

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ABRAÃO SALUCCI SALOTO

EFEITO DA SUPERPOSIÇÃO DE RANHURAS PARALELAS
NO DESGASTE ABRASIVO

VITÓRIA

2010

ABRAÃO SALUCCI SALOTO

EFEITO DA SUPERPOSIÇÃO DE RANHURAS PARALELAS NO
DESGASTE ABRASIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

VITÓRIA

2010

ABRAÃO SALUCCI SALOTO

**EFEITO DA SUPERPOSIÇÃO DE RANHURAS PARALELAS NO
DESGASTE ABRASIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Materiais e Processos de Fabricação.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Cherlio Scandian
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Roberto Martins de Souza
Escola Politécnica da USP

Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Melo
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Washington Martins Junior
Universidade Federal do Espírito Santo

Com amor e carinho a minha esposa,
Amanda D'Carlos Cunha Saloto, meu
presente de Deus.

“Porque ninguém pode lançar outro fundamento, além do que já foi posto, o qual é Jesus Cristo. Nele, todos os tesouros da sabedoria e do conhecimento estão ocultos.”

(1 Coríntios 3:11 e Colossenses 2:3)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Cherlio Scandian pela confiança e credibilidade na realização deste mestrado.

Agradeço ao professor José Daniel Biasoli pela orientação na pesquisa e disponibilidade no esclarecimento das discussões.

Ao professor Wahsington Martins da Silva Junior pelo auxílio nos trabalhos realizados.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e da Universidade Federal do Espírito Santo que contribuíram para a minha formação.

A Ângela Maria da Silva Andrade e Eunice Helena Nogueira pelo apoio e dedicação.

Aos amigos professores Rogério, Ernane e Luciano pelo companheirismo e auxílio durante toda essa caminhada.

Resumo

O desgaste abrasivo pode ser classificado através da dinâmica das partículas abrasivas na interface do desgaste: rolamento e deslizamento das partículas entre as superfícies. O sistema tribológico determina o predomínio de um desses movimentos. O desenvolvimento de novos parâmetros visa avaliar a remoção de matéria na superfície dos materiais. Este trabalho consiste na utilização de um novo método para validar o conceito de superposição de ranhuras paralelas. O fenômeno da superposição é analisado a fim de estabelecê-lo como um parâmetro para a ocorrência do desgaste abrasivo. O equipamento utilizado nesse experimento foi um micro-simulador. Este equipamento consiste em um sistema de mesas coordenadas de alta resolução, que movimenta a amostra no plano horizontal e o indentador no eixo vertical. A morfologia é visualizada via microscopia eletrônica de varredura e a topografia da superfície é obtida usando interferometria a laser. Deslizamento paralelo foi a configuração do mecanismo de desgaste adotado no equipamento. Essa configuração representa o deslizamento puro dos abrasivos na interface de desgaste, com o direcionamento bem definido desse movimento. As amostras utilizadas foram em aço rápido, alumina e pastilha de WC. Uma relação entre força e largura de ranhuras isoladas foi obtida para calcular a quantidade de eventos superpostos em uma área de 1,0 x 0,5 mm. Cinco valores de força normal, 2; 5,7; 6 e 6,9 N, e níveis entre 0 e 98% de superposição foram utilizados para comparação entre os materiais. Através da avaliação dos perfis médios, a profundidade média e as áreas acima e abaixo da superfície da amostra foram calculadas para analisar a possibilidade de ocorrência de desgaste. O aumento crescente do nível de superposição, associada à magnitude da força aplicada, promoveu a perda de material no aço rápido para valores acima de 70%, na alumina a partir de 0% e no WC a partir de 20%. Em todos os casos as superfícies apresentaram-se morfologicamente semelhantes, independente da força aplicada, à medida que o nível de superposição se aproximava de 98%. A superposição de ranhuras paralelas mostrou ser um parâmetro que influencia o desgaste abrasivo, seja qual for o material.

Palavras-chave: Desgaste Abrasivo. Mecanismos de Desgaste. Deslizamento. Superposição de Ranhuras Paralelas.

Abstract

The abrasive wear can be classified through the dynamics of the abrasive particles at the interface of wear, rolling and sliding between the surfaces of the particles. The tribological system determines the predominance of one of these movements. The development of new parameters intends to study the removal of material on the surface of materials. This work consists of using a new method to validate the concept of superimposition of parallel scratches. The phenomenon of superimposition is analyzed to establish it as a parameter for the occurrence of abrasive wear. The equipment used in this experiment was a micro-simulator that consists of a two high resolution sliders drives the sample horizontally while the indenter is moved vertically by another slider. The morphology was assessed using scanning electron microscopy and the topography was obtained by using laser interferometry. The parallel scratches configuration was adopted to represent the mechanism of wear on the equipment. This configuration represents scratches alone of abrasives at the interface of wear, with well defined direction of movement. The high speed steels, alumina and WC samples were used for the tests. The ratio between normal load and width of scratches isolated was obtained to calculate the amount of events superimposed on an area of 1,0 x 0,5 mm. Five values of normal load, 2; 5,7; 6 e 6,9 N, and levels of superimposition between 0 and 98% were used for comparison between materials. Through the evaluation of the mean profiles, the average depth and the areas above and below the surface of the sample were calculated to examine the possibility of wear. The increasing level of superimposition associated with the magnitude of the applied normal load, promoted the loss of material in high speed steel to values above 70%, the alumina from 0% and WC from 20%. In all cases the surfaces were morphologically similar, regardless of the applied normal load, as the level of superimposition was approaching 98%. The superimposition of parallel scratches proved to be a parameter that influences the abrasive wear, whatever the material.

Keywords: Abrasive wear. Wear mechanisms. Sliding. Superimposition of Parallel scratches.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTODUÇÃO | 10 |
| 2. MECANISMOS DE DESGASTE | 14 |
| 2.1. Conceito de Desgaste Abrasivo | 14 |
| 2.2. Micromecanismos de Desgaste Abrasivo | 18 |
| 3. DINÂMICA DA PARTÍCULA NA INTERFACE | 22 |
| 4. OBJETIVO | 37 |
| 5. TÉCNICA EXPERIMENTAL | 38 |
| 5.1 Descrição do Equipamento | 38 |
| 5.2 Definição dos Parâmetros para a Execução da Superposição | 39 |
| 6. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO DE RANHURAS PARALELAS..... | 41 |
| 6.1 Resumo do Método..... | 41 |
| 6.2 Ajuste do Indentador..... | 42 |
| 7. RESULTADOS | 44 |
| 8. CONCLUSÕES GERAIS | 83 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 84 |

1. INTRODUÇÃO

Tribologia é a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo e práticas relacionadas (Jost, 1966). A palavra tribologia é derivada da palavra grega “tribos”, que significa roçamento e envolve o estudo científico de todos os tipos de atrito, lubrificação e desgaste. Muito dos problemas da tribologia nos dias atuais, assim como no início, exige o conhecimento de uma combinação de várias áreas da ciência.

Os termos utilizados para classificar os processos de desgaste é um assunto que diverge entre muitos pesquisadores. Burwell e Strang (1952) classificam o desgaste em abrasivo, adesivo, corrosivo, fadiga superficial, “fretting”, cavitação e erosão. Godfrey (1980) classifica o desgaste em adesivo suave, adesivo severo, abrasão, erosão, fadiga, delaminação, corrosivo, eletrocorrosivo, corrosão por fretting, dano por cavitação, descarga elétrica e polimento. Muitos dos termos utilizados para a classificação do desgaste são redundantes, pois se referem aos mesmos mecanismos de desgaste. A norma DIN 50320 resume em quatro categorias os tipos de desgaste: adesão, abrasão, reações triboquímicas e fadiga superficial.

O desgaste abrasivo é considerado o mais importante processo de desgaste, pois conduz à maioria das falhas por desgaste.

O estudo da abrasão abrange inúmeras possibilidades de realização de experimentos em virtude de uma elevada quantidade de variáveis inerentes ao processo de desgaste. Os métodos de análise em laboratório, que visam reproduzir o desgaste abrasivo, dividem-se em dois grupos: abordagem global, utilizando técnicas abrasométricas e abordagem local, destacando-se a esclerometria. A tentativa de estabelecer uma relação entre os ensaios e a realidade consiste em identificar os mecanismos de desgaste em cada situação, através da avaliação da superfície desgastada e os resíduos de desgaste.

Os micromecanismos de desgastes são processos que consistem na remoção de matéria na abrasão através da interação entre a protuberância e a superfície. Eles dependem das propriedades dos materiais, das características dos abrasivos, das condições de operação e da forma de interação dos elementos do sistema tribológico.

O estudo das interações entre partículas duras e superfícies é muito complexo devido à forma irregular e tamanho das partículas abrasivas e à topografia de superfície (Trezona; Allsopp, 1999; Adachi; Hutchings, 2003; Da Silva; R. Binder; De Melo, 2005). Na abordagem global, ensaios de desgaste padronizados possibilitam prever e reproduzir os mecanismos de desgaste através de um controle cuidadoso das condições de teste e de variáveis do processo. Na abordagem local, onde o controle é ainda mais rígido, a forma da partícula e o seu tamanho são representados pela geometria do indentador e a profundidade e/ou força normal de interação, respectivamente.

Os mecanismos de desgaste estão associados com o movimento das partículas na interface das superfícies desgastadas, e dependem das características tribológicas do sistema (Trezona; Allsopp, 1999; Adachi; Hutchings, 2003; Da Silva; R. Binder; De Melo, 2005). Os parâmetros tribológicos do processo de desgaste abrasivo determinam dois tipos principais de movimento da partícula na interface de desgaste: rolamento e deslizamento. O rolamento das partículas na interface é caracterizado pela presença de indentações na superfície desgastada, enquanto o deslizamento produz riscos/sulcos na superfície desgastada.

A movimentação dos abrasivos, por rolamento e/ou deslizamento, em uma superfície provoca a alteração da topografia e perda de matéria. Uma maneira de reproduzir em laboratório uma superfície obtida por desgaste abrasivo baseia-se na representação do rolamento e deslizamento de partículas, de uma superfície desgastada, por seqüências de indentações e riscos/sulcos, respectivamente, em outra superfície. De outra forma, essa simulação laboratorial é uma simplificação da realidade que consiste em extrair as informações obtidas da superfície desgastada, topografia e morfologia, para a geração de eventos (interação entre o indentador e a superfície da amostra) produzindo os mecanismos de desgaste observados na superfície desgastada.

A simulação do desgaste abrasivo em laboratório permite que os principais parâmetros desses ensaios sejam relacionados em uma metodologia através de uma simulação instrumentada, que utiliza um esclerômetro retilíneo para reproduzir o rolamento e o deslizamento de um grão abrasivo sobre uma superfície de uma amostra, a fim de obter uma semelhança entre a topografia e os mecanismos de

desgaste da superfície produzida na simulação e a superfície de referência (De Mello e Da Silva, 2006). Esse método reproduz a ação de uma partícula abrasiva na superfície de uma amostra pela seqüência controlada de interações, isto é, pela execução de indentações e/ou riscos/sulcos.

A obtenção de uma semelhança entre a superfície de referência e a superfície simulada depende da determinação de parâmetros que influenciam na reprodução dos mecanismos de desgaste observados na superfície de referência. Com a utilização de outros equipamentos observa-se a profundidade, a quantidade relativa, e a forma de cada evento na superfície de referência. Com base nessas informações os eventos da simulação são dimensionados e a carga de cada evento é determinada, assim como a quantidade relativa de indentações e riscos/sulcos realizados na simulação (De Mello e Da Silva, 2006).

Além da força e quantidade de eventos, outro parâmetro que influencia no mecanismo de desgaste é a interação entre ranhuras paralelas. Em testes de esclerometria, o deslizamento de um indentador, que representa uma partícula abrasiva, provoca a formação de uma ranhura (risco e/ou sulco) isolada e o mecanismo de desgaste depende principalmente do ângulo de ataque do indentador. Entretanto, quando ocorre a interação entre ranhuras (riscos e/ou sulcos) paralelas, de modo que o segundo passe do penetrador é realizado sobre o material deformado no primeiro passo, a distância entre os riscos adjacentes tornase um fator importante para determinar o mecanismo de desgaste (J. A. Williams e Y. Xie, 1991).

A interação entre ranhuras é executada de forma controlada e gera riscos/sulcos paralelos em uma superfície pela variação da distância entre as interações e a largura das interações. Consiste na tentativa de reproduzir o efeito da interação de partículas abrasivas na interface da superfície de desgaste para avaliar a formação e a transição dos mecanismos de desgaste.

Esse conceito, chamado de superposição (Da Silva e De Mello, 2009), é o fundamento da simulação instrumentada que permite relacionar parâmetros topográficos da superfície de referência pelo controle das variáveis usadas em uma simulação. Essa variável é definida como a razão da distância entre ranhuras pela largura de uma única ranhura (Da Silva e De Mello, 2009).

A realização de novos testes laboratoriais, utilizando o conceito de superposição de ranhuras, visa constatar a sua influência no desgaste abrasivo.

Para fundamentar essa idéia, o segundo capítulo aborda os principais conceitos sobre o desgaste abrasivo e a geração dos micromecanismos de desgaste.

O terceiro capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos assuntos relativos à dissertação, contendo o tema de superposição de eventos, isto é, indentação e/ou ranhura.

O quarto capítulo descreve os métodos experimentais e os equipamentos utilizados nos ensaios.

O quinto capítulo expõe a metodologia utilizada e o sexto capítulo os resultados obtidos.

No sétimo capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

O oitavo capítulo lista as referências bibliográficas citadas na dissertação.

2. MECANISMOS DE DESGASTE

2.1. Conceito de Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é definido como a perda de matéria, devido ao movimento relativo de duas superfícies, causada pela presença de asperezas duras em uma das superfícies ou pela presença de partículas duras entre ambas as superfícies ou engastadas em uma delas (OECD, 1969). Inicialmente, esse processo de desgaste foi dividido em dois modelos básicos conhecidos como abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos (Burwell, 1957). Esses conceitos podem ser explicados da seguinte maneira: o primeiro corpo é a amostra, o segundo corpo é um contra-corpo, que está em movimento relativo com o primeiro, o terceiro corpo são as partículas que podem estar presentes na interface entre o primeiro e o segundo corpo. A Figura 2.1 mostra, esquematicamente, o desgaste abrasivo a dois corpos e três corpos.

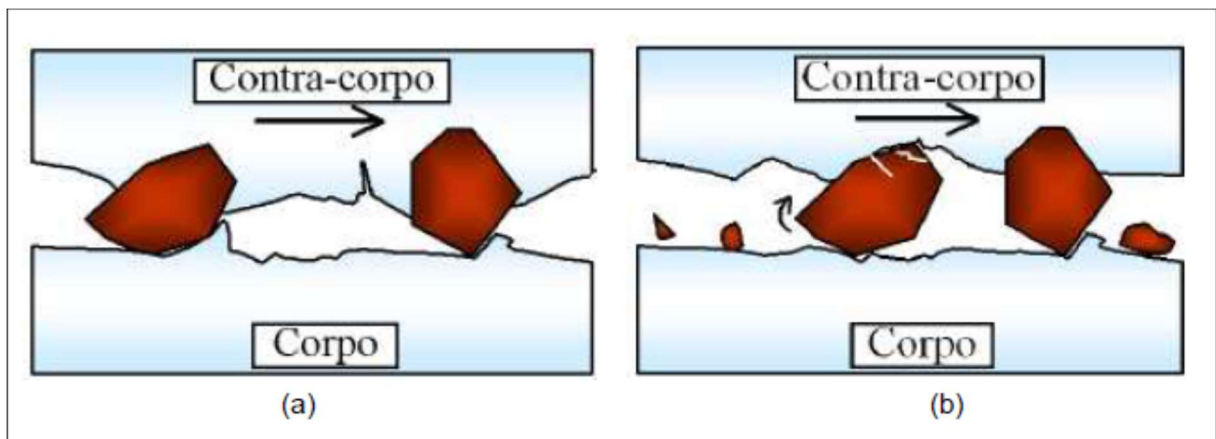


Figura 2.1 – Modos de desgaste abrasivo. (a) Dois corpos; (b) Três corpos (esquema adaptado, De Bozzi; De Mello, 1999).

Na abrasão a dois corpos, o desgaste é provocado por asperezas e/ou partículas duras engastadas na superfície do contra-corpo que, durante o movimento, geram riscos/sulcos sobre a superfície da amostra. A abrasão a três corpos pode ser entendida como o desgaste causado por partículas abrasivas livres, que rolam e/ou deslizam, presentes como elementos interfaciais entre a amostra e o contra-corpo, e que passam parte do tempo atuando sobre a superfície (Rabinowicz; Dunn; Russell, 1961). Uma adaptação do modelo criado por Williams e Hyncica, 1992, proposta por Trezona e co-autores aborda a dependência do mecanismo de desgaste em relação

(a) (b) à carga e à concentração de abrasivos, isto é, para abrasão a três corpos as partículas abrasivas contidas entre as superfícies de desgaste podem rolar ou deslizar. O teste de abrasão a dois corpos produz taxas de desgaste de, no mínimo, uma ordem de grandeza maior do que a abrasão a três corpos sob condições de carregamento comparáveis (Rabinowicz; Dunn; Russell, 1961; Rabinowicz Mutis, 1965; Rabinowicz, 1995), todavia, testes realizados por Trezona e co-autores, 1999, mostraram que a variação da perda de matéria pela concentração de abrasivos em testes de abrasão a dois e três corpos são, em determinados intervalos, similares.

J. D. Gates (1998) propôs que a terminologia desgaste abrasivo a dois corpos e três corpos fosse abandonada em virtude de algumas inconsistências encontradas em determinados testes. Uma situação referente a essa discussão é o caso do teste de abrasão roda de borracha, que é geralmente considerado como abrasão a três corpos. Nesse teste, as partículas são de certa forma, acomodadas pela borracha e podem não estar livres para girar e, conseqüentemente, as taxas de desgaste são surpreendentemente elevadas para a abrasão a três corpos.

Essa dificuldade para classificar o desgaste abrasivo decorre da utilização dos termos, dois corpos e três corpos, para distinguir situações em que as partículas abrasivas são fixadas no contra-corpo, produzindo riscos/sulcos, ou permanecem livres, de modo que rolam entre as duas superfícies, independentemente do número de corpos envolvidos. Os termos abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos seriam mais bem utilizados para analisar o sistema e descrever o número de diferentes corpos em uma situação de abrasão. A maioria dos pesquisadores utiliza esses termos para descrever o comportamento da partícula no contato, onde há desgaste, ao invés de aplicá-los no sistema (Trezona e co-autores, 1999).

Trezona e co-autores (1999) adotaram novos termos para a classificação do desgaste abrasivo através da dinâmica das partículas abrasivas. O processo de desgaste abrasivo em que as partículas são fixadas no contra-corpo é descrito como desgaste abrasivo por deslizamento e o processo de desgaste abrasivo em que a partícula é capaz de rolar entre duas superfícies é chamado de desgaste abrasivo por rolamento. Entretanto, é possível que partículas abrasivas deslizem sobre a superfície produzindo sulcos, mesmo se elas não estiverem presas ao contra-corpo.

Esses movimentos das partículas foram abordados por Williams e Hyncica (1992), pelo desenvolvimento um modelo teórico a partir de um experimento onde um fino filme hidrodinâmico formado entre duas superfícies e de espessura controlada, continha partículas abrasivas com vários diâmetros introduzidas propositalmente. Essa proposta considera o mecanismo de uma única partícula mostrada na Figura 2.2. A maior diagonal da seção transversal da partícula é D e o ângulo β , que descreve a geometria, varia de 45° a 90° . A espessura do filme é h e a superfície inferior, B, movimenta-se da esquerda para a direita em relação à superfície superior, A.

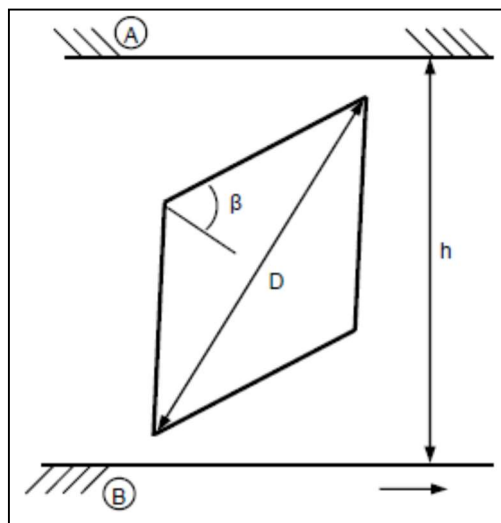


Figura 2.2 – Partícula abrasiva descrita pelos parâmetros β e D . Superfície movendo-se da esquerda para a direita.

Se $D/h < 1$, então a partícula pode passar através do espaço entre as superfícies provocando impactos ocasionais com as mesmas e produzindo pequenos danos em ambas. Entretanto, se a partícula é maior do que a espessura h , como mostrado na Figura 2.3a, é provável que ela se fixe e indente as superfícies sólidas, cujos valores de dureza foram considerados os mesmos. A força associada com cada indentação age na direção perpendicular à face da partícula de acordo com a Figura 2.3a e 2.3b. Duas forças R , que geralmente não são colineares, atuam nas extremidades opostas da partícula formando um binário que tende a girar a partícula. Se a partícula não for suficientemente grande, ela pode girar e perder contato com as superfícies sólidas completamente, deixando-as com pequenos danos associados às indentações que ocorreram, mas sem a presença de desgaste severo (riscos/sulcos). Isso é ilustrado na Figura 2.3d. A partícula com tamanho crítico, isto é, a razão $(D/h)_{1,}$ é descrita pelo ângulo β através da relação $(D/h) = \sec \beta$.

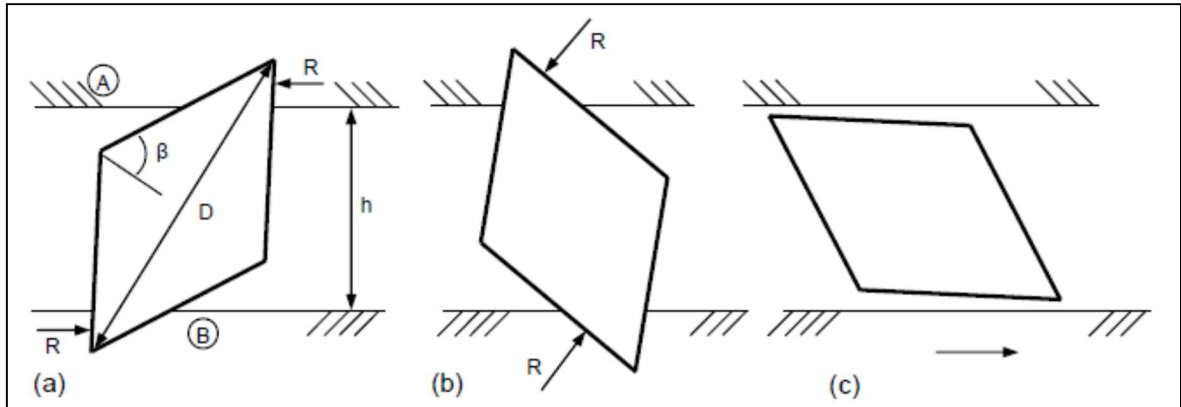


Figura 2.3 – $D/h < (D/h)_1$. A partícula rola entre as superfícies devido à ação do binário mostrado em (a) e (b) causando pequenos danos (Williams; Hyncica, 1992a; 1992b).

Williams e Hyncica também mostraram que, para o caso onde a espessura do filme diminui, ou seja, para um dado abrasivo com razão D/h elevado, a partícula gira e as extremidades da diagonal menor permanecem em contato com as superfícies, o que permite que a partícula continue girando, Figura 2.4a, 2.4b e 2.4c. Esse movimento progride até que as forças se tornem colineares, Figura 2.4d. Nesse momento, o binário é anulado e a partícula tenderá a permanecer na inclinação mostrada pelo ângulo θ_1 . Por simetria, a linha de ação das duas forças de indentação passa pelo centro geométrico da partícula e, portanto, espera-se a formação de riscos/sulcos em ambas as superfícies.

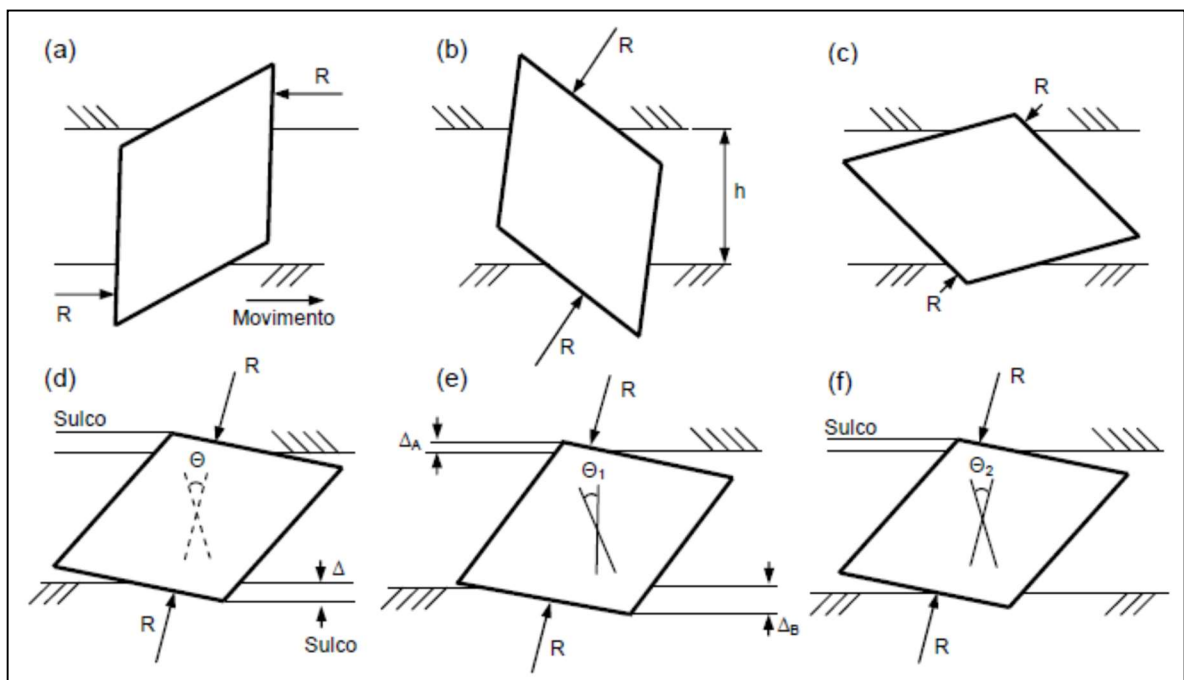


Figura 2.4 – (a) a (d). Quando $D/h < (D/h)_1$ as partículas giram até uma posição de equilíbrio.; (e) Situação similar quando as durezas das superfícies são diferentes; (f) Partícula alojada na superfície mais mole.

Para superfícies onde os valores de dureza são diferentes, ocorrem poucas alterações. O valor de θ_1 não muda, entretanto, a linha de ação não passa através do centro geométrico da superfície, mas é deslocado em direção à superfície mais mole. A Figura 2.4e mostra essa situação. Nesse caso, as duas superfícies são sulcadas apresentando profundidades diferentes Δ_A e Δ_B .

O valor limite para o ângulo de rotação da partícula (Figura 2.4f) depende da dureza relativa entre as duas superfícies.

De acordo com Trezona e co-autores (1999), uma definição mais completa que classifica o desgaste abrasivo através do movimento da partícula, sugere que o desgaste abrasivo por deslizamento é o processo no qual a mesma região da partícula abrasiva, ou aspereza, permanece em contato com a superfície desgastada durante o processo. As superfícies das amostras, nesse tipo de desgaste, são caracterizadas por riscos/sulcos paralelos na direção do deslizamento.

Para o desgaste abrasivo por rolamento a região da partícula abrasiva em contato com a superfície desgastada é continuamente substituída. As superfícies obtidas nesse processo de desgaste são caracterizadas por uma elevada deformação, múltiplas indentações e, com pouca ou nenhuma direcionalidade.

Esses mesmos autores também discutem a possibilidade de ocorrência de rolamento e deslizamento simultâneo das partículas abrasivas.

2.2. Micromecanismos de Desgaste Abrasivo

O movimento das asperezas e/ou partículas abrasivas sobre superfícies em movimento relativo consiste na ação de deslizar e/ou rolar. O deslizamento das partículas pode provocar a geração de sulco, corte e trincamento. No rolamento, a atuação das partículas possibilita que o material se comporte de maneira dútil e/ou frágil.

A definição dos mecanismos de desgaste está associada ao movimento da partícula abrasiva sobre a superfície. Micromecanismo de desgaste é o processo de interação entre a partícula abrasiva ou aspereza dura e a superfície desgastada (Mulheran; Samuels, 1962; Sedriks; Mulhearn, 1963; Zum Gahr, 1987). Microsulcamento,

microcorte e microtrincamento são os mecanismos de desgaste mais comuns identificados no deslizamento. A figura 2.2 mostra o mecanismo de desgaste conhecido como microsulcamento.

Esse tipo de interação, entre aspereza e superfície, ocorre devido ao deslocamento de uma única partícula abrasiva em condições dúteis. No microsulcamento o material é deformado plasticamente para as laterais do sulco e à frente do abrasivo. A ação de uma partícula não conduz à perda de matéria, entretanto, isso pode ocorrer devido à interação de muitas partículas abrasivas operando de modo simultâneo e sucessivo. Desse modo, a superfície do material apresenta a formação de vários sulcos (Figura 2.2b) evidenciando uma intensa deformação plástica (Zum Gahr, 1987).

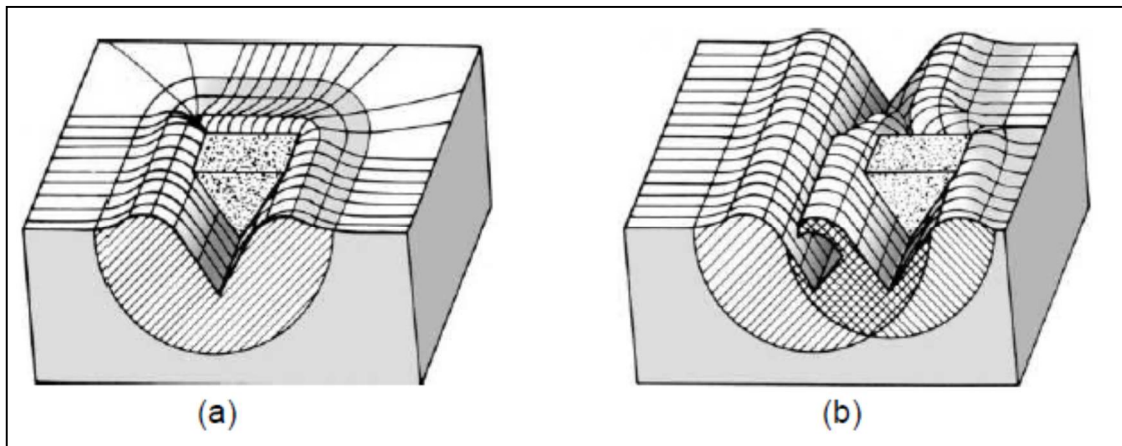


Figura 2.2 – Microsulcamento. (a) Ação de uma partícula, (b) Interação de sulcos (Zum Gahr, 1987).

No microcorte, uma única interação pode levar a perda de massa. Em situações onde ocorrem grandes níveis de deformação plástica localizada há predominância do mecanismo de microcorte. Se as condições favorecem o microcorte puro (Figura 2.3a), o volume de material perdido é igual ao do volume da ranhura produzida. (Zum Gahr, 1987).

O microsulcamento e o microcorte são mecanismos de desgaste dominantes em materiais dúteis. A proporção de material deslocado para as laterais das ranhuras, isto é, a razão entre microsulcamento e microcorte, depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva. Esse ângulo é formado entre a face do indentador e a direção de deslizamento (Zum Gahr, 1987).

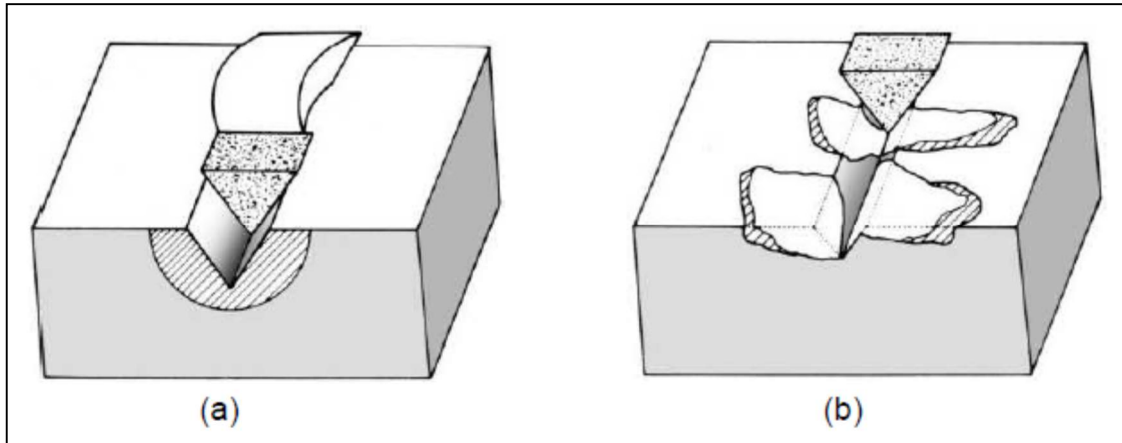


Figura 2.3 – Microcorte. (a) Microcorte; (b) Microtrincamento (Zum Gahr, 1987).

Mulhearn, Samuels e Sedriks, 1962, mostraram que ocorre remoção de material na superfície por microcorte quando ângulos de ataque de partículas abrasivas duras são maiores do que um valor crítico. Esse valor é função da propriedade do material e das condições de teste.

O microtrincamento (Figura 2.3b) ocorre quando elevados níveis de tensão são impostas pelas partículas abrasivas, particularmente em materiais frágeis. Nesse caso, fragmentos de desgaste de grandes proporções são destacados da superfície devido a formação e propagação de trincas. A dimensão do fragmento torna-se maior do que a ranhura executada (Zum Gahr, 1987).

Outro 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 é conhecido como indentação e está apresentado na Figura 2.3.

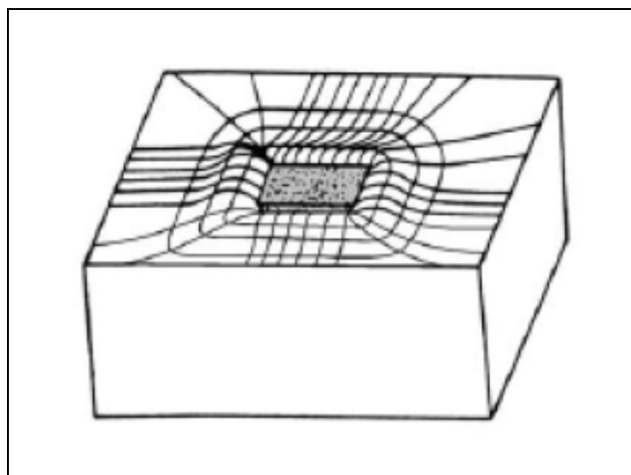


Figura 2.3 – Indentação (Da Silva, 2008).

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.

3. DINÂMICA DA PARTÍCULA NA INTERFACE

Da Silva e De Mello (Da Silva; De Mello, 2006) propuseram um novo método experimental para simular o desgaste abrasivo através da representação do movimento da partícula abrasiva na superfície de uma amostra pela seqüência controlada de interações. O rolamento das partículas abrasivas é representado pela seqüência de indentações e o deslizamento pela seqüência de ranhuras. A análise topográfica de uma superfície desgastada provê informações necessárias para a geração de cada evento, permitindo a reprodução dos mecanismos de desgaste observados na superfície de referência. A validação da simulação para o desgaste abrasivo depende da semelhança de ambos, topografia e mecanismos de desgaste, entre as superfícies desgastadas.

Superfícies produzidas em um abrasômetro do tipo LTM, responsável pela geração da superfície de referência, foram simuladas por um macroesclerômetro que simula a superfície original. A configuração do abrasômetro consiste na fixação de amostras, submetidas a uma carga constante, sobre um contra-corpo com ambos executando movimento de rotação. Esse sistema é alimentado por um fluxo contínuo e uniforme de abrasivos, de modo que a rotação do contra-corpo garante a renovação desse abrasivo na interface de contato. O macroesclerômetro retilíneo é composto por três mesas coordenadas que permitem a movimentação da amostra no plano horizontal e do penetrador na direção perpendicular a esse plano. Os penetradores utilizados foram de diamante nos padrões Rockell e Vickers e representam a atuação de uma partícula abrasiva.

A condição de ensaio, no abrasômetro, na qual a amostra foi submetida, favoreceu a geração de uma maior quantidade de indentações do que riscos/sulcos sobre a superfície desgastada. Os riscos/sulcos foram de comprimentos variados e direções aleatórias (Figura 3.1).

Inicialmente os autores quantificaram a proporção de riscos/sulcos e indentações, e a profundidade dos eventos na amostra de referência, obtida no abrasômetro e realizaram um ensaio inicial com essas duas variáveis. A figura 3.2 mostra a superfície gerada pela utilização de um penetrador Rockwell C.

Conforme indicação na Figura 3.2 observa-se que a deformação plástica ocorrida na superfície pode levar a remoção de material. O mecanismo de desgaste mostrado na Figura 3.2 não é compatível com o observado na superfície de referência (Figura 3.1).

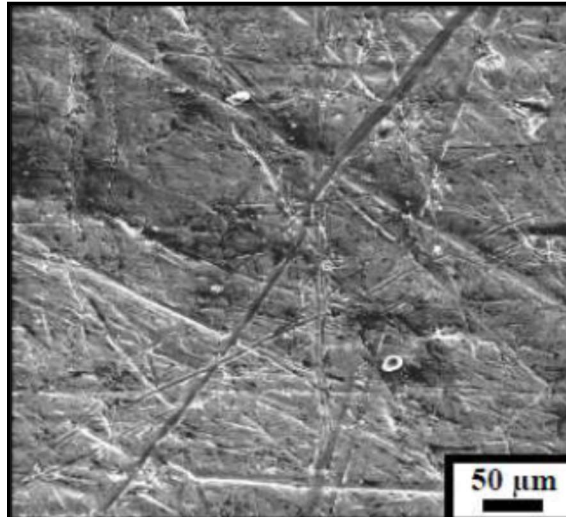


Figura 3.1 – Superfície desgastada no abrasômetro LTM. Inclinação 30°, MEV (Da Silva; De Mello, 2006).

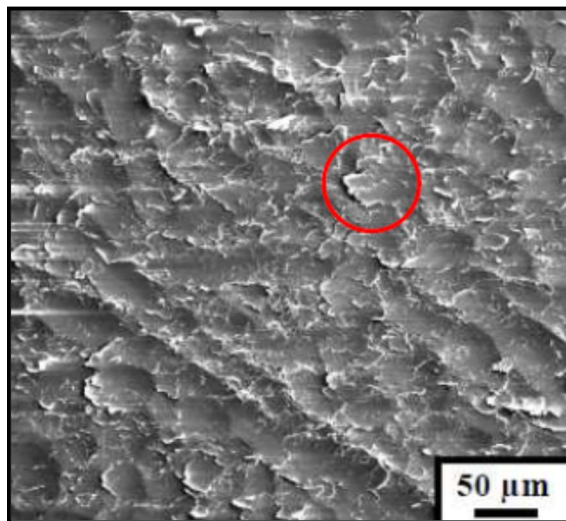


Figura 3.2 – Superfície obtida na simulação. Área 1x1 mm, 2000 eventos, MEV (Da Silva; De Mello, 2006).

Novos testes realizados por Da Silva e De Mello mostraram que a utilização de um penetrador Vickers e o aumento da quantidade eventos são fatores determinantes para uma aproximação entre os mecanismos de desgaste da superfície simulada e de referencia na simulação, mas os eventos gerados apresentam dimensões maiores do que a referência. A figura 3.3 mostra a evolução da superfície produzida na simulação em função da quantidade de eventos.

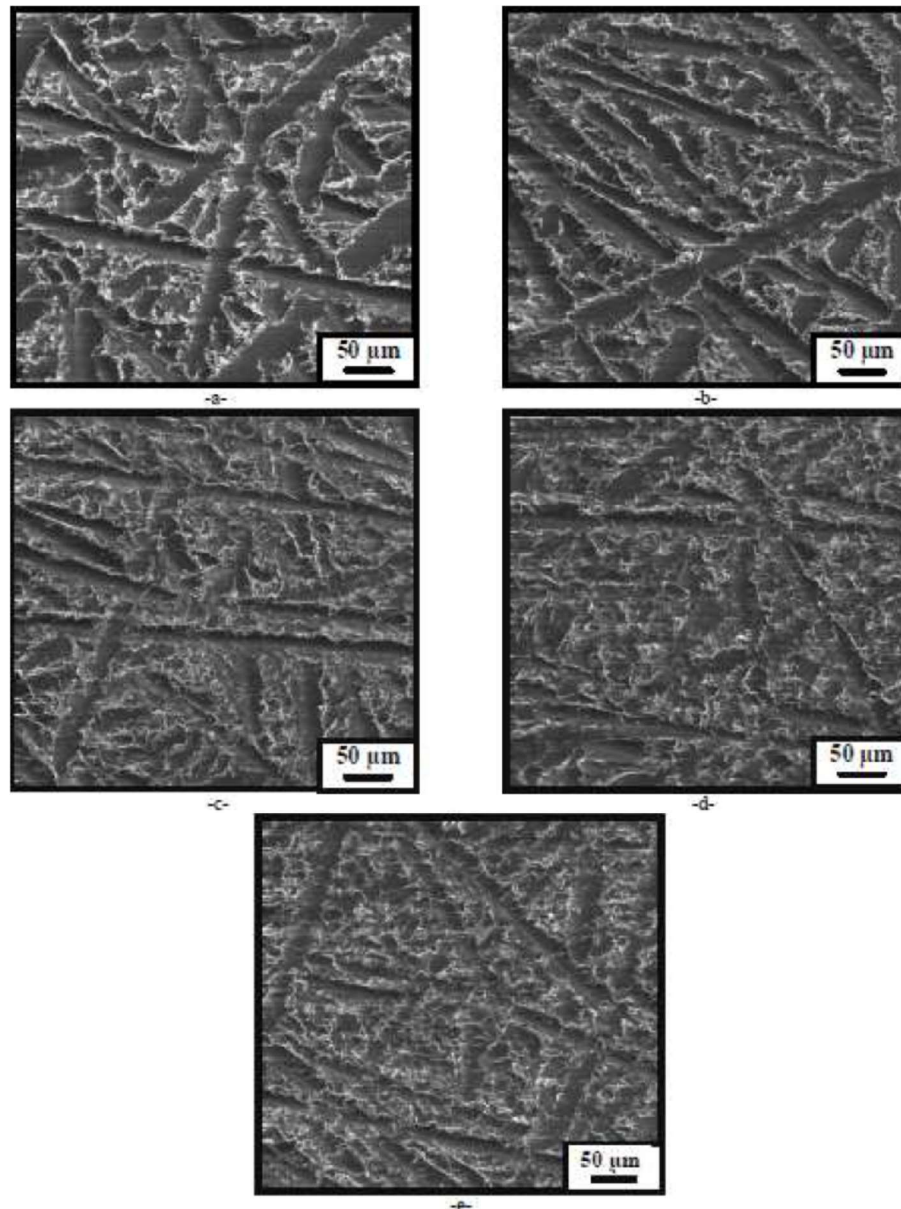


Figura 3.3 – Superfície obtida na simulação. a- 500 eventos; b- 1000 eventos; c- 1500 eventos; d 2000 eventos; e- 2500 eventos. Inclinação 30°, MEV (Da Silva; De Mello, 2006).

Observa-se na figura 3.3 que a superfície é modificada conforme a variação da quantidade de eventos. Comparando as Figuras 3.1 e 3.3 percebe-se uma semelhança entre as topografias da superfície de referência e a simulada à medida que a quantidade de eventos aumenta (Da Silva e De Mello, 2006).

Williams e Xie desenvolveram um modelo que estuda a interação entre ranhuras paralelas provocadas pela ação de um indentador com uma superfície dútil. Os testes foram realizados com um indentador piramidal de base quadrada, que representa a ação de uma partícula abrasiva, sobre a superfície cilíndrica de uma amostra de cobre. O indentador executa o movimento de translação e a amostra o

de rotação. O equipamento utilizado permite controlar a geração e a posição de uma ranhura subseqüente em relação à ranhura anterior de forma precisa. A figura 3.4 mostra o espaçamento entre as ranhuras ou a distância entre riscos/sulcos.

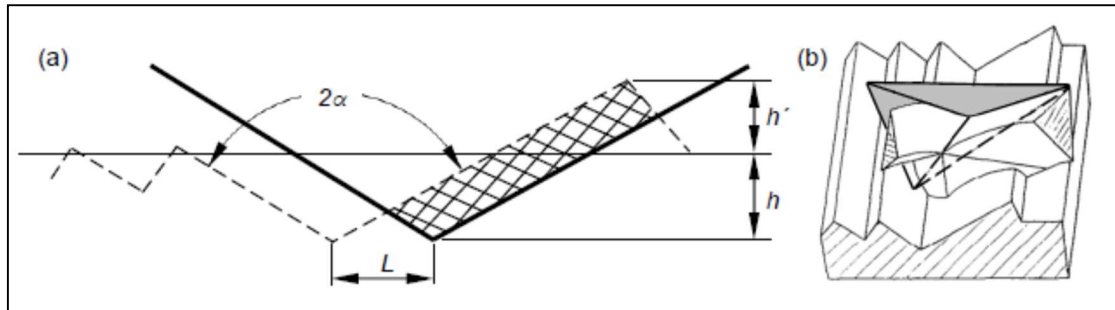


Figura 3.4 – Esquema de ranhuras (Williams; Xie, 1992)

O indetador usado é o piramidal de base quadrada com ângulo entre arestas 2α , como mostrado na figura. Esse indetador tem um raio de ponta definido de $10\ \mu\text{m}$ e a direção de deslizamento é na sua diagonal, ângulo de diedro 2ϕ igual 90° . O esquema mostra a profundidade do deslizamento h e a altura do material deformado h' (Williams, Xie, 1992).

A partícula pode apresentar-se para a superfície com seu eixo vertical inclinado para trás ou para frente relativo à normal da superfície da amostra, e essa inclinação, junto com o valor de α , determina o valor do ângulo de ataque ψ , isto é, o ângulo entre a borda dianteira do penetrador e a direção do deslizamento (Figura 3.5).

Uma série de testes foi realizada produzindo eventos isolados com ângulos entre as arestas variando de 86° a 170° para a obtenção de um mapa de desgaste. Para testes onde o ângulo de ataque foi menor do que 32° ($2\alpha=116^\circ$) houve um predomínio de microsulcamento, isto é, o material é deslocado lateralmente e sem perda de matéria. Entretanto, verificou-se o aparecimento do regime misto, microsulcamento e microcorte, com ângulo de ataque entre 32° e 44° ($2\alpha=92^\circ$). O valor do ângulo de ataque crítico que corresponde ao predomínio do microcorte foi de 39° , atingindo a estabilidade com 44° . Através desses resultados, conclui-se que o mecanismo de desgaste depende do ângulo de ataque.

O ângulo de diedro também influencia o comportamento do material e Kato e coautores mostraram que quando a base quadrada da pirâmide se move com uma das extremidades à frente ($2\phi=90^\circ$) há uma transição suave de microcorte para

microsulcamento com a redução de ψ ; entretanto se o indentador se movimentar com uma das faces recebendo todo o esforço do deslocamento ($2\varphi=180^\circ$), então, a medida que o ângulo de ataque diminui, surge uma região de instabilidade de formação de proa ou formação de cunha antes do microsulcamento puro se tornar estável.

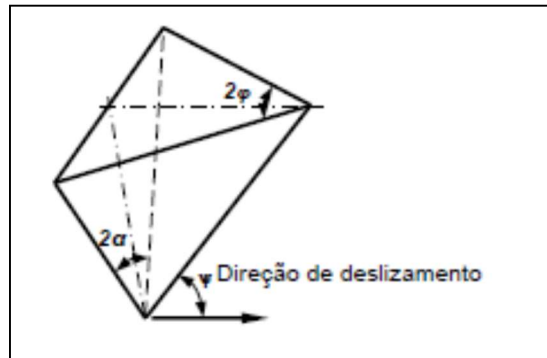


Figura 3.5 – Esquema de uma partícula definida pelos ângulos α e φ ; ψ é o ângulo de ataque. (Williams; Xie, 1992).

Ao inserir a distância entre ranhuras como uma variável observou-se que, para pequenas distâncias independentemente do ângulo de ataque, parte do material foi removido como cavaco (Figura 3.6). Isso permitiu concluir que a diminuição dos espaçamentos entre riscos/sulcos favorece a mudança do mecanismo de desgaste (Williams; Xie, 1992).

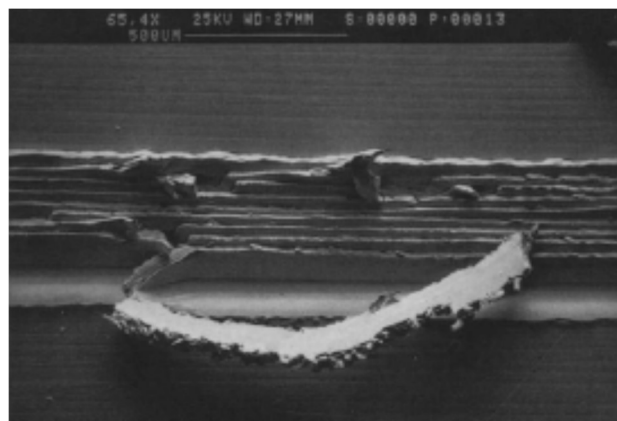


Figura 3.6 – Micrografia de uma superfície desgastada mostrando um cavaco formado pelo indentador (Williams, Xie; 1992).

A Figura 3.7 mostra um mapa que relaciona o espaçamento lateral de material pelo ângulo de ataque e o ângulo entre arestas. Observam-se duas regiões nesse gráfico: uma que representa microsulcamento completo e a segunda onde se verifica um regime misto de microsulcamento e microcorte. Essa figura contém uma curva

que é proveniente de um modelo numérico desenvolvido pelos autores (Williams; Xie, 1992) para definir as áreas de onde ocorrem os micromecanismos de desgaste e os dados experimentais.

Quando o ângulo de ataque é pequeno, tanto a curva analítica como os dados experimentais revelam que a divisão entre a região entre sulcamento puro e a região de sulcamento combinada com microcorte se tornem assintótica para o valor de $L/(h \tan \alpha)$ igual a 0,45.

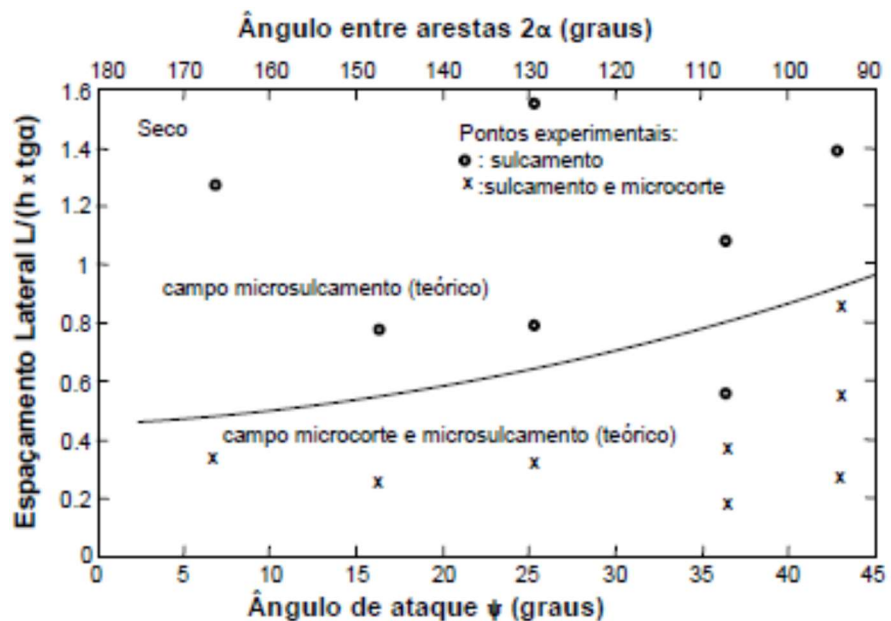


Figura 3.7 – Diagrama de mecanismos de desgaste para deslizamentos paralelos sobre a superfície de cobre na condição seco (Williams; Xie, 1992).

Uma vez que o espaçamento médio da ranhura atinge esse nível, teoricamente todas as partículas abrasivas levam a algum desgaste por microcorte, cuja ação decorre da remoção de material que foi deslocado lateralmente durante o evento de desgaste anterior. A proporção de material desgastado por microsulcamento e/ou microcorte depende da geometria das partículas e das propriedades físicas da superfície desgastada (Williams; Xie, 1992).

Pequenos ângulos de ataque, em deslizamentos paralelos com espaçamentos pequenos, que a princípio favoreceriam o sulcamento em uma superfície, conduzem à perda de material por microcorte e no deslizamento isolado, somente grandes ângulos de ataque levam à remoção de material.

Os autores (Williams; Xie, 1992) concluem que quando superfícies duras estão em contato com componentes dúcteis, cada interação de partícula pode gerar diferentes combinações de sulcamento com microcorte.

Mezlini e co-autores estudaram as interações entre ranhuras e a influência delas nos mecanismos de desgaste em folhas de alumínio utilizadas para o transporte de material granular. Os experimentos consistiram em utilizar um equipamento capaz de realizar ranhuras paralelas, usando um indentador rígido, em amostras que são fixadas em uma mesa controlada por um transdutor. O indentador utilizado nesse experimento foi do tipo diamante cônico com sua extremidade hemisférica, semiângulo de 60° e raio de $10\ \mu\text{m}$.

Para estudar os diferentes mecanismos de desgaste que podem ocorrer em materiais utilizados para o transporte granular, Mezlini e co-autores simularam as interações entre ranhuras nas ligas de alumínio, 5xxx e 7xxx, com um microesclerômetro. A metodologia consistiu em executar duas ranhuras paralelas, distantes uma da outra, sem que houvesse superposição entre ambas, e uma terceira ranhura foi realizada entre as duas ranhuras geradas anteriormente, com a superposição daquela em ambas.

Ranhuras isoladas foram realizadas em dois tipos de ligas de alumínio. Observações feitas na liga 5xxx, após a execução dos testes, mostraram que o material é deslocado para os lados da ranhura e uma cunha é formada à frente do indentador. Alguns cavacos são formados na final das ranhuras, mas o microsulcamento aparece como o principal mecanismo de desgaste (Figura 3.8). Para a liga de alumínio 7xxx percebeu-se a formação de alguns cavacos na final das ranhuras, mas o mecanismo dominante foi o mesmo observado na liga 5xxx (Mezlini e coautores). A Figura 3.9 mostra esses resultados.

Mezlini e co-autores mostraram que pela geração de ranhuras paralelas duas ligas de alumínio têm praticamente a mesma resistência ao desgaste e este comportamento se deve à modificação das propriedades subsuperficiais na região onde a ranhura foi executada. No caso real, o contato com o material granular provoca carregamento repetitivo. Interações entre ranhuras e diferentes mecanismos de desgaste podem ocorrer (Mezlini e co-autores).

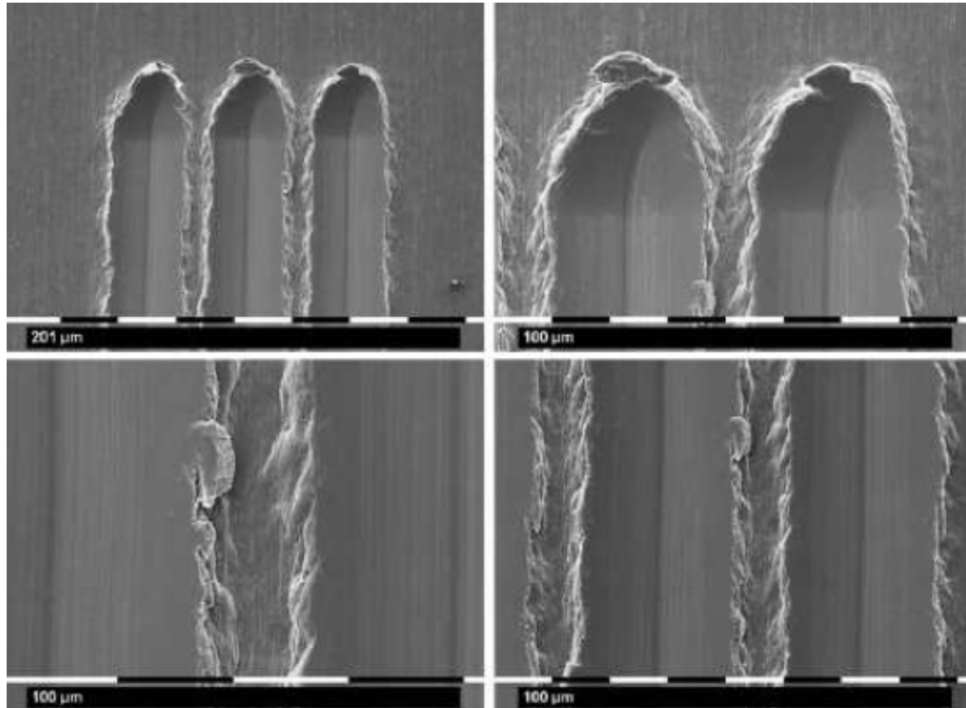


Figura 3.8 – Fotos das ranhuras executadas na liga de alumínio 5xxx retiradas pelo MEV (Mezlini e co-autores).

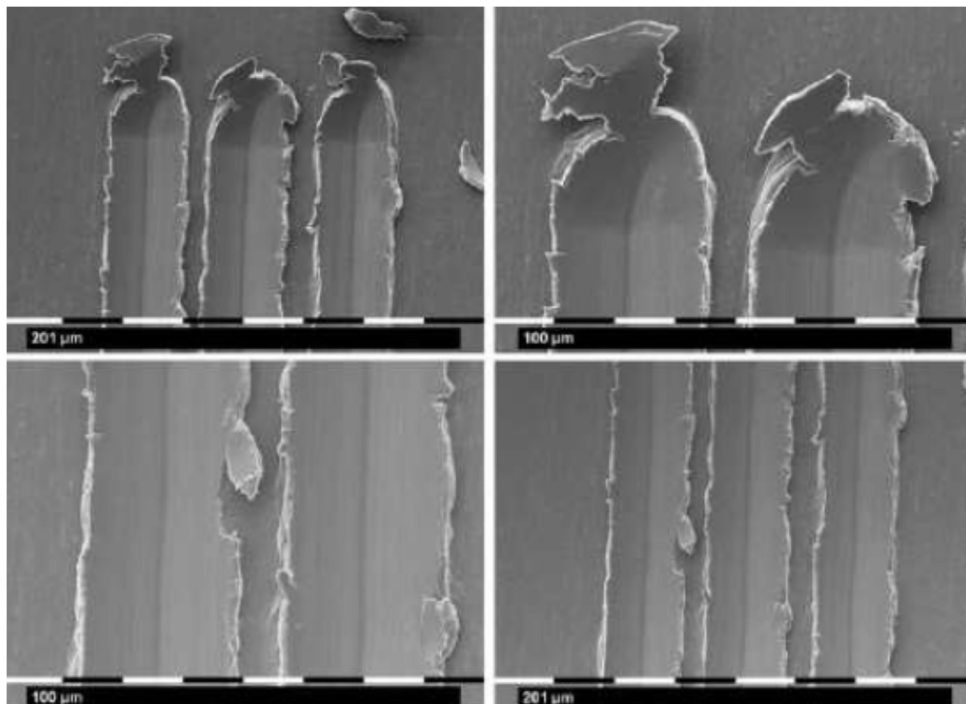


Figura 3.9 – Fotos das ranhuras executadas na liga de alumínio 7xxx retiradas pelo MEV (Mezlini e co-autores).

Analisando as figuras 3.10 e 3.11, os principais mecanismos de desgaste observados na liga de alumínio 5xxx, com superposição de eventos, foram sulcamento e formação de cunha. Alguns cavacos foram formados na lateral da ranhura.

Analisando as ranhuras isoladas e as ranhuras superpostas na liga 5xxx, observa-se que não houve mudança nos mecanismos de desgaste nos ensaios realizados com essa liga (Mezlini e co-autores).

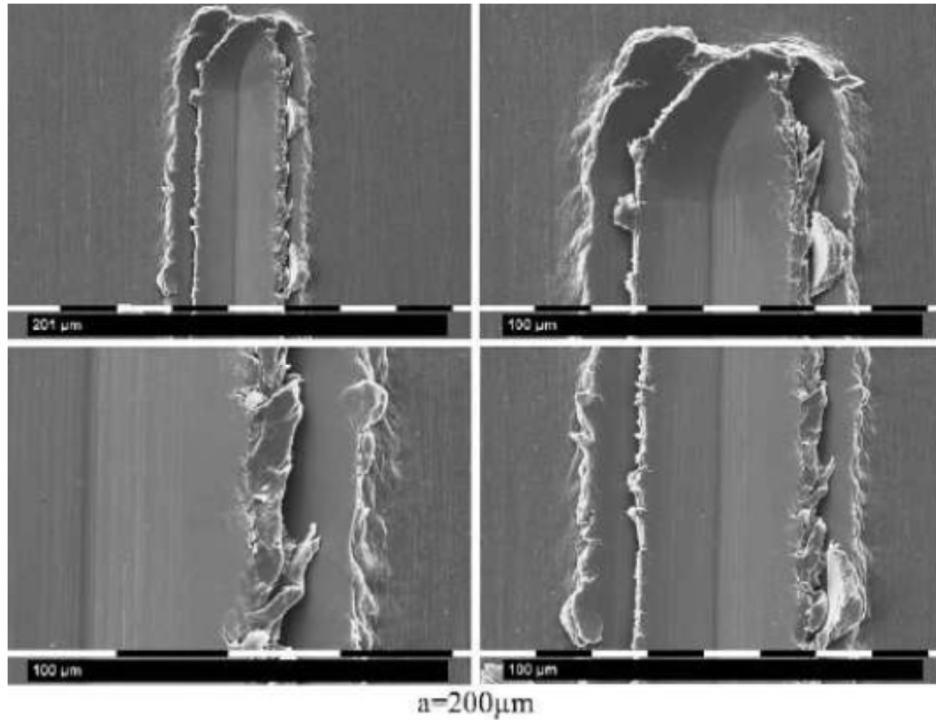


Figura 3.10 – Fotos de interações entre ranhuras executadas na liga de alumínio 5xxx, com espaçamento de 200μm, retiradas pelo MEV (Mezlini e co-autores, 2004).

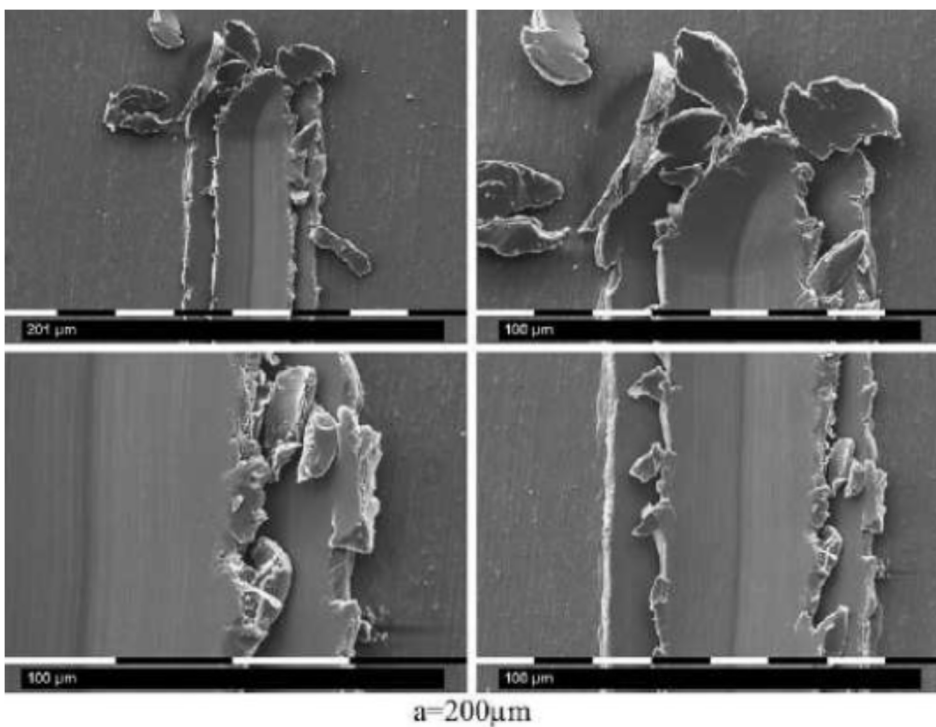


Figura 3.11 – Fotos de interações entre ranhuras executadas na liga de alumínio 7xxx, com espaçamento de 200μm, retiradas pelo MEV (Mezlini e co-autores, 2004).

Na liga de alumínio 7xxx observou-se a formação de cavacos na extremidade e na lateral das ranhuras. A ranhura do meio foi responsável pela formação de muitos cavacos. Os autores concluíram que o material deformado durante a primeira e a segunda ranhura apresenta dificuldade de se deformar novamente para os lados durante a realização da terceira ranhura, e desse modo, forma cavacos. Então, o principal mecanismo de desgaste muda de sulcamento e formação de cunha para microcorte pela ação de uma ranhura quando há superposição de eventos.

Observa-se que nos ensaios realizados com a geração de ranhuras isoladas e ranhuras superpostas na liga 7xxx houve mudança nos mecanismos de desgaste, de sulcamento e formação de cunha para microcorte (Mezlini e co-autores). Portanto, os mecanismos de desgaste abrasivo parecem depender das interações entre ranhuras e da susceptibilidade do material ser deformado com ou sem fratura.

Na tentativa de obter superfícies semelhantes pela simulação do desgaste abrasivo, através do controle de variáveis usadas na simulação, Da Silva e De Mello (2009) desenvolveram um equipamento para reproduzir a ação de uma partícula abrasiva, chamado de microsimulador. Um indentador Vickers foi escolhido para interagir com o material por possuir uma geometria similar à da partícula. Uma superfície desgastada foi produzida no teste roda de borracha para servir de referência para a simulação. Eles introduziram um novo parâmetro para avaliar a transição dos mecanismos de desgaste, chamado de superposição de interações. Para estudar o efeito da superposição, uma série de ranhuras paralelas foi gerada na superfície de uma amostra pela variação da distância entre mono-interações e da largura de mono-interações.

Esses autores iniciaram o estudo utilizando os dados obtidos da topografia da superfície de referência (Figura 3.12). O tamanho das partículas abrasivas foi associado com a profundidade das ranhuras observadas na superfície de referência. O parâmetro de rugosidade S_q , que representa a profundidade média, foi obtido com um valor médio igual a $0,83 \mu\text{m}$.

Para a geração dos dados iniciais da simulação, Da Silva e De Mello utilizaram valores arbitrários de força normal variável para as ranhuras realizadas e obtiveram a relação entre carga normal e profundidade (Figura 3.13) A força normal exercida

no deslizamento está diretamente relacionada com as dimensões da ranhura, isto é, a largura e a profundidade.

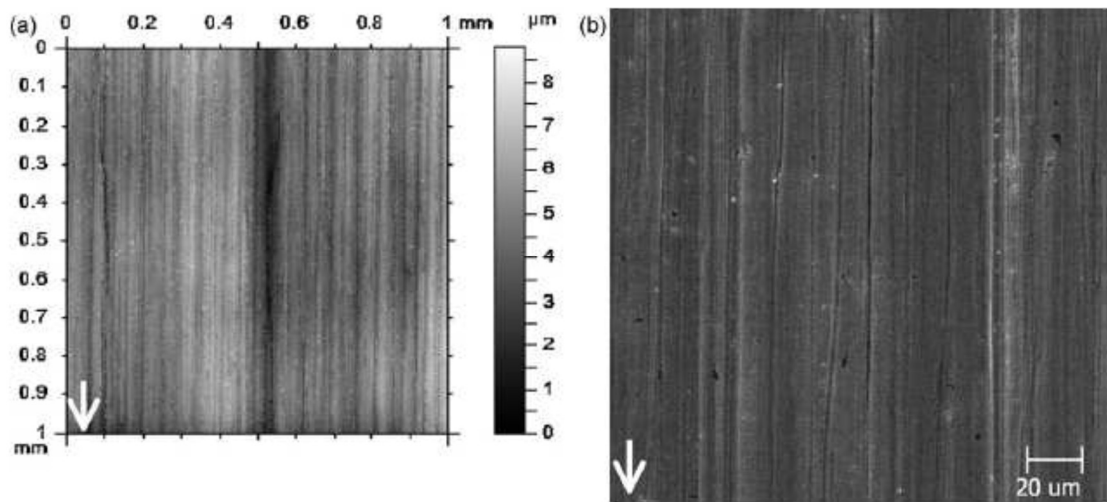


Figura 3.12 – Superfície de referência obtida no teste roda de borracha: (a) IL e (b) MEV (Da Silva; De Mello, 2009).

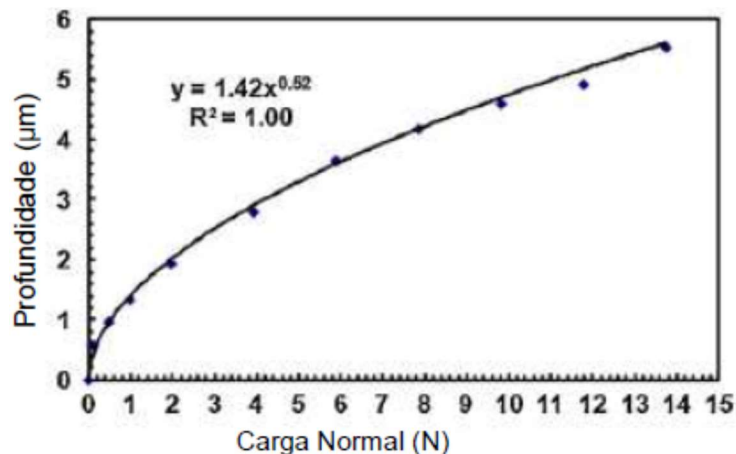


Figura 3.13 – Influência da carga normal e da profundidade de ranhuras isoladas (Da Silva; De Mello, 2009).

Os autores sugeriram a utilização do S_q (profundidade média) da superfície de referência para iniciar os experimentos. Desse modo, os valores desse parâmetro foram inseridos na equação da curva da Figura 3.13 e a magnitude da força usada na simulação foi obtida. O S_q calculado para a superfície simulada foi de $0,87 \mu\text{m}$ e aproximou-se do valor encontrado na referência. Entretanto, a morfologia encontrada nessa superfície foi diferente da referência. Esses autores concluíram que para a simulação usando ranhuras paralelas, onde a profundidade das ranhuras é obtida pela fixação da carga normal, definida pelo valor de S_q da referência, a rugosidade superficial é reproduzida, no entanto, a topografia e a morfologia diferem.

Na prática, a superfície de referência foi gerada por abrasivos de diferentes tamanhos e/ou por diferentes cargas por partícula. Cada tamanho de interação, decorrente da ação de uma partícula, na superfície de referência é causado por diferentes intensidades de interações de cada partícula abrasiva.

Na tentativa de reproduzir a variação do tamanho das ranhuras observadas na superfície de referência, Da Silva e De Mello variaram a intensidade das ranhuras utilizando perfis de força normal variável e testaram outros parâmetros de rugosidade para obter uma semelhança com a morfologia da referência. Os resultados indicaram que as considerações adotadas não foram suficientes para reproduzir a morfologia da superfície.

Outra consideração baseou-se em promover a interação entre ranhuras para avaliar a topografia. Para isso, foi realizado um estudo em que a superposição de ranhuras pudesse ocorrer e ser controlada. A razão da distância entre as ranhuras pela largura de uma ranhura define o valor da superposição.

Para controlar o grau de superposição das ranhuras paralelas, Da Silva e De Mello realizaram testes iniciais com ranhuras individuais para diferentes cargas normais a fim de estabelecer a relação entre carga normal e largura das ranhuras (LR). O grau de superposição foi controlado pela distância entre ranhuras (D), isto é, o número de ranhuras e as dimensões de suas larguras (Figura 3.14). 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. Testes realizados com carga de 5,9 N com graus de superposição variando de 0% a 98% mostraram que acima de 80% de superposição houve remoção de material.

A Figura 3.15 confirma a ocorrência de remoção de material pela presença de fragmentos de desgaste. Essa figura ilustra o efeito da superposição de ranhuras na morfologia da superfície resultante. A Figura 3.15a mostra as ranhuras separadas para grau de superposição de (- 100%) e as Figuras 3.15b e (c) mostram áreas com intensa deformação para graus de superposição de 85 e 95%, respectivamente.

Os mecanismos de transição de desgaste foram encontrados nos ensaios realizados por Da Silva e De Mello. A figura 3.15a mostra uma mistura de microsulcamento e microcorte para pequenos níveis de superposição. O destacamento de material

presente nas Figuras 3.15b e (c) significa que o microcorte foi intensificado pelo aumento da superposição. A remoção de material é confirmada pela grande quantidade de fragmentos de desgaste observados na Figura 3.15(d), ratificando a idéia que elevados níveis de superposição são requeridos para ocorrência de desgaste (Da Silva e De Mello, 2006). Portanto, esse fenômeno intensifica a formação de cavacos e reduz a deformação plástica, levando a uma considerável perda de matéria.

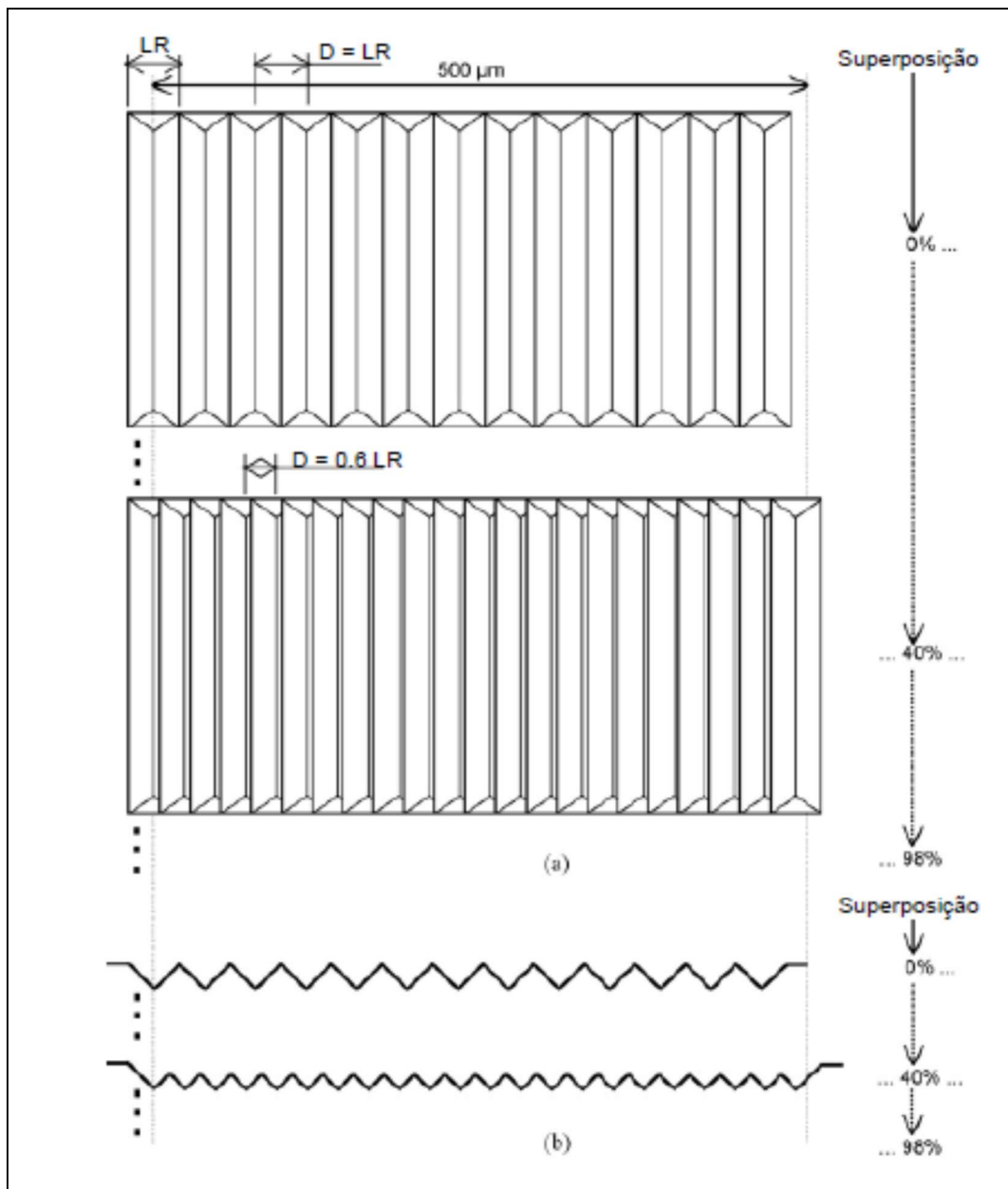


Figura 3.14 – Representação esquemática da seqüência de ranhuras; (a) vista superior e (b) perfis (Da Silva; De Mello, 2009).

Da Silva e De Mello descobriram que a relação entre a profundidade média da ranhura e a carga normal para a simulação, usando níveis de superposição, permite detectar a região onde o desgaste irá ocorrer.

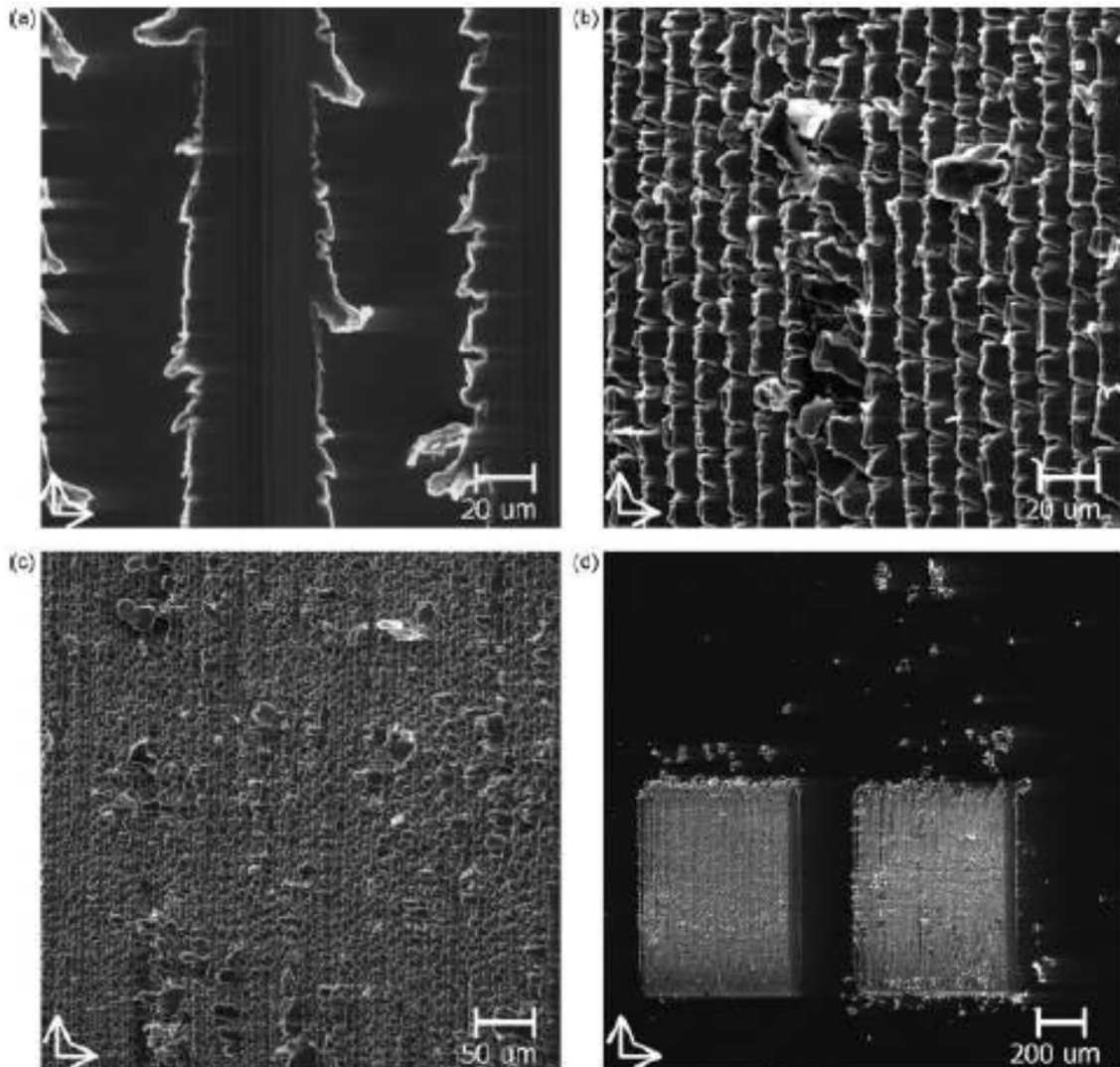


Figura 3.15 – Morfologia obtida em uma simulação com diferentes graus de superposição e com força normal de 5,9N: (a) -100%; (b) 85%; (c) 95%; (d) fragmentos formados ao redor da área das ranhuras com graus de superposição de 85 e 95%; SEM (Da Silva; De Mello, 2009).

Superfícies simuladas de acordo com essas regiões, onde há intensa perda de material, mostraram uma similaridade morfológica com a superfície de referência e apresentaram os mesmos mecanismos de desgaste (Figura 3.16).

Os valores dos parâmetros topográficos encontrados na superfície simulada foram bastante similares aos da referência, particularmente o S_q , que foi igual a $0,80 \mu\text{m}$ contra $0,83 \mu\text{m}$ da referência.

Da Silva e De Mello concluem que a metodologia proposta é aplicável para reproduzir o desgaste abrasivo pela aplicação da posição de cada interação com a carga associada.

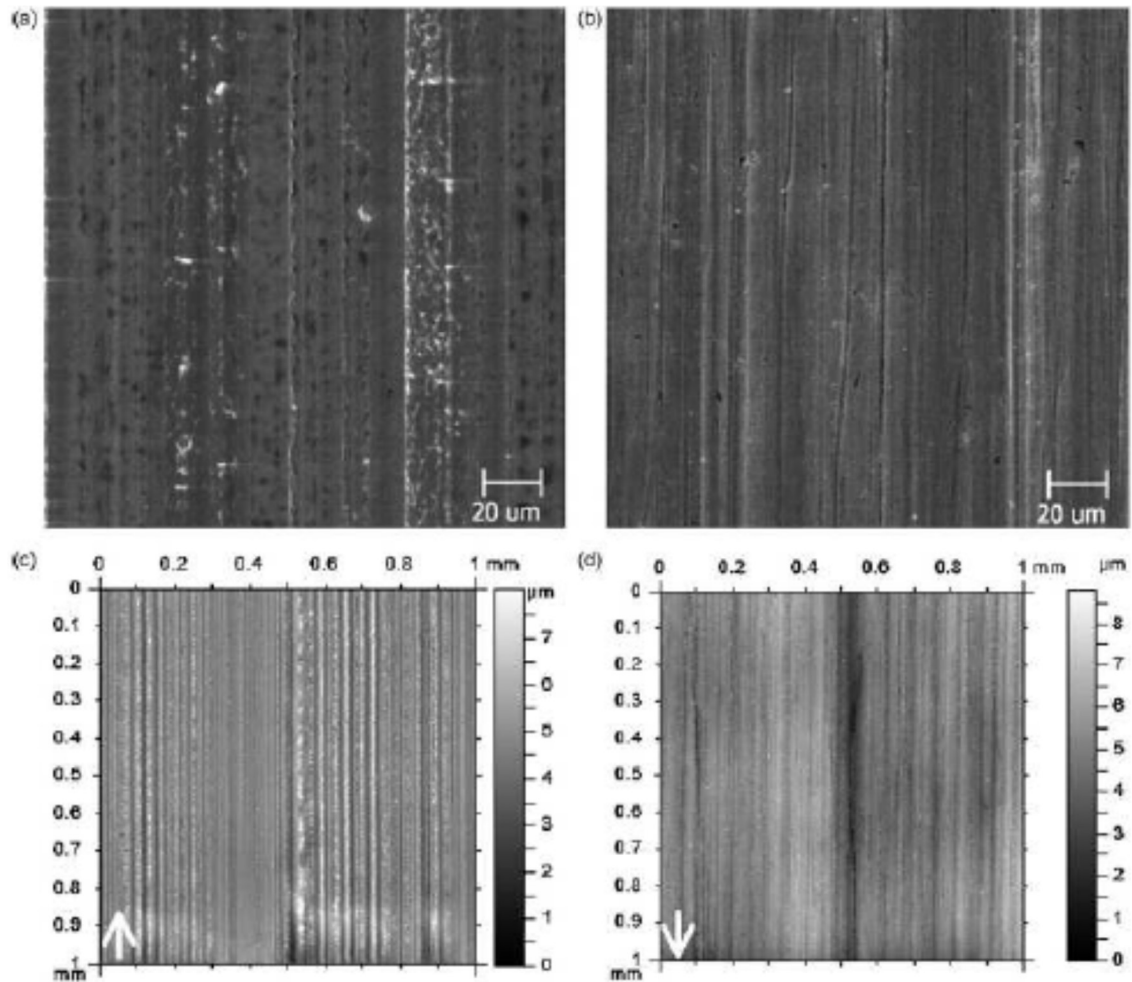


Figura 3.16 – Comparação entre a superfície de referência e a superfície simulada: (a) simulação; (b) referência, MEV; (c) simulação; (d) referência LI.

4. OBJETIVO

O método utilizado na continuação do estudo do deslizamento paralelo consiste no cerne desse trabalho. A técnica usada fundamentou-se em um novo parâmetro desenvolvido por Da Silva e De Mello (2009) denominado superposição de deslizamentos paralelos. O trabalho desses autores revelou que essa variável influencia, sobretudo, na remoção de material.

O objetivo desse mestrado é validar o conceito de superposição de ranhuras paralelas com quantidade variável de eventos abrangendo três novos materiais diferentes, onde o processo de seleção desses materiais baseou-se na quantificação da perda relativa de matéria dos mesmos. O fenômeno da superposição é analisado a fim de estabelecê-lo como um parâmetro para a ocorrência do desgaste abrasivo. O desenvolvimento desse trabalho consiste em executar ranhuras paralelas sobre a superfície de uma amostra variando os espaçamentos entre os eventos e verificar regiões da amostra onde houve desgaste.

5. TÉCNICA EXPERIMENTAL

5.1 Descrição do Equipamento

Para a realização dos ensaios de desgaste abrasivo foi utilizado um microsimulador. Os principais componentes deste equipamento são uma célula de carga tridimensional de alta resolução que opera no fundo de escala de 18 N; um indentador no padrão Vickers constituído por uma pirâmide de diamante com ângulo de diedro de 136° que é comprimida e movimentada relativamente, com uma força arbitrária, contra a superfície do material; três mesas coordenadas responsáveis pela movimentação da amostra, no plano horizontal, e do indentador, no plano vertical, e um translador piezelétrico, ao qual, o movimento do indentador está associado. As mesas do plano horizontal, x e y, movimentam-se perpendicularmente uma em relação à outra. A Figura 4.1 ilustra esse equipamento.

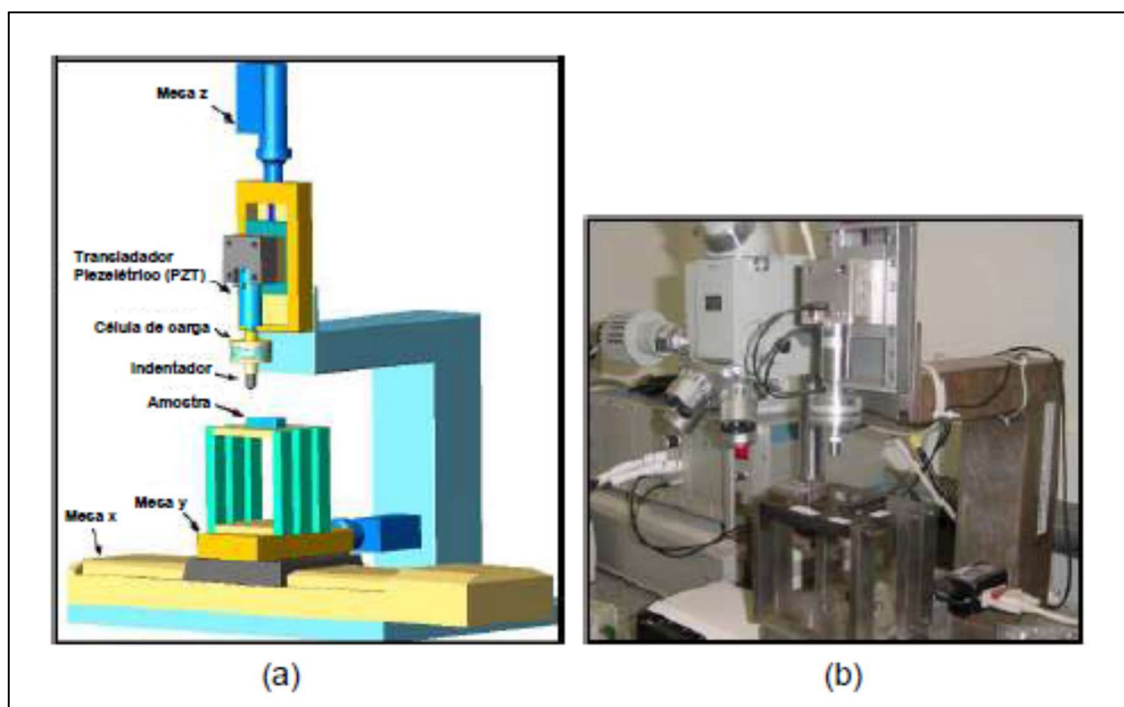


Figura 4.1 – (a) Esquema do microsimulador; (b) Equipamento (Da Silva, 2008).

Evento é uma interação controlada entre o indentador e a superfície da amostra que produz uma indentação (impressão) ou ranhura (risco/sulco). O micro-simulador permite cinco tipos de configurações: 1 - indentação aleatória, 2 – deslizamento aleatório, 3 - deslizamento paralelo, 4 - deslizamento paralelo e indentação aleatória, 5 – deslizamento aleatório e indentação aleatória, cuja finalidade é a simulação do

desgaste abrasivo pela execução de impressões pontuais e/ou riscos/sulcos na superfície.

Para este trabalho a configuração selecionada foi deslizamento paralelo. A simulação executada nessa configuração representa o deslizamento puro dos abrasivos na interface de desgaste, com o direcionamento bem definido desse movimento. A Figura 4.2 ilustra esse tipo de movimento (Da Silva, 2008).

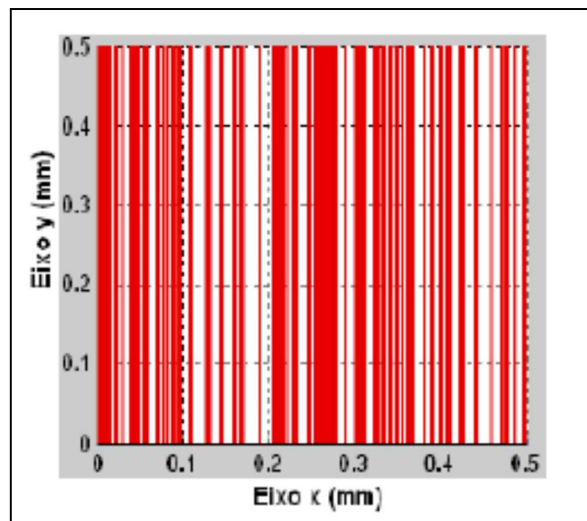


Figura 4.2 – Esquema do posicionamento dos eventos na configuração deslizamento paralelo (Da Silva, 2008).

5.2 Definição dos Parâmetros para a Execução da Superposição

Os principais parâmetros que concorrem para geração do desgaste abrasivo no microsimulador são: força normal de cada evento, forma do indentador e quantidade de eventos.

A força normal representa a força imposta à partícula em um processo abrasivo e a forma do indentador simula a forma da partícula abrasiva. O indentador utilizado nessa dissertação foi o de diamante no padrão Vickers, piramidal de base quadrada com ângulo de 136° entre faces. A Figura 4.3 mostra a extremidade desse indentador.

A quantidade de eventos é um parâmetro determinante na superposição de eventos. Os parâmetros referentes à execução dos testes de superposição associados com a configuração do posicionamento dos eventos, mostrado na Figura 4.2, definem o mecanismo de desgaste nesses experimentos.

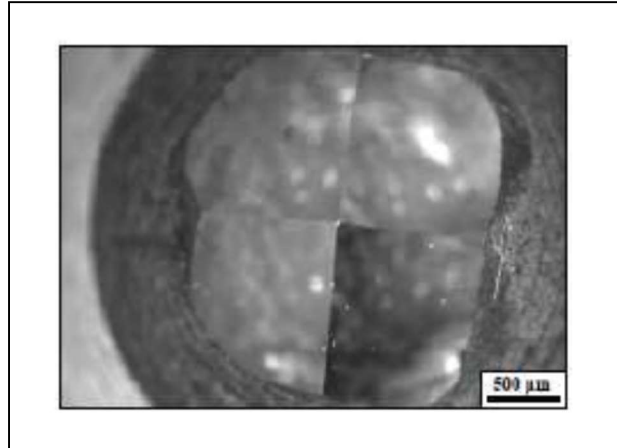


Figura 4.3 – Indentador Vickers (Da Silva, 2008).

6. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO DE RANHURAS PARALELAS

6.1 Resumo do Método

O estudo da superposição teve início com a geração de deslizamentos isolados definidos como a realização de eventos consecutivos e sem interferência (Figura 5.1).

A dimensão das larguras das ranhuras isoladas foi utilizada para determinar a quantidade de ranhuras dentro de uma área onde ocorre superposição a fim de calcular os níveis de eventos superpostos que irão indicar a faixa onde o desgaste pode ocorrer.

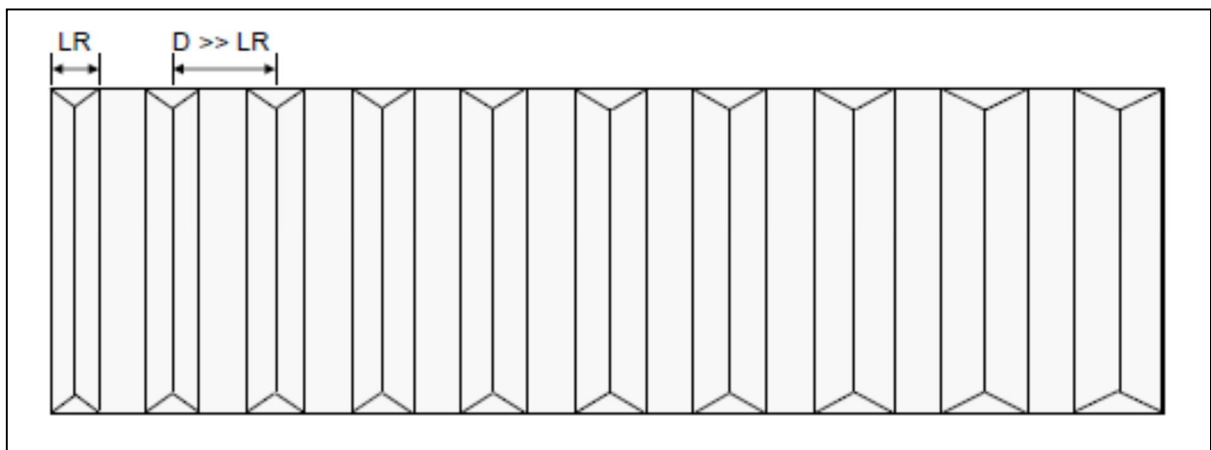


Figura 5.1 – Esquema. Execução de ranhuras paralelas isoladas.

Experimentos preliminares, utilizando o método da superposição de ranhuras paralelas realizados em diversos materiais, mostraram que a quantidade de matéria removida, sob as mesmas condições de teste, varia para cada material. Esse fator consistiu no critério de avaliação para a seleção dos materiais. O aço rápido, a alumina e o WC foram escolhidos para a execução dos ensaios desejados.

As condições dos ensaios nos materiais foram determinadas pela execução das mesmas seqüências de testes. Em algumas seqüências de testes para um determinado material, os valores de força normal e quantidade de eventos, definidos arbitrariamente, possuíram uma pequena variação para a mesma seqüência nos outros materiais. Apesar de, a escala da célula de carga variar entre zero e 18 N, a LR $D \gg LR$ máxima força escolhida não ultrapassou 12 N, devido às limitações do movimento de translação do indentador.

A realização dos testes para a avaliação do efeito da superposição está condicionada à definição da força normal associada à quantidade de eventos, isolados ou superpostos, e vice-versa. O comprimento dos eventos e as áreas simuladas foram constantes em todos os testes.

Três penetradores no padrão vickers foram utilizados durante os experimentos. Em todos os testes o valor da velocidade de deslizamento do penetrador sobre a amostra permaneceu abaixo de 0,300 mm/s com o objetivo de preservar a integridade do penetrador durante a realização da seqüência de eventos.

6.2 Ajuste do Indentador

A fixação do penetrador é ajustada conforme a posição da impressão provocada pela extremidade da pirâmide de diamante na superfície do material. A avaliação do posicionamento da área impressa é realizada no microscópio ótico. Devido à limitação na ampliação da imagem gerada pelo microscópio e as magnitudes das cargas aplicadas pelo equipamento, uma amostra de alumínio foi selecionada para os testes de posicionamento do penetrador, visto que, esse material apresenta uma grande capacidade de deformação plástica.

O procedimento para determinar a posição ideal do penetrador consiste, primeiramente, em posicionar a amostra na mesa y do plano horizontal e aplicar uma carga de magnitude constante na superfície plana da amostra. Posteriormente, a amostra é conduzida ao microscópio ótico pela mesa x, sem que haja alteração de sua posição na mesa y. O equipamento utilizado para a realização dos experimentos foi abordado na seção 4.1, Figura 4.1.

A posição ideal é caracterizada quando um dos lados do losango regular gerado for paralelo a uma reta suporte no eixo x (Figura 5.2). Na maioria das vezes é necessário repetir as indentações para obter a posição desejada.

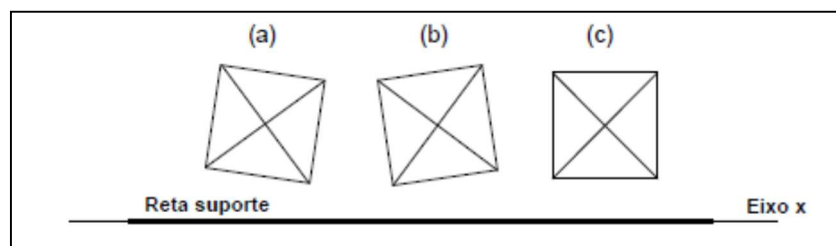


Figura 5.2 – Esquema do posicionamento do indentador. (a) e (b) Inadequado; (c) Adequado.

Uma maneira de constatar que o penetrador encontra-se na posição correta baseia-se na realização do teste de deslizamento paralelo, isto é, na execução de uma ranhura que consiste somente na movimentação da mesa y em contato com o indentador. Esse ensaio proporciona a formação de uma ranhura obtida pelo deslizamento do indentador sobre a amostra, cujo eixo de simetria longitudinal deverá conter a marca provocada pela extremidade do penetrador (Figura 5.3), para garantir que apenas uma das faces estará submetida ao esforço de deslizamento, isto é, em contato com o material deslocado e/ou removido. Caso contrário, se os esforços de deslizamento forem divididos com mais de uma face do indentador o mecanismo de desgaste obtido pode variar conforme a posição de fixação do indentador (Kato; co-autores, 1986).

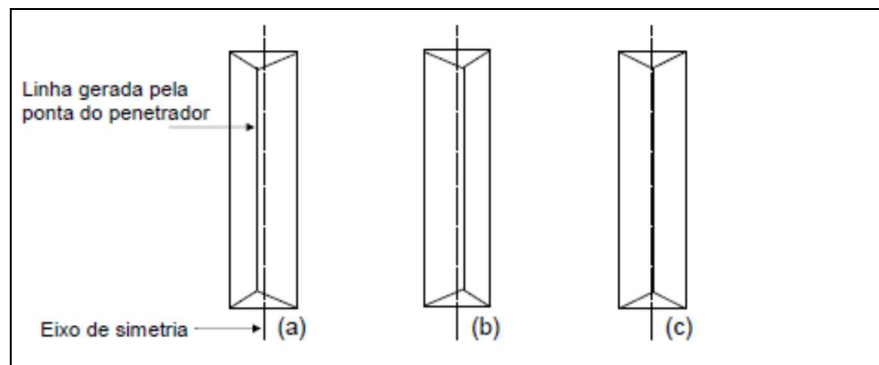


Figura 5.3 – Esquema da área retangular gerada pelo deslizamento do indentador. (a) e (b) Eixo de simetria e linha gerada pelo indentador não colineares; (c) Linha e eixo colineares.

Os experimentos realizados consistiram na utilização de cinco valores de força normal, 2; 5,7; 6 e 6,9 N, para comparação entre os materiais, associados a uma quantidade de níveis de superposição para verificar a ocorrência de desgaste. A tabela 1 mostra as informações sobre os ensaios de superposição para o aço rápido (AR), a alumina (Al_2O_3) e o WC.

Tabela 5.1 – Materiais ensaiados na superposição de ranhuras paralelas.

| Superposição (%) | Força Normal (N) | | | | | |
|------------------|------------------|-------------------------|----|-------------------------|----|-----|
| | 2 | | | 5,7 | 6 | 6,9 |
| 0 | AR | Al_2O_3 | WC | Al_2O_3 | WC | - |
| 10 | - | Al_2O_3 | WC | - | WC | - |
| 20 | - | - | WC | Al_2O_3 | WC | - |
| 30 | AR | - | - | - | WC | - |
| 80 | - | Al_2O_3 | - | Al_2O_3 | - | AR |
| 95 | AR | Al_2O_3 | - | Al_2O_3 | - | AR |
| 98 | AR | Al_2O_3 | WC | Al_2O_3 | WC | AR |

7. RESULTADOS

O procedimento de execução das ranhuras teve início com a geração de eventos isolados e paralelos, isto é, sem o efeito da superposição. Cada ranhura foi realizada com carga constante e o valor adotado para cada uma aumentou até a execução do último risco, totalizando um número arbitrário de dez riscos. Comparando as dimensões das ranhuras geradas, a largura de cada uma varia à medida que a força aumenta de uma ranhura para outra.

Antes de iniciar os testes foi realizada a fixação do indentador. A figura 6.1 mostra a posição de um indentador alinhado.

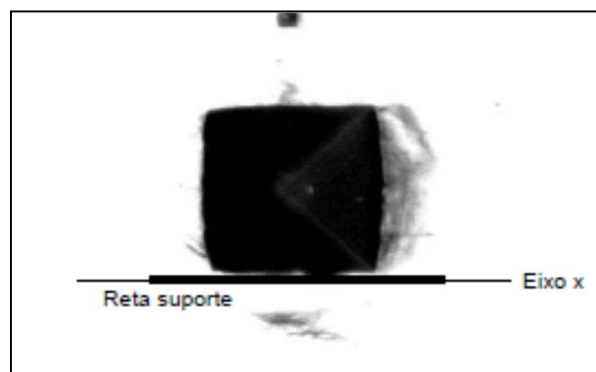


Figura 6.1 – Indentador alinhado, MO.

Os primeiros ensaios foram realizados na amostra de aço rápido 53 x 23 x 10 mm. Os parâmetros de entrada foram: velocidade de 0,300 mm/s, comprimento da ranhura isolada de 2 mm, espaçamento entre ranhuras de 0,5 mm e força igual a 0,2; 0,5; 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 12 N. A figura 6.2 mostra a topografia da superfície, obtida pela interferometria a laser e com a utilização do programa Mountains Map, onde estão dispostos os riscos isolados.

A etapa posterior foi levar ao microscópio ótico a amostra para a medição da largura dos eventos. Utilizando os dados da força por evento e sua correspondente largura obteve-se um gráfico do deslizamento isolado que pode ser visto na figura 6.3. Essa relação entre força e largura é utilizada para calcular a quantidade de eventos superpostos em uma determinada área, associando as larguras da ranhura e da área ensaiada, conforme a Figura 3.14.

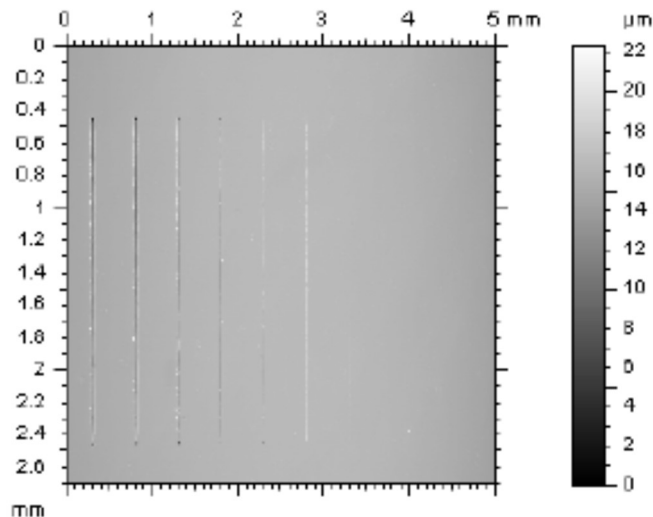


Figura 6.2 – Riscos Isolados executados no aço rápido.

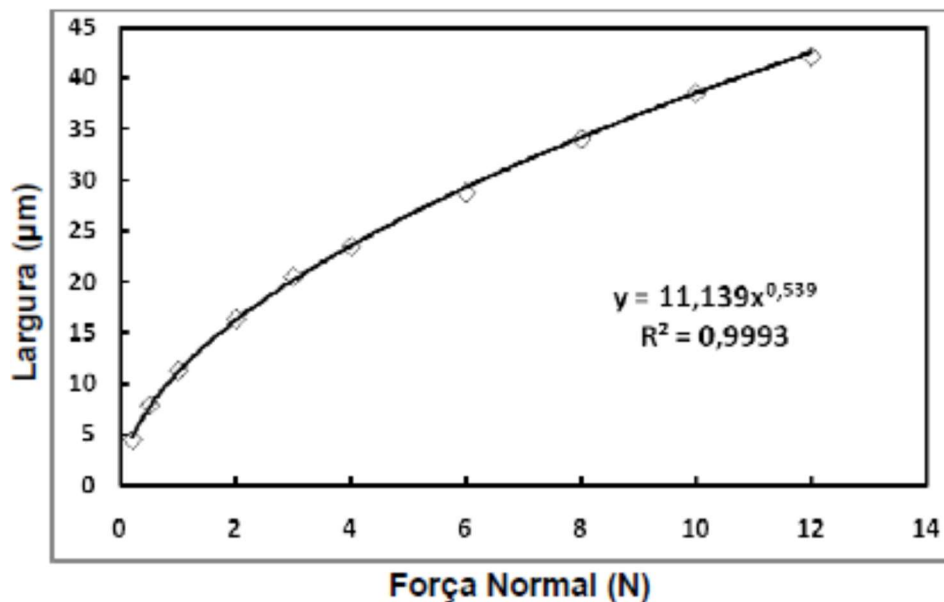


Figura 6.3 – Relação entre força normal e largura do deslizamento isolado. Aço rápido.

A metodologia utilizada para estudar a superposição de deslizamentos paralelos foi abordada no tópico três. Nesse método os parâmetros de entrada para os primeiros eventos superpostos foram: comprimento do risco de 1 mm, lado da área de 0,5 mm, distância entre as áreas de 0,5 mm, velocidade de 0,300 mm/s, controle de superposição de 0, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 85, 90, 95 e 98% e força de 3,9 N.

Cem perfis ortogonais à direção do movimento do indentador, escolhidos arbitrariamente, foram gerados em cada área do ensaio a fim de obter o perfil médio. A Figura 6.4 mostra área formada em um ensaio realizado com 95% de superposição e força normal de 3,9 N.

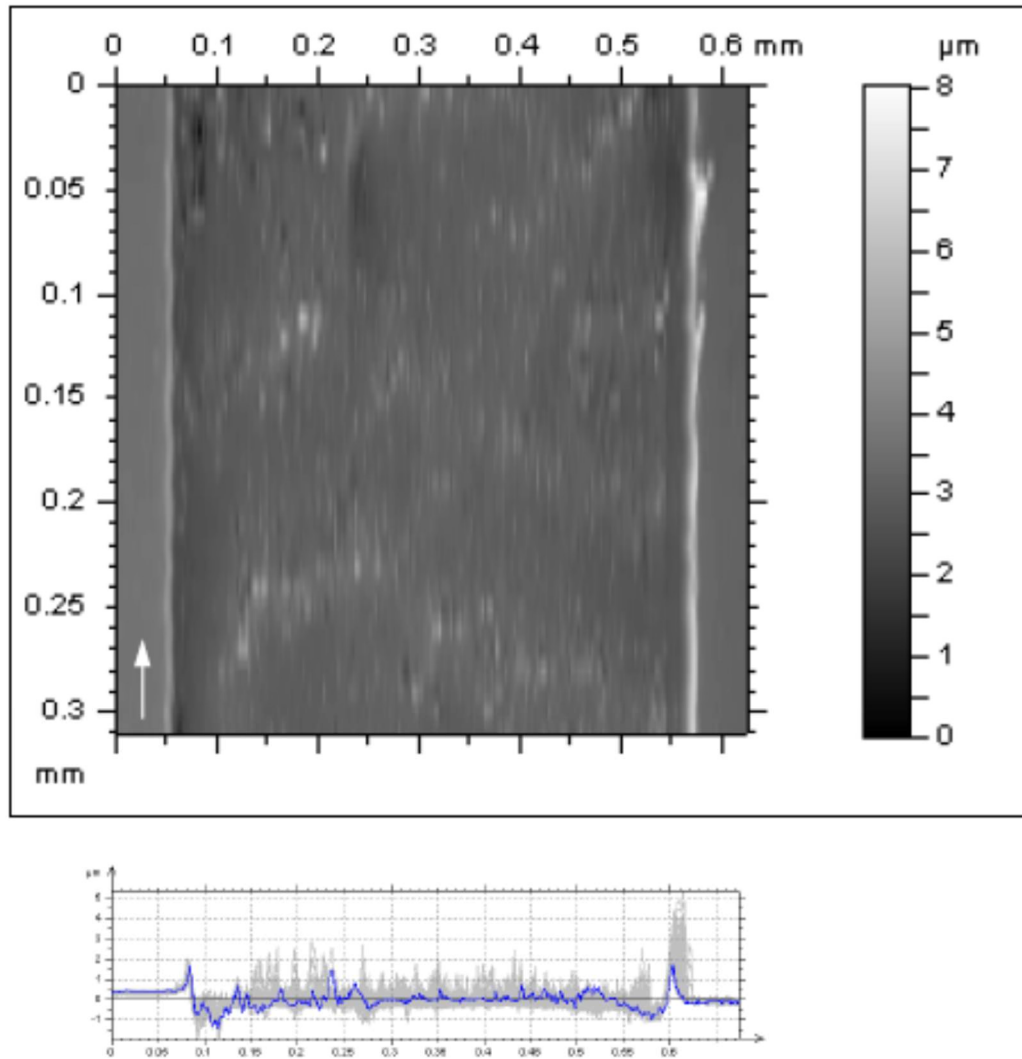


Figura 6.4 – (a) Área de deslizamentos superpostos a 95% de superposição e força igual 3,89 N; (b) Perfil Médio. Mountains Map.

A média dos perfis da topografia da superfície, segundo a direção ortogonal ao comprimento da área ensaiada, permite obter o perfil médio do deslizamento. Esse perfil é calculado na direção de deslizamento dos eventos mostrados na área da Figura 6.4a, ou seja, o perfil médio é perpendicular à direção do movimento do indentador.

A Figura 6.5 mostra o perfil médio respectivo a cada área dos ensaios de superposição de deslizamentos paralelos para o aço rápido, com força igual a 3.9 N.

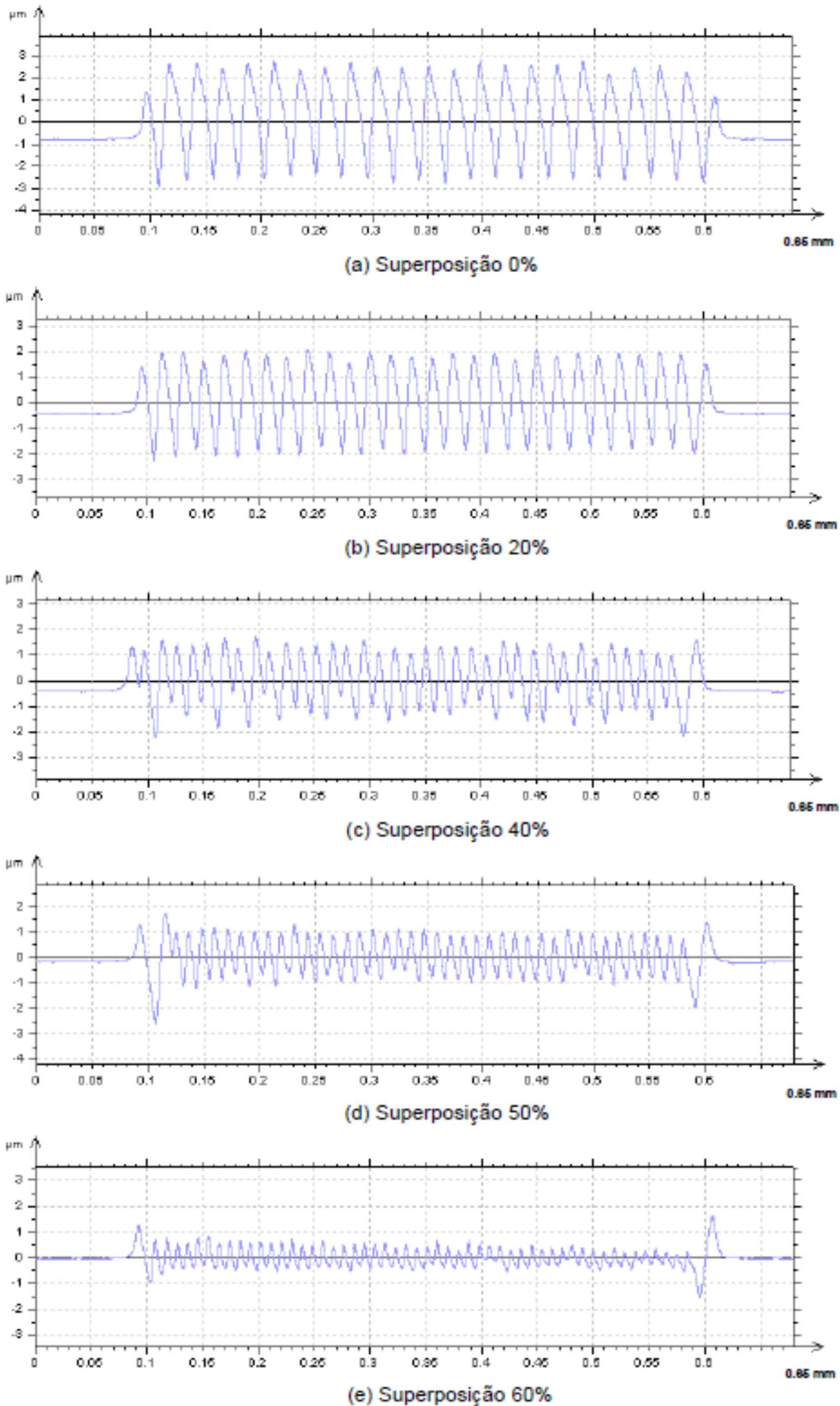
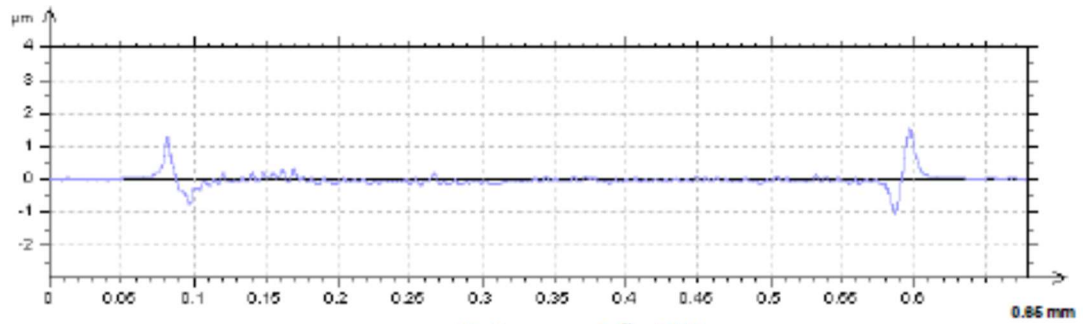
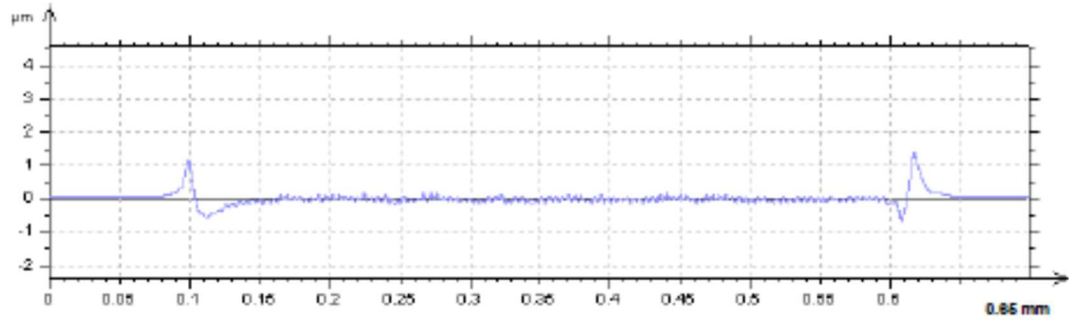


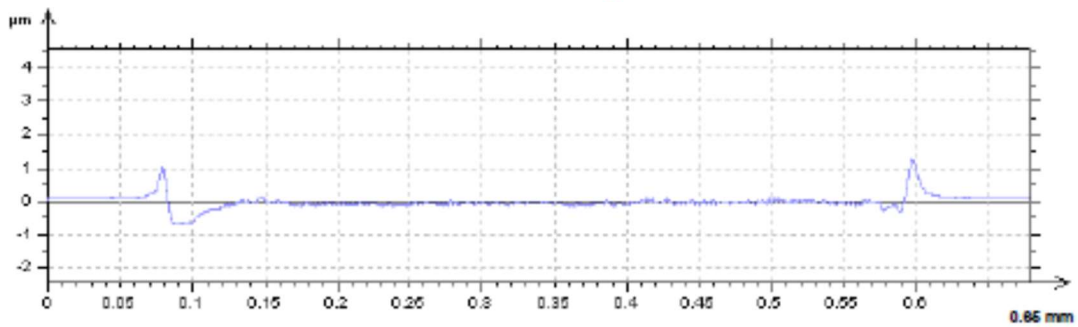
Figura 6.5 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Continua.



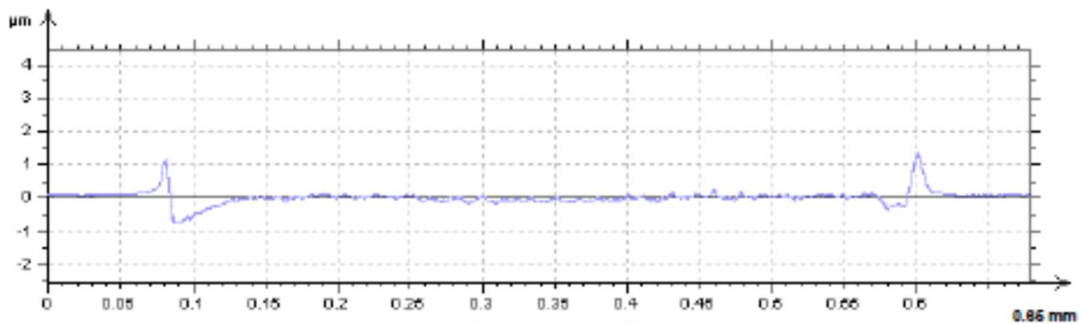
(f) Superposição 70%



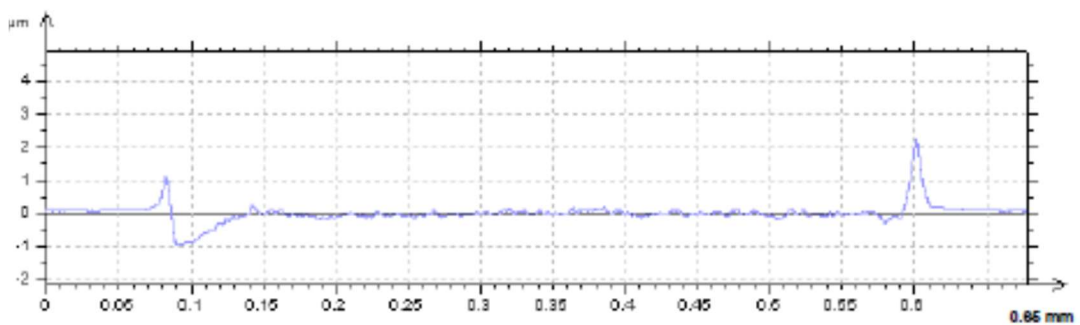
(g) Superposição 80%



(h) Superposição 85%



(i) Superposição 90%



(j) Superposição 95%

Figura 6.5 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Continua.

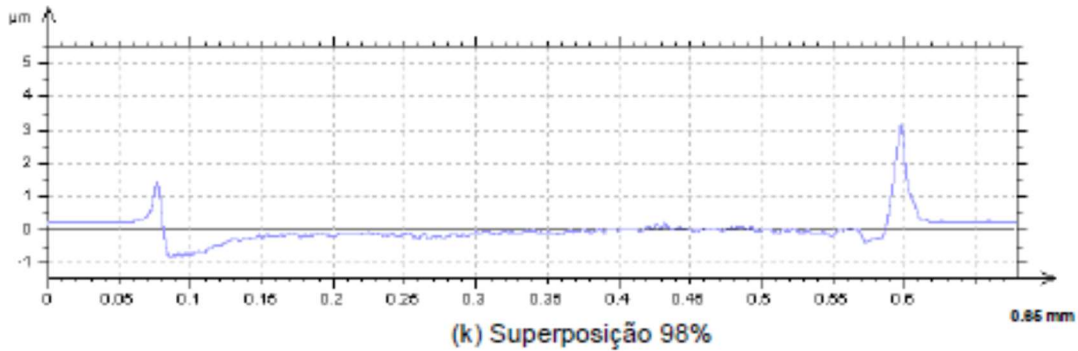


Figura 6.5 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL.

O perfil médio mostrado em cada gráfico da Figura 6.5 representa o comportamento da largura e da profundidade dos eventos ao longo da área ensaiada. A profundidade média, e as áreas acima e abaixo da superfície da amostra foram calculadas para analisar a possibilidade da ocorrência de desgaste. Esses resultados são apresentados no gráfico da Figura 6.6.

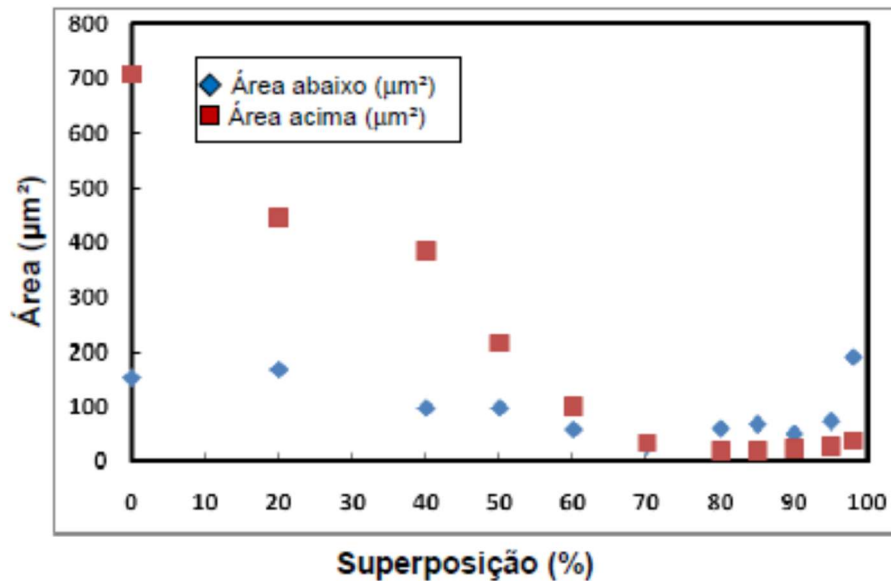


Figura 6.6 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 3,9 N. Aço rápido.

À medida que o nível de superposição aumenta os valores das áreas relativas às deformações acima e abaixo da superfície da amostra de aço rápido aproximam-se até 60%. Para o valor de 70% essas áreas apresentam valores praticamente iguais. Acima de 70% o valor da área abaixo da superfície aumenta enquanto a área deformada acima da superfície apresenta valores pequenos. Conclui-se através do gráfico que, para valores acima de 70% de superposição ocorre a remoção de matéria da amostra, mostrando que, a geração de eventos superpostos pode levar ao desgaste. A Figura 6.7 evidencia a formação de uma grande quantidade de

pequenos fragmentos nas áreas de superposição acima de 70% próximos do final das ranhuras, indicando que o material é removido do início para o final do risco/sulco.

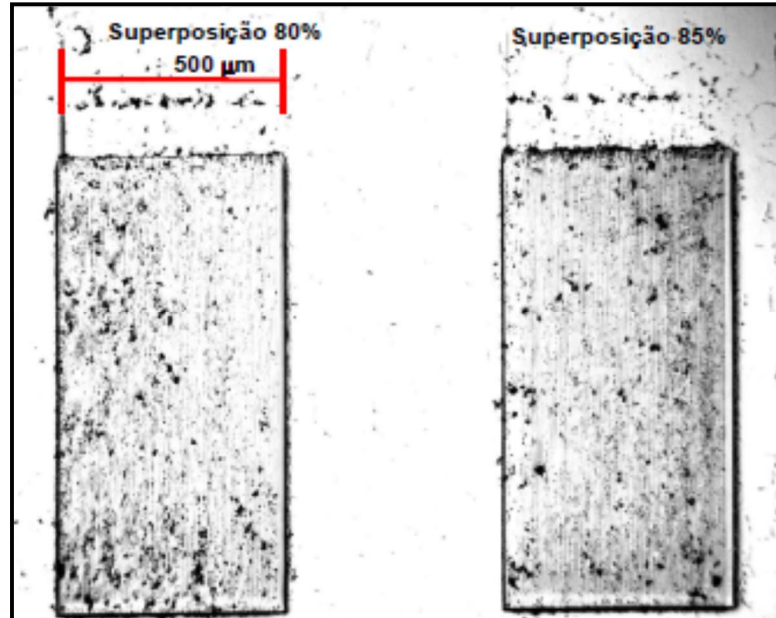


Figura 6.7 – Fragmentos da amostra de aço rápido em duas áreas ensaiadas. MO.

Uma comparação entre os materiais utilizados nesse trabalho foi realizada para verificar como os níveis de superposição variam quanto ao desgaste, de acordo com o comportamento dúctil ou frágil de cada um.

Os experimentos para o aço rápido foram realizados de acordo com os resultados obtidos pelo método de superposição de deslizamentos paralelos com força normal de 3.9 N. Assim, os níveis de superposição selecionados foram de 0, 30,95 e 98% para 2 N e 80, 95 e 98% para 6 N. As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam os perfis médios das áreas superpostas. Os resultados das áreas acima e abaixo da superfície da amostra são apresentados nos gráficos das Figuras 6.10 e 6.11.

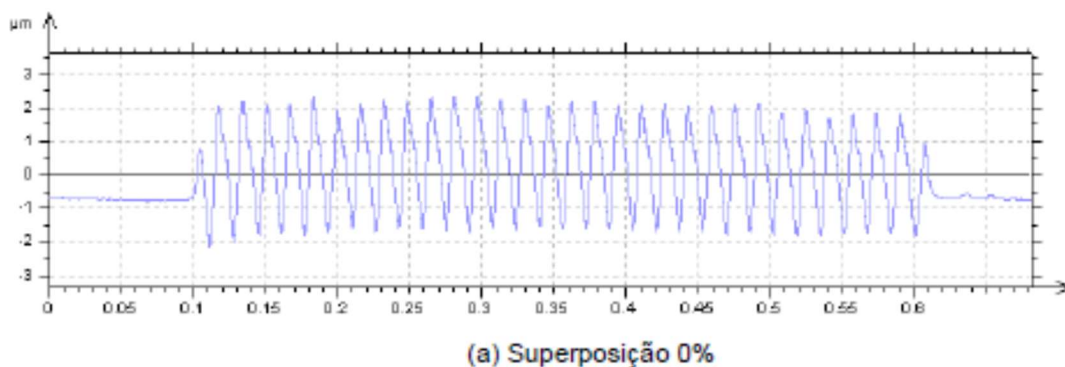
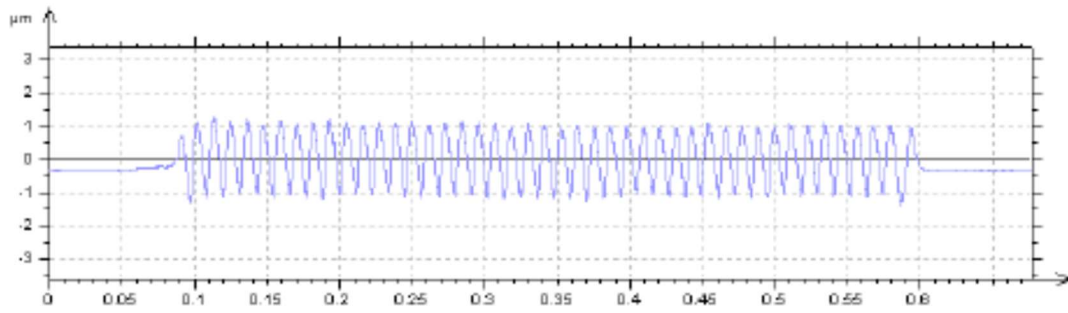
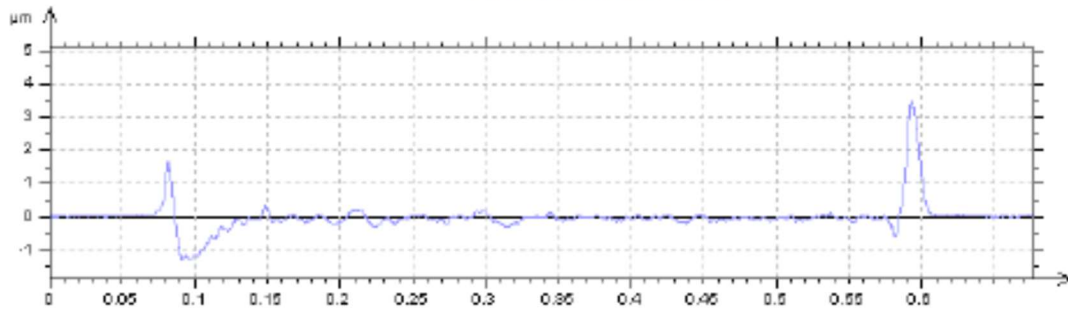


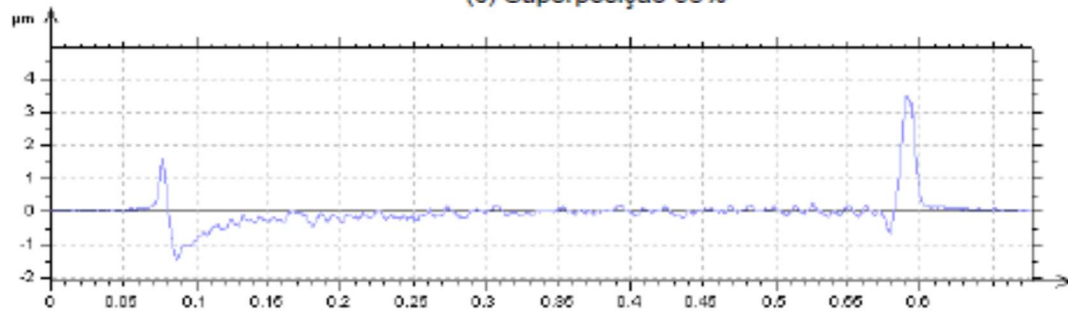
Figura 6.8 – Superposição de deslizamentos paralelos; perfis médios, IL. AR; 2 N. Continua.



(b) Superposição 30%

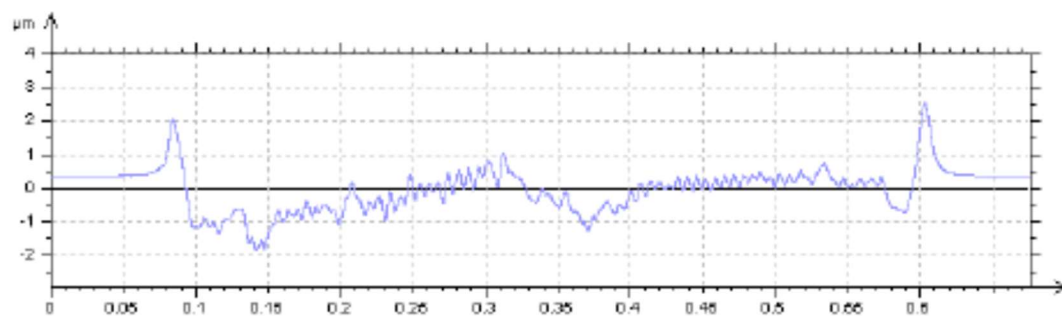


(c) Superposição 95%



(d) Superposição 98%

Figura 6.8 – Superposição de deslizamentos paralelos; perfis médios, IL. AR; 2 N.



(a) Superposição 80%

Figura 6.9 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. AR; 6,9 N. Continua.

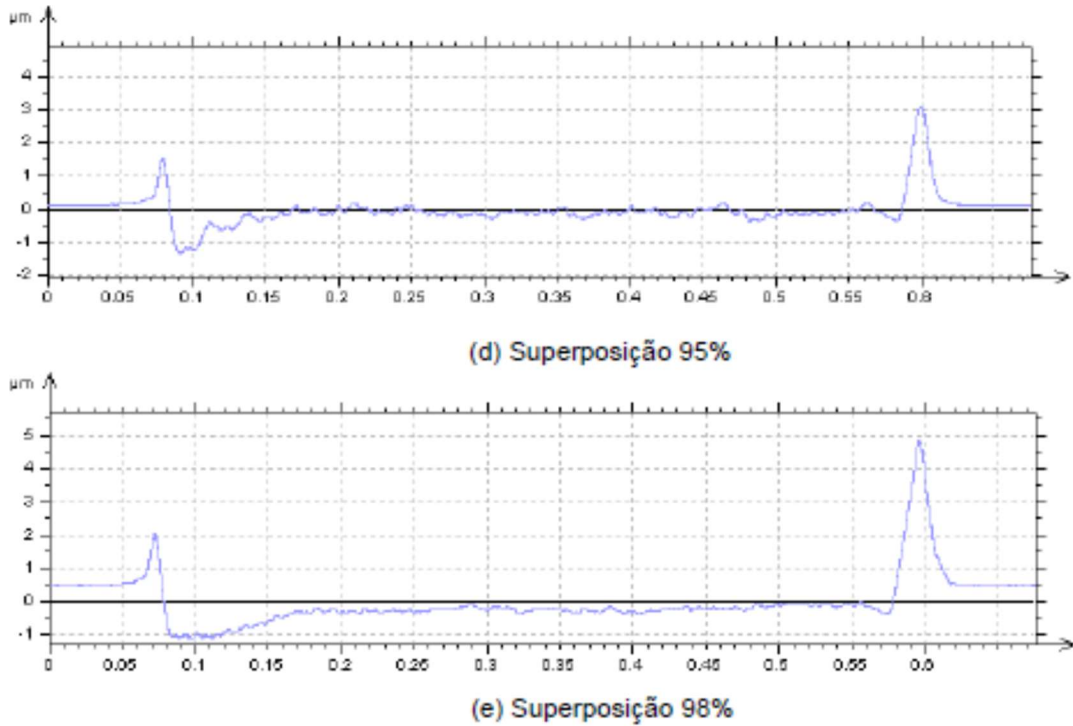


Figura 6.9 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. AR; 6,9 N.

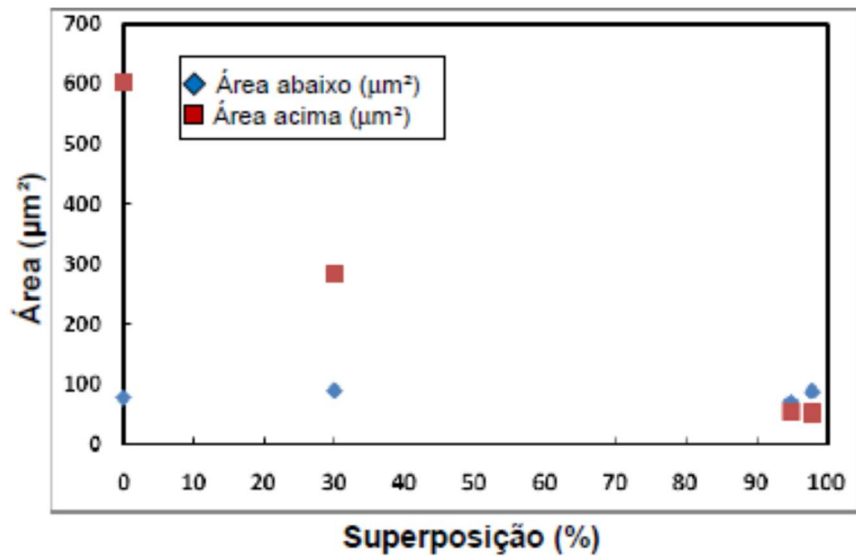


Figura 6.10 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 2 N. Aço rápido.

As áreas acima da superfície apresentam valores de deformação muito elevados em relação às áreas abaixo da superfície até 30% de superposição. Somente acima de 95% verifica-se que o valor da área abaixo da superfície supera o valor da área deformada acima da superfície e, por conseguinte, há remoção de matéria da amostra.

Para experimentos com força normal de 6,9 N, níveis de superposição de 80 a 98% proporcionam a geração de desgaste, pois as áreas abaixo da superfície

apresentam maior deformação. A quantidade de matéria removida aumenta próximo do nível de superposição de 100%.

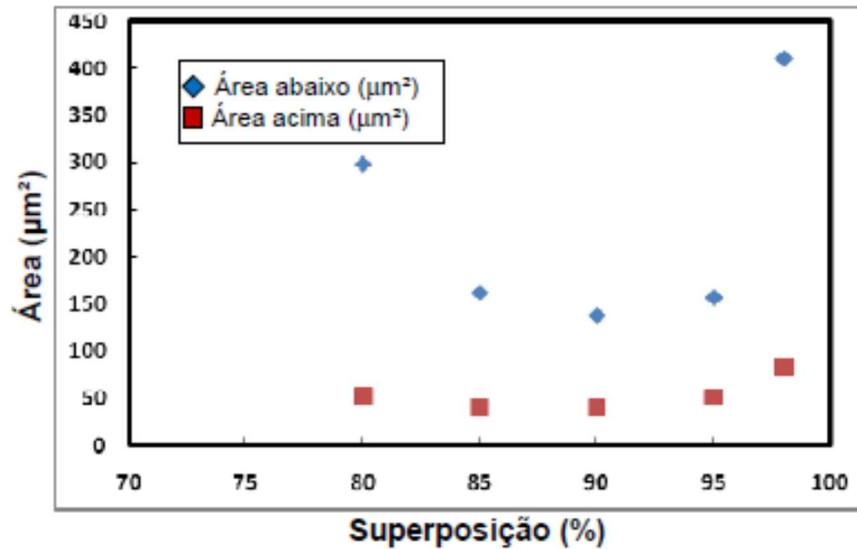
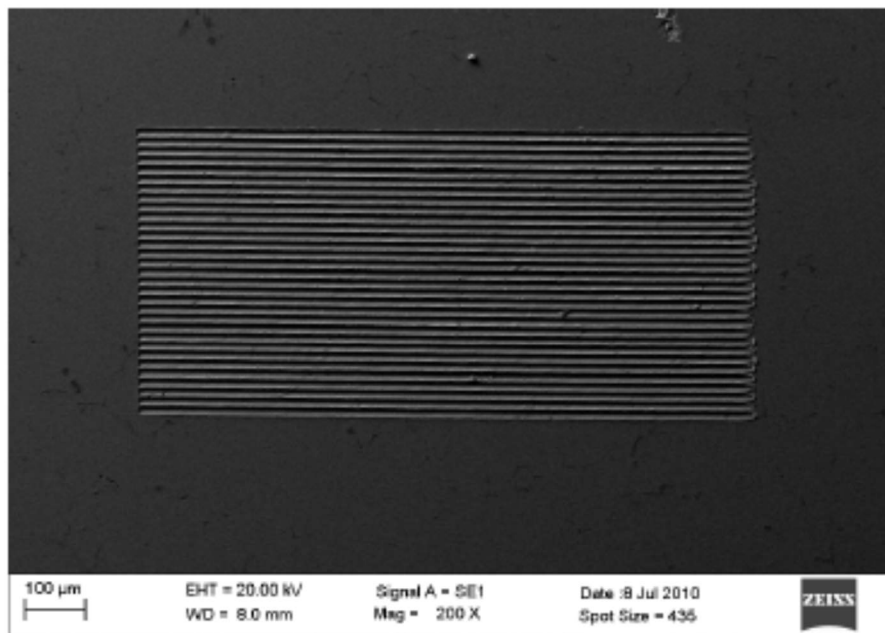


Figura 6.11 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 6,9 N. Aço rápido.

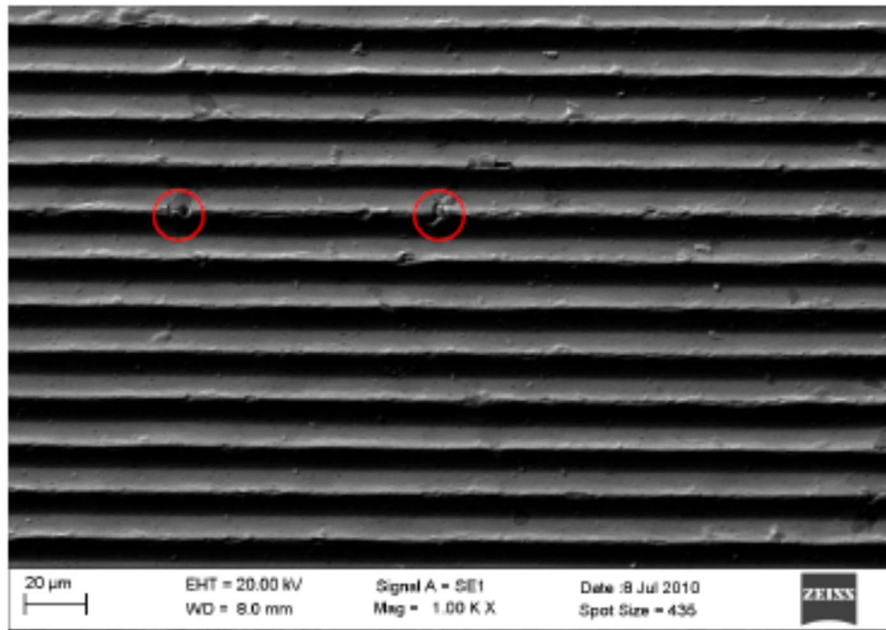


(a) F=2 N e 0% superposição.

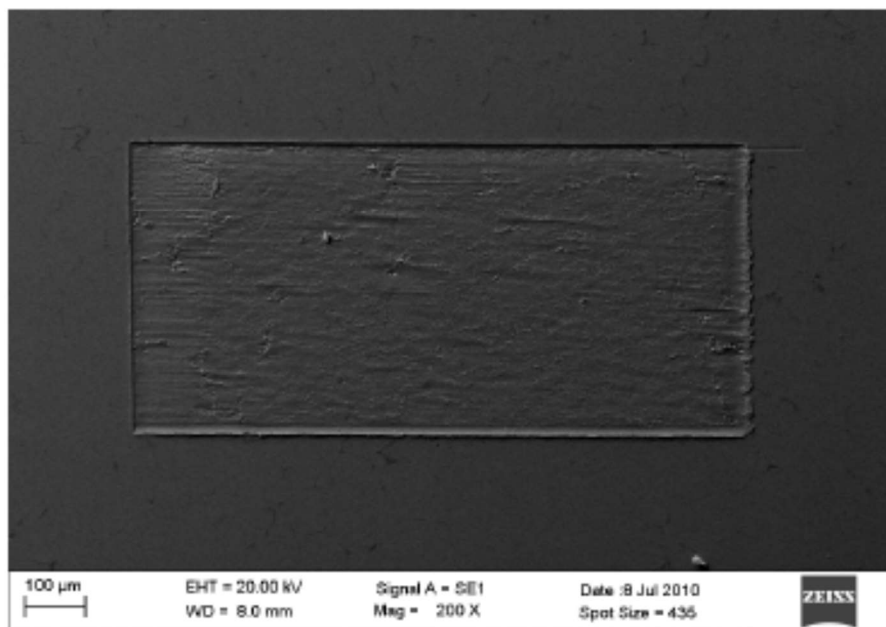
Figura 6.12 – Topografia da primeira bateria de testes. MEV. Continua.

Comparando os resultados obtidos nos testes realizados no aço rápido (Figura 6.11), com forças de 2 N; 3,9 e 6,9 N, observa-se que o desgaste ocorre em níveis menores de superposição à medida que a força aumenta. Para a força de 2 N acima de 95%, enquanto que, para as forças de 3,9 e 6 N verifica-se a ocorrência de desgaste para valores maiores e iguais a 80%. Isso revela a influência da força no

desgaste e mostra que quanto maior a força aplicada nos ensaios para o aço rápido, maior é a quantidade de material deformado e, por conseguinte, maior é a perda de material.



(b) F=2 N e 0% superposição.

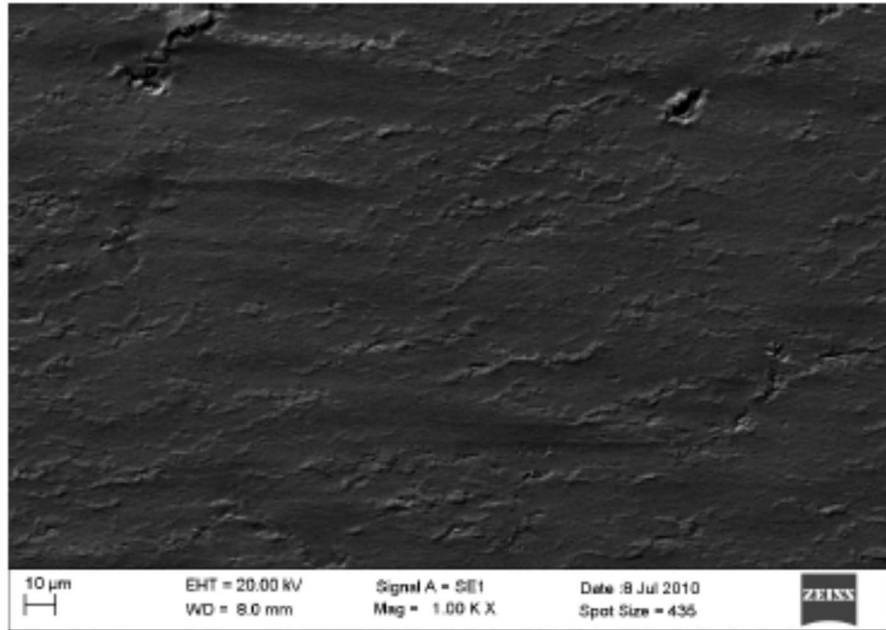


(c) F=2 N e 98% superposição

Figura 6.12 – Topografia da primeira bateria de testes. MEV. Continua.

A Figura 6.12 mostra as imagens da topografia do aço rápido para a força de 2 N e níveis de superposição de 0 e 95%. Na a primeira condição (Figura 6.12a,b) observa-se a formação de sulcos e regiões onde ocorreu o destacamento de

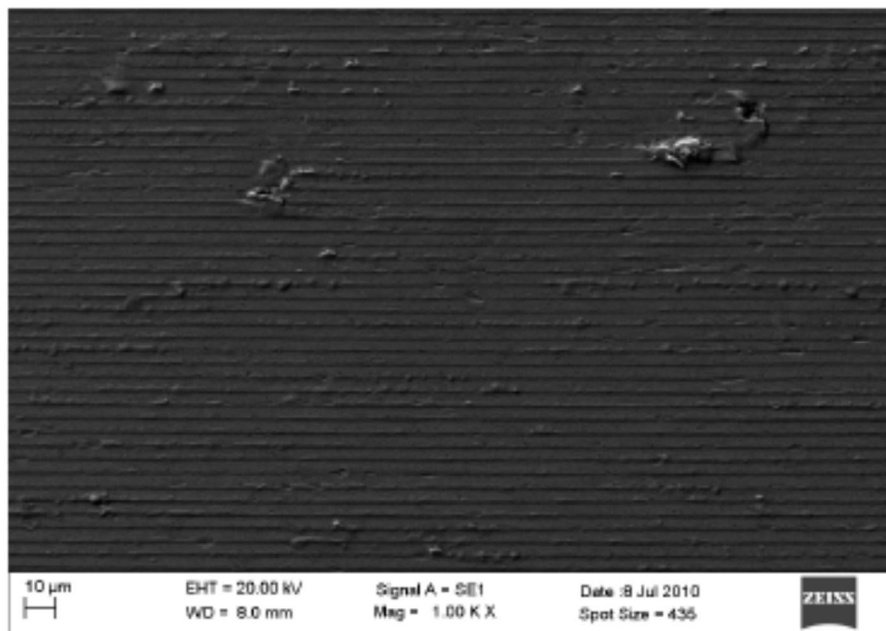
carbonetos (regiões circuladas). Na segunda (Figura 6.12c,d), a interface entre riscos foi suprimida e a área formada apresenta uma morfologia uniforme com pequenos vazios, o que indica a remoção de carbonetos.



(d) F=2 N e 98% superposição.

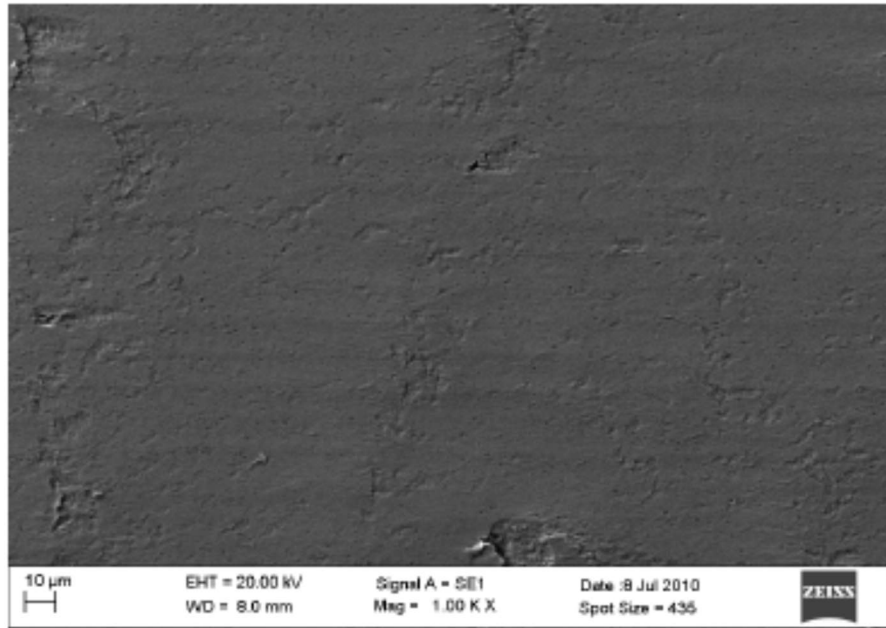
Figura 6.12 – Topografia da primeira bateria de testes. MEV.

A Figura 6.13 mostra as imagens dos testes com força igual a 3,9 N e níveis de superposição de 80 e 98% e força igual a 6,9 N e 98% de superposição.

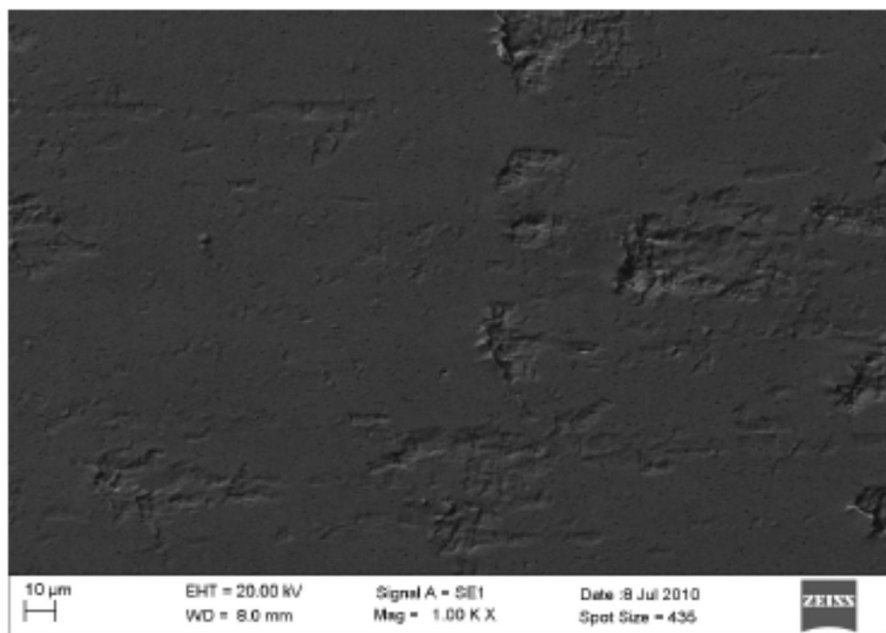


(a) F=3,9 N e 80% superposição

Figura 6.13 – Topografia da primeira bateria de testes. MEV. Continua.



(b) F=3,9 N e 98% de superposição



(c) F=6,9 N e 98% superposição.

Figura 6.13 – Topografia da primeira bateria de testes. MEV.

Observa-se nas imagens dos testes realizados no aço rápido que a morfologia da superfície apresenta-se uniforme à medida que o nível de superposição aumenta. Isso pode ser explicado pela diminuição do valor do Sq. A Figura 6.14 mostra essa tendência.

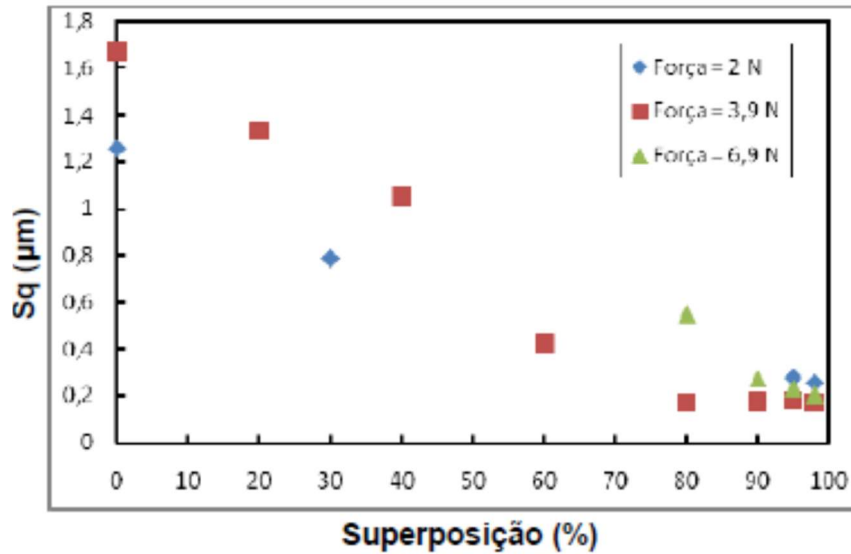


Figura 6.14 – Rugosidade superficial do aço rápido.

A segunda bateria de ensaios foi realizada na amostra de alumina. Os parâmetros de entrada foram: velocidade de 0,300 mm/s, comprimento da ranhura isolada de 2 mm, espaçamento entre ranhuras de 0,5 mm e força igual a 0,2; 0,5; 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 12 N.

Seguindo o mesmo procedimento adotado para o aço rápido, a amostra de alumina foi observada no microscópio óptico para a medição da largura dos eventos. O gráfico do deslizamento isolado pode ser visto na figura 6.15.

A mesma metodologia usada para o aço rápido foi repetida para a geração dos eventos superpostos na alumina. Os parâmetros de entrada para os primeiros eventos superpostos foram: comprimento do risco de 1 mm, lado da área de 0,5 mm, distância entre as áreas de 0,5 mm, velocidade de 0,300 mm/s, controle de superposição de 0, 10, 80, 95 e 98% para a força de 2,0 N e 0, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 e 98% para a força de 5,7 N.

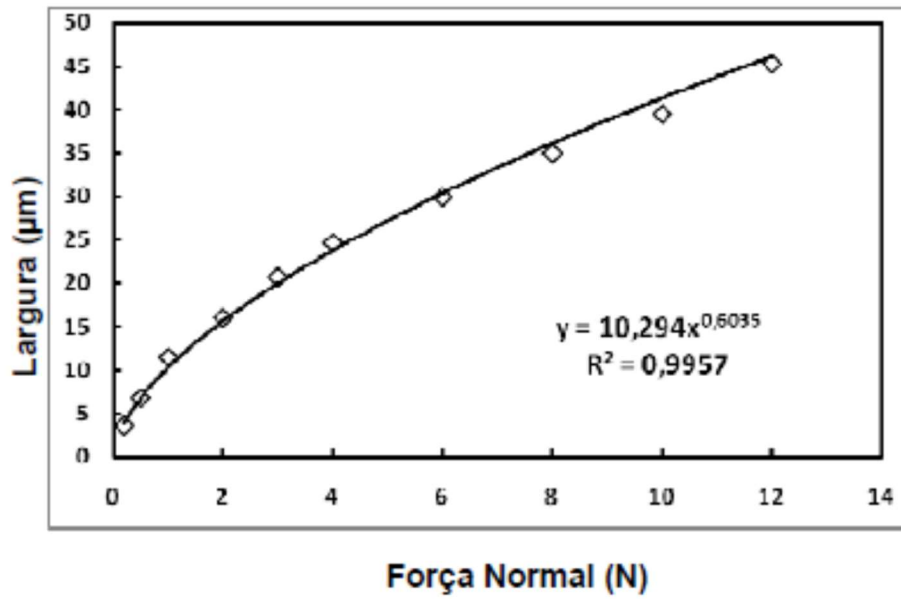


Figura 6.15 – Relação entre força normal e largura do deslizamento isolado. Alumina.

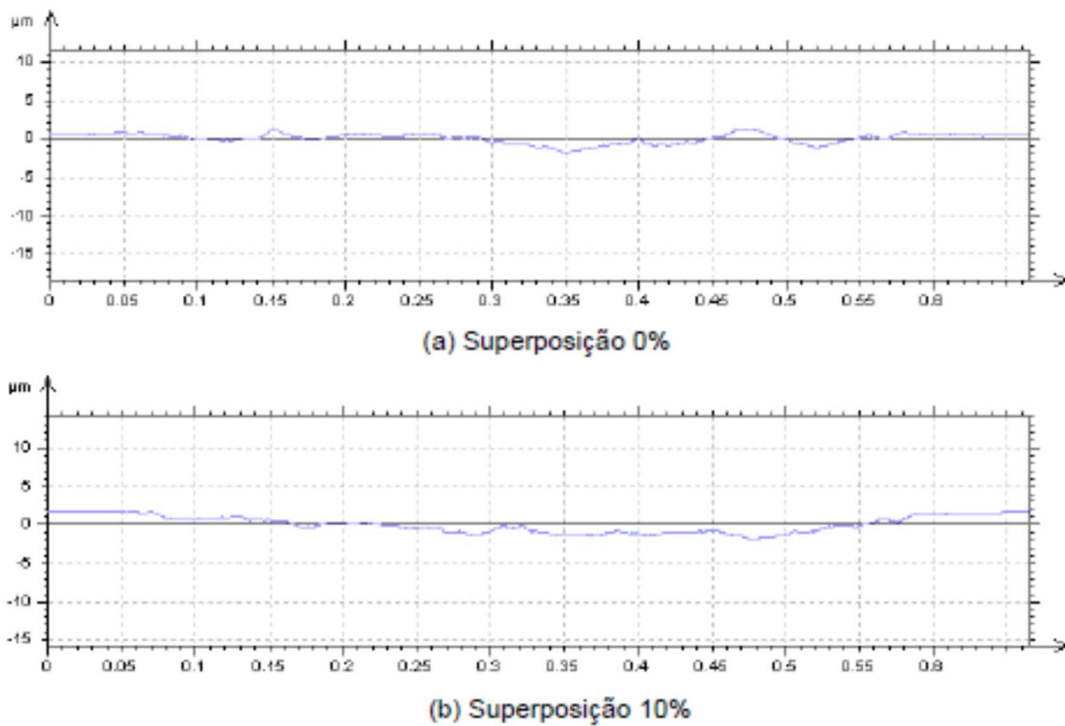
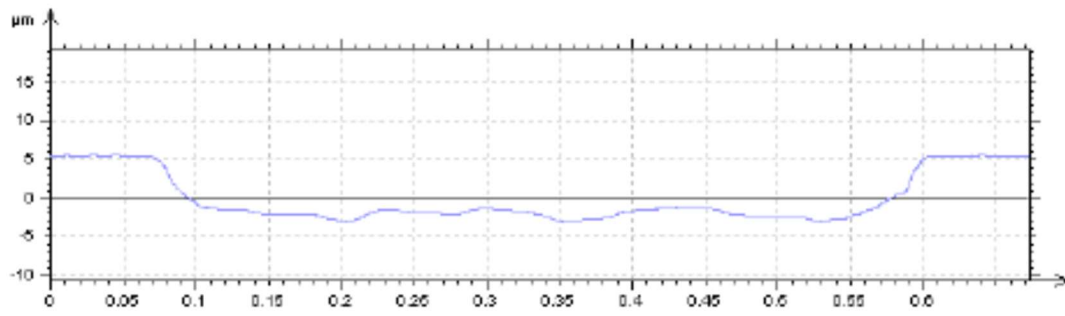
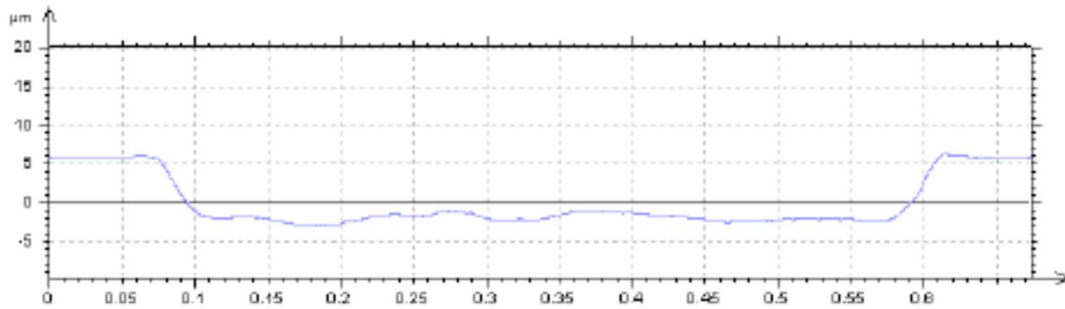


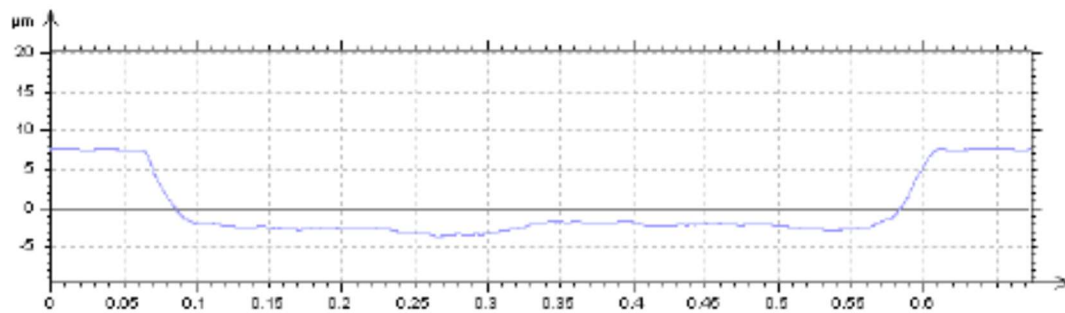
Figura 6.16 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Alumina; 2 N. Continua.



(a) Superposição 80%

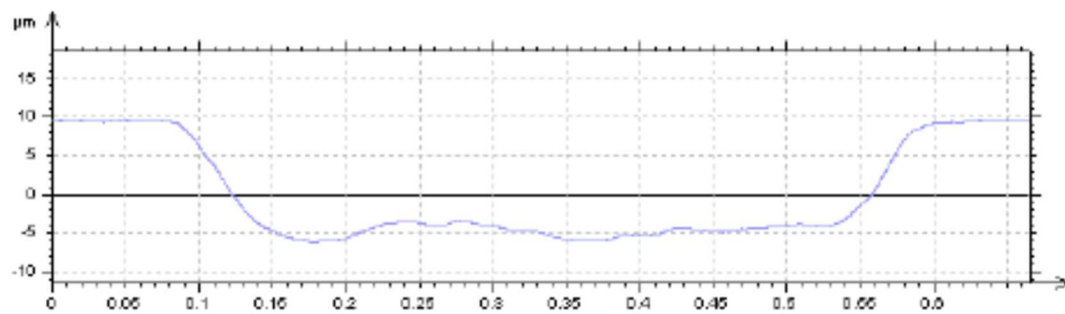


(c) Superposição 95%



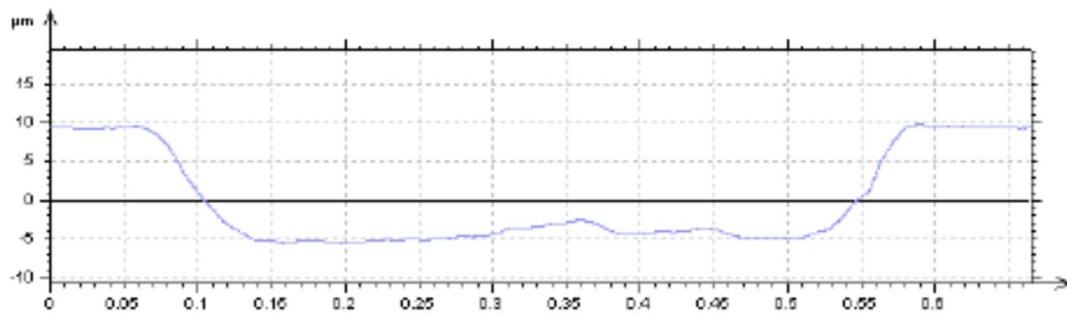
(d) Superposição 98%

Figura 6.16 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Alumina; 2 N.

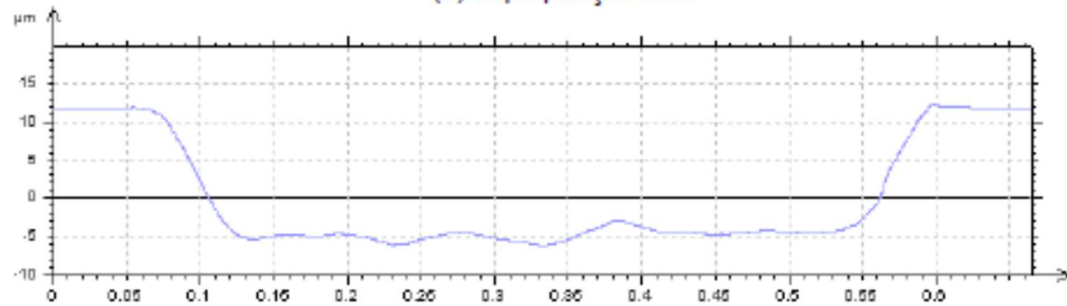


(a) Superposição 0%

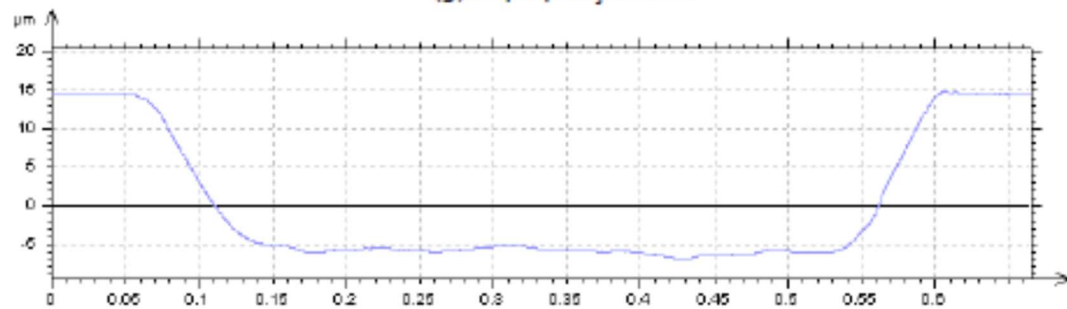
Figura 6.17 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Alumina; 5,7 N. Continua.



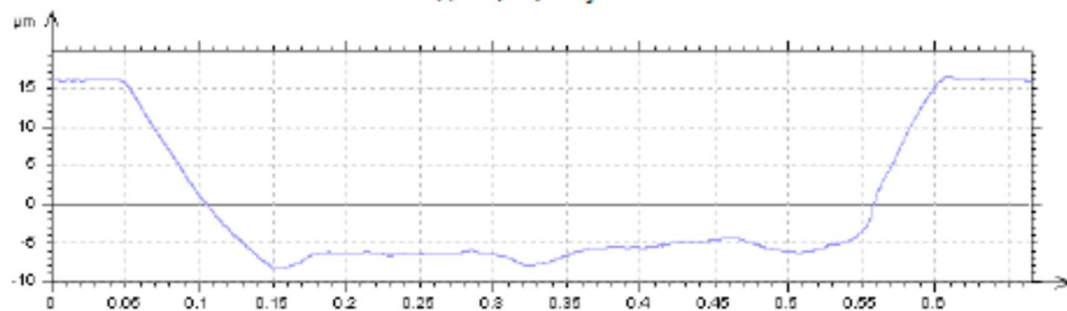
(b) Superposição 20%



(g) Superposição 80%



(i) Superposição 95%



(j) Superposição 98%

Figura 6.17 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. Alumina; 5,7 N.

Os perfis médios mostrados em cada gráfico das Figuras 6.16 e 6.17 representam o comportamento dos eventos em relação à largura e profundidade ao longo da área ensaiada. A profundidade média, e as áreas acima e abaixo da superfície da amostra foram calculadas para analisar a possibilidade da ocorrência de desgaste. Esses resultados são apresentados no gráfico das Figuras 6.18 e 6.19.

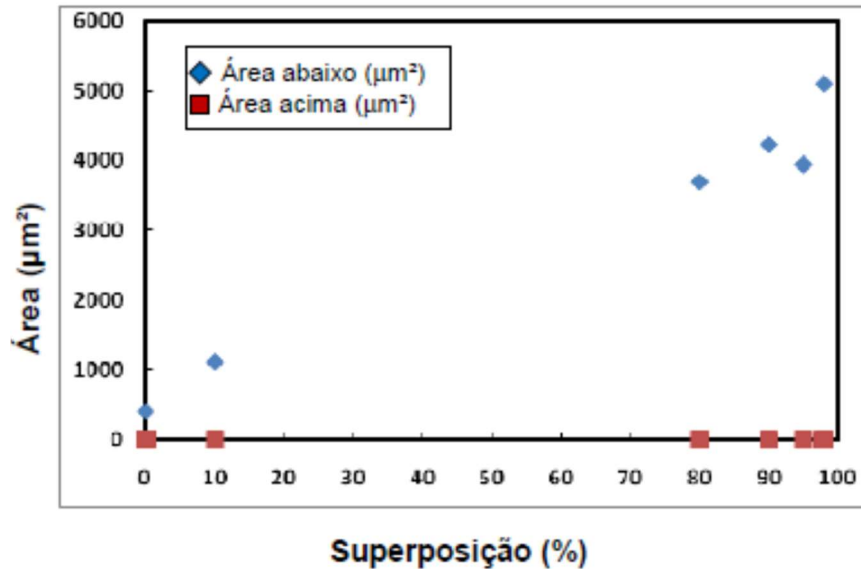


Figura 6.18 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 2,0 N.

As áreas abaixo da superfície aumentam à medida que o nível de superposição cresce. Conforme pode se analisado pelos dados da área acima da superfície, praticamente não há material deformado acima da superfície.

O mesmo se repete para os testes com força igual a 5,7 N. As áreas abaixo da superfície aumentam gradativamente e a áreas acima das superfícies permanecem constantes em seus valores.

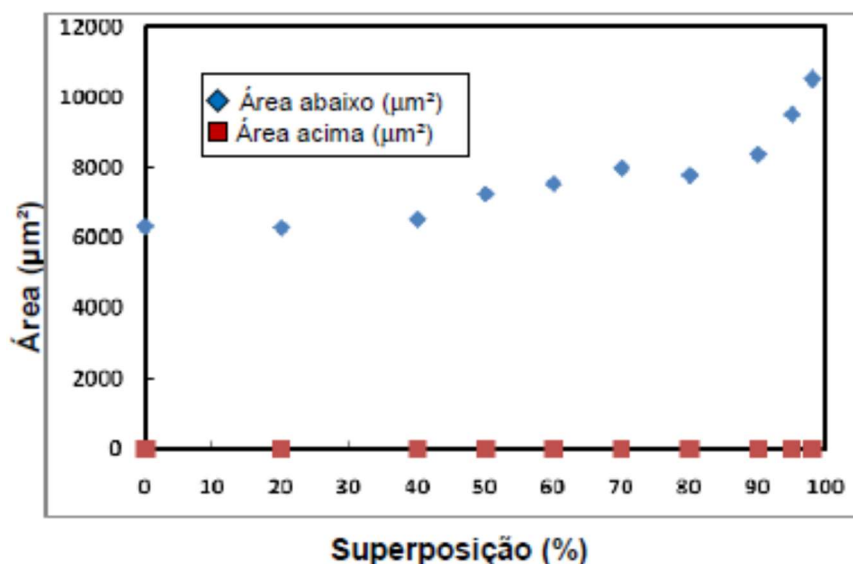


Figura 6.19 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 5,7 N.

Comparando os resultados obtidos nos testes realizados na alumina, com forças de 2 N e 5,7 N, observa-se, nas figuras 6.18 e 6.19, que o desgaste ocorre a partir de 0% de superposição para ambas as forças. Com o aumento da força, a perda de

matéria é intensificada atingindo valores muito elevados. As topografias da alumina, obtidas via interferometria a laser, estão apresentadas na Figura 6.20.

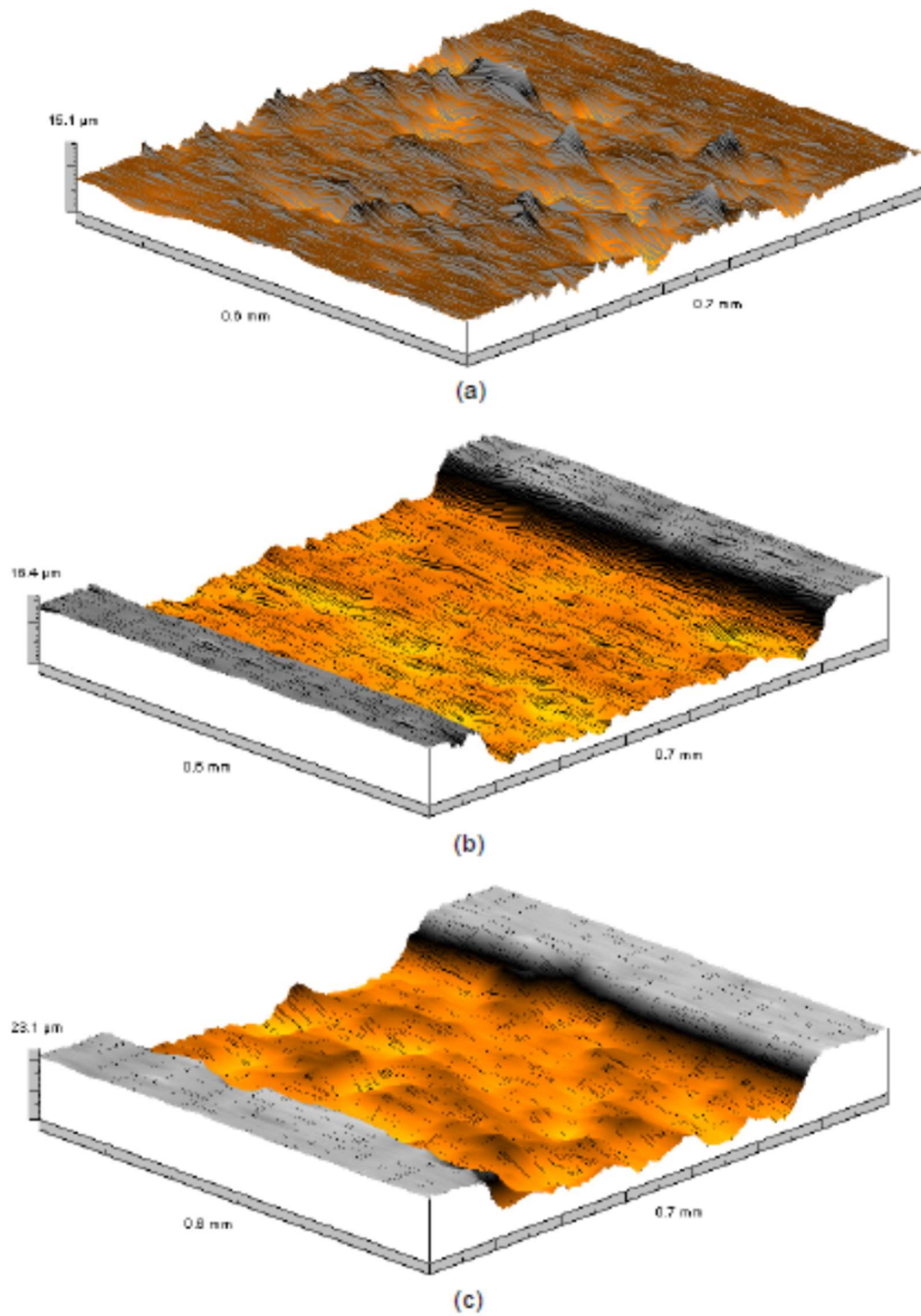


Figura 6.20 – Topografia da superfície desgastada da alumina. (a) $F=2$ N e 0% superposição; (b) $F=2$ N e 98% superposição; (c) $F=5,7$ N e 0% superposição; (d) $F=5,7$ N e 98% superposição. Continua.

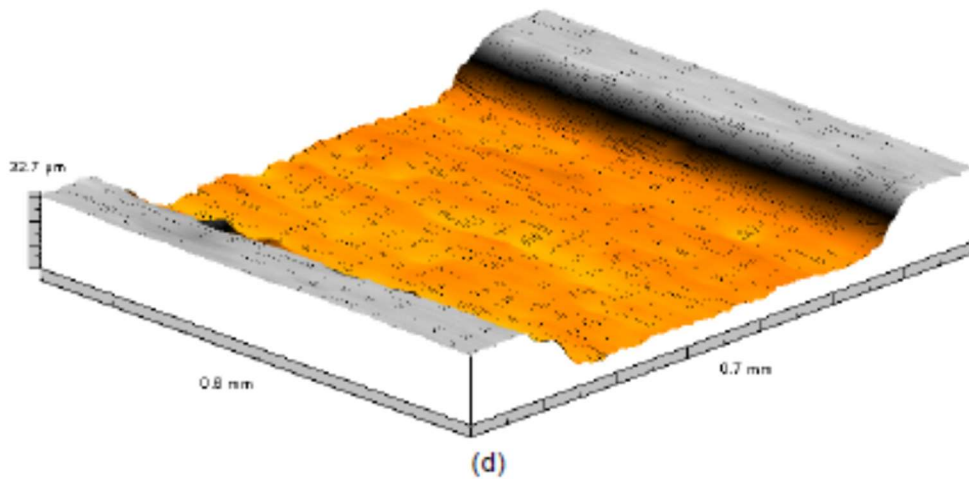
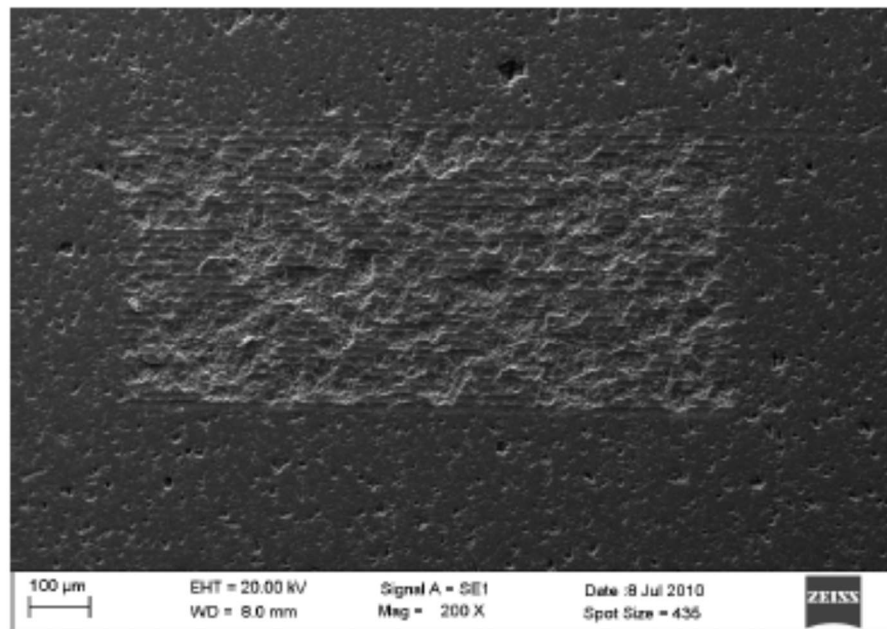


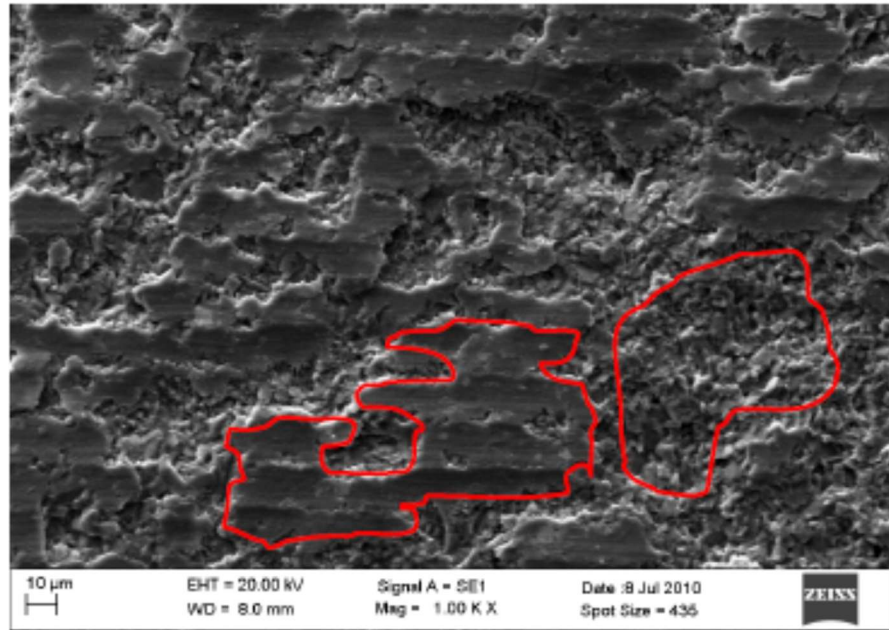
Figura 6.20 – Topografia da superfície desgastada da alumina. (a) $F=2$ N e 0% superposição; (b) $F=2$ N e 98% superposição; (c) $F=5,7$ N e 0% superposição; (d) $F=5,7$ N e 98% superposição.

A Figura 6.21 apresenta as imagens da topografia da superfície da alumina, com área de $0,5$ mm x 1 mm, referente aos testes com forças de 2 N e $5,7$ N associadas com 0% e 98% de superposição em ambas.

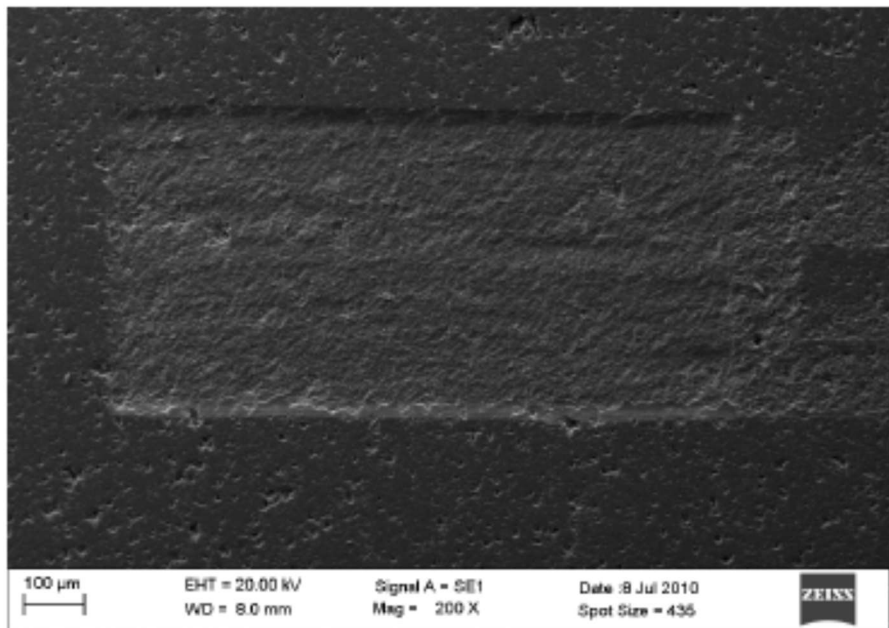


(a) $F=2$ N e 0% superposição

Figura 6.21 – Topografia da segunda bateria de testes. MEV. Continua.



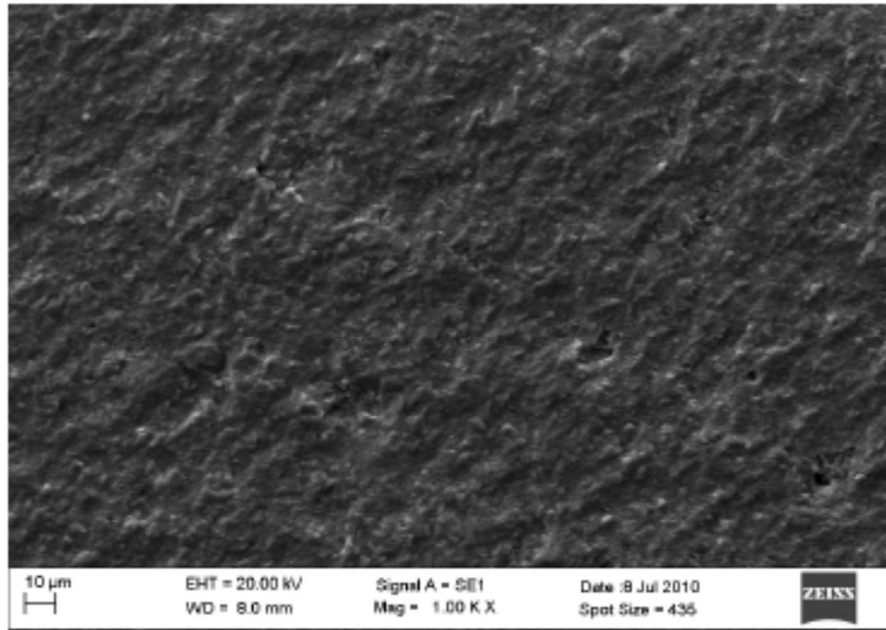
(b) F=2 N e 0% superposição.



(c) F=2 N e 98% superposição

Figura 6.21 – Topografia da segunda bateria de testes. MEV. Continua.

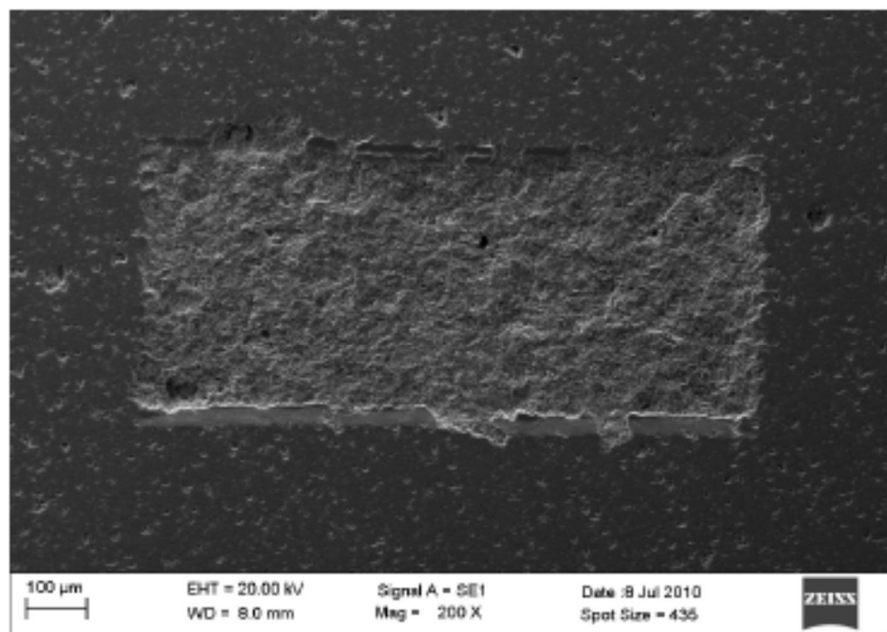
As regiões delimitadas na Figura 6.21(b) distinguem as áreas onde ocorreram fraturas frágeis e, possivelmente, deformação plástica. A área que apresenta uma seção aparentemente lisa é a região onde ocorreu a deformação plástica e a área que expõe pequenos grãos é a região que sofreu fratura.



(d) F=2 N e 98% superposição.

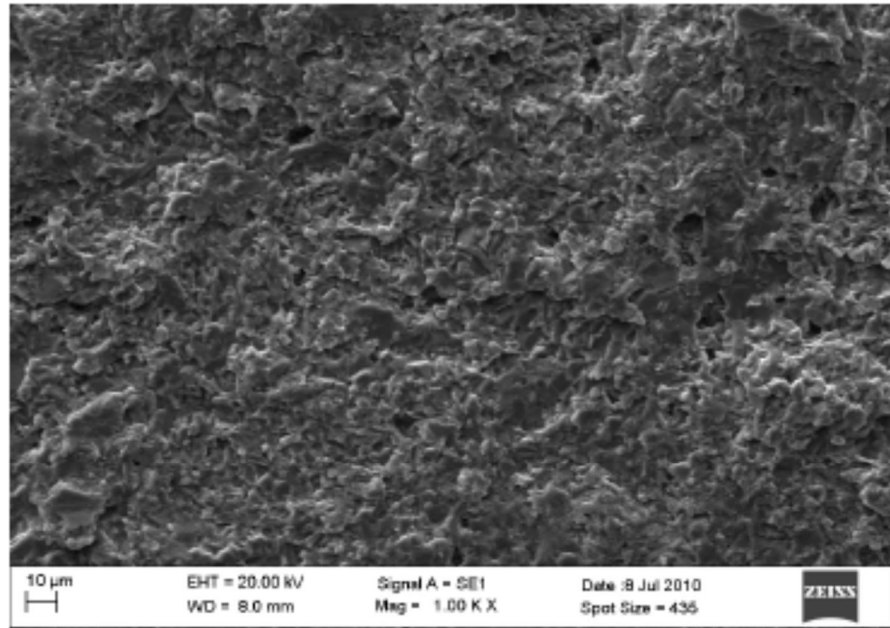
Figura 6.21 – Topografia da segunda bateria de testes. MEV

Diferentemente da morfologia da Figura 6.21(b), a Figura 6.21(d) mostra poucas áreas que contêm vestígios de deformação plástica. Isso pode ser explicado pelo aumento do nível de superposição.

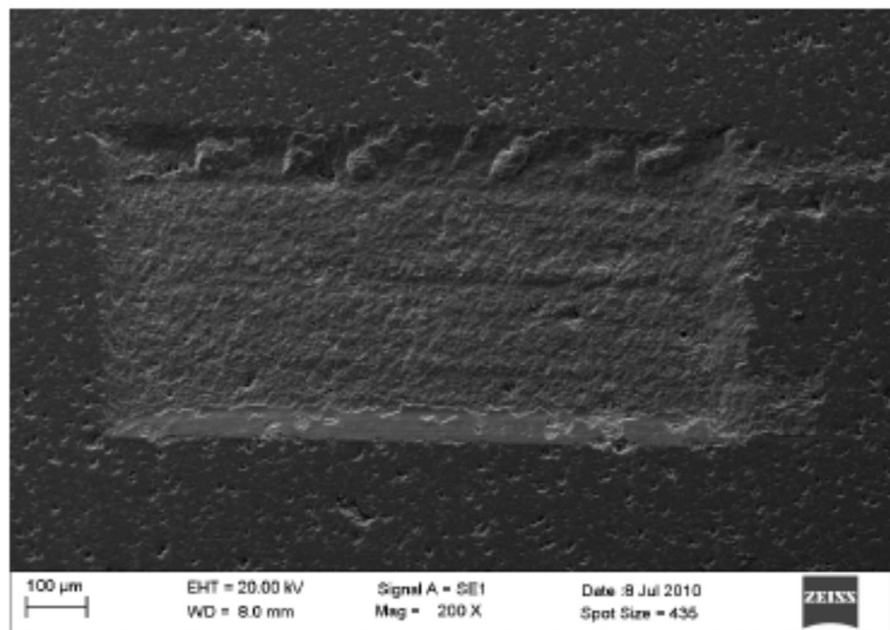


(a) F=5,7 N e 0% superposição

Figura 6.22 – Topografia da segunda bateria de testes. MEV. Continua.



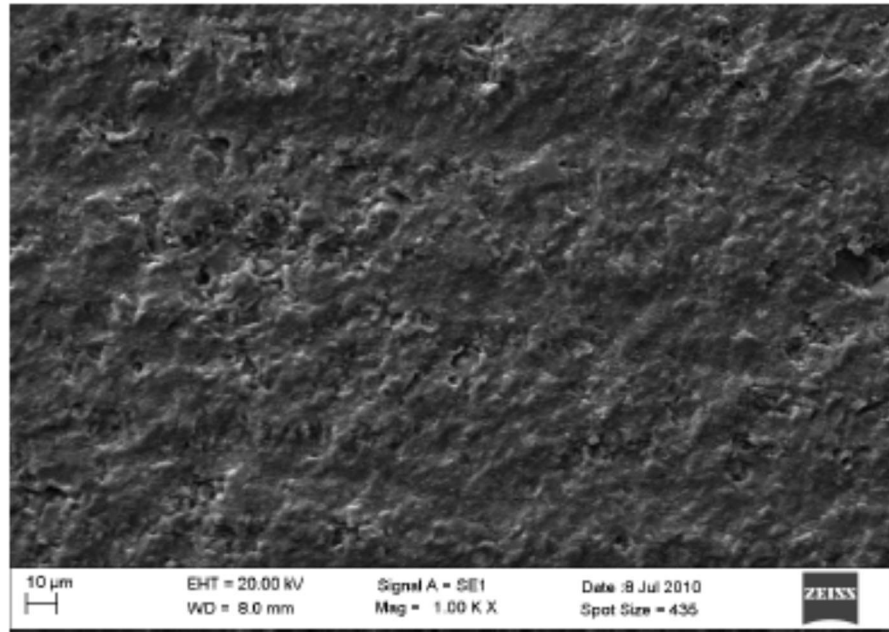
(b) F=5,7 N e 0% superposição.



(c) F=5,7 N e 98% superposição

Figura 6.22 – Topografia da segunda bateria de testes. MEV. Continua.

O teste com força igual a 5,7 N e superposição de 98%, apresentado na Figura 6.22 (d), mostra a região de desgaste mais uniforme, morfologicamente, do que a região apresentada na Figura 6.22 (b), para força igual a 5,7 N e superposição de 0%. Ambas as regiões, praticamente não possuem regiões deformadas plasticamente.



(d) $F=5,7\text{ N}$ e 98% superposição.

Figura 6.22 – Topografia da segunda bateria de testes. MEV.

Comparando as Figuras 6.21(b) e (d) e 6.22(b) e (d) percebe-se que a morfologia da superfície tende a apresentar-se mais homogênea à medida que o nível de superposição aumenta para qualquer valor de força aplicado. Essa conclusão é comprovada pelo gráfico da Figura 6.23, onde o valor do S_q de cada região desgastada tende a diminuir à medida que o nível de superposição aumenta de acordo com as forças aplicadas nos testes.

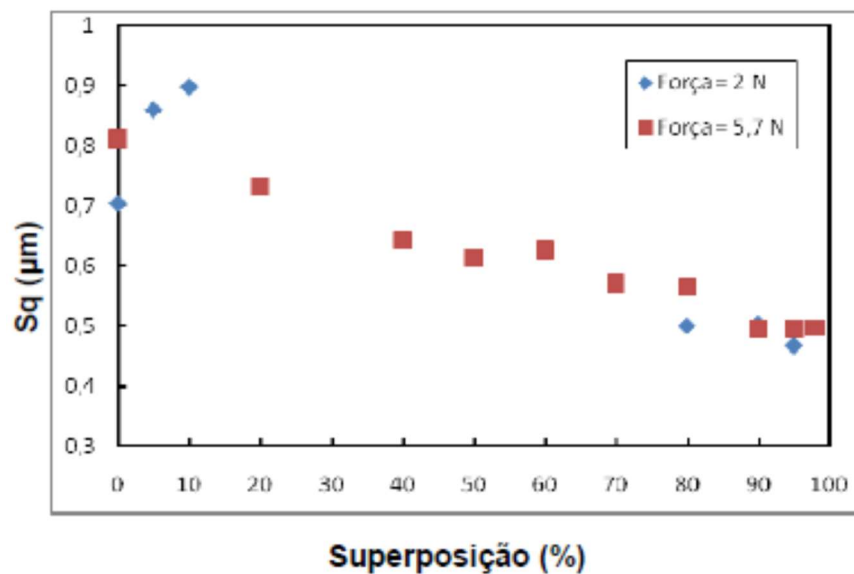


Figura 6.23 – Rugosidade superficial da alumina.

A terceira bateria de ensaios foi realizada na amostra de WC. Os parâmetros de entrada foram: velocidade de 0,300 mm/s, comprimento da ranhura isolada de 2 mm, espaçamento entre ranhuras de 0,5 mm e força igual a 0,2; 0,5; 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 11 N.

Seguindo o mesmo procedimento adotado para o aço rápido e a alumina, a amostra de WC foi observada no microscópio ótico para a medição da largura dos eventos. A Figura 6.24 apresenta o gráfico do deslizamento isolado.

Para a geração dos eventos superpostos no WC os parâmetros de entrada para os primeiros eventos superpostos foram: comprimento do risco de 1 mm, lado da área de 0,5 mm, distância entre as áreas de 0,5 mm, velocidade de 0,300 mm/s, controle de superposição de 0, 10, 20, e 98% para a força de 2,0 N e 0, 10, 20, 30 e 98% para a força de 6 N.

As Figuras 6.25 e 6.26 mostram o perfil médio do WC para cada área dos ensaios de superposição de deslizamentos paralelos para as forças de 2,0 e 6 N.

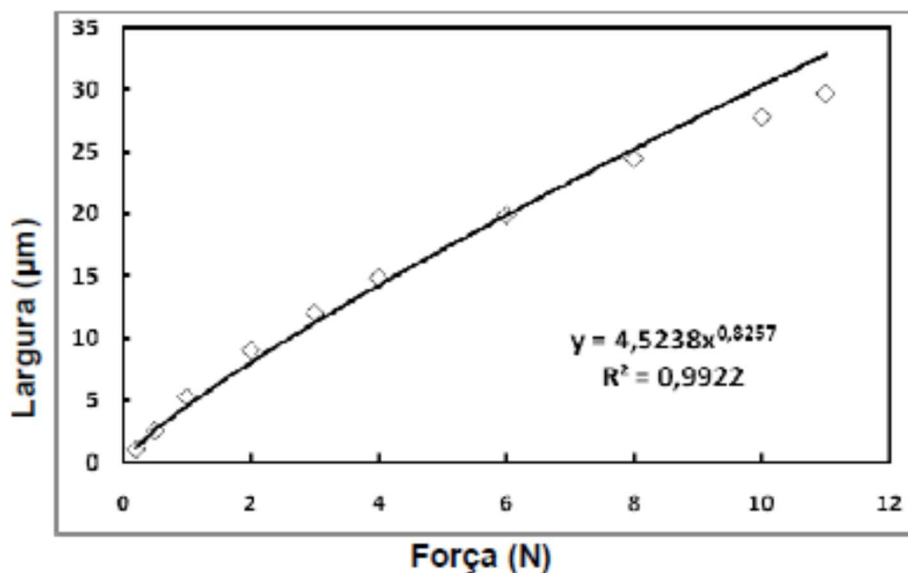
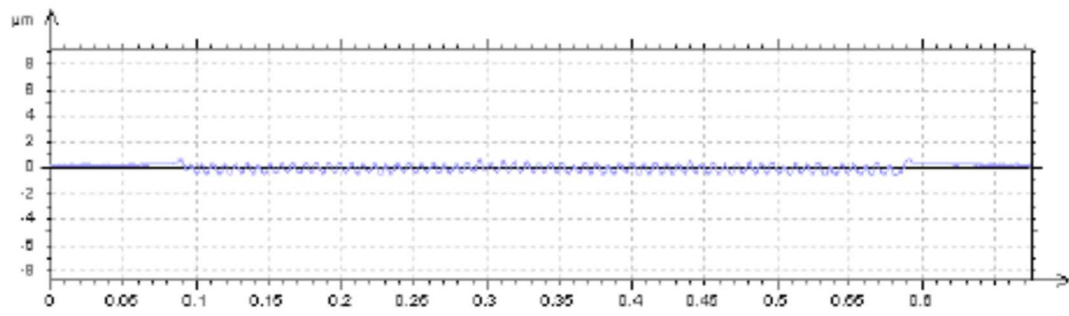
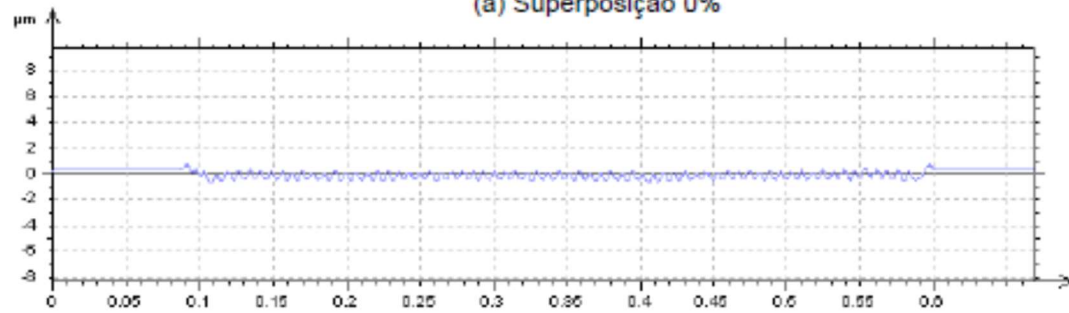


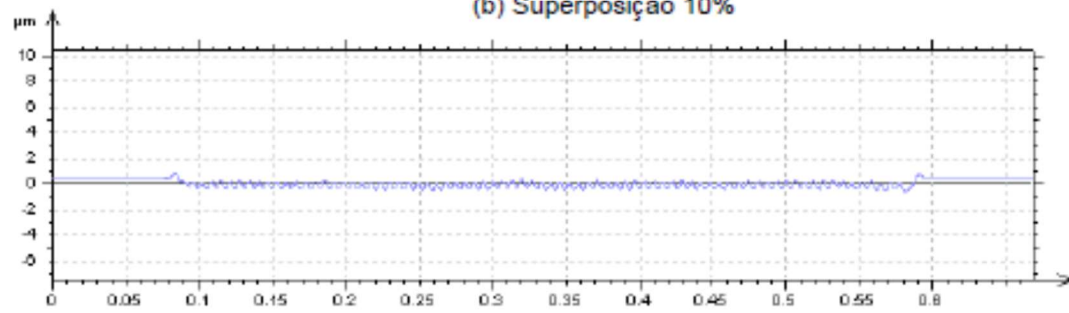
Figura 6.24 – Relação entre força normal e largura do deslizamento isolado. WC.



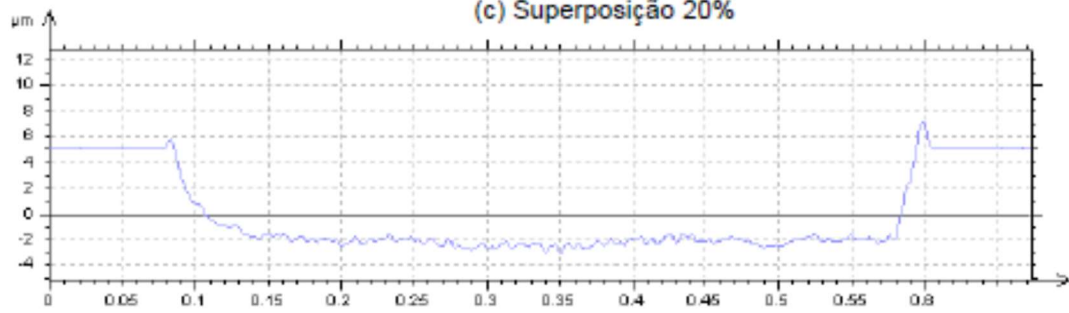
(a) Superposição 0%



(b) Superposição 10%

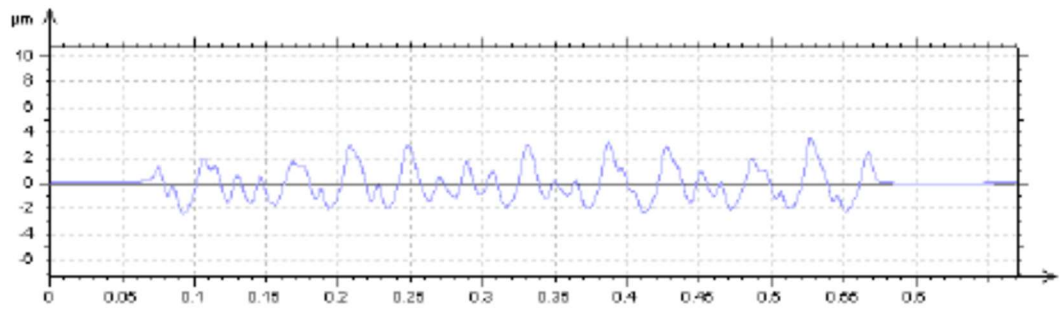


(c) Superposição 20%

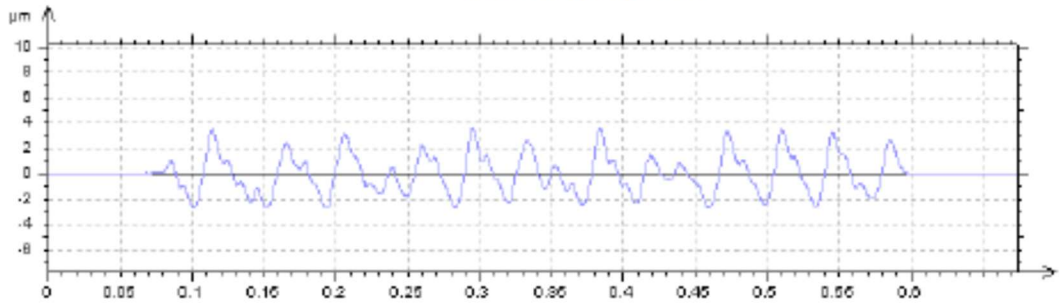


(d) Superposição 98%

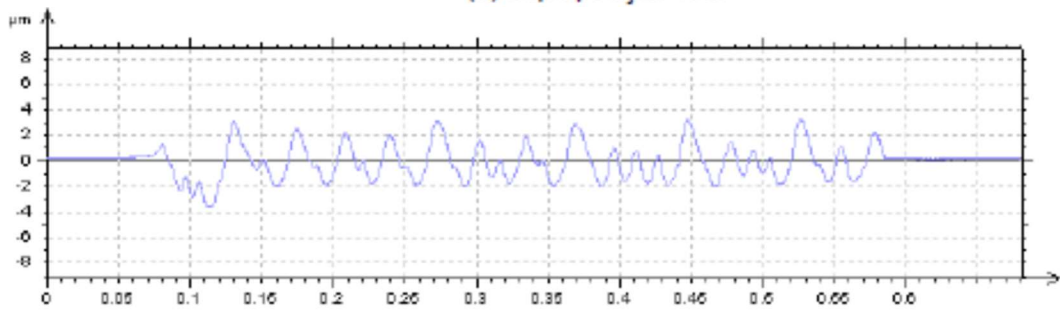
Figura 6.25 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. WC; 2 N.



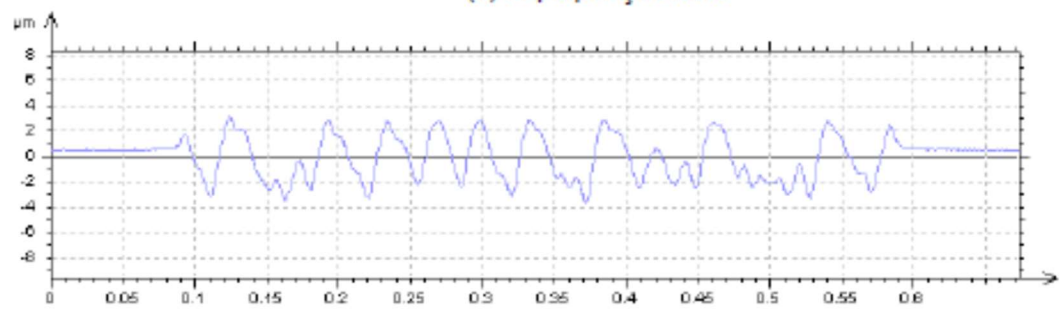
(a) Superposição 0%



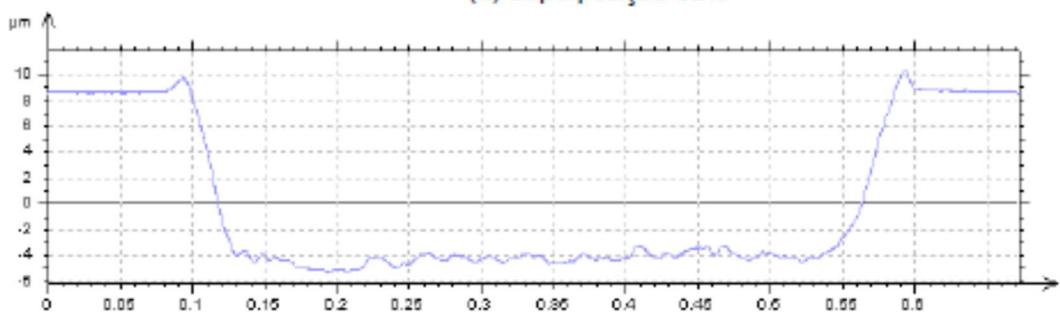
(b) Superposição 10%



(c) Superposição 20%



(d) Superposição 30%



(e) Superposição 98%

Figura 6.26 – Superposição de deslizamentos paralelos, perfis médios. IL. WC; 6 N.

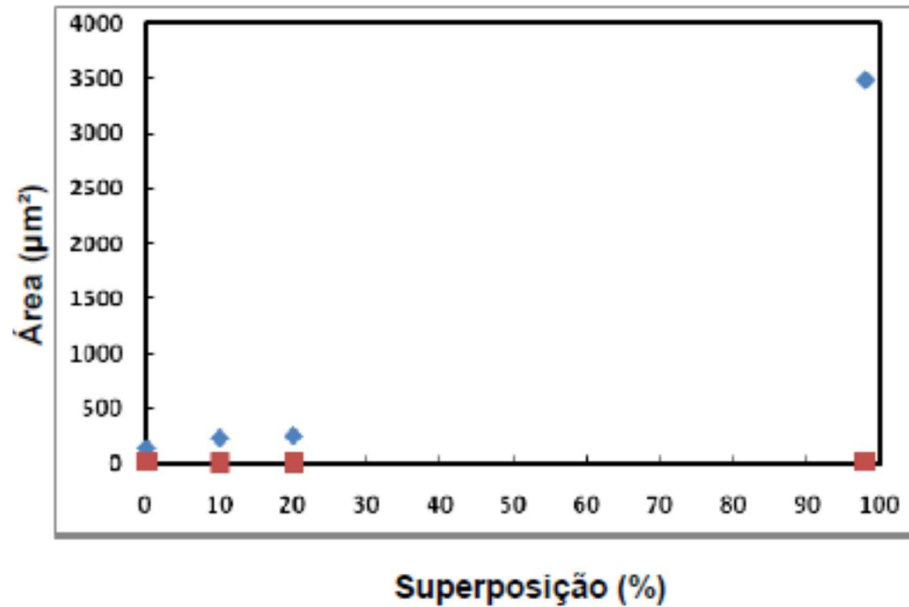


Figura 6.27 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 2 N.

De acordo com o gráfico da Figura 6.27 observa-se a ocorrência de desgaste a partir de 0% de superposição para a força de 2 N e próximo a 100% de superposição uma grande quantidade de material removido. Para o teste realizado com força de 6 N o desgaste é observado a partir de 20% de superposição (Figura 6.28). Em princípio, esses resultados parecem apresentar uma inconsistência referente ao valor de força utilizado com o nível de desgaste obtido, pois com a menor força observa-se a ocorrência de desgaste em níveis de superposição mais baixos quando comparada com a maior força.

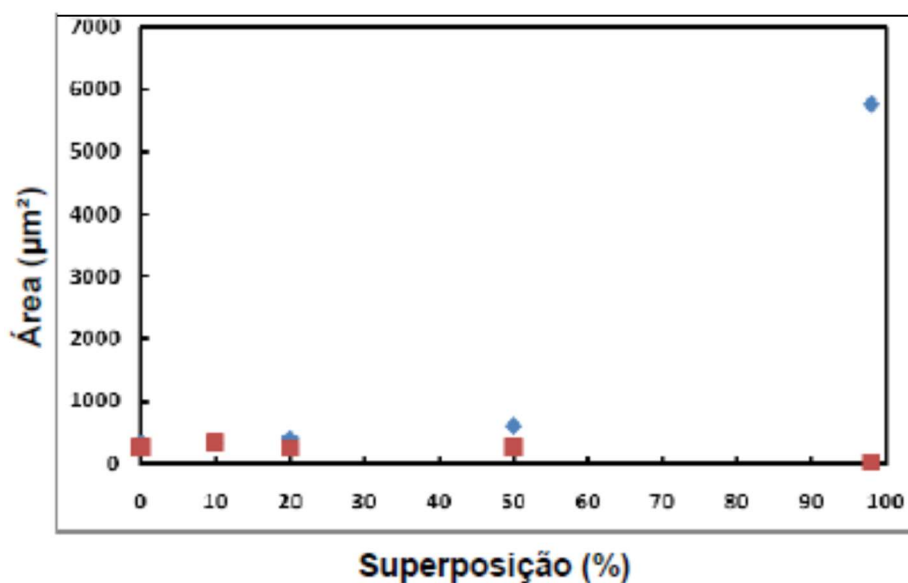


Figura 6.28 – Superposição de deslizamentos paralelos. Força Normal 6 N.

As topografias do WC, obtidas via interferometria a laser, estão apresentadas na Figura 6.29.

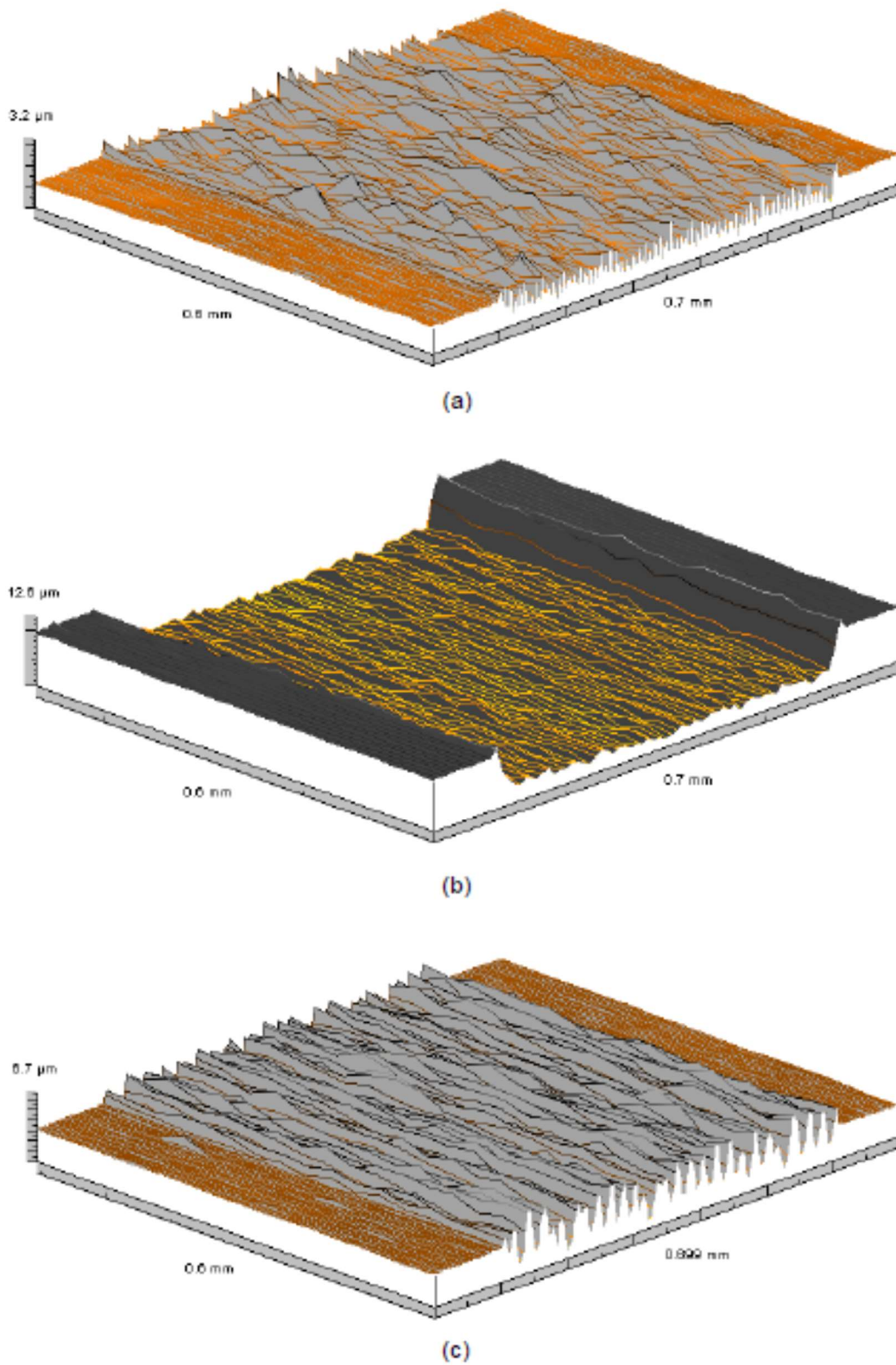


Figura 6.29 – Topografia da superfície desgastada do WC. (a) $F=2 \text{ N}$ e 0% superposição; (b) $F=2 \text{ N}$ e 98% superposição; (c) $F=6 \text{ N}$ e 0% superposição; (d) $F=6 \text{ N}$ e 98% superposição. Continua.

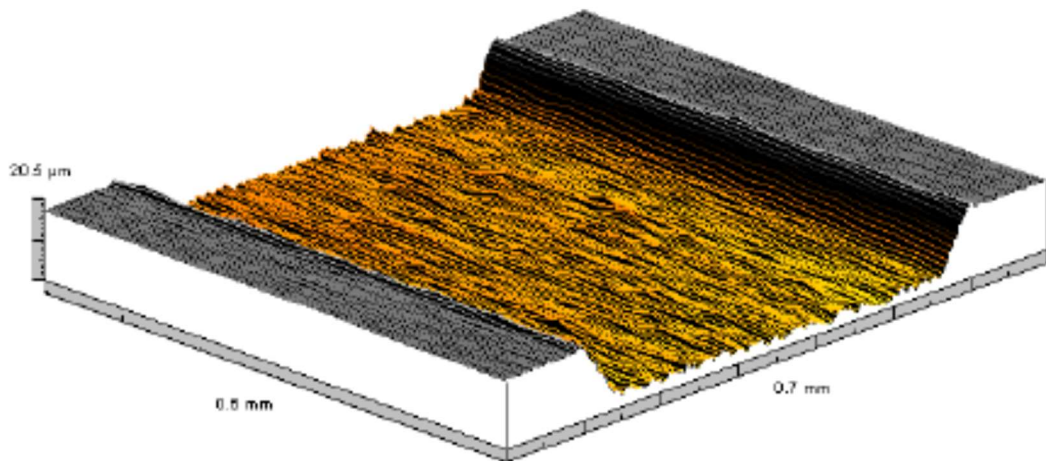
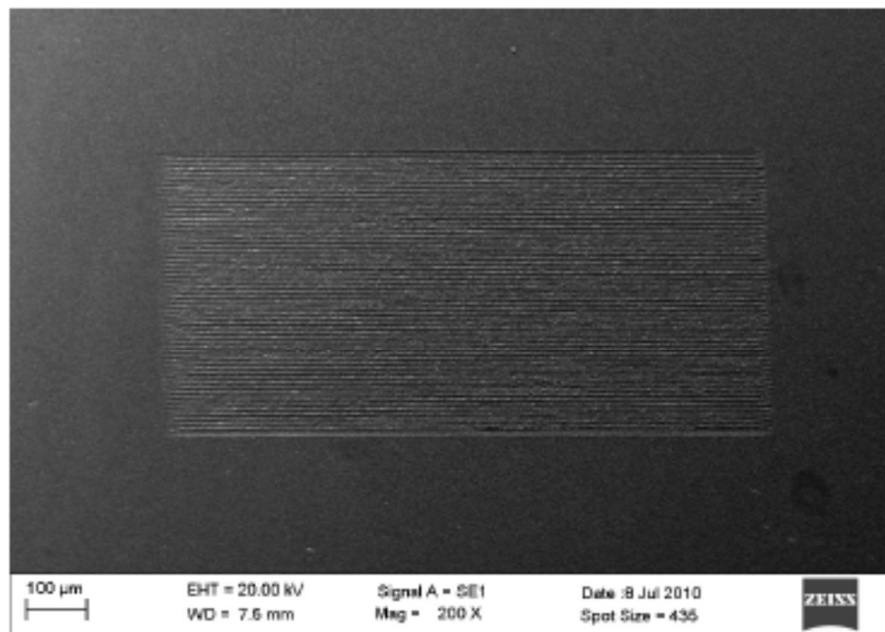


Figura 6.29 – Topografia da superfície desgastada do WC. (a) F=2 N e 0% superposição; (b) F=2 N e 98% superposição; (c) F=6 N e 0% superposição; (d) F=6 N e 98% superposição.

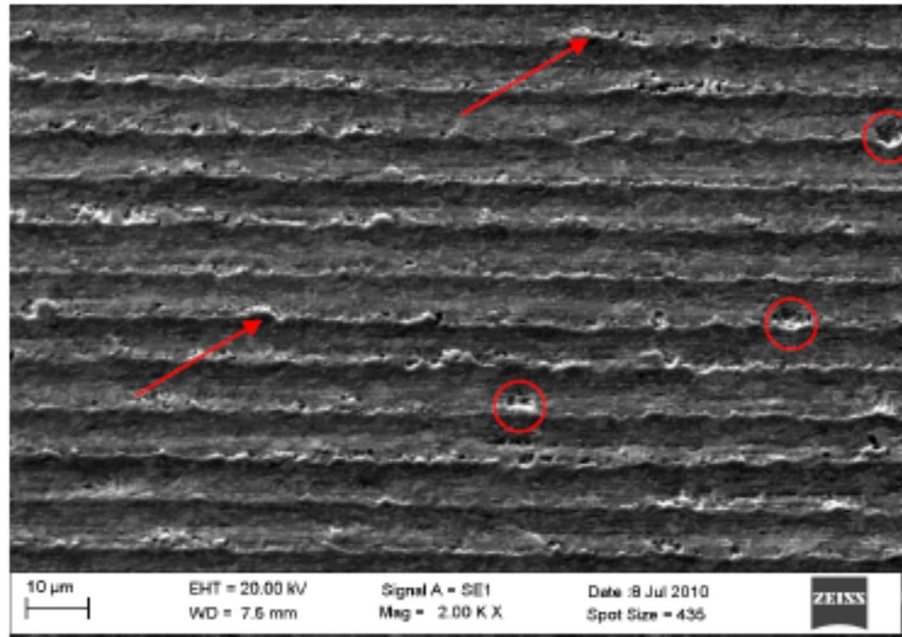
As imagens da topografia do WC (Figuras 6.30 e 6.31) mostram a morfologia da superfície após a execução dos testes de desgaste.



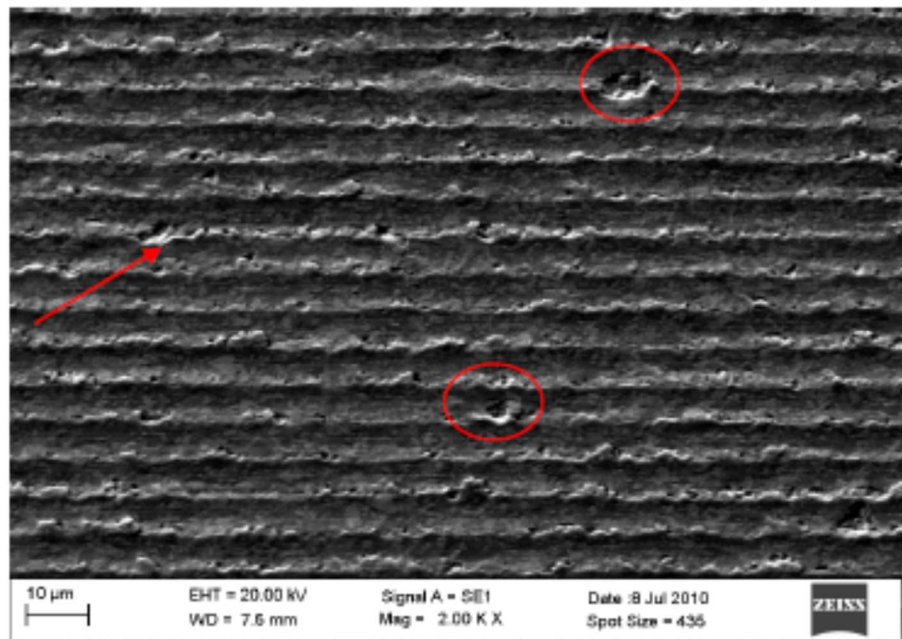
(a) F=2 N e 0% superposição.

Figura 6.30 – Topografia da terceira bateria de testes. MEV. Continua.

Na Figura 6.30b é possível observar as ranhuras formadas, pouca deformação plástica e pequenos espaços vazios, oriundos de remoção de carbonetos e perda de material. Com o aumento do nível de superposição ambos, deformação plástica e formação de espaços vazios, ocorrem em maiores quantidades (Figura 6.30c) A cor mais clara (seta), na interseção das laterais das ranhuras, refere-se à deformação plástica e as marcações circulares aos espaços vazios (Figura 6.30b, c).

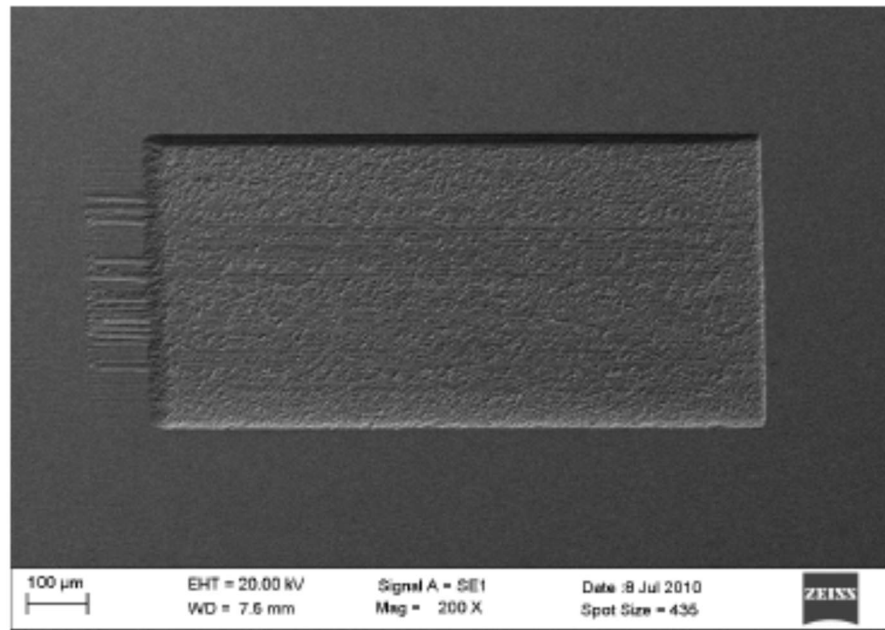


(b) F=2 N e 0% superposição.

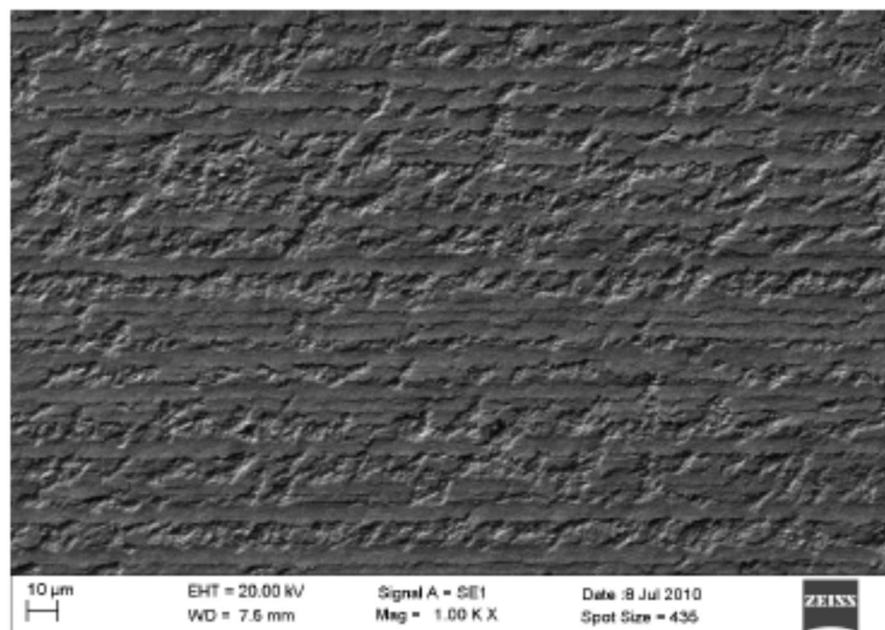


(c) F=2 N e 20% superposição.

Figura 6.30 – Topografia da terceira bateria de testes. MEV. Continua.



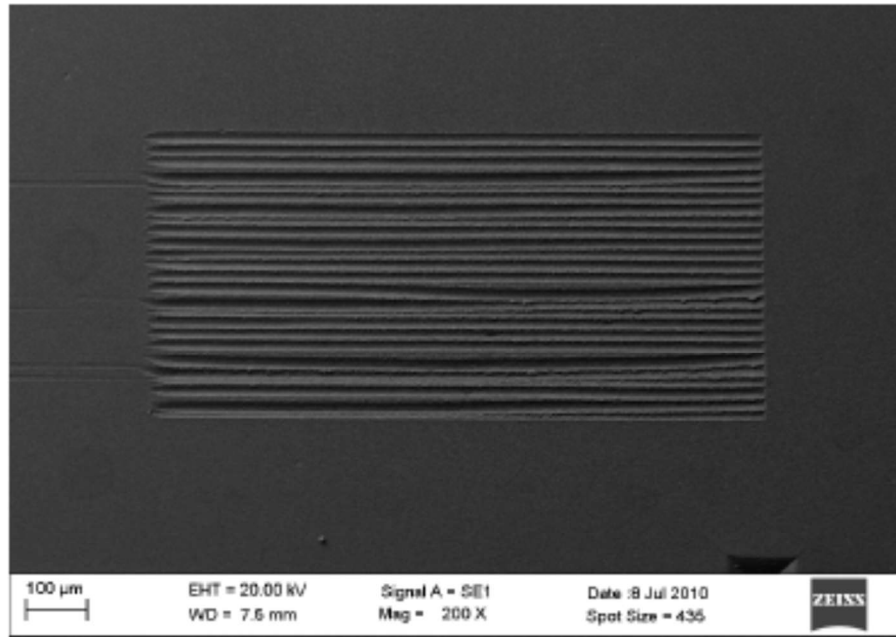
(d) F=2 N e 98% superposição.



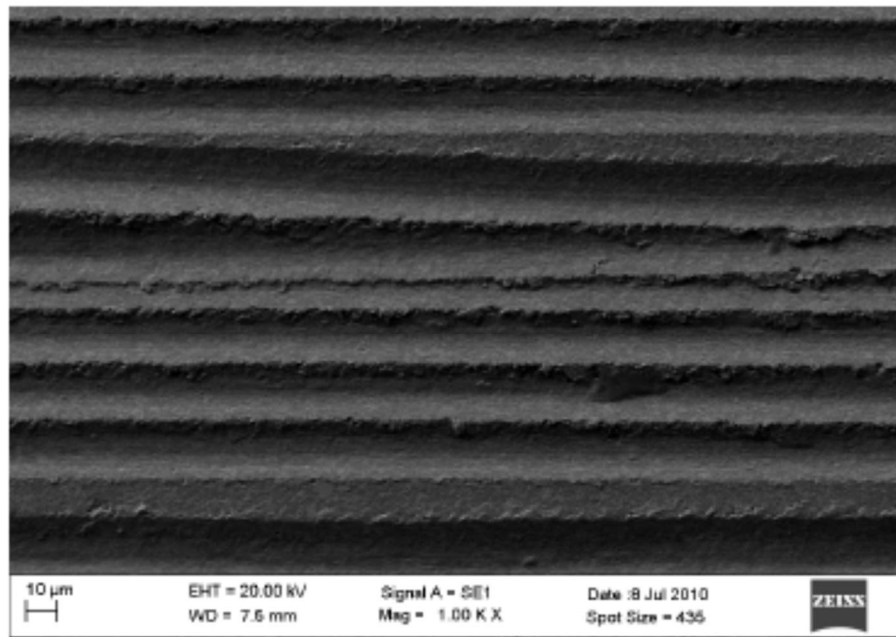
(e) F=2 N e 98% superposição.

Figura 6.30 – Topografia da terceira bateria de testes. MEV.

Na condição de força igual a 2 N e 98% de superposição, a topografia apresenta-se com regiões mistas de deformação plástica e fratura frágil.



(a) F=6 N e 0% superposição.



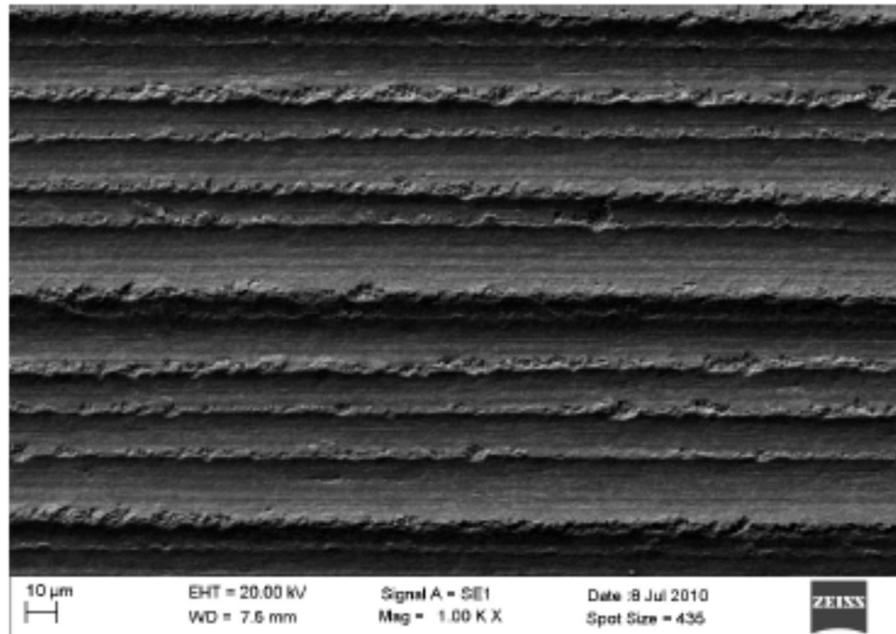
(b) F=6 N e 0% superposição.

Figura 6.31 – Topografia da terceira bateria de testes. MEV. Continua.

Analisando a Figura 6.31b observa-se que a largura da ranhura é maior do que a largura da ranhura formada na Figura 6.30b. Isso é decorrente da magnitude da força nessa condição ser maior.

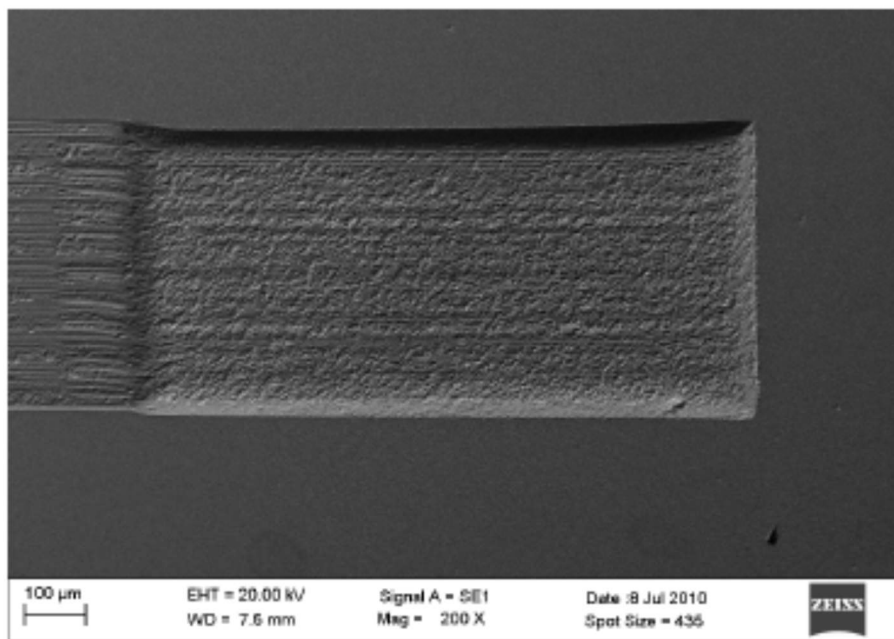
Uma análise sobre as imagens nas Figuras 6.30b e 6.31b indica que para o ensaio com força de 6 N não houve desgaste, enquanto que para a força de 2 N houve remoção de material. Os gráficos das Figuras 6.27 e 6.28 mostram que as áreas

acima e abaixo da superfície para ambos os ensaios estão de acordo com a última análise.



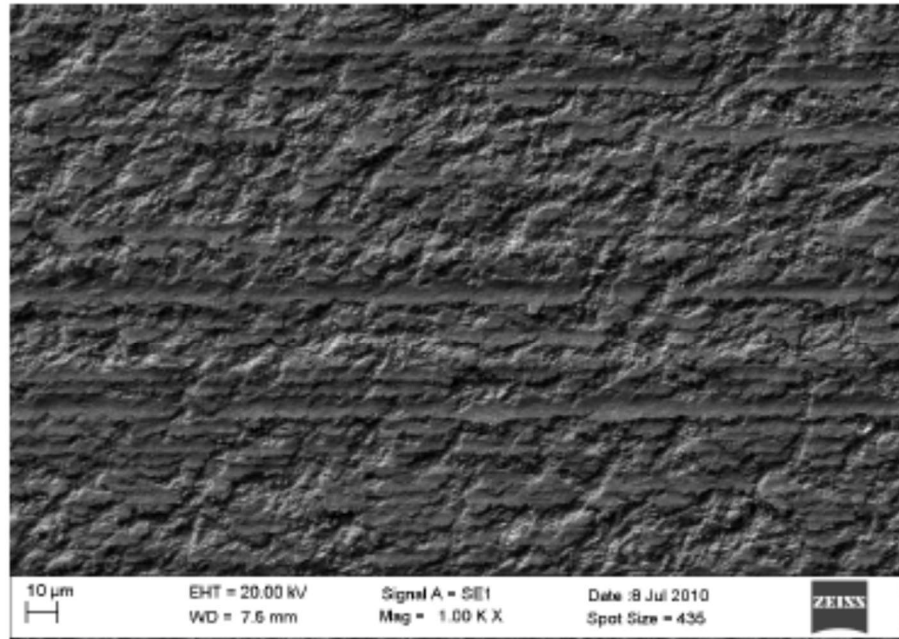
(c) F=6 N e 20% superposição.

Com o aumento do nível de superposição para 20% o ensaio com a força de 6 N provoca o aparecimento de inúmeros espaços vazios, e desse modo, ocorre desgaste. Esse resultado está de acordo com o gráfico da Figura 6.28, que mostra essa condição como o princípio para a geração de desgaste.



(d) F=6 N e 98% superposição.

Figura 6.31 – Topografia da terceira bateria de testes. MEV. Continua.



(e) F=6 N e 98% superposição.

Figura 6.31 – Topografia da terceira bateria de testes. MEV.

Comparando as imagens 6.30(e) e 6.31(e) verifica-se que há um predomínio da região que sofreu fratura frágil na área desgastada para o ensaio com força de 6N.

O gráfico da Figura 6.32 mostra a tendência da superfície desgastada atingir um valor de S_q menor à medida que o nível de superposição aumenta. No caso da força de 2 N o valor do S_q permanece praticamente inalterado. Esse resultado é similar aos encontrados para o aço rápido e alumina.

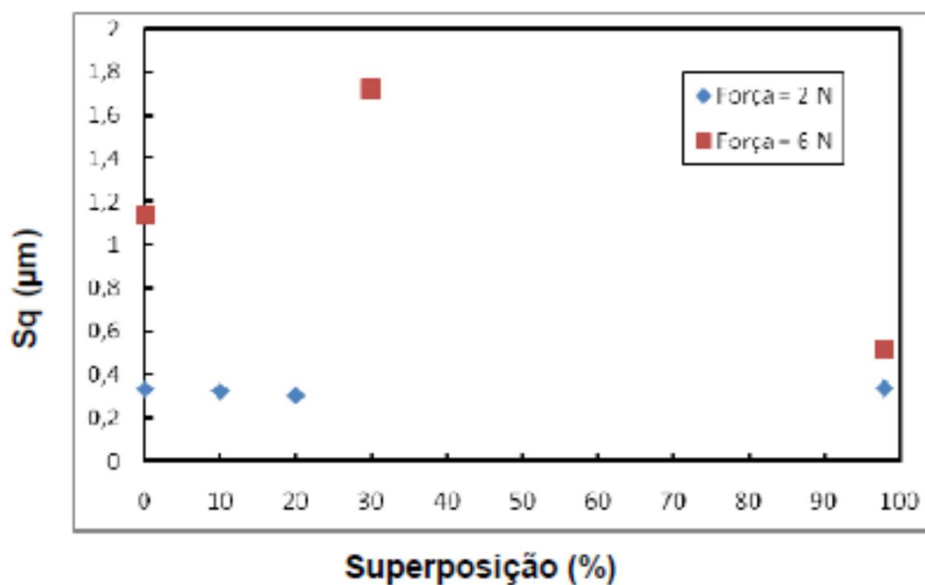


Figura 6.32 – Rugosidade superficial do WC.

De forma geral, os gráficos 6.14, 6.23.e 6.32 indicam que o valor de S_q tende a diminuir com o aumento do nível de superposição para qualquer valor de força. Nesse caso, o desgaste torna-se um benefício em ocasiões onde se busca remover material sem perder a qualidade superficial do material.

Utilizando uma escala de 13 mm para comparar os perfis médios dos três materiais nos testes para força igual a 2 N com níveis de superposição de 0, 10 e 98% e outra escala de 28 mm para as forças iguais a 5,7; 6 e 6,7 N com 0, 20 e 98% observa-se que cada material se comporta de maneira diferente conforme as Figuras 6.29 e 6.32.

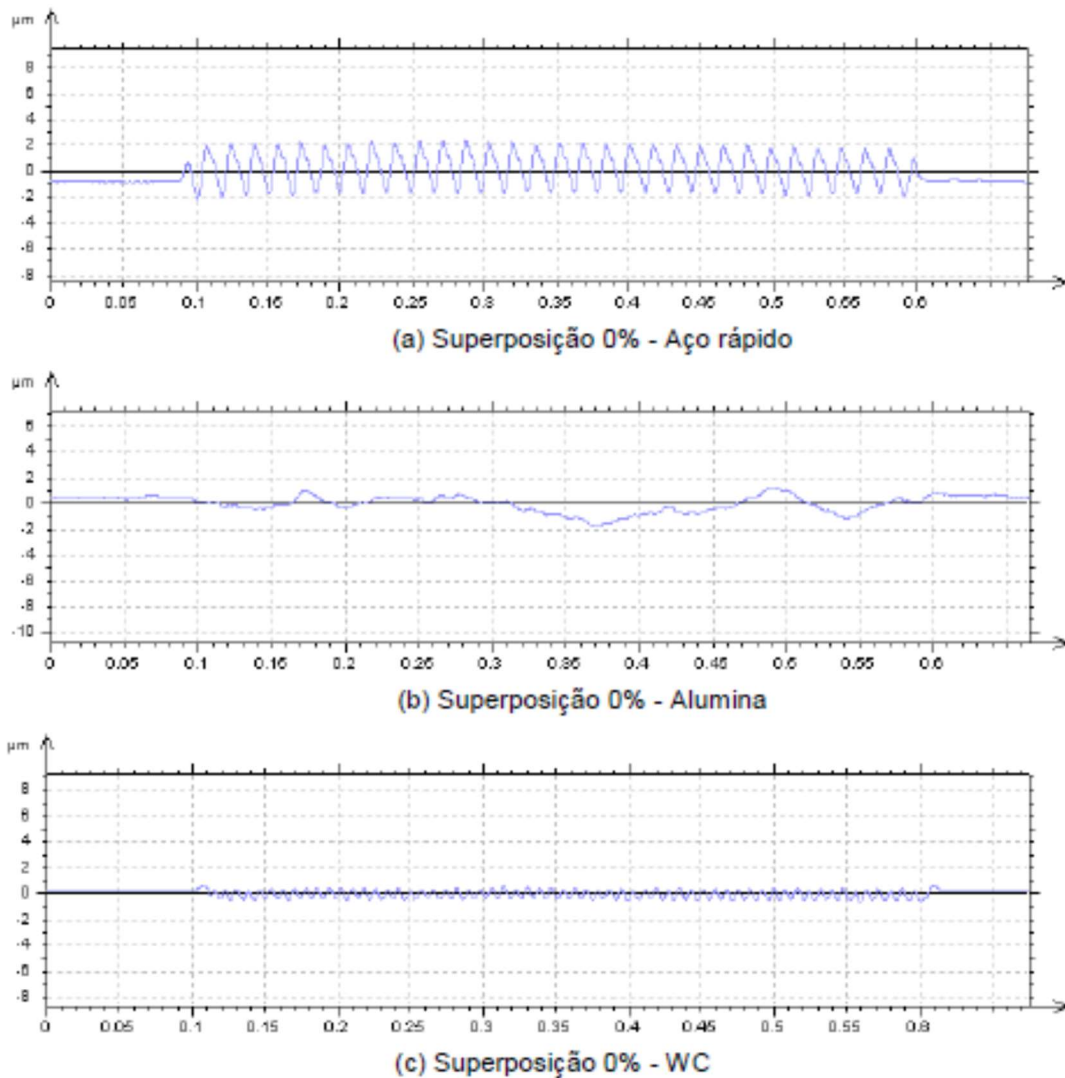
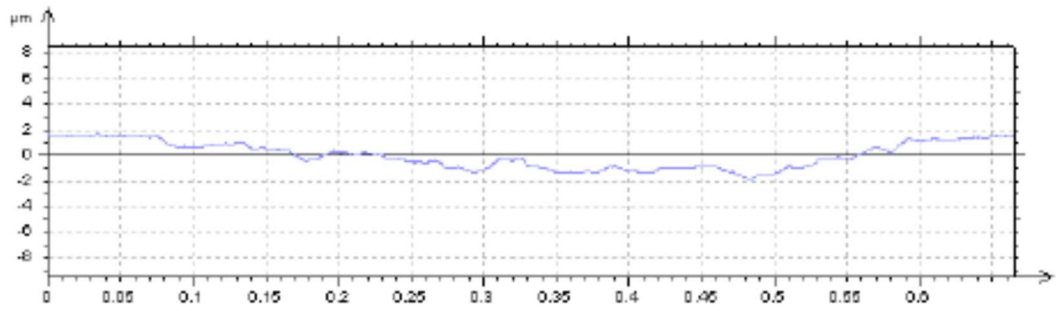
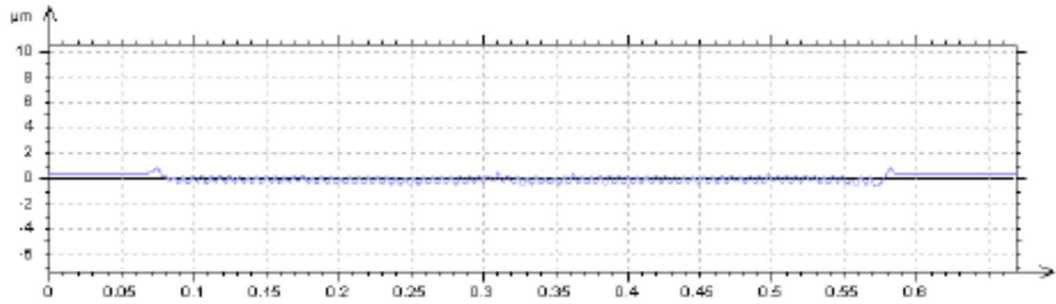


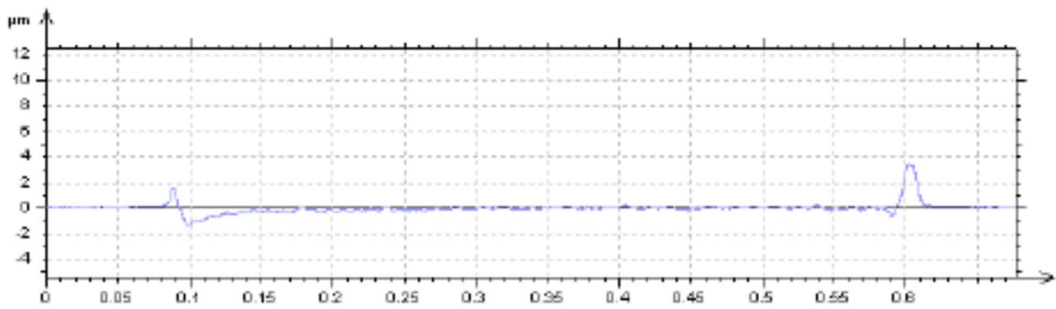
Figura 6.29 – Comparação entre os perfis médios do AR, alumina e WC. Força Normal 2 N. Continua.



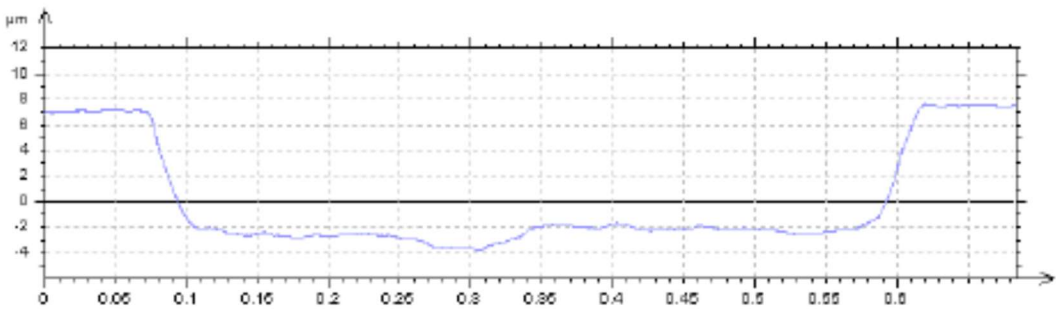
(d) Superposição 10% - Alumina



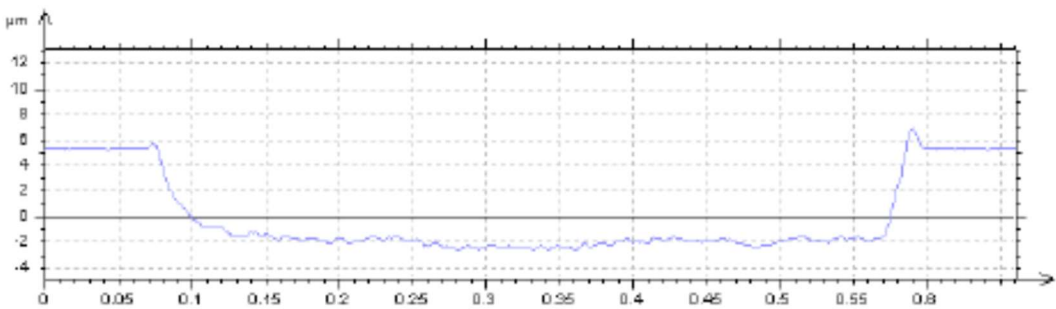
(e) Superposição 10% - WC



(f) Superposição 98% - Aço rápido

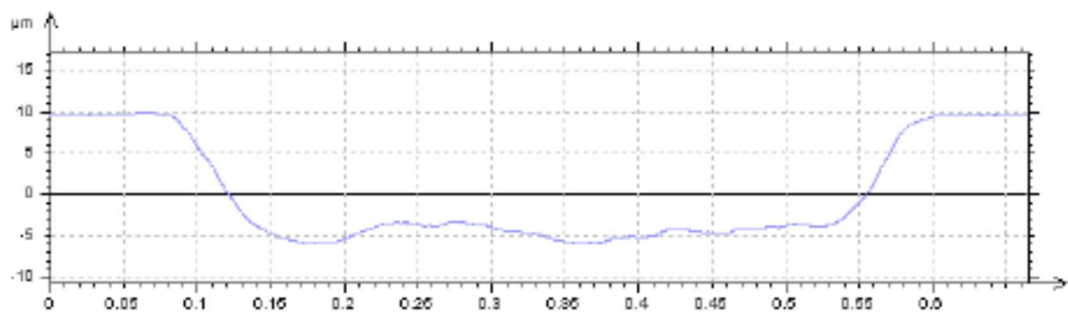


(g) Superposição 98% - Alumina

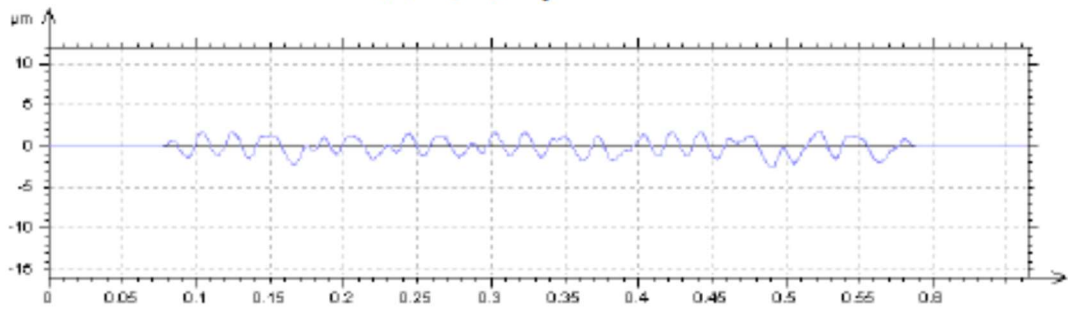


(h) Superposição 98% - WC

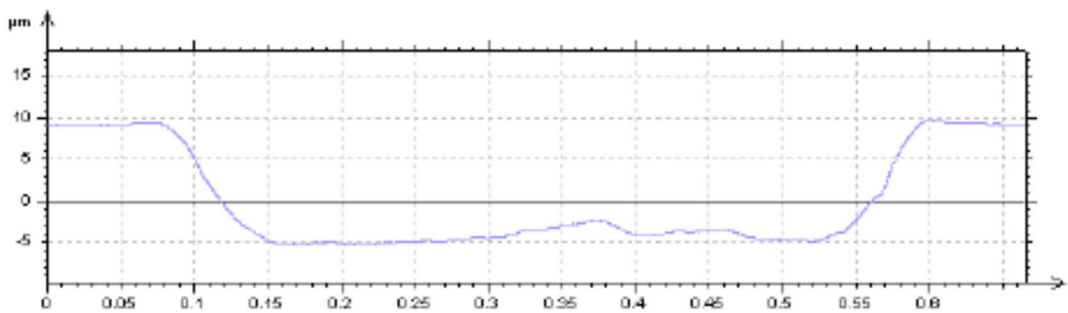
Figura 6.29 – Comparação entre os perfis médios do aço rápido, alumina e WC. Força Normal 2 N.



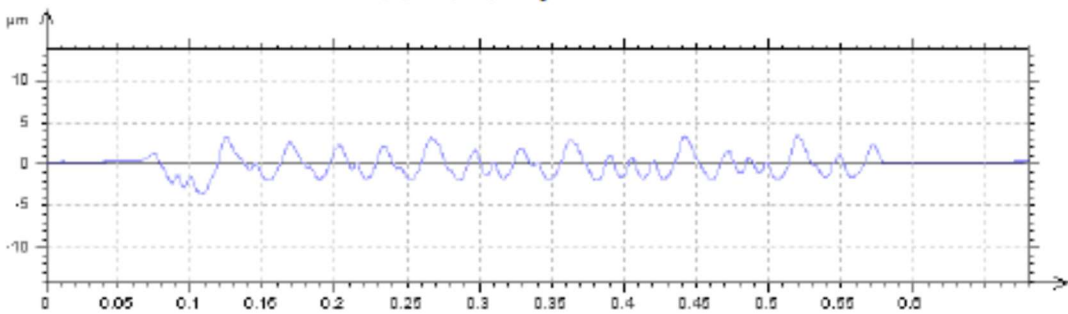
(a) Superposição 0% - Alumina



(b) Superposição 0% - WC



(c) Superposição 20% - Alumina



(d) Superposição 20% - WC

Figura 6.30 – Comparação entre os perfis médios do AR, alumina e WC. Força Normal Média 6 N. Continua.

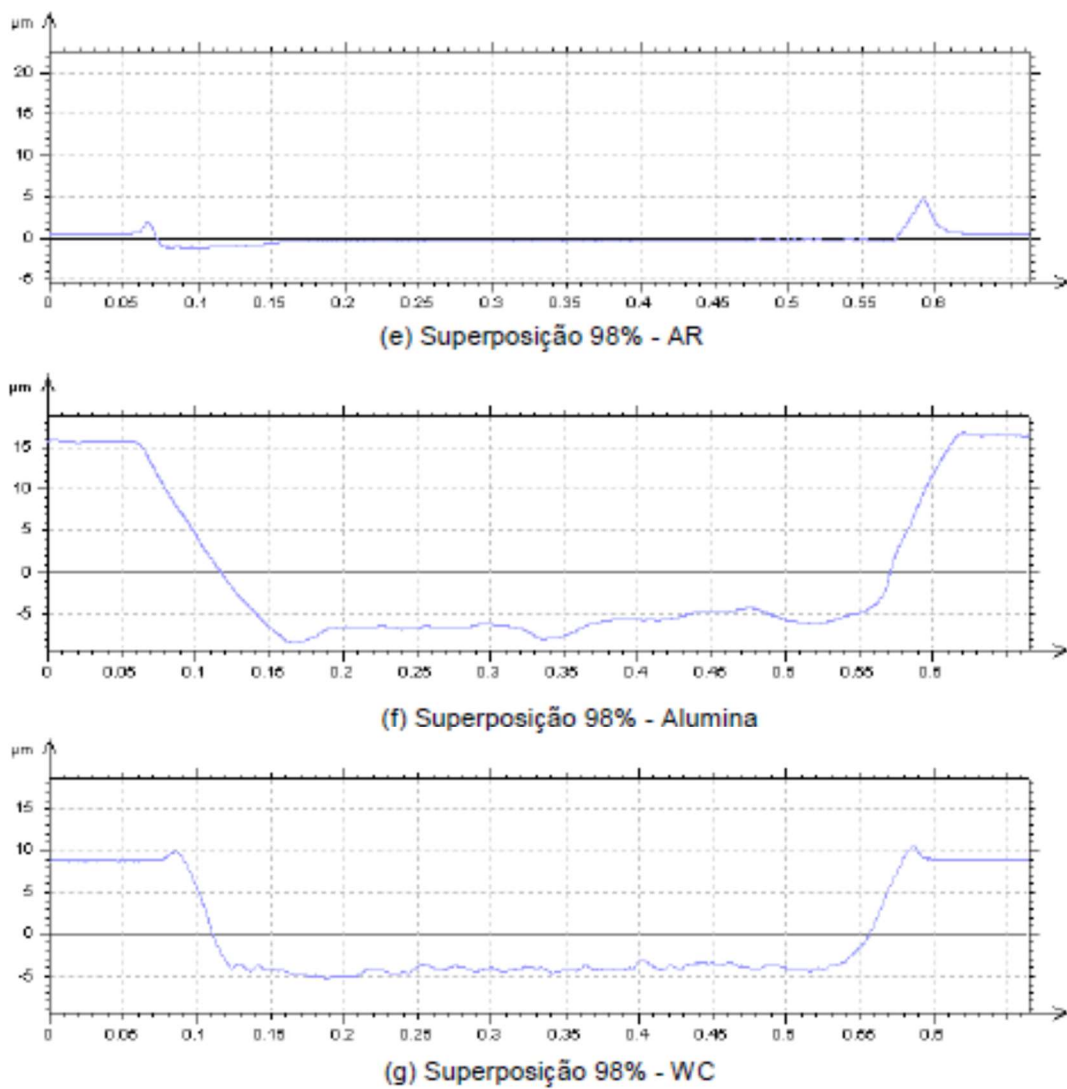


Figura 6.30 – Comparação entre os perfis médios do AR, alumina e WC. Força Normal Média 6 N.

Isso indica que a associação entre força, capacidade de deformação plástica e níveis de superposição pode apresentar uma combinação variada que influencia no desgaste.

8. CONCLUSÕES GERAIS

O nível de superposição de eventos acima do qual é observada a ocorrência de desgaste varia de acordo com o material.

A superposição de ranhuras paralelas mostrou ser um parâmetro que influencia o desgaste abrasivo, seja qual for o material.

O processo de desgaste permite a obtenção de uma superfície com melhor acabamento.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BURWELL, J. T. and Strang, C. D. On the Empirical Law of Adhesive Wear. *J. Appl. Phys.*, volume 23, pp 18 – 28, 1952.

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

DA SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Abrasive Wear of Steam Treated Sintered Iron, *Wear*, volume 258, pp 166 – 167, 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.

DA SILVA, W. M. Simulação do Desgaste Abrasivo via Interações Múltiplas, 2008, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

DA SILVA, W. M.; DE MELLO, J. D. B. Using Parallel Scratches to Simulate Abrasive Wear, *Wear*, volume 267, pp 1987 – 1997, 2009.

GATES, J. D. Two-body and Three-body Abrasion: A Critical Discussion, *Wear*, volume 214, pp 139 – 146, 1998.

GODFREY, D. Diagnosis of Wear Mechanisms, in *Wear Control Handbook*. Peterson, M. B. and Winer, W. O., eds., ASME, New York, pp 283 – 311, 1980.

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 CCE (OECD), Paris, 1969.

JOST, H. P. Lubrication (Tribology) Education and Research, ('Jost Report') UK Office), 79 p, 1966.

KATO, K.; HOKKIRIGAWA K.; KAYABA T.; ENDO Y., *J. Tribol.*, volume 108, pp 346 – 351, 1986.

MEZLINI S.; KAPSA PH.; HENON C.; GUILLEMENET J., Abrasion of Aluminium Alloy: Effect of Subsurface Hardness and Scratch Interaction Simulation, *Wear*, volume 257, pp 892 – 900, 2004.

MULHEARN, T. O.; SAMUELS L. E. The Abrasion of Metals: A Model of the Process, *Wear*, volume 5, pp 478 – 498, 1962.

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, 2^a edição, New York, ISBN 0471830844, 315 p, 1995.

SEDRIKS, A. J.; MULHEARN, T. O. Mechanics of Cutting and Rubbing in Simulated Abrasive Process, *Wear*, volume 6, pp 457 – 466, 1963.

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.

WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. Abrasive Wear in Lubricated Contacts, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, volume 25 pp A81 – A90, 1992a.

WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. Mechanisms of Abrasive Wear in Lubricated Contacts, *Wear*, volume 152, pp 57 – 74, 1992b.

WILLIAMS, J. A.; XIE, Y. The Generation of Wear Surfaces by the Interaction of Parallel Grooves, *Wear*, volume 155, pp 363 – 379, 1992.

ZUM GAHR, K. L. Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, volume 10, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, ISBN 0444427546, 560 p, 1987.