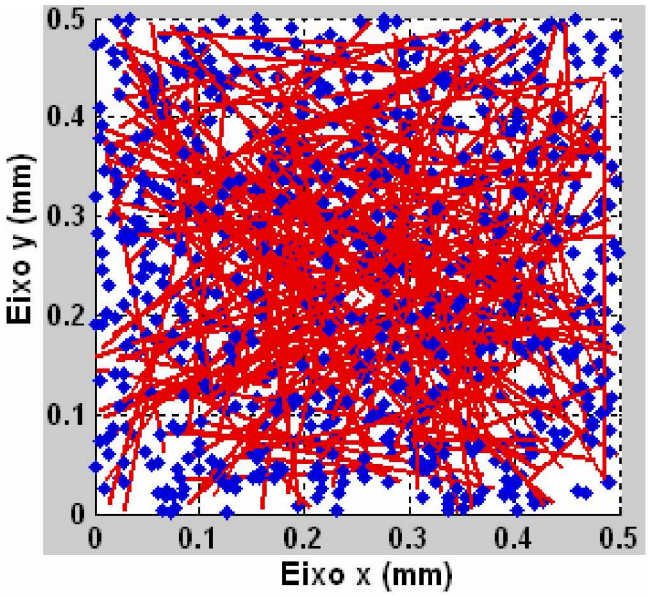


Figura 3.14 - Esquema do posicionamento dos eventos na configuração deslizamento aleatório e indentação aleatória.

Assim como a configuração anterior, a ordem de ocorrência do deslizamento ou da indentação é escolhida aleatoriamente. Essa configuração representa o regime de desgaste misto, onde ocorre tanto o deslizamento quanto o rolamento das partículas abrasivas na interface de desgaste.

A configuração da simulação é definida conforme a análise da superfície desgastada ou conforme a dinâmica do tipo de ensaio de desgaste a ser simulado.

3.3.3 - Programa principal da simulação

Os passos para a execução da seqüência de eventos que constitui a simulação estão apresentados no fluxograma da Fig. 3.15.

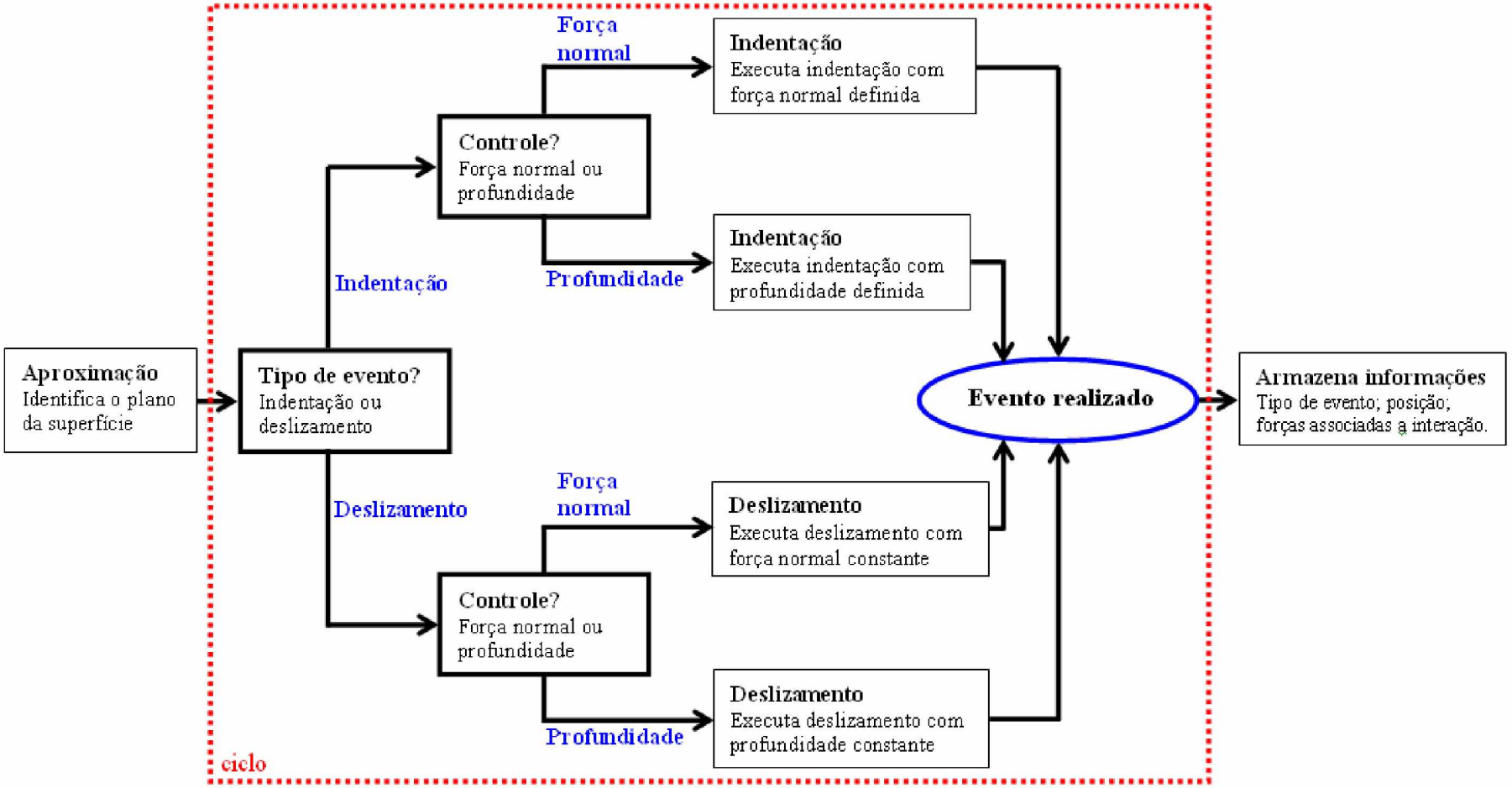


Figura 3.15 – Fluxograma simplificado do programa da simulação.

Primeiramente procede-se a aproximação e reconhecimento da superfície da área de trabalho, como explicado no tópico 3.3.1. É necessário fornecer o valor do lado da área de trabalho. Essa rotina calcula a equação que representa o plano da superfície da amostra.

Em seguida é executada a rotina que gera as posições dos eventos. Os parâmetros de entrada são: quantidade de eventos, configuração da simulação e força normal de cada evento. Caso a configuração adotada combine deslizamento e indentação, é necessário entrar com a quantidade de eventos e o percentual de cada tipo de evento.

No processo de execução de um evento, mostrado no fluxograma da Fig. 3.15, existem duas escolhas principais: o tipo de evento e o tipo de controle adotado. O tipo de evento define se o evento atual é uma indentação ou um deslizamento. O tipo de controle define se a intensidade do evento é em função da força normal ou em função da profundidade. Essas duas escolhas em seqüência abrem quatro possibilidades para a execução de um evento: indentação controlada via força normal; indentação controlada via profundidade; deslizamento controlado via força normal; deslizamento controlado via profundidade.

O ciclo mostrado na Fig. 3.15 (linha pontilhada) se repete de acordo com a quantidade de eventos pré-estabelecida.

A interface de comunicação com o operador do programa de controle do macro-simulador está apresentada na Fig. 3.16.

Na tela mostrada na Fig. 3.16 encontram-se as variáveis de entrada, onde são definidos a quantidades de eventos, o percentual de indentações e o lado da área quadrada. Logo abaixo, as variáveis que controlam a aplicação da carga dos eventos e a velocidade, no caso de deslizamento. No lado direito da tela, encontram-se as informações de saída expressas em gráficos. Essas informações também são guardadas em uma matriz de arquivo texto (txt), ao final da execução de todos os eventos.

A Fig. 3.17 apresenta a interface de comunicação do programa que controla o micro-simulador. Essa tela é dividida em duas partes, uma referente ao processo de aproximação do penetrador na amostra, e outra referente à simulação. A Fig. 3.17a mostra a posição que os eixos coordenados e o PZT se encontram durante todo o processo de aproximação.

Na tela principal, mostrada na Fig. 3.17b, definem-se as variáveis: quantidades de eventos, percentual de indentações, lado da área quadrada, variáveis que controlam a aplicação da carga dos eventos e velocidade, no caso do processo de deslizamento. As informações obtidas durante a simulação referentes a carga, profundidade penetrada e posição da amostra são apresentadas graficamente.

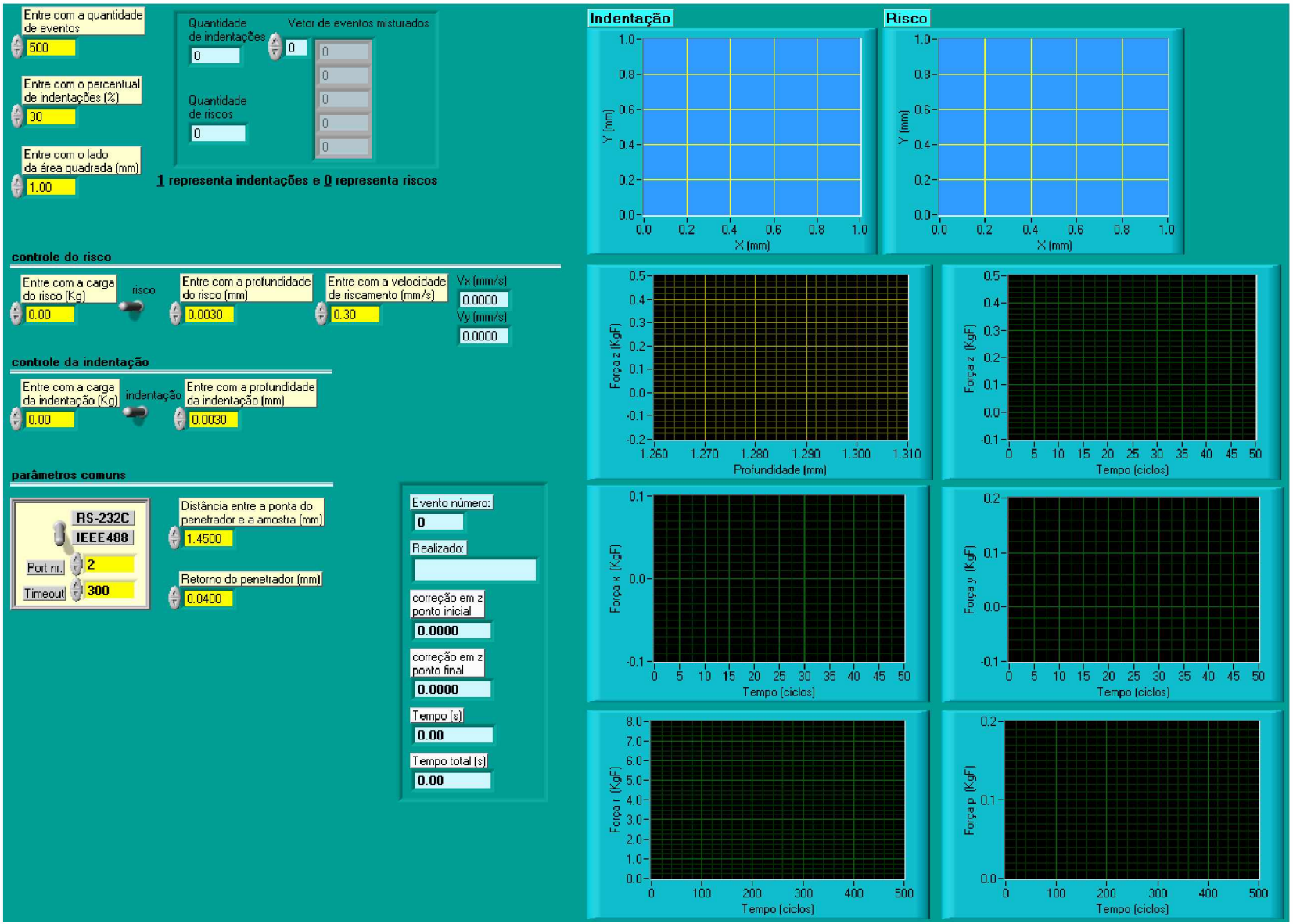
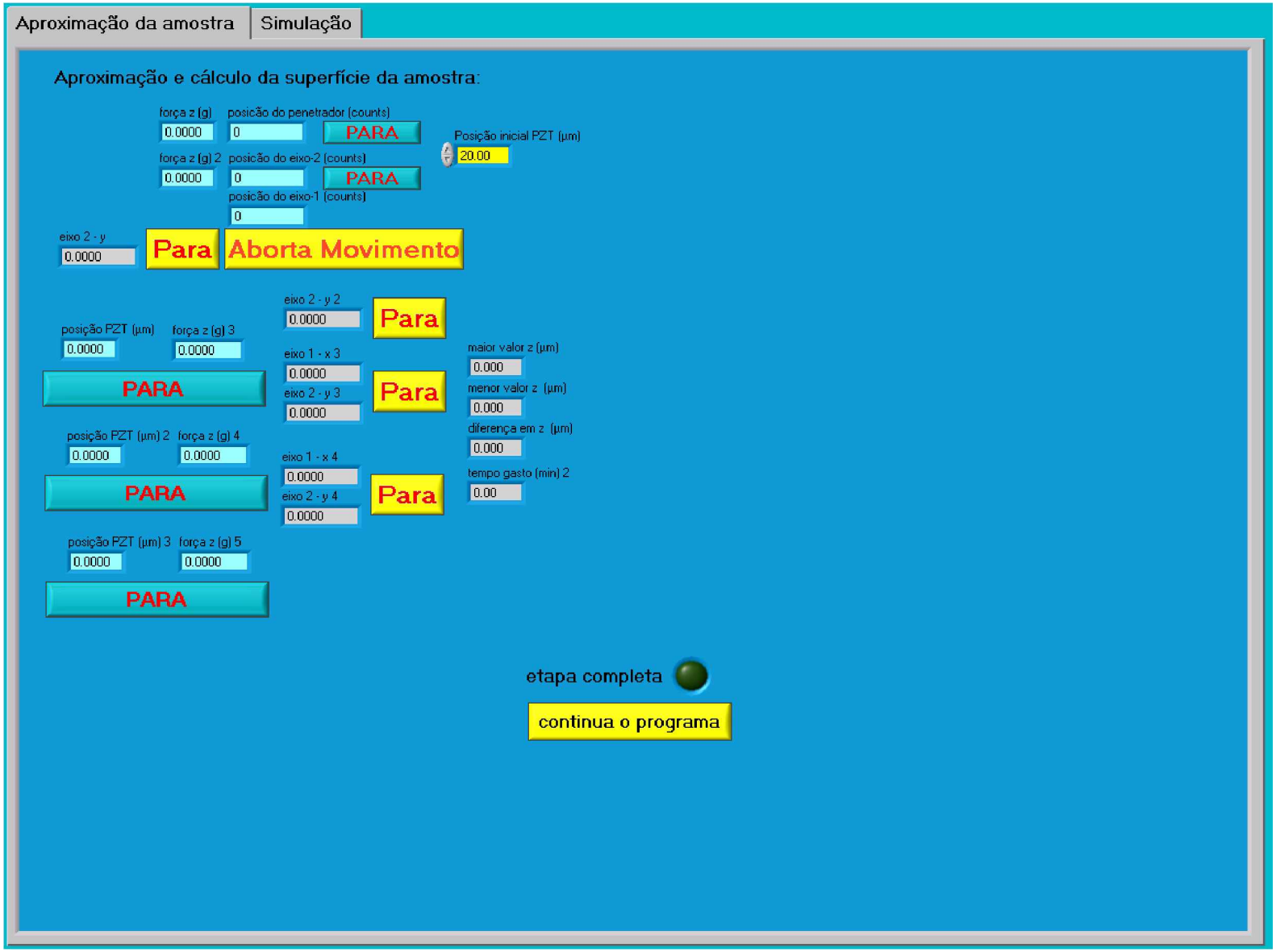
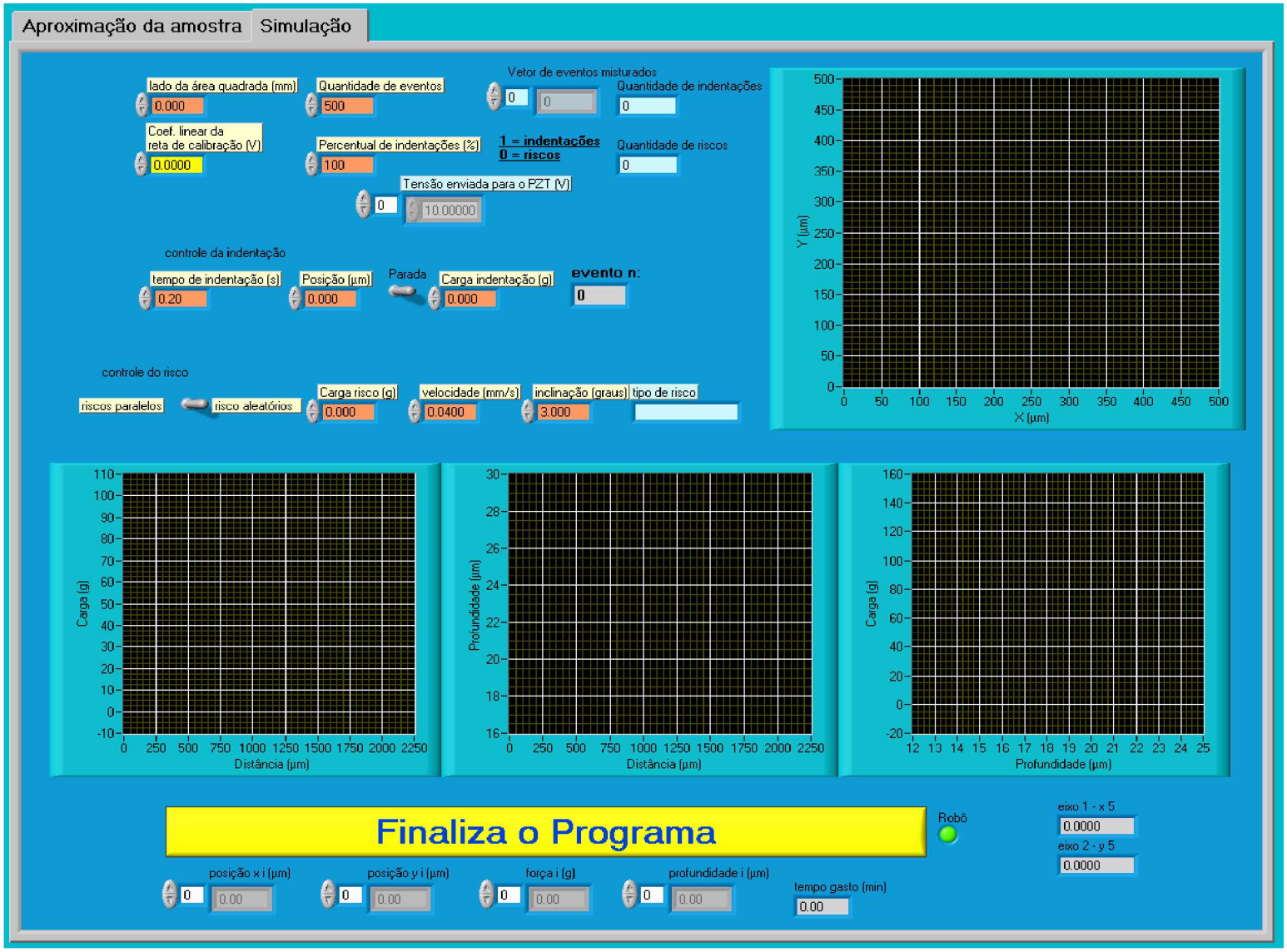


Figura 3.16 - Tela de comunicação com o operador do programa de controle do macro-simulador.


Aproximação da amostra
Simulação
Aproximação e cálculo da superfície da amostra:
força z (g)
posição do penetrador (counts)
PARA
Posição inicial PZT (µm)
força z (g) 2
posição do eixo-2 (counts)
PARA
posição do eixo-1 (counts)
eixo 2 - y
Para
Aborta Movimento
eixo 2 - y 2
Para
posição PZT (µm)
força z (g) 3
maior valor z (µm)
eixo 1 - x 3
PARA
eixo 2 - y 3
Para
menor valor z (µm)
diferença em z (µm)
posição PZT (µm) 2
força z (g) 4
eixo 1 - x 4
PARA
eixo 2 - y 4
Para
tempo gasto (min) 2
posição PZT (µm) 3
força z (g) 5
PARA
etapa completa
continua o programa

-a-



-b-

Figura 3.17 - Interface de comunicação com o operador no micro-simulador: a- Tela do processo de aproximação; b- Tela principal.

3.3.4 - Sub-rotinas de execução dos eventos na simulação

A intensidade dos eventos é controlada monitorando a força através da célula de carga, e a posição do indentador em relação à superfície da amostra. O fluxograma da Fig. 3.18 mostra os passos para a execução de uma indentação.

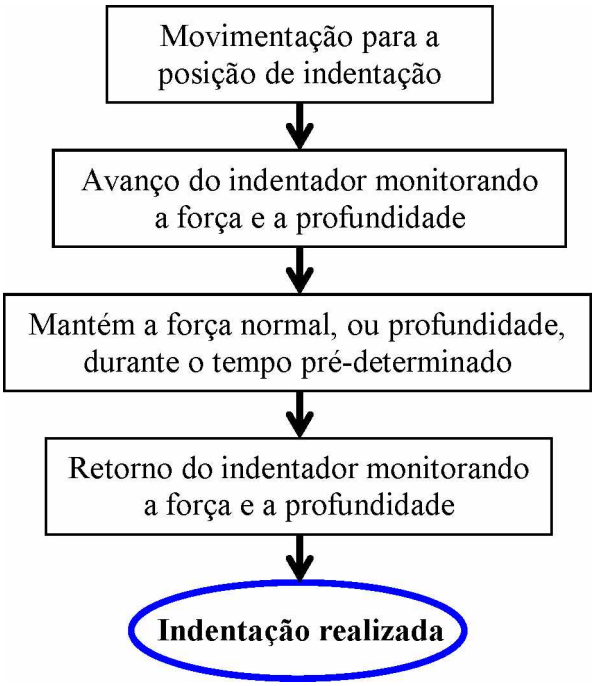
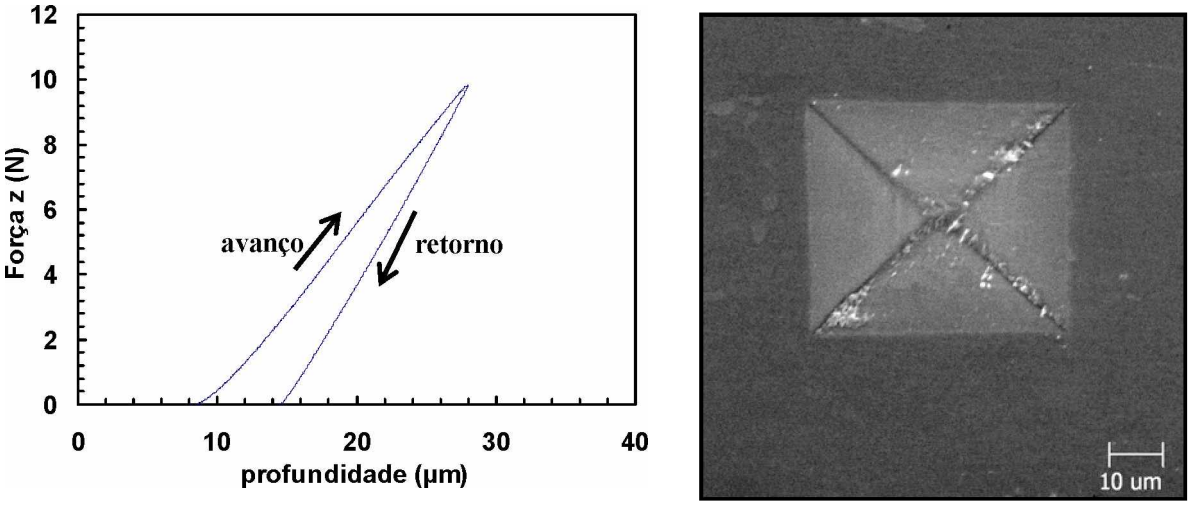


Figura 3.18 - Processo de execução de uma indentação.

Posiciona-se a amostra no ponto previamente definido para a ocorrência da indentação. Em seguida, o indentador passa a movimentar-se verticalmente com velocidade constante, deformando a amostra. Há duas possibilidades para o controle da indentação: via força normal e via profundidade fixa. Na indentação controlada pela força normal, o indentador movimenta-se até atingir o valor de força normal pré-estabelecido. Na seqüência, o controle do movimento do indentador atua para manter a força normal constante durante um intervalo de tempo. No caso de indentação com a profundidade fixa, o indentador movimenta-se até atingir a profundidade relativa à superfície da amostra, em seguida mantém a posição constante durante um intervalo de tempo. Passado o tempo da indentação, o indentador retorna com velocidade constante. As forças são monitoradas durante todo o processo de avanço, espera e retorno do indentador.

O resultado do processo de indentação em uma amostra de aço ferramenta, usando indentador Vickers, até a força normal 9,8 N, está apresentado na Fig. 3.19.

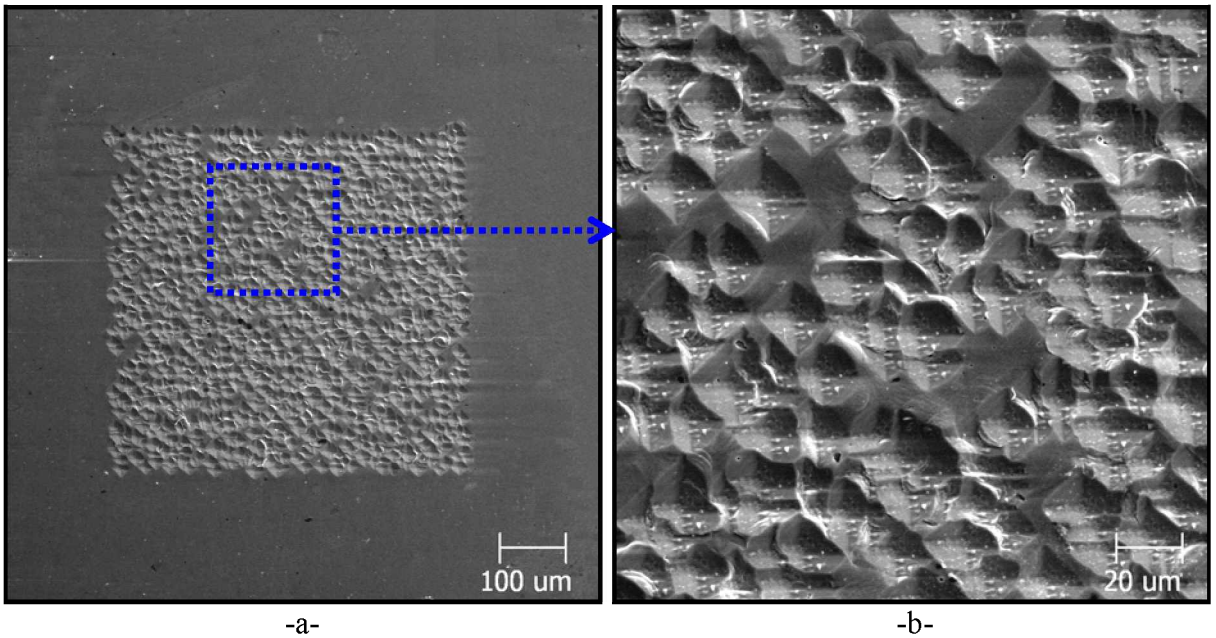


-a- -b-

Figura 3.19 - Indentação. a- Aquisição da força normal; b- Evento isolado. MEV.

A Fig. 3.19a mostra o comportamento típico da força normal em função da profundidade em um processo de indentação. Observa-se que o comportamento da força normal na curva de avanço é diferente da curva de retorno do indentador. Esse fato ocorre porque, nesse caso, houve deformação plástica da superfície durante o processo de indentação. A Fig. 3.19b mostra a indentação resultante dessa interação.

A superfície resultante de uma seqüência de 1500 indentações no o aço 1010 (ABNT), seguindo a configuração de indentações aleatórias (Fig. 3.10), em uma área de trabalho de 0,5 por 0,5 mm, é apresentada na Fig. 3.20.



-a- -b-

Figura 3.20 – Simulação no aço 1010; 1500 indentações; força normal constante 0,29 N: a- Área de trabalho; b- Ampliação. MEV.

A Fig. 3.20 mostra que a seqüência de indentação altera a topografia inicial. Observa-se que existem áreas não cobertas por indentações, ou seja, essa quantidade de indentações com força normal constante em 0,29 N não foram suficientes para cobrir a área de trabalho.

Esse resultado preliminar motivou o desenvolvimento de um programa que determina a quantidade de eventos necessária para cobrir a área de trabalho. A Fig. 3.21 mostra o algoritmo e os gráficos gerados por esse programa.

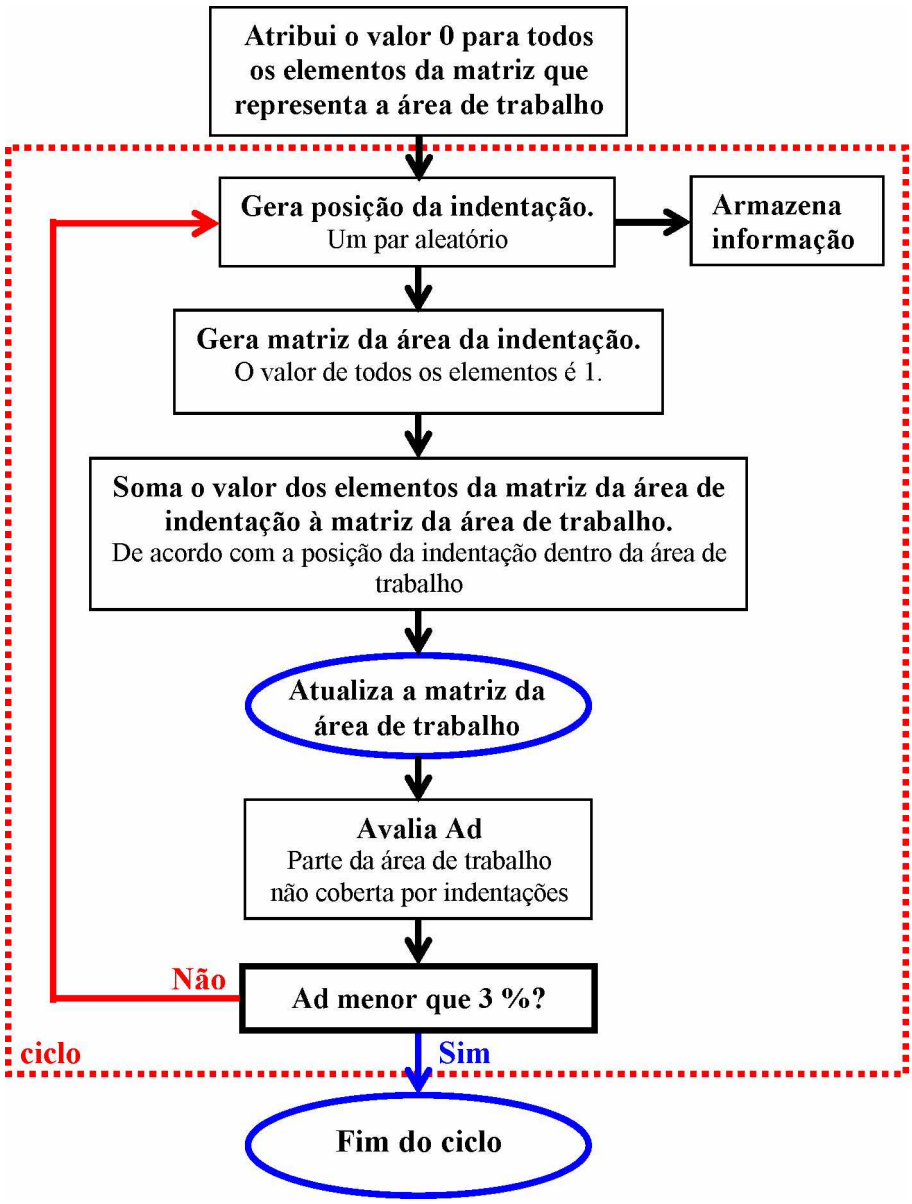
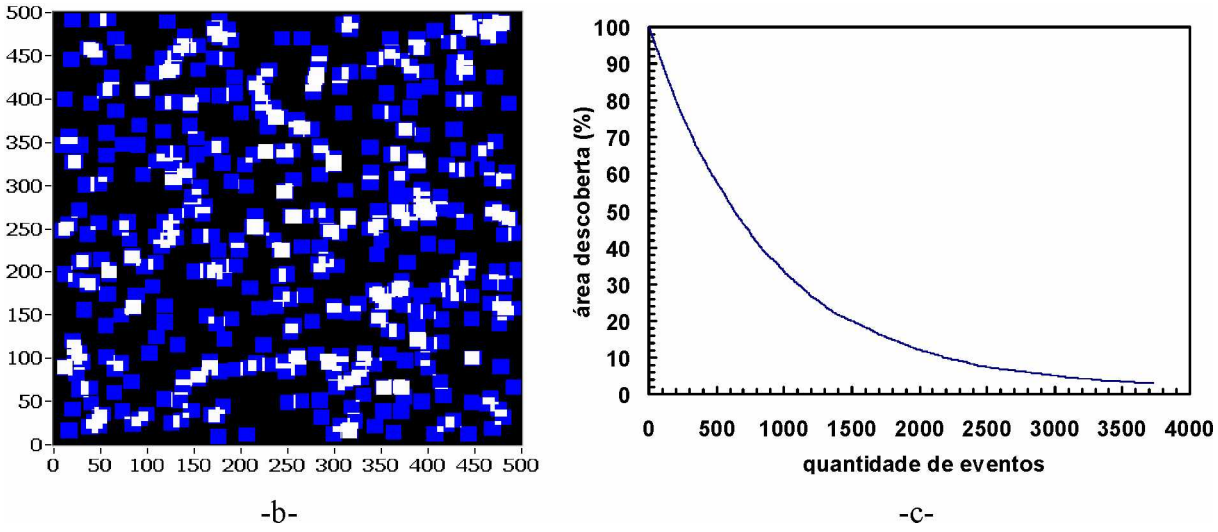


Figura 3.21 - Algoritmo do programa de avaliação do percentual da área descoberta na área de trabalho.

Nesse programa a área de trabalho é representada por uma matriz com elementos de valor zero. Cada ponto dessa matriz equivale a 1 μm² da área de trabalho. A área de cada

indentação é representada por uma matriz cujos elementos têm valor unitário. A indentação Vickers no aço 1010 com força normal 0,29 N gera uma área de 17 por 17 μm. A lógica deste programa consiste em posicionar a matriz da área da indentação em relação à matriz da área de trabalho, e somar os elementos das duas matrizes. Dessa forma, a matriz da área de trabalho é atualizada a cada nova indentação, e a área não recoberta por indentações (Ad), representada pelos pontos de valor zero, é quantificada. Assim que a área de trabalho for suficientemente recoberta o programa interrompe seu ciclo e para de gerar novos eventos. A Fig. 3.22a mostra o gráfico da matriz da área de trabalhos. A Fig. 3.22b apresenta a variação da área livre de indentações em função do aumento do número de eventos.



-b- -c-

Figura 3.22 – a- Representação do posicionamento de 500 indentações na área de trabalho; b- Percentual de área descoberta.

Na Fig. 3.22a as marcas azuis reapresentam a área ocupada por cada indentação. A área em preto representa os espaços da área de trabalho não coberta por nenhum indentação. A área em que duas ou mais indentações se sobrepõem está representada em branco. O gráfico da Fig. 3.22b mostra que para cobrir 97% da área de trabalho seriam necessários aproximadamente 3700 indentações. O percentual de área descoberta foi utilizado como parâmetro para definir a quantidade de eventos a serem realizados na simulação.

O processo de deslizamento do indentador sobre a amostra segue os passos mostrados no fluxograma da Fig. 3.23.

Posiciona-se a amostra no ponto previamente definido para o inicio do deslizamento. O indentador movimenta-se verticalmente com velocidade constante, deformando a amostra. As forças associadas à deformação são monitoradas pela célula de carga. Como mostrado no

fluxograma da Fig. 3.15, há duas possibilidades de controle durante o deslizamento: força normal constante e profundidade fixa.

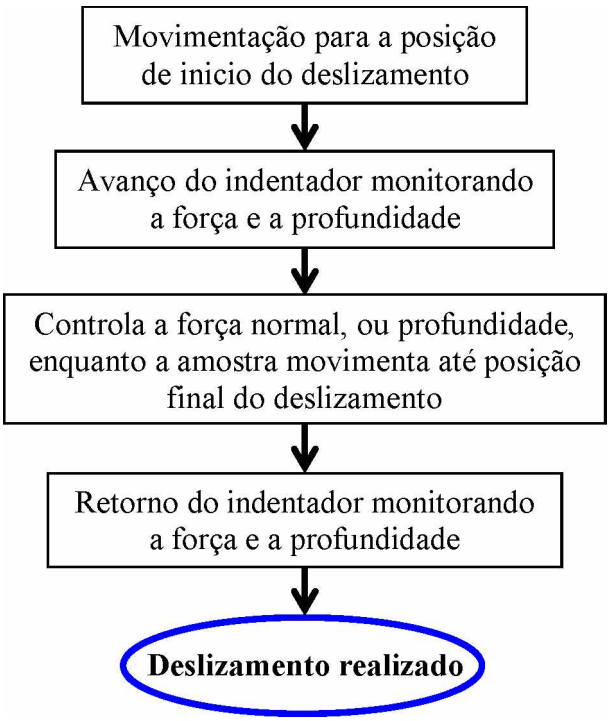


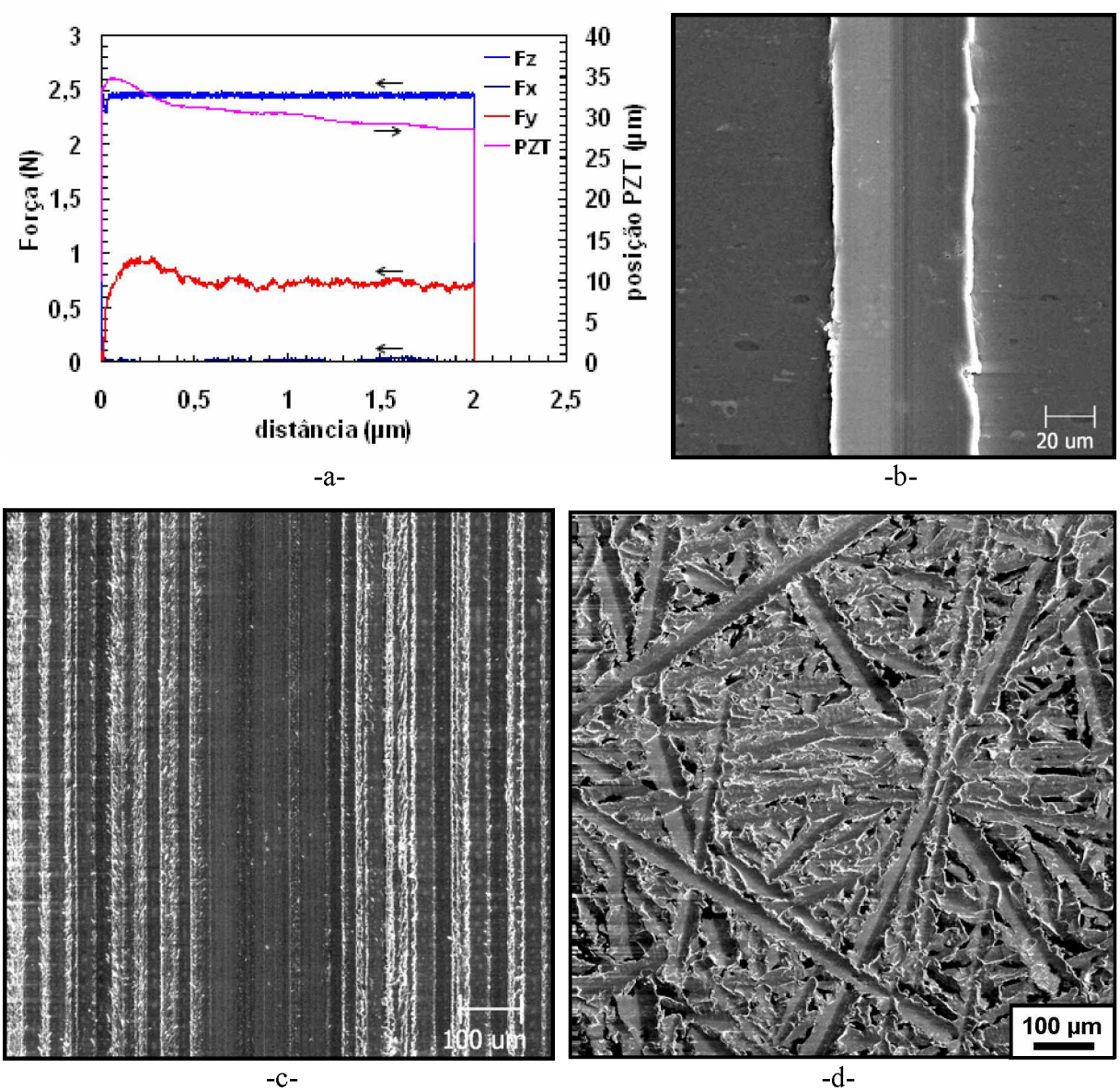
Figura 3.23 - Processo de deslizamento do indentador sobre a amostra.

No controle com força normal constante, o indentador movimenta-se até atingir o valor de força normal pré-estabelecido. Em seguida, a amostra movimenta-se com velocidade constante para a posição do final do deslizamento. O controle do movimento do indentador atua para manter a força normal constante durante o deslizamento.

No caso de deslizamento com a profundidade relativa fixa, o indentador movimenta-se até atingir a profundidade relativa à superfície da amostra. Em seguida, a amostra movimenta-se para a posição do final do deslizamento, com velocidade constante. Durante o deslizamento, a posição do indentador é corrigida em função do plano de referência da superfície da amostra (tópico 3.3.1), no sentido de manter a profundidade relativa constante ao longo do deslizamento. Atingido o ponto final do deslizamento, o indentador retorna com velocidade constante. As forças são monitoradas durante todo o processo de avanço, movimentação da amostra e retorno do indentador.

A Fig. 3.24a mostra um gráfico típico das informações adquiridas durante o deslizamento com força normal controlada em uma amostra de alumínio.

O gráfico da Fig. 3.24a mostra que o PZT corrige a posição vertical do indentador ao longo da distância deslizada para controlar a força normal (Fz), que permanece constante. A força tangencial (Fy) representa a resistência ao movimento horizontal, e está associada à deformação do material. A força lateral (Fx) permanece em torno de zero porque, nesse exemplo, o deslizamento ocorre na direção y. A Fig. 3.24b mostra o evento gerado no deslizamento, com força normal 0,98 N, de um indentador Vickers sobre uma amostra de alumínio.



-a- -b-

-c- -d-

Figura 3.24 - a- Aquisição das forças normal, tangencial, lateral e posição do PZT em função da distância deslizada; b- Evento isolado no alumínio, força normal 0,98 N; c- Deslizamento paralelo no aço ferramenta, 1000 eventos, área 1 x 1,3 mm; d- Deslizamentos aleatório no aço ferramenta, 2700 eventos, área 2 x 2 mm. MEV.

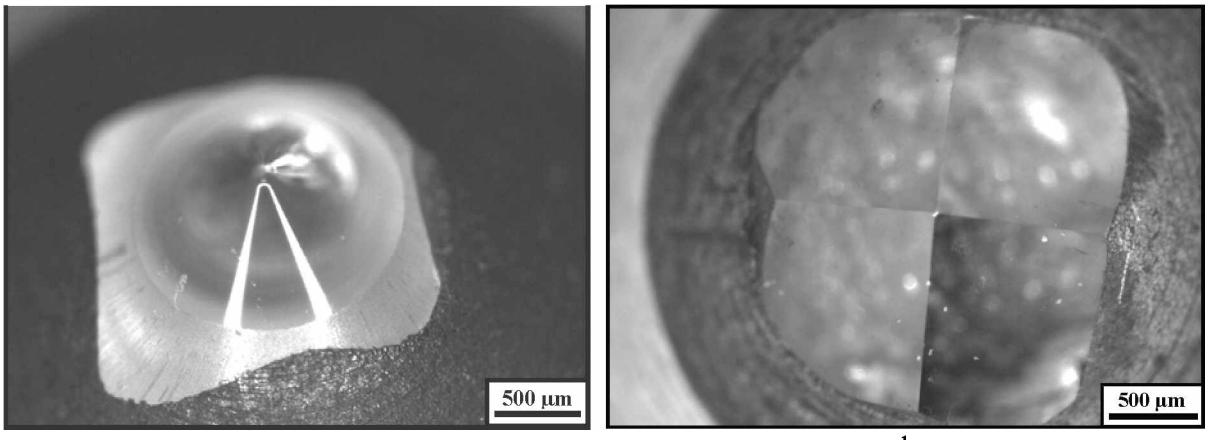
Exemplos de simulações no aço ferramenta nas configurações deslizamento paralelo e deslizamento aleatório são mostrados nas Fig. 3.24c e Fig. 3.24d, respectivamente. Observa-se que a topografia é o resultado das diversas interações entre os eventos, e que o direcionamento tem forte influência na topografia da simulação. Também foi desenvolvido um programa análogo ao apresentado na Fig. 3.21 para determinar a quantidade de deslizamentos mínima necessária para cobrir a área de trabalho.

3.4 Parâmetros que afetam a simulação do desgaste abrasivo.

Os principais parâmetros que afetam a simulação do desgaste abrasivo são: força normal de cada evento; forma do indentador e a quantidade de eventos.

A força normal representa a força imposta à partícula em um processo abrasivo. O efeito da força por partícula sobre o mecanismo de desgaste foi demonstrado no tópico 2.2.

A forma do indentador simula a forma da partícula abrasiva. Nessa tese foram utilizados dois indentadores de diamante em formato diferentes: padrão Vickers, piramidal de base quadrada com ângulo de 136° entre as faces; padrão Rockwell C, cônico com ângulo 120° e arredondamento de ponta com 0,2 mm de raio. A Fig. 3.25 mostra a ponta de diamante desses indentadores.



-a- -b-

Figura 3.25 - Indentadores utilizados: a- Rockwell C; b- Vickers.

Como apresentado no seção 2.2, a forma da partícula abrasiva afeta o tipo de mecanismo de desgaste. As partículas de forma mais angulosa tendem a rotacionar, enquanto as mais arredondadas tendem a deslizar entre as superfícies.

A quantidade de eventos é um parâmetro importante para a simulação, pois influencia a superposição dos eventos.

Os parâmetros da simulação e a configuração do posicionamento dos eventos, mostrados nas Fig. 3.10 a 3.14, definem o mecanismo de desgaste na simulação.

3.5 Métodos de análise da superfície.

A simulação é validada através da comparação dos parâmetros topográficos e aspecto visual entre a referência e a superfície produzida na simulação.

Tanto a superfície de abrasão usada como referência quanto a superfície produzida na simulação são analisadas quantitativamente, via interferometria laser (IL – modelo: UBM Microfocus Expert IV – fabricante UBM), e qualitativamente, via microscopia eletrônica de varredura (MEV – modelo: Leo 940A – fabricante: Zeiss).

A análise da topografia da referência via MEV é usada para determinar o tipo de mecanismo de desgaste que predomina no sistema tribológico. A presença de riscos/sulcos indica a ocorrência de deslizamento dos abrasivos. Nesse caso, observa-se a direcionalidade dos eventos e se há a ocorrência simultânea de indentações. O rolamento da partícula abrasiva gera indentações sobre a superfície. Nestas imagens também foi observada a dimensão do maior evento ocorrido durante a abrasão. Esse valor foi utilizado na definição de parâmetros de filtragem da topografia.

Existem dois métodos para medir a topografia: o apalpamento e a reflexão ótica.

No apalpamento, um apalpador de diamante descreve a topografia. Usualmente esse método é utilizado para a medição de perfis lineares, mas há dispositivos que usam esse método para descrever pequenas áreas (Alcalá; Barone; Anglada, 2000).

Um dos métodos de reflexão ótica mais utilizado para a medição da topografia é a interferometria laser. Nesse método, um sensor laser descreve a topografia sem o contato com a mesma.

Na medição da topografia via IL foi utilizada a máxima resolução lateral para melhor definir os eventos de desgaste ocorridos na abrasão. A análise da topografia foi realizada em um programa especializado: Digital Surf Mountains Map Universal®, versão 3.0.11.

3.5.1 - Ondulação e rugosidade

Um perfil topográfico pode ser considerado um sinal estacionário em relação ao espaço. A Fig. 3.26 mostra o esquema de um processo de filtragem aplicado a um perfil topográfico.

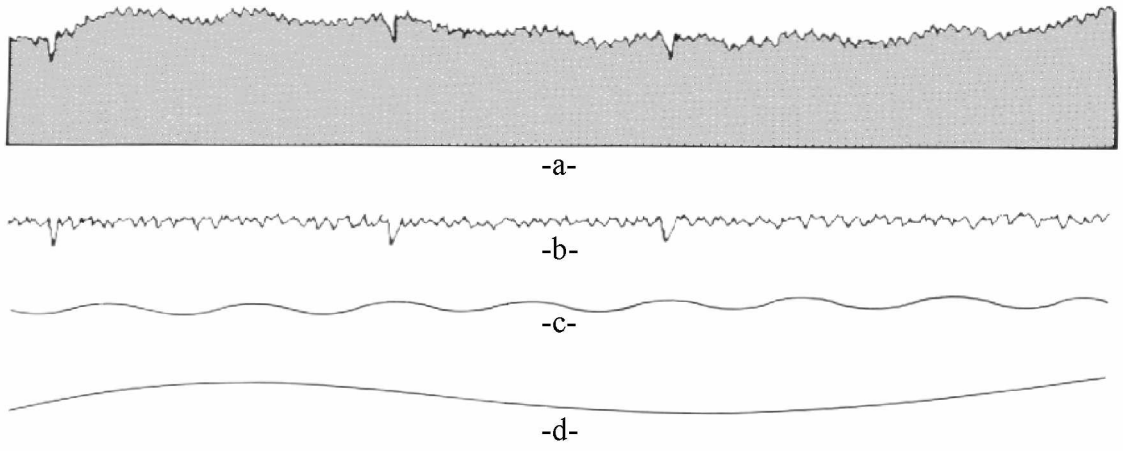


Figura 3.26 - Esquema de composição de um perfil. a- perfil original; b-rugosidade; c-ondulação; d- forma (Stout; Blunt, 1995).

Esse filtro seletivo separa os efeitos de forma (Fig. 3.26d), ondulação (Fig. 3.26c) e rugosidade(Fig. 3.26b) de acordo com comprimentos de onda específicos.

A Fig. 3.27a mostra um perfil de rugosidade representativo de uma superfície desgastada.

O espectro (Fig. 3.27b) mostra a amplitude em função da freqüência espacial ($f_{espacial}$). A freqüência espacial representa quantos ciclos o comprimento de onda se repete ao longo do perfil de rugosidade. O comprimento de onda guarda relação com a freqüência espacial como mostrado na Eq. 3.1.

$$\text{comprimento de onda}(\mu m) = \frac{\text{comprimento do perfil}(\mu m)}{f_{espacial}} \tag{3.1}$$

Os maiores comprimentos de onda estão associados à forma e ondulação do perfil, enquanto que os menores comprimentos de onda estão associados à rugosidade do perfil. Os processos de filtragem usam um valor de comprimento de onda específico para determinar o que é rugosidade e o que é ondulação chamado "cut off". Os harmônicos com comprimento de onda acima desse valor representam o efeito da ondulação e da forma, e comprimentos de onda menores são considerados rugosidade.

A Fig. 3.27c mostra a ondulação e a forma resultante da filtragem do perfil mostrado na Fig. 3.27a com "cut off" de 80 μm. Os comprimentos de onda menores que esse valor, rugosidade, são apresentados na Fig. 3.27d.

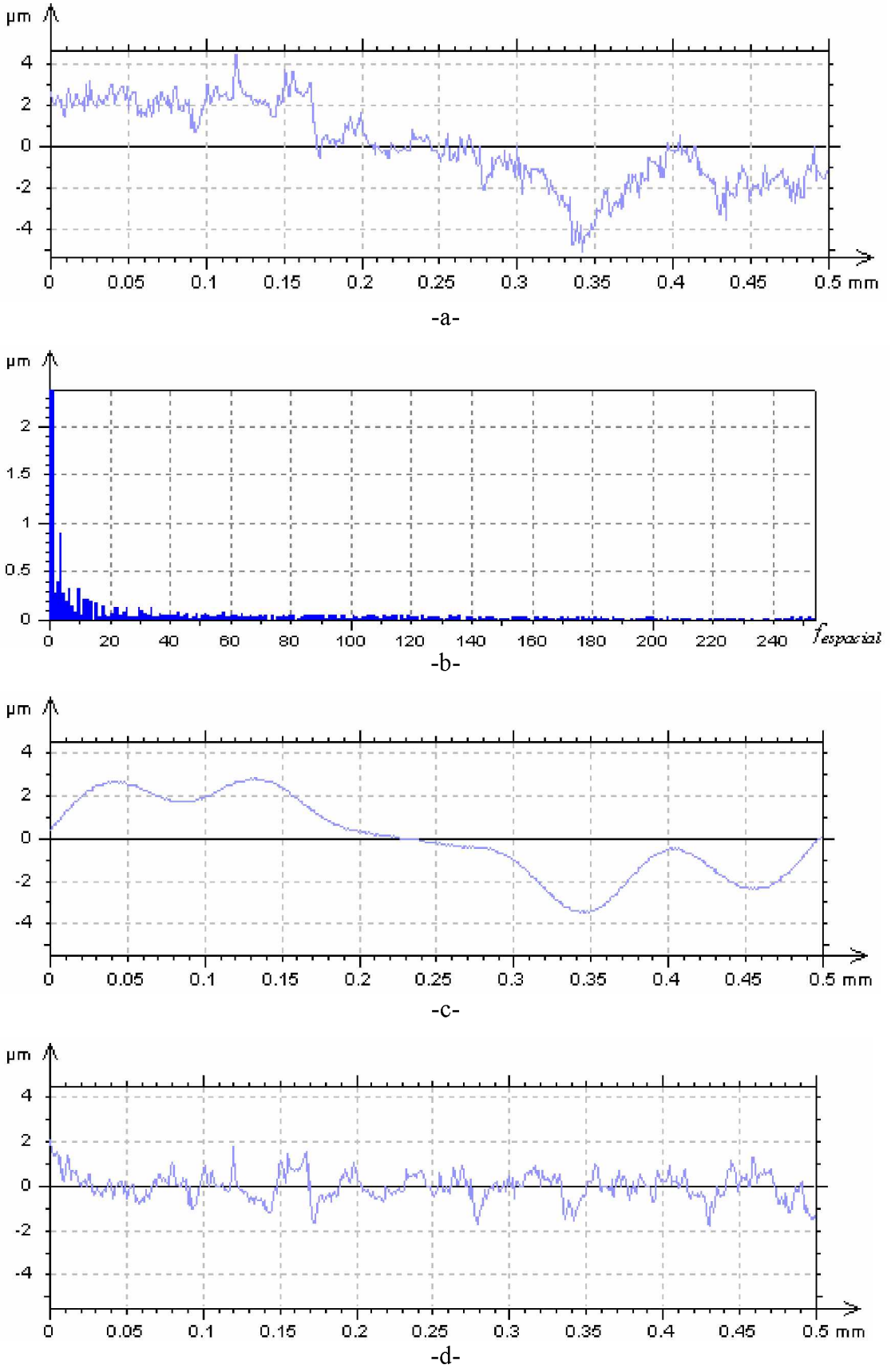


Figura 3.27 - a- Perfil de uma superfície produzida no ensaio roda de borracha; b- Espectro em freqüência espacial; c- Ondulação e forma (“cut off” = 80 µm); d- Rugosidade. IL.

3.5.2 - Parâmetros de rugosidade

Parâmetros de rugosidade são quantificações do perfil de rugosidade. A norma ISO 4287 define os parâmetros de rugosidade bidimensionais. Os parâmetros de rugosidade tridimensionais são extrapolações dos parâmetros bidimensionais, entretanto ainda não constam em norma, mas são bem conhecidos da literatura (Dong; Sullivan; Stout, 1992, 1993, 1994a, 1994b; Stout; Blunt, 1995; Stout et al., 2000). Os parâmetros tridimensionais são definidos em comparação com o plano médio da superfície, calculado através do nivelamento usando método de mínimos quadrados aplicados à superfície medida (Dong; Mainsail; Stout, 1995)

Destacamos os seguintes parâmetros:

- Distância máxima entre pico e vale (Rz - Sz)

O Rz é definido como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade (Gadelmawla et al., 2002; ISO 4287). A Fig. 3.28 mostra a definição desse parâmetro.

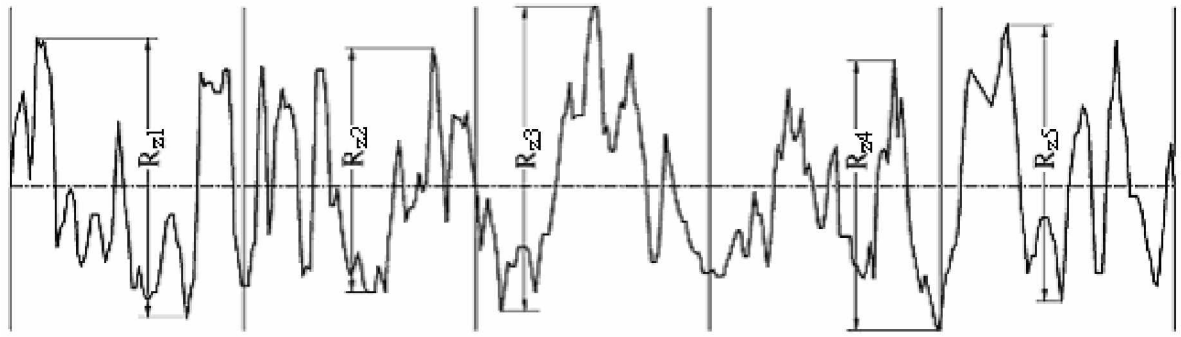


Figura 3.28 - Distância máxima entre picos e vales - Rz (Gadelmawla et al., 2002).

Para o cálculo do Rz, o perfil de rugosidade é dividido em pelo menos cinco seções. Em cada seção é calculada a distancia vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo, compondo cinco valores de distância por perfil ($R_{z1}...R_{z5}$). O Rz é então calculado como a média dessas cinco distâncias adquiridas ao longo do perfil de rugosidade (ISO 4287).

No plano, a distância máxima entre pico e vale (Sz) é definida como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem da superfície de rugosidade. Nesse caso cada área de amostragem é dividida em pelo menos cinco seções, sendo obtido o valor do pico mais alto e o do vale mais profundo para cada seção ($S_{z1}...S_{z5}$). O Sz é calculado como a média das cinco distâncias entre pico e vale, adquiridas na superfície medida. (Dong; Sullivan; Stout,1994a).

- Rugosidade quadrática média (Rq - Sq)

O Rq, ou valor RMS do pefil ('Root Mean Square'), representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície. As equações 3.2 e 3.3 mostram a definição matemática e numérica do parâmetro Rq (Gadelmawla et al., 2002; ISO 4287):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \tag{3.2}$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^{\,2}} \tag{3.3}$$

Onde Yi é a altura do perfil no ponto i.

Análogo ao Rq, a rugosidade superficial quadrática média (Sq) é o valor RMS das alturas em relação ao plano médio da superfície. As equações 3.4 e 3.5 definem o Sq para uma superfície contínua e discreta (Dong; Sullivan; Stout,1994a; Stout et al., 2000).

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y}\int_0^{l_y}\int_0^{l_x} \{y(x,y)\}^2 dxdy} \tag{3.4}$$

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{NM}\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^2} \tag{3.5}$$

Onde z é a distância relativa entre a superfície e o plano médio em uma determinada posição (x, y), N é a quantidade de pontos de cada perfil, e M a quantidade de perfis paralelos que compõem a superfície.

- Comprimento de onda quadrático médio (λq)

O λq (RLq), ou comprimento de onda quadrático médio, é um parâmetro bidimensional híbrido, que leva em consideração espaçamento em y (Rq) e a inclinação quadrática média (Δq), ou seja, espaçamentos em x e y. As definições de λq e Δq são apresentadas nas Eq. 3.6 e Eq. 3.7 respectivamente (ISO 4287; Gadelmawla et al., 2002).

$$\lambda q = 2\pi \frac{Rq}{\Delta q} \tag{3.6}$$

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L (\theta(x) - \dot{\theta})^2 dx}, \quad \dot{\theta} = \frac{1}{L}\int_0^L \theta(x)dx \tag{3.7}$$

Onde θ é a inclinação entre dois pontos consecutivos do perfil e $\dot{\theta}$ é a inclinação média. A Fig. 3.29 mostra a definição do método de cálculo do da inclinação média de um perfil de rugosidade.

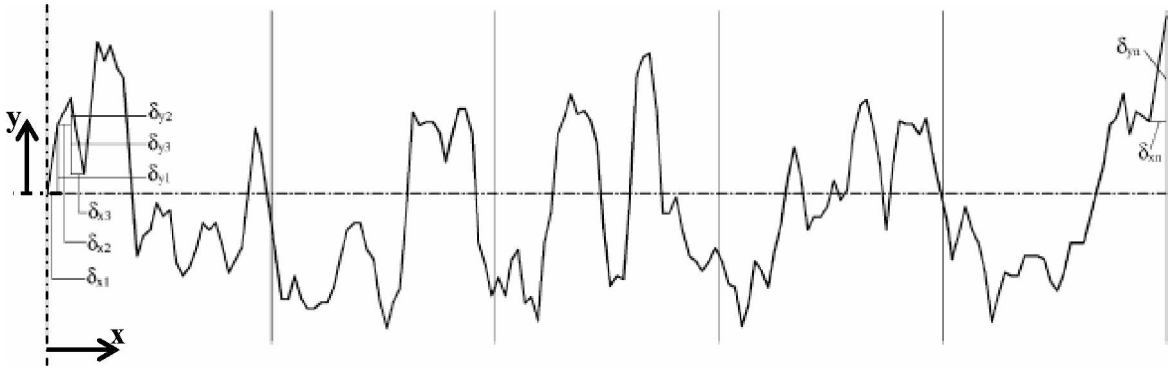


Figura 3.29 - Definição de inclinação média - $\dot{\theta}$ (Gadelmawla et al., 2002).

A cada dois pontos consecutivos, calcula-se a distância relativa em x e y, representados por δ_x e δ_y respectivamente, como mostrado na Fig. 3.29. Os parâmetros inclinação quadrática média Δq e a inclinação média $\dot{\theta}$ são definidos, numericamente, de acordo com as Eq. 3.8 e 3.9.

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{\delta_{y_i}}{\delta_{x_i}} - \dot{\theta}\right)^2} \tag{3.8}$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right) \tag{3.9}$$

Usando o Δq e o Rq na Eq. 3.6 calcula-se o λq. O parâmetro λq está relacionado ao comprimento de onda médio do perfil de rugosidade.

3.5.3 - Interferometria dos eventos

A interferometria laser foi usada para medir a profundidade dos eventos isolados. Exemplos de marcas de deslizamentos obtidos via interferometria laser são apresentados na Fig. 3.30.

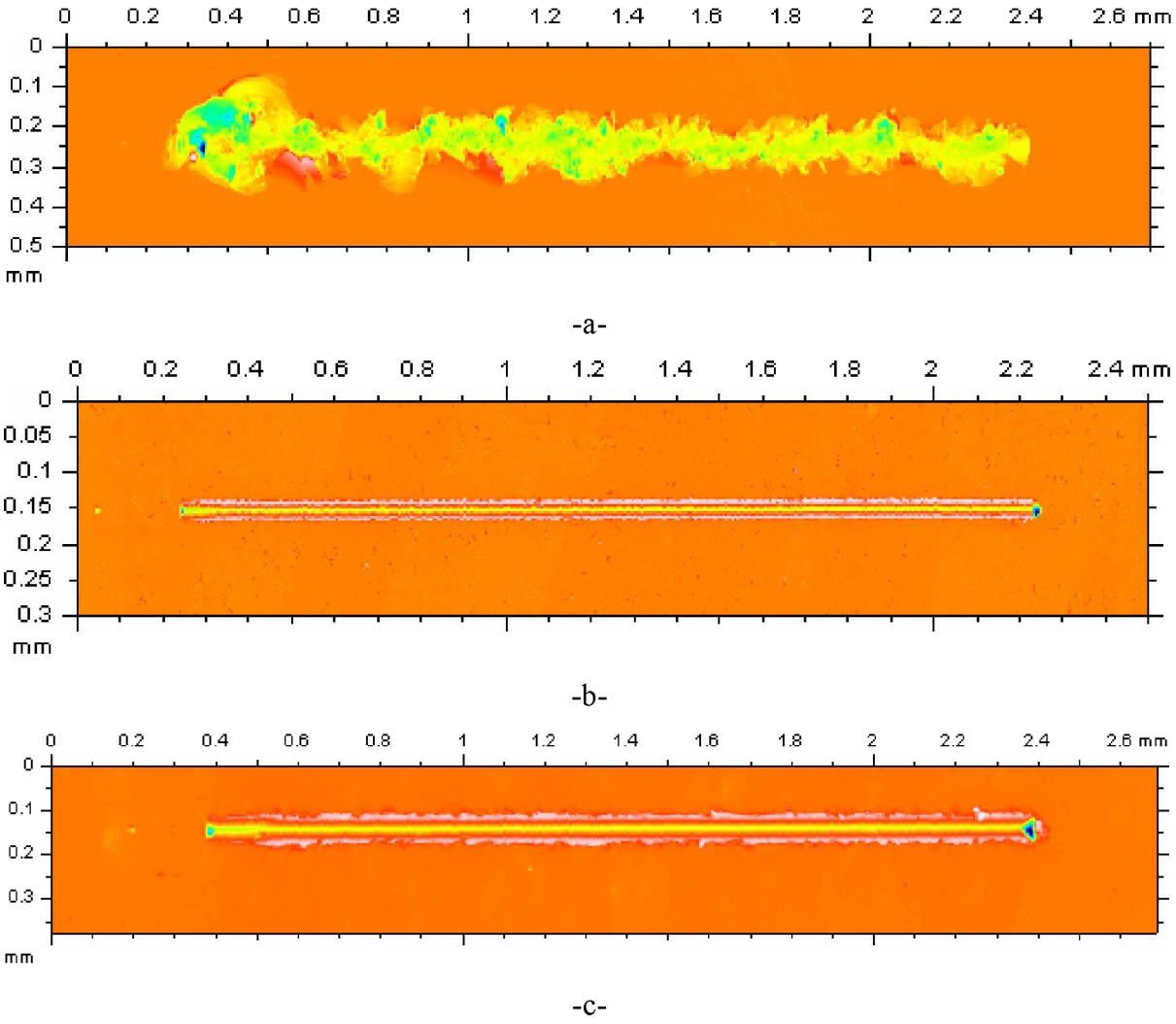


Figura 3.30 – Deslizamento, Vickers, força normal 2,9 N: a- Vidro; b- Aço ferramenta; c- Aço 1010. IL.

Devido à sua transparência, as amostras de vidro foram recobertas com um filme fino de ouro (sputtering). Dessa forma, o feixe laser é refletido de acordo com a topografia da superfície da amostra, Fig. 3.30a.

Algumas indentações Vickers obtidas via interferometria são apresentadas nas Fig. 3.31a-c.

Visivelmente, observa-se a ocorrência de anomalias nas marcas de indentações Vickers obtidas via interferometria laser, Fig. 3.31. A forma piramidal da marca de indentação Vickers afeta a reflexão do laser gerando erros na leitura da posição. Esse fenômeno ótico ocorre em determinadas regiões da marca de indentação. A Fig. 3.31d mostra o perfil transversal AA, da marca de indentação Vickers apresentada na Fig. 3.31b, com esse tipo de anomalia.

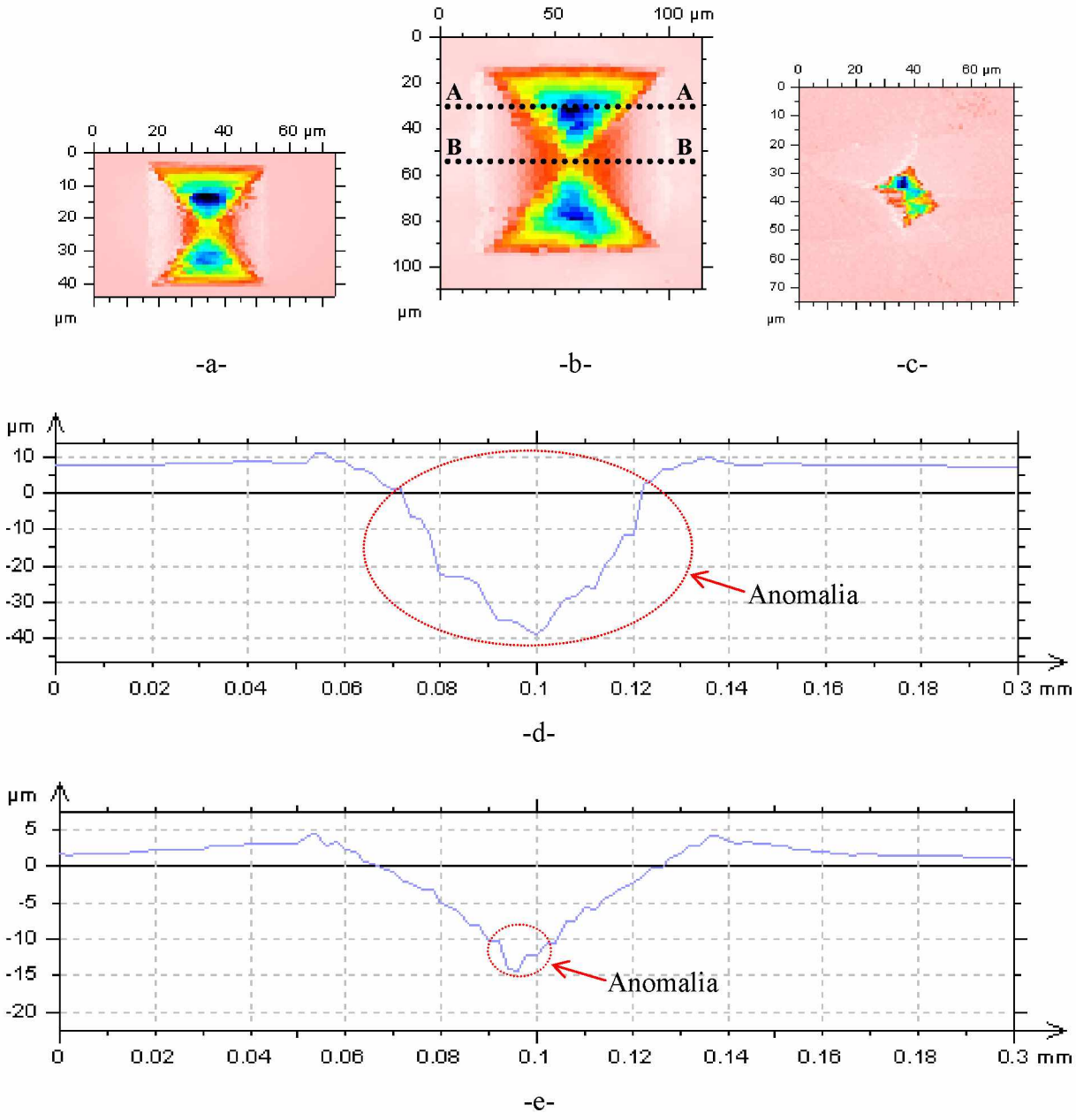


Figura 3.31 – Indentação, Vickers: a- Aço ferramenta, 9,8 N; b- Aço 1010, 9,8 N; c- Vidro 1,9 N; d- Perfil transversal AA; e- Perfil transversal BB.

A Fig. 3.32 mostra um esquema do processo de interferometria da indentação.

Quando o sensor laser se encontra na posição P1 (Fig. 3.32) a refletividade é alta, pois a superfície plana e horizontal favorece a reflexão do feixe laser na direção do sensor. À medida que o sensor se posiciona dentro na indentação, posição P2, a refletividade diminui, pois a superfície plana e inclinada modifica a direção do feixe refletido. Nesse caso, mesmo com a refletividade baixa, a leitura da topografia é possível. A partir de uma determinada profundidade (Fig. 3.32, posição P3) ocorre a interferência do feixe laser com a própria reflexão, levando à leitura errônea mostrada nos perfis da Fig. 3.31d-e. Esse problema foi

minimizado com o refinamento dos parâmetros de aquisição do sensor laser do interferômetro ("range: ±500 μm; laser power: 1,2; control type: accurate; damping level: 0; reflection threshold: 2,0%; action if surface lost: search; search speed: 4,7; dv/dt limit: 1").

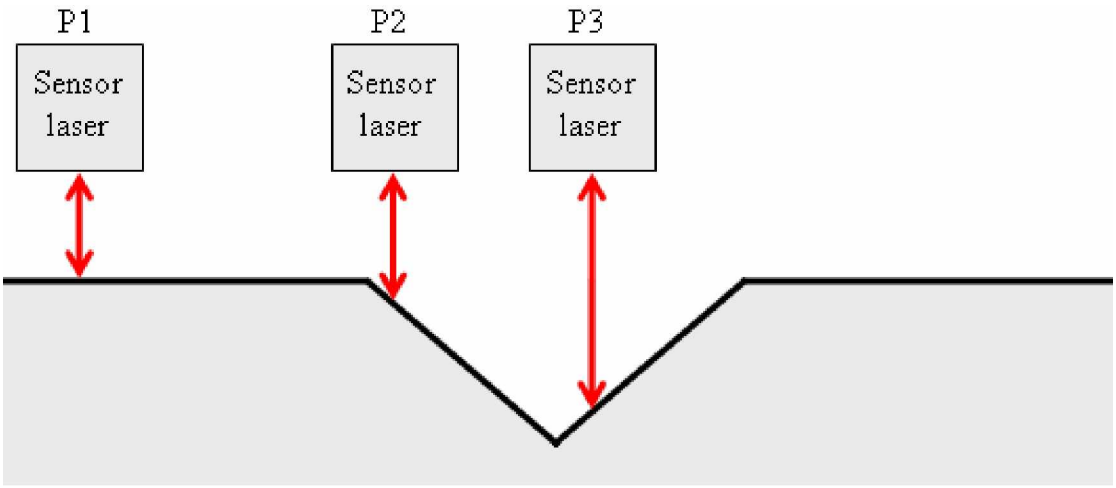


Figura 3.32 – Esquema sobre a reflexão em uma indentação.

É interessante notar que, nos perfis obtidos na região central da indentação (perfil BB - Fig. 3.31b), o efeito da anomalia diminui, conforme mostrado na Fig. 3.31e. Ainda assim, observa-se a pequena ocorrência de interferência na parte mais profunda da marca de indentação.

Para medir a profundidade da indentação foram utilizados métodos numéricos de linearização no perfil transversal da indentação. Esse processo de medição consiste em três passos. A Fig. 3.33 apresenta o resultado do primeiro passo desse processo de medição.

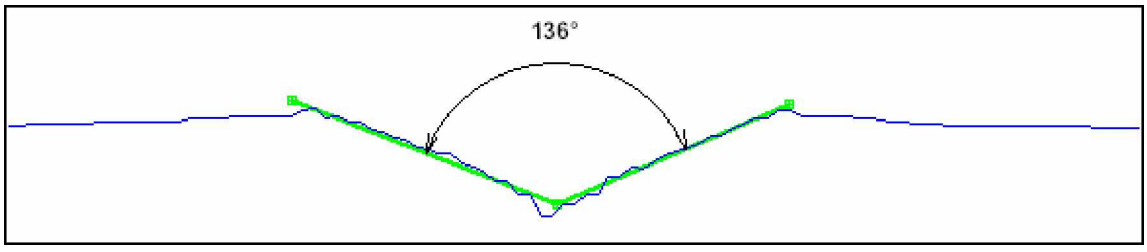


Figura 3.33 – Linearização relativa às faces da indentação.

Utilizam-se os pontos internos à indentação, que, visivelmente, não perderam a refletividade, para definir a face da marca da indentação. Nesse caso o ângulo entre faces do penetrador Vickers é 136°, como confirmado na medição. A Fig. 3.34 mostra o perfil referente ao segundo passo para a medição da profundidade.

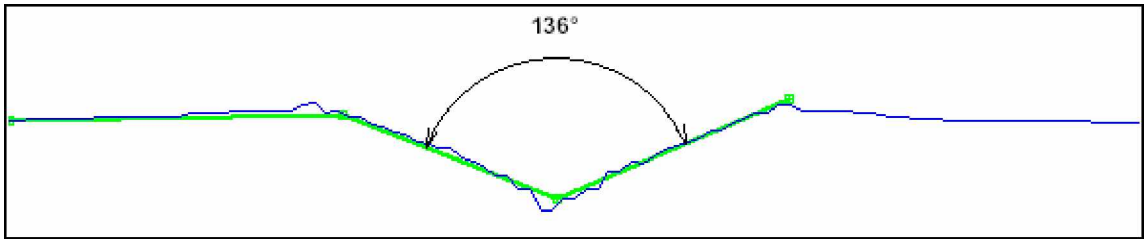


Figura 3.34 – Linearização referente à superfície da amostra.

São utilizados os pontos externos à marca da indentação para definir a superfície da amostra. A Fig. 3.35 mostra o terceiro passo do processo de medição.

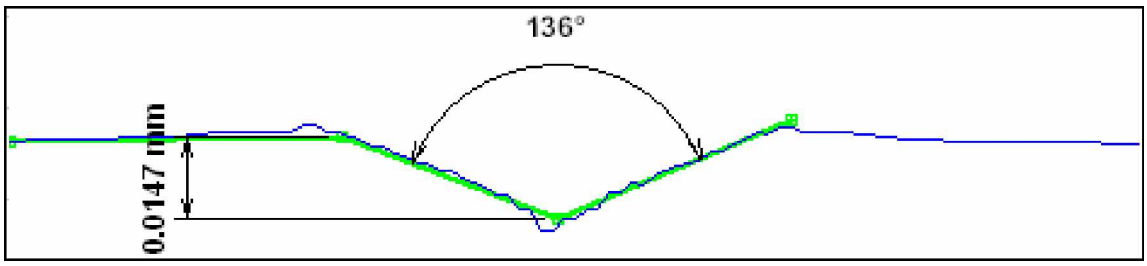


Figura 3.35 – Medição da profundidade de uma indentação Vickers, aço 1010, 9,8 N. IL.

Medido o segmento correspondente à face da marca, em relação à superfície da amostra, estima-se a profundidade do evento de indentação, como mostrado na Fig. 3.35.

Em marcas de menor tamanho, não há pontos suficientes para definir os segmentos correspondentes à face da indentação Vickers, comprometendo o processo de medição. Ou seja, esse método é inadequado para indentações com pequena profundidade, ou baixa força normal.

Não foi observada nenhuma anomalia nas interferometrias das marcas de deslizamento, Fig. 3.30.

CAPITULO IV

4 SIMULAÇÃO

O esquema apresentado na Fig. 4.1 mostra a visão geral da seqüência de etapas realizadas nessa tese, ressaltando as idéias principais de cada tópico que guiaram o estudo da simulação.

O estudo exploratório teve início no macro-simulador, onde se buscou avaliar o efeito dos parâmetros da simulação em comparação com a referência obtida no ensaio LTM. Essa primeira abordagem da simulação é tratada no tópico 4.1, onde se concluiu que a simulação não é viável no macro-simulador para a faixa de força normal pretendida. A solução encontrada para resolver o problema da imprecisão na medição da força normal foi utilizar o equipamento micro-simulador. Como mostrado na seção 3.2, o sistema do micro-simulador é mais sensível quanto à medição das forças e ao posicionamento do indentador em relação ao macro-simulador.

O tópico 4.2 apresenta a simulação do rolamento puro da partícula abrasiva. Observou-se que é preciso entender o efeito da interação entre eventos para relacionar os parâmetros topográficos da referência com o método de controle da simulação.

No tópico 4.3 são mostrados quatro métodos para estudar o efeito de superposição das indentações. Observou-se que, a partir de um determinado nível de superposição, a interação entre os eventos leva a remoção de matéria. Nessa região de interesse, foi obtida uma relação que representa o efeito da superposição dos eventos considerando a força normal das indentações. Constatou-se que em somente o método superposição em linha com quantidade variável de eventos é viável para o estudo da superposição de indentações.

O método encontrado para utilizar a resposta obtida no estudo da superposição de indentações no processo de simulação do rolamento é apresentado na seção 4.4. O processo de simulação do deslizamento paralelo das partículas abrasivas está mostrado no tópico 4.5.

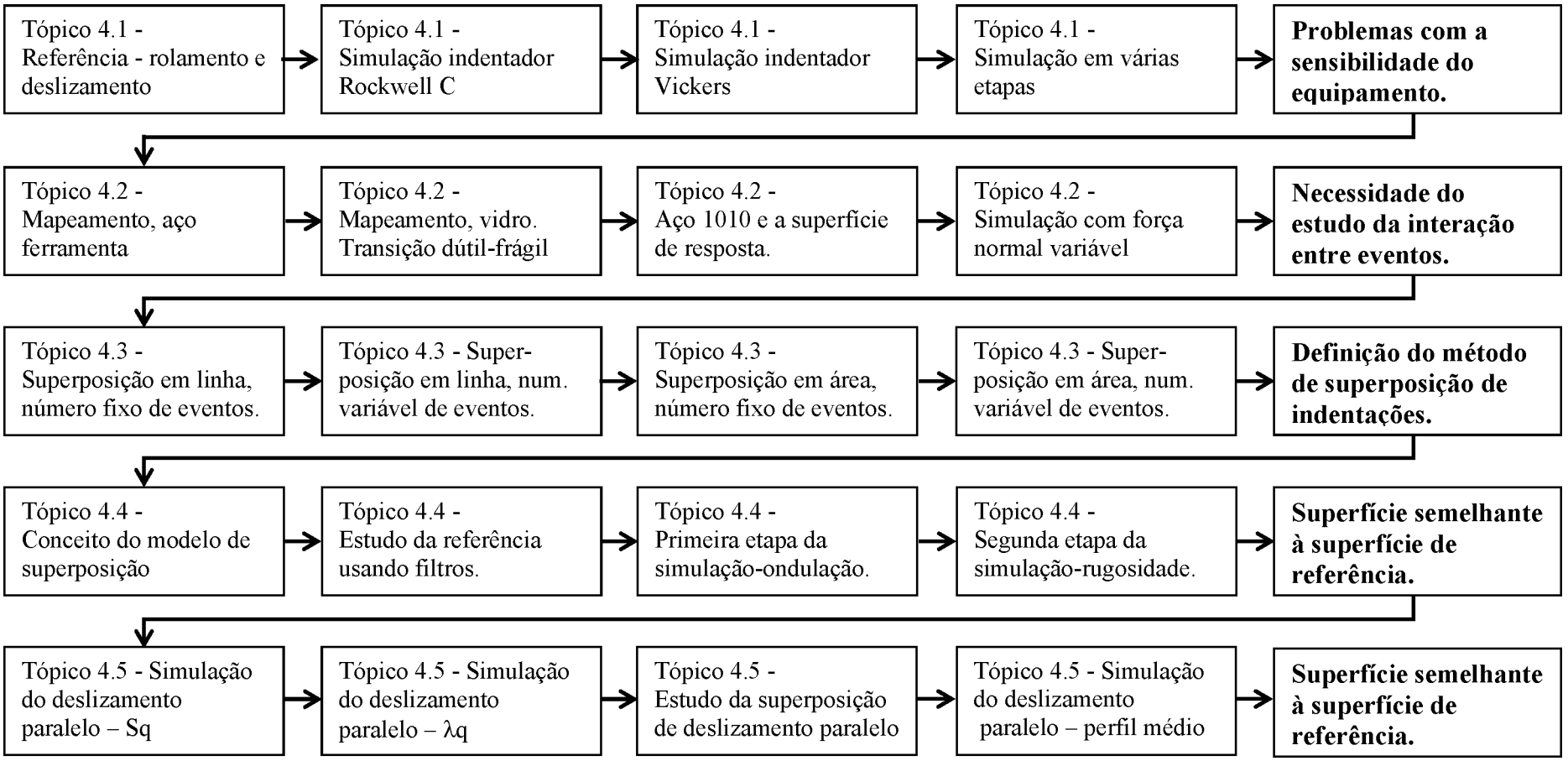
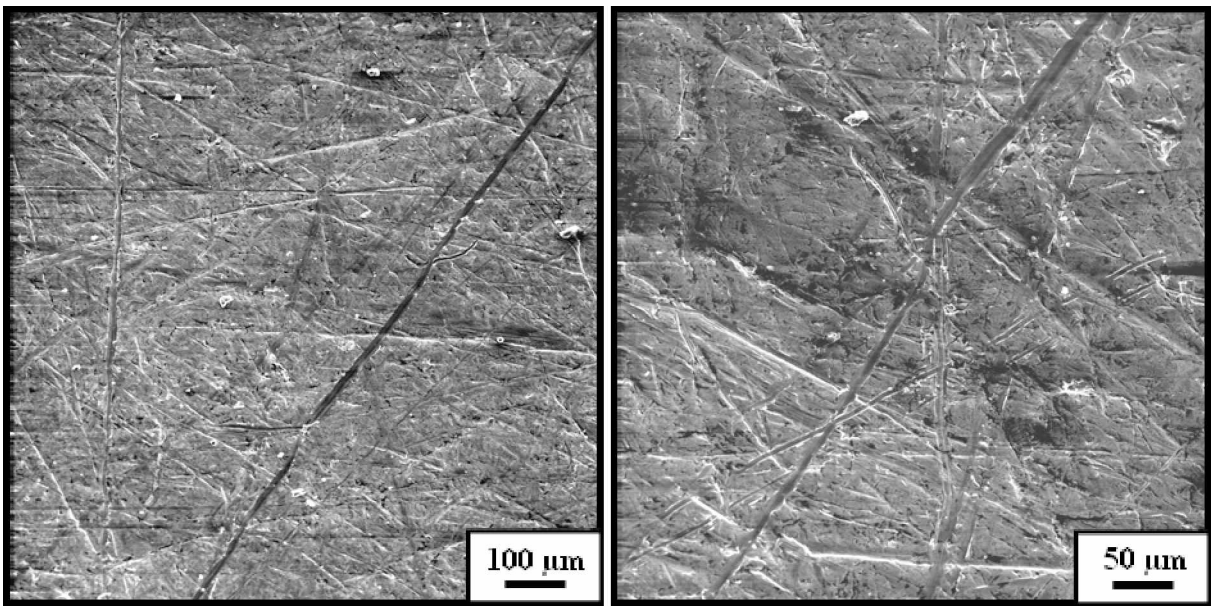


Figura 4.1 – Etapas realizadas no estudo da simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo.

4.1 Resultados preliminares

A Fig. 4.2 apresenta a superfície típica produzida no abrasômetro LTM, em amostras de aço ferramenta. As condições de ensaio utilizadas foram: força normal 6,94 N, abrasivo areia normal brasileira número 30 (tamanho entre 0.6 a 1.2 mm) e contra-corpo de borracha. Observa-se a ocorrência tanto de riscos/sulcos quanto de indentações sobre a superfície desgastada. Esse fato representa o regime misto de desgaste, ou seja, ocorrência de deslizamento e rolamentos das partículas abrasivas na interface de desgaste. Os riscos/sulcos são de comprimentos variados e direções aleatórias, como esperado nestas condições de desgaste.



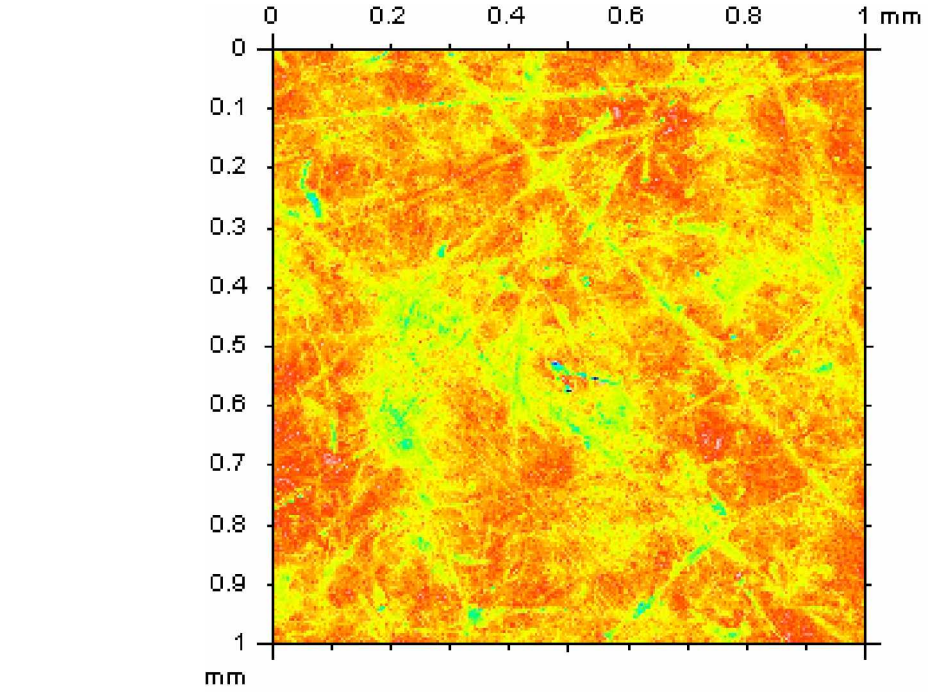
-a- -b-

Figura 4.2 – a- Superfície desgastada; b- Ampliação. MEV, inclinação 30°.

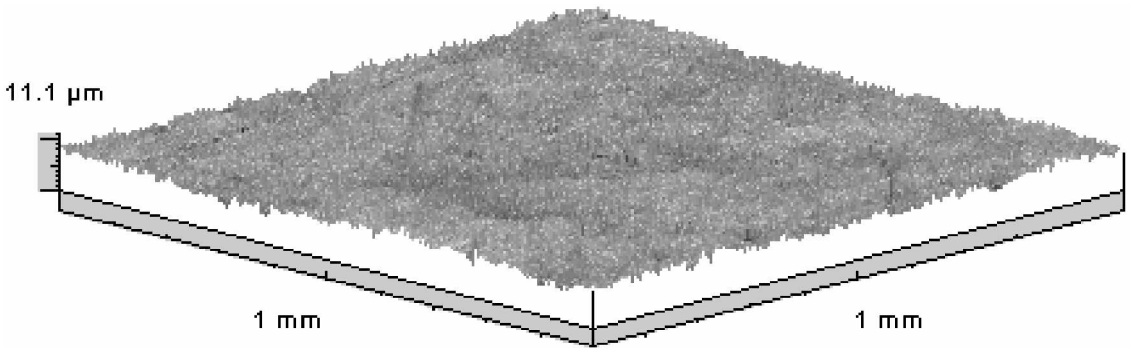
Foi realizada a quantificação visual da ocorrência de deslizamento e indentação nas imagens mostradas na Fig. 4.2. Na ampliação mostrada na Fig. 4.2b observa-se a maior quantidade de deslizamentos que de indentações. A contagem mostrou uma proporção aproximada de 90 para 10 na relação deslizamento/indentação.

A Fig. 4.3a-b mostram a topografia obtida via interferometria laser dessa superfície.

O parâmetro de rugosidade Sq é bastante representativo da variação das alturas da topografia. Por esse motivo, o Sq foi inicialmente adotado como valor da profundidade média dos eventos presentes na abrasão. O valor do Sq da referência é 0,81 µm.



-a-

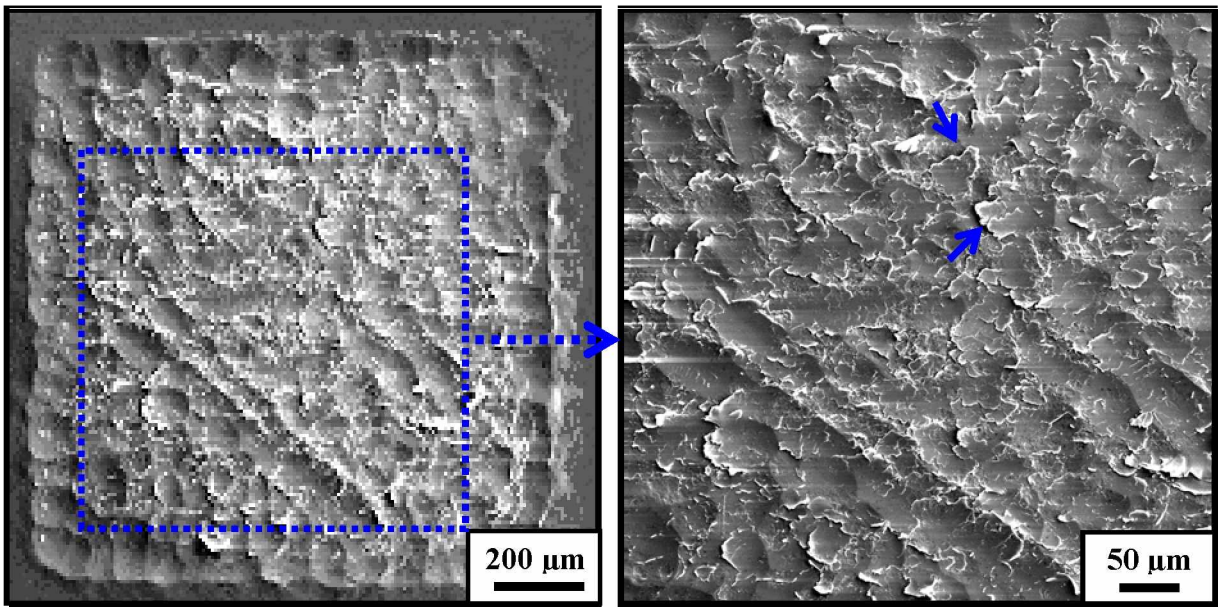


-b-

Figura 4.3 – a- Topografia da superfície desgastada; b- Perspectiva, IL.

O macro-simulador permite o controle direto da profundidade dos eventos. Dessa forma, o primeiro ensaio de simulação foi realizado fixando a profundidade dos eventos de acordo com o Sq da referência, ou seja, 0,8 µm. Utilizou-se a configuração deslizamento aleatório com indentação aleatória para o posicionamento dos eventos (Fig. 3.14). Foi definida a proporção 90 % para a ocorrência de deslizamentos e 10% para indentações. A quantidade de eventos foi fixada em 2000 para uma área de trabalho de 1 por 1 mm. A velocidade de deslizamento foi mantida em 0,200 mm/s na direção do deslizamento. Foi utilizado o indentador Rockwell C.

A Fig. 4.4 mostra a superfície gerada neste ensaio.



-a- -b-

Figura 4.4 - a- Superfície obtida na simulação; b- Ampliação; Indentador Rockwell C. MEV.

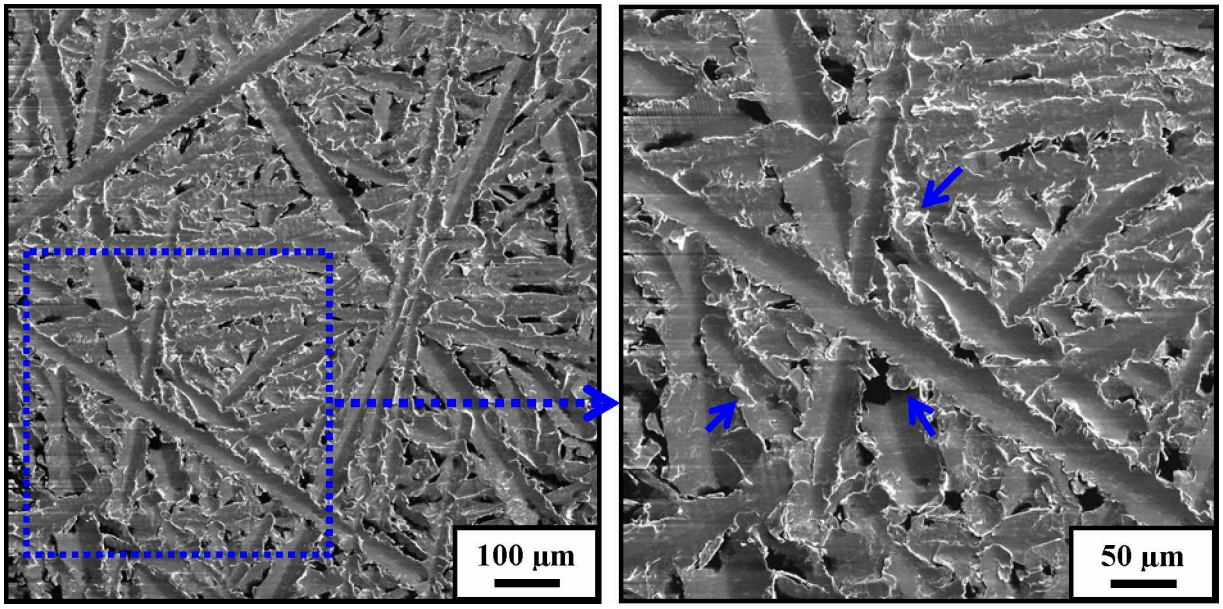
Foi observado na Fig. 4.4 que o raio de ponta e a forma cônica do indentador Rockwell C gerou eventos mais arredondados que os encontrados na referência (Fig. 4.2). Assim, a superfície obtida no processo de simulação descrito (Fig. 4.4) é diferente da referência. A deformação plástica decorrente das interações pode levar a remoção de material, como mostrado no detalhe da Fig. 4.4b.

Para aproximar a forma dos eventos da simulação aos encontrados na referência, foram realizados novos testes utilizando o indentador Vickers. Os testes foram realizados até 3000 eventos, sendo 10 % destes indentações, em seis etapas de 500 eventos. Os demais parâmetros foram mantidos iguais ao da simulação anterior. A Fig. 4.5 mostra o aspecto da superfície após a realização dos 3000 eventos.

Os detalhes apontados na Fig. 4.5b indicam que a intensa deformação plástica pode levar ao destacamento de material.

Na Fig. 4.5, é nítida a predominância de riscos/sulcos. A quantidade de eventos foi suficiente para cobrir a área de trabalho.

Os eventos mostrados na Fig. 4.5 são semelhantes aos encontrados na referência (Fig. 4.2). Sugere-se que a forma do indentador Vickers resulte em eventos com forma mais próxima a dos eventos encontrados na superfície da referência, em comparação com o indentador Rockwell C. Entretanto, os eventos mostrados na Fig. 4.5 têm dimensão maior que os da referência.



-a- -b-

Figura 4.5 – a- Superfície produzida na simulação; b- Ampliação. Indentador Vickers. MEV.

A Fig. 4.6 mostra a variação da força resultante da interação entre o indentador e a superfície da amostra. Neste gráfico a força foi representada pelas componentes nos eixo x, y e z. Ao final de cada etapa da simulação, foi calculada a força média e o desvio padrão.

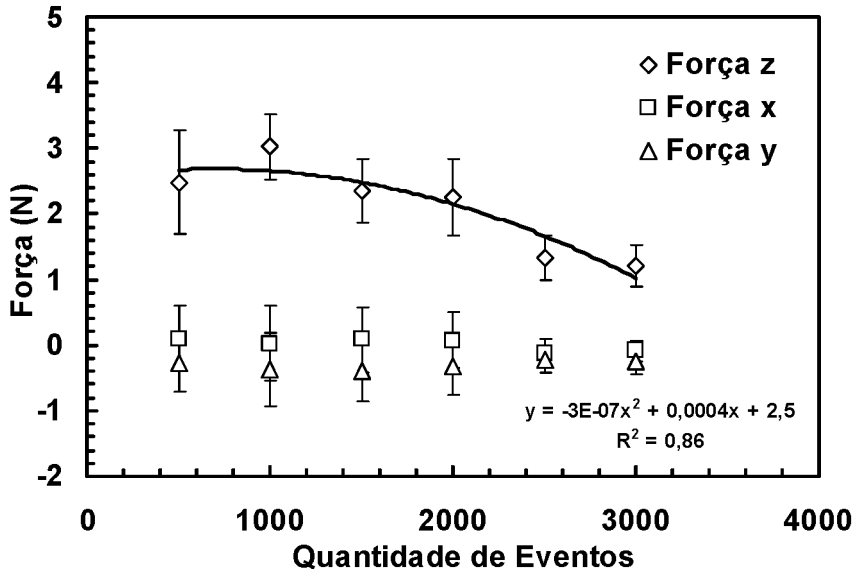


Figura 4.6 - Componentes da força média adquiridas durante as etapas da simulação.

As forças x e y médias variam em torno de zero, em todas as etapas. A configuração utilizada nesse ensaio foi o deslizamento com direção aleatória combinada com indentação em posição aleatória. Os resultados mostrados no gráfico da Fig. 4.6 são valores médios de

500 eventos. A aleatoriedade da direção do movimento dos deslizamentos tende a anular o somatório das componentes x e y medidas durante o ensaio.

O desvio padrão da força normal ao plano da amostra (força z) é significativo, indicando erros relativos de até 32 % (Fig. 4.6). Em uma primeira análise, esses erros foram considerados característicos do ensaio, uma vez que este foi realizado mantendo a profundidade dos eventos constante. Ao manter a profundidade constante ao longo do deslizamento, a interação com eventos anteriores promove a variação da força normal.

Observa-se, também, que a força z média diminuiu à medida que aumenta a quantidade de eventos, representando um decréscimo de até 3,5 vezes no valor da força normal média. Essa diminuição pode ser justificada pelo fato da referência do posicionamento do indentador ser externa à área de trabalho. O processo de obtenção do plano de referência foi detalhado no tópico 3.3.1. Dessa forma, a superfície foi alterada durante o ensaio e parte do material foi removido, diminuindo a profundidade efetiva de atuação do indentador a partir de 2000 eventos (Fig. 4.6).

Na tentativa de minimizar esse efeito, foi modificado o processo de execução da seqüência de eventos. A diminuição sistemática do valor da força normal média foi atribuída ao referenciamento externo à área de trabalho da profundidade do evento. O controle da simulação foi modificado para que o referenciamento da profundidade do evento ocorresse na posição definida para a realização do evento, ou seja, dentro da área de trabalho. Em outras palavras, o indentador aproxima-se até encontrar a superfície da amostra na posição da indentação ou na posição de início de deslizamento. Assim que o indentador reconhece a superfície da amostra, faz-se a indentação com a profundidade definida, nesse caso 0,8 μm (de acordo com o Sq da referência).

Usando esse novo processo de aproximação, foi realizado um novo teste para analisar o efeito da densidade de eventos nas respostas da força na simulação. Na área de 2 por 2 mm foram feitos 2500 eventos em cinco etapas de 500 eventos. Os demais parâmetros foram os mesmos da simulação anterior. Entre cada etapa foram obtidos a massa da amostra, a topografia da superfície (IL) e o aspecto do mecanismo de desgaste (MEV).

A evolução do mecanismo de desgaste da superfície produzida na simulação em função da quantidade de eventos é apresentada na Fig. 4.7.

Comparando os resultados da simulação com a referência, observa-se que os eventos produzidos na simulação são maiores que na referência. Visualmente, a superfície da simulação apresenta uma suavização à medida que aumenta a quantidade de eventos.

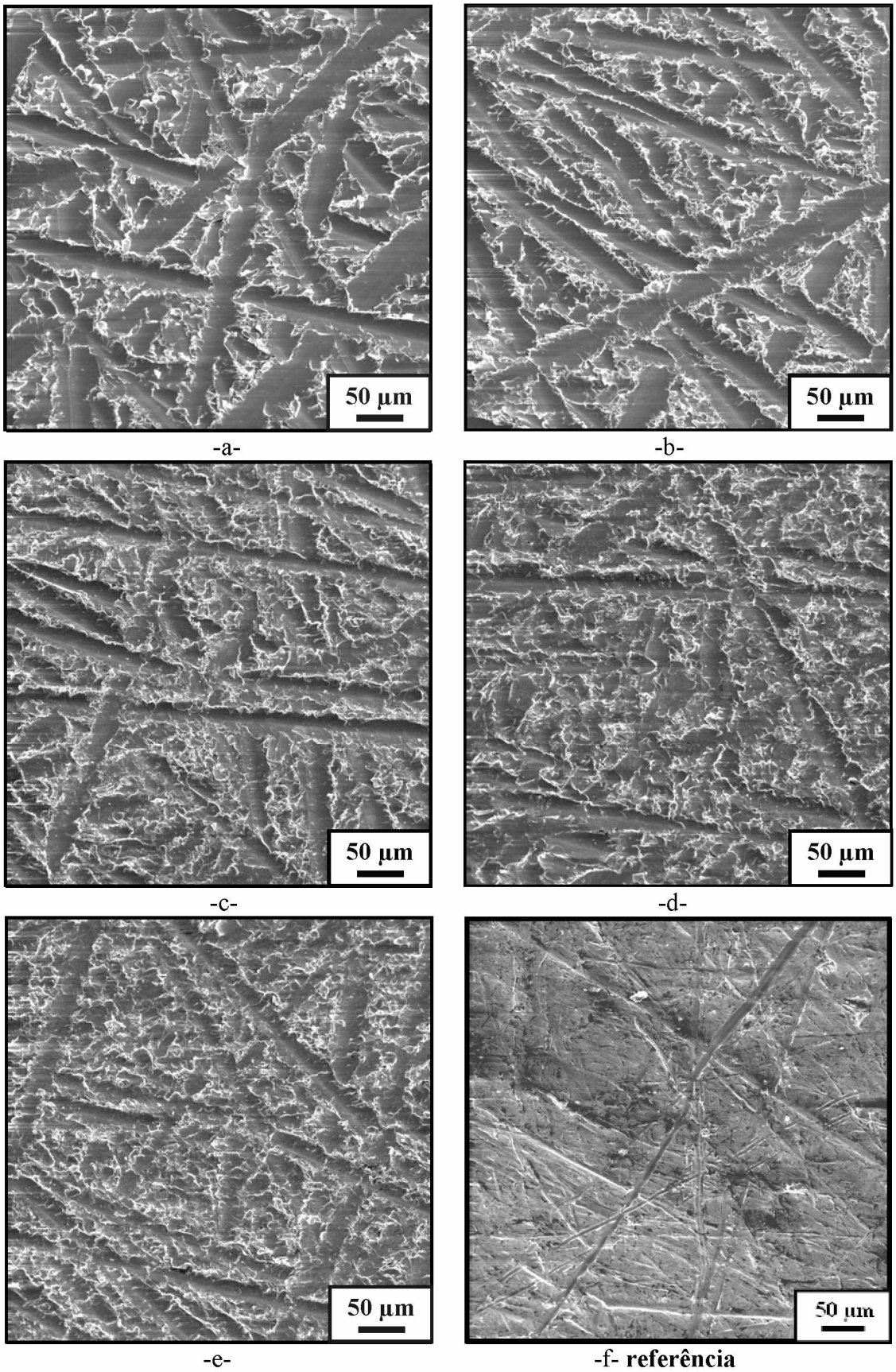


Figura 4.7 - Superfície produzida na simulação. a- 500 eventos; b- 1000 eventos; c- 1500 eventos; d- 2000 eventos; e- 2500 eventos; f- Referência (Fig. 4.2).MEV, inclinação 30º.

Os resultados da quantificação da perda de massa entre cada etapa da simulação estão apresentados na Fig. 4.8.

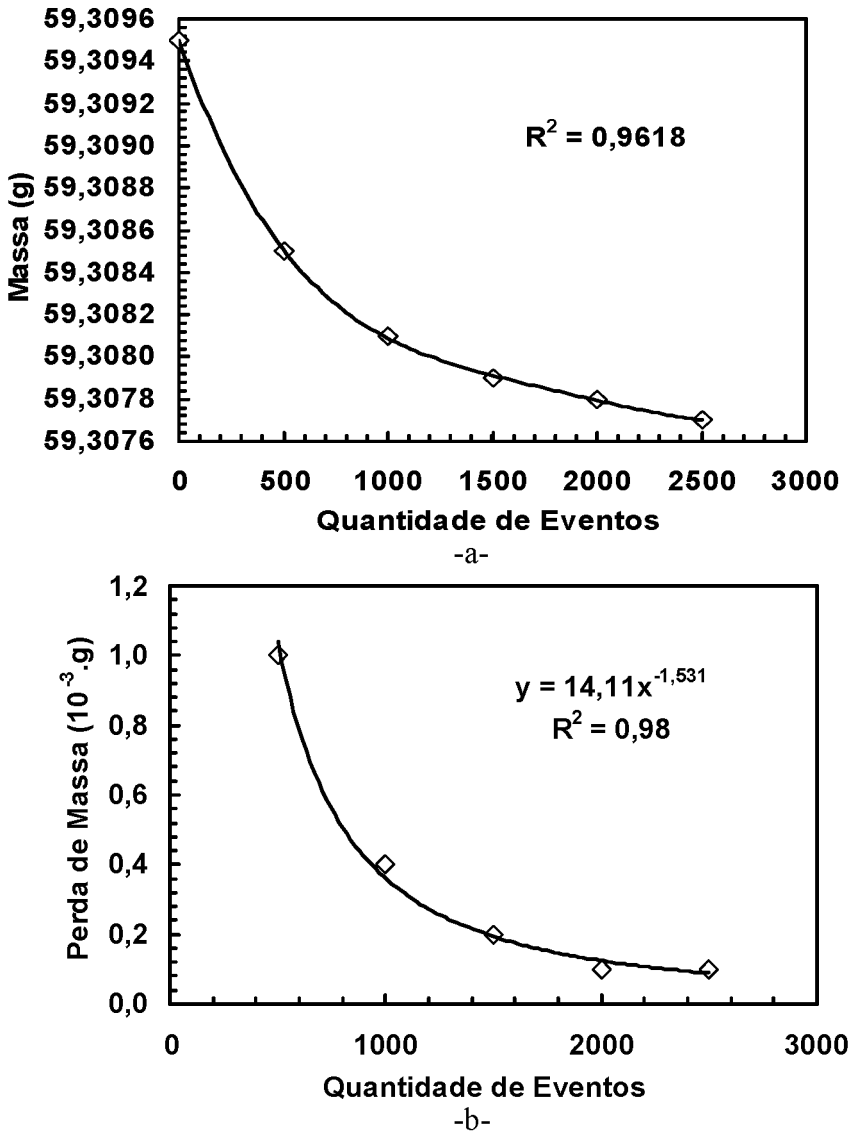


Figura 4.8 - a- Massa medida em função da quantidade de eventos; b- Perda de massa.

O valor da perda de massa diminui com o aumento da densidade de eventos (Fig. 4.8b). A variação da massa foi pequena, principalmente nas últimas etapas da simulação (aproximadamente 0,0001 g). Esse fato levou ao questionamento da sensibilidade da balança utilizada para essa medição, uma vez que a variação da massa esta próxima da resolução da medição. Para efeito de comparação, procedeu-se a medição da perda de volume do material utilizando IL.

O volume de material removido é medido utilizando a borda da área de trabalho como referência da superfície da amostra. Os valores de volume desgastado são apresentados no gráfico da Fig. 4.9a.

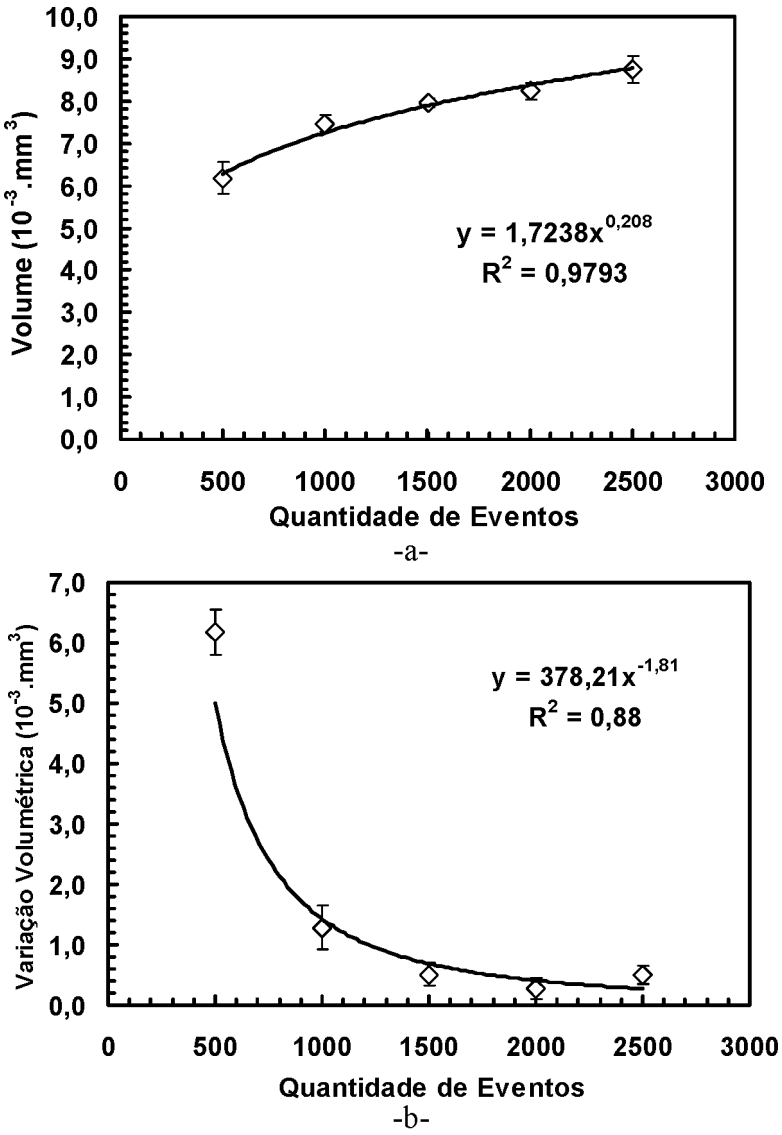


Figura 4.9 - Variação do volume de material retirado da superfície em função da quantidade de eventos.

Assim como na perda de massa (Fig. 4.8b), a variação volumétrica diminui à medida que a densidade de eventos aumenta (Fig. 4.9b). A medição da variação volumétrica via IL é uma boa opção para avaliar o desgaste na simulação.

A rugosidade das superfícies obtidas na simulação foram medidas na região interna à área de trabalho, sem o efeito da borda dessa área. A Fig. 4.10 apresenta os resultados de Sq em função da quantidade de eventos.

A análise da topografia evidenciou que a rugosidade diminuiu com o aumento da quantidade de eventos, como está mostrado no gráfico da Fig. 4.10. O valor do Sq da superfície produzida na simulação está na ordem de 1,8 a 2,6 μm, e não corresponde a rugosidade da referência, 0,81 μm. Entretanto, com o aumento da quantidade de eventos, a rugosidade da superfície produzida na simulação tende a diminuir linearmente.

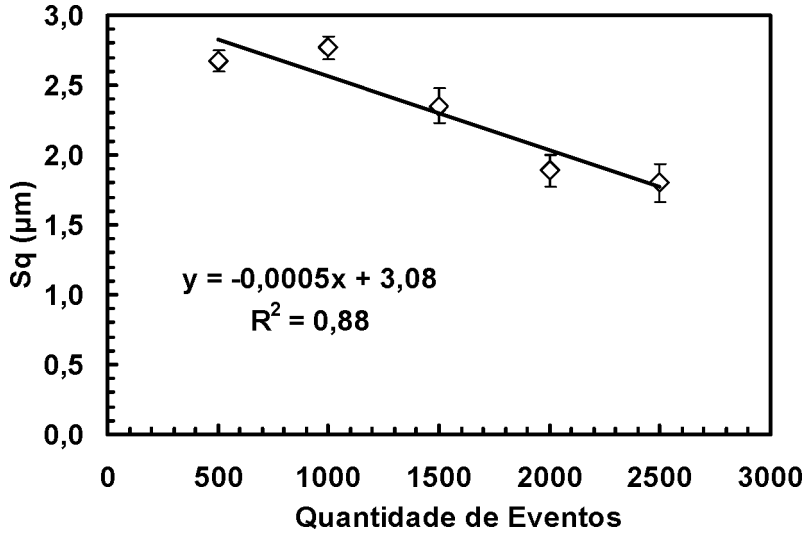


Figura 4.10 – Parâmetro de rugosidade Sq em função da densidade de eventos.

A Fig. 4.7 mostra que a superfície é suavizada à medida que aumenta a densidade de eventos. Essa observação está de acordo com o gráfico da Fig. 4.10, confirmando a análise em função da rugosidade da superfície.

O gráfico mostrado na Fig. 4.11 apresenta a evolução das componentes da força durante o ensaio.

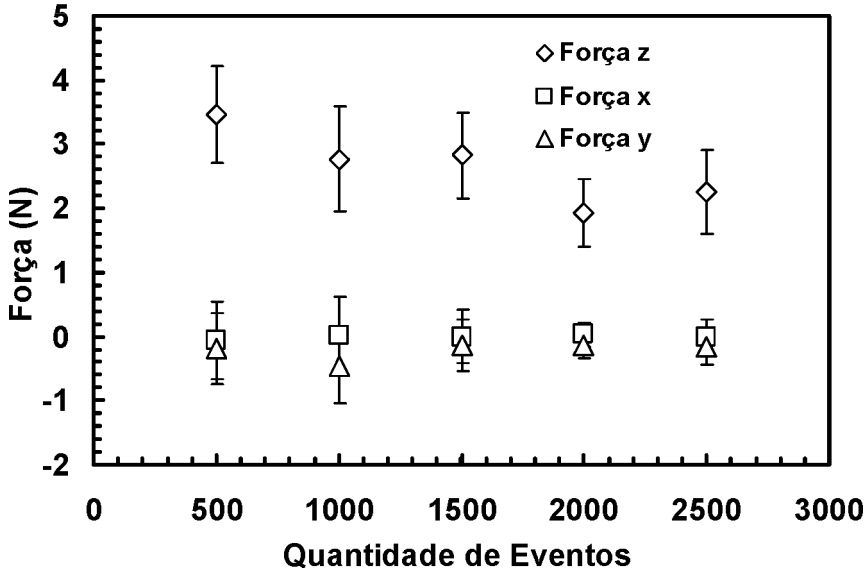


Figura 4.11 - Componentes da força resultante média em função da quantidade de eventos.

A Fig. 4.11 mostra que o processo de apalpamento da superfície antes da realização de cada evento promoveu a redução na tendência de diminuição da força normal para 2,25 vezes. Entretanto, a dispersão dos valores da componente da força em z é considerável. As componentes da força no sentido de x e y não apresentam variação com a quantidade de eventos, e são dispersas em torno de zero. Essa dispersão se deve à aleatoriedade do

movimento do indentador sobre a amostra. O fundo de escala da célula de carga do macro-simulador é 500 N, o que indica que a precisão deste sensor diminui para cargas abaixo de 5 N. De acordo com a curva de calibração desta célula de carga (Anexo I) observa-se que o erro de medição da força é crescente em baixas cargas, estando entre 8 e 17% na faixa de carga onde ocorrem os eventos, o que justifica a dispersão da força no sentido z.

O processo de apalpamento da superfície toma como referência uma carga menor ainda, em torno de 0,98 N (0,1 Kgf), que pode representar um erro de medição de até 42 % (Anexo I). Esta insensibilidade intrínseca do sistema para determinar a superfície antes de cada evento contribuiu para a grande dispersão da força normal medida, e para a variação da dimensão dos eventos observada nas Fig. 4.5 e Fig. 4.7.

Nesse estágio do estudo exploratório nos deparamos com um problema de escala, ou seja, deve-se diminuir a dimensão dos eventos na simulação para representar o desgaste abrasivo. A última análise dos resultados obtidos na simulação mostra que a utilização do macro-simulador em forças ainda menores (menores profundidades) é inviável. Apresentam-se duas possibilidades para a continuidade deste projeto, ambas no sentido de aumentar a precisão da medição para valores menores de força. A primeira é a mudança da célula de carga do macro-simulador por outra com menor fundo de escala. Para o mesmo sistema de aquisição AD/DA, menor fundo de escala representa uma maior resolução na medição da força. A segunda possibilidade é adaptar o equipamento micro-simulador para executar a simulação. Esse equipamento possui maior precisão, tanto em termos de posicionamento e controle do indentador, quanto de medição da força normal.

Decidiu-se pela utilização do micro-simulador porque, além de atender ao requisito de operar em baixo nível de força normal, possui características favoráveis no sentido de melhorar o controle da execução dos eventos.

4.1.1 - Conclusões parciais

- Os resultados preliminares mostraram que a forma do indentador tem forte influência na morfologia da superfície produzida na simulação.
- A semelhança qualitativa entre a superfície produzida pela simulação e a referência pode estar associada à profundidade efetiva dos eventos realizados na simulação.
- Foi observado desgaste no processo de simulação. A melhor forma de medir o desgaste é através da variação volumétrica, obtida nas análises de interferometria laser.

- Os eventos observados na simulação possuem dimensão maior do que os observados na referência
- A metodologia proposta para a realização da simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo via eventos múltiplos é viável. Entretanto, faz-se necessário aumentar a precisão do sistema de leitura de força para que a simulação possa reproduzir fielmente o mecanismo de desgaste da superfície de referência.

4.2 Indentações múltiplas

O micro-simulador é mais preciso em comparação ao macro-simulador. O limite da força é 18 N (1830 gf) nas direções principais de medição, com resolução medida no sistema de aquisição de 0,88 mN. Esta célula de carga tridimensional trabalha com um sistema independente de aquisição, cuja calibração é feita pelo fabricante.

O movimento do indentador é mais preciso, pois é controlado por um transladador piezelétrico (PZT) que movimenta linearmente a distância de 40 μm com resolução de 5 nm. Tanto o sistema de medição da força normal quanto o sistema de translação do indentador são controlados através de uma interface analógica-digital (AD/DA). Essa interface é rápida, e melhora o controle da movimentação do sistema. O resultado da calibração do movimento do PZT é apresentado na Fig. 4.12 e no ANEXO II.

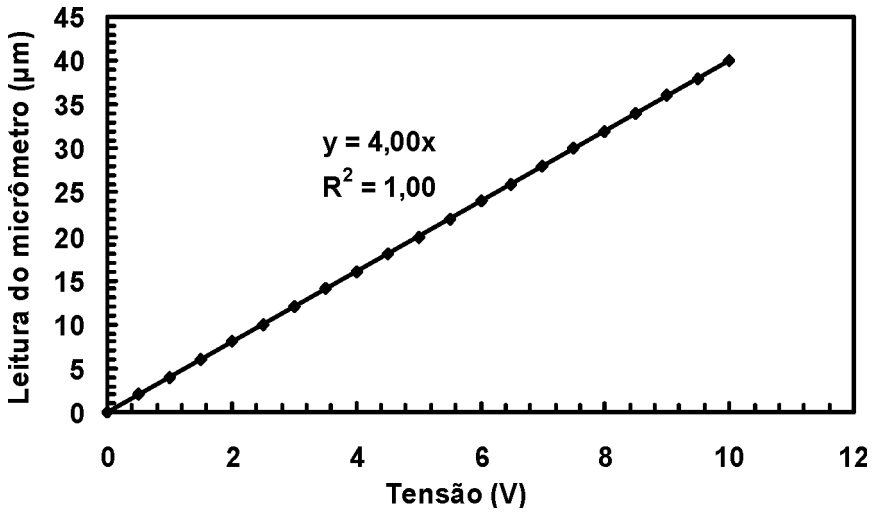


Figura 4.12 – Curva de calibração do movimento do piezo transladador em função da tensão.

O movimento do PZT é perfeitamente linear em toda a faixa de atuação. Essa curva está em função da tensão enviada ao controlador do PZT pelo canal de saída da interface AD/DA.

Outra característica importante do processo de calibração do micro-simulador é a rigidez do sistema, ou seja, qual o nível de deformação do sistema quando solicitado de uma determinada força. Para avaliar a rigidez do sistema foram realizadas interações em condições especiais que levam a deformação do sistema e não dos materiais envolvidos na interação. Foram utilizados uma amostra de alumina (Al_2O_3) e um indentador esférico de nitreto de silício (Si_3N_4) com grande raio (5 mm) para minimizar a deformação relativa à amostra e ao indentador. Dessa forma, assumiu-se que toda a deformação medida nesse processo de interação é relativa ao restante do equipamento. A Fig. 4.13 mostra o gráfico resultante do processo de calibração da rigidez do sistema micro-simulador.

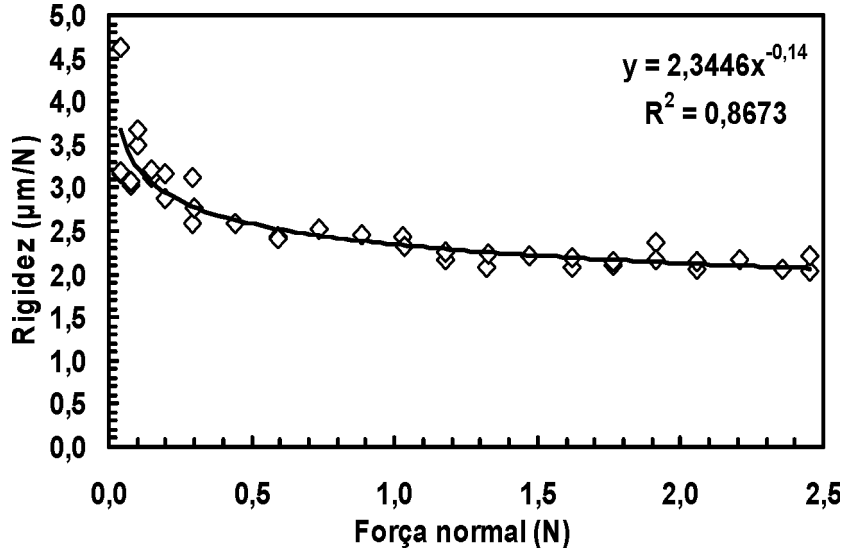


Figura 4.13 – Calibração da rigidez do micro-simulador.

A Fig. 4.13 mostra que o sistema apresenta deformação quando solicitado de uma determinada força. A rigidez do sistema é variável de acordo com o nível de solicitação. Esse resultado afeta a confiabilidade da medição da profundidade do evento durante a interação entre indentador e amostra.

Esse processo de calibração deve ser realizado usando um sensor de posição de alta resolução externo ao sistema de atuação. Infelizmente, não houve recurso suficiente para essa solução durante o período desse doutorado.

A maneira encontrada para contornar esse fato é controlar a intensidade do evento usando a força normal, e associar a força normal à profundidade do evento medida externamente, via interferometria laser. Ou seja, para acessar a profundidade do evento é necessário o trabalho de calibração da profundidade do evento em função da força normal aplicada para cada conjunto material - indentador.

Outro ponto importante nessa fase do trabalho é a opção pelo estudo da indentação múltipla, por ser mais simples do que a mistura de deslizamento e indentações mostrada no tópico anterior.

O primeiro passo foi mapear a resposta da simulação em função dos parâmetros força normal e quantidade eventos. Nesse caso utilizou-se a configuração indentação aleatória na simulação (Fig. 3.10).

-aço ferramenta

A Fig. 4.14 mostra o mapeamento realizado em amostras de aço ferramenta.

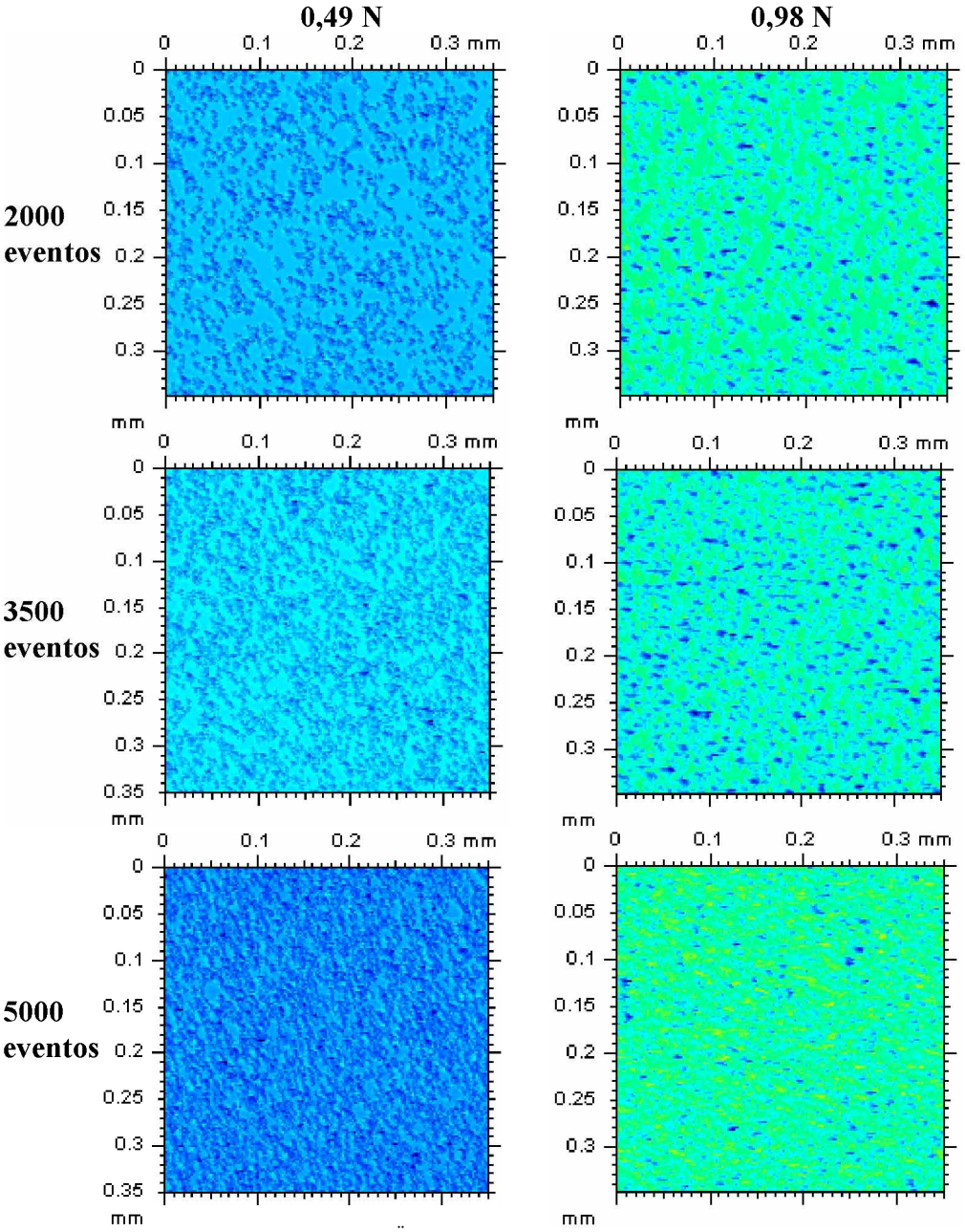


Figura 4.14 – Mapeamento da simulação para o aço ferramenta. Indentação aleatória. IL. Continua.

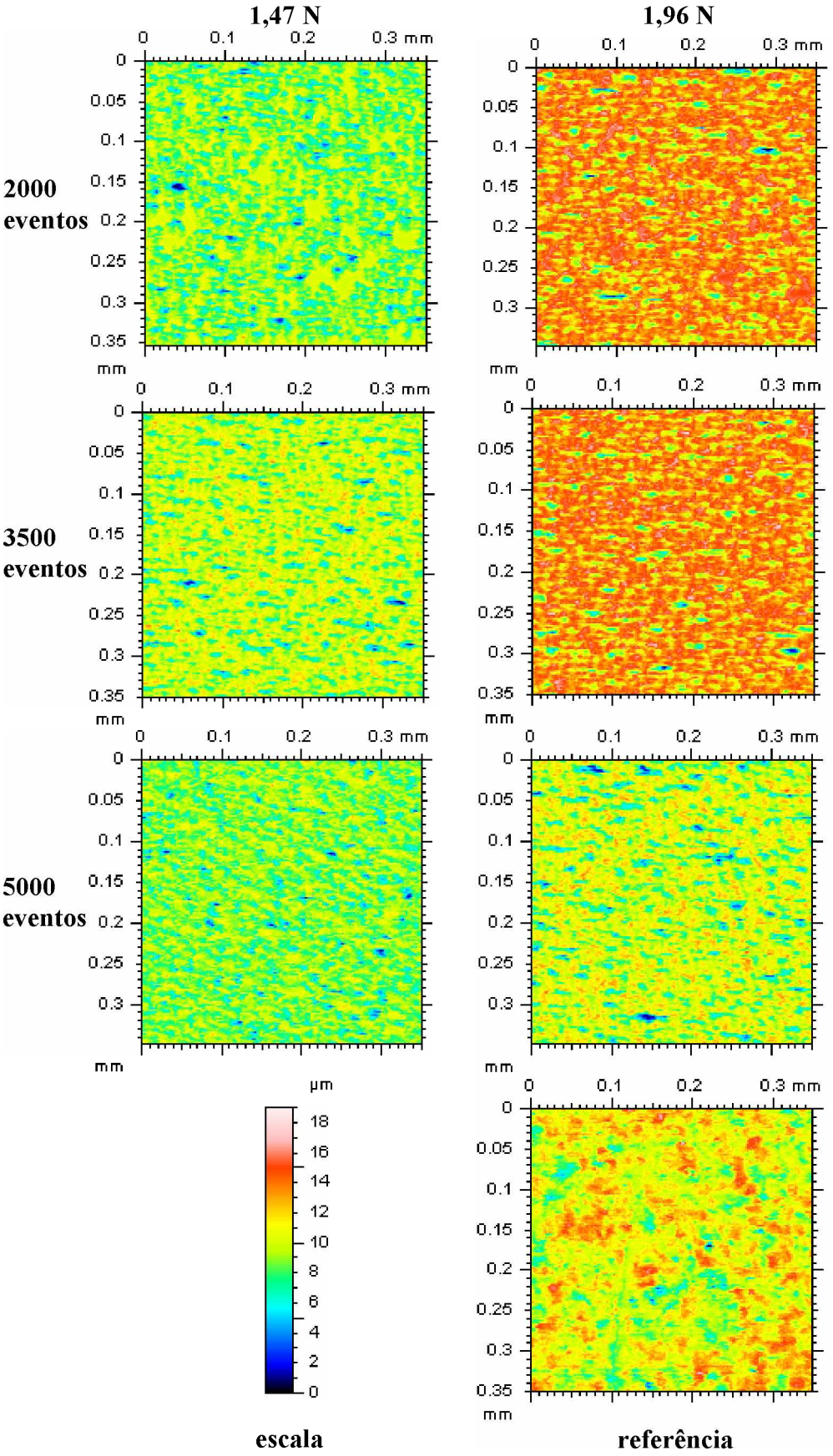
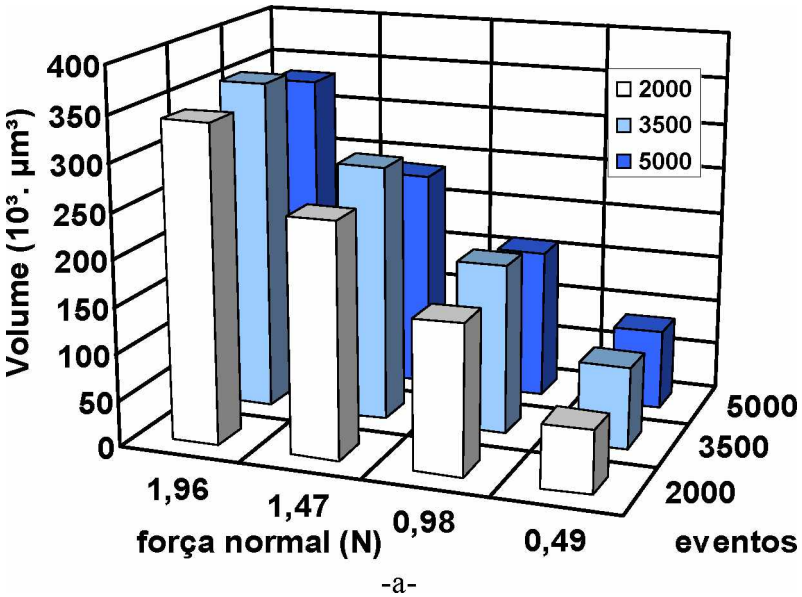


Figura 4.14 – Mapeamento da simulação para o aço ferramenta. Indentação aleatória. IL.

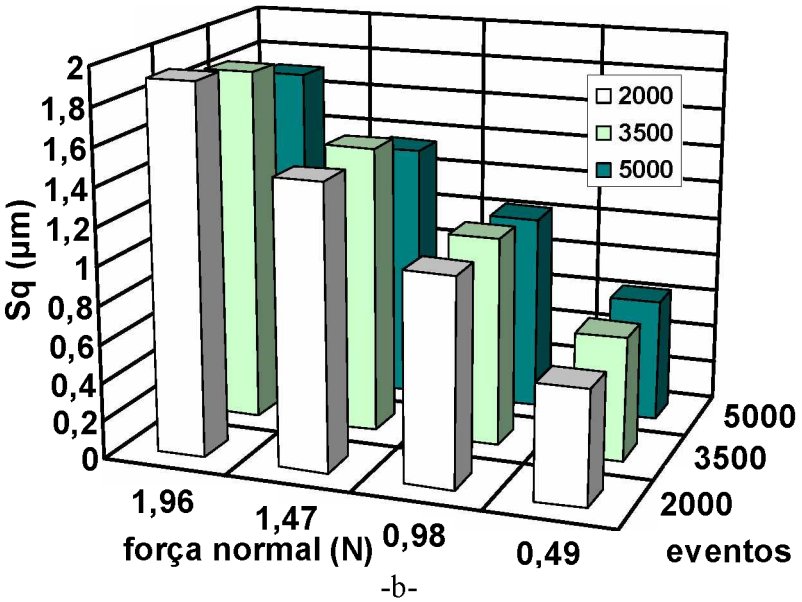
Para efeito de comparação adotou-se como referência a superfície obtida no ensaio de desgaste abrasivo LTM, com carga de 4,11 N e abrasivo carbeto de silício (SiC) de tamanho 220 mesh. Essas condições de ensaio levaram ao rolamento da partícula abrasiva na interface de desgaste.

Visualmente, observa-se que o aumento da quantidade e da força normal dos eventos intensifica a deformação plástica da superfície. Entretanto, o aspecto visual das topografias obtidas na simulação não é parecido com a referência. As marcas de indentação encontradas na referência são maiores que as marcas das superfícies simuladas.

A Fig. 4.15 mostra o resultado do mapeamento em termos de volume removido e de Sq.



-a-



-b-

Figura 4.15 – Resultado do mapeamento: a- Volume dos vales; b- Sq.

O volume removido na simulação foi medido usando borda da área de trabalho como referência da superfície da amostra. Assim, o volume dos vales em relação à superfície da amostra compreende o material deformado e o material removido devido às sucessivas interações. A Fig. 4.15a mostra que, para a mesma quantidade de eventos, o volume aumenta em função da força normal das indentações. Essa variação representou um aumento no valor do volume de até 410% em relação à força normal. Em relação à quantidade de eventos a variação no valor do volume não foi tão significativa, representando um aumento de 31% em função da quantidade de eventos para a força normal 0,49 N. Para a força normal 1,96 N o valor do volume permanece praticamente constante em função do aumento da quantidade de eventos.

O Sq foi medido dentro da área de trabalho, sem influência das deformações na borda da área de trabalho. No gráfico da Fig. 4.15b, observa-se que a força normal afeta fortemente o valor do Sq, para a mesma quantidade de eventos. Essa influência é de 222% para as simulações realizadas com 2000 eventos. Com relação ao parâmetro quantidade de eventos observa-se a variação no comportamento do valor do Sq. Para valores baixos de força normal (0,49 e 0,98 N) o valor do Sq aumenta em função da quantidade de eventos. Esse aumento representa a variação de 8,4% no valor de Sq. Em valores mais altos de força normal o Sq diminui com o aumento da quantidade de eventos. Para 1,96 N o valor do Sq diminui 11,6% em função do aumento da quantidade de eventos.

O gráfico da Fig. 4.16 mostra a variação dos valores de Sq das superfícies obtidas na simulação do aço ferramenta. Para efeito de comparação o Sq da referência (1,82 μm), está apresentado no gráfico da Fig. 4.16.

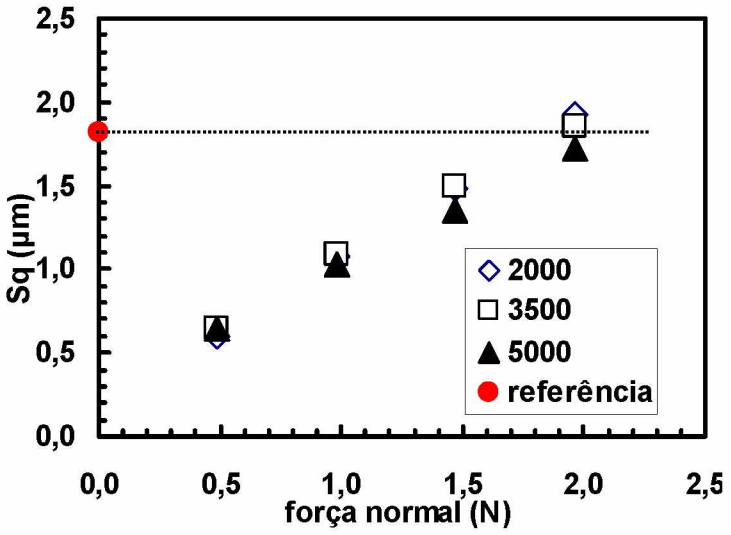


Figura 4.16 – Comparação da referência com o Sq.

O valor do Sq da referência está próximo ao das superfícies simuladas com força normal 1,96 N. Entretanto, a Fig. 4.14 mostra que visualmente estas superfícies não são semelhantes.

-vidro sodo-cálcico

O mesmo método de mapeamento da resposta da simulação em função dos parâmetros força normal e quantidade de evento foi realizado em amostras de vidro. A Fig. 4.17 apresenta esse mapeamento.

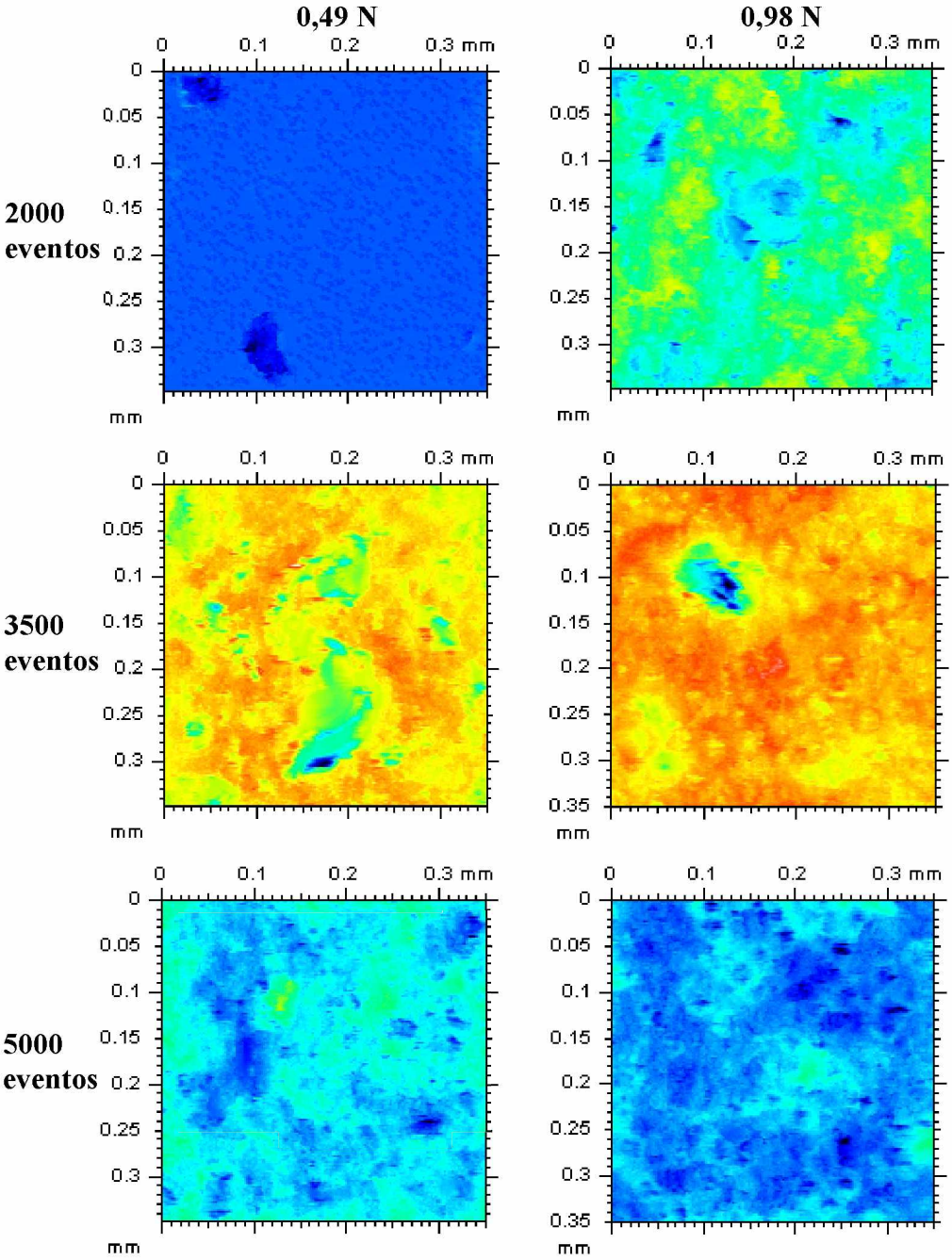


Figura 4.17 – Mapeamento da simulação para o vidro. Indentação aleatória. IL. Continua.

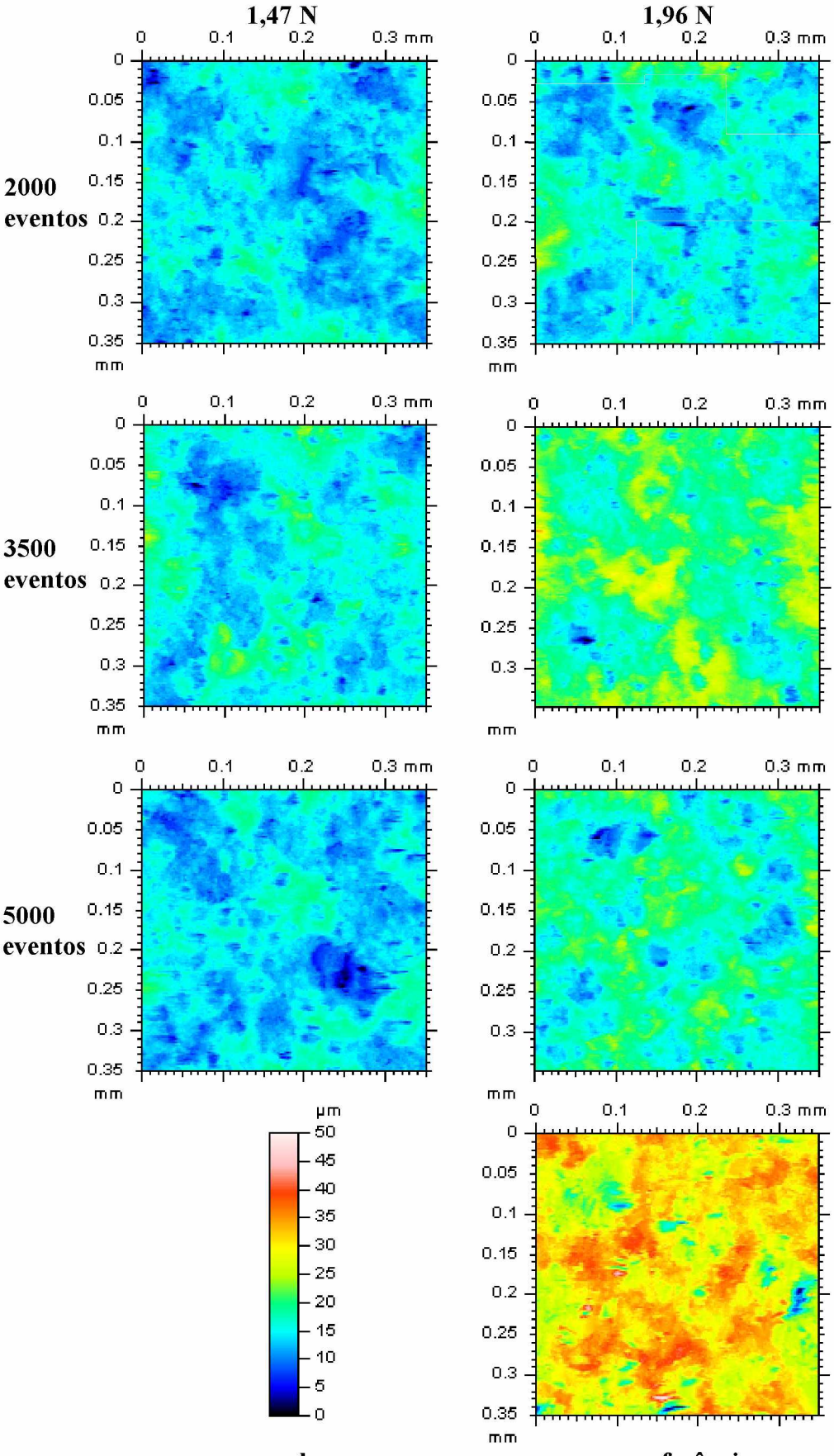


Figura 4.17 – Mapeamento da simulação para o vidro. Indentação aleatória. IL.

A referência mostrada na Fig. 4.17 foi obtida no ensaio de desgaste abrasivo LTM, com carga de 4,11 N e abrasivo carbeto de silício (SiC) de tamanho 220 mesh. Essas condições de ensaio levaram ao rolamento da partícula abrasiva na interface de desgaste.

Observa-se, na maioria dos casos, que o mecanismo de remoção de matéria foi a propagação de trincas e o estilhaçamento da superfície, característico de comportamento frágil. Na simulação com 2000 eventos e força normal 0,49 N houve a deformação plástica na maior parte da área de trabalho, característica do comportamento dútil. Esse fato motivou a realização de novos ensaios de simulação com menores valores de força normal e quantidade de evento. As superfícies resultantes desses ensaios estão apresentadas na Fig. 4.18.

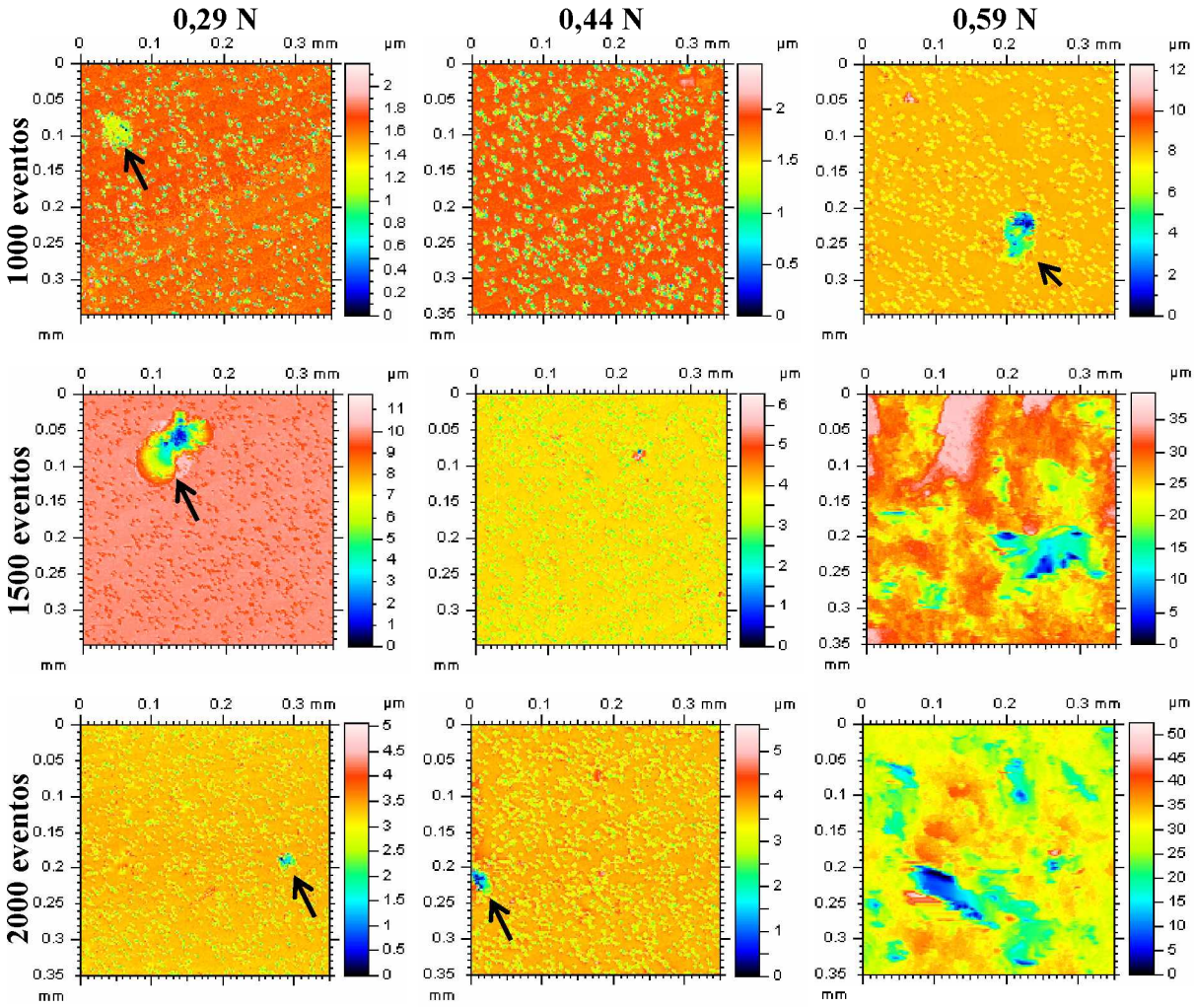


Figura 4.18 – Mapeamento da simulação para o vidro em valores menores de força normal e quantidade de eventos. Indentação aleatória. IL.

Os estilhaçamentos apontados na Fig. 4.18 mostram que, independentemente do valor da força normal, a proximidade das indentações pode induzir ao comportamento frágil do vidro, onde a propagação de trincas leva a remoção de material. Mesmo na condição de baixa

força normal (1500 eventos e 0,29 N - Fig. 4.18) a concentração de eventos induziu a fragilidade do sistema. Entretanto, na maioria das situações apresentadas na Fig. 4.18 observam-se indentações dúteis. O aumento da força normal e da quantidade de eventos (1500 – 2000 eventos e 0,59 N - Fig. 4.18) levou ao predomínio do comportamento frágil na simulação.

No mapeamento do vidro também foi possível medir o volume desgastado na simulação usando como referência da superfície da amostra na borda da área de trabalho. O resultado do volume medido nesse mapeamento está apresentado na Fig. 4.19.

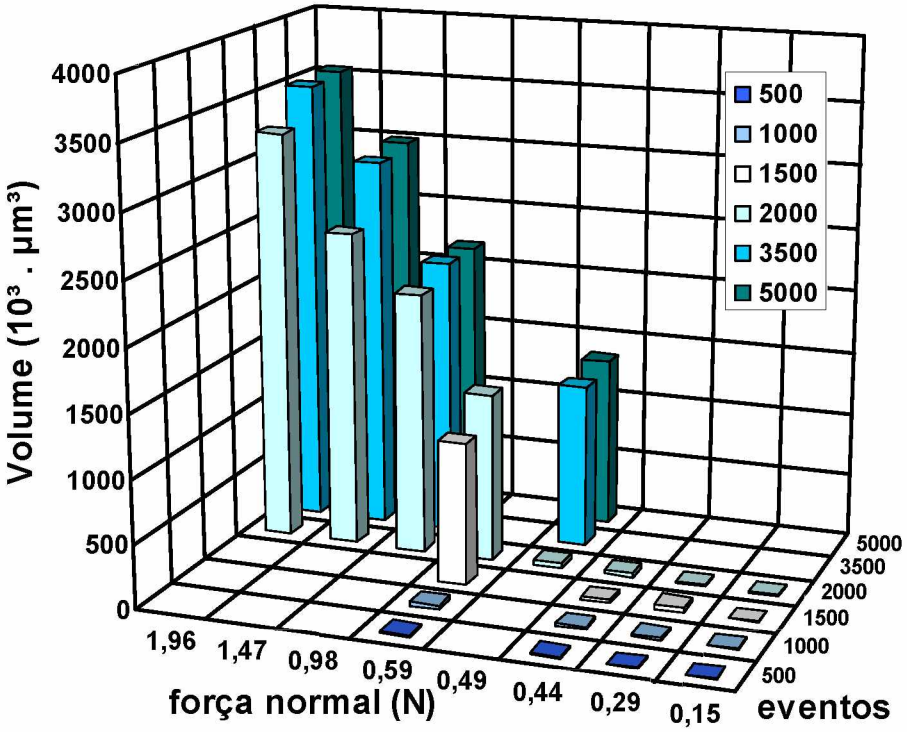


Figura 4.19 – Volume desgastado, mapeamento da simulação no vidro.

O gráfico da figura 4.19 mostra claramente a diferença de comportamento na simulação do vidro quando há o predomínio do regime frágil ou o predomínio do regime dútil. O comportamento frágil do vidro leva a um maior nível de remoção de matéria. Na transição de comportamento dútil-frágil o volume desgastado apresenta uma grande variação, de até 2700% no valor do volume dos vales.

Na região de comportamento frágil observa-se que a força normal exerce grande influência nos valores de volume. O aumento da força normal leva ao aumento do valor do volume desgastado, esse aumento foi de até 173,4%. Em relação ao parâmetro quantidade de eventos o volume desgastado apresenta um leve aumento. A influência da quantidade de eventos no volume desgastado foi quantificada em até 20,1%.

O parâmetro de rugosidade Sq foi medido na região dentro da área de trabalho, sem a influência da borda da área de trabalho. A Fig. 4.20 apresenta os valores de Sq encontrados no mapeamento do vidro.

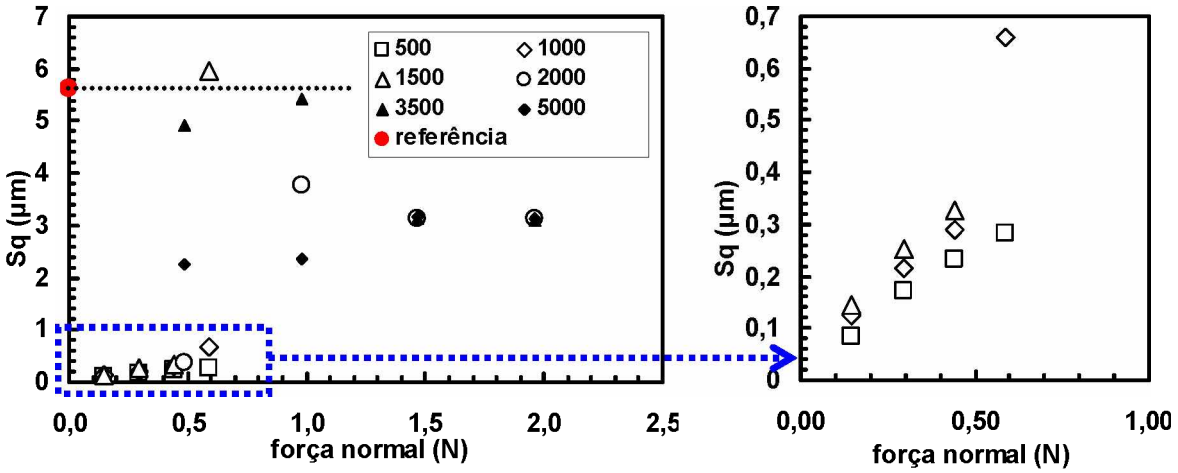


Figura 4.20 – Mapeamento do vidro: a- Todos os valores de Sq medidos; b- Ampliação na região de baixa força normal – regime dútil.

A Fig. 4.20b mostra que, no comportamento dútil, o parâmetro força normal tem forte influência sobre os valores de Sq. O comportamento frágil da superfície influencia a topografia de maneira complexa, Fig. 4.20a. Nos ensaios em regime frágil não houve uma correlação clara entre os parâmetros de rugosidade e os parâmetros de controle da simulação.

É interessante notar que para os valores de força normal 1,47 N e 1,96 N os valores de Sq permaneceram praticamente idênticos, em torno de 3 µm (Fig. 4.20a).

Estudos sobre esclerometria de materiais frágeis mostram que a partir de um determinado valor de força normal, parâmetros como largura do suco, dureza ao risco, energia específica e quantidade de trincas permanecem constantes (Broese; Maan; Veldkamp, 1975; de Mello, 1983; Nogueira; de Mello, 1988a; Laurent; de Mello 1991). Isso se deve à transição de abrasão dútil para abrasão frágil. Esse fenômeno é normalmente conhecido como efeito escala. A Fig. 4.20 mostra que os ensaios de simulação em materiais frágeis também apresentam tal efeito, pois para as forças 1,47 e 1,96 N o parâmetro de rugosidade Sq permaneceu independente da quantidade de eventos realizados e da força normal.

-aço 1010 (ASTM)

No mapeamento dos parâmetros de simulação da amostra de aço 1010, adotou-se um método para determinar a superfície de resposta dos valores de Sq e identificar os parâmetros que determinam um valor de Sq igual ao da referência. A Fig. 4.21 mostra o aspecto visual de algumas das superfícies obtidas nesse método e da referência.

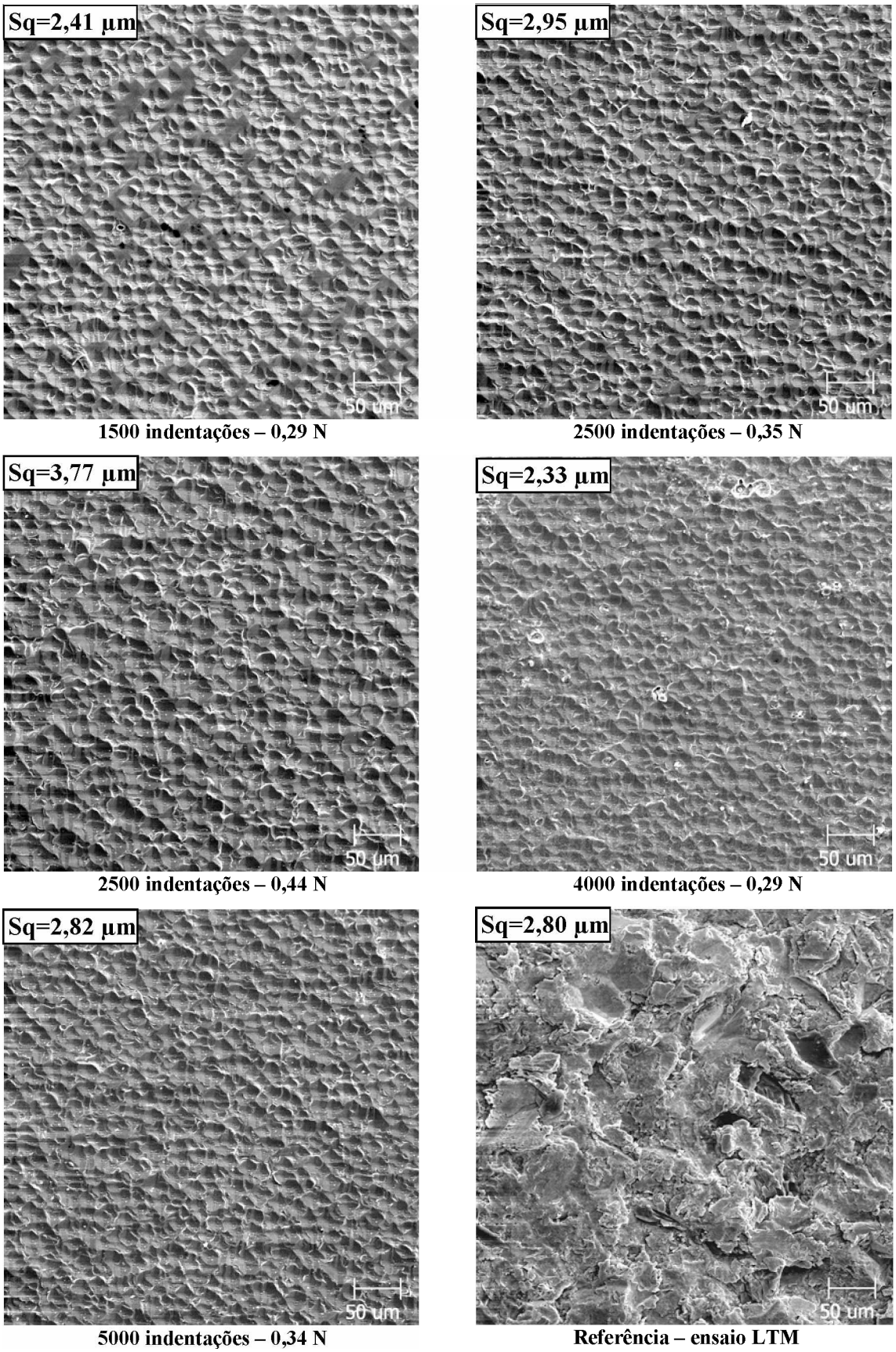


Figura 4.21 – Aspecto visual das superfícies em função dos parâmetros de simulação. Comparação com a referência. Aço 1010 (ASTM). MEV.

A referência apresentada na Fig. 4.21 foi obtida no abrasômetro LTM, em condições que favorecem o rolamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. As condições de ensaio foram: carga de teste 11,4 N; contra-corpo de ferro fundido; abrasivo areia número 100 (peneira 0,15 a 0,3 mm). Esse ensaio resultou em uma superfície com valor de Sq igual a 2,8 μm.

Na Fig. 4.21 observa-se que as superfícies obtidas na simulação são homogêneas, em comparação com a referência. Mesmo com valores de Sq próximos, os eventos encontrados na referência são maiores que os obtidos na simulação.

Inicialmente foram realizados quatro ensaios usando os seguintes parâmetros de teste: 2000 eventos; 5000 eventos; 0,29 N e 0,98 N. Interpolando esses resultados em função da força normal e da quantidade de eventos foi definida a primeira superfície de resposta. Analisando essa primeira superfície, observou-se que os valores de Sq mais próximos da referência (2,8 μm) ocorrem em valores força normal abaixo de 0,49 N. Dessa forma, a primeira superfície de resposta foi utilizada para determinar os parâmetros para o próximo ensaio. Os gráficos referentes à superfície de resposta dos valores de Sq em função dos parâmetros da simulação e a curva de nível para o Sq igual a 2,8 μm estão apresentados na Fig. 4.22.

O método usado para o mapeamento do efeito dos parâmetros da simulação para o aço 1010 consistiu em analisar a superfície de resposta do Sq a cada novo ensaio para definir o ensaio seguinte. Assim, nesse mapeamento foi possível descrever uma curva de nível na superfície de resposta para o Sq igual ao da referência (Fig. 4.22b).

Esse método permitiu, em poucos ensaios, encontrar os valores de força normal e quantidade de eventos que produziram uma superfície com o mesmo valor de Sq da referência. A curva de nível no valor de Sq 2,8 μm é praticamente independente da variação da quantidade de eventos (Fig. 4.21).

O polinômio mostrado na Eq. 4.1 descreve os valore de Sq da superfície de resposta com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,994.

$$Sq = -0{,}057 + 13{,}98Fn - 6{,}10.10^{-4}Qe - 2{,}88.10^{-4}Fn.Qe - 6{,}47Fn^2 + 9{,}71.10^{-8}Qe^2 \qquad (4.1)$$

Onde Qe é a quantidade de eventos e Fn é a força normal.

O gráfico apresentado na Fig. 4.22a mostra que o principal parâmetro que influencia no comportamento do Sq na simulação é a força normal dos eventos. Esse fato também foi observado no mapeamento para o aço ferramenta (Fig. 4.15b).

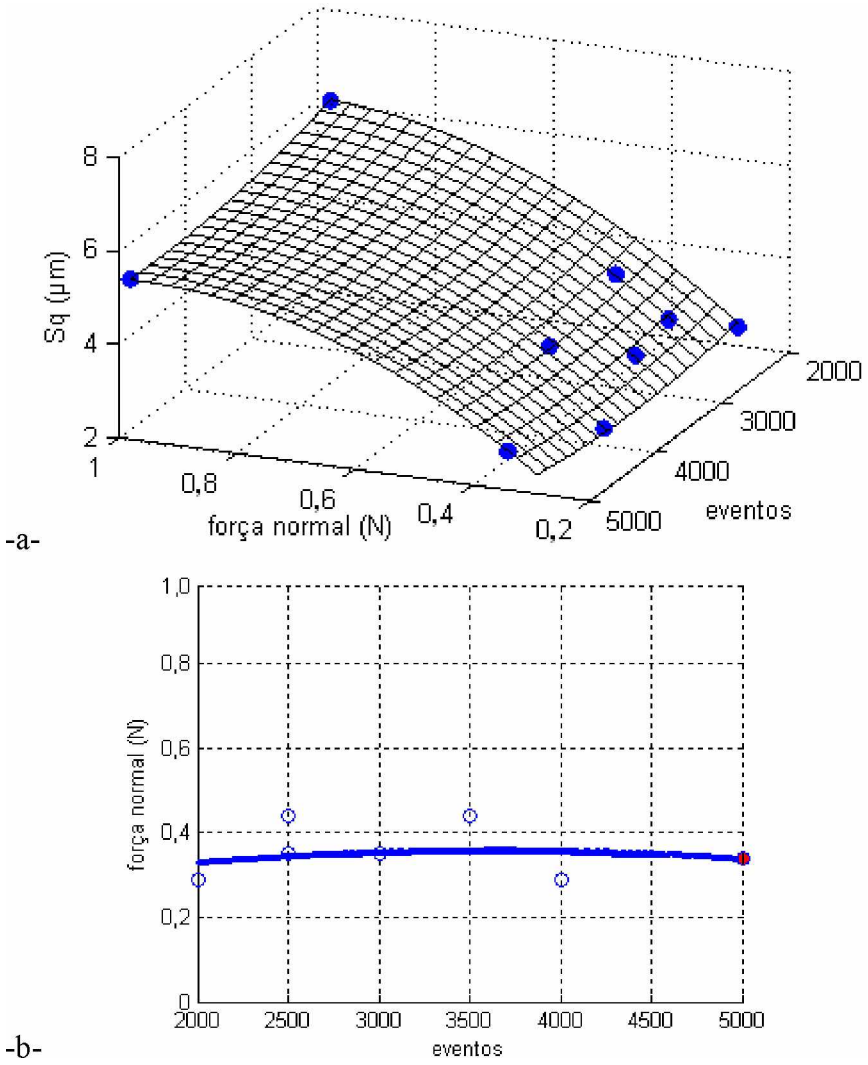


Figura 4.22 – Mapeamento do aço 1010. a- Superfície de resposta do Sq; b- Curva de nível para o Sq igual a 2,8 µm.

Analisando a curva "isorugosa", mostrada na Fig. 4.22b, observa-se que são possíveis inúmeras configurações de simulação que resultem no Sq próximo ao da referência. As diferentes condições de simulação mostradas na Fig.4.21 geraram superfícies com valor de Sq próximo ao da referência. Entretanto, a Fig. 4.21 mostra que o tamanho dos eventos realizados na simulação não apresenta variações, o que leva ao aspecto homogêneo das superfícies geradas na simulação.

A topografia da referência mostrada na Fig. 4.21 apresenta eventos de diferentes tamanhos. Essa heterogeneidade está associada à variação do tamanho das partículas atuantes na interface de desgaste. Como foi demonstrado no modelo de Williams e Hincyca (1992a; 1992b) o tamanho da partícula influencia na força normal que esta imprime sobre as superfícies móveis. Por analogia, observa-se que o aspecto visual homogêneo das superfícies obtidas na simulação deve-se ao fato de a força normal usada na simulação ser constante.

O processo abrasivo está associado à atuação de partículas de tamanho diferentes. A dimensão destas partículas abrasivas pode ser representada por uma distribuição granulométrica. Dessa forma, a força que as partículas abrasivas exercem sobre a superfície da amostra pode ser descrita por uma distribuição de valores de força. É razoável pensar na simulação usando força normal variável. Os diferentes valores de força normal simulam as diferenças de tamanho da partícula na abrasão. Nessa etapa do trabalho, sugere-se a variação do valor da força normal ao longo do ensaio de simulação.

A primeira abordagem do estudo da simulação com força variável utilizou valores aleatórios para a força normal dos eventos realizados. A força normal da indentação está diretamente relacionada à sua dimensão. Para determinar essa relação, foram realizadas indentações sobre a superfície da amostra em diferentes forças, consequentemente diferentes tamanhos. Estes eventos são isolados, ou seja, não sofrem o efeito da deformação ou de tensões residuais de outros eventos próximos. A Fig. 4.23 mostra os resultados da dimensão do evento isolado, nesse caso lado da área da indentação, em função da força normal usada para gerar esse evento.

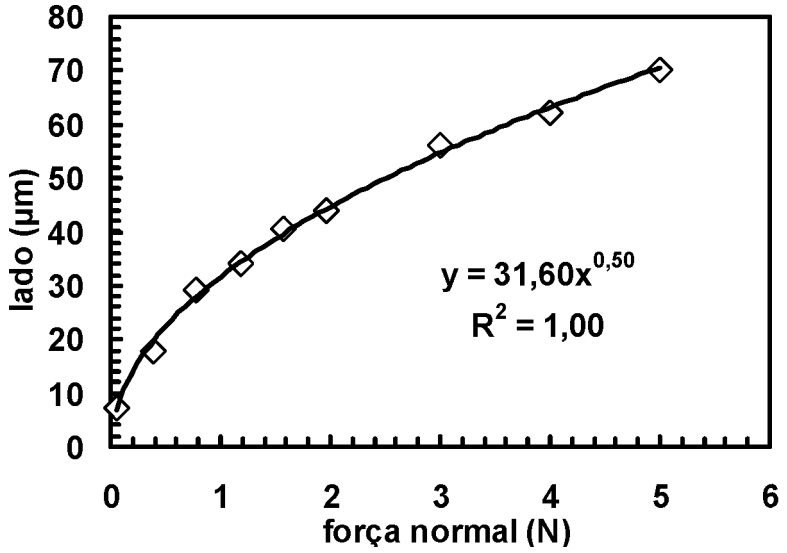
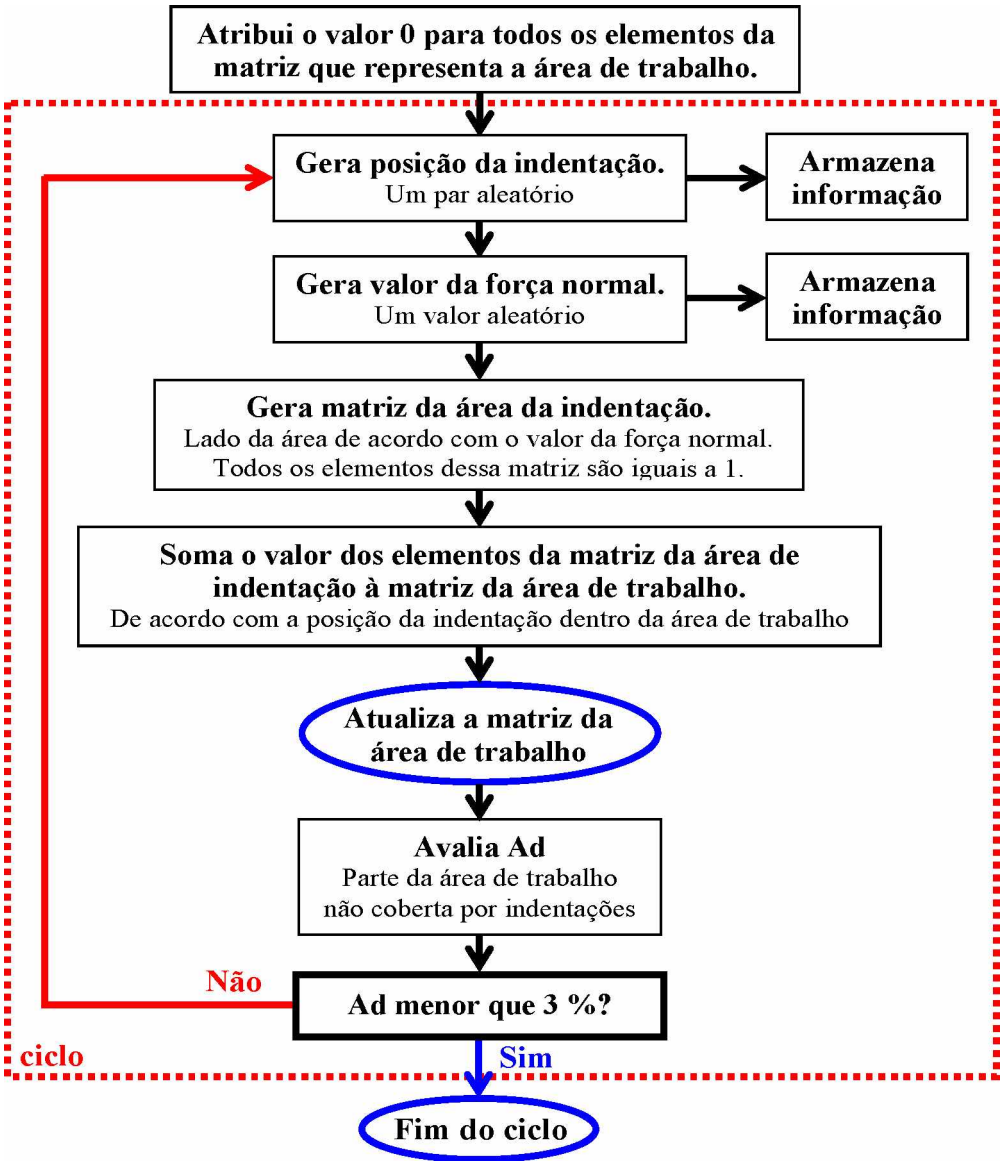


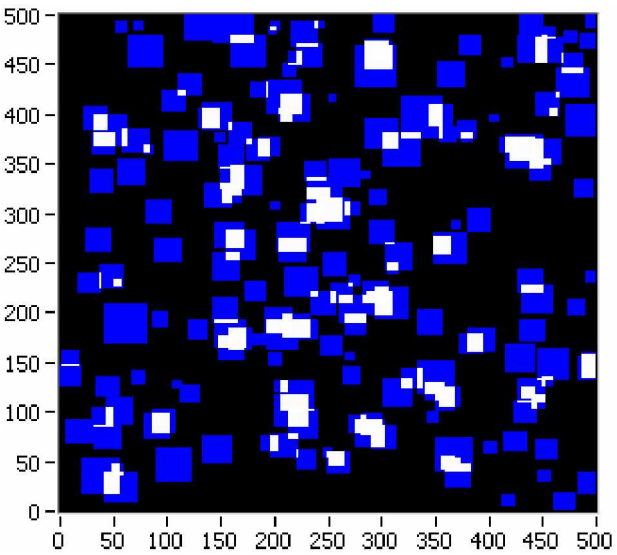
Figura 4.23 - Relação entre força normal e lado de indentação. Vickers. Aço 1010.

A relação entre lado e força normal da indentação pode ser descrita matematicamente através da curva apresentada na Fig. 4.23.

No tópico 3.3.4 (Fig. 3.19) foi apresentado o algoritmo do programa que avalia o percentual da área de trabalho coberto por indentações. Este algoritmo foi readaptado para a simulação com força normal variável. A relação apresentada na Fig. 4.23 foi utilizada nesse processo de geração do valor de força normal. A Fig. 4.24 apresenta esse novo algoritmo e o gráfico que representa a área de trabalho gerado nesse programa.



-a-



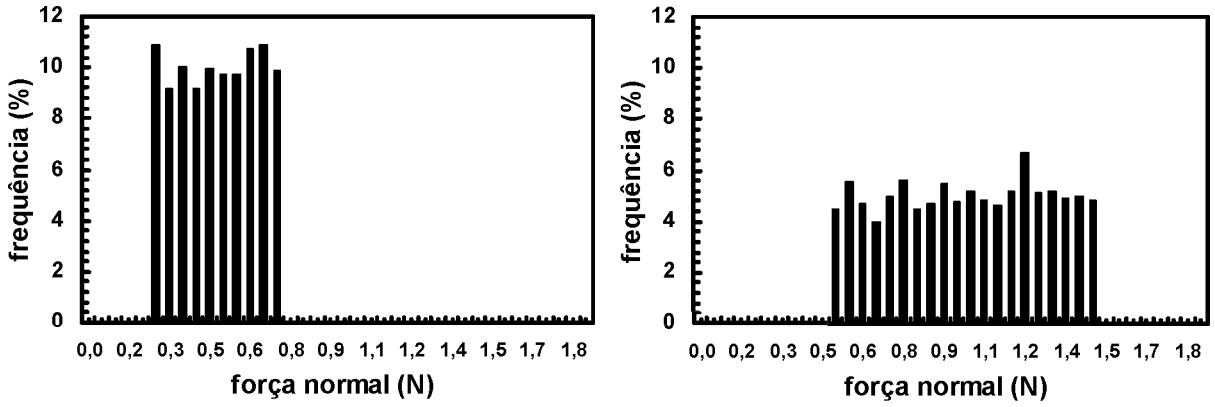
-b-

Figura 4.24 – a- Novo algoritmo para determinar a área ocupada por indentações de força normal variável; b- Gráfico gerado nesse programa com 200 eventos.

Um exemplo do gráfico gerado nesse programa é apresentado na Fig. 4.24b para 200 eventos com força normal variando entre 0,04 e 1,96 N. Cada valor de força normal corresponde a um valor de área de indentação de acordo com a relação mostrada na Fig. 4.23. Posicionando a área da indentação dentro da matriz da área de trabalho é possível prever quanto da área de trabalho está coberta por indentações. Na Fig. 4.24b estão representados em azul as áreas de indentações isoladas, e em branco a superposição das indentações. Essa técnica foi utilizada para avaliar a quantidade mínima necessária para cobrir de indentações a área de trabalho na simulação com força normal variável.

Os primeiro ensaios de simulação com força variável foram realizados utilizando um gerador de números aleatórios de padrão uniforme para definir os valores da força normal dos eventos. Esse tipo de gerador foi apresentado na seção 3.3.2 (Fig. 3.8 e 3.9). Define-se o limite máximo e mínimo para a escolha do valor de força aleatório. Essa é a faixa de força normal para a execução dos eventos da simulação.

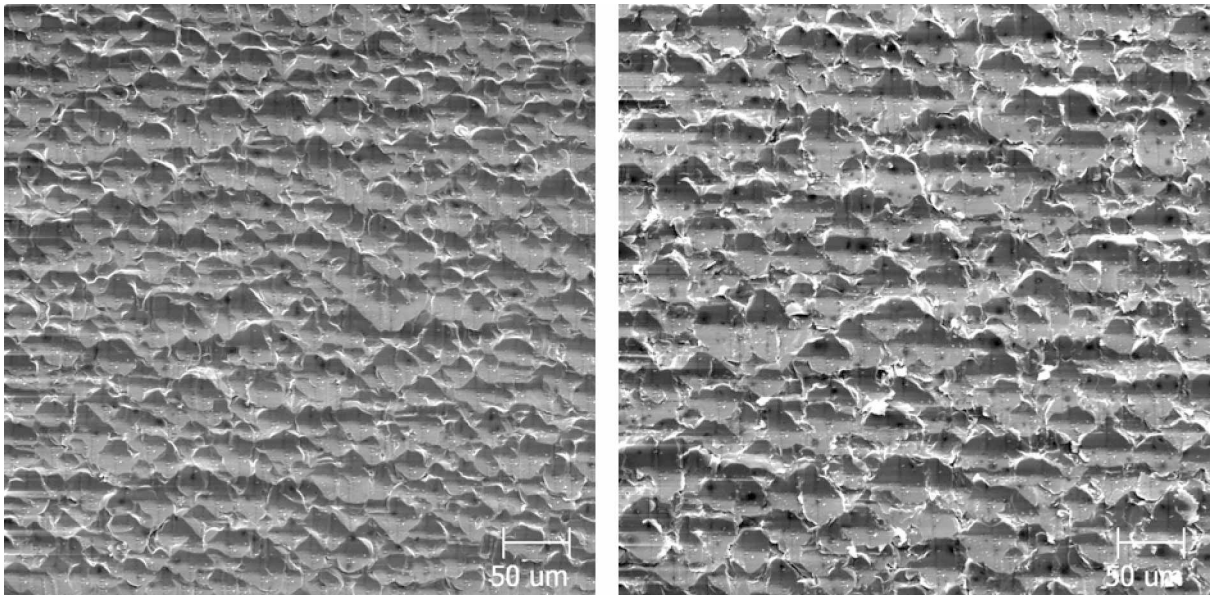
O programa mostrado na Fig. 4.24 define, antes da execução da simulação, as posições e a respectiva força normal dos eventos. Os valores de força normal podem ser representados em histogramas que são chamados de perfil de força. O perfil de força destaca a forma da distribuição dos valores de força normal dentro da faixa escolhida. A Fig. 4.25 mostra dois histogramas que representam os valores da força normal de 2500 eventos em faixas de força normal diferentes.



-a- -b-

Figura 4.25 – Perfil de força; distribuição uniforme: a- de 0,24 a 0,73 N; b- de 0,49 a 1,47 N.

Os perfis de força apresentados na Fig. 4.25 mostram distribuições uniformes, ou seja, que não há a tendência de concentrar valores em torno de uma média. A Fig. 4.26 mostra as superfícies resultantes da simulação realizada com os perfis de força apresentados na Fig. 4.25.



-a- -b-

Figura 4.26 – Simulação com 2500 indentações. Área de trabalho 0,5 x 0,5 mm. Força normal: a- de 0,24 a 0,73 N; b- de 0,49 a 1,47 N. MEV.

Como esperado, a variação da força normal favorece a heterogeneidade da superfície resultante. Na superfície obtida na simulação usando o perfil de força normal mostrado na Fig. 4.25b, observa-se a maior variação no tamanho dos eventos gerados, Fig. 4.26b. Esse fato está associado ao perfil de força utilizado nesse ensaio cobrir a faixa de força que vai de 0,49 a 1,47 N. O perfil com faixa mais estreita e de menor valor, 0,24 a 0,73 N (Fig. 4.25a), obteve uma superfície mais homogênea (Fig. 4.26b). Destes ensaios conclui-se que a morfologia da superfície produzida na simulação está associada, não só ao efeito do posicionamento, mas também à força normal dos eventos.

Além da distribuição uniforme, é possível gerar valores aleatórios seguindo outras distribuições. Nessa tese também foram estudados perfis de força gerados usando distribuição normal. Outros tipos de distribuição para o perfil de força são apresentados na Fig. 4.27a e b.

O gerador utilizado para determinar os perfis da Fig. 4.24 a e b usa uma distribuição do tipo normal. Ou seja, os números gerados são aleatórios, mas tendem a se concentrar em um determinado valor (moda). O histograma da Fig. 4.27a representa 1500 eventos em torno de 0,98 N, gerados entre 0,049 e 1,96 N. A Fig. 4.27b mostra o perfil correspondente a 5000 eventos em torno de 0,49 N, no intervalo de 0,049 a 3,92 N.

Perfis de força cuja distribuição favoreçam cargas menores necessitam de um maior número de eventos para cobrir a área de trabalho. O perfil com maior faixa de força (Fig. 4.27b) promove maior heterogeneidade no tamanho dos eventos gerados na simulação, consequentemente no aspecto visual da superfície obtida, Fig. 4.27d.

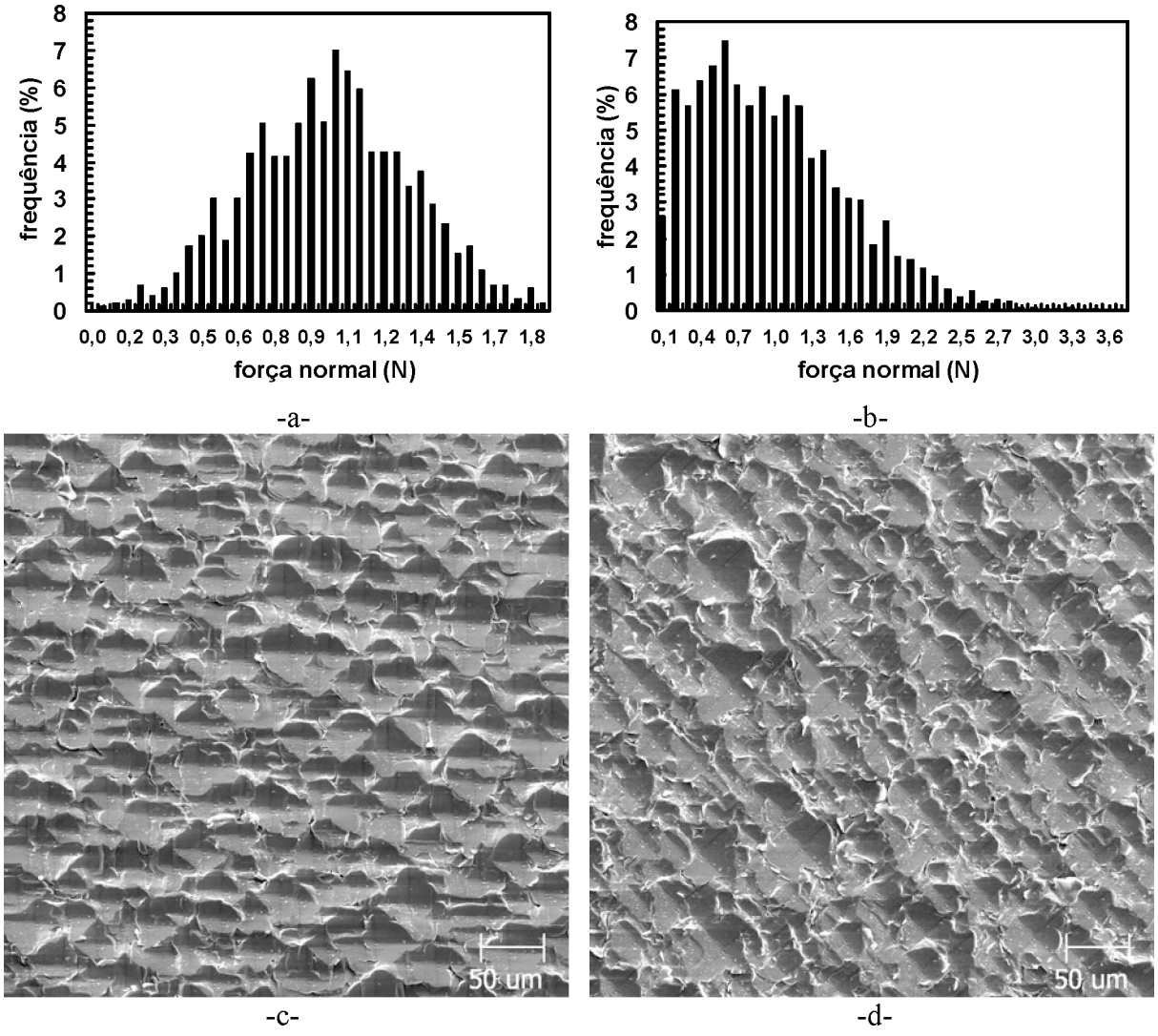


Figura 4.27 – Perfis de força, distribuição normal: a- média 0,98 N entre 0,049 e 1,96 N; b- média 0,49 N entre 0,049 a 3,92 N; c-d- Superfícies resultantes dos perfis a-b respectivamente. MEV.

Nessa fase do trabalho procurou-se associar os perfis de força a parâmetros da topografia da referência. A topografia obtida via interferometria laser da referência do aço 1010 está apresentada na Fig. 4.28.

O programa utilizado para analisar e quantificar a topografia da referência (Mountains Map®) permite a transformação de uma superfície em séries de perfis. O gráfico gerado nesse processo está apresentado na Fig. 4.28b. Esse método possibilita o cálculo dos parâmetros de rugosidade bidimensionais para cada perfil bidimensional. Os valores calculados são apresentados em termos de valor médio máximo e mínimo encontrado. Esses valores dão a idéia da variabilidade da topografia da referência.

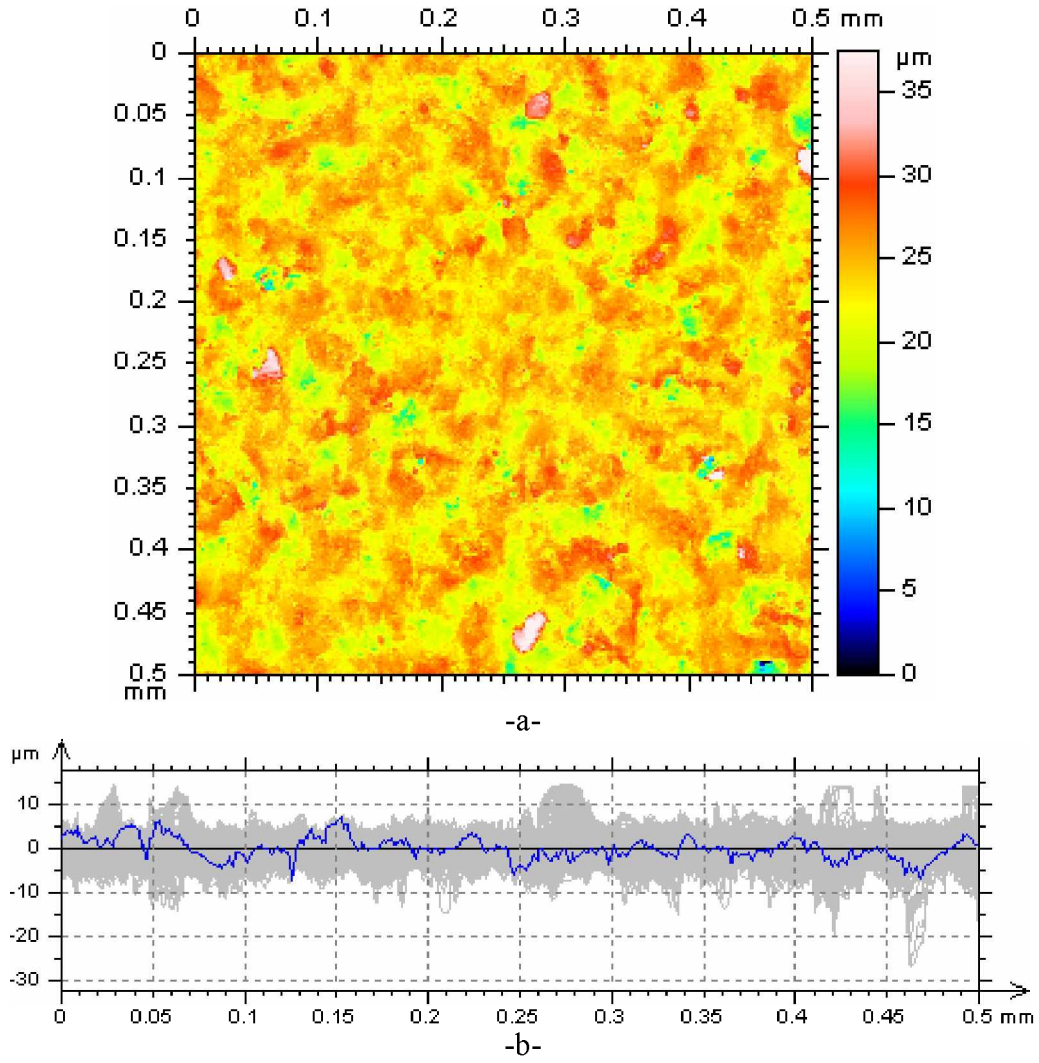


Figura 4.28 – a- Topografia da referência do aço 1010 (ASTM). b- gráfico gerado para o cálculo dos parâmetro bidimensionais de todos os perfis da referência. Mountains Map®.

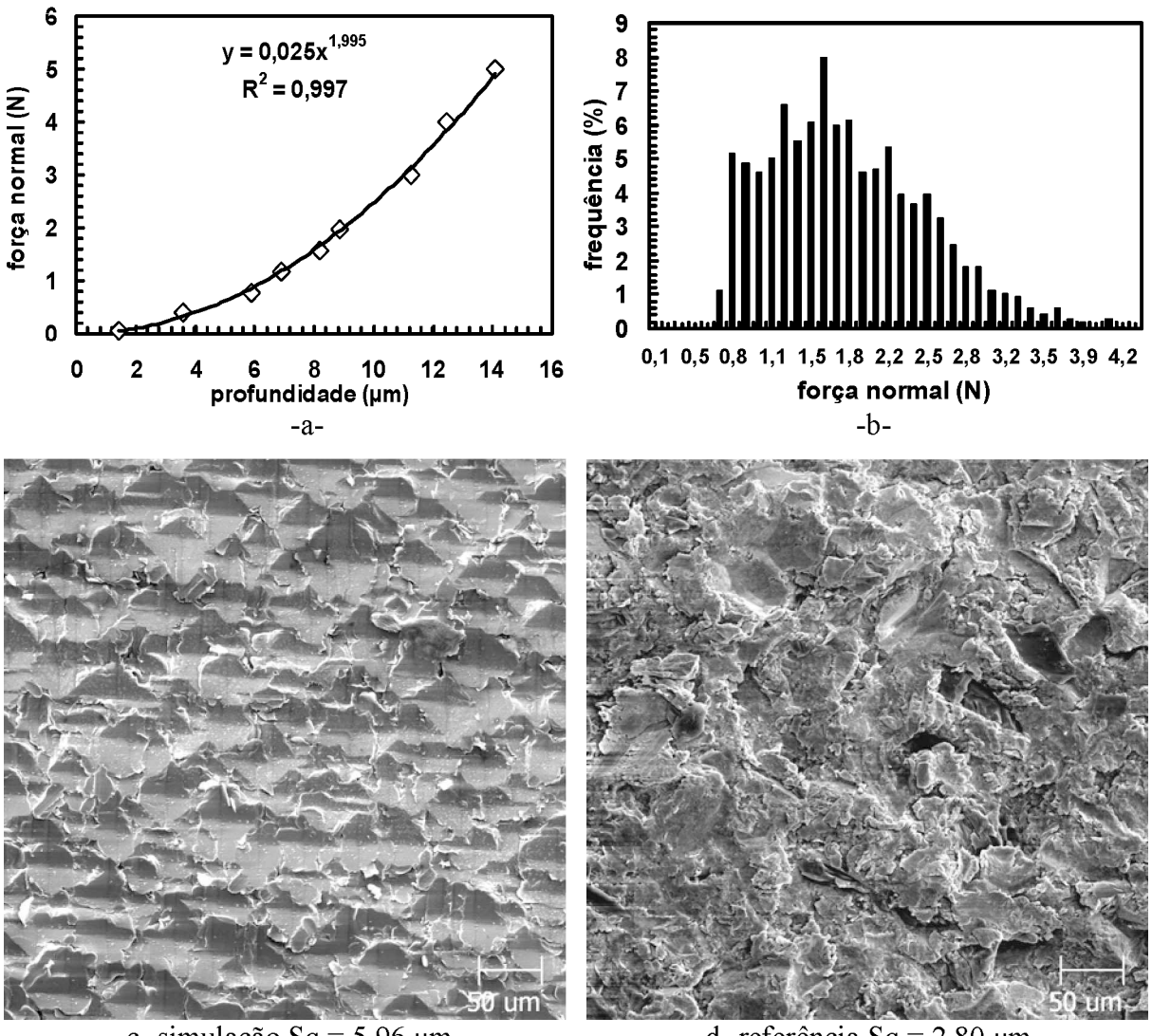
Por exemplo, calculando o valor do parâmetro de rugosidade Rz (tópico 3.5.2) em todos os perfis que compõem a topografia da referência do aço 1010 (Fig. 4.28), obtêm-se os valores mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Varredura na topografia do aço 1010, "cut off" 80 µm.

Aço 1010 (ASTM)	**Rz (µm)**	**Força normal correspondente (N)**
Mínimo	5,16	0,66
Média	7,61	1,43
Máximo	13,6	4,53

Conforme estudado no tópico 3.5.2, o Rz é definido pelo valor da distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade. O Rz é uma média de pelo menos cinco valores obtidos no perfil de rugosidade estudado.

Considerando que o Rz representa a profundidade dos eventos encontrados na superfície da referência, a força normal correspondente é calculada comparando o Rz com a profundidade da indentação isolada. Essa função de transferência está apresentada na Fig. 4.29a, que relaciona a força normal à profundidade da indentação isolada. Assim, têm-se os valores de força normal médio, máximo e mínimo para serem usados na geração do perfil de força da simulação. Os valores de força normal correspondentes ao parâmetro de rugosidade Rz estão apresentados na tabela 4.1. Usando esses dados em um gerador de números aleatórios de padrão normal determina-se o perfil de força mostrado na figura 4.29b para 1500 eventos, com média em torno de 1,42 N. A figura 4.29c mostra a superfície obtida nesse ensaio de simulação.



-a- -b-

-c- simulação Sq = 5,96 µm -d- referência Sq = 2,80 µm

Figura 4.29 – a- Função de transferência força normal x profundidade; b- Perfil de força utilizando as informações referentes ao Rz; c- Superfície resultante na simulação, MEV; d- Referência, ensaio LTM, aço 1010, MEV.

Comparando a superfície obtida nessa simulação, Fig. 4.29c, com a referência do aço 1010, Fig. 4.29d, observa-se que o tamanho dos eventos da simulação é menor que a dimensão dos eventos observados na realidade.

Além do Rz, também foram testados os parâmetros Rq e o parâmetro híbrido λq (tópico 3.5.2). O λq leva em consideração o Rq e a inclinação média (Δq), ou seja, a distribuição dos valores em x.

A experiência mostrou que o aspecto visual da superfície gerada na simulação com variação da força normal ainda se apresentava homogêneo em relação à referência. Sugere-se que a deformação resultante da indentação interfira na sua vizinhança de forma que a profundidade média dos eventos na área de trabalho não corresponda à profundidade de um evento isolado. Assim, para entender o processo da simulação é necessário entender como as deformações interagem entre eventos.

4.2.1 - Conclusões parciais

- Os parâmetros de controle da simulação afetam o volume removido e a topografia (Sq) da superfície resultante. A força normal influencia fortemente nessa resposta.
- O mapeamento no vidro apresentou claramente a transição do comportamento de abrasão-dútil para abrasão-frágil. A quantidade de eventos influencia essa transição, pois a proximidade entre os eventos pode levar ao estilhaçamento da superfície, mesmo em baixo valor de força normal.
- O uso de força normal variável na simulação leva a heterogeneidade na dimensão dos eventos produzidos na simulação. O perfil de força pode ser correlacionado com parâmetros de rugosidade da referência. A topografia da superfície produzida na simulação apresenta eventos de menor dimensão que os presentes na referência.

4.3 Estudo da superposição dos eventos

A Fig. 4.30 mostra a topografia de um ensaio com 500 indentações aleatoriamente distribuídas em uma área de 500 por 500 μm e de força normal constante (1,47 N), em uma amostra de aço ferramenta. A baixa densidade de eventos desse teste permitiu observar as interações entre indentações.

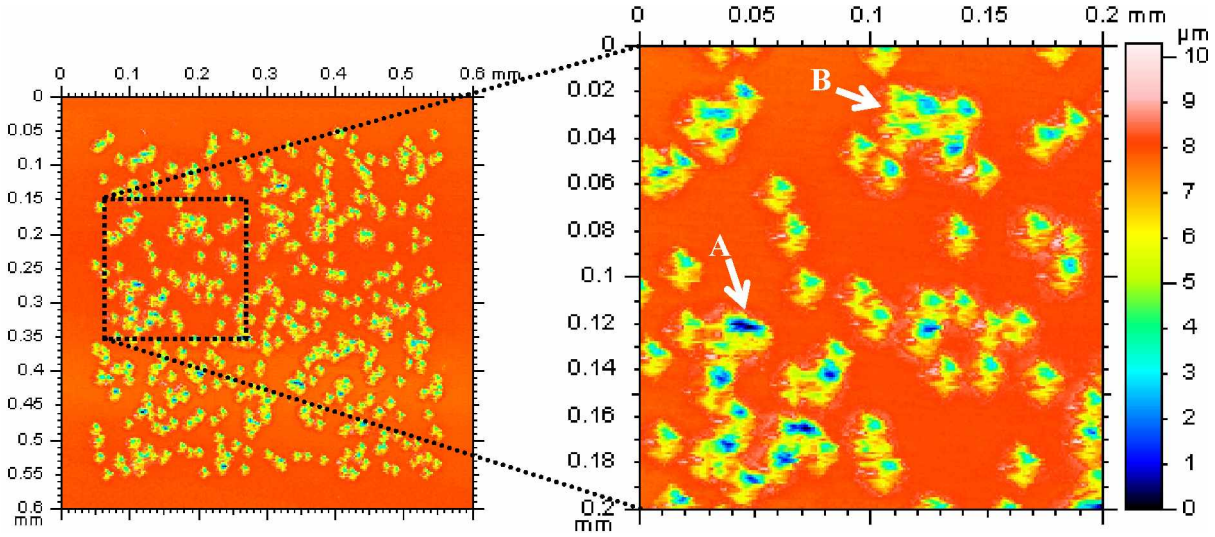


Figura 4.30 – a- Simulação com 500 indentações, aço ferramenta, força normal 1,47 N; b- Ampliação. IL.

Na Fig. 4.30b, as setas destacam grupos de indentações de mesma força normal realizadas em posições próximas umas das outras. A seta 'A' mostra que as indentações interagiram de forma que a profundidade média dos eventos foi maior do que o esperado para a força normal especificada. O grupo destacado pela seta 'B' mostra que algumas indentações aparecem preenchidas pela deformação de outras indentações, o que diminui a profundidade dos eventos. Essa observação mostra que a profundidade do evento em um agrupamento pode ser bastante diferente da profundidade do evento isolado.

O presente tópico é dedicado ao estudo do processo de interação das indentações em função do seu posicionamento e superposição. Espera-se entender e mapear a relação entre força normal e a profundidade dos eventos, considerando a superposição destes. Para tanto, foram desenvolvidas e comparadas quatro metodologias diferentes para observar o fenômeno da superposição de indentações.

4.3.1 - Superposição em linha com quantidade variável de eventos.

Nesse método foram produzidas linhas paralelas de indentações com a mesma distância entre indentações (DE). O comprimento da linha de indentações é fixo em 300 µm, e a quantidade de eventos aumenta progressivamente entre as linhas subseqüentes. O aumento da quantidade de indentações em cada linha representa a diminuição do espaçamento entre eventos e conseqüente aumento da superposição. A distância entre eventos está relacionada ao

tamanho do lado da área da indentação (LI). Nesse método, a superposição dos eventos é controlada através da relação entre DE e LI. O valor da superposição corresponde ao percentual da área do evento que está superposto. Superposição igual zero indica que as indentações estão tocando umas as outras. O valor negativo de superposição significa que as indentações estão distantes uma das outras de uma distância relativa à LI. O esquema da Fig. 4.31 apresenta essa idéia.

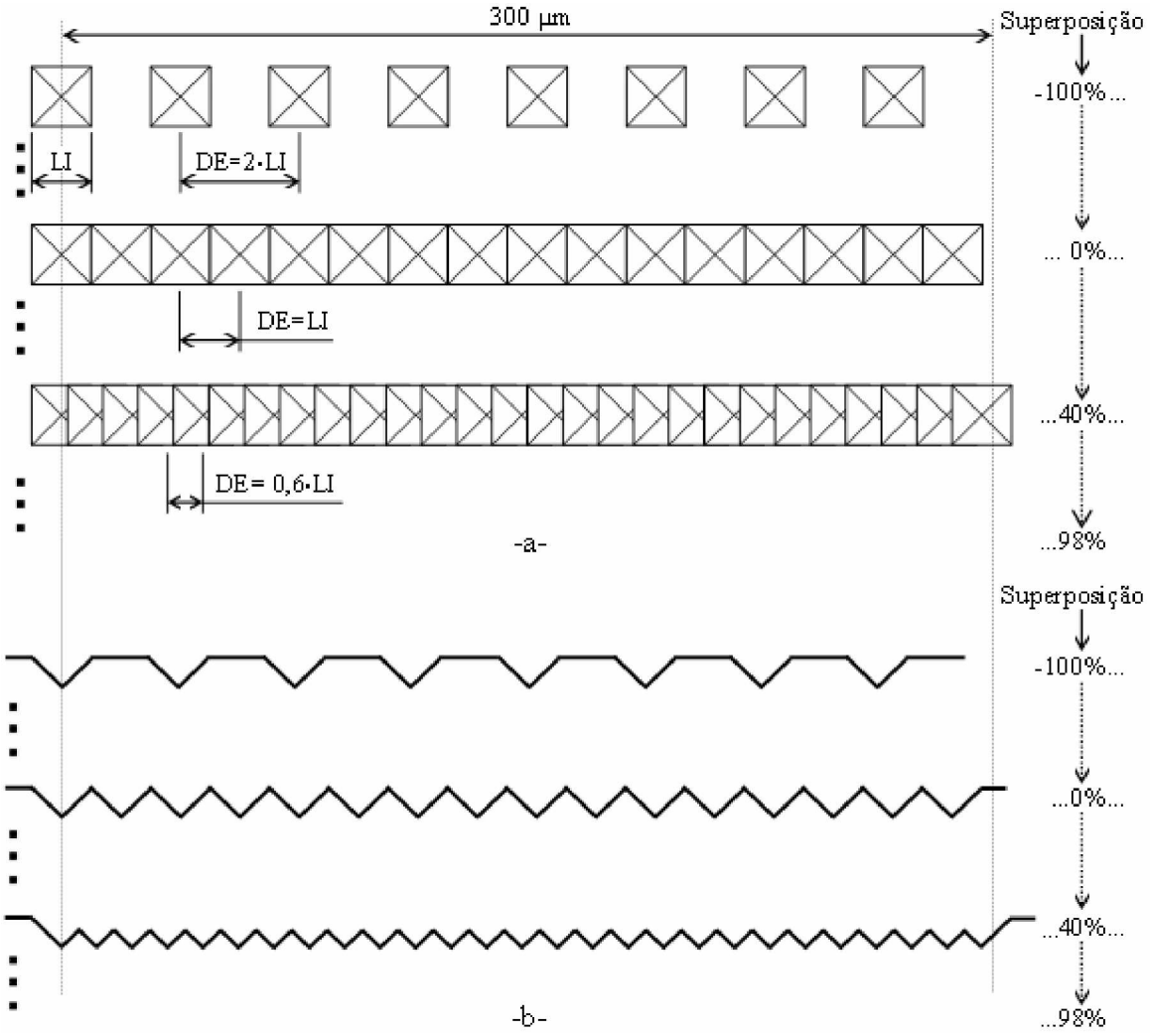


Figura 4.31 – a- Esquema do método de superposição de indentações em linha com quantidade variável de eventos; b- Perfis de eventos superpostos.

O sentido de realização das indentações é da esquerda para a direita com o mesmo espaçamento, até ser preenchido o comprimento previsto para a linha de indentações.

No esquema da Fig. 4.31, a primeira indentação deforma a superfície da amostra isoladamente. A deformação decorrente da segunda interação cobre parcialmente a marca deixada pela primeira indentação, e assim por diante. O resultado desse processo é a alteração da profundidade média dos eventos.

O resultado dos ensaios realizados para avaliar a superposição dos eventos está apresentado na Fig. 4.32, onde são listados os valores de distância entre eventos, quantidade de eventos e superposição.

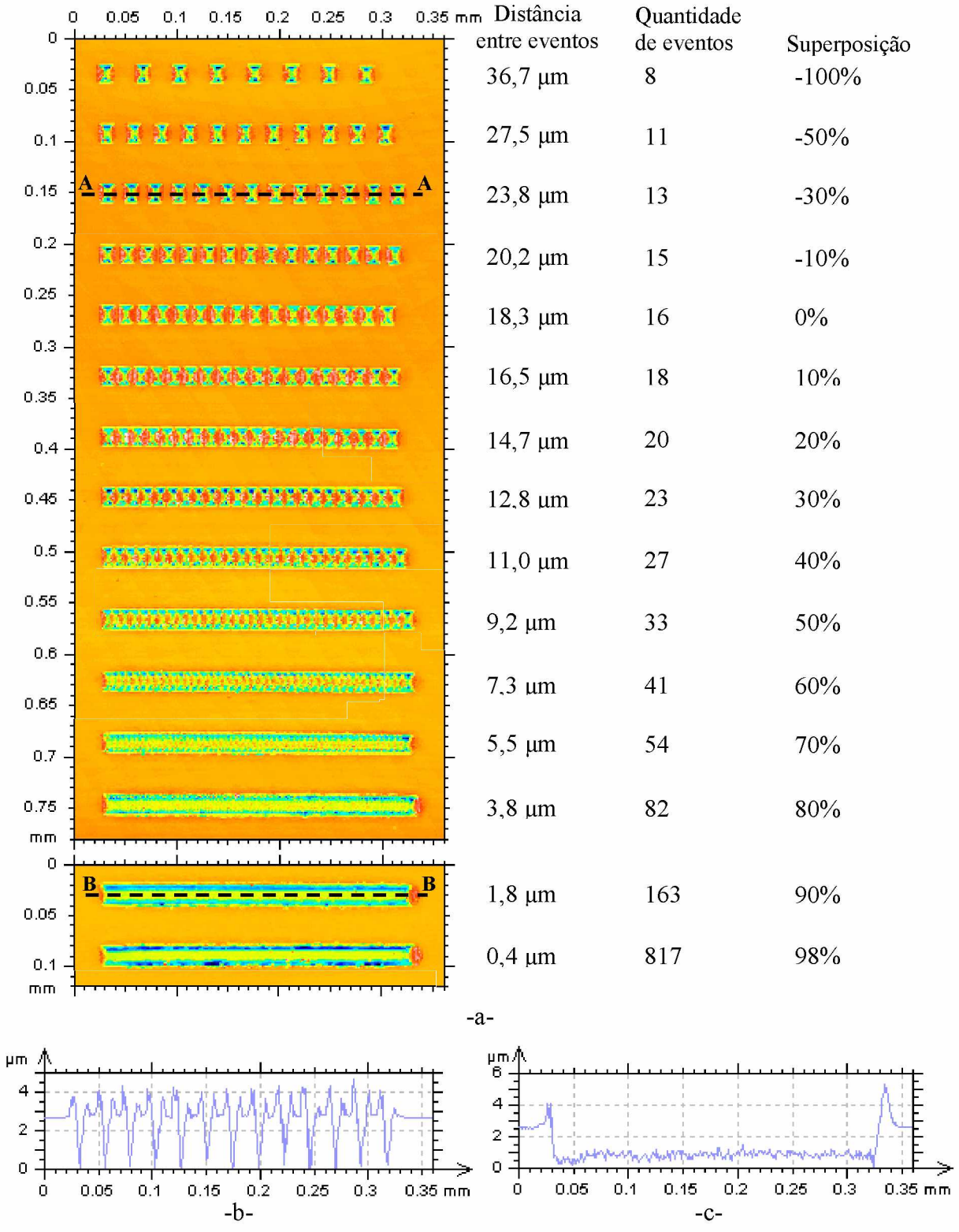


Figura 4.32 – a- Ensaios de superposição de indentações em amostras de aço ferramenta. b- Perfil AA; c- Perfil BB. IL.

Essa bateria de testes foi realizada com força normal fixa em 2,3 N. A indentação isolada realizada com esse valor de força normal gera uma marca cujo lado da área mede 18,35 μm. Esse valor foi utilizado como referência para o cálculo da superposição. Na primeira linha ocorreram 8 eventos, com a distância entre eventos de 36,7 μm e superposição -100%. A superposição máxima foi limitada em 98% porque acima desse valor seria necessário um número muito elevado de indentações.

As Fig. 4.32b-c apresentam os perfis AA e BB respectivamente, como indicado na Fig. 4.32a. Na linha de indentações AA os eventos não se superpõem mantendo a profundidade dos eventos aproximadamente constante. Entretanto, quando os eventos são superpostos, Fig. 4.32c, a profundidade média das indentações diminui. Isso pode ser explicado pelo fato de o material deformado por uma indentação cobrir parcialmente a indentação anterior.

A Fig. 4.33 apresenta o método usado para medir a profundidade média dos eventos superpostos mostrado no perfil BB (Fig.4.32c).

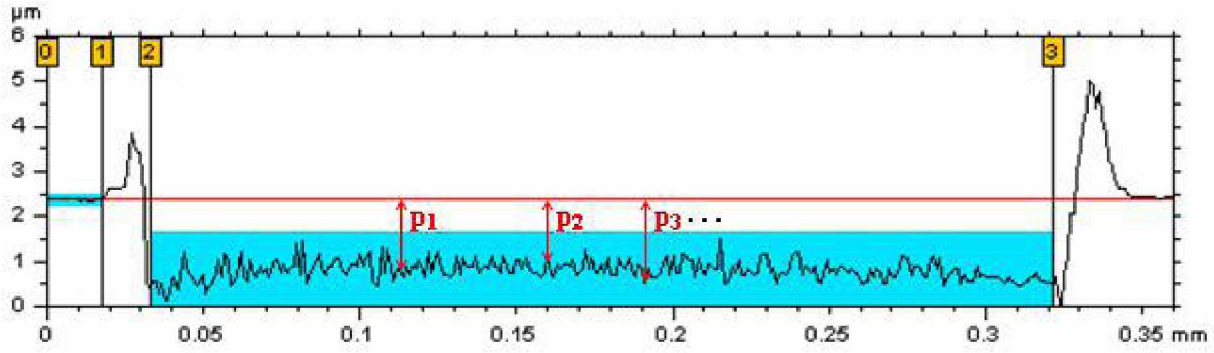


Figura 4.33 – Medição da profundidade média dos eventos superpostos. Mountains Map®.

Primeiramente, extrai-se um perfil na direção da linha de indentações. Esse perfil é representativo do conjunto de indentações superpostas. Na Fig. 4.32 a linha vermelha representa a superfície da amostra. Essa linha vermelha foi definida posicionando as barras número 0 e 1. As barras número 2 e 3 delimitam a região do perfil onde a medição é feita (região 2-3). Esse procedimento avalia a distância entre os pontos pertencentes à região 2-3 até a linha vermelha (p_1, p_2, p_3, ... p_n – Fig.4.33). Nesse caso, o valor médio da distância pode ser entendido como profundidade média dos eventos superpostos.

Além da profundidade média, esse método fornece a profundidade máxima e a espessura da região 2-3. O valor da espessura pode ser interpretado como a variação do valor da profundidade no intervalo 2-3 (Fig. 4.33). Os resultados de profundidade média em função da sobreposição estão apresentados na Fig. 4.34.

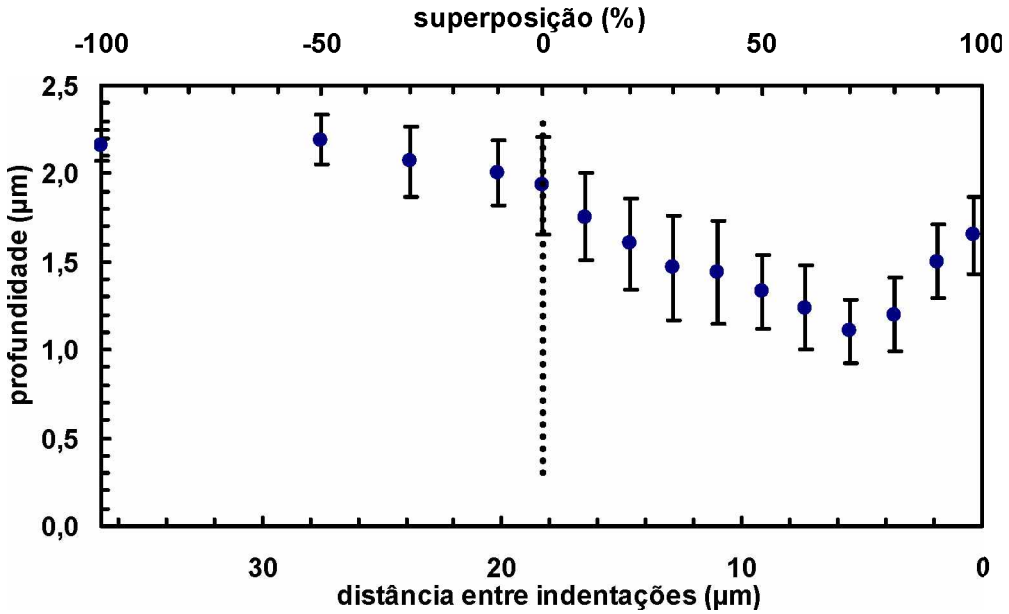


Figura 4.34 – Profundidade dos eventos em função da superposição.

Esse estudo mostra que o valor da profundidade média dos eventos é dependente da superposição. A profundidade média dos eventos é afetada em superposições acima de 0%, ou seja, quando as marcas de indentações se tocam. Os menores valores de profundidade se deram em 70% de superposição. Para superposições acima de 70% o valor da profundidade média volta a aumentar (Fig. 4.34).

A técnica de superposição com linha de tamanho fixo e quantidade de eventos variável permite a avaliação das deformações do conjunto de eventos. Os detalhes dessa medição são apresentados na Fig. 4.35.

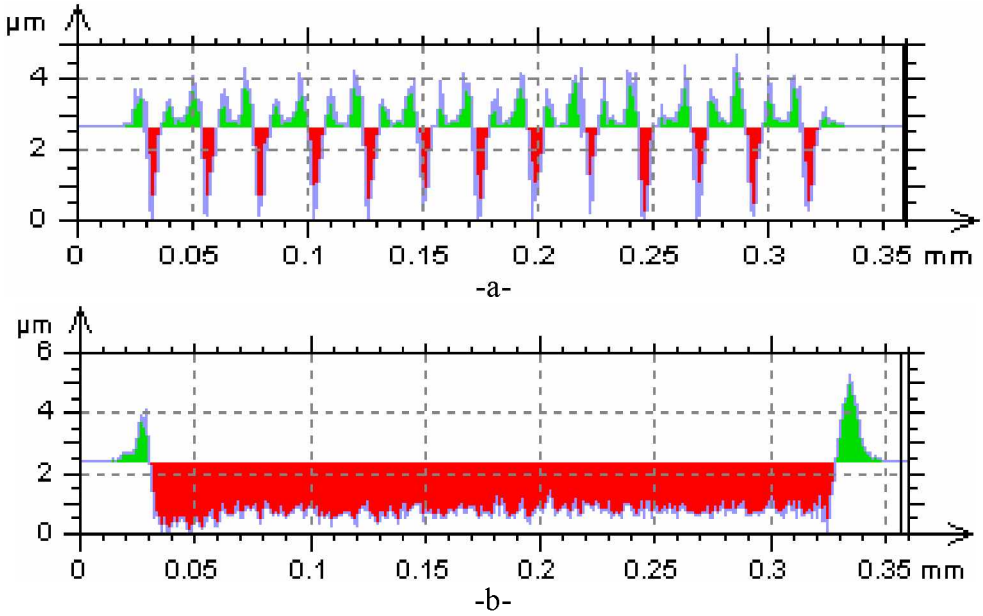


Figura 4.35 – Medição da área acima e abaixo da superfície. Material: aço ferramenta. a- Perfil AA (Fig. 4.32b); b- Perfil BB (Fig. 4.32c). Mountains Map®.

A borda do perfil é a referência da superfície da amostra. A área verde representa a área delimitada pelo perfil que está acima da superfície, enquanto a vermelha representa o espaço abaixo da superfície. Estas áreas estão associadas às deformações decorrentes das indentações. A Fig. 4.35a mostra a medição da área deformada no perfil AA (Fig. 4.35b). A área medida acima da superfície obteve o valor 116 μm², enquanto a área abaixo da superfície ficou em 121 μm². Estes valores próximos indicam que todo o material deformado nas indentações foi movimentado para a lateral dos eventos.

Na Fig. 4.35b, perfil BB (Fig. 4.32c), obteve-se o valor de área acima da superfície de 25,3 μm², enquanto a área abaixo atingiu o valor 539 μm². Essa grande diferença de valor mostra que o elevado nível de deformação causada pela superposição dos eventos induziu a perda de matéria.

O gráfico da Fig. 4.36 mostra a variação das áreas acima e abaixo da superfície para as linhas de eventos estudadas (Fig. 4.32a).

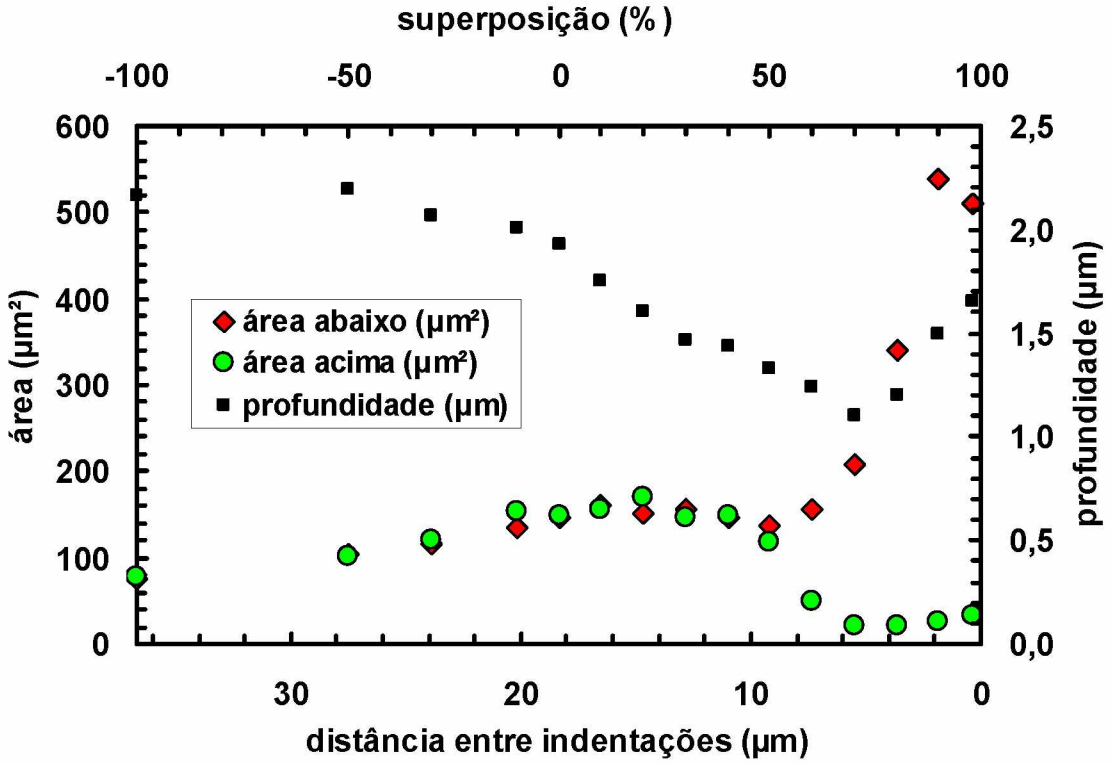


Figura 4.36 – Áreas deformadas e profundidade média dos eventos em função da superposição.

Os valores das áreas acima e abaixo da superfície permanecem próximos até a superposição 50% (Fig. 4.36). Em superposições acima de 50% o valor da área abaixo da superfície aumenta consideravelmente (aproximadamente 4 vezes), e o valor da área acima diminui até atingir um patamar constante em torno de 25 μm².

A Fig. 4.36 mostra que o aumento da profundidade dos eventos acima de 70% de sobreposição acompanha ainda, a variação dos valores de áreas deformadas.

Assim como demonstrado na Fig. 4.35b, a diferença observada entre os valores de área acima e abaixo da superfície esta associada à intensa deformação que leva ao desgaste na linha de indentações. Dessa forma, os resultados apresentados na Fig. 4.36 permitem delimitar a região de interesse no estudo da superposição. O ensaio de simulação deve ocorrer em superposições acima de 50%, para induzir a remoção de matéria, ou seja, desgaste. Isso implica em ensaios de simulação com grandes quantidades de eventos.

Nos resultados apresentados, a superposição foi estudada em um único valor de força normal. É necessário entender como a força normal afeta o comportamento da profundidade média dos eventos superpostos. Para obter essa informação, foram planejados experimentos com o objetivo de definir a superfície de resposta da profundidade média dos eventos em função da superposição e da força normal.

Fixou-se o tamanho da linha de indentações em 500 μm, e a quantidade de eventos de cada linha variou de acordo com o valor de superposição e de força normal.

A Fig. 4.37 mostra a relação entre a força normal de indentações isoladas e o respectivo lado da área da marca gerada.

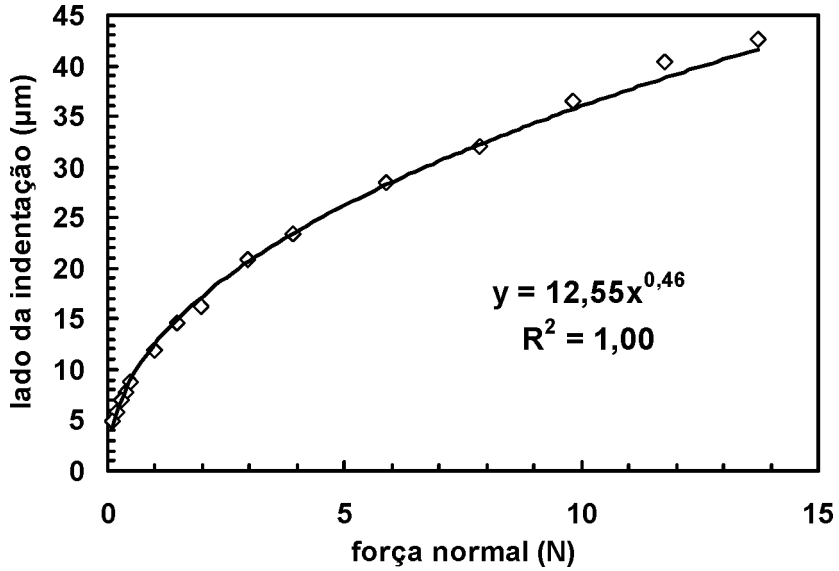


Figura 4.37 – Relação entre lado da indentação isolada e força normal. Aço ferramenta.

O valor da superposição é a relação entre o lado da área da indentação e a distância entre elas dentro de cada linha de eventos. Utilizando a relação mostrada no gráfico da Fig. 4.37, define-se a quantidade de eventos em cada linha para diferentes combinações superposição-força normal.

Na tabela 4.2 estão apresentadas as informações relativa ao planejamento dos experimentos, espaçamento dos eventos e quantidade de indentações.

Tabela 4.2 - Informações de cada linha de eventos dos ensaios de superposição.

Ensaio	Superposição (%)	Força normal (N)	Lado da indentação (µm)	Distâncias (µm)	Número de indentações
1	55	0,98	12,42	5,59	98
2	95	0,98	12,42	0,62	885
3	55	9,81	35,52	15,98	34
4	95	9,81	35,52	1,78	310
5	55	0,98	12,42	5,59	98
6	95	0,98	12,42	0,62	885
7	55	9,81	35,52	15,98	34
8	95	9,81	35,52	1,78	310
9	65	3,43	22,00	7,70	71
10	85	3,43	22,00	3,30	167
11	65	7,35	31,15	10,90	50
12	85	7,35	31,15	4,67	118
13	65	3,43	22,00	7,70	71
14	85	3,43	22,00	3,30	167
15	65	7,35	31,15	10,90	50
16	85	7,35	31,15	4,67	118
17	75	5,39	27,04	6,76	81
18	75	5,39	27,04	6,76	81
19	55	13,73	41,37	18,62	30
20	75	11,77	38,56	9,64	57
21	95	13,73	41,37	2,07	266
22	55	13,73	41,37	18,62	30
23	75	11,77	38,56	9,64	57
24	95	13,73	41,37	2,07	266

No planejamento apresentado na tabela 4.2, são definidos a superposição e a força normal. O valor do lado da indentação depende da força normal de acordo com a relação mostrada no gráfico da Fig. 4.37. A distância entre eventos é definida de acordo com a superposição e o lado da indentação para cada linha. De acordo com a distância entre eventos obtém-se o número de indentações necessário para preencher a respectiva linha de eventos.

Os resultados de profundidade média do perfil obtidos nesses testes estão apresentados na tabela 4.3. em função da força normal e da superposição.

Tabela 4.3 - Resultados da profundidade média do perfil de eventos.

Profundidade (µm)		Força normal (N)						
		0,98	**3,43**	**5,39**	**7,35**	**9,81**	**11,77**	**13,73**
Superposição (%)	**55**	0,17				1,73		2,05
	65		0,89		1,53			
	75			1,62			2,52	
	85		1,82		2,09			
	95	1,16				2,7		3,23

Graficamente, esses resultados são apresentados na figura 4.38.

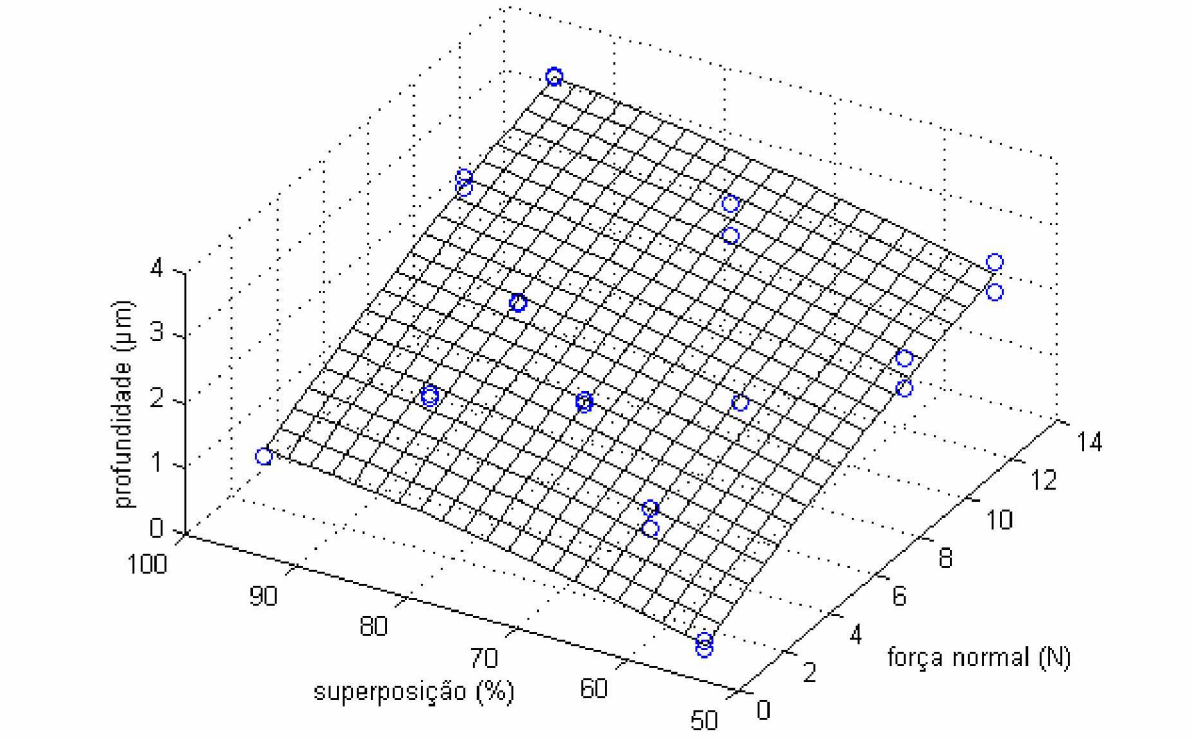


Figura 4.38 – Profundidade média dos eventos em função da superposição e da força normal.

As duas variáveis afetam a resposta. A força normal tem influência de até 1200% no valor da profundidade enquanto a superposição influencia em até 600%. O polinômio que melhor se ajusta aos resultados está mostrado na Eq. 4.2. Esse ajuste obteve R^2 igual a 0,958.

$$profundidade = -4{,}8 + 0{,}41Fn + 0{,}12S - 6{,}2.10^{-3}S.Fn - 2{,}3.10^{-3}Fn^2 - 6{,}2.10^{-4}S^2 - 1{,}6.10^{-5}Fn^2.S + 4{,}3.10^{-5}Fn.S^2 \quad (4.2)$$

Na Eq. 4.2, S é o percentual de superposição e Fn é a força normal.

Essa equação foi utilizada para relacionar a topografia da referência com força a normal dos eventos da simulação. Esse assunto será detalhado no tópico 4.4.

4.3.2 - Outros métodos para o estudo da superposição de indentações.

-Superposição em linha com quantidade fixa de eventos.

Nesse método foram produzidas linhas paralelas de indentações equiespaçadas, com a mesma quantidade de indentações em cada linha. A distância entre as indentações foi reduzida entre as linhas subseqüentes, até que todos os eventos ocorreram na mesma posição. O resultado dessa metodologia está mostrado na figura 4.28a.

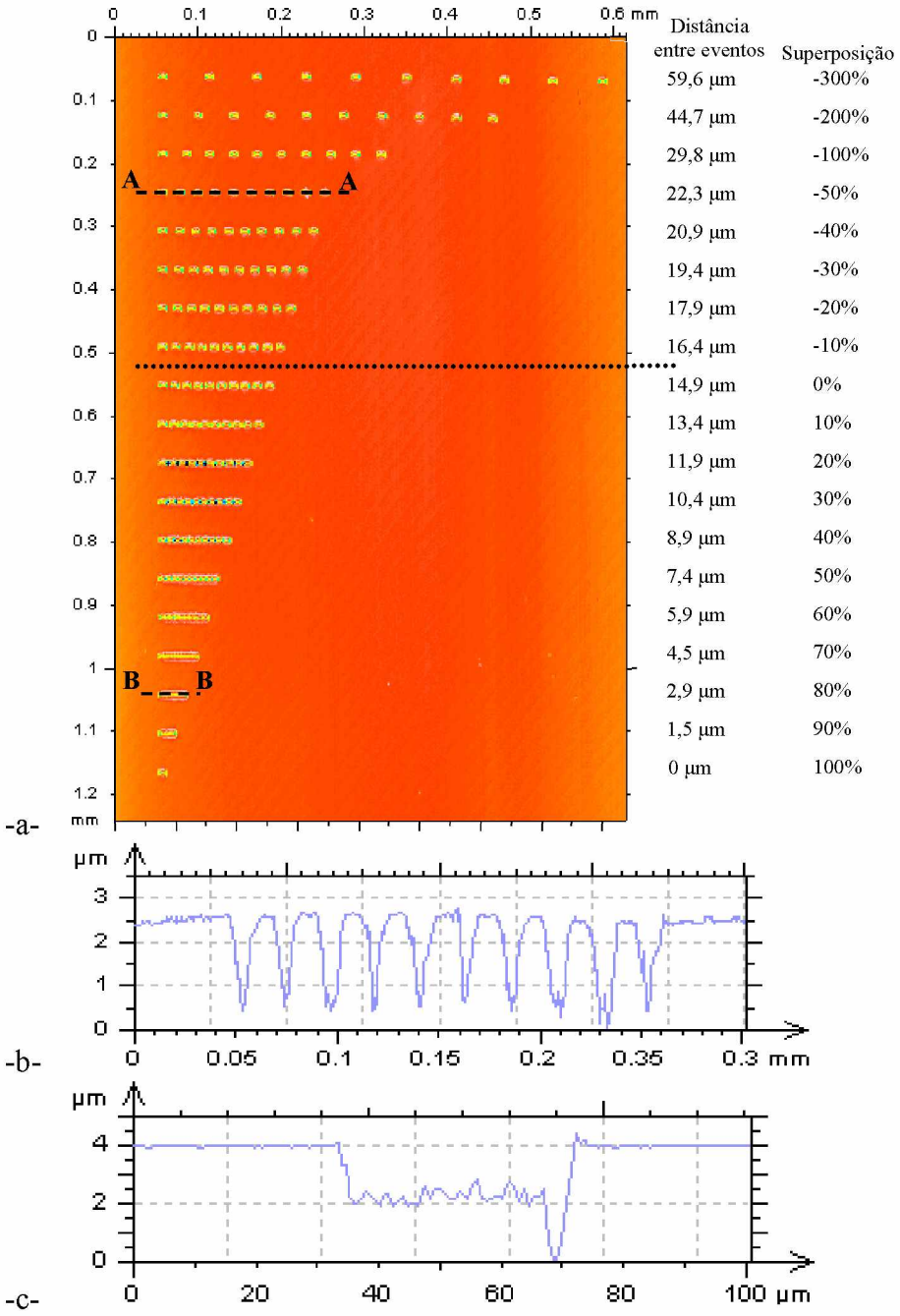


Figura 4.39 – a- Superposição de indentações em linha no aço ferramenta. b- Perfil AA; c- Perfil BB. IL.

Foram executados dez eventos em cada linha. Na primeira linha a distância entre eventos foi fixada em 59,6 μm, que resulta em uma superposição de 300%. O tamanho do lado da indentação foi de 14,9 μm para o evento isolado, correspondente a força normal 1,5 N. A distância entre as indentações e o valor da superposição para cada linha de eventos estão listados na figura 4.39a.

A linha de indentações AA indicada na Fig. 4.39a está apresentada na Fig. 4.39b. Nesse perfil, os eventos não se sobrepõem, e a profundidade dos eventos permanece aproximadamente constante. Entretanto, quando os eventos são superpostos, Fig. 4.39c, a profundidade média dos eventos diminui. Isso pode ser explicado pelo fato de o material deformado por uma indentação cobrir parcialmente a indentação anterior. Quando há a superposição o último evento de cada linha é ressaltado em relação ao restante da linha (Fig. 4.39c).

A profundidade média dos eventos superpostos foi medida usando o método apresentado no tópico 4.3.1 e ilustrado na Fig.4.33. A Fig. 4.40 mostra a profundidade média das indentações em função da superposição.

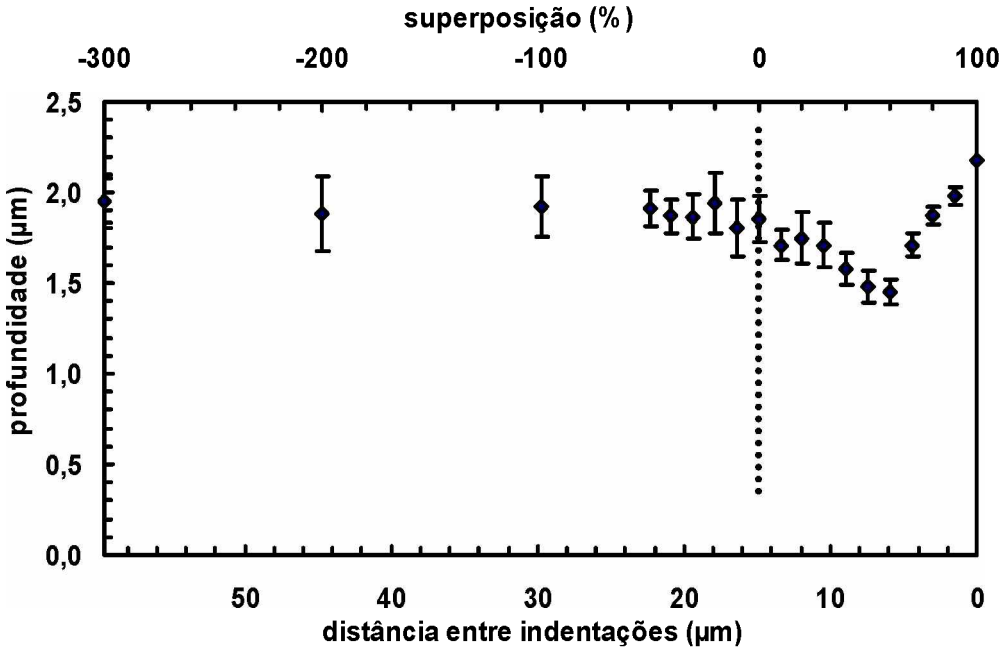


Figura 4.40 - Efeito da superposição na profundidade dos eventos. Aço ferramenta.

Na Fig. 4.40, para a distância entre indentações maior do que 14,9 μm (superposição menor que 0%), não se observam mudanças significativas na profundidade de indentação média. Quando os eventos estão superpostos (acima de 0% de superposição), a profundidade

média diminui até atingir um mínimo para a superposição igual a 60%. Em superposições maiores que 60% a profundidade média volta a aumentar. A linha de indentações que representa 100% de superposição apresenta um valor de profundidade de evento ligeiramente superior ao da profundidade da indentação isolada.

Esse estudo mostra que o valor da profundidade média dos eventos é dependente da superposição. A profundidade média dos eventos é afetada em superposições acima de 0%, ou seja, quando as marcas de indentações se tocam.

O perfil característico da condição em que os eventos estão superpostos, figura 4.39c, permite observar que a última indentação tem grande influência no resultado de profundidade média. Esse efeito foi observado em superposições maiores que 70%, o que gera dúvida quanto à medição da profundidade média dos eventos. Esse fato foi considerado uma desvantagem deste método em relação ao método anterior.

-Superposição em área com quantidade fixa de eventos.

Nesse método executam-se áreas com a mesma quantidade de eventos e distância entre eventos decrescente. As áreas subseqüentes diminuem de tamanho até que todos os eventos ocorram na mesma posição. A Fig. 4.41 mostra as superfícies resultantes desse método e lista as superposições e respectiva distância entre eventos de cada área.

Esse método foi estudado no ao aço ferramenta, com 100 eventos em cada área. Força normal aplicada a cada evento foi de 2,3 N, que corresponde a um lado de indentação de 18,35 μm.

Da forma, como está apresentado na Fig. 4.41a, as áreas de indentações são realizadas em linhas verticais que se repetem da esquerda para a direita. A primeira indentação foi realizada na extremidade inferior esquerda e a última na extremidade superior direita em cada área. No detalhe mostrado nas Fig. 4.41c e Fig. 4.41d observa-se que na região da última linha de eventos, lateral direita da área de indentações, a profundidade média é maior do que no restante da área. À medida que a superposição dos eventos aumenta a área ocupada por indentações diminui, aumentando a representatividade da última linha de eventos em relação a área de indentações. Em superposições maiores que 40% o efeito da última linha de eventos é visivelmente representativo (setas).

A medição da profundidade média dos eventos foi realizada extraindo alguns perfis (pelo menos 7) que representam a área de eventos. Os resultados de profundidade em função da superposição são apresentados na Fig. 4.42.

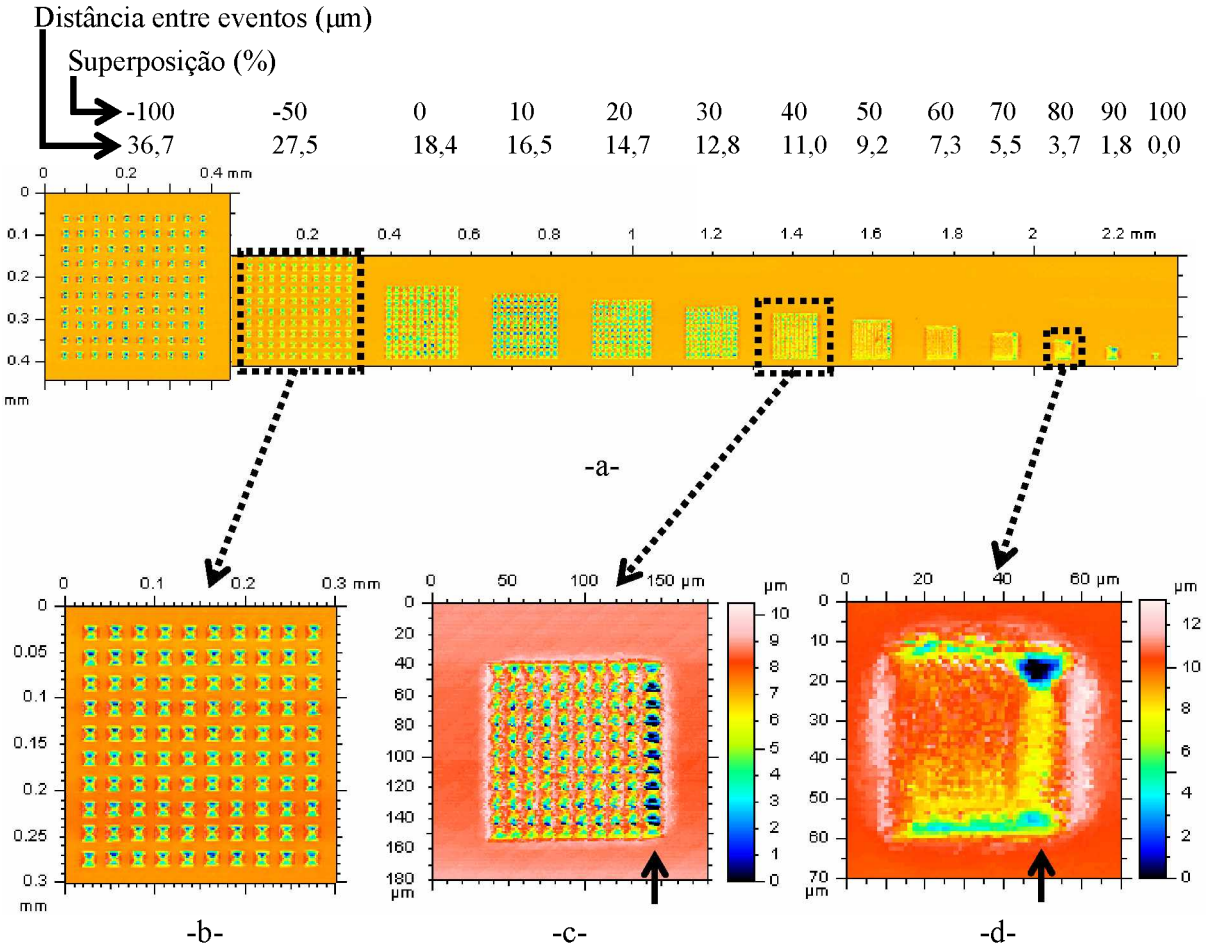


Figura 4.41 – a- Superposição de indentações em área com quantidade fixa de eventos; Detalhe, superposições: b- -50%; c- 40%; d- 80%. IL.

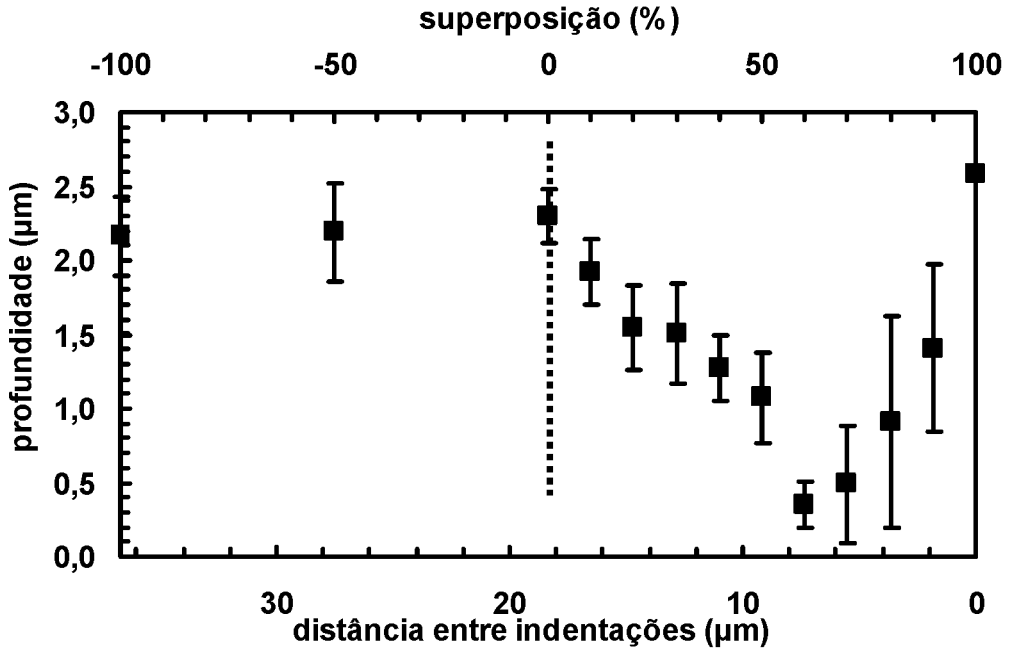


Figura 4.42 – Evolução da profundidade média dos eventos em função da superposição.

Observa-se que a profundidade média dos eventos permanece constante até 0% de superposição. A partir de 0% de superposição os eventos passam a interagir e a profundidade diminui até o mínimo de 60%, quando volta a aumentar. Esse resultado está de acordo com os obtidos pelos métodos anteriores (Fig. 4.34 e Fig. 4.40).

A presença da última linha de eventos, como mostrada na Fig. 4.41d, dificulta a leitura da profundidade média dos eventos. Esse fato leva a incerteza na medição desse parâmetro para superposições acima de 60%, Fig. 4.42.

-Superposição em área com quantidade variável de eventos.

Análogo ao método apresentado no tópico 4.3.1, esse método consiste em executar áreas de mesmo tamanho (área de eventos), aumentando a quantidade de indentações entre as áreas subseqüentes. O número de indentações dentro da área está associado à sobreposição dos eventos. Foram realizadas 11 áreas de 200 por 200 μm, com força normal de 2,3 N que corresponde a 18,35 μm de lado da indentação. O resultado desse método, a quantidade de eventos e a respectiva superposição estão apresentados na Fig. 4.43a.

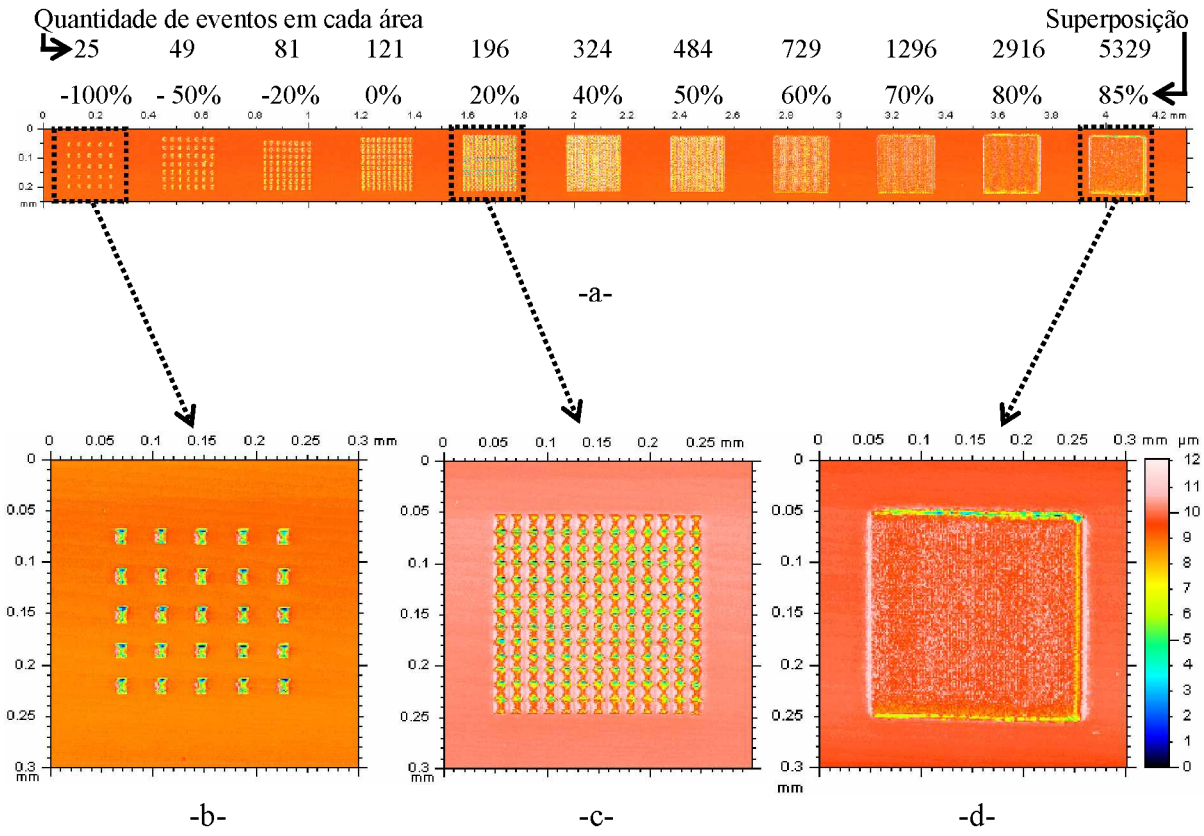


Figura 4.43 – a- Estudo da superposição em área fixa com quantidade crescente de eventos em amostras de aço ferramenta; Ampliação – superposição: b- -100%; c- 20%; 85%. IL.

O método de superposição de eventos com quantidade variável de eventos minimiza o efeito da ultima linha de eventos não recobertos, que foi detalhado na Fig. 4.41. Entretanto, esse método requer uma grande quantidade de indentações. Por exemplo, no ensaio com 85% de superposição foram necessários 5329 eventos. Superposições acima desse valor exigiriam um número muito alto de eventos.

Observa-se, na Fig. 4.43d, que a última linha de eventos não representa um problema grave como mostrado no método anterior. É possível a análise clara da profundidade média dos eventos em função da sua superposição usando a superfície da amostra como referência. Essa medida foi realizada usando alguns perfis (pelo menos 7) que representam a área de eventos. O resultado da profundidade média dos eventos está apresentado na Fig. 4.44.

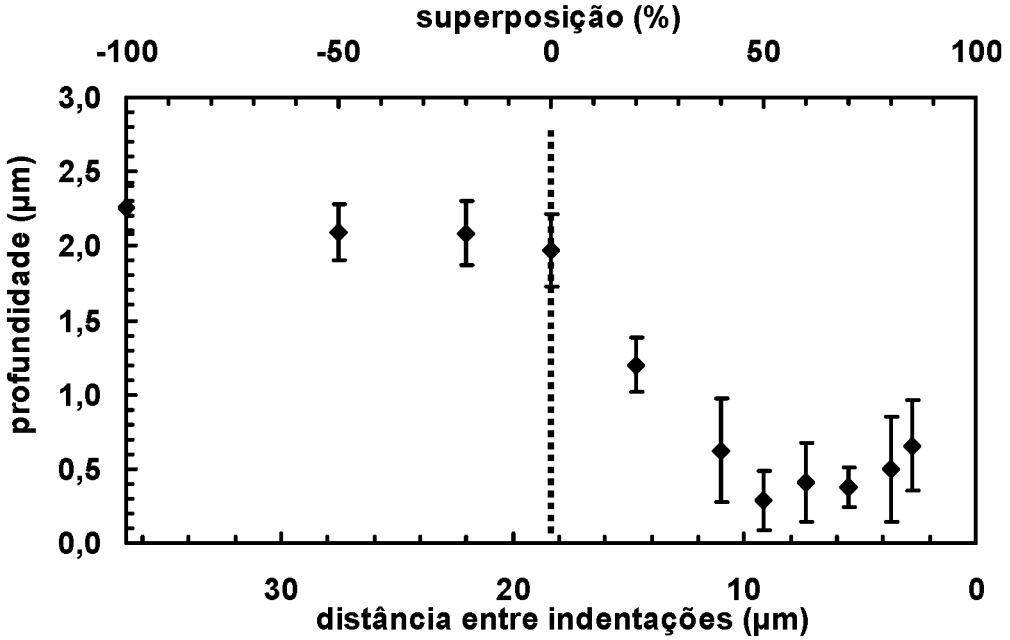


Figura 4.44 – Profundidade média em função da superposição dos eventos.

Assim como nos outros métodos, a superposição afeta a profundidade média dos eventos acima de 0%. O menor valor de profundidade média foi em 50% de superposição. O aumento do valor de profundidade para superposições acima de 50% não é representativo.

Nesse método foi avaliado o Sq em função da superposição dos eventos. Esse parâmetro pode ser entendido como um meio de quantificar o nível de deformação da superfície. Para medir o Sq foi definida a área de medição de 220 por 220 µm com intuito de incluir o efeito da deformação na borda da área de eventos. Esse resultado está apresentado no gráfico da Fig. 4.45.

O Sq aumenta em função do aumento do valor da superposição até atingir o valor máximo em 20% de superposição. Acima de 20% o valor decresce. O aumento do valor do Sq

está associado à deformação do material acima da superfície da amostra (empilhamento). A partir do momento que as deformações geradas em um evento cobrem as marcas dos eventos anteriores, o Sq decresce (Fig. 4.45).

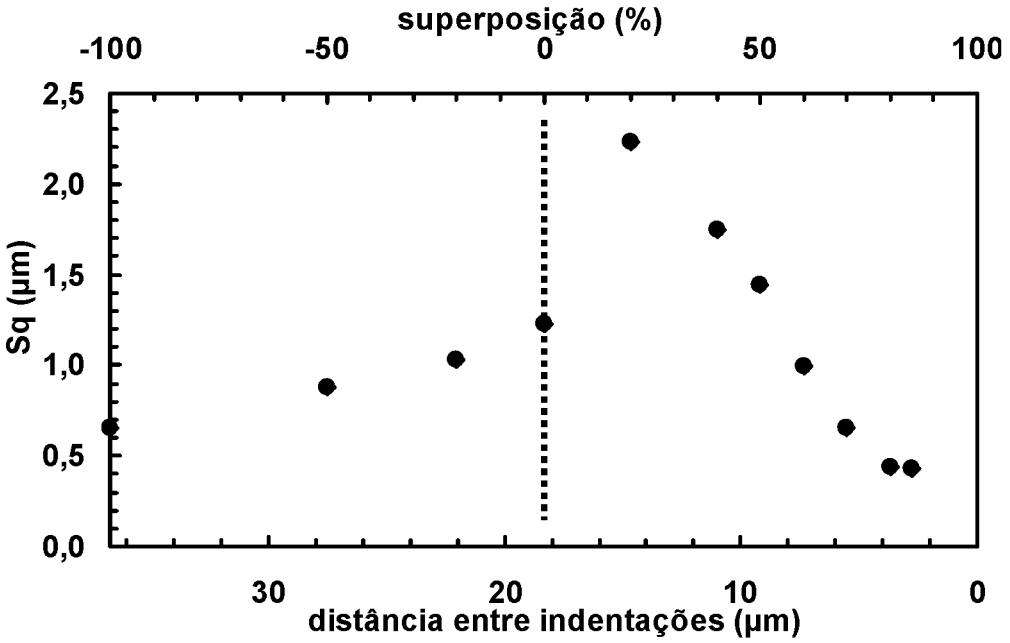


Figura 4.45 – Efeito da superposição dos eventos no Sq.

4.3.3 - Síntese do estudo da superposição

O objetivo do estudo de superposição é encontrar um parâmetro físico que permita correlacionar informações da topografia da referência com o controle da simulação. A profundidade média dos eventos se mostra como um bom meio para realizar essa correlação.

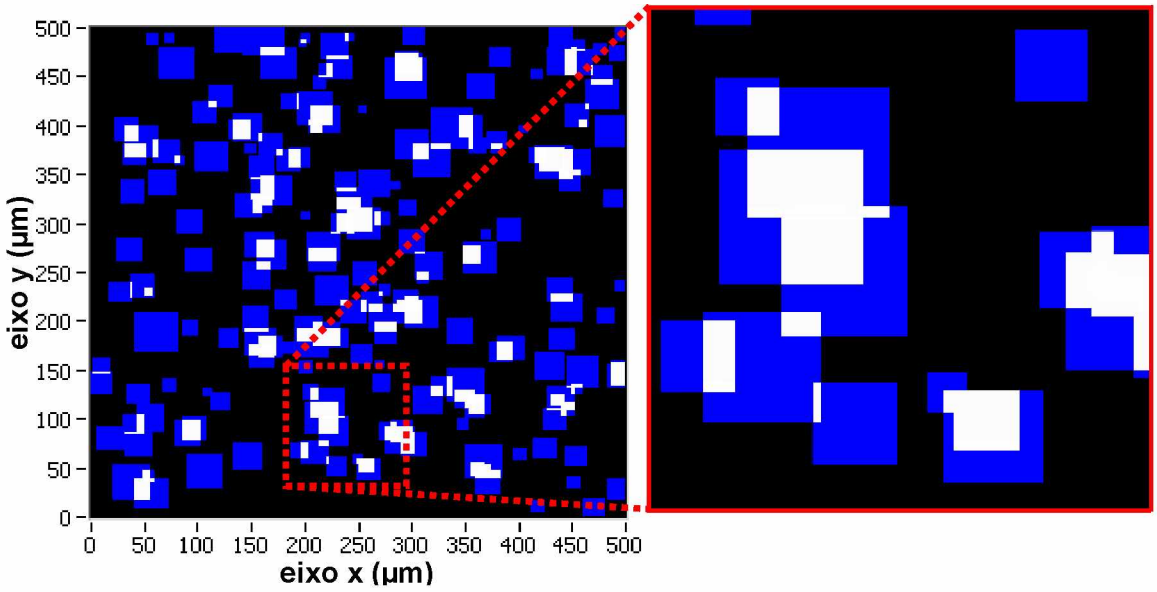
Em todos os métodos estudados, a profundidade média das indentações é afetada a partir de 0% de superposição, ou seja, quando as áreas das indentações se superpõem.

No método de superposição em linha com tamanho fixo e quantidade variável de eventos, a superposição de indentações induz o desgaste em valores maiores que 50 % de superposição.

O método superposição em linha com tamanho fixo e quantidade variável de eventos permitiu a definição do valor da profundidade média dos eventos na faixa de superposição que leva ao desgaste (acima de 50% de superposição). Foi observada a relação entre a profundidade média dos eventos em função da força normal e da superposição dos eventos. Esse estudo será usado no tópico seguinte para estabelecer a relação entre a topografia de referência e as variáveis de controle da simulação.

4.4 Simulação do rolamento das partículas usando a superposição dos eventos.

O esquema da Fig. 4.46a representa o posicionamento de 200 eventos de força normal variável dentro da área de trabalho. Esse gráfico foi produzido usando o algoritmo apresentado no tópico 4.2, Fig. 4.24. As áreas em azul representam a área ocupada por cada indentação; o tamanho da área varia de acordo com a força normal aplicada.



-a- -b-

Figura 4.46a- Posicionamento de 200 eventos na área de trabalho; b- Detalhe.

No detalhe mostrado na figura 4.46b as áreas em branco representam o espaço da área de trabalho onde indentações foram superpostas. Observa-se que o posicionamento aleatório dos eventos, aliado à escolha aleatória da força normal, leva a superposição irregular no processo de simulação.

O estudo da superposição dos eventos, apresentado no tópico anterior (tópico 4.3.1 – Fig. 4.38), foi realizado de forma regular e bem controlada, como mostrado no esquema da Fig. 4.47.

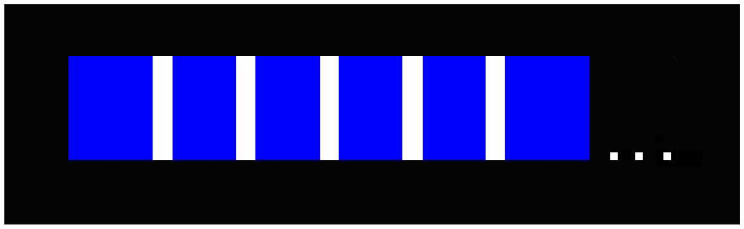


Figura 4.47 – Esquema da superposição em linha para a superposição 20%.

A Fig. 4.47 mostra que, nesse estudo, os eventos são superpostos em relação ao lado da área da indentação, com tamanho uniforme.

O posicionamento aleatório dos eventos promove interações irregulares, onde também são possíveis superposições em relação à diagonal da área da indentação, como mostrado na Fig. 4.46b. Outro aspecto importante é que a escolha aleatória da força normal na simulação leva a indentações de tamanhos diferentes, ou seja, mesmo que os eventos se sobreponham em relação ao lado da indentação, provavelmente terão tamanhos diferentes. O método proposto para representar a superposição é simples em relação à realidade da simulação.

Nesse estágio do estudo da simulação, nos deparamos com um problema de aplicabilidade do método de superposição devido o caráter aleatório do posicionamento e da força normal dos eventos. Consideramos duas possibilidades para a continuidade do projeto.

A primeira é aumentar a complexidade do estudo da superposição para englobar dois aspectos: a superposição relativa à diagonal da área da indentação; e à variação de tamanho do evento. Como mostrado na Fig. 4.46b, o caráter aleatório da simulação promove a superposição irregular dos eventos. Ainda assim, não é clara a aplicabilidade do estudo de superposição no processo de simulação com indentações posicionadas aleatoriamente, mesmo quando aumentada a complexidade do posicionamento dos eventos no estudo de superposição.

O segundo caminho é controlar o posicionamento dos eventos na simulação de forma que seja possível aplicar o resultado dos ensaios de superposição de eventos. O posicionamento dos eventos em uma malha eqüidistante permite o controle da superposição em relação ao lado da indentação, ou seja, da mesma forma como foi realizado no estudo da superposição (Fig. 4.47).

Assim, decidiu-se pela segunda opção, dada a dificuldade da aplicação do estudo de superposição dos eventos, quando o posicionamento das indentações no processo de simulação é aleatório.

O próximo tópico detalha o processo de simulação do desgaste abrasivo para o rolamento das partículas abrasivas, usando a equação de superposição de indentações.

4.4.1 - Método de simulação do rolamento das partículas abrasivas.

A Fig. 4.48 mostra um esquema representativo do método de simulação do rolamento das partículas abrasivas usando a superposição dos eventos.

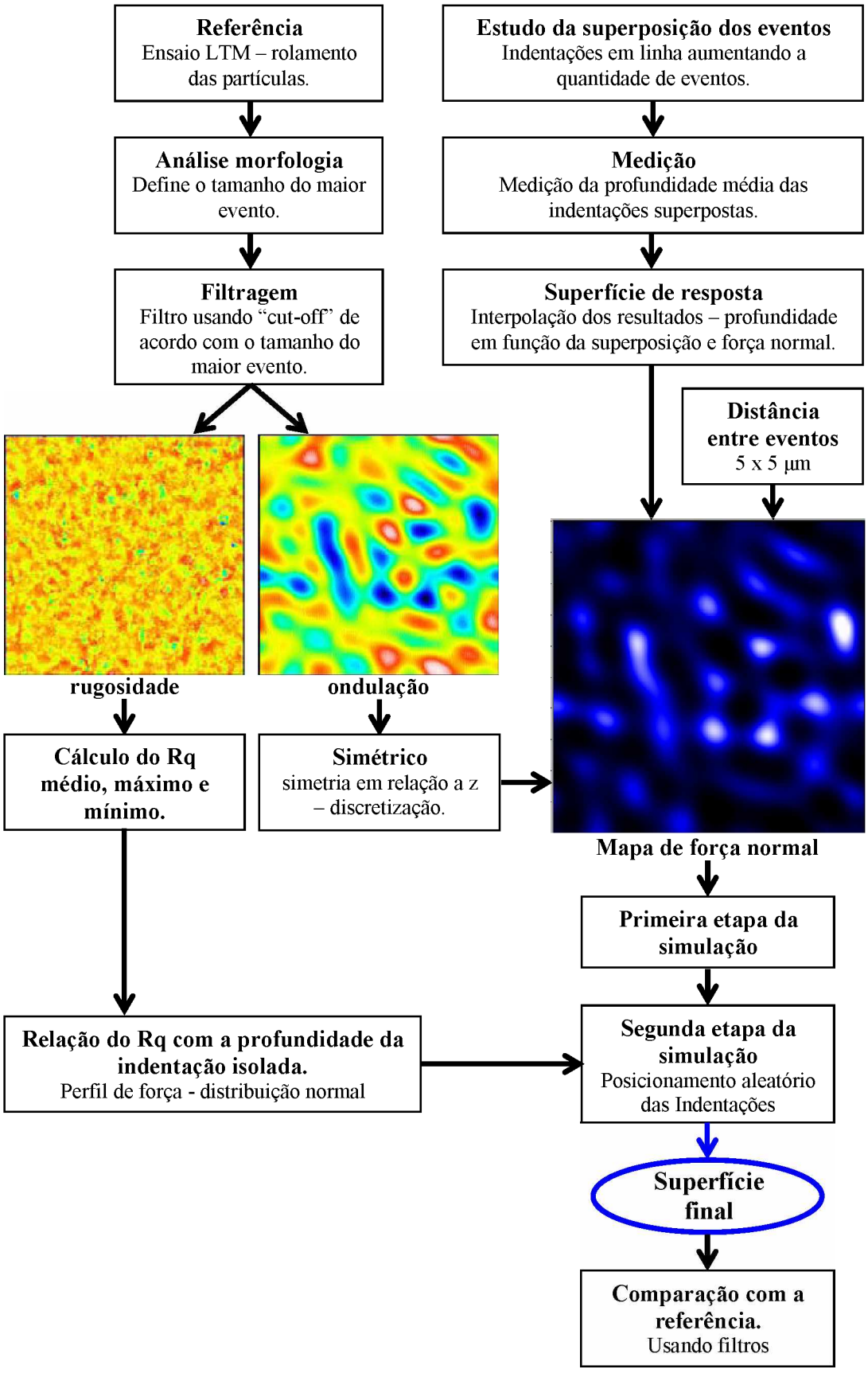
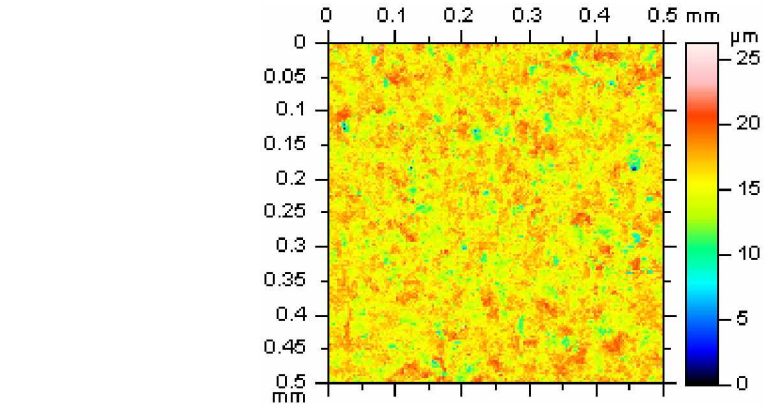


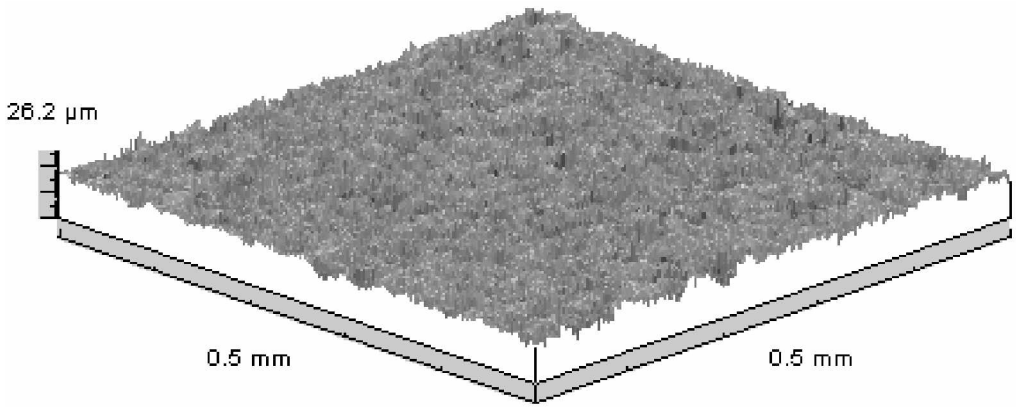
Figura 4.48 – Esquema do método de simulação do rolamento das partículas abrasivas.

Essa abordagem, Fig. 4.48, introduz novas técnicas no sentido de interpretar a referência para melhorar o controle da simulação. A topografia da referência passa por um processo de filtragem usando um comprimento de onda de corte ("cut off") de acordo com o tamanho do maior evento encontrado na superfície. A superfície de ondulação é utilizada para determinar a força normal das indentações de acordo com o posicionamento fixo dos eventos, formando um mapa de força normal. Nessa abordagem, a simulação é realizada em duas etapas. A primeira etapa se baseia na superfície relativa à ondulação para definir o mapa de força normal. Na segunda etapa a intensidade dos eventos é definida através da análise da superfície relativa à rugosidade da referência.

A referência desta etapa do estudo foi produzida em amostras de aço ferramenta no abrasômetro LTM, em condições que favorecem o rolamento das partículas abrasivas. As condições de ensaio foram: carga de teste 0,98 N; contra-corpo de ferro fundido; abrasivo areia número 100 (peneira 0,15 a 0,3 mm). A Fig. 4.49 apresenta a topografia da referência obtida via interferometria laser.



-a-

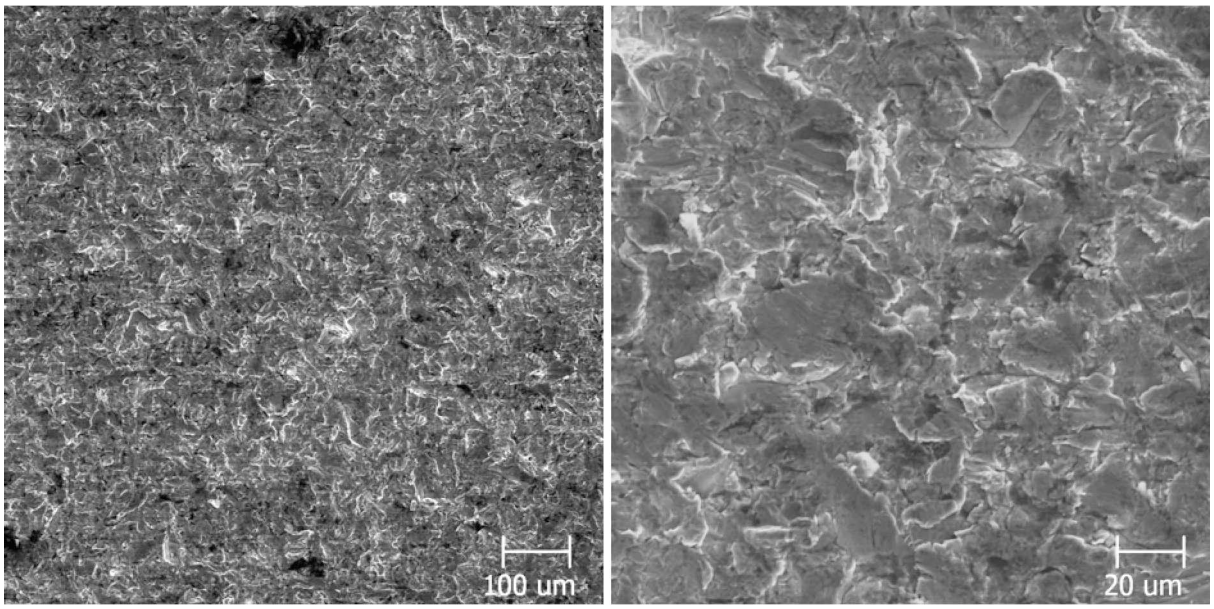


-b-

Figura 4.49 – a- Topografia da referência do aço ferramenta; b- Perspectiva. IL.

O Sq dessa topografia é igual a 1,77 μm.

As imagens da superfície da referência são apresentadas na Fig. 4.50.



-c- -d-

Figura 4.50 – a- Referência do aço ferramenta; b- Ampliação. MEV.

Estudando a morfologia da referência em um programa de análise imagens (Image J, versão 1.37), foi observado que o maior evento ocorrido nessa superfície tem diâmetro médio igual a 51 μm.

No tópico 3.5.1 foi demonstrado que o processo de filtragem é usado para separar as componentes de forma, ondulação e rugosidade de uma topografia. Tanto em um perfil bidimensional quanto em uma topografia tridimensional, o comprimento de onda de corte ("cut-off") é o parâmetro usado para discernir, na topografia, a ondulação e a rugosidade.

Foi admitido que, provavelmente, todos os eventos ocorridos no processo de desgaste da referência foram menores do que 80 μm. Assim, adotou-se esse valor como o comprimento de onda de corte para o filtro da topografia apresentada na Fig. 4.49. O resultado dessa filtragem separou as componentes de rugosidade e ondulação da superfície de referência, apresentadas na Fig. 4.51a e Fig.4.51b, respectivamente.

Nesse caso, a superfície referente à rugosidade, Fig. 4.51a, contém informações sobre a dimensão dos eventos ocorridos durante o desgaste, que possuem comprimento de onda menor que 80 μm. Essa informação será utilizada para definir o perfil de força na segunda etapa da simulação (Fig. 4.48).

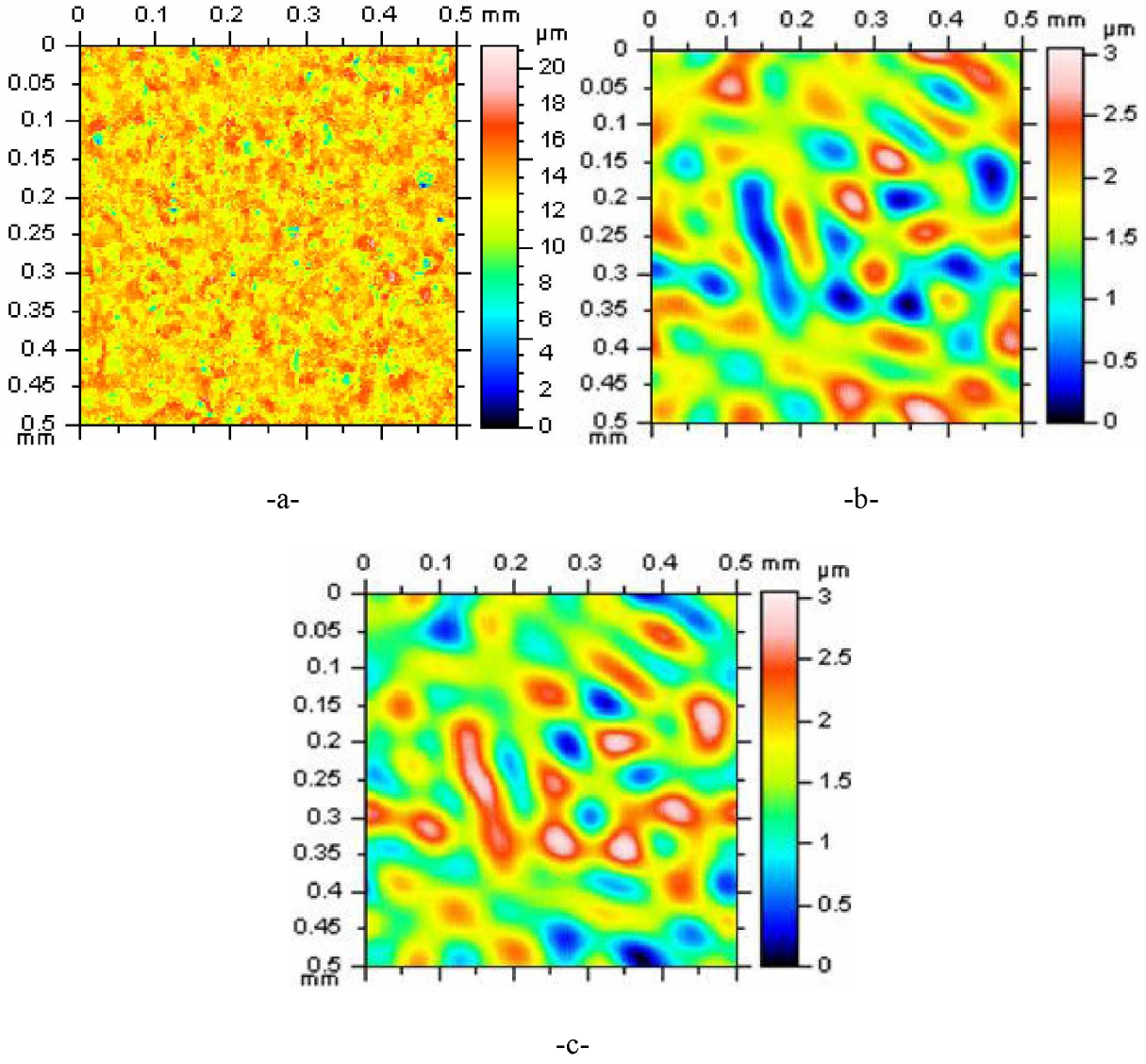


Figura 4.51 – Referência filtrada com "cut-off" 80 µm. a- Rugosidade; b- Ondulação; c- Superfície simétrica à ondulação. IL.

A ondulação é o resultado da concentração dos eventos que ocorreram durante a abrasão. Por exemplo, os vales da topografia da ondulação representam a região onde houve a concentração de eventos causados por abrasivos de maior tamanho durante o desgaste. O tamanho do abrasivo está relacionado com a força imposta à superfície da amostra. Assim, a ondulação pode ser interpretada como um diagrama que representa a concentração de forças dos eventos ocorridos durante o desgaste. Essa é a primeira idéia importante na estruturação do método da simulação.

Outra idéia importante para definir o método da simulação é que as informações contidas na superfície da ondulação estão associadas à atuação de um conjunto de eventos, ou

seja, a ondulação também deve ser entendida como o resultado da superposição dos eventos que ocorreram durante a abrasão.

Associando essas duas idéias temos, por exemplo, que os vales da superfície de ondulação correspondem às regiões onde ocorreram vários eventos, superpostos, e de alta força normal, Fig. 4.51b. Essa região de vales é representada na simulação por eventos de alta força normal que se superpõem. Dessa forma, a superfície relativa à ondulação é interpretada como um mapa de força normal de eventos superpostos.

Para facilitar o cálculo, as profundidades de eventos superpostos são obtidas da superfície simétrica em relação ao eixo z da superfície da ondulação, apresenta na Fig. 4.51c (negativo da Fig. 4.51b).

A relação entre força normal e lado da área da indentação isolada foi apresentada na Fig. 4.37 (tópico 4.3.1). De acordo com essa relação, uma indentação de 0,63 N no aço ferramenta corresponde ao lado da área da indentação de 10,2 μm. Assim, para essa força normal, a distância entre eventos de 5 μm gera a superposição de indentações igual a 50%. Analisando de outra forma, para a distância entre eventos fixa em 5 μm, indentações com força normal maior que 0,63 N representam superposições maiores que 50%.

Fixando a força normal mínima dos eventos em 0,63 N e a distância entre eventos em 5 μm, a condição mínima para que ocorra desgaste na simulação é satisfeita - 50 % de superposição.

Nesse método, a área de trabalho adotada tem a dimensão de 500 por 500 μm. Esse valor foi escolhido para representar a mesma área da topografia da referência analisada, Fig. 4.51. Nessa área de trabalho a distância de 5 μm corresponde a uma malha fixa de 10201 pontos distanciados de 5 por 5 μm. Aplicando essa malha de pontos na superfície inversa à ondulação da referência (Fig. 4.51c) obtêm-se os valores de profundidade dos 10201 eventos equiespaçados.

Usando estes valores de profundidade de eventos na Eq. 4.2, que representa a superposição das indentações (Fig. 4.38), obtêm-se os valores de força normal para os 10201 eventos. Na Eq. 4.2, a força normal é definida em função do valor da superposição e da profundidade de ventos superpostos. Nesse cálculo, a força normal do evento é definida para o maior nível de superposição possível porque, como foi discutido no tópico 4.3.1 (Fig. 4.36), o valor da superposição está associado à remoção de matéria.

A Fig. 4.52 mostra a representação gráfica da força normal dos 10201 eventos equiespaçados na área de 500 por 500 μm.

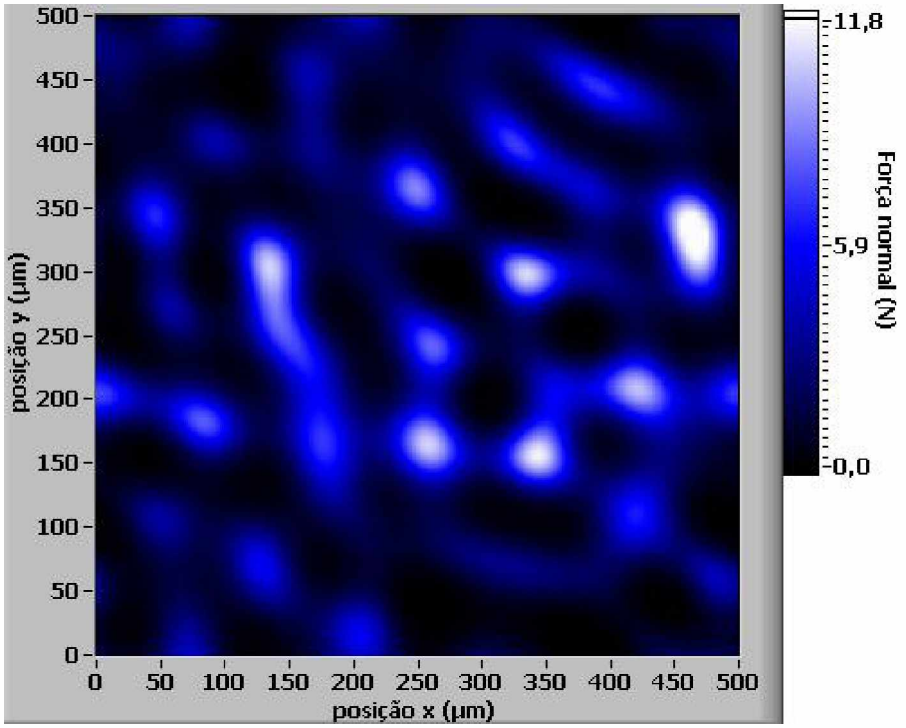


Figura 4.52 – Mapa de força normal gerada a partir da ondulação da referência.

O gráfico mostrado na Fig. 4.52 foi chamado de mapa de força normal.

Analisando os valores da força normal apresentados no mapa da Fig. 4.52, independentemente da posição dos eventos, obtém-se o histograma mostrado na Fig. 4.53.

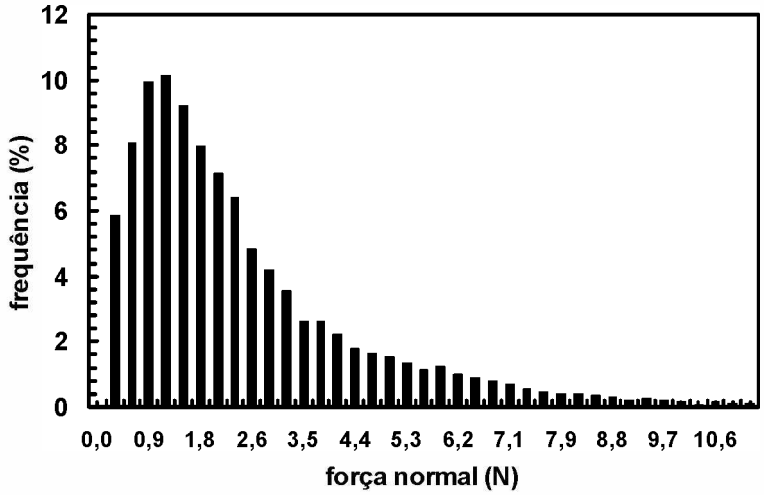
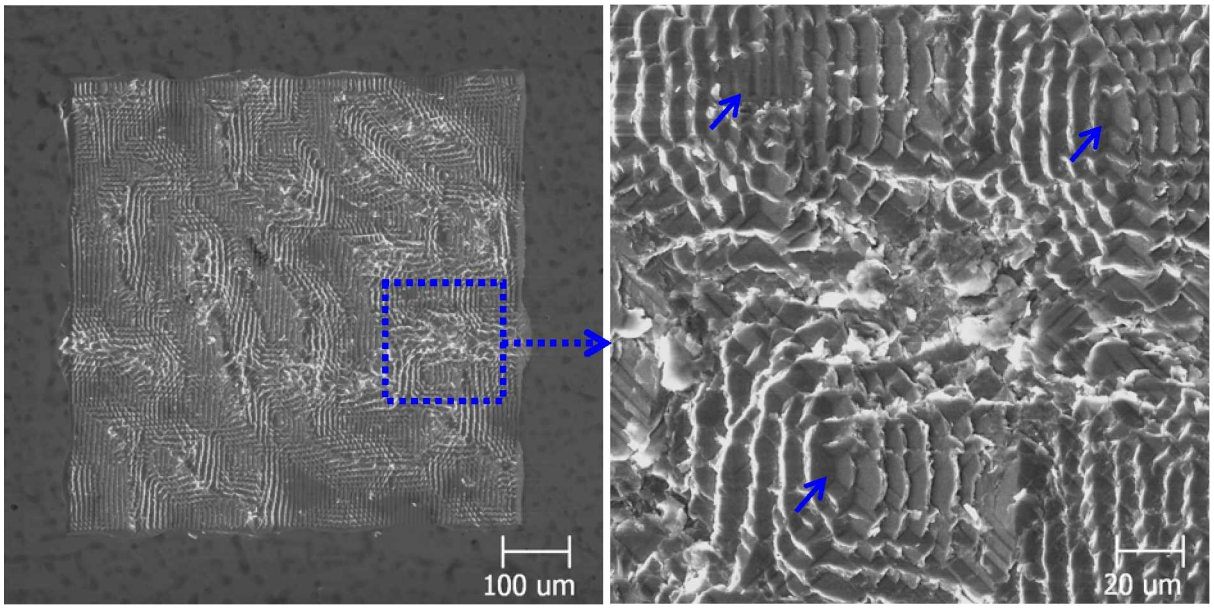


Figura 4.53 – Perfil de força para o ensaio que simula a ondulação.

Esse histograma é o perfil de força desse ensaio, que se aproxima de uma distribuição lognormal. A moda da distribuição aconteceu em 1,18 N, mas houve a ocorrência de forças até 11,8 N.

Para minimizar o efeito da variação da força normal e, consequentemente, do tamanho dos eventos, a simulação foi realizada ordenando os eventos da maior para a menor força

normal. Ou seja, inicialmente são realizadas as indentações relativas às posições dos vales da superfície de ondulação da referência (Fig. 4.51b). As imagens resultantes do ensaio de simulação da ondulação estão apresentadas na Fig. 4.54.

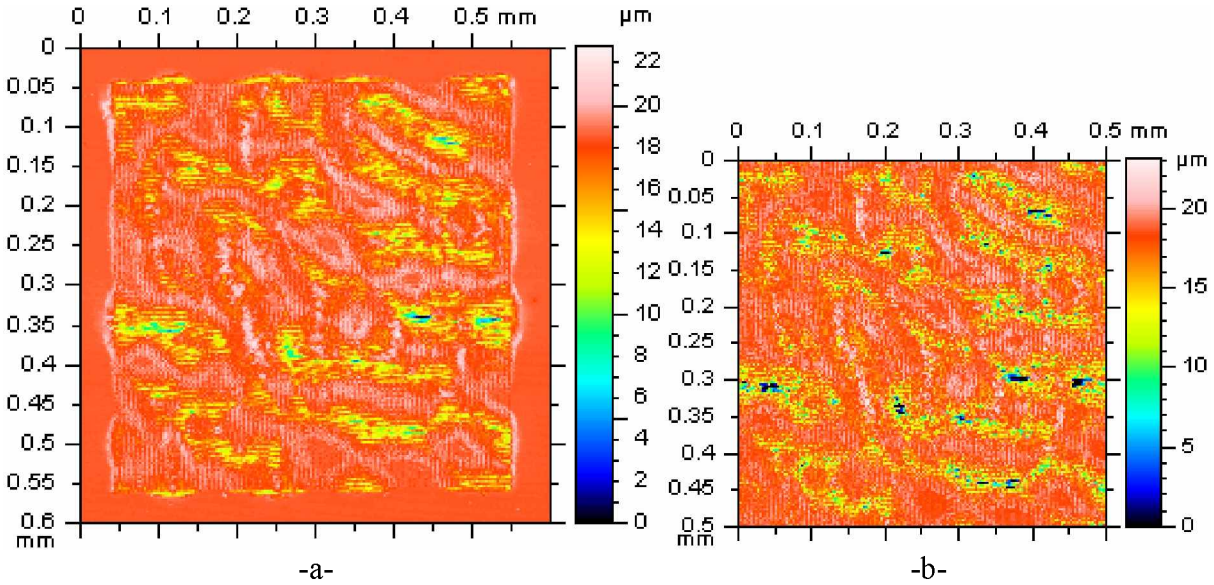


-a- -b-

Figura 4.54 – Primeira etapa da simulação. a- Área de trabalho; b- Ampliação. MEV.

As setas na Fig. 4.54b ressaltam os eventos que permaneceram não recobertos. Estes eventos foram os últimos a serem realizados nesse processo e são relativos aos picos da superfície da ondulação da referência (Fig. 4.51b).

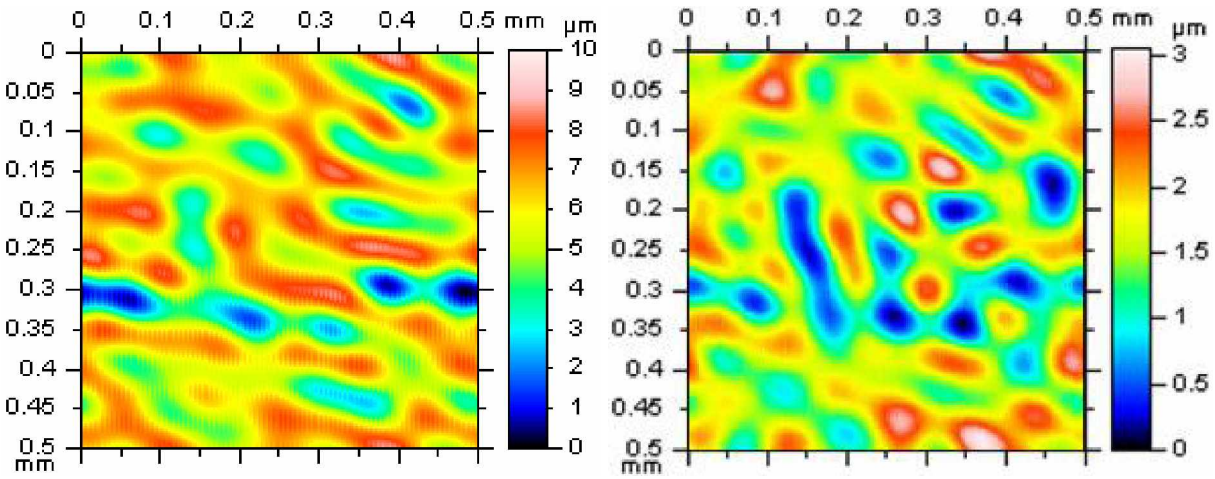
A Fig. 4.48 apresenta a topografia da superfície obtida nesse ensaio.



-a- -b-

Figura 4.55 - Topografia do ensaio de simulação. Primeira etapa. a- Área de trabalho; b- Ampliação. IL.

Filtrando a superfície produzida na simulação (Fig. 4.55b), com comprimento de onde de corte ("cut off") igual a 80 µm, obtém-se a ondulação mostrada na Fig. 4.56a.



-a- Simulação -b- Referência

Figura 4.56 – a- Ondulação da superfície obtida na simulação ("cut off" = 80µm); b- Ondulação da referência (Fig. 4.44b). IL.

Em comparação, a Fig. 4.56 mostra que, morfologicamente, a ondulação da superfície obtida na simulação tende a acompanhar a ondulação da referência, entretanto a altura das irregularidades das duas superfícies é diferente.

Utilizando o método de medição apresentado no tópico 4.2, e ilustrado na Fig. 4.28, calculam-se os valores de Rq de todos os perfis que compõem a superfície da rugosidade da referência (Fig. 4.51a) obtendo os valores de Rq apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Varredura na topografia do aço ferramenta. Rugosidade, "cut off" 80 µm.

Aço Ferramenta	**Rq (µm)**	**Força normal correspondente (N)**
Mínimo	0,77	0,35
Média	1,07	0,64
Máximo	1,44	1,10

Considerando que o Rq está relacionado com a profundidade das indentações é possível aplicar a relação entre força normal e profundidade da indentação isolada, mostrada na Fig. 4.57 para o aço ferramenta. Dessa relação, são calculados os valores da força normal média, máxima e mínima que completam a tabela 4.4.

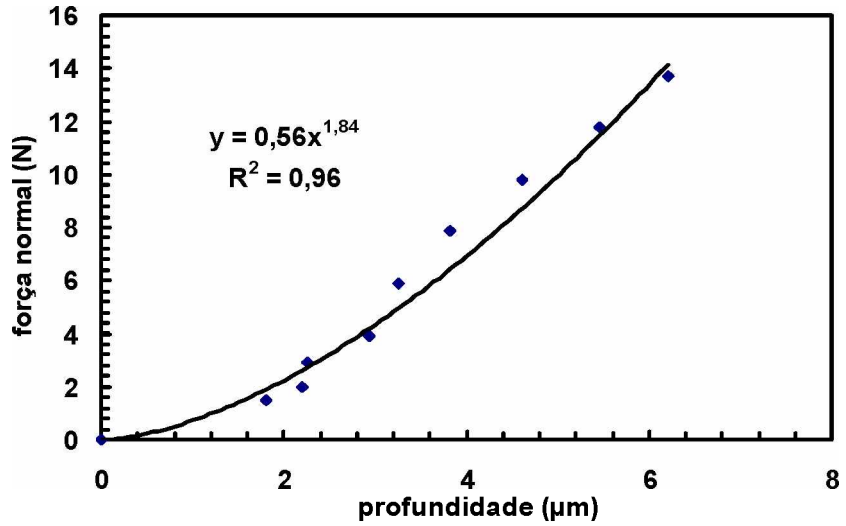


Figura 4.57 – Força normal versus a profundidade da indentação isolada. Aço ferramenta.

Usando os dados da tabela 4.4 em um gerador de números aleatórios de padrão normal determina-se o perfil de força mostrado na Fig. 4.58. A quantidade de eventos foi determinada usando a rotina apresentado no tópico 4.2 (Fig. 4.24). No aço ferramenta, foram necessários 5599 eventos aleatoriamente distribuídos para cobrir 95% da área de trabalho de 500 por 500 µm.

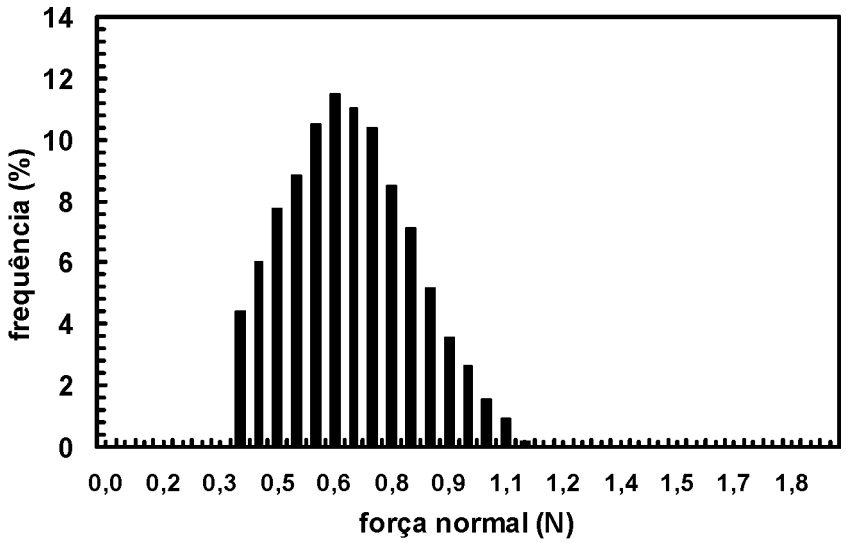
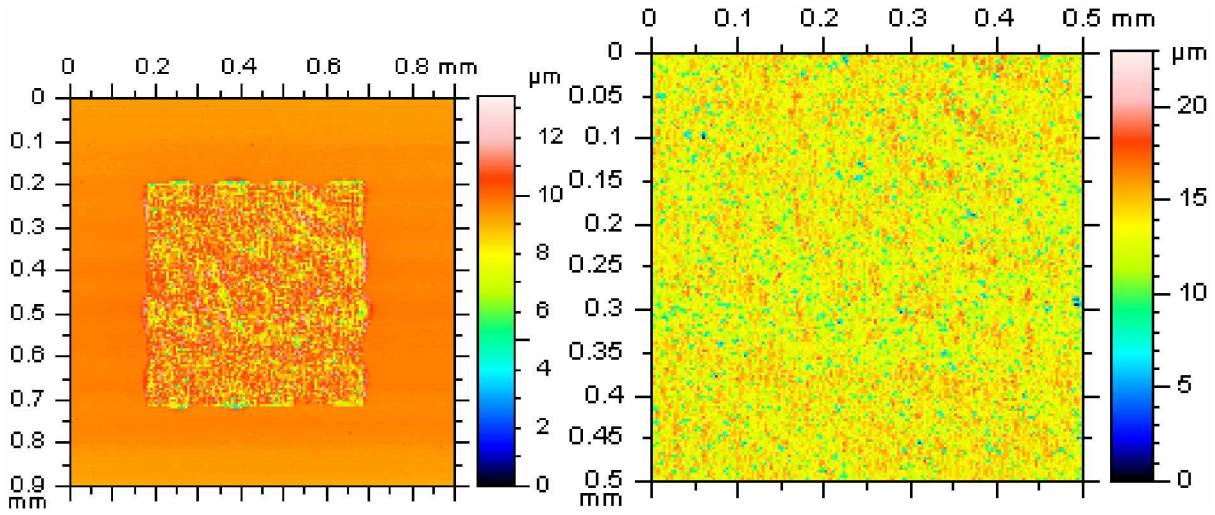
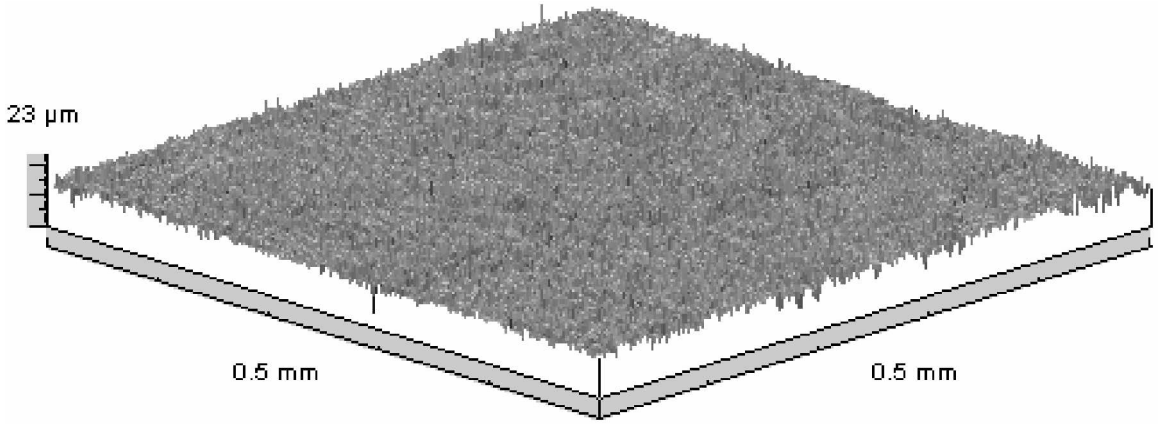


Figura 4.58 – Perfil de força de 5599 eventos.

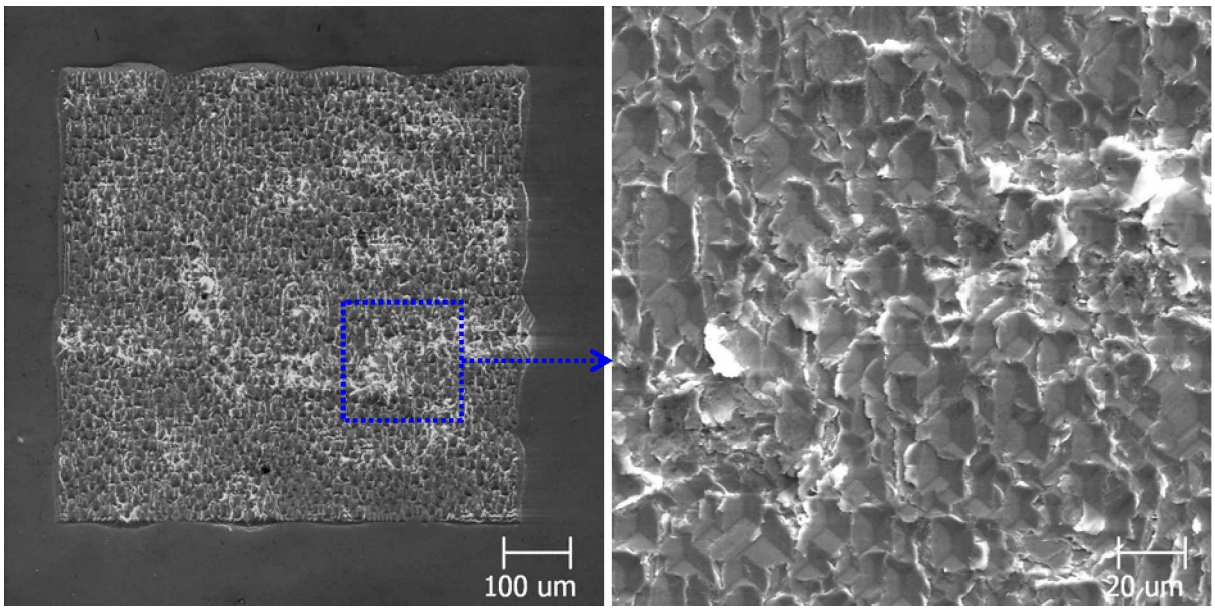
Esse perfil de força normal foi utilizado numa segunda etapa de simulação (Fig. 4.48), que foi realizada sobre a superfície apresentada na Fig. 4.54. A idéia é que a primeira etapa represente a ondulação da referência e a segunda etapa represente a rugosidade. Na segunda etapa da simulação a configuração utilizada foi a indentação aleatória (Fig. 3.10). A superfície resultante dessa segunda etapa de simulação está apresentada na Fig. 4.59.



-a- -b-



-c-



-d- -e-

Figura 4.59 – Topografia da segunda etapa do ensaio de simulação. a- Área de trabalho; b- Ampliação; c- Perspectiva. IL. Imagens: d- Área de trabalho; e- Ampliação. MEV.

Na topografia obtida na segunda etapa da simulação, mostrada na Fig. 4.59b foi calculado um valor de Sq igual a 1,74 µm, valor próximo ao calculado na topografia da referência (Fig. 4.49a) que foi 1,77 µm. A simulação em duas etapas gerou uma superfície com a rugosidade próxima à da referência.

É possível medir o volume de picos e vales na topografia da superfície, usando a borda da área de trabalho como referência da superfície da amostra, Fig. 4.59a. O volume obtido para o material deformado acima da superfície da amostra (picos), foi igual a 87944 µm³. O volume dos vales, ou seja, volume abaixo da superfície da amostra foi de 175907 µm³. O processo de simulação resultou em uma variação volumétrica de 87963 µm³.

A Fig. 4.60 apresenta a comparação da superfície obtida na segunda etapa da simulação com a referência. Foi aplicado o filtro com comprimento de onda de corte igual a 80 µm para evidenciar a ondulação e a rugosidade das superfícies.

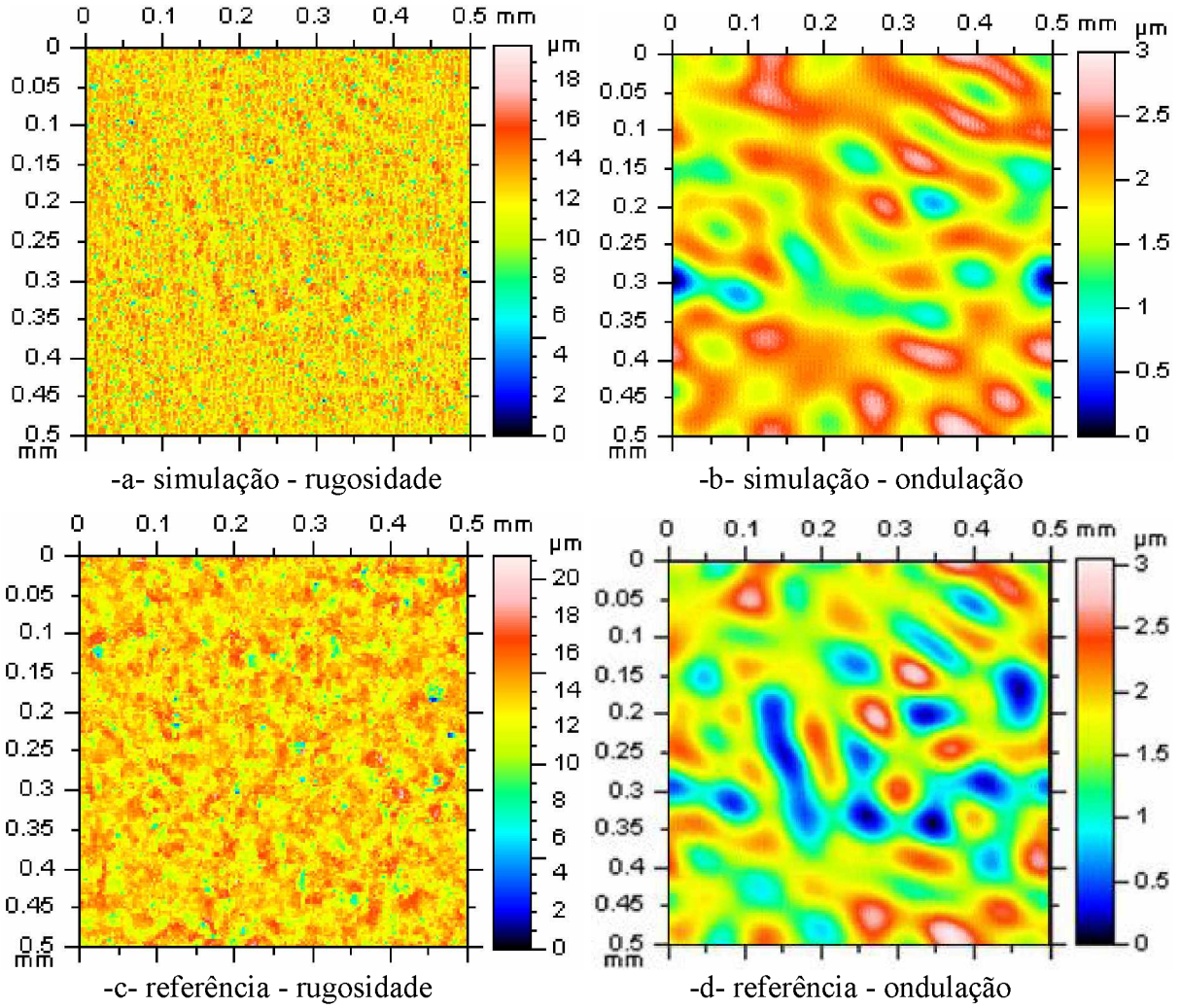
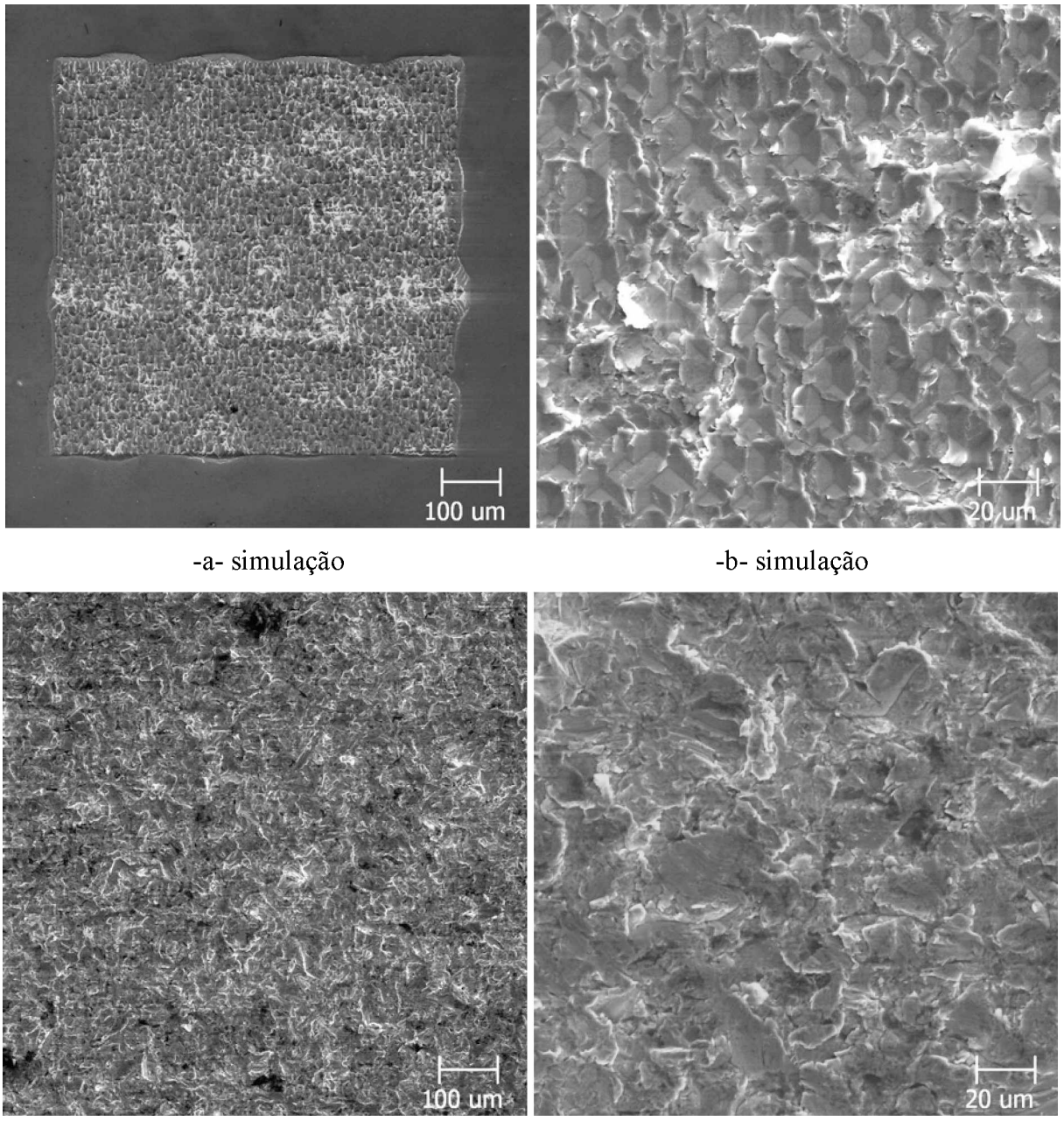


Figura 4.60 – Comparação das topografias filtradas, "cut off" 80 µm. a-b- Simulação. c-d- Referência (Fig. 4.51a-b). IL.

Observa-se a semelhança entre a ondulação da referência e a ondulação da simulação, inclusive a magnitude das irregularidades das duas topografias é a mesma (Fig. 4.60b e 4.60d). A superfície da rugosidade obtida na simulação, Fig. 4.60a, se apresenta com eventos menores em relação à referência, Fig. 4.60c.

Para comparação, as imagens da superfície obtida na simulação e da referência são apresentadas na Fig. 4.61.



-a- simulação -b- simulação

-c- referência -d- referência

Figura 4.61 – Imagens da superfície obtida na segunda etapa da simulação: a- Área de trabalho; b- Ampliação. c-d- Referência. MEV.

Comparando as Fig. 4.61a e Fig. 4.61c observa-se a semelhança visual da superfície obtida na simulação em comparação com a referência. Nas ampliações Fig. 4.61b e Fig. 4.61d observa-se a diferença da forma dos eventos, que, provavelmente, está associada à forma regular do indentador em comparação com a forma do abrasivo.

Na análise comparativa da topografia (Fig. 4.60) e da morfologia (Fig. 4.61), considerou-se a superfície obtida na simulação é semelhante à referência.

4.4.2 - Conclusões parciais

- Foi proposta uma abordagem para a simulação, que permite a aplicação do estudo da superposição demonstrado. Isso requer uma nova interpretação da superfície de referência, considerando os efeitos de ondulação.
- O comprimento de onda de corte "cut off" com valor representativo do maior tamanho de evento observado nas imagens da referência é um bom parâmetro para definir a ondulação e a rugosidade.
- O método de simulação realizado em duas etapas resultou em uma superfície morfológica e topograficamente semelhante à referência.
- Filtrando a superfície obtida na simulação, observa-se que a ondulação é semelhante à ondulação da referência. A rugosidade da superfície produzida na simulação apresenta eventos menores que os eventos presentes na referência.
- Foi observado desgaste no processo de simulação, medido via variação volumétrica.

4.5 Deslizamento paralelo

Outro desdobramento do estudo da simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo trata da simulação do deslizamento paralelo das partículas. Assim como o estudo do rolamento das partículas, o processo de simulação do deslizamento paralelo evoluiu à medida que os resultados da simulação apresentavam superfícies pouco semelhantes à referência. Inicialmente foram realizados testes com força normal dos eventos fixa e de acordo com parâmetros de rugosidade da referência. Também foi observado o efeito de superposição dos deslizamentos, e realizado um estudo que determina a profundidade média dos deslizamentos superpostos em função da força normal e da superposição dos eventos. Esse estudo mostrou a ocorrência do desgaste para valores de superposição maiores que 80%. Foi desenvolvido um método para simular o deslizamento paralelo usando o estudo da superposição dos eventos.

A referência desse estudo é o aço ferramenta, ensaiado no abrasômetro roda de borracha (tópico 3.1), que favorece o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste, com forte direcionamento. As condições de ensaio foram: força normal 18,75 N; contra-corpo de borracha; abrasivo areia normal brasileira número 50 (peneira de 0,3 a 0,6 mm), a seco; velocidade 100 rpm; tempo de ensaio 30 minutos. A interferometria da referência está apresentada na Fig. 4.62.

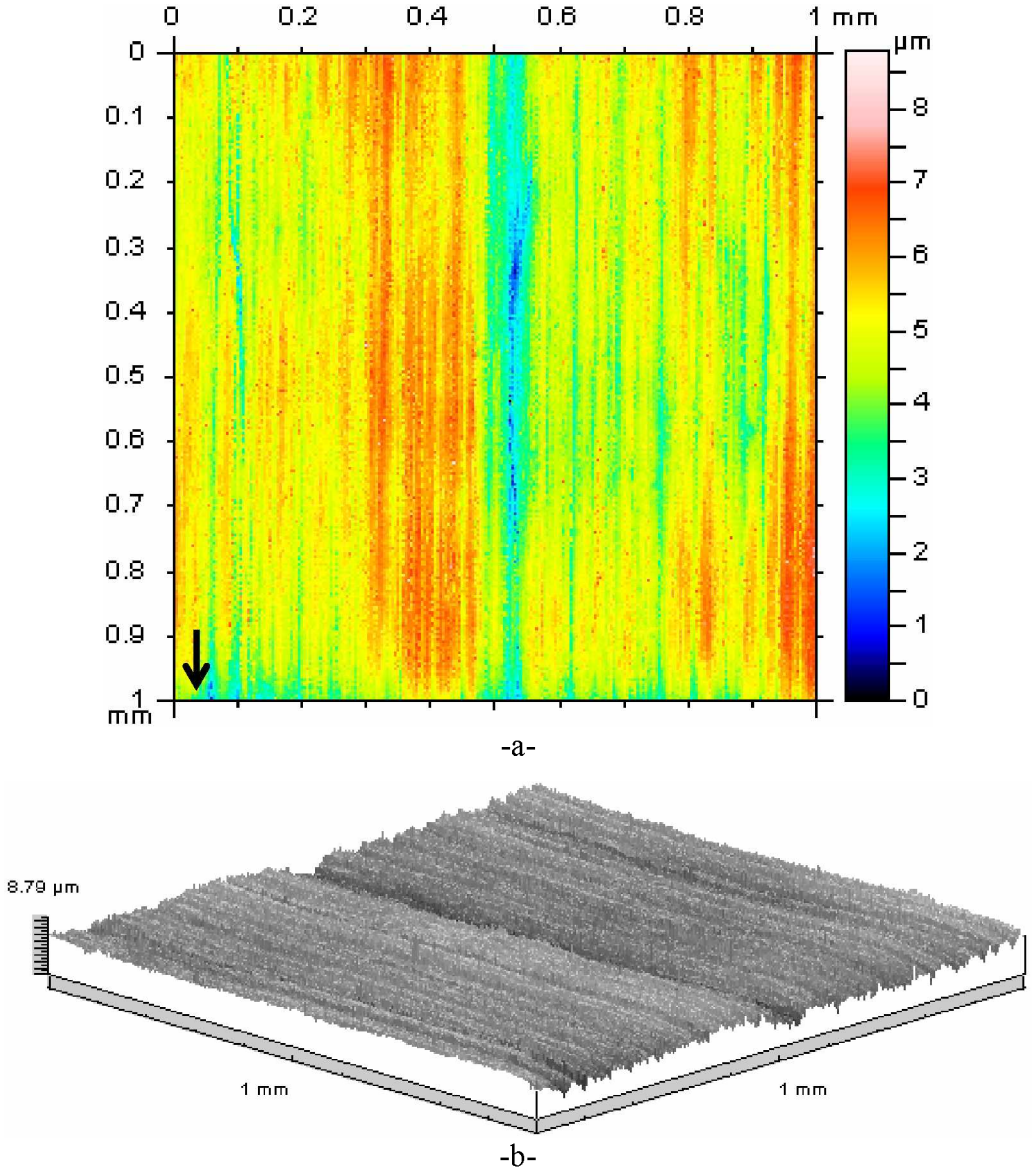
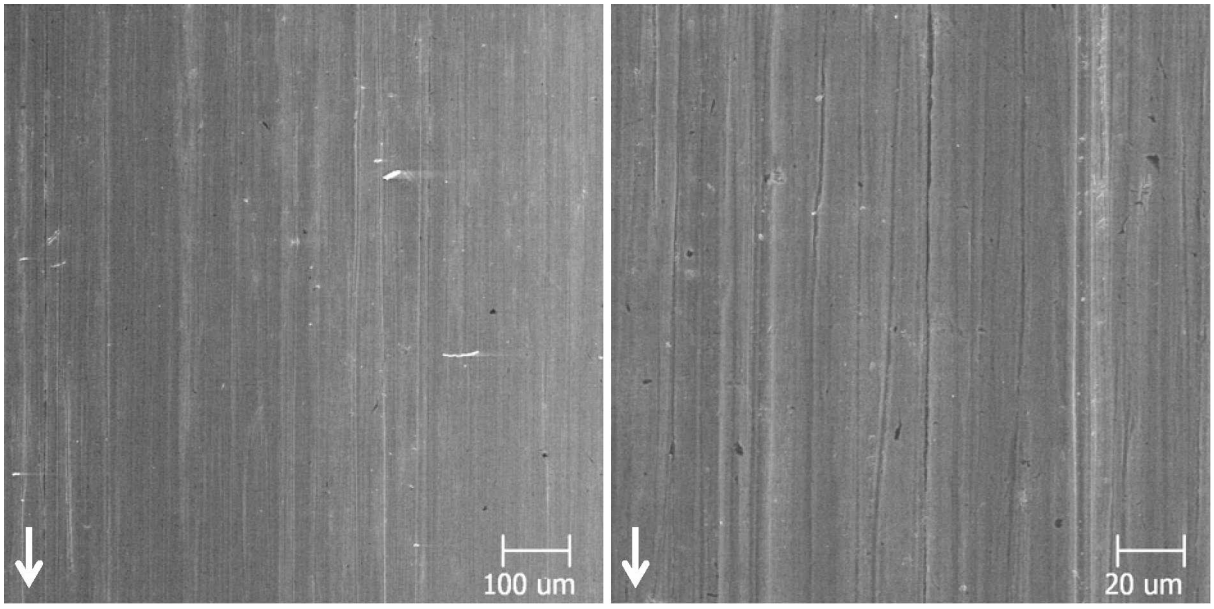


Figura 4.62 – Referência aço ferramenta, deslizamento paralelo; a- Topografia como adquirida; b- Perspectiva. IL.

Na superfície apresentada na Fig. 4.62 foi calculado o valor de Sq igual a 0,83 µm. A Fig. 4.63 mostra o mecanismo de desgaste encontrado na referência, evidenciando o movimento de deslizamento paralelo das partículas abrasivas. A seta indica o sentido do deslizamento das partículas abrasivas.



-a- -b-

Figura 4.63 – Mecanismo de desgaste encontrado na referência de aço ferramenta; a- Deslizamento paralelo; b- Ampliação. MEV.

As setas indicam o sentido do deslizamento das partículas abrasivas. As medições nas imagens obtidas mostraram que o maior valor de largura de deslizamento encontrado na superfície abrasonada foi 12,5 μm.

O deslizamento isolado é realizado sem a interferência de eventos próximos, ou seja, sem efeito da superposição. A profundidade dos eventos isolados em função da força normal do deslizamento está apresentada na Fig. 4.64.

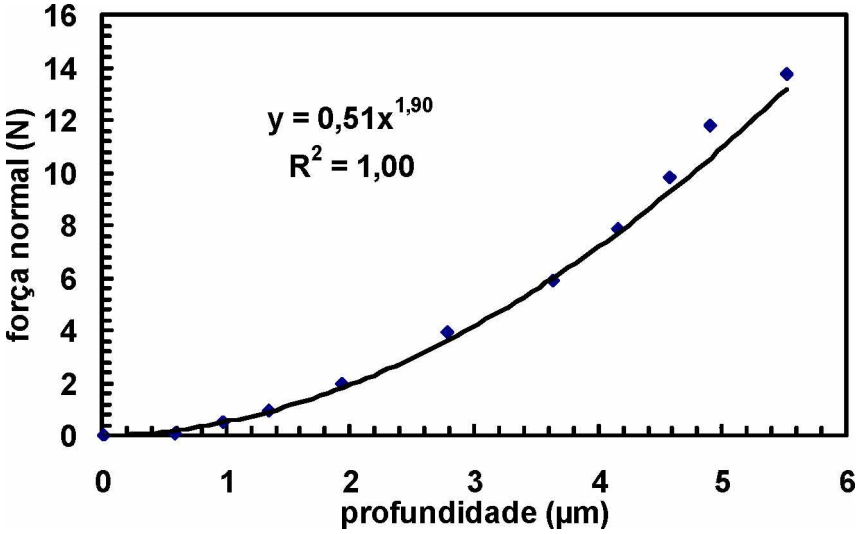


Figura 4.64 – Força normal em função da profundidade do deslizamento isolado.

Os valores apresentados no gráfico da Fig. 4.64 foram medidos usando interferometria laser. Considerando o Sq uma medida de profundidade média dos eventos ocorridos no

desgaste, e de acordo com a relação mostrada na Fig. 4.64, o Sq igual a 0,83 μm corresponde a eventos com 0,36 N.

A Fig. 4.65 mostra a relação entre largura do deslizamento isolado em função da força normal usada para realizá-lo.

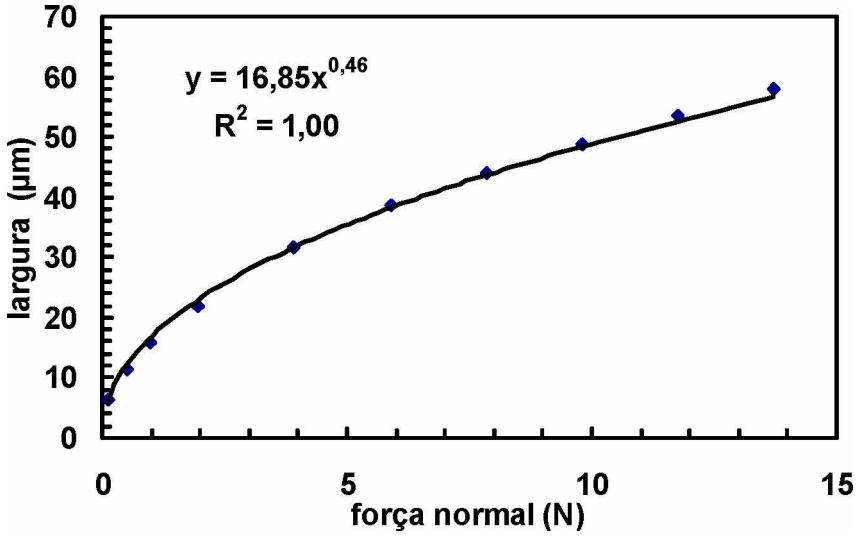


Figura 4.65 - Relação entre força normal e largura do deslizamento isolado.

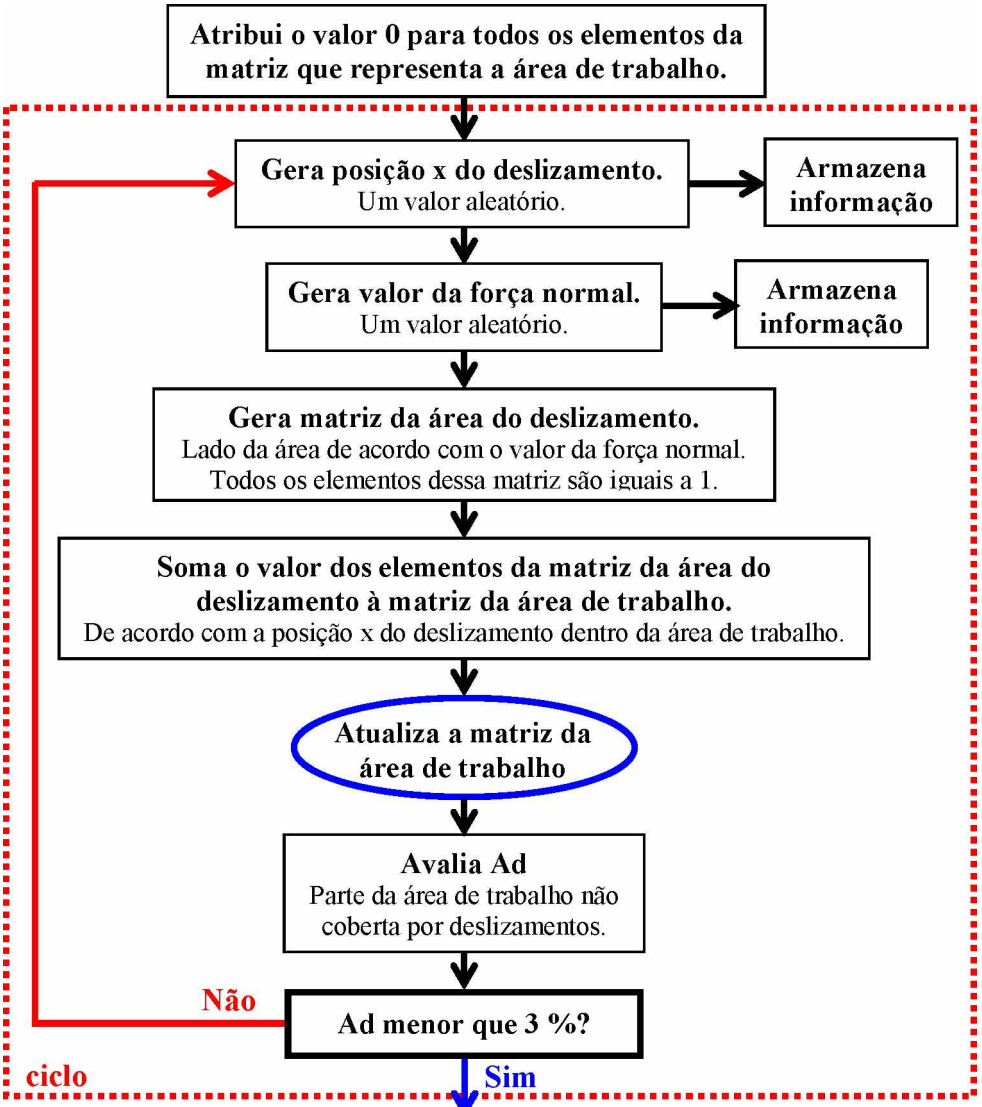
Para analisar previamente a área ocupada pelos eventos na área de trabalho, a rotina apresentada no tópico 4.2 (Fig. 4.24) foi adaptada para o deslizamento paralelo. Foi utilizada a relação entre a largura do deslizamento isolado e a respectiva força normal, mostrada na Fig. 4.65, para determinar a região ocupada por um deslizamento dentro da área de trabalho. O algoritmo deste programa está apresentado na Fig. 4.66a e um exemplo do gráfico gerado na análise da área ocupada por eventos de mesma força normal está apresentado na Fig. 4.66b.

Na Fig. 4.66b está representado em azul a área do deslizamento, em branco a região de superposição dos eventos. Esse gráfico mostra 30 eventos de 0,36 N numa área de trabalho de 550 por 550 μm. Nesse caso a posição x dos eventos foi determinada usando um gerador randômico de padrão uniforme.

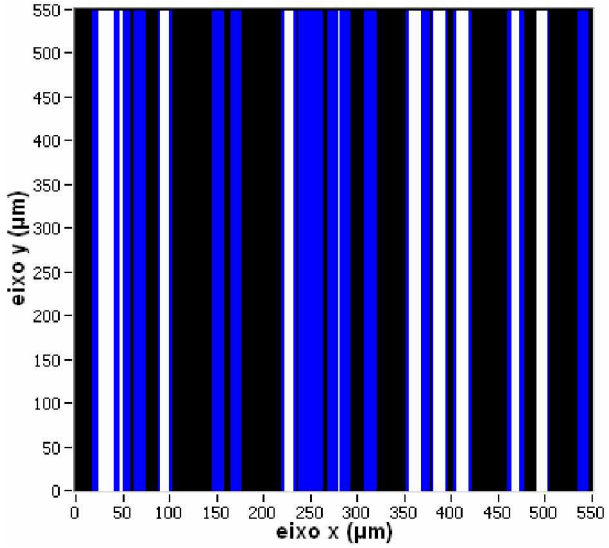
Esse programa mostrou que são necessários 212 deslizamentos de 0,36 N para cobrir 99% da área de trabalho.

Em uma primeira abordagem da simulação do deslizamento paralelo das partículas abrasivas, procedeu-se a simulação com força normal fixa em 0,36 N, e posicionamento aleatório em relação ao eixo x da área de trabalho.

O resultado da simulação do deslizamento paralelo com eventos distribuídos aleatoriamente e de força normal igual a 0,36 N, está apresentado na Fig. 4.67.

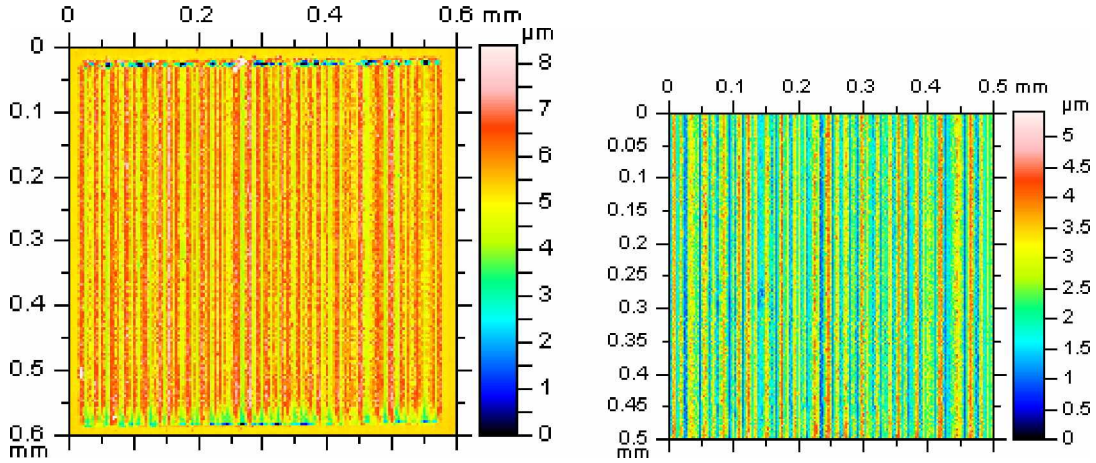


-a-



-b-

Figura 4.66 – Programa para a medição da área ocupada por deslizamentos paralelos. a- Algoritmo; b- gráfico gerado para 30 eventos.



-a- -b-

Figura 4.67 – Simulação de deslizamentos paralelos com força normal constante. a- Área de trabalho; b- Ampliação. IL.

A Fig. 4.67b mostra a ampliação na região interna da área de trabalho. O Sq calculado nessa área é igual a 0,873 µm, valor próximo ao da referência, 0,83 µm. Esse resultado mostra que a simulação do deslizamento paralelo com força normal constante e de acordo com o Sq da referência, gera uma superfície com Sq próximo ao da referência. Entretanto o aspecto visual dessa superfície se mostra muito homogêneo em relação à referência.

Análogo ao estudo da indentação múltipla, nessa fase do estudo do deslizamento paralelo, utilizou-se a variação de força normal de acordo com parâmetros de rugosidade da referência, para aumentar a heterogeneidade na simulação.

O método apresentado no tópico 4.2 (Fig.4.28) permite o cálculo de parâmetros de rugosidade bidimensionais para todos os perfis que compõem a superfície. O parâmetro de rugosidade híbrido λq está associado ao comprimento de onda médio do perfil de rugosidade (tópico 3.5.2). Ou seja, considerando o perfil de rugosidade bidimensional uma função periódica, o λq está associado ao comprimento de onda médio dessa função. Nesse caso, assume-se que cada oscilação da função periódica representa um evento médio e o comprimento de onda é a largura desse evento.

As setas indicadas nas Fig. 4.62 e Fig. 4.63 mostram o sentido do deslizamento das partículas abrasivas da topografia da referência. No caso do deslizamento paralelo, extraindo um perfil perpendicular à direção do movimento do abrasivo, o comprimento de onda médio (λq) pode ser comparado à largura média dos eventos descritos nesse perfil.

O maior valor de largura de deslizamento medida nas imagens da superfície da referência (Fig. 4.63) foi 12,5 µm. Essa medição foi realizada utilizando um programa de análise de imagens (Image J, versão 1.37). Considerando que não ocorreram eventos com

largura maior que 20 μm, esse valor foi adotado como comprimento de onda de corte do processo de filtragem ("cut off").

A tabela 4.5 mostra o resultado de λq calculado para todos os perfis perpendiculares à direção de movimento da partícula na topografia da referência (Fig. 4.62).

Tabela 4.5 - Varredura na topografia da referência, parâmetro λq, "cut off" 20 μm.

Aço Ferramenta	λq (μm)	Força normal correspondente (N)
Mínimo	10,8	0,38
Média	11,7	0,46
Máximo	17,5	1,08

A força normal correspondente ao λq foi calculada usando a relação entre a largura e a força normal do deslizamento isolado, mostrada no gráfico da Fig. 4.65.

Os valores de força normal dos eventos foram definidos usando um gerador randômico de padrão normal, de acordo com os valores de força normal média, máxima e mínima, apresentados na tabela 4.5. O perfil de força gerado está apresentado na Fig. 4.68.

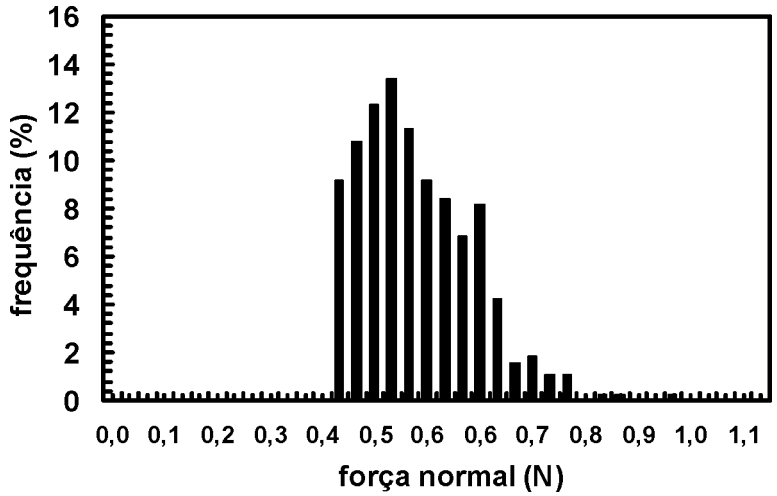


Figura 4.68 – Perfil de força normal relacionado ao λq de referência ("cut off" = 20 μm).

Utilizando os valores de força normal, calculados de acordo com o λq da referência, na rotina apresentada na Fig. 4.66 foi definido o posicionamento aleatório de 380 eventos. Essa quantidade de eventos é suficiente para cobrir 99% da área de trabalho de 550 por 550 μm. O resultado do processo de simulação do deslizamento paralelo com força normal variável de acordo com o λq da referência está apresentado na Fig. 4.69.

Em comparação, a Fig. 4.69 mostra que a superfície produzida nesse processo de simulação e a referência não são morfologicamente semelhantes, pois apresenta eventos de tamanhos regulares e pequenos em relação à referência.

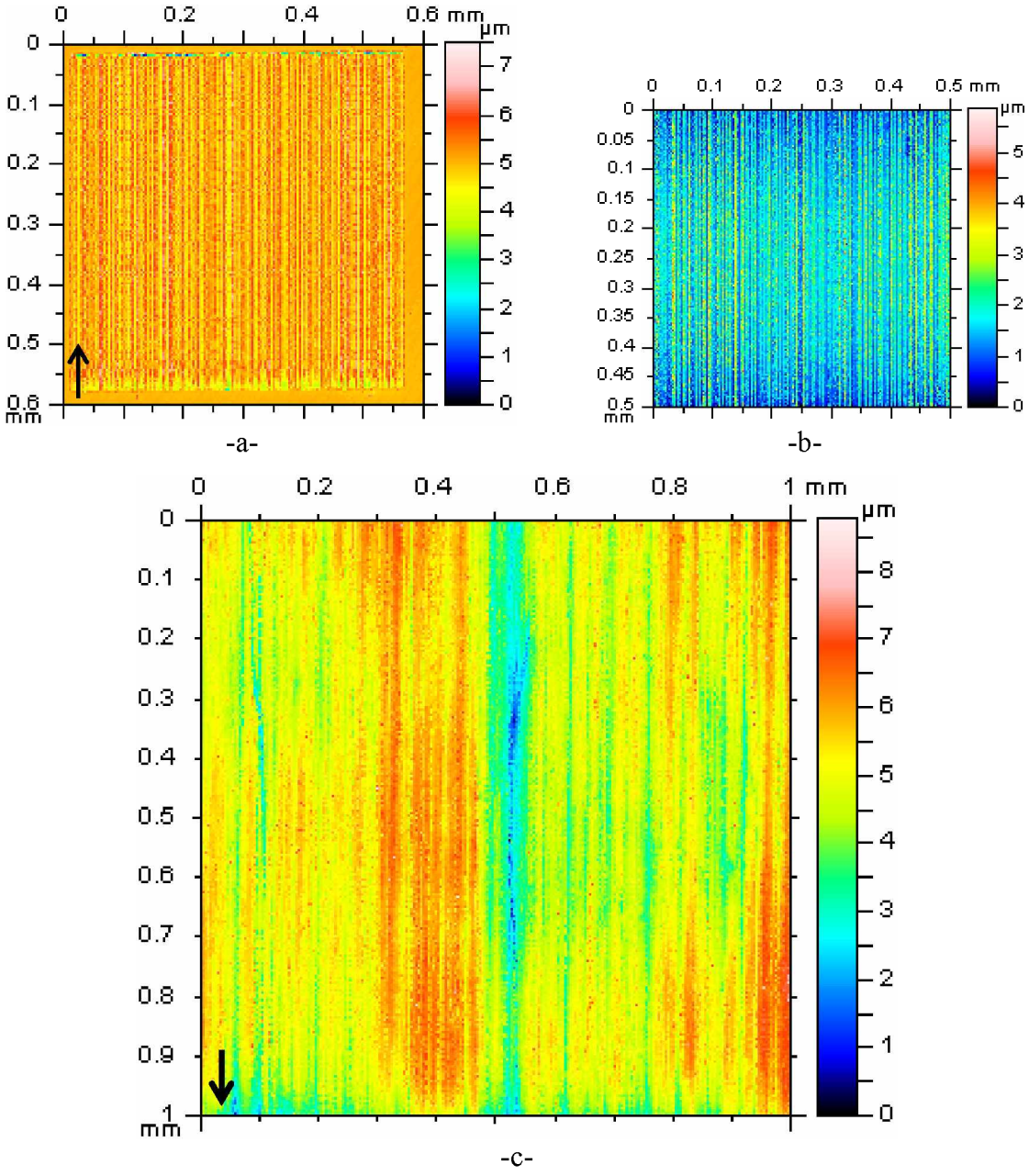


Figura 4.69 – Simulação de deslizamentos paralelos com força normal variável de acordo com o λq. a- Área de trabalho; b- Ampliação; c- Referência (Fig. 4.55a). IL.

O λq médio de todos os perfis que compõem a topografia da superfície obtida na simulação (Fig. 4.69b) pode ser medido usando o método apresentado no tópico 4.2 (Fig.4.28). O valor do λq médio calculado é 7,15 µm. A diferença entre o valor do λq médio da superfície de simulação e o da referência (tabela 4.5) está associada à interação entre os deslizamentos.

Análogo ao estudo da indentação múltipla, o estudo do deslizamento paralelo passa a uma nova faze que objetiva entender o processo de interação entre os eventos – a

superposição de deslizamentos paralelos. O esquema da Fig. 4.70 apresenta o método utilizado para o estudo da superposição de deslizamentos paralelos.

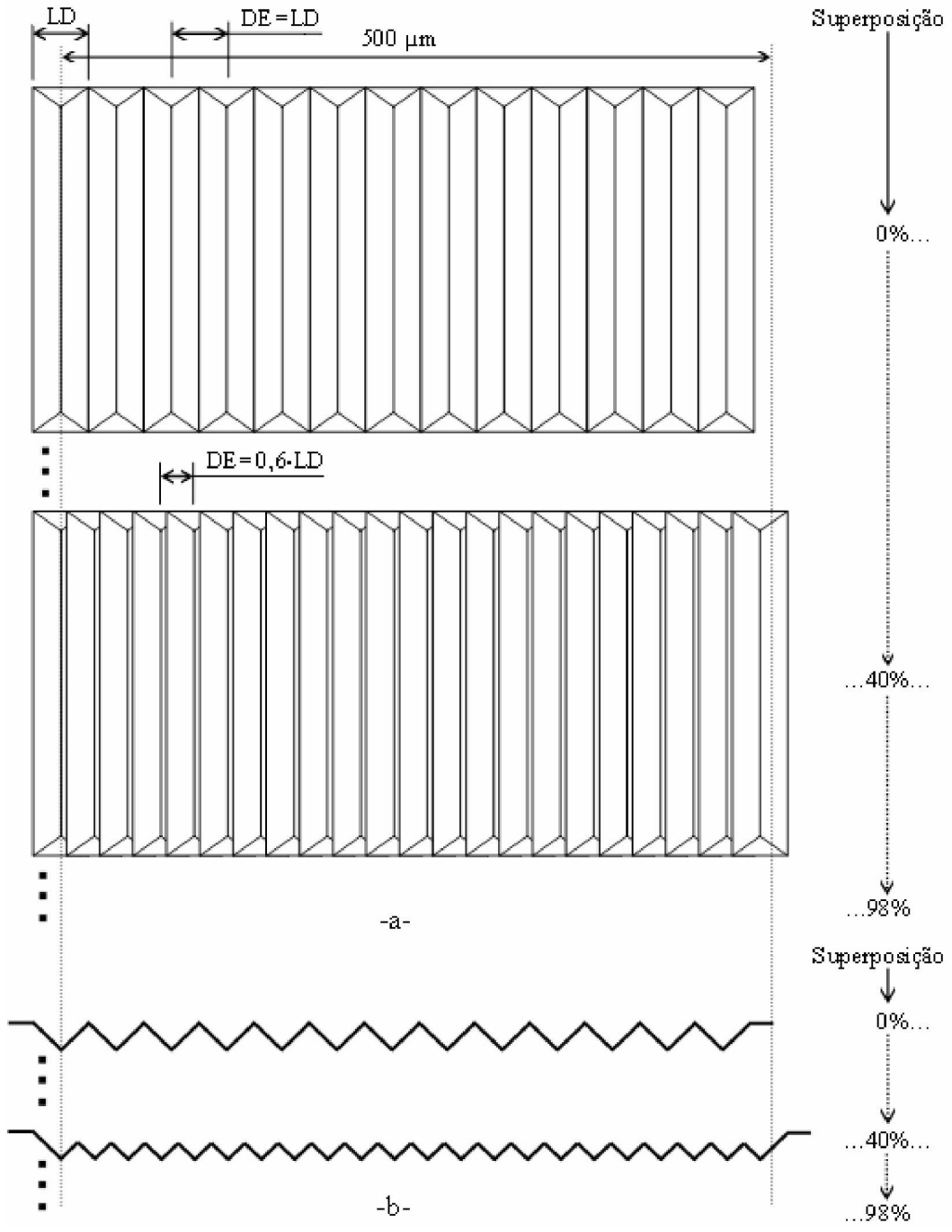


Figura 4.70 – Esquema. a- Método de superposição de deslizamentos paralelos com quantidade variável de eventos; b- Perfil transversal.

A metodologia usada para estudar a superposição do deslizamento consiste em se fazer uma seqüência de deslizamentos equiespaçados de mesma força normal variando a distância entre os eventos (DE). A largura do deslizamento (LD) se relaciona com a força

normal de acordo com o gráfico apresentado na Fig. 4.65. A superposição é dada pela relação entre largura do evento e distância entre os eventos no eixo x da área de trabalho. Nesse método, as áreas formadas têm largura fixa de 500 µm, ou seja, a quantidade de eventos varia de acordo com a superposição e a força normal. No inicio de cada deslizamento é necessário um tempo de estabilização do controle da força normal que pode interferir na profundidade média do deslizamento. Assim, o comprimento do deslizamento é de 800 µm, para serem analisados 600 µm. Foi adotada uma velocidade de deslizamento lenta, 30 µm por segundo. Devido a limitações do movimento de translação do indentador a máxima força normal possível nos ensaios de superposição foi 11,8 N. Por simetria, a primeira análise do efeito da superposição foi realizada em 5,9 N. Nos primeiros ensaios foram avaliados os seguintes níveis de superposição: 0, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 98 %.

Foram obtidos 50 perfis em cada área dos ensaios de superposição de deslizamentos, na direção perpendicular à do movimento do indentador. A área obtida em um ensaio realizado a 90% de superposição e força normal 5,9 N, está apresentado na Fig. 4.71a.

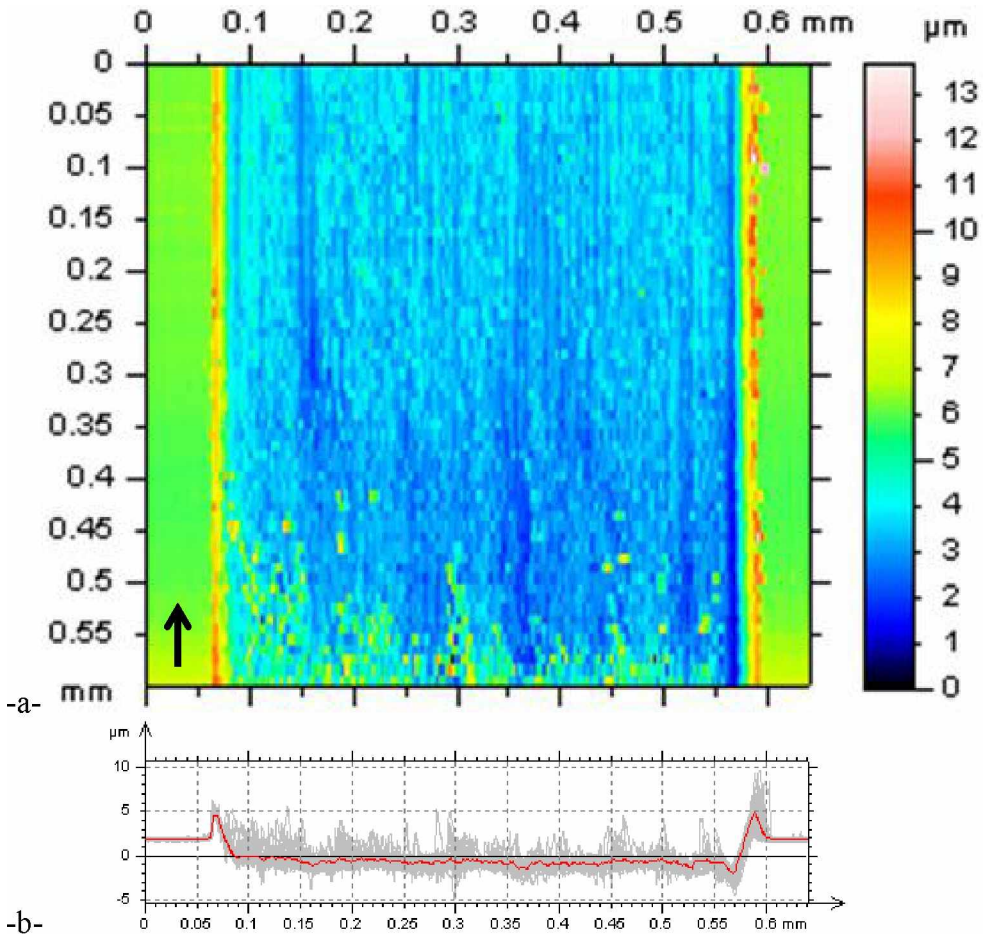
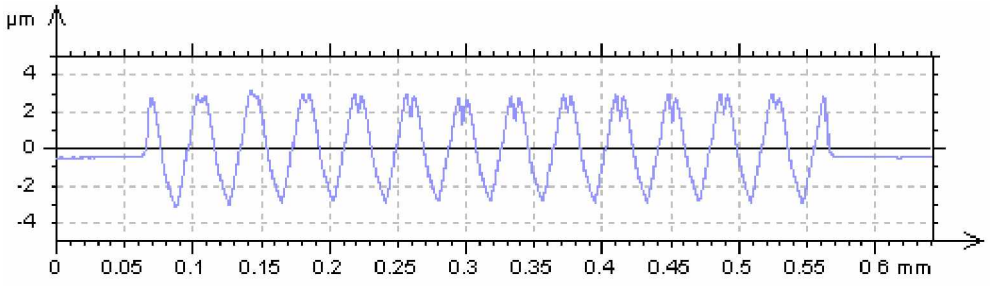


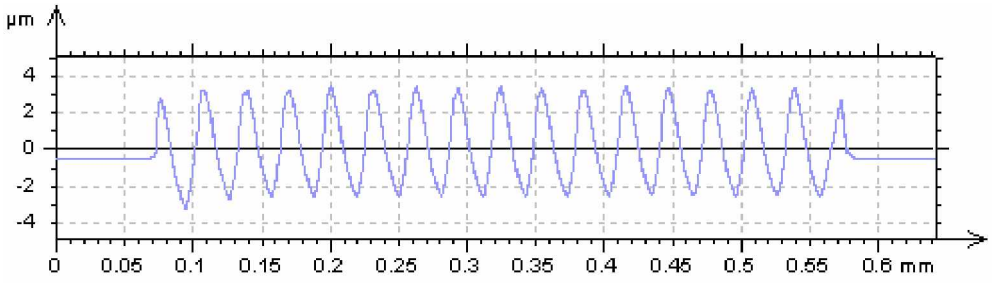
Figura 4.71 – a- Área de deslizamentos superpostos a 90% de superposição e Fn=5,9 N; b- Perfil médio. Mountains Map®.

O perfil médio é resultado do cálculo da média da topografia da superfície segundo uma direção ortogonal. No exemplo mostrado na Fig. 4.71b o perfil médio é calculado na direção de deslizamento dos eventos mostrados na área da Fig. 4.71a (seta), ou seja, o perfil médio é perpendicular à direção do movimento do indentador.

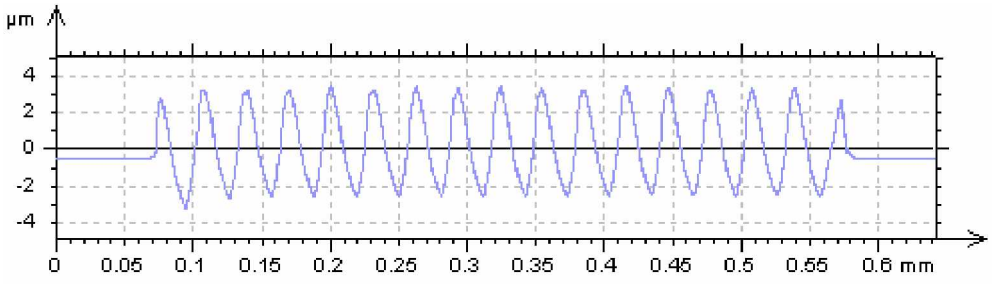
A Fig. 4.72 mostra o perfil médio respectivo a cada área dos ensaios de superposição de deslizamentos paralelos.



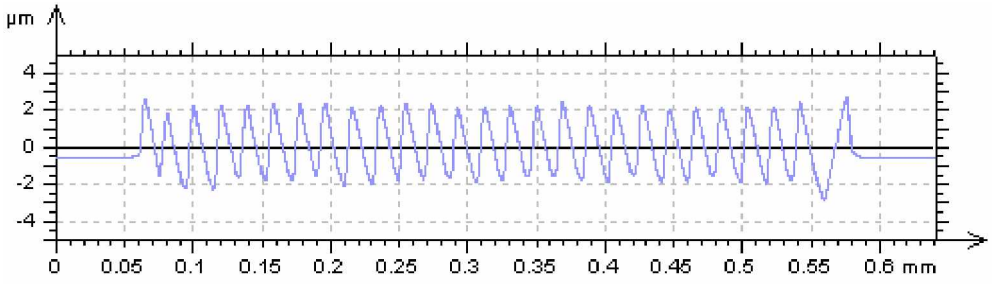
-a- superposição 0%



-b- superposição 20%



-c- superposição 40%



-d- superposição 50%

Figura 4.72: Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Continua.

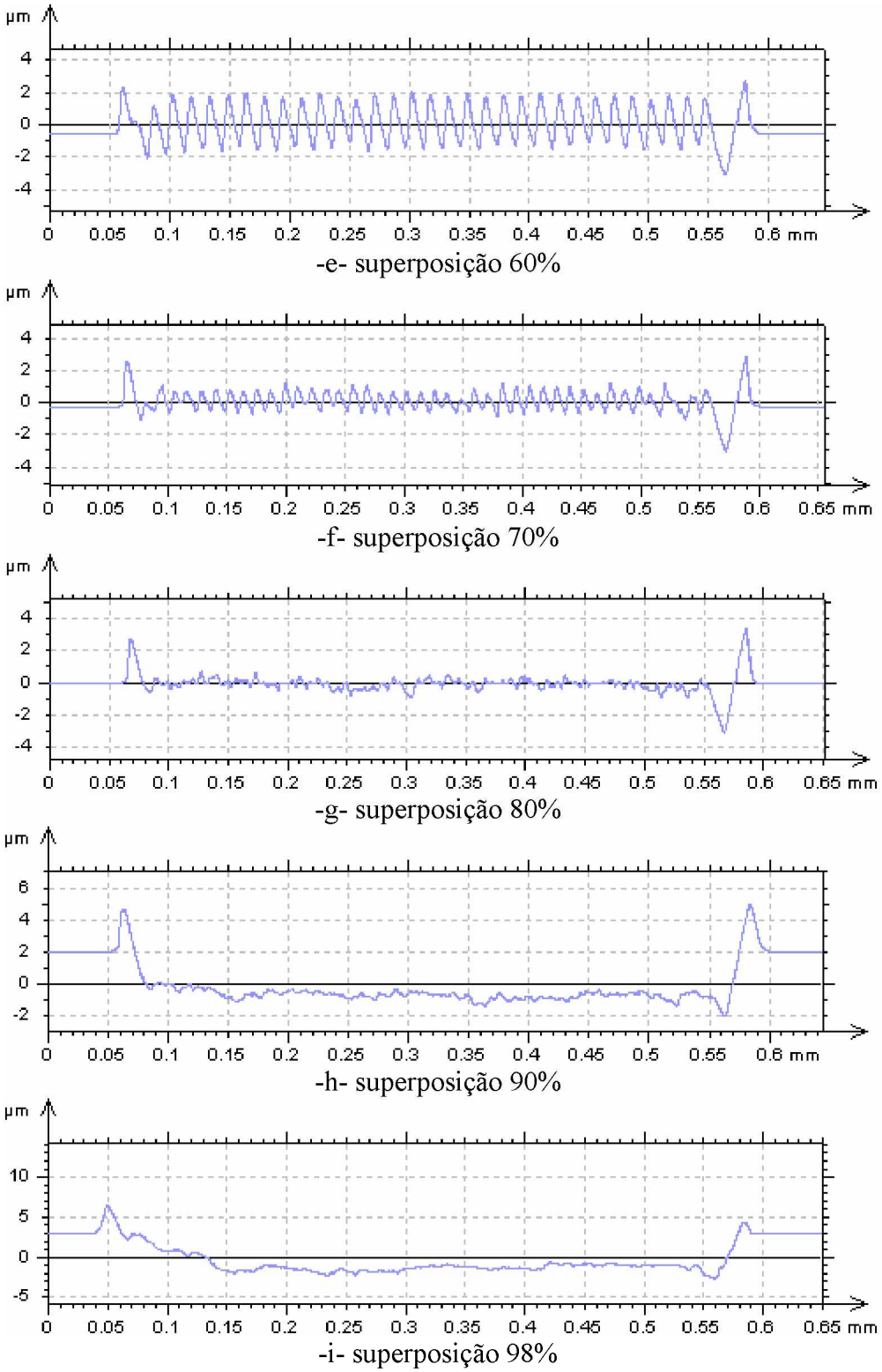


Figura 4.72 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL.

Nos perfis mostrados na Fig. 4.72 o perfil médio representa o comportamento da largura e da profundidade dos eventos ao longo da área ensaiada. Foram calculadas a profundidade média dos eventos, e as áreas acima e abaixo da superfície da amostra. Estes resultados são apresentados no gráfico da Fig. 4.73.

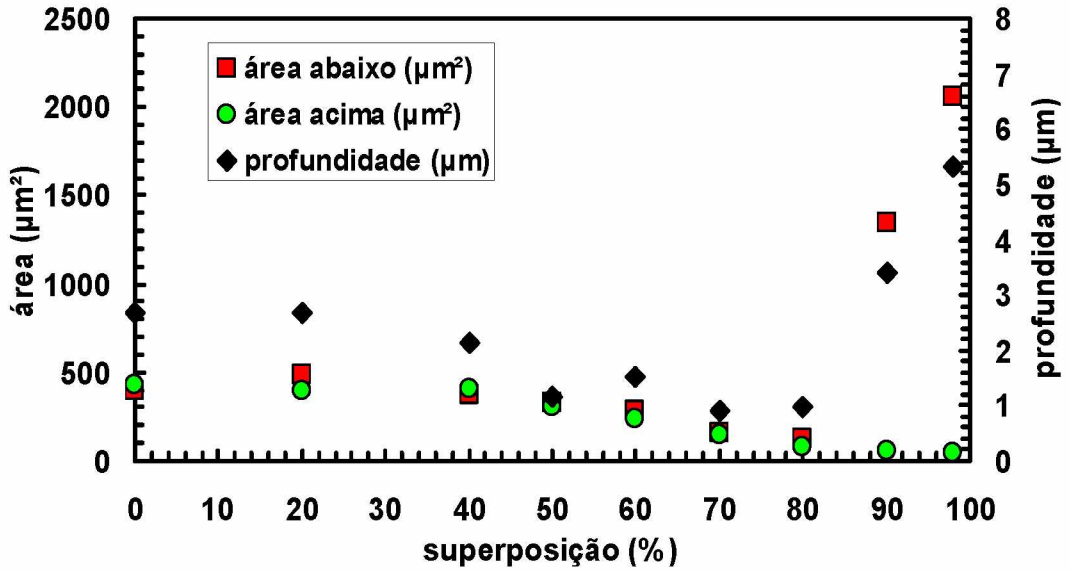


Figura 4.73 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força normal 5,9 N.

As áreas referentes à deformação acima e abaixo da superfície da amostra permanecem com valores próximos até 80% de superposição. Acima de 80% o valor da área abaixo da superfície aumenta enquanto a área deformada acima da superfície permanece pequena. A profundidade média dos eventos também acompanha o aumento da área deformada abaixo da superfície. Esse gráfico evidencia que acima de 80% de superposição ocorre a remoção de matéria da amostra. De fato, a interação entre os eventos foi suficientemente intensa para levar a formação de pequenos fragmentos nas áreas com superposição acima de 80%, como mostrado na Fig. 4.74.

Na Fig. 4.74 as setas indicam o sentido do deslizamento e da repetição dos riscos/sulcos na área de trabalho. Inicialmente a superfície da amostra foi polida, ou seja, as marcas pretas em torno da área de trabalho são os fragmentos formados durante o ensaio. Observa-se que os fragmentos se formam preferencialmente na região próxima ao final do deslizamento, indicando que o material é cortado do início paro final do risco/sulco.

O trabalho de Williams e Xie (1992) mostrou que a superposição de deslizamentos favorece o micromecanismo de remoção de matéria misto (microsulcamento+microcorte), mesmo em indentadores com pequeno ângulo de ataque. O microcorte é favorecido porque o indentador interage com o material da superfície da amostra e com o material deformado pelo deslizamento anterior, como mostrado no esquema da Fig.2.26. Os resultados apresentado na superposição de deslizamentos paralelos, Fig. 4.73 e Fig. 4.74, concordam com o trabalho de Williams e Xie (1992).

Nesse trabalho procura-se utilizar a profundidade média dos eventos no processo de simulação do desgaste. Assim, define-se a área de interesse no estudo da superposição de

deslizamentos paralelos para superposições acima de 80% em toda a faixa de força normal. Os experimentos foram planejados para 3 níveis de superposição 80, 90 e 98%, e cinco níveis de força normal: 0,49; 2,9; 5,9; 8,8 e 11,7 N.

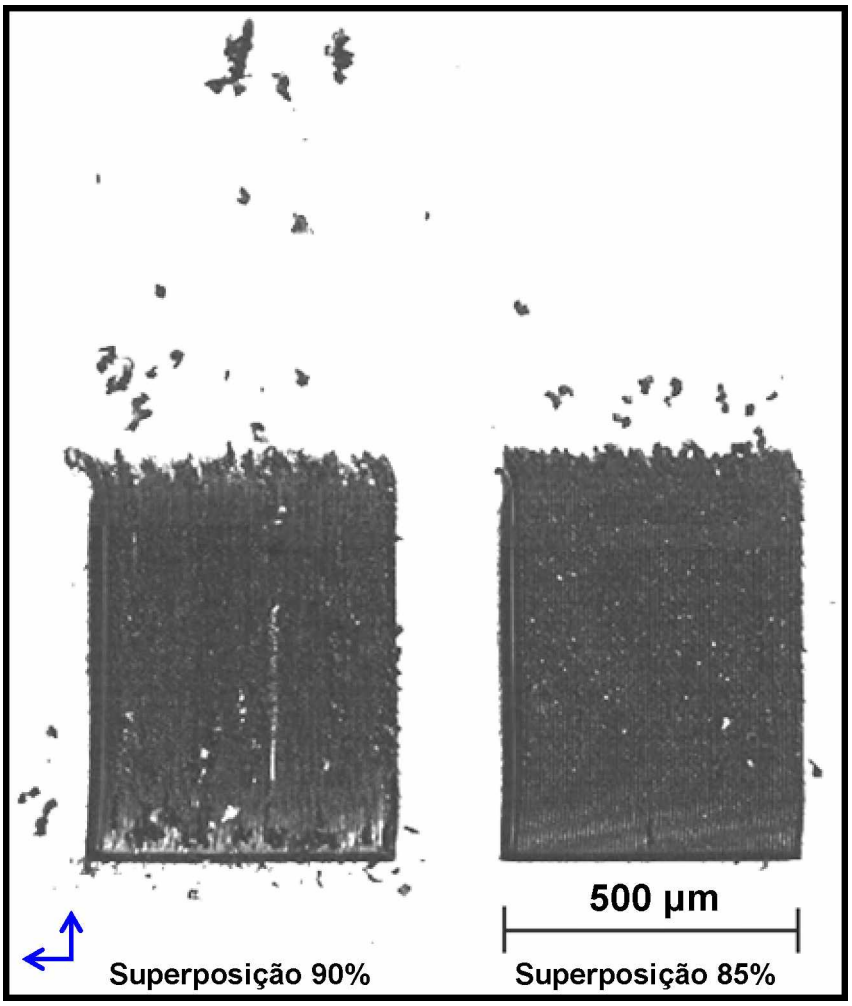


Figura 4.74 – Fragmentos formados nos ensaios de superposição de deslizamentos paralelos.

A tabela 4.6 lista as informações sobre os ensaios de superposição.

Tabela 4.6 - Informações sobre os ensaios de superposição de deslizamentos paralelos.

Ensaio	Superposição (%)	Força normal (N)	Largura do deslizamento (µm)	Distância entre eventos (µm)	Número de eventos
1	98	0,49	12,12	0,24	2063
2	98	2,94	27,75	0,55	901
3	98	5,88	38,23	0,76	654
4	98	8,83	46,11	0,92	542
5	98	11,77	52,67	1,05	475
6	80	5,88	38,23	7,65	65
7	90	5,88	38,23	3,82	131
8	80	0,49	12,12	2,42	206
9	80	11,77	52,67	10,53	47

Os resultados obtidos nesses ensaios estão apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados de profundidade média na superposição de deslizamentos paralelos.

Profundidade (µm)		Força normal (N)				
		0,49	**2,94**	**5,88**	**8,83**	**11,77**
Superposição (%)	**80**	0,15		0,98		2,14
	90			3,42		
	98	0,31	1,16	5,31	8,17	8,36

Graficamente, esses resultados são apresentados na Fig. 4.75.

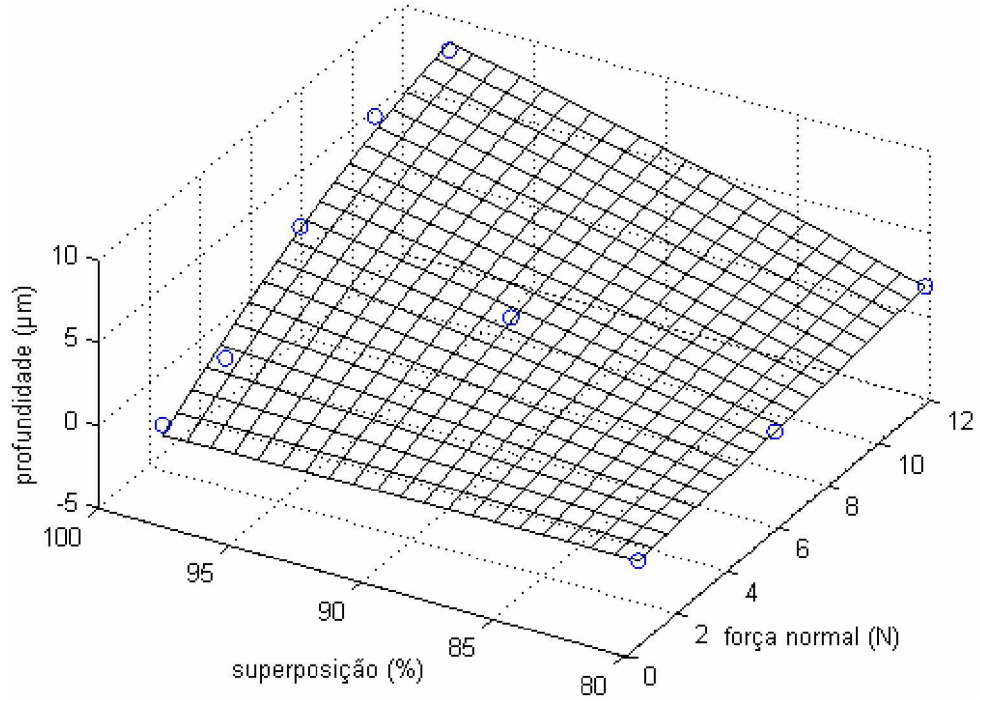


Figura 4.75 – Profundidade média na superposição de deslizamentos paralelos.

A Fig. 4.75 mostra que as duas variáveis afetam a resposta da profundidade média na superposição de deslizamentos paralelos. A profundidade média dos eventos aumenta com o aumento da força normal. A variável força normal pode influenciar em até 2700% a resposta da profundidade média. Na faixa de superposição estudada, a profundidade média aumenta com o aumento do valor da superposição. Observa-se que a influência da superposição na profundidade média, para o mesmo valor de força normal, chega a 540%. O polinômio que melhor representa a superfície de resposta está apresentado na Eq. 4.4.

$$profundida\ de = -4{,}48 - 4{,}83\,Fn + 0{,}151\,S + 0{,}062\,S.Fn + 0{,}082\,Fn^2 - 1{,}2.10^{-3}\,S^2 - 1{,}2.10^{-5}\,Fn^2.S^2 \quad (4.4)$$

Onde S é o percentual de superposição e Fn é a força normal. O ajuste desse polinômio aos resultados obteve R^2 igual a 0,964.

4.5.1 - Simulação do deslizamento paralelo considerando a superposição.

A Fig. 4.76 mostra um esquema do método de simulação do deslizamento das partículas abrasivas usando a relação entre profundidade média dos deslizamentos superpostos em função da força normal e da superposição.

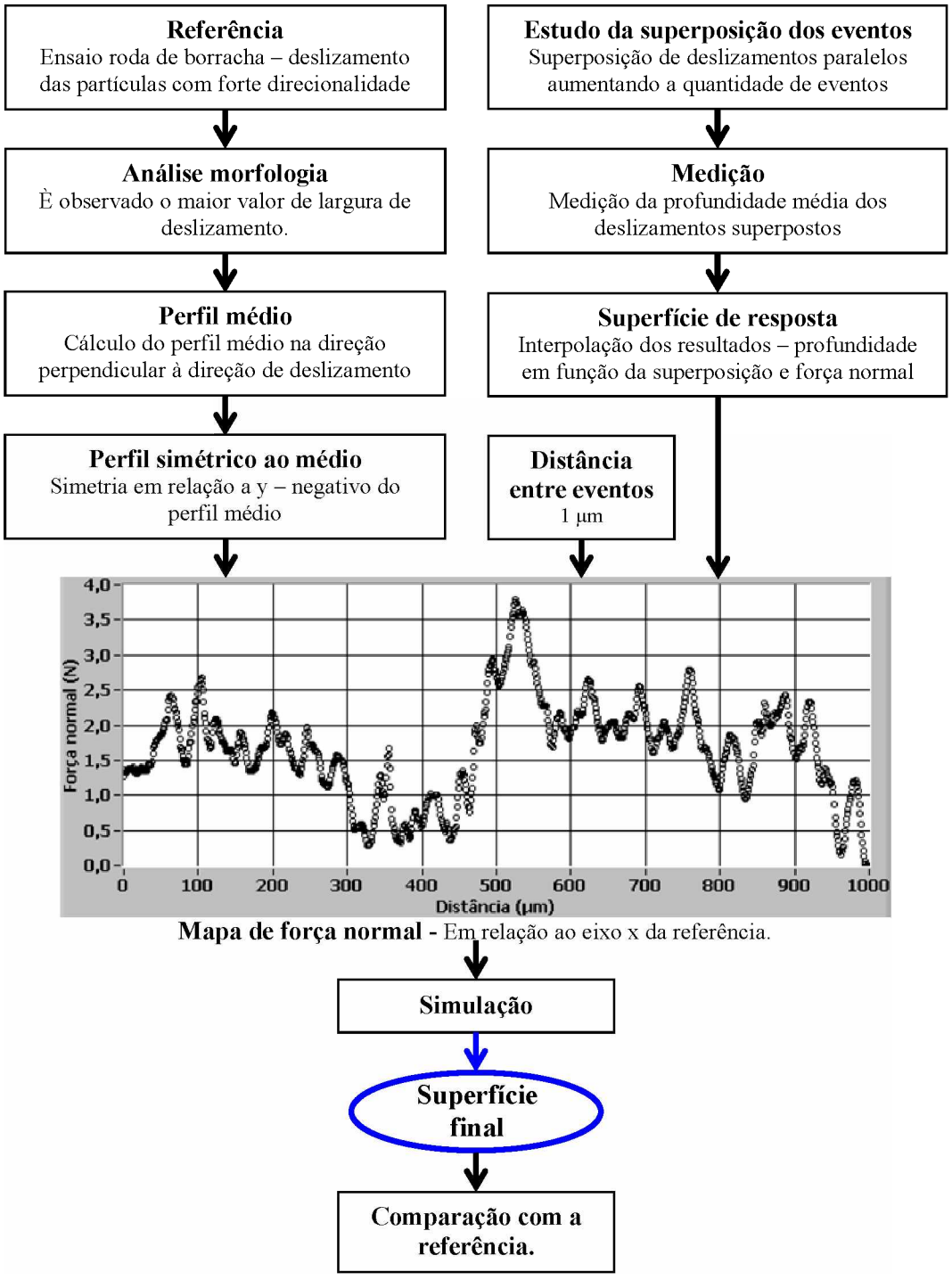


Figura 4.76 – Esquema do método de simulação do deslizamento paralelo das partículas abrasivas.

Nessa abordagem, Fig. 4.76, são introduzidos dois aspectos novos no processo de simulação de deslizamentos paralelos. O primeiro é a análise da superfície da referência usando perfil médio, obtido na direção perpendicular à direção de deslizamento das partículas abrasivas. O segundo aspecto trata da utilização desse perfil médio para definir os valores da força normal dos eventos de acordo com a posição relativa ao eixo x (Fig. 4.76).

A Fig. 4.77b mostra o perfil médio calculado na topografia da referência do estudo do deslizamento paralelo.

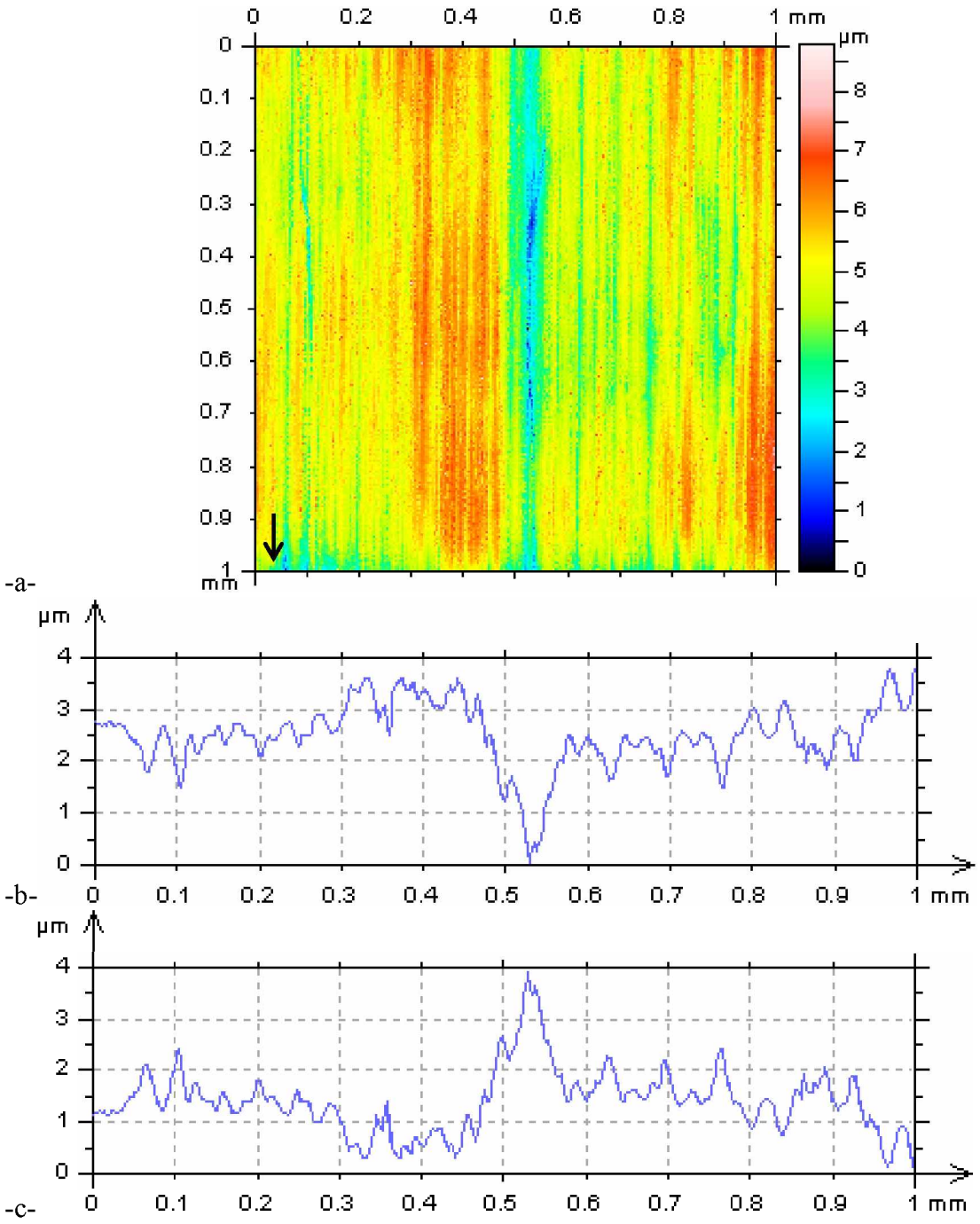


Figura 4.77 – a- Referência (Fig. 4.62a); b- Perfil médio; b- Perfil simétrico ao perfil médio.

Na referência desse estudo as partículas abrasivas deslizaram no sentido mostrado na Fig. 4.77a (seta). O perfil médio calculado na direção perpendicular ao deslizamento dos eventos mostra o efeito médio combinado da ondulação e da rugosidade da topografia decorrente da ação das partículas abrasivas, Fig. 4.77b.

Para efeito de cálculo, a profundidade média dos eventos superpostos ao longo do eixo horizontal foi obtida a partir do perfil inverso do perfil médio, Fig. 4.77c. A idéia é aplicar a equação de superposição do deslizamento paralelo no perfil médio da referência para determinar a intensidade dos eventos da simulação de acordo com o posicionamento relativo ao perfil médio.

Discretizando o perfil mostrado na Fig. 4.77c com espaçamento de 1 μm obtêm-se 1001 pontos que representam os valores de profundidade de deslizamentos superpostos. Para a distância entre eventos de 1 μm, um deslizamento com largura igual a 5 μm representa uma superposição de 80%. Analisando de outra forma, para esse espaçamento fixo, eventos de largura maior que 5 μm levam a superposições maiores que 80 %. De acordo com a relação apresentada na Fig. 4.65, a largura de 5 μm equivale a uma força normal de 0,07 N. Definindo esse valor como força normal mínima, é possível usar a Eq. 4.4 para determinar a força normal dos eventos da simulação em relação ao perfil médio da referência. O gráfico da força normal dos 1001 eventos em função da posição no perfil médio da referência está apresentado na Fig. 4.78.

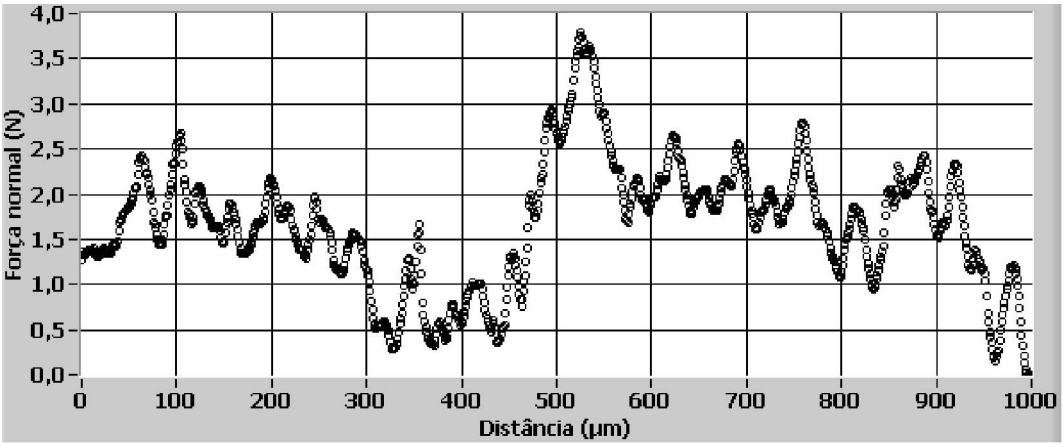


Figura 4.78 – Força normal de 1001 eventos de acordo com o perfil médio da referência.

Como esperado, o mapa de força normal com distância entre eventos fixa mostrado na Fig. 4.78 acompanha o perfil médio mostrado na Fig. 4.77.

O mapa de força define a largura da área de trabalho em 1 mm (Fig. 4.78). O comprimento da área de trabalho foi fixado em 1,3 mm. Para efeito de comparação será

analisada a área de 1 por 1 mm. A topografia resultante dessa simulação está apresentada na Fig. 4.79.

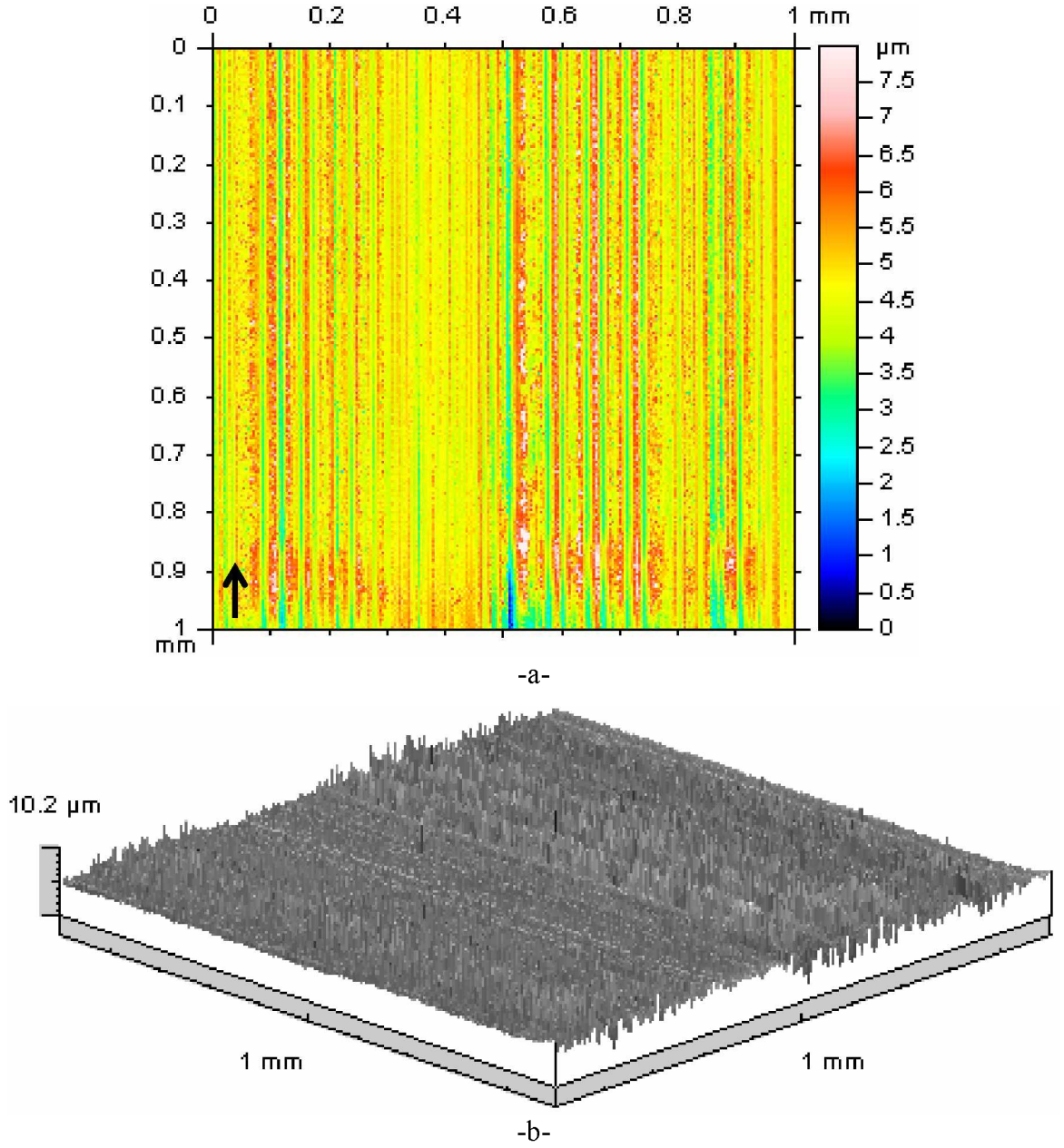


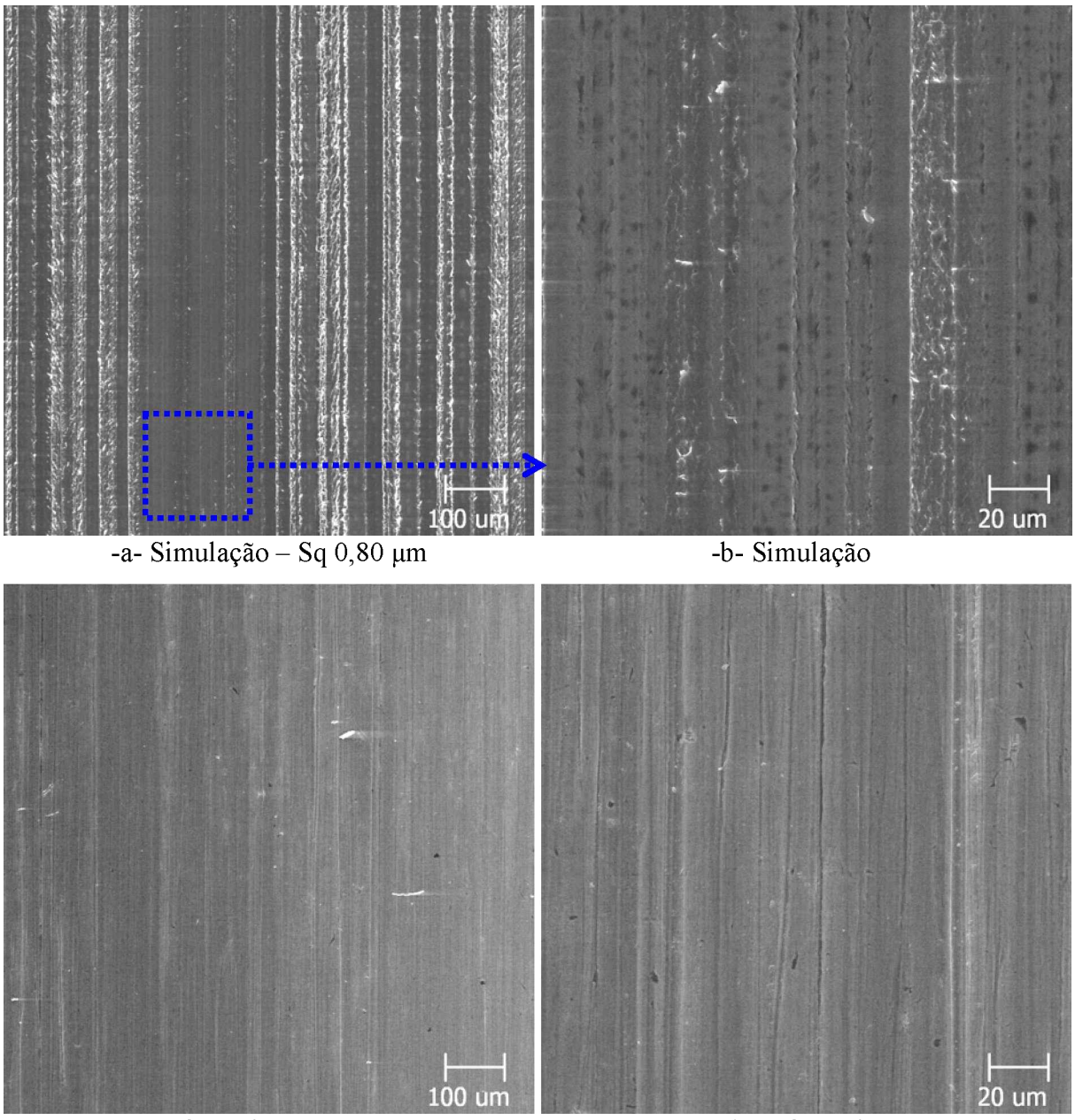
Figura 4.79 - Simulação de deslizamentos paralelos com força normal variável de acordo com o perfil médio da referência. a- Área de trabalho e borda; b- Área de análise; c- Perspectiva. IL.

A simulação do deslizamento paralelo usando perfil médio (Fig. 4.79) gera uma superfície mais heterogênea do que a superfície obtida nos métodos de simulação que usam posicionamento aleatório dos eventos (Fig. 4.67 e Fig. 4.69).

O valor de Sq calculado na área de análise, mostrada na Fig. 4.79, é igual a 0,80 µm. Esse valor está próximo ao valor do Sq calculado na referência 0,83 µm.

Utilizando a borda da área de trabalho como referência da superfície da amostra, foram calculados os valores de volume acima e abaixo da superfície. O volume deformado acima da superfície foi igual a 40623 μm³, o volume deformado abaixo da superfície resultou em 2943811 μm³. A diferença entre esses valores, 2903188 μm³, pode ser interpretada como desgaste decorrente da ação dos deslizamentos paralelo na superfície.

As imagens da superfície obtida no processo de simulação descrito estão apresentadas na Fig.4.80 a-b.



-a- Simulação – Sq 0,80 μm -b- Simulação

-c- Referência – Sq 0,83 μm -d- Referência

Figura 4.80 – a- Mecanismo de desgaste obtido na simulação de deslizamentos paralelos usando o perfil médio da referência; b- Ampliação; c-d Referência. MEV.

Em comparação, a ampliação mostrada na Fig. 4.80b é morfologicamente semelhante à imagem da referência de mesma escala, Fig. 4.80d. Em menor ampliação, observa-se que os eventos produzidos na simulação são maiores que os presentes na referência (Fig. 4.80a e 4.80c).

4.5.2 - Conclusões parciais

- A simulação do deslizamento paralelo com força normal constante e de acordo com o Sq da referência, gera uma superfície com Sq próximo ao da referência.
- O processo de simulação do deslizamento paralelo com força normal variável de acordo com o λq da referência obteve um valor menor de λq do que a referência. Esse fato está associado à interação entre os eventos.
- Foi desenvolvido um método para a análise da superposição de deslizamentos paralelos. O resultado desse estudo mostrou que superposições acima de 80 % levam ao desgaste.
- A equação encontrada no estudo da superposição foi utilizada na simulação do deslizamento das partículas com posicionamento eqüidistante dos eventos e força normal definida pelo perfil médio da referência. A superfície resultante possui valor de Sq próximo ao da referência. O aspecto morfológico da superfície obtida nessa simulação é semelhante ao observado na referência.

4.6 Estado atual da metodologia de simulação do desgaste abrasivo.

A Fig. 4.81 mostra o fluxograma constando as etapas principais do processo de simulação proposto nesta tese.

Essa abordagem, apresentada no tópico 2.5 e ilustrada no esquema da Fig. 2.28, foi proposta no início deste trabalho. As etapas em azul foram pesquisadas e desenvolvidas para dois casos da simulação: o rolamento e o deslizamento com forte direcionalidade das partículas abrasivas.

A conseqüência natural desta tese é o desenvolvimento de um método de simulação computacional para avaliar o desgaste abrasivo. O conhecimento do posicionamento exato dos eventos, das forças e profundidades associadas à interação da partícula com a superfície permite estruturar esse modelo. A superfície produzida na simulação via interações múltiplas pode ser utilizada para validar a simulação computacional do desgaste abrasivo.

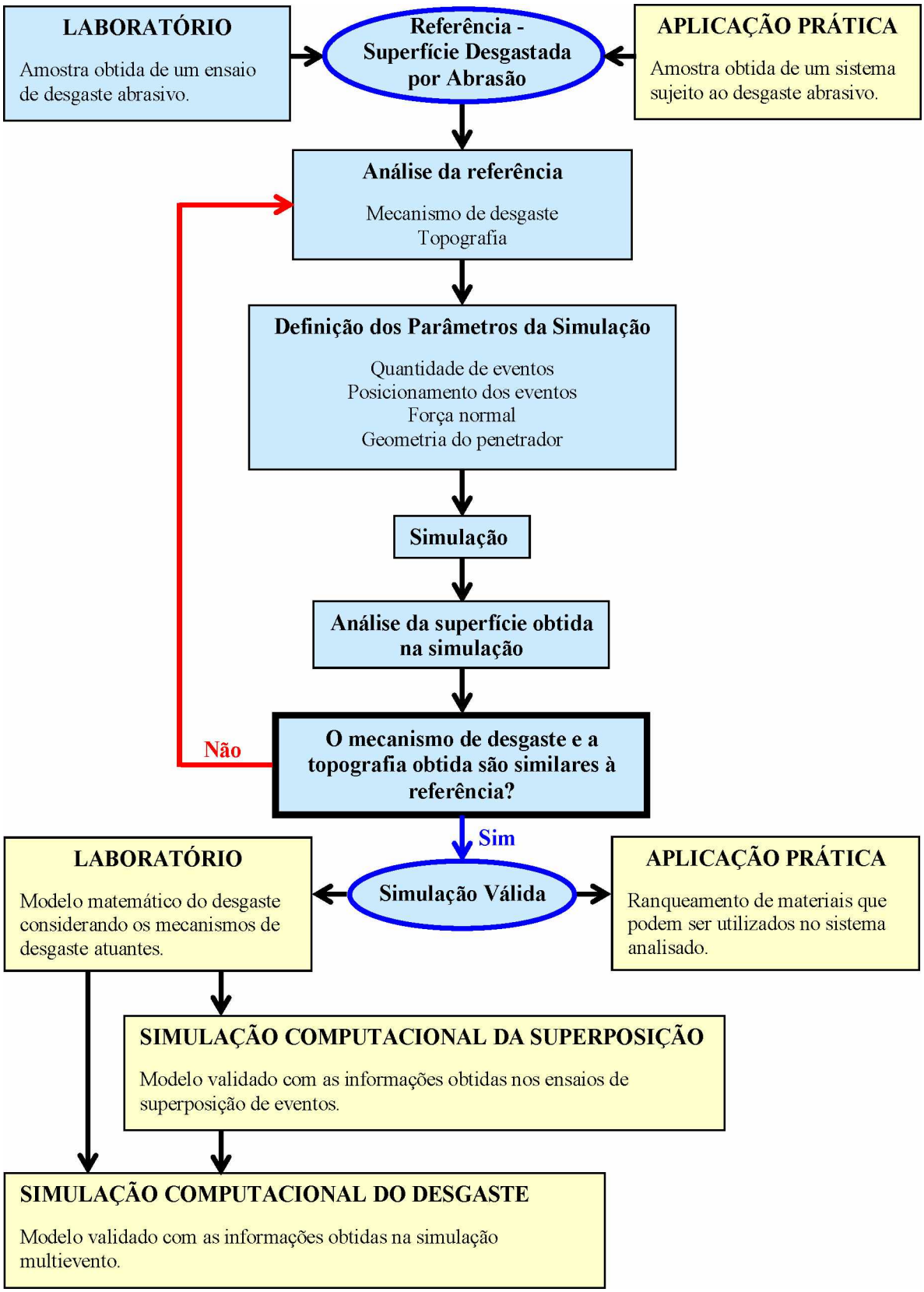


Figura 4.81 – Etapas da metodologia proposta para a simulação do desgaste abrasivo (adaptado da Fig. 2.28).

Os métodos desenvolvidos para o estudo da superposição dos eventos também abrem a possibilidade da realização de um estudo sobre os fundamentos da interação entre eventos utilizando a simulação computacional. Nesse caso, os modelos baseiam-se na reposta do material à interação de um indentador. O comportamento das concentrações de tensão e deformações decorrentes da interação entre eventos determina o efeito da superposição dos eventos. Esse efeito também pode ser utilizado na simulação computacional do desgaste de forma análoga aos métodos utilizados nessa tese.

Outra aplicação possível para o ensaio de simulação é a análise de uma situação prática, onde as condições de desgaste abrasivo não são controladas nem tampouco conhecidas. Nesse caso, a simulação parte da análise da superfície gerada nesse processo de desgaste desconhecido, e pode ser utilizada como um ensaio de desgaste comum, onde é avaliada a resistência de diversos materiais ao desgaste. Esse aspecto prático da utilização do processo de simulação foi previsto na metodologia proposta, mas não realizado durante este doutorado. Essa idéia se mostra bastante promissora, pois o processo de simulação pode representar mecanismos de desgaste que não são possíveis em testes laboratoriais comuns.

4.7 Considerações finais.

A simulação laboratorial é uma simplificação da realidade, possível de ser reproduzida em laboratório. A dinâmica da partícula abrasiva foi representada para o rolamento puro e o deslizamento paralelo das partículas abrasivas; entretanto, as simplificações impostas ao processo de simulação dificultaram a comparação das superfícies. A análise de parâmetros de rugosidade isolados mostra que a simulação chega a valores idênticos aos da rugosidade da referência, mas com morfologia superficial diferente da referência. Por exemplo, a simplificação da forma do abrasivo promoveu superfícies cujos eventos têm forma diferente aos encontrados na referência. No entanto, dependendo da ampliação utilizada na comparação morfológica, as superfícies são semelhantes.

Esta tese mostrou que a idéia da simulação laboratorial foi atingida. O objetivo desse tipo de ensaio não é corresponder fielmente à realidade, mas aproximar-se dela a ponto de representá-la. Dessa forma, para dois tipos de dinâmica de partícula abrasiva diferentes, o desgaste abrasivo foi simulado. Como mostrado no tópico anterior, esse fato abre caminho para vários desdobramentos do estudo da abrasão.

CAPITULO V

5 CONCLUSÕES GERAIS

- Existe um nível de superposição dos eventos acima do qual é observada a remoção de matéria.
- A metodologia proposta para a simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo via interações múltiplas tem grande potencial, uma vez que foi medido o desgaste na simulação, e foi constatada a semelhança morfológica e topográfica da superfície da simulação com a referência.
- A conseqüência natural desta tese é o desenvolvimento de um método de simulação computacional para avaliar o desgaste abrasivo. A superfície produzida na simulação via interações múltiplas pode ser utilizada para validar a simulação computacional do desgaste abrasivo.

CAPITULO VI

6 PROJETOS FUTUROS

Sugerem-se como continuidade desse projeto os seguintes temas:

I. Estudo das técnicas de quantificação do tamanho dos eventos na topografia da referência;
II. Estudo do efeito da forma do indentador em comparação com os parâmetros topográficos da referência;
III. Estudo do comportamento do desgaste abrasivo no ensaio roda de borracha em comparação com o desgaste da simulação de deslizamento paralelo. A execução desse tema produzirá informações importantes para a realização da simulação computacional do desgaste para esse tipo de movimento da partícula abrasiva.
IV. Simulação computacional do processo de interação entre eventos, com enfoque na análise das tensões e nas deformações geradas em cada interação. Esse modelo computacional pode ser validado utilizando os métodos de estudo da superposição desenvolvidos nesta tese.

CAPITULO VII

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. Wear Mode Mapping for the Micro-scale Abrasion Test, **Wear**, volume: 255, pp 23 – 29, 2003.

ALCALÁ , J.; BARONE, A. C.; ANGLADA M. The Influence of Plastic Hardening on Surface Deformation Modes Around Vickers and Spherical Indents, **Acta. mater.**, volume 48, pp 3451 – 3464, 2000.

ASTM G 65. **Standard Test Method form Measuring Abrasion Using the Dry Sand/rubber Wheel Apparatus**, Annual Book of ASTM Standards, volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259, 1991.

BARRADAS, H. A.; COSTA H. L.; DE MELLO J. D. B. O Uso da Topografia de Superfícies 3D para Determinar o Fator F_{ab} em Ensaios Esclerométricos, XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 2001, Tribologia, volume 3, **anais do XVI COBEM.**

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Random Data**, John Wiley & Sons Inc., 2ª edition, ISBN 0-471-04000-2, New York, USA, 566 p, 1986.

BLACK, A. J.; KOPALINSKY, E. M.; OXLEY, P. L. B. An Investigation of the Different Regimes of Deformation Which Can Occur When a Hard Wedge Slides Over a Soft Surface: the Influence of Wedge Angle, Lubrication and Prior Plastic Working of the Surface, **Wear**, volume 123, pp 97 – 114, 1988.

BLACK, A. J.; KOPALINSKY, E. M.; OXLEY, P. L. B. An Investigation of the Interaction of Model Asperities of Similar Hardness, **Wear**, volume 153, pp 245 – 261, 1992.

BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. Wear Resistance and Wear Mechanisms of Wc–12%Co Thermal Sprayed Coatings in Three-Body Abrasion, **Wear**, volume 233 - 235, pp 575 – 587, 1999.

BUIJS, M.; KORPEL-VAN HOUTEN, K. A Model for Lapping of Glass, **Journal of Materials Science**, volume 28, pp 3014 – 3020, 1993a.

BUIJS, M.; KORPEL-VAN HOUTEN, K. Three-body Abrasion of Brittle Materials as Studied by Lapping, **Wear**, volume 166, pp 237 – 245, 1993b.

BURWELL, J. T. Survey of Possible Wear Mechanisms, **Wear**, volume 1, pp 119 – 141, 1957.

BROESE VAN GROENOU, A.; MAAN, N.; VELDKAMP, J. D. B. Scratching Experiments on Various Ceramic Materials, **Philips Res. Report**, volume 30, pp 320 – 359, 1975.

COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Desenvolvimento de um Novo Abrasômetro a Três Corpos, XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 2001, Tribologia, volume 3, **anais do XVI COBEM,** pp 235 – 244.

DA SILVA, W. M. **Efeito da Pressão de Compactação e Tamanho do Pó de Ferro na Microabrasão do Ferro Sinterizado Oxidado a Vapor**, 2003, 98 f, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DA SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Influência da Natureza do Abrasivo e Porosidade Aberta nos Mecanismos de Desgaste do Ferro Sinterizado e Oxidado a Vapor, 59° CONGRESSO INTERNACIONAL ANUAL DA ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 19 a 22 de julho de 2004, São Paulo - SP, **anais do 59° Congresso Internacional Anual da ABM,** CPB 4004, pp 4266-4275.

DA SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Abrasive Wear of Steam Treated Sintered Iron, **Wear**, volume 258, pp 166-177, 2005.

DA SILVA, W. M.; DE MELLO, J. D. B. Simulação de Desgaste Abrasivo via Eventos Múltiplos, **Ciência & Tecnologia dos Materiais** (ISSN: 0870-8312), volume 18, número 1/2, pp 49-56, Janeiro-Junho de 2006.

DE MELLO, J. D. B. **Structures Metallurgiques et Caracterisation de La'abrasion des Fontes Blanches au Chrome**, 1983, 141 p, Tese de Doutorado, L'institut national politecnique de Grenoble, Grenoble, França.

DE MELLO, J. D. B.; DURAND-CHARRE, M.; MATHIA T. A Sclerometric Study of Unidirecionally Solidified Cr-Mo White Cast Irons, **Wear**, volume 111, pp 203-215, 1986.

DONG, W. P.; MAINSAIL, E.; STOUT K. J. Reference Planes for the Assessment of Surface Roughness in Three Dimensions, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, volume 35, número 2, pp. 263-271, 1995.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography I: Some Inherent Properties of Parameter Variation, **Wear**, volume 159, pp 161-171, 1992.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography II: Statistical Properties of Parameter Variation, **Wear**, volume 167, pp 9-21, 1993.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterising Three- Dimensional Surface Topography: III: Parameters for Characterising Amplitude and Some Functional Properties, **Wear**, volume 178, pp 29-43, 1994a.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterising Three-Dimensional Surface Topography: IV: Parameters for Characterising Spatial and Hybrid Properties, **Wear**, volume 178, pp 45-60, 1994b.

DUBE, N. B.; HUTCHINGS, I. M. Influence of Particle Fracture in the High-Stress Abrasive Wear of Stell, **Wear**, volume 233-235, pp 246-256, 1999.

EYRE, T. S. Friction and Wear Mechanisms, II SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, dezembro, 1991, Uberlândia, MG, **anais do II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste**, pp 263 – 292.

FANG, L.; KONG, X. L.; SU, J. Y.; ZHOU, Q. D. A Wear Tester Capable of Monitoring and Evaluating the Movement Pattern of Abrasive Particles in Three-body Abrasion, **Wear**, volume 159, pp 115 – 120, 1992.

FANG, L.; KONG, X. L.; SU, J. Y.; ZHOU, Q. D. Movement Patterns of Abrasive Particle in Three-body Abrasion, **Wear**, volume 162 - 164, pp 782 – 789, 1993.

FERREIRA, D. F. **Estatística Básica**, Editora UFLA, ISBN 85-87692-23-2, Lavras, 664 p, 2005.

FRANCO S. D.; ZUMPANO, P.; DE MELLO, J. D. B. Abordagem Global do Estudo do Processo do Abrasivo. Parte II: Desenvolvimento e Avaliação de Abrasômetro a Dois e Três Corpos, 1° SEMINÁRIO BRASILEIRO DE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE ABRASIVO, ABM-EPUSP, 1989, São Paulo, **anais do 1° Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste Abrasivo**, pp 47-62.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEVA, I. M.; SOLIMAN, H. H. Roughness Parameters, **Journal of Materials Processing Technology**, volume 123, pp 133 – 145 , 2002.

GATES, J. D. Two-body and Three-body Abrasion: A Critical Discussion, **Wear**, volume 214, pp 139 – 146, 1998.

HUTCHINGS, I. M. Ductile-brittle Transitions and Wear Maps for the Erosion and Abrasion of Brittle Material, **J. Phys. D: Appl. Phys**.; volume 25, A212-A221, 1992a.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, published by Arnold, ISBN 034056184X, London, 273 p, 1992b.

ISO 4287 Geometrical Product Specifications (GPS) – **Surface Texture: Profile Method – Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**, International Standard ISO 4287, primeira edição, publicada em 01 de abril de 1997.

JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics**, Cambridge University Press, ISBN 0521347963, Cambridge, United Kingdom, 241 p, 1985.

JOST, H. P. Lubrication (Tribology) Education and Research, ('Jost Report') **UK Department of Education and Science, HMSO (Her Magesty's Stationery Office)**, 79 p, 1966.

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

KELLY, D. A.; HUTCHINGS, I. M. A New Method for Measurement of Particle Abrasivity, **Wear**, volume 250, pp 76-80, 2001.

LAURENT, P.; DE MELLO, J. D. B. Transição Abrasão Dútil / Abrasão Frágil em Vidros Sodo-cálcicos, II SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, dezembro, 1991, Uberlândia, MG, **anais do II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste**, pp 313 – 332.

LAWN, B. R.; SWAIN, M. V. Microfracture Beneath Point Indentations in Brittle Solids, **Journal of Materials Science**, volume 10, pp 113-122, 1975.

MAAN, N.; VAN GROENOU A. B. Low Speed Scratch Experiments on Steels, **Wear**, volume 42, pp 365-390, 1977.

MARSHALL, D. B.; LAWN, B. R.; EVANS, A. G. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System, **Journal of the American Ceramic Society**, volume 63, número 9-10, pp 574-581, 1980.

MARSHALL, D. B.; LAWN, B. R.; EVANS, A. G. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System, **Journal of the American Ceramic Society**, volume 65, número 11, pp 561-566, 1982.

MISRA, A.; FINNIE, I. On the Size Effect in Abrasive and Erosive Wear, **Wear**, volume 65, pp 359-373, 1981.

MISRA, A.; FINNIE, I. Experimental Study of Three-body Abrasive Wear, **Wear**, volume 85, pp 57-68, 1983.

MOORE, M. A.; KING, F. S. Abrasive Wear of Brittle Solids, **Wear**, volume 60, pp 123-140, 1980.

MULHEARN, T. O.; SAMUELS L. E. The Abrasion of Metals: A Model of the Process, **Wear**, volume 5, pp 478 – 498, 1962.

NOGUEIRA, R. E. F. Q.; DE MELLO, J. D. B. Abrasão de Quartzo: um Estudo Esclerométrico, 8° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS - CBECIMAT, 1988a, Campinas, SP, **anais do 8° CBECIMAT**, pp 451 – 456.

NOGUEIRA, R. E. F. Q.; DE MELLO, J. D. B. Esclerometria Aplicada ao Estudo do Desgaste Abrasivo: Potencialidades da Técnica, Construção e Avaliação de Esclerômetro Retilíneo, 43° CONGRESSO ANUAL DA ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, volume 1, 1988b, Belo Horizonte, MG, **Anais do 43° Congresso Anual da ABM,** pp 281 – 300.

OECD, 1969. **Glossary of Terms in the Field of Friction, Wear, and Lubrication.** Research Group on Wear of Engineering Materials, Organization for Economic Cooperation and Development da CCE (OECD), Paris, 1969.

PHILLIPS, K.; CRIMES, G. M.; WILSHAW, T. R. On the Mechanism of Material Removal by Free Abrasive Grinding of Glass and Fused Silica, **Wear**, volume 41, pp 327 – 350, 1977.

PINTAÚDE, G. **Análise dos Regimes Moderados e Severo de Desgaste Abrasivo Utilizando Ensaios Instrumentados de Dureza**, 2002, 200 f, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L. A.; RUSSELL, P. G. A Study of Abrasive Wear Under Three-body Conditions, **Wear**, volume 4, pp 345-355, 1961.

RABINOWICZ, E.; MUTIS,A. Effect of Abrasive Particle Size on Wear, **Wear**, volume 8, pp 381-390, 1965.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Material**, John Wiley & Sons, 2ª edição, New York, ISBN 0471830844, 315 p, 1995.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A Micro-abrasive Wear Test, With Particular Application to Coated Systems, **Surface and Coatings Technology**, volume 79, pp 231-239, 1996.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. Theory and Aplication of a Micro-Scale Abrasive Wear Test, **Journal of Testing and Evaluation**, volume 25, pp 250 – 260, 1997.

SANTANA, S. A.; DE MELLO, J. D. B. Abrasão a Três Corpos de Ferros Fundidos Brancos Eutéticos, III SEMINÁRIO BRASILEIRO DE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, volume 1, outubro de 1994, Fortaleza - CE, **Anais do III Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste,** pp 147 – 166.

SEDRIKS, A. J.; MULHEARN, T. O. Mechanics of Cutting and Rubbing in Simulated Abrasive Process, **Wear**, volume 6, pp 457 – 466, 1963.

SEDRIKS, A. J.; MULHEARN, T. O. The Effect of Work-Hardening on the Mechanics of Cutting in Simulated Abrasive Processes, **Wear**, volume 7, pp 451 – 459, 1964.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, Butterworth – Heinemann, 2ª edition, Woburn, MA, USA, ISBN 0750673044, 744 p, 2001.

STOUT, K. J.; BLUNT, L. Nanometres to Micrometres: Three-Dimensional Surface Measurement in Bio-Engineering, **Surface and Coatings Technology**, volume 71, pp 69-81, 1995.

STOUT, K. J.; BLUNT, L.; DONG, W. P.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T.; SULLIVAN, P. J.; ZAHOUANI, H. **Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions**, Butterworth-Heinemann, ISBN 1857180232, capítulos 10, 11 e 12, 384 p, 2000.

TALJAT, B.; PHARR, G.M. Development of Pile-up During Spherical Indentation of Elastic-Plastic Solids, **International Journal of Solids and Structures**, volume 41, pp 3891–3904, 2004.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transition Between Two–body and Three-body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test, **Wear**, volume 225 – 229, pp 205 – 214, 1999.

VERSPUI, M. A.; WITH, G. DE, VAN DER VARST, P. G. TH.; BUIJS, M. Bed Thickness and Particle Size Distribution in Three-body Abrasion, **Wear**, volume 188, pp 102 – 107, 1995.

VERSPUI, M. A.; WITH, G. Three-body Abrasion: Influence of Applied Load on Bed Thickness and Particle Size Distribution in Abrasive Processes, **Journal of the European Ceramic Society**, volume 17, pp 473 – 477, 1997.

WILLIAMS, J. A, XIE, Y. The Generation of Wear Surfaces by the Interaction of Parallel Grooves, **Wear**, volume 155, pp 363 – 379, 1992.

WILLIAMS, J. A.; HYNCICA, A. M. Abrasive Wear in Lubricated Contacts, **J. Phys. D: Appl. Phys.**, volume 25, pp A81-A90, 1992a.

WILLIAMS, J. A.; HYNCICA, A. M. Mechanisms of Abrasive Wear in Lubricated Contacts, **Wear**, volume 152, pp 57-74, 1992b.

WILLIAMS, J. A. Analytical Models of Scratch Hardness, **Tribology International**, volume 29, número: 8, pp. 675-694 1996.

WILLIAMS, J. A. Wear Modeling: Analytical Computational and Mapping: A Continuum Mechanics Approach, **Wear**, volume 225-229, pp 1-17, 1999.

WILLIAMS, J. A. Wear and Wear Particles – Some Fundamental, **Tribology International**, volume: 38, pp 863-870, 2005.

ZUM GAHR, K. L. **Microstructure and Wear of Materials**, Tribology Series, Volume 10, Elsevier Sience Publishers B. V., Amsterdam, ISBN 0444427546, 560 p, 1987.

ANEXO I

ANEXO I – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA DO MACRO-SIMULADOR

A célula de carga do macro-simulador é tridimensional. As forças foram calibradas com a célula montada no equipamento, para cada direção, independentemente. A força conhecida foi aplicada via peso morto, usando sistema de roldanas ou alavanca. O erro apresentado na Tab. AI 1 é relativo à tensão média, ou seja, é a razão entre o desvio padrão e a tensão média, medidos em Volts. O valor do erro é expresso percentualmente e, em alguns casos, o valor do desvio padrão pode ser muito maior que a média.

- componente horizontal, força x.

A força foi aplicada na direção horizontal x através de um sistema de roldanas.

Tabela AI 1 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força x.

Força conhecida (gf)	Tensão média (V)	Desvio Padrão (V)	Erro relativo - DP/M (%)
0,000	0,0008	0,0052	650,0000
7,036	0,0055	0,0050	90,9091
17,160	0,0100	0,0049	49,0000
27,470	0,0159	0,0049	30,8176
32,564	0,0180	0,0048	26,6667
58,097	0,0290	0,0049	16,8966
84,883	0,0424	0,0050	11,7925
109,088	0,0544	0,0049	9,0074
135,874	0,0651	0,0048	7,3733
160,251	0,0767	0,0051	6,6493
187,037	0,0902	0,0048	5,3215
209,432	0,1006	0,0047	4,6720
236,219	0,1127	0,0051	4,5253
260,595	0,1238	0,0049	3,9580
278	0,1312	0,0048	3,6585
772	0,3508	0,0050	1,4253
1774	0,8342	0,0050	0,5994
2268	1,0693	0,0051	0,4769
2808	1,3453	0,0050	0,3717
3302	1,5721	0,0051	0,3244
4304	2,0461	0,0050	0,2444
4798	2,2815	0,0051	0,2235
5334	2,5468	0,0052	0,2042
5828	2,7644	0,0052	0,1881
6830	3,2538	0,0049	0,1506
7816	3,7815	0,0051	0,1349
9312	4,5191	0,0048	0,1062
9806	4,7628	0,0052	0,1092

- componente horizontal, força y.

A força foi aplicada na direção horizontal y através de um sistema de roldanas.

Tabela AI 2 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força y.

Força conhecida (gf)	Tensão média (V)	Desvio Padrão (V)	Erro relativo - DP/M (%)
0,000	0,0001	0,0030	3000,0000
7,036	0,0018	0,0031	172,2222
17,160	0,0037	0,0029	78,3784
27,470	0,0053	0,0029	54,7170
32,564	0,0070	0,0029	41,4286
58,097	0,0119	0,0029	24,3697
84,883	0,0167	0,0028	16,7665
109,088	0,0210	0,0028	13,3333
135,874	0,0257	0,0028	10,8949
160,251	0,0303	0,0029	9,5710
187,037	0,0359	0,0030	8,3565
209,432	0,0399	0,0029	7,2682
236,219	0,0448	0,0030	6,6964
260,595	0,0508	0,0029	5,7087
278	0,0535	0,0029	5,4206
772	0,1530	0,0027	1,7647
1774	0,3538	0,0030	0,8479
2268	0,4538	0,0028	0,6170
2808	0,5636	0,0029	0,5145
3302	0,6627	0,0030	0,4527
4304	0,8662	0,0029	0,3348
4798	0,9663	0,0028	0,2898
5334	1,0705	0,0028	0,2616
5828	1,1710	0,0029	0,2477
6830	1,3723	0,0030	0,2186
7816	1,5798	0,0029	0,1836
9312	1,8858	0,0031	0,1644
9806	1,9869	0,0031	0,1560
10796	2,1924	0,0031	0,1414
11290	2,3017	0,0037	0,1608
11752	2,3876	0,0033	0,1382
13236	2,7099	0,0032	0,1181
15766	3,2273	0,0034	0,1054
18292	3,7217	0,0036	0,0967
20296	4,1339	0,0042	0,1016
22778	4,6416	0,0043	0,0926
24274	4,9346	0,0033	0,0669

- componente vertical, força z.

Nesse processo de calibração, a força conhecida foi aplicada na direção vertical através de um sistema de alavancas. A transferência de forças no sistema de alavanca está apresentada na Eq. A.1.

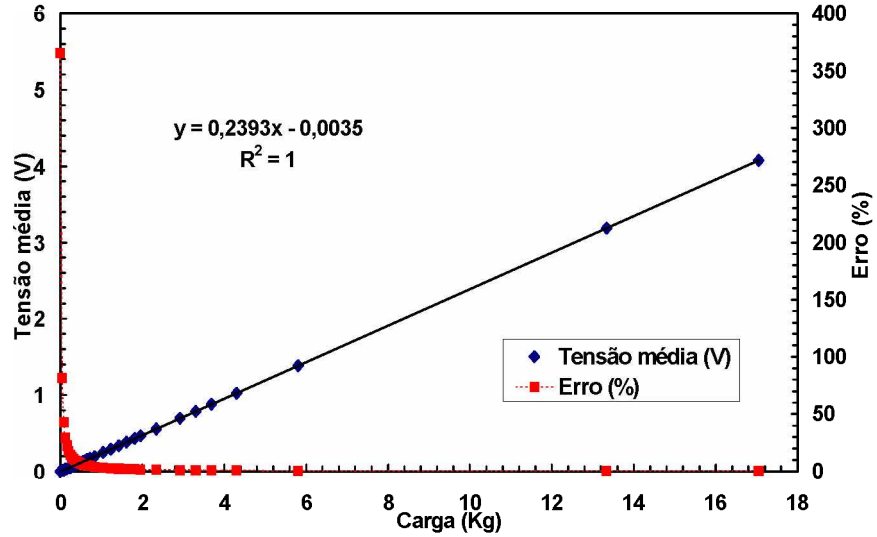
$$\text{Força conhecida } 1 \cdot 626{,}80 = \text{Força conhecida } 2 \cdot 13{,}40 \qquad \text{(A.1)}$$

Na tabela AI .3 o valor 'força conhecida 2 (gf)' foi utilizado para a calibração.

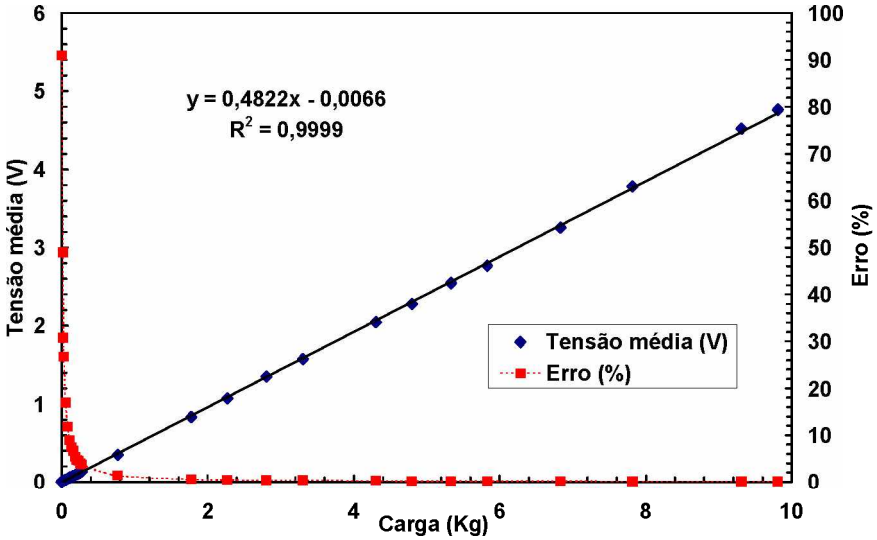
Tabela AI 3 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força z.

Força conhecida 1 (gf)	Força conhecida 2 (gf)	Tensão média (V)	Desvio Padrão (V)	Erro relativo - DP/M (%)
0,000	0,000	-0,0023	0,0084	365,2174
7,036	52,877	0,0098	0,0080	81,6327
12,130	91,161	0,0184	0,0079	42,9348
17,243	129,594	0,0270	0,0079	29,2593
22,254	167,253	0,0363	0,0082	22,5895
27,373	205,721	0,0457	0,0082	17,9431
32,564	244,736	0,0548	0,0077	14,0511
37,464	281,561	0,0641	0,0080	12,4805
42,655	320,576	0,0734	0,0081	11,0354
49,007	368,316	0,0854	0,0082	9,6019
54,121	406,749	0,0939	0,0078	8,3067
59,132	444,408	0,1028	0,0079	7,6848
64,250	482,876	0,1119	0,0081	7,2386
69,441	521,891	0,1214	0,0080	6,5898
76,342	573,756	0,1341	0,0079	5,8911
81,456	612,190	0,1431	0,0078	5,4507
86,467	649,849	0,1516	0,0076	5,0132
91,585	688,317	0,1607	0,0079	4,9160
96,776	727,332	0,1699	0,0078	4,5909
112,218	843,385	0,1978	0,0082	4,1456
138,840	1043,467	0,2460	0,0081	3,2927
163,558	1229,233	0,2914	0,0083	2,8483
190,180	1429,315	0,3388	0,0080	2,3613
214,721	1613,751	0,3828	0,0081	2,1160
241,343	1813,833	0,4306	0,0082	1,9043
260,772	1959,854	0,4655	0,0082	1,7615
311,935	2344,372	0,5571	0,0082	1,4719
389,293	2925,763	0,6965	0,0081	1,1630
440,632	3311,611	0,7884	0,0082	1,0401
491,795	3696,129	0,8803	0,0082	0,9315
572,539	4302,967	1,0269	0,0079	0,7693
772	5802	1,3868	0,0079	0,5697
1774	13333	3,1853	0,0083	0,2606
2268	17045	4,0774	0,0083	0,2036

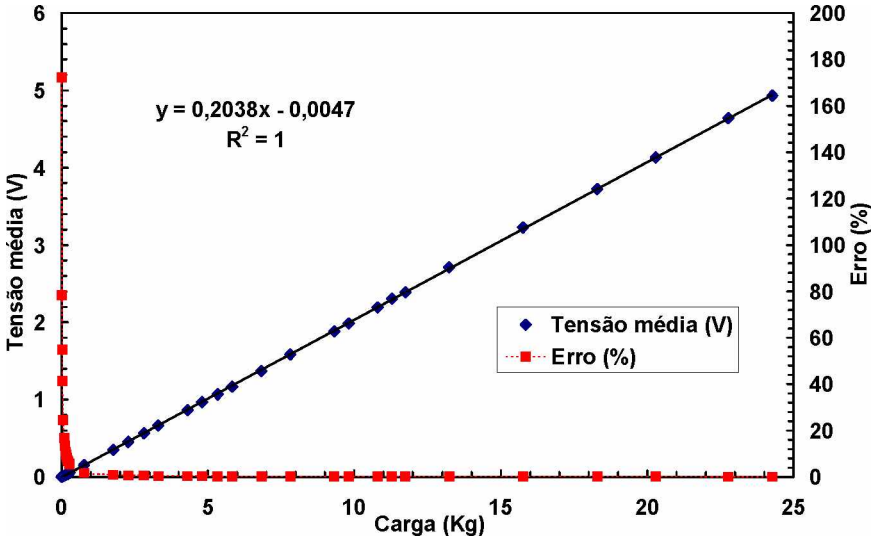
A Fig. AI 1 apresenta a representação gráfica das curvas de calibração e o erro relativo medidos para cada componente x, y e z da força.



-a-



-b-



-c-

Figura AI 1- Curva de resposta da célula de carga tridimensional do macro-simulador. Componente da força na direção: a- eixo z; b- eixo x; c- eixo y.

ANEXO II

ANEXO II – CALIBRAÇÃO DO TRANSLADADOR PIEZELÉTRICO DO MICRO-SIMULADOR

O transladador piezelétrico (PZT) movimenta no sentido do eixo z uma distância máxima de 40 μm. A tabela AII 1 mostra os resultados obtidos no processo de calibração desse instrumento.

Tabela AII 1 - Resposta e erro de medição da célula de carga na direção da força z.

Enviado para o PZT (V)	Leitura do PZT (V)	DP(V)	Erro relativo - DP/M (%)	Leitura do micrômetro (μm)
0,0	0,02	0,001565	7,887	0,0
0,5	0,53	0,001498	0,284	2,0
1,0	1,04	0,001613	0,156	4,0
1,5	1,54	0,001544	0,100	6,0
2,0	2,05	0,001577	0,077	8,0
2,5	2,56	0,001448	0,057	10,0
3,0	3,07	0,001499	0,049	12,0
3,5	3,58	0,001589	0,044	14,0
4,0	4,08	0,001474	0,036	16,0
4,5	4,59	0,001597	0,035	18,0
5,0	5,10	0,001518	0,030	20,0
5,5	5,61	0,001563	0,028	22,0
6,0	6,12	0,001559	0,025	24,0
6,5	6,62	0,001566	0,024	26,0
7,0	7,13	0,001558	0,022	28,0
7,5	7,64	0,001483	0,019	30,0
8,0	8,15	0,001437	0,018	32,0
8,5	8,66	0,001441	0,017	34,0
9,0	9,16	0,001442	0,016	36,0
9,5	9,67	0,001476	0,015	38,0
10,0	10,18	0,001343	0,013	40,0
9,5	9,67	0,001471	0,015	38,0
9,0	9,17	0,001423	0,016	36,0
8,5	8,66	0,001461	0,017	34,0
8,0	8,15	0,001488	0,018	32,0
7,5	7,64	0,001375	0,018	30,0
7,0	7,13	0,001515	0,021	28,0
6,5	6,63	0,0017	0,026	26,0
6,0	6,12	0,001556	0,025	24,0
5,5	5,61	0,001437	0,026	22,0
5,0	5,10	0,001598	0,031	20,0
4,5	4,59	0,001627	0,035	18,0
4,0	4,09	0,001501	0,037	16,0
3,5	3,58	0,001619	0,045	14,0
3,0	3,07	0,001649	0,054	12,0
2,5	2,56	0,001537	0,060	10,0
2,0	2,05	0,001588	0,077	8,0
1,5	1,55	0,001563	0,101	6,0
1,0	1,04	0,00156	0,150	4,0
0,5	0,53	0,001554	0,294	2,0
0,0	0,02	0,001438	6,931	0,0