

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LAIZ TAMIRES TACLA BRITO

**ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE
REVESTIMENTO WC-Co-Cr SEGUNDO A NORMA
ASTM G-76**

VITÓRIA-ES

2015

LAIZ TAMIRES TACLA BRITO

**ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE
REVESTIMENTO WC-Co-Cr SEGUNDO A NORMA
ASTM G-76**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr Cherlio Scandian

**VITÓRIA-ES
2015**

LAIZ TAMIRES TACLA BRITO

**ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE
REVESTIMENTO WC-Co-Cr SEGUNDO A NORMA
ASTM G-76**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 09 de Julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Antonio Cesar Bozzi
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Msc. Luiz Rafael Resende da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

A Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu saúde, para que eu pudesse concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais Ronaldo Brito e Maria Aparecida Brito e a minha irmã Ísis Brito por todo apoio e incentivo.

Ao professor Dr. Cherlio Scandian pelas orientações dadas não somente para a realização deste trabalho, mas também durante meu curso de graduação.

Ao mestrando Bruno Corveto Bragança, por todo apoio e ajuda na realização dos ensaios de laboratório.

Ao técnico Nishida do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais pelas micrografias retiradas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Aos colegas do Laboratório Tribologia, Corrosão e Materiais TRICORRMAT pelo apoio.

EPÍGRAFE

Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.

Mahatma Gandhi

RESUMO

O propósito deste trabalho está dividido em duas partes. A primeira parte visa analisar o fenômeno da degradação de revestimentos WC-Co-Cr, empregado no equipamento do processo produtivo de uma empresa local beneficiadora de finos de minério. O revestimento foi depositado no substrato pelo processo de manta sinterizada. Foram realizados ensaios de desgaste erosivo por partículas duras em temperatura ambiente. A segunda parte consiste em comparar o comportamento relacionado a taxa de desgaste do revestimento estudado neste trabalho com outro revestimento, similar que fez uso do mesmo processo de deposição e fora analisado em uma dissertação de mestrado. Apontando assim, os possíveis fatores que podem influenciar no desempenho do desgaste erosivo. Os ensaios foram realizados no erosímetro validado pela norma ASTM G-76, o equipamento pertence ao Laboratório de Tribologia e Corrosão Materiais - TRICORRMAT da Universidade Federal do Espírito Santo. Com a seguinte condição de ensaio, partícula erodente alumina, ângulo de impacto 90° e temperatura ambiente, segundo a norma ASTM G-76. Nesta condição a velocidade foi de 70 m/s. Nos ensaios observaram-se que a taxa de desgaste foi duas vezes maior comparada a taxa de desgaste obtida no outro trabalho, apresentando assim um desgaste mais severo que foi encontrado através de análise microscópica, através dos seguintes mecanismos de desgaste, microcorte, microsulcamento, microindentações com alumina retida no ligante. Afim de investigar esta diferença no desempenho do material fez-se uma análise metalográfica do revestimento constatando-se que o material deste trabalho apresenta diversas peculiaridades que demonstram uma qualidade inferior.

Palavras-chave: revestimento WC-Co-Cr, manta sinterizada, erosão por partículas sólidas.

ABSTRACT

The purpose of this study is divided in two parts. The first part aims to analyze the phenomenon about degradation of coatings WC-Co-Cr, used in the equipment of a production process from a local company that works with ores fine. The coating was deposited on the substrate by the sintered blanket process. Under various samples of this coating were performed tests of erosive wear by solid particles either at room temperature. The second part is to compare the behavior related to the erosive wear rate, of the coating studied in this thesis with other coating, like that used the same deposition process and been analyzed in a Master`s degree paper. Pointing so that several factors can influence the performance of erosive wear. The tests were performed in erosímetro validated by ASTM G-76 regulation, the equipment belongs to Laboratory TRICORRMAT (Tribology Corrosion and Materials) at UFES (Universidade Federal do Espírito Santo). With the following test conditions, erodent alumina particle, impact angle of 90° with room temperature. According regulation ASTM G-76. In this condition the speed was 70 m/s. In the tests it was observed an erosive wear rate twice more high if you compare to the another thesis realized, presenting then a severe wear erosion, where it was found by microscopic analysis micro ploughing, micro cutting, micro indentation and alumina retained in the binder phase. In order to investigate this difference about the material performance was made a metallographic analysis of the coating where it was found that the material of this study has several peculiarities that demonstrate a lower, quality.

Keywords: WC-Co-Cr coating, sintered blanket, erosion by solid particles

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama exhibe as forças que podem agir na partícula em contato com a superfície.....	16
Figura 2 - Gráfico relacionado a taxa de erosão em função da dureza da partícula com ângulo de impacto de 90°: (a) velocidade da partícula 25 m/s e (b) velocidade da partícula 45 m/s.....	17
Figura 3 - Imagens de partículas erodentes: (a) SiO ₂ e (b) Al ₂ O ₃	19
Figura 4 - Representação da taxa de erosão em função do tamanho da partícula ...	20
Figura 5 - Taxa de desgaste em função do tamanho da partícula de SiC para cobre em desgaste erosivo e abrasão em dois e três corpos	21
Figura 6 - Representação do ângulo de impacto.....	22
Figura 7 - Gráfico do efeito do ângulo de impacto em taxas de desgastes de materiais dúcteis e frágeis	23
Figura 12 - Possíveis mecanismos de erosão. a) abrasão em ângulo de impacto baixo, b) fadiga da superfície durante baixa velocidade, alto ângulo de impacto, c) fratura frágil ou múltipla deformação plástica durante velocidade média, alto ângulo de impacto, d) fusão em alta velocidade de impacto, e) Erosão com efeitos secundários, f) degradação da rede cristalina por impacto dos átomos.....	24
Figura 13 - Seção transversal do material mostrando os mecanismos de desgaste após o impacto de partícula dura. A direção do impacto foi da esquerda para a direita; (a) deformação por sulcamento por partículas esféricas; (b) corte tipo I por uma partícula angular girando no sentido horário; (c) corte tipo II por uma partícula angular girando no sentido anti-horário.....	25
Figura 14 - Formação de trinca devido a indentação pontual. Aumentando de (a) para (c) e aliviando a carga de (d) para (f).	27

Figura 15 - Etapas do processo de deposição por manta sinterizada.....	28
Figura 16 – Resultados dos ensaios de erosão para abrasivo hematita, ângulo de impacto 90°, velocidade 70 m/s, temperatura 375°C	30
Figura 17 – Resultados do desgaste para WC-1, WC-2 e WC-3 onde WC-1 tem maior fração volumétrica de carbonetos, decrescendo para os demais. Ensaio realizado de acordo com a norma ASTM G76, velocidade 70 m/s, alumina 50 µm, ângulo de impacto 45°.	30
Figura 18 - Resultados dos ensaios com pós convencionais e nanométricos depositado por HVOF nos revestimentos. Com partícula abrasiva quartzo . (a) abrasivo 103-150 µm. (b) abrasivo 350-500 µm.....	31
Figura 19 - Taxa de erosão para diferentes materiais e diferentes processos de deposição de revestimentos	32
Figura 21 - Amostra utilizada para o ensaio como recebida.	34
Figura 22 - Perfil topográfico da superfície de uma das amostras do revestimento..	38
Figura 23 - Gráfico relacionado com a rugosidade superficial média do revestimento.....	39
Figura 24 - Micrografia via MEV da manta sinterizada com ampliação de 2000x e 8000x e sinalizações dos defeitos.....	40
Figura 25 - Gráfico da fração volumétrica em percentagem dos carbonetos presentes no revestimento.....	41
Figura 26 - Gráfico da análise química por EDS global.....	42
Figura 27 - Gráfico representando o resultado encontrado no ensaio de dureza Rockwell C.	43

Figura 28 - Desenho esquemático do perfil transversal da microdureza Vickers.....	43
Figura 29 – Primeiro gráfico representando o resultado encontrado no ensaio de microdureza vickers e também resultado do perfil de dureza média para carga de 300g a partir da superfície da amostra.....	44
Figura 30 - Micrografia com ataque químico solução nital 10 %, da seção transversal da amostra e suas indentações de microdureza vickers. (a) indentações para carga 300g e (b) indentações para carga de 100g.....	45
Figura 31 - Microscopia feita nas partículas antes e após a realização dos ensaios. (a) alumina antes do ensaio, (b) alumina após o ensaio.	46
Figura 32 - Representação gráfica em escala logarítmica do diâmetro das partículas (a) alumina.	47
Figura 33 - Gráfico taxa de desgaste da calibração do erosímetro.....	48
Figura 34 – Taxa de desgaste da condição ensaio, ambas foram feitas com alumina a temperatura ambiente	48
Figura 35 – Micrografias via MEV dos revestimentos mostrando a distribuição do carboneto na matriz. (a) Manta sinterizada da Amostra do trabalho anterior. (b) Manta sinterizada da amostra do trabalho atual	49
Figura 36 - Resultado do desgaste para WC-1, WC-2 e WC-3 onde WC-1 tem maior fração volumétrica de carbonetos, decrescendo para os demais. Ensaio realizado de acordo com a norma ASTM G76, velocidade 70m/s, alumina 50µm, ângulo de impacto 45°.....	50
Figura 37 – Micrografia via MEV do revestimento após o ensaio.....	50
Figura 38 – Micrografia da seção transversal do revestimento	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 SOBRE A TRIBOLOGIA.....	14
2.2 DESGASTE EROSIVO.....	15
2.2.1 PARAMETROS QUE INFLUENCIAM O DESGASTE EROSIVO.....	16
2.2.2 MECANISMOS DE DESGASTE.....	23
2.3 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO POR MANTA SINTERIZADA.....	28
2.4 COMPORTAMENTO EM EROSÃO DO REVESTIMENTO COM O WC COMO PRINCIPAL CONSTITUINTE.....	29
3. METODOLOGIA.....	33
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 AMOSTRA.....	33
3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO.....	34
3.1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	35
3.2 MÉTODOS.....	35
3.2.1 CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	35
3.2.2 EROSÍMETRO TRICORRMAT E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	36

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO.....	38
4.1.1 RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO REVESTIMENTO	38
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS CONSTITUINTES	39
4.1.3 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS CARBONETOS.....	41
4.1.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA SEMI-QUANTITATIVA.	41
4.1.5 DUREZA DO REVESTIMENTO.....	42
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	46
4.2.1 MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS	46
4.2.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	46
4.3 RESULTADO DO ENSAIO.....	47
5. CONCLUSÃO.....	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O Departamento de Educação e Ciência da Inglaterra em 1966, definiu Tribologia como *A ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas relacionadas a isso* (DOWNSON, 1998). Somente a definição era relativamente nova, na década de 60 na Inglaterra. A história da atuação humana nos tempos antigos nos apresenta vários exemplos onde a Tribologia foi demonstrada muito antes de sua definição. Diversos estudiosos exemplificam comportamentos associados a Tribologia no período paleolítico, nas civilizações egípcias em 1880 a.C., no período do artista renascentista Leonardo da Vinci em 1452 a 1519 entre outros períodos históricos.

A palavra Tribologia é baseada no Grego *tribos* que significa fricção, atrito. Seu estudo de maneira geral envolve a lubrificação, o atrito e o desgaste dos materiais. Segundo Hutchings (1992) o desgaste pode ser classificado em desgaste por deslizamento e desgaste por partículas duras – erosão e abrasão.

O desgaste erosivo, tema deste trabalho, é causado pelo impacto de sólido ou líquido contra a superfície de um corpo, ele ocorre em uma grande variedade de máquinas (STACHOWIAK, 2001). Em indústria petroquímica, em indústria de beneficiamento de minério, em indústria siderúrgica, em indústria aeronáutica e em indústria aeroespacial. Tal fenômeno leva a perda progressiva de material, que pode ser suficiente para causar danos ou indisponibilidade do equipamento, perdas em termos financeiros e até mesmo afetar ao meio ambiente.

Estatísticas realizadas mostram que em países desenvolvidos cerca de 1% a 6% do PIB são perdidos com desgaste (CZICHOS E HABIG, 1992). Jost (1990) já sugeria que é possível reduzir as perdas por desgaste em até 20% com aplicação de conceitos tribológicos existentes. Mesmo com o passar dos anos os números ainda são expressivos. Segundo Mello (apud ERDEMIR, 2009) “[...] os custos de desgaste e atrito nos Estados Unidos da América perfazem a impressionante cifra de meio trilhão de dólares por ano. Com dados de 2008 isto significa um terço do PIB brasileiro”.

Posto isto, o objetivo deste trabalho está dividido em duas partes. A primeira parte visa analisar o desempenho da resistência do desgaste por partículas sólidas de revestimento WC-Co-Cr depositado no substrato por manta sinterizada, tal revestimento é empregado em paletas dos ventiladores radiais centrífugos dos fornos de ventilação de uma empresa local beneficiadora de finos de minério de ferro.

A segunda parte consiste em comparar o comportamento quanto ao desgaste erosivo do revestimento estudado neste trabalho com outro revestimento similar, que fez uso do mesmo processo de deposição e fora analisado em uma dissertação de mestrado. Apontando assim, que diversos fatores podem influenciar no desgaste erosivo. O estudo baseou-se nas especificações da Norma ASTM G-76.

Para levar a cabo tal objetivo, o capítulo 2 (dois) far-se-á uma revisão bibliográfica sobre erosão e sobre o processo de deposição por manta sinterizada. No capítulo 3 (três) será abordado a metodologia abrangendo os métodos utilizados para caracterização do revestimento e da partícula, as condições e procedimentos de ensaio. E por fim no capítulo 4 (quatro) será abordado os resultados e discussões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão abordados assuntos referentes ao termo Tribologia, seguido pela abordagem ao tema específico deste trabalho desgaste erosivo com suas definições e conceitos, com seus parâmetros que influenciam ao desgaste e seus mecanismos. Por fim será discutido a técnica de deposição do revestimento que será analisado o seu comportamento em erosão.

2.1 SOBRE A TRIBOLOGIA

Define-se a palavra Tribologia do termo grego τριβος, que significa esfregação (HUTCHINGS, 1992). Sendo comumente encontrado nas literaturas especializadas por “Ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo”. Uma ciência altamente sistêmica, não linear e de elevada sensibilidade, incorpora o estudo do atrito, lubrificação e desgaste, subdividindo este último em desgaste por deslizamento, por erosão, por abrasão, oxidativo e por fretting, entre outros.

O movimento entre duas superfícies é fundamentalmente importante para o funcionamento de muitos tipos de mecanismos, seja ele de caráter natural ou artificial. Deste movimento pode-se obter vantagens, mas a desvantagem também se faz presente em muitos casos. Em relação ao atrito por exemplo, é desejável o baixo atrito em articulações humanas, mas em contrapartida o andar humano exige a presença do atrito entre o calçado e o chão para que possamos nos locomover.

Nestes sistemas de movimentos relativos entre as superfícies o desgaste é inevitável. A perda por desgaste de pequenas quantidades de material pode ser suficiente para causar a completa falha de máquinas robustas. A forma encontrada para minimizar este problema está na lubrificação. A lubrificação é um possível método eficaz e frequentemente vem sendo utilizado para reduzir ao atrito e conseqüentemente ao desgaste.

Sabe-se que o desgaste apresenta-se subdividido sendo que todos são definidos por uma perda progressiva de material, mas os que diferenciam são as características pertinentes a cada um. O desgaste por deslizamento caracteriza-se por duas superfícies deslizarem uma sobre a outra. O desgaste por abrasão é classificado em dois e três corpos, mas literaturas atuais substituem este termo por múltiplas indentações e micro riscamento, onde as partículas são pressionadas gerando uma força normal sobre a superfície. O desgaste de erosão por partículas sólidas é caracterizado por partículas impactando a superfície e sua principal força se dá pela desaceleração da partícula ao se chocar com a superfície. Fretting é caracterizado por uma baixa amplitude e alta frequência da partícula.

2.2 DESGASTE EROSIVO

A Norma ASTM G76-02 *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets* define erosão por perda progressiva do material original de uma superfície devido o mecanismo de interação entre esta superfície e um fluido, um fluido multicomponente ou líquido sob ação impactante ou partículas sólidas.

A perda progressiva do material original de uma superfície como citada pela Norma ASTM G76-02 rege qualquer tipo de desgaste, contudo há particularidades que os diferenciam e caracterizam. De acordo com Hutchings (1992) em erosão por impacto de partículas sólidas várias forças de diferentes origens podem agir na partícula em contato com a superfície (Figura 1). A força dominante sobre uma partícula erosiva, é devido à desaceleração da partícula, ao se chocar com a superfície. Já na abrasão por exemplo, as partículas são pressionadas, gerando uma força normal a superfície, sobre a qual deslizam.

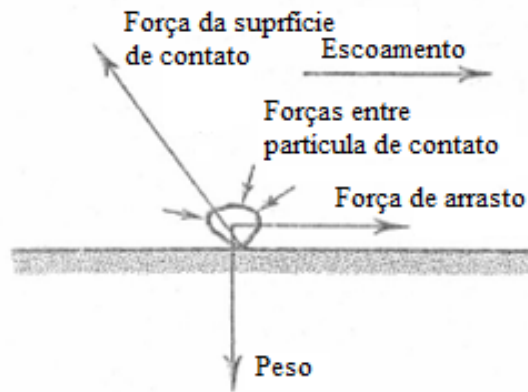


Figura 1 – Diagrama exibe as forças que podem agir na partícula em contato com a superfície. Fonte: Adaptado Hutchings, 1995, p.171.

No exercício da engenharia em diversos setores o desgaste em muitos casos inevitável. Segundo Stachowiak (2001) desgaste erosivo ocorre em uma grande variedade de máquinas e são exemplos típicos o dano as lâminas de turbinas a gás quando uma aeronave voa entre as nuvens de poeira, o rotor de bomba na lama do sistema de processamento mineral. Haugen (1995) destaca que na exploração de petróleo e gás, válvulas de controle e bloqueio são erodidas por pequenas partículas de areia que são arrastadas quando o gás natural escoam em alta velocidade.

2.2.1 Parâmetros que influenciam o desgaste erosivo

As propriedades e características das partículas no desgaste por erosão e em qualquer outro desgaste que envolva partícula dura, como abrasão por exemplo, são significantes e são cada vez mais reconhecidas como um relevante parâmetro no controle do desgaste (STACHOWIAK, 2001). Em face disto, faz-se necessário caracterizar as propriedades das partículas erodentes como dureza, forma, tamanho. A influência da velocidade e fluxo da partícula, ângulo de impacto, temperatura ambiente faz-se importante e também será apresentada.

(a) Dureza da partícula

A dureza da partícula erodente que impacta a superfície influencia a taxa de desgaste. O comportamento está relacionado com a razão entre dureza da partícula e a dureza do material a ser desgastado. A tabela 1 mostra valores de dureza para partículas erodentes comuns, materiais estruturais e materiais de revestimento.

Tabela 1 – Valores de dureza vickers para típicos materiais abrasivos, fases ou constituintes de aço e ferro fundido e materiais cerâmicos (granel ou revestimento). Fonte: Adaptado Hutchings, 1992, p. 137.

<i>Típicos Materiais Erosivos</i>	<i>Dureza do material [HV]</i>
Diamante	6000 – 10000
Carboneto de sílica	2100 – 2600
Alumina (minério)	1800 – 2000
Magnetita, Fe ₃ O ₄	370 – 600
<i>Fases ou Constituintes de aço e ferro fundido</i>	<i>Dureza do material [HV]</i>
Cromo / Carboneto de ferro	1200 – 1600
Martensita	500 – 1000
Austenita (baixa liga)	250 – 350
Ferrita, α Fe	70 – 200
<i>Materiais Cerâmicos (granel ou revestimento)</i>	<i>Dureza do material [HV]</i>
Carboneto de zinco	2360 – 2600
Carboneto de titânio	2000 – 3200
Carboneto de tungstênio	2000 – 2400
Carboneto de cromo, Cr ₇ C ₃	1600

Como afirma Hutchings (1992) o desgaste erosivo torna-se mais sensível quando a razão da dureza da partícula H_a , pela dureza da superfície H_s , for menor que aproximadamente 1. A razão para este comportamento pode ser entendida examinando o mecanismo de contato entre a partícula e a superfície plana. Se a superfície do material escoar plasticamente uma vez que o limite de escoamento foi excedido, o escoamento plástico significativo ocorrerá na superfície quando a principal pressão de contato alcançar três vezes sua tensão de escoamento uniaxial.

Suresh Badu, Bikramjit Basu e Sudararajan (2011) descreveram a influência da dureza erodente no comportamento erosivo. Eles estudaram materiais diferentes, compreendidos por um aço de baixo carbono e recobrimentos de WC-12Co depositados por “Detonation Spray Process” sob diferentes condições de deposição, onde variou-se a taxa de oxigênio e acetileno. Estes materiais foram erodidos com

partículas de SiO_2 , Al_2O_3 e SiC . A figura 2 exibe o comportamento dos materiais ensaiados.

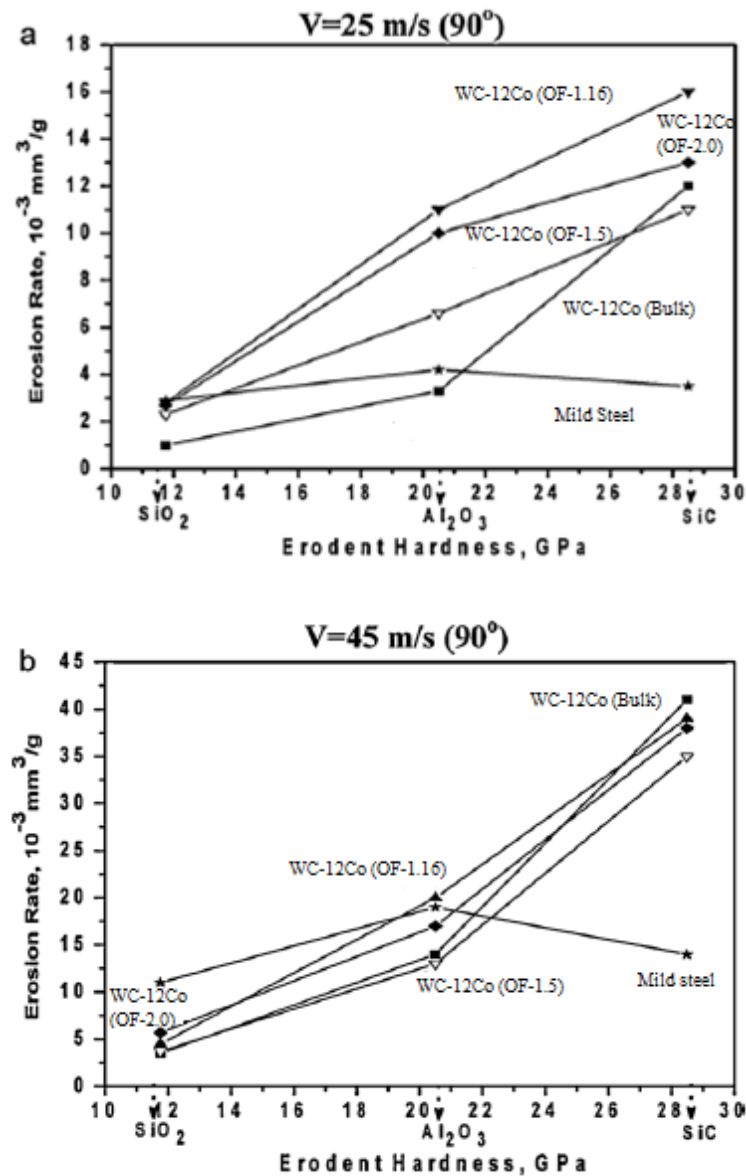


Figura 2 – Gráfico da taxa de erosão em função da dureza da partícula com ângulo de impacto de 90°: (a) velocidade da partícula 25 m/s e (b) velocidade da partícula 45 m/s.

Fonte: Adaptado Suresh Badu, Bikramjit Basu e Sudararajan, 2011, p. 907.

Nos resultados do ensaio pode-se observar o crescimento da taxa de erosão com o aumento da dureza da partícula erodente em todos os materiais ensaiados, com exceção do aço médio carbono, que apresentou maior taxa de desgaste para Al_2O_3 , possivelmente por esta ter forma mais angulada.

(b) Forma da partícula

O desgaste é influenciado pela forma das partículas, onde partículas esféricas apresentam menor taxa de desgaste comparada com partículas angulares.

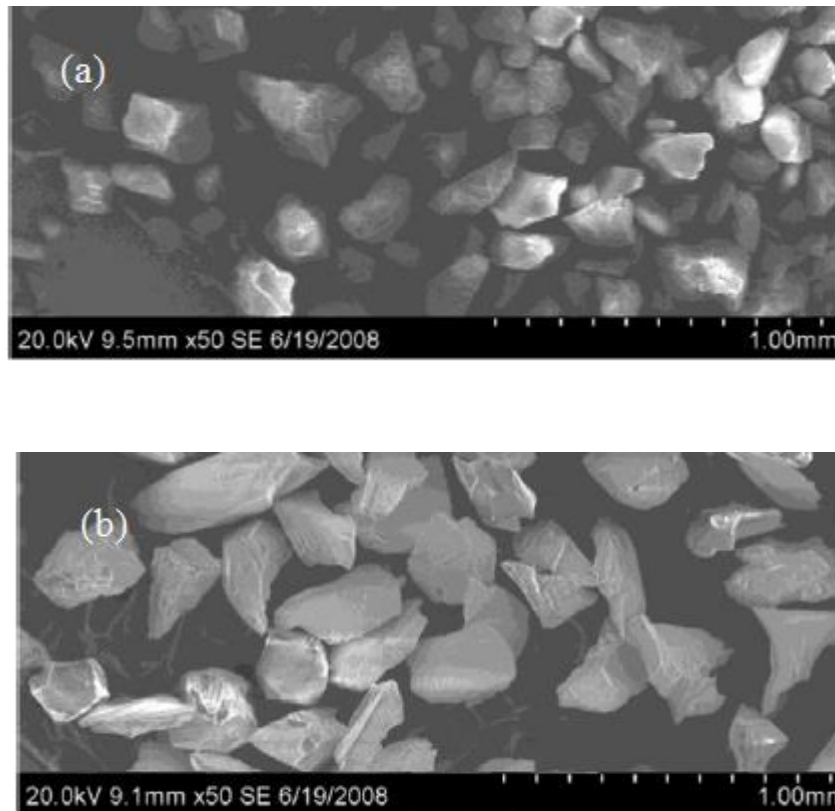


Figura 3 – Imagens de partículas erodentes: (a) SiO₂ e (b) Al₂O₃.
 Fonte: Adaptado Suresh Badu, Bikramjit Basu e Sudararajan, 2011, p. 907.

Segundo Hutchings (1992), a forma da partícula pode ser definida medindo o perímetro e a área da seção transversal da projeção da partícula gerada pelo auxílio de um microscópio óptico. Assim a razão entre a área atual da projeção da partícula (A) e a área definida pelo círculo formado pelo perímetro (P) também da projeção, conforme mostrada na equação I. Esta razão denominamos de fator de esfericidade (F).

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \quad (I)$$

Se F apresenta valores menores que uma unidade, a partícula tende a ser mais angulosa. Já se F apresentar valor unitário, pode se dizer que a partícula é mais esférica.

(c) Tamanho da partícula

O tamanho da partícula é outro parâmetro que pode influenciar no desgaste erosivo. A tendência geral do efeito do tamanho da partícula de impacto na taxa de erosão é exibida na figura 4, representa que as taxas de desgaste caem abruptamente para partículas menores.

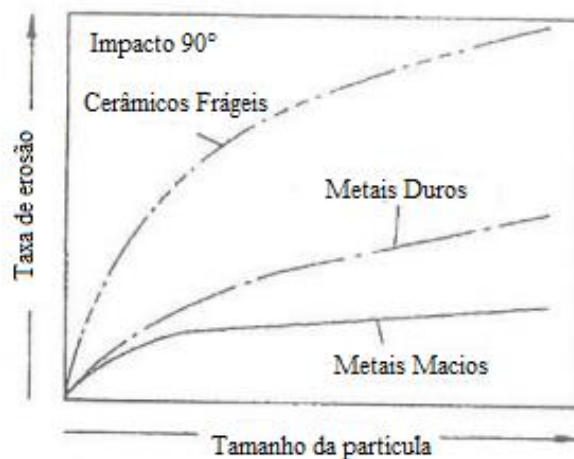


Figura 4 – Representação da taxa de erosão em função do tamanho da partícula.
Fonte: Adaptado Zum Gahr, 1987, p. 535.

Ensaio realizados com cobre e carboneto de silício (SiC) como partícula abrasiva em desgaste abrasivo com deslizamento, rolamento de partícula e erosão mostra que as taxas de desgaste diminuem subitamente a partir de um tamanho crítico do abrasivo, caem a partir de partículas aproximadamente menores que $100\ \mu\text{m}$ (figura 5).

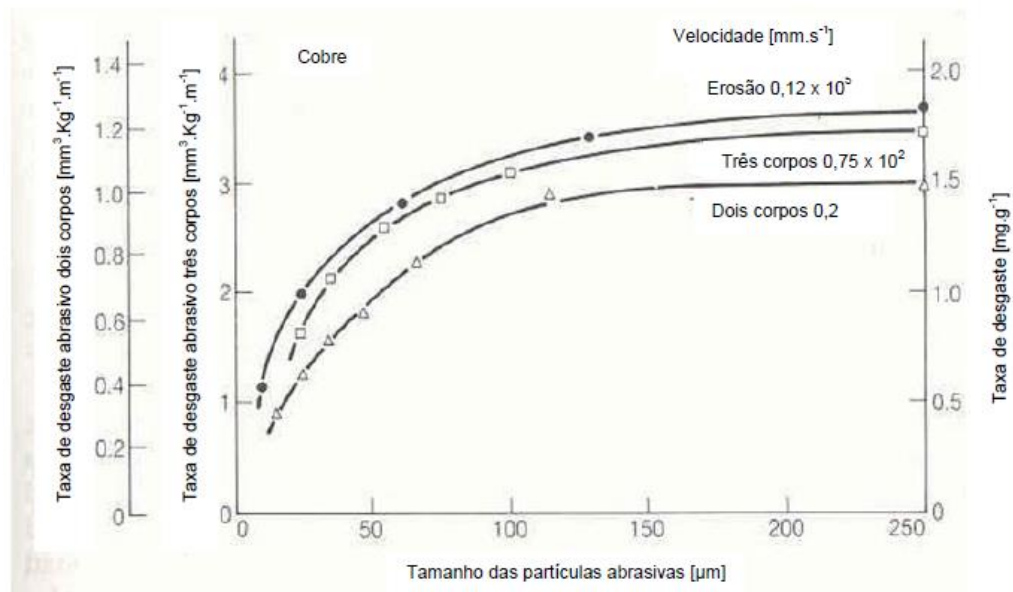


Figura 5 – Taxa de desgaste em função do tamanho da partícula de SiC para cobre em desgaste erosivo e abrasão em dois e três corpos. Fonte: Adaptado Finnie, 1995, p. 6.

O motivo que explica este comportamento está no efeito denominado *size effect* ou efeito escala que atinge a resistência do cobre. A tensão que ocasiona o escoamento em um pequeno volume de material é maior que a tensão necessária para escoar um volume maior de material, fundamentado pela existente dificuldade para a nucleação e movimentação de discordâncias em material de menor volume. Assim, o aumento na tensão de escoamento para volumes pequenos gera uma redução na taxa de desgaste por deformação plástica (EWALD, 2011).

(d) Velocidade de impacto

A velocidade de impacto de partículas tem um forte efeito na taxa de desgaste. As médias e altas velocidades cobrem a maioria dos problemas práticos, a relação entre a taxa de desgaste e a velocidade de impacto pode ser descrita pela equação:

$$\frac{-dm}{dt} = K \cdot V^n \quad (II)$$

Onde:

m é massa desgastada [kg] (negativa, uma vez que o desgaste envolve perda de massa);

t é a duração do processo [s];

k é uma constante;

V é velocidade de impacto [m/s];

n é expoente da velocidade.

O valor do expoente n é usualmente variável entre 2 e 3 para partículas sólidas (STACHOWIAK, 2001).

As propriedades das partículas, como o tamanho, a forma e a dureza influenciam fortemente o valor do expoente n . Por exemplo, a diferença no tamanho da partícula influencia a energia cinética a ser transferida para o alvo ao longo de um volume, propiciando, assim variadas densidades de energia no material alvo (BAHADUR, apud SILVA, 2013, p. 13).

(e) Ângulo de impacto

O ângulo de impacto de partículas erodentes é definido como o ângulo formado entre a trajetória da partícula e superfície do material alvo, figura 6. Estes ângulos podem variar de 0° até 90° (STACHOWIAK, 2001).

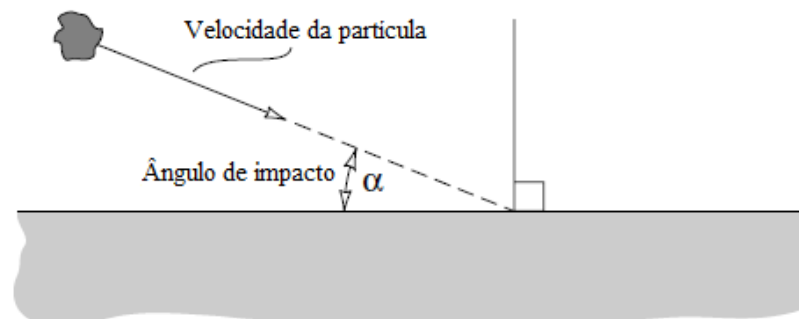


Figura 6 – Representação do ângulo de impacto.
Fonte: Adaptado Stachowiak, 2001, p. 511.

Em ângulo de impacto zero o desgaste é desprezível porque a partícula erodente não impacta a superfície. O ângulo influencia nas taxas de erosão de acordo com a natureza do material erodido. Em materiais dúcteis o desgaste erosivo aumenta até um valor máximo próximo a 30° e posteriormente decresce a medida que se aproxima do ângulo normal (90°). Já para superfície de materiais frágeis a taxa máxima de desgaste se dá em ângulo de impacto próximo a 90°, figura 7 (STACHOWIAK, 2001).

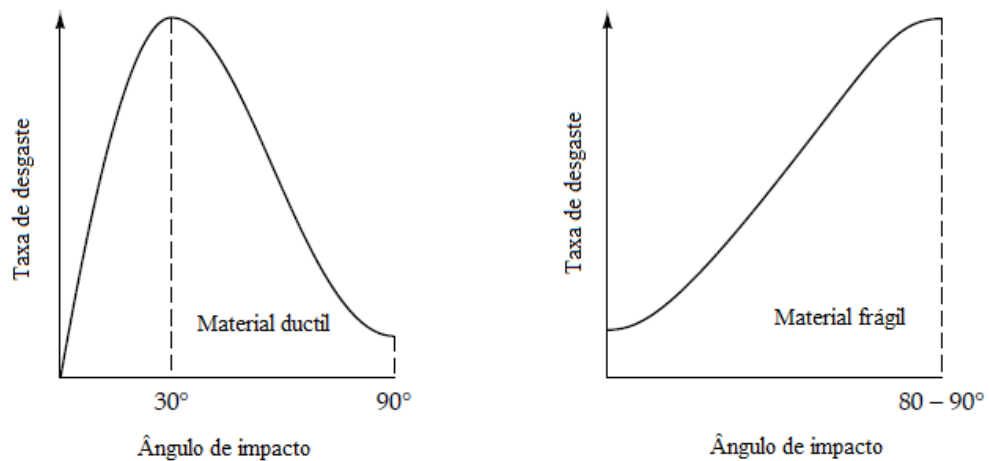


Figura 7 – Gráfico do efeito do ângulo de impacto em taxas de desgastes de materiais dúcteis e frágeis. Fonte: Adaptado Stachowiak, 2001, p. 511.

2.2.2 Mecanismos de desgaste

O desgaste erosivo envolve vários mecanismos de desgaste, que são amplamente controlados pela partícula, de acordo com sua forma, tamanho, ângulo de impacto e velocidade de impacto (figura 12) (STACHOWIAK, 2001).

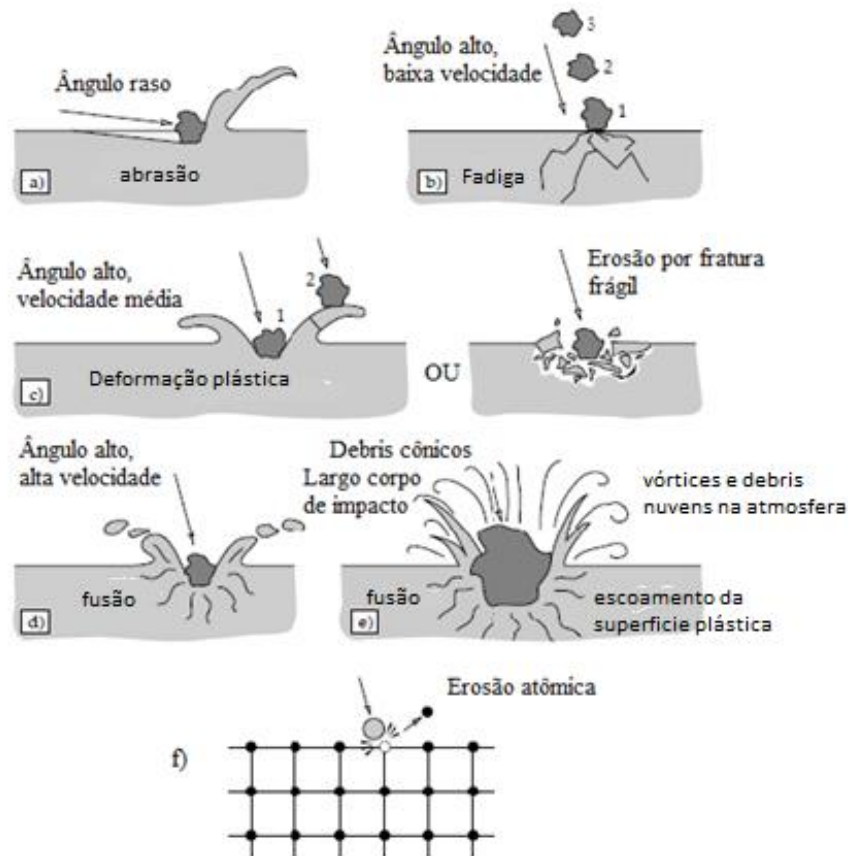


Figura 12 – Possíveis mecanismos de erosão. a) abrasão em ângulo de impacto baixo, b) fadiga da superfície durante baixa velocidade, alto ângulo de impacto, c) fratura frágil ou múltipla deformação plástica durante velocidade média, alto ângulo de impacto, d) fusão em alta velocidade de impacto, e) Erosão com efeitos secundários, f) degradação da rede cristalina por impacto dos átomos.
 Fonte: Adaptado Stachowiak, (2001, p. 510).

O estudo dos principais mecanismos de desgaste por erosão origina-se na análise de uma única partícula que colide com uma superfície. O impacto de múltiplas partículas envolve fenômenos complexos, tais como diferentes ângulos de incidência simultâneos, interação entre partículas, partículas engastadas na superfície e etc (ZUM GAHR, 1987).

A colisão de partículas contra a superfície pode levar à diferentes consequências, deformação plástica, corte e trincas que levam ao desgaste da superfície. As distintas consequências podem ser explicadas pelo material da superfície. Para matérias dúcteis há uma maior tendência de ocorre o chamado microsulcamento e microcorte. Já em materiais frágeis normalmente ocorrer trincas na superfície. Serão apresentados dois mecanismos propostos por Hutchings (1992) – erosão por deformação plástica e erosão por fratura frágil.

(a) Mecanismos dúcteis

O desgaste por mecanismos dúcteis é regido por deformação plástica, onde microcorte e microsulcamento na superfície são observados. A severidade do desgaste onde prevalece os mecanismos dúcteis estão presentes em baixos ângulos de impacto das partículas entre 20° e 30°.

Hutchings (1992), apresenta a forma que o material toma após ser colidido por uma partícula. Partículas esféricas deformam o material por sulcamento, deslocando-o para a frente ou para o lado conforme figura 13 (a). Impactos subsequentes levam a remoção do material já deformado. A deformação por partículas angulares depende de sua orientação. Se a partícula rola na direção do movimento, modo de corte tipo I, penetrando no material formando uma ondulação exposta aos impactos subsequentes (figura 13 (b)). Se a partícula em direção oposta ao movimento haverá usinagem do material, com a aresta da partícula retirando cavaco da superfície, modo corte tipo II (figura 13 (c)).

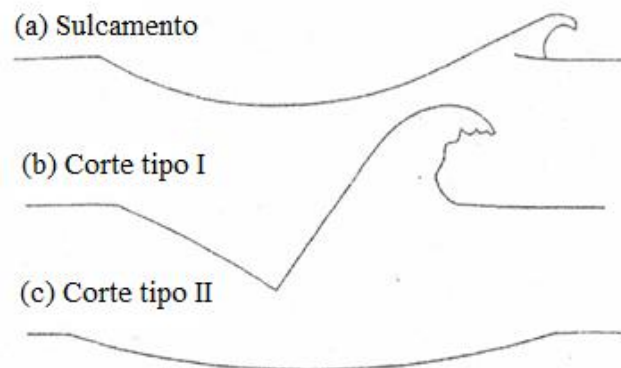


Figura 13 - Seção transversal do material mostrando os mecanismos de desgaste após o impacto de partícula dura. A direção do impacto foi da esquerda para a direita; (a) deformação por sulcamento por partículas esféricas; (b) corte tipo I por uma partícula angular girando no sentido horário; (c) corte tipo II por uma partícula angular girando no sentido anti-horário. Fonte: Adaptado Hutchings (1992, p.176).

Segundo Hutchings (1992) duas expressões podem representar o material removido em um desgaste erosivo. Para ângulos rasos propôs a expressão a seguir.

$$E = \frac{K\rho U^n}{H} f(\theta) \quad (\text{III})$$

Onde, E é a massa de material removido por massa de partículas que impactam a superfície; K é uma constante (coeficiente de desgaste); ρ é a densidade do material desgastado; U é a velocidade de impacto; n é o expoente de velocidade e varia entre 2,0 e 2,5 sendo também uma função do ângulo de impacto θ ; H é a dureza do material desgastado.

E para ângulos reto, propôs a seguinte expressão.

$$E = \frac{K_I \rho \sigma^{1/2} U^3}{\epsilon_c^2 H^{3/2}} \quad (\text{IV})$$

Onde, E é a massa de material removido por massa de partículas que impactam a superfície; K_I é uma constante conhecida como coeficiente de desgaste; ρ é a densidade do material desgastado; σ é a densidade das partículas erosivas esféricas; U é a velocidade de impacto; ϵ_c é a deformação plástica crítica, entendida como uma medida de ductilidade sob erosão; H é a dureza do material desgastado.

(b) Mecanismos frágeis

A presença de trincas são observadas comumente em mecanismos frágeis, e a severidade da taxa de desgaste nestes casos são para ângulos normais. Trincas Hertzianas representadas por Hutchings (1992) expressam este mecanismo. Onde, o material é removido pela interseção das trincas que são formadas de uma deformação plástica no ponto de impacto D, ao elevar a tensão da superfície até um ponto crítico, causando assim as trincas medianas (M). Estas, por sua vez, quando é aliviada a tensão, se fecham e dão início às trincas laterais (L), aumentando o seu tamanho até chegarem a superfície (figura 14).

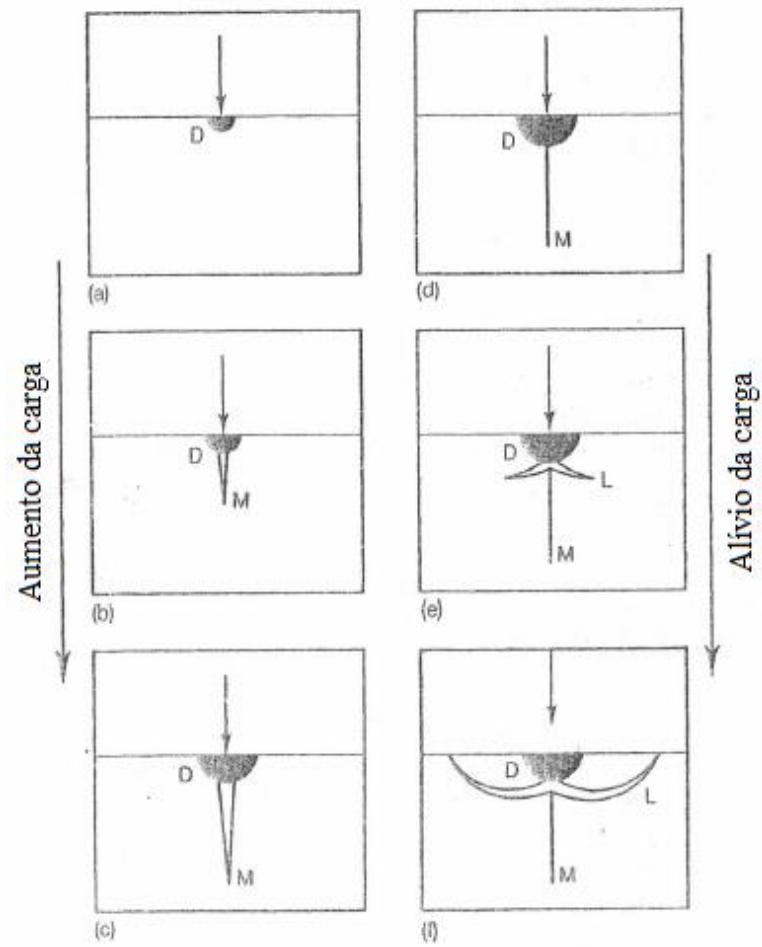


Figura 14 – Formação de trinca devido a indentação pontual. Aumentando de (a) para (c) e aliviando a carga de (d) para (f). Fonte: Adaptado Hutchings (1992, p. 151).

2.3 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO POR MANTA SINTERIZADA

O processo de deposição por manta sinterizada possui quatro etapas a saber, misturas de pós metálicas, produção do tecido, aplicação do tecido e brasagem (figura 15). A misturas de pós metálicas consiste primeiramente na seleção dos pós e posteriormente na mistura de pós metálicos juntamente com pasta orgânica e adesivos. A próxima etapa do processo consiste na produção do tecido onde o material é laminado na espessura e densidade desejada, comumente está espessura varia de 0.5 a 3.2 mm. Com a manta fabricada segue-se então para a etapa de aplicação, nesta utiliza-se adesivo de baixa temperatura. Por fim na última etapa é realizada, brasagem, onde o componente é levado ao forno a vácuo com atmosfera controlada. O revestimento formado possui excelente resistência ao desgaste, conforme apresentado na tabela 2 onde foram comparados o desempenho de vários métodos de deposição (Site TUNGSTEK DO BRASIL).

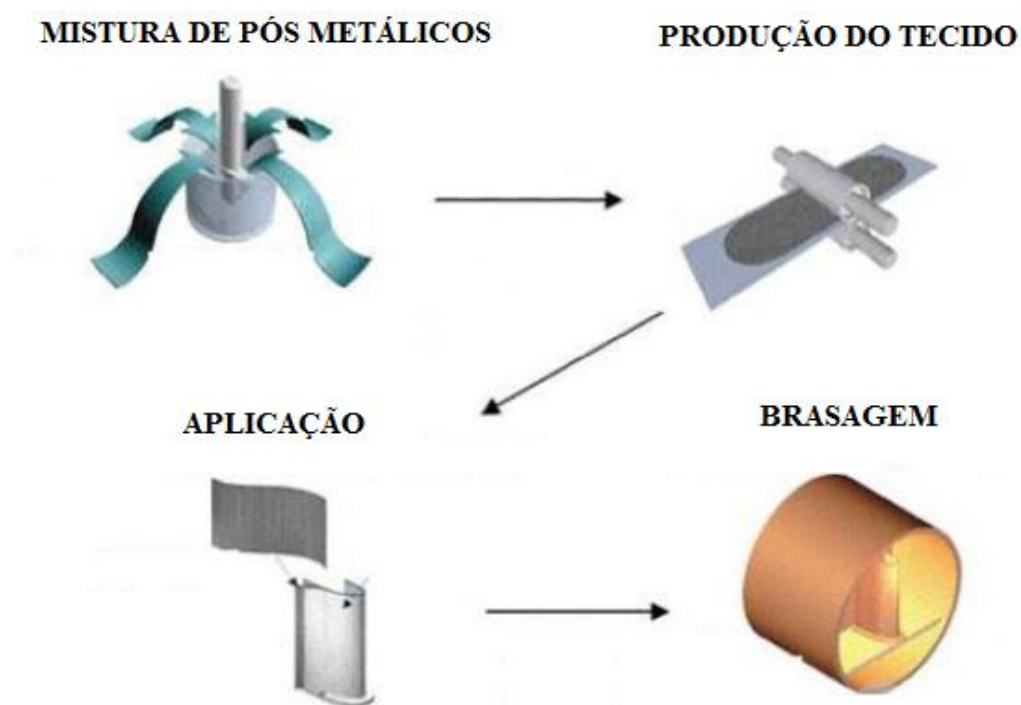


Figura 15 – Etapas do processo de deposição por manta sinterizada. Fonte: Adaptado Site Tungstek do Brasil.

Tabela 2 – Desempenho de alguns métodos de deposição comparativo a manta sinterizada. Fonte: Adaptado Site Tungstek do Brasil.

Condição	Deposição			
	Manta sinterizada WC	Aspersão térmica	Solda por sobreposição	Aspersão por plasma
Uso com geometrias complexas	Sim	Não	Difícil	Não
Resistência a abrasão	Muito alta	Moderada	Alta	Moderada
Resistência a erosão	Muito alta	Baixa para moderada	Baixa	Baixa
Resistência a corrosão	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
Resistência ao impacto	Moderada	Baixa	Moderada	Baixa
Nível de óxido	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
Resistência a temperatura	Alta	Moderada	Baixa	Moderada

2.4 COMPORTAMENTO EM EROSÃO DO REVESTIMENTO COM O WC COMO PRINCIPAL CONSTITUINTE

Neste tipo de material o carboneto de tungstênio fica disperso em uma matriz dúctil que pode ser cobalto, cromo, níquel, entre outros. Destacam-se por apresentar ligação metalúrgica superior a 480 MPa, mínima diluição e uma baixíssima porosidade (SILVA, 2013).

Segundo Silva (2013), o revestimento depositado por manta sinterizada apresenta uma baixa taxa de desgaste quando comparado ao método de deposição por PTA-P (*Plasma Transferred Arc – Powder*). O desgaste para condições de hematita a quente com ângulo de impacto 90° apresenta severidade elevada para os revestimentos processados por aspersão térmica com diferentes substratos, justificado tal fato por revestimentos por PTA-P apresentarem livre caminho médio maior, implicando em uma fração volumétrica menor (figura 16).

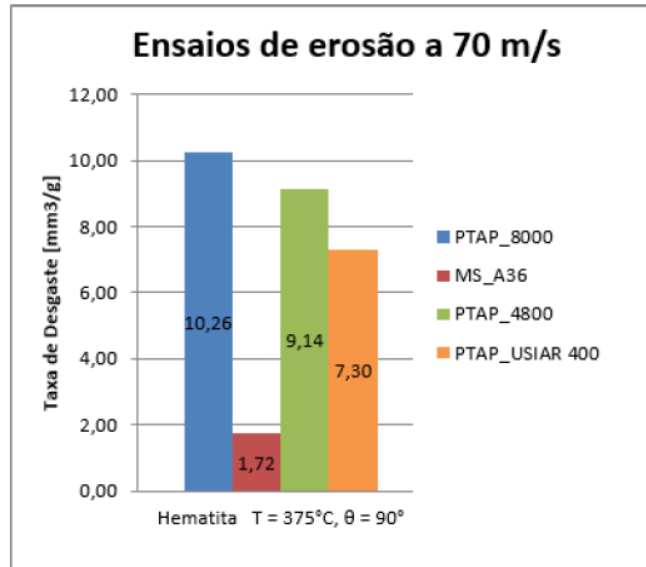


Figura 16 – Resultados dos ensaios de erosão para abrasivo hematita, ângulo de impacto 90°, velocidade 70 m/s, temperatura 375°C. Fonte: Adaptado Silva (2013, p. 54).

De acordo com Juliot (apud SILVA, 2013, p. 23) resistência a erosão nos revestimentos é proporcional a fração volumétrica de WC no ligante Co. Resultados de desgaste erosivo para o WC-1, WC-2 e WC-3, onde WC-1 tem a maior fração volumétrica de carbonetos, decrescendo para os demais, apresenta maior desgaste nos revestimentos que com menor fração volumétrica (figura 17).

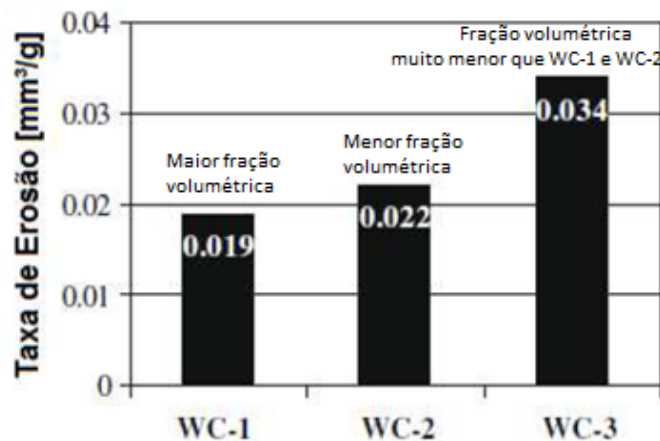


Figura 17 - Resultados do desgaste para WC-1, WC-2 e WC-3 onde WC-1 tem maior fração volumétrica de carbonetos, decrescendo para os demais. Ensaio realizado de acordo com a norma ASTM G76, velocidade 70 m/s, alumina 50 µm, ângulo de impacto 45°. Fonte: Silva, (2013, p.23).

Thakur et al (2011), estudou a influência do tamanho do carboneto na resistência ao desgaste erosivo, onde avaliou-se dois diferentes materiais, um com pó convencional

de WC utilizado no processo de deposição por HVOF e o outro um pó nanométrico também utilizado em processo de deposição por HVOF. Resultados mostraram que os revestimentos com pós manométricos tinham melhor tenacidade à fratura (K_{IC}) e maiores valores de dureza em relação ao com pós convencionais, o que caracterizou este material com maior resistência ao desgaste (figura 18).

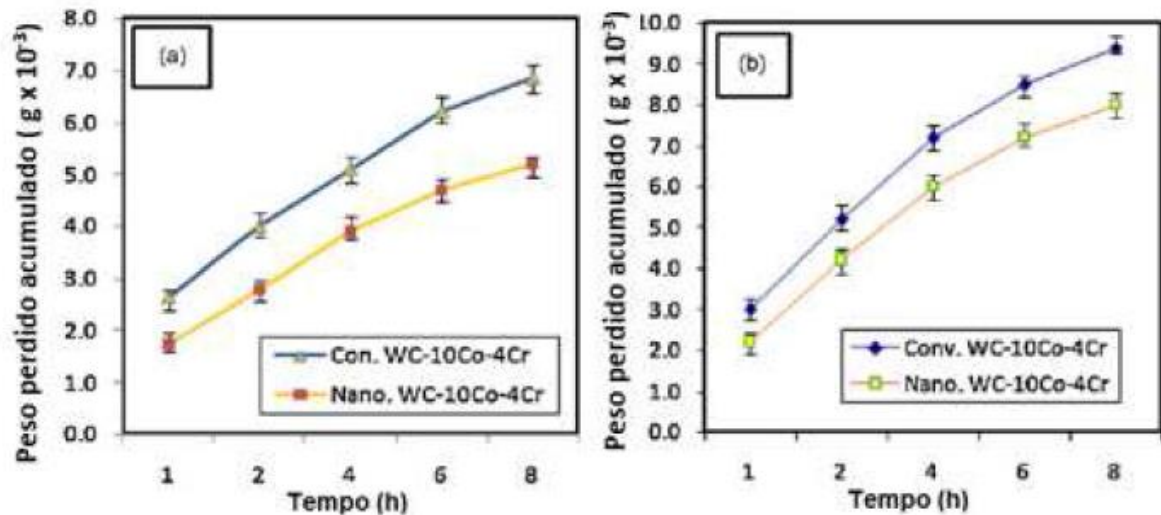


Figura 18 – Resultados dos ensaios com pós convencionais e nanométricos depositado por HVOF. Com partícula abrasiva quartzo. (a) abrasivo 103-150 µm. (b) abrasivo 350-500 µm. Fonte: Thakur et al (2011, p. 1225-1234).

Um estudo realizado em condições especificadas pela norma ASTM G-76 em diversos tipos de materiais demonstraram que o revestimento com WC depositado por manta sinterizada apresentou excelente resistência ao desgaste erosivo quando comparada aos outros materiais (figura 19) (Site TUNGSTEK DO BRASIL).

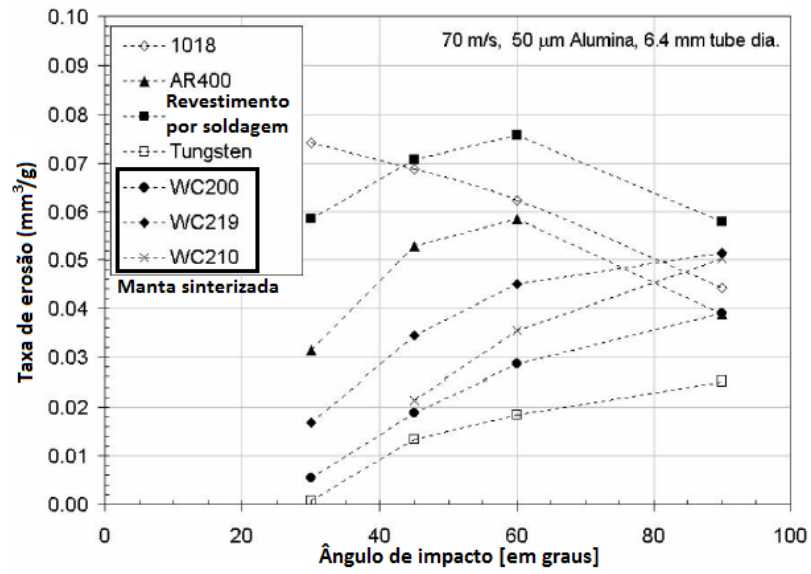


Figura 19 – Taxa de erosão para diferentes materiais e diferentes processos de deposição de revestimentos. Fonte: Adaptado Site Tungstek do Brasil.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, será abordado quais foram os métodos utilizados para a caracterização do revestimento e caracterização da partícula. Bem como os procedimentos e condição de ensaio que as amostras foram submetidas. Como este trabalho tem por objetivo, comparar o desempenho de revestimentos depositados por manta sinterizada constituído de WC-Co-Cr no desgaste erosivo, assim será confrontado em condições idênticas as realizadas nas amostras do trabalho Dissertação de Mestrado Silva, 2013.

3.1 MATERIAIS

Neste tópico serão apresentadas as características das amostras ensaiadas bem como quais são os pontos relevantes para a caracterização do revestimento e também para a caracterização das partículas. Todos os equipamentos utilizados e que foram citados neste trabalho são pertencentes ao Laboratório TRICORRMAT - Tribologia, Corrosão e Materiais ou ao Laboratório LCSM - Caracterização e Superfícies de Materiais, da Universidade Federal do Espírito Santo. Exceto para análise da composição química semi-quantitativa que foi realizada no equipamento EDS pertencente a Empresa Prysmian Group.

3.1.1 Amostra

São 11 (onze) amostras e todas dispõem das mesmas características, as amostras apresentam 0,5 mm de revestimento a base de WC-Co-Cr, depositados pelo processo de manta sinterizada cujo substrato é aço carbono. Foram recebidas previamente cortadas com 31.8 x 31.6 x 6 mm (figura 21).



Figura 21 – Amostra utilizada para o ensaio como recebida.

3.1.2 Caracterização do revestimento

Com o propósito de identificar, quantificar e caracterizar o revestimento correlacionando com seu desempenho no ensaio de desgaste realizaram-se a análise da rugosidade superficial, da microestruturados constituintes, da fração volumétrica dos carbonetos, da composição semi-quantitativa e da dureza.

A análise da rugosidade superficial foi realizada em 4 (quatro) amostras através do analisador tridimensional de superfície, marca Taylor Robson. A ASTM G-76: 2002 determina que topografia superficial das amostras apresentem uma rugosidade média menor ou igual a $1\mu\text{m}$.

A análise da caracterização microestrutural dos constituintes na superfície do revestimento foi realizada através de micrografias retiradas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo EVO 40 – ZEISS. A fim de observar morfologia, tamanho, homogeneidade dos constituintes e verificar possíveis defeitos encontrados no revestimento como trincas, porosidades e outros.

A fração volumétrica foi realizada pelo software SVRNA System (Microstructure Segmentation by Computational Vision using Artificial Neural Networks), com o objetivo de quantificar a fração volumétrica dos carbonetos dispersos na matriz.

A composição química semi-quantitativa foi realizada através da Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), a fim de identificar percentualmente a composição dos constituintes no revestimento.

Por fim para determinar a dureza dos revestimentos realizaram-se medições macro e micro. Realizou-se macrodureza, no durômetro marca Panambra pelo método Rockwell C, devido à alta dureza do revestimento composto por carboneto de tungstênio. Realizou-se também microdureza nos carbonetos como na matriz através do microdurômetro Pantec HXD – 1000TM.

3.1.3 Caracterização das partículas

A caracterização da partícula consiste em uma análise da distribuição granulométrica, pelo método sedimentação-peneiramento regido pelas normas NBR 6508 e NBR 7181, realizada no Laboratório de solos do CT I departamento da Engenharia Civil. E análise da sua morfologia, através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Condição de ensaio

A condição de ensaio prevista neste trabalho (tabela 3) seguem a norma ASTM G-76 e é idêntica à condição de ensaio realizado nas amostras do trabalho anterior à qual serão comparadas. Foram ensaiadas um total de 10 (dez) amostras, 5 (cinco) de aço 1020 para a calibração do equipamento e 5 (cinco) nas amostras de revestimento WC-Co-Cr.

Tabela 3 – Condição de ensaio.

Condição	Tipo de partícula	Velocidade de impacto	Ângulo de impacto	Temperatura do ensaio
ASTM G-76	Alumina	70m/s	90°	23°C

3.2.2 Erosímetro TRICORRMAT e procedimentos de ensaio

A preparação do equipamento foi feita para dar início ao ensaio. O fluxo de partículas que irão adentrar o escoamento, foi aferido. A partícula erodente que entra no equipamento é impulsionada por uma esteira de transporte, sendo esta esteira movimentada por um pequeno motor. A velocidade de impacto das partículas também foi medida através do método dos dois discos, em que se faz uma correlação da velocidade medida com a pressão de ar dada por um manômetro da forma U instalado na tubulação de alimentação de ar. A distância marcadas no disco é medida e correlacionada com a rotação do mesmo, sendo assim possível encontrar a velocidade das partículas. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais – TRICORRMAT e que foi validado segundo a norma ASTM G76. Os procedimentos ocorreram da seguinte maneira.

Passo 1) com o erosímetro preparado, a amostra foi limpa com acetona no ultrassom Unique Ultra Cleaner 1400 durante 10 (dez) minutos, borrifada com álcool para acelerar a secagem e secada com sopro de ar quente. Lixamento da superfície revestida porque as amostras estavam com a rugosidade superficial dentro do permitido pela norma e também por se tratar de um revestimento com alta dureza. Após limpa a amostra foi pesada na balança de precisão Sartorius CP225D. Com a amostra devidamente preparada e caracterizada foi posicionada no equipamento erosímetro em seu porta amostra com a superfície revestida normal à direção do fluxo de partículas (ângulo de 90°);

Passo 2) mede-se o fluxo de partículas para verificar se ainda é o mesmo fluxo medido inicialmente antes dos ensaios;

Passo 3) pôde-se, então, regular o diferencial de pressão no manômetro U com o mesmo valor daquele observado para determinar a velocidade das partículas. Em seguida, acionou-se o circuito PWM responsável pela inserção das partículas no escoamento. O tempo de ensaio deve ser medido com auxílio de um cronômetro, durante 10 (dez) minutos, conforme determina a norma;

Passo 4) após os 10 (dez) minutos de ensaio, a amostra é retirada, levada ao ultrassom novamente, limpada-a durante 10 (dez) minutos, em acetona e depois por mais 10 (dez) minutos, em álcool. Em seguida, borrifa se álcool na amostra para acelerar a secagem e secada com sopro de ar quente e repesada, assim encontra-se a diferença de massa, ou seja, a perda de massa por ensaio de desgaste erosivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e discussões inerentes a este trabalho juntamente com os resultados relacionado ao outro trabalho, Dissertação de Mestrado Da Silva, 2013. Sob qual serão comparados os resultados.

Como trata-se também de um trabalho comparativo, as identificações das amostras seguem: as amostras deste trabalho serão denominadas por *amostra atual*. As oriundas do trabalho de Da Silva (2013) serão aqui denominadas por *amostra trabalho Silva*.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO

4.1.1 Rugosidade superficial do revestimento

Ao caracterizar a amostra por topografia superficial (figura 22) foi extraído a rugosidade média conhecida por Ra horizontal a superfície, com valor médio entre as amostras de $0,011 \mu\text{m}$ e um desvio padrão de $0,003 \mu\text{m}$ (figura 23). Assegurando assim que a amostra apresentou um parâmetro de rugosidade dentro do especificado pela norma menor ou igual a $1 \mu\text{m}$.

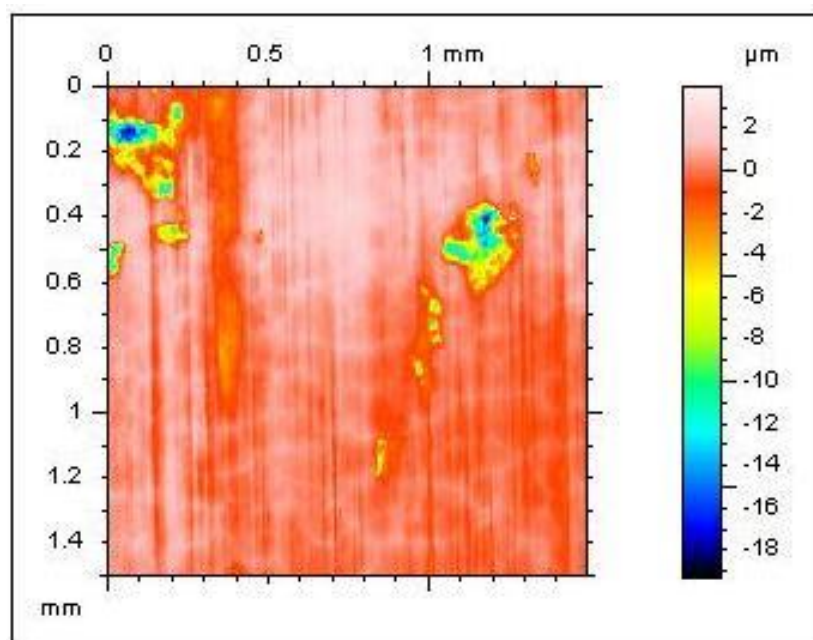


Figura 22 – Perfil topográfico da superfície de uma das amostras que será ensaiada.

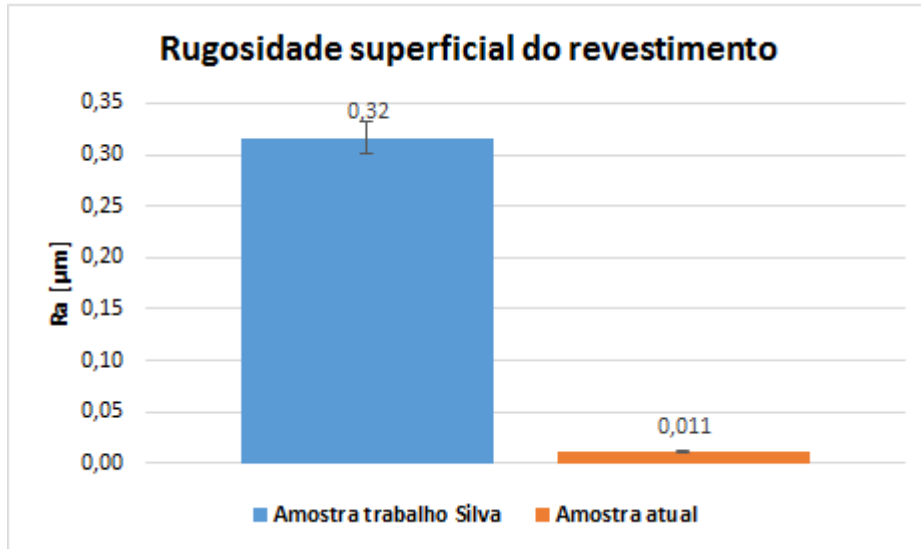


Figura 23 - Gráfico relacionado com a rugosidade superficial média do revestimento.

4.1.2 Caracterização microestrutural dos constituintes

Através de micrografias retiradas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de amostras não ensaiadas foi possível notar um material com uma estrutura extremamente defeituosa, no qual favoreceram há um baixo desempenho no ensaio. A figura 24 exibiu micrografias com os defeitos sinalizados, como heterogeneidade na distribuição dos carbonetos de tungstênio em algumas regiões, presença de muitas microtrincas, presença de alguns poros, regiões totalmente degradadas, com material facilmente desprendido.

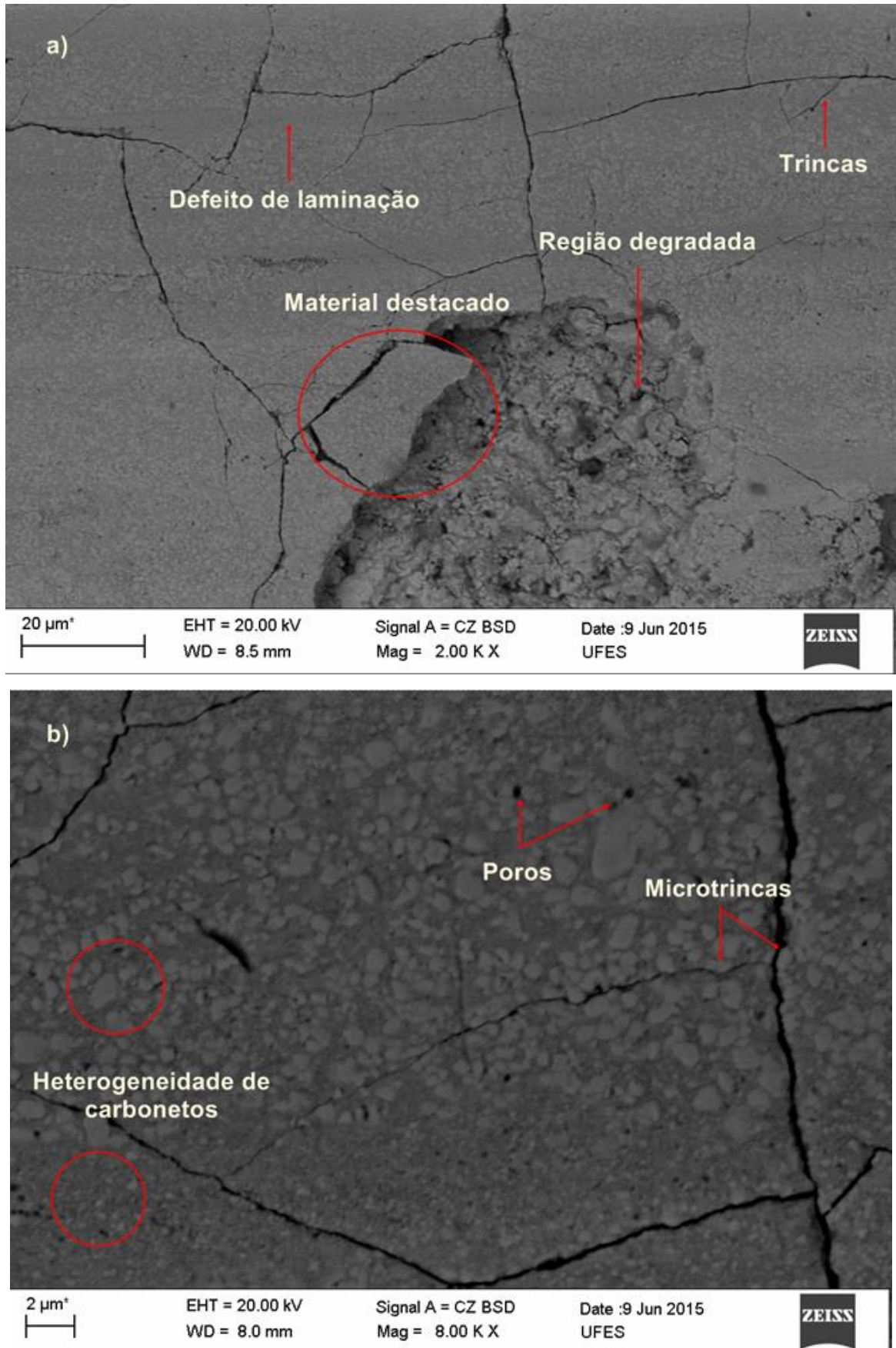


Figura 24 – Micrografia via MEV da manta sinterizada: a) com ampliação de 2000x e b) com ampliação de 8000x, e ambas as figuras com sinalizações dos defeitos.

4.1.3 Fração volumétrica dos carbonetos

A fração volumétrica dos carbonetos foi encontrada pela média entre 5 (cinco) fotos analisadas no programa SVRNA System (Microstructure Segmentation by Computational Vision using Artificial Neural Networks), apresentando um valor de 42,53% de carbonetos de tungstênio dispersos na matriz (figura 25). Um resultado não tão satisfatório quanto a do outro fabricante, onde foi informado um valor de 58%, mostrando uma maior quantidade de carbonetos.

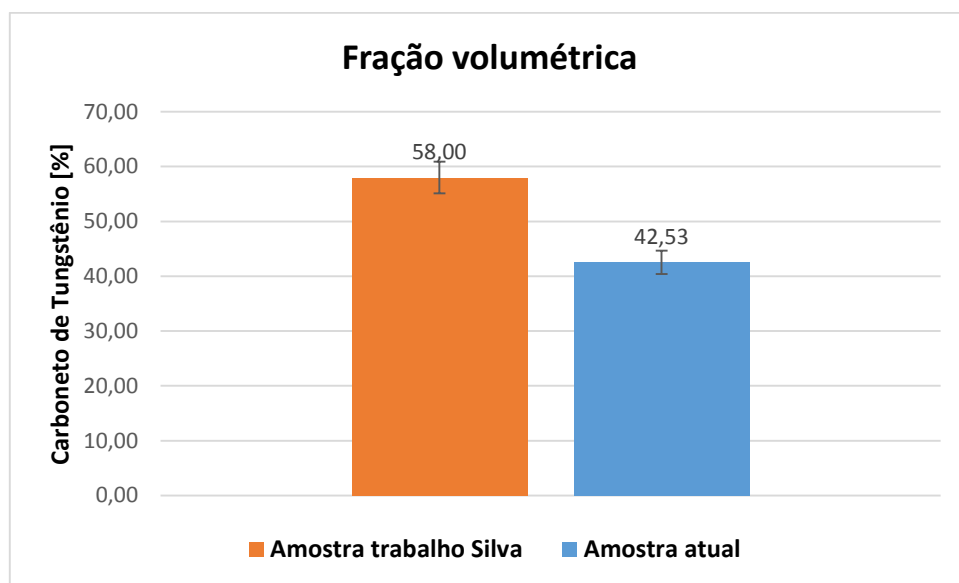


Figura 25 – Gráfico da fração volumétrica em percentagem dos carbonetos de tungstênio.

4.1.4 Composição química semi-quantitativa

A composição química semi-quantitativa apresentou 87,58% carboneto de tungstênio, 9,07% de Cobalto e 3,36% de Cromo, um resultado coerente com o esperado. A figura 26 mostra o relatório da análise química por meio do EDS global do revestimento, o EDS foi realizado antes do ensaio.

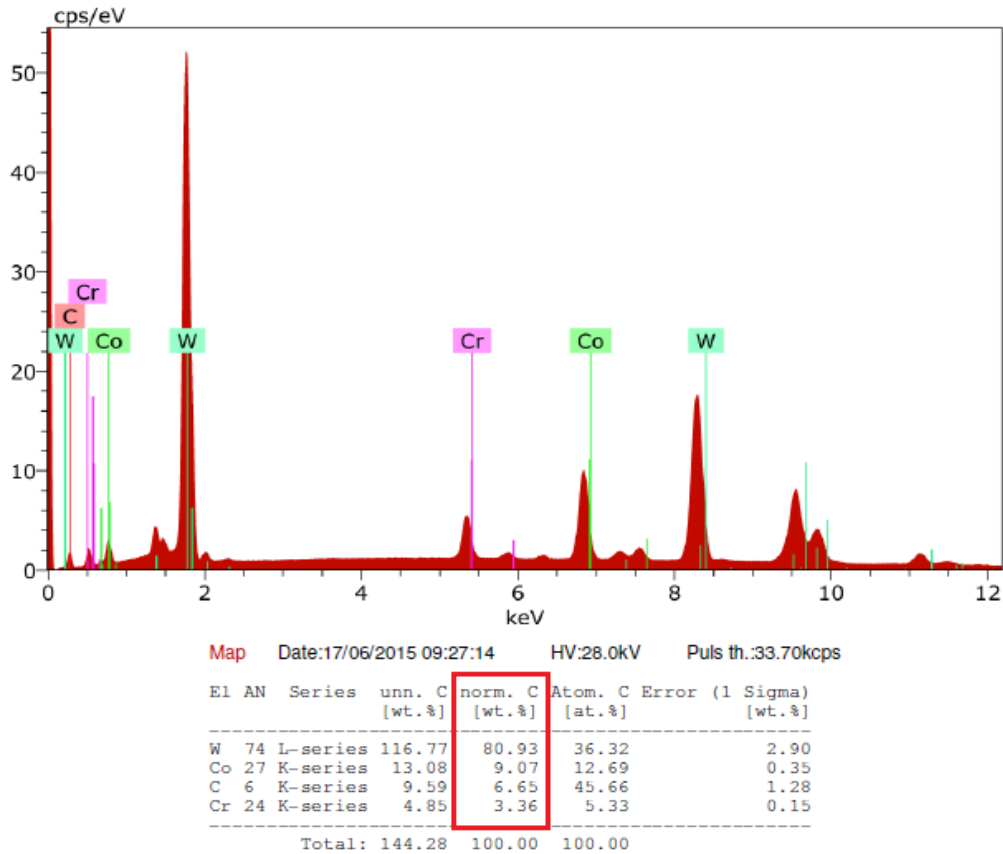


Figura 26 – Gráfico da análise química por EDS global.

4.1.5 Dureza do revestimento

No ensaio de dureza Rockwell C, o revestimento apresentou um valor baixo comparado com o apresentado no outro trabalho, como pode ser observado no gráfico representado na figura 27. Vale ressaltar que a macrodureza pode “mascarar” o resultado pois não sabemos se o indentedor atinge ao substrato devido ao revestimento ter espessura tão fina.

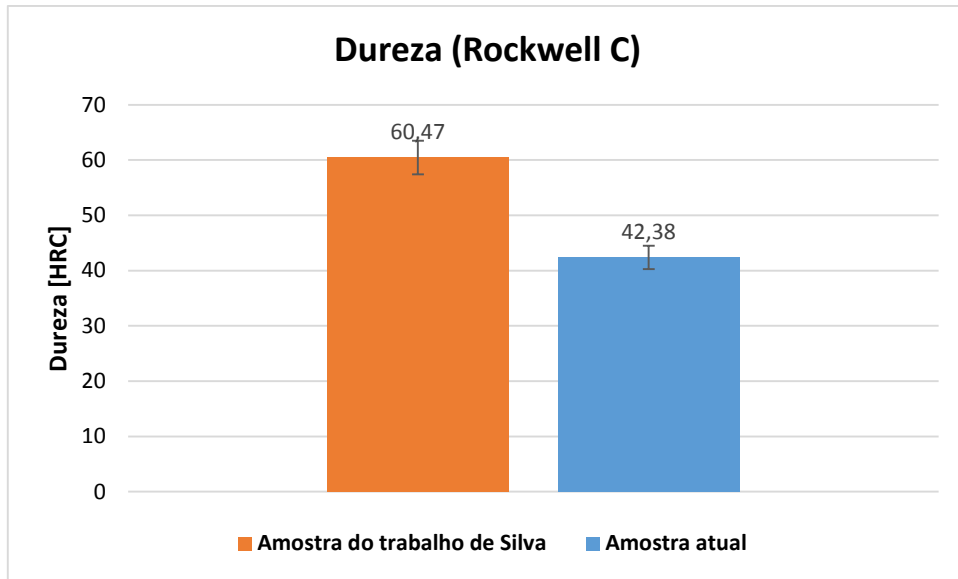


Figura 27 – Gráfico representando o resultado encontrado no ensaio de dureza Rockwell C.

Realizou-se a microdureza do revestimento com indentações tanto no revestimento, quanto no substrato, como mostra no perfil esquemático (figura 28). A microdureza obtida no revestimento foi de 700 HV0,3 e a microdureza para o substrato 450 HV0,3 (figura 29).

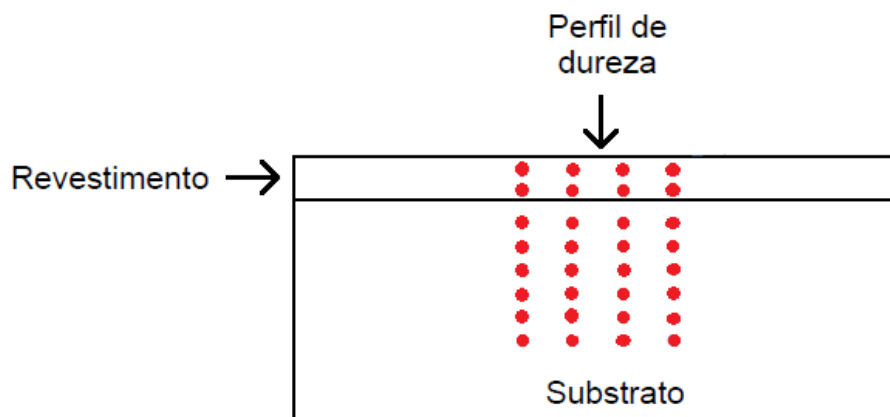


Figura 28 – Desenho esquemático do perfil transversal da micro dureza Vickers.

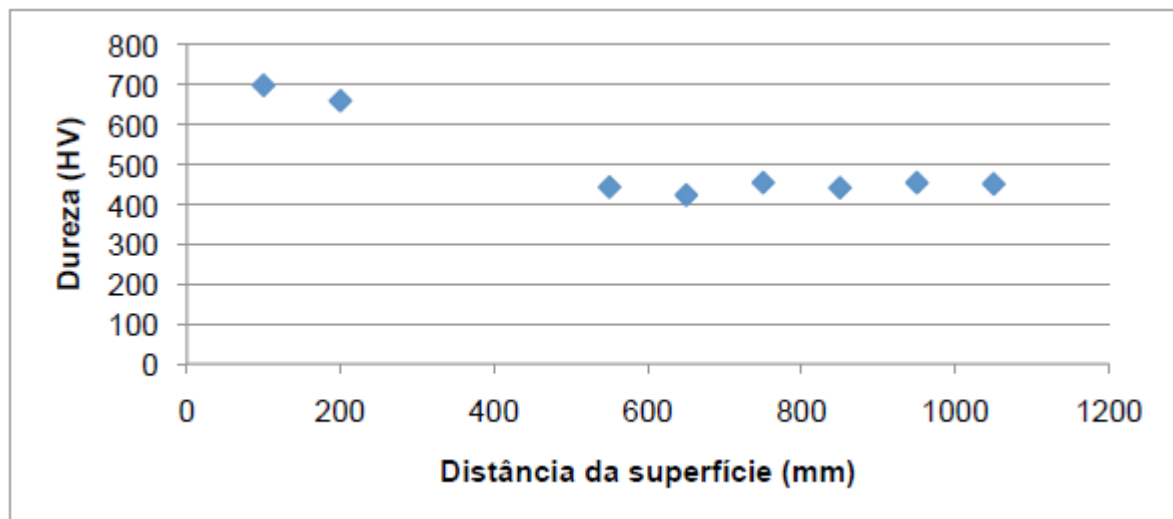
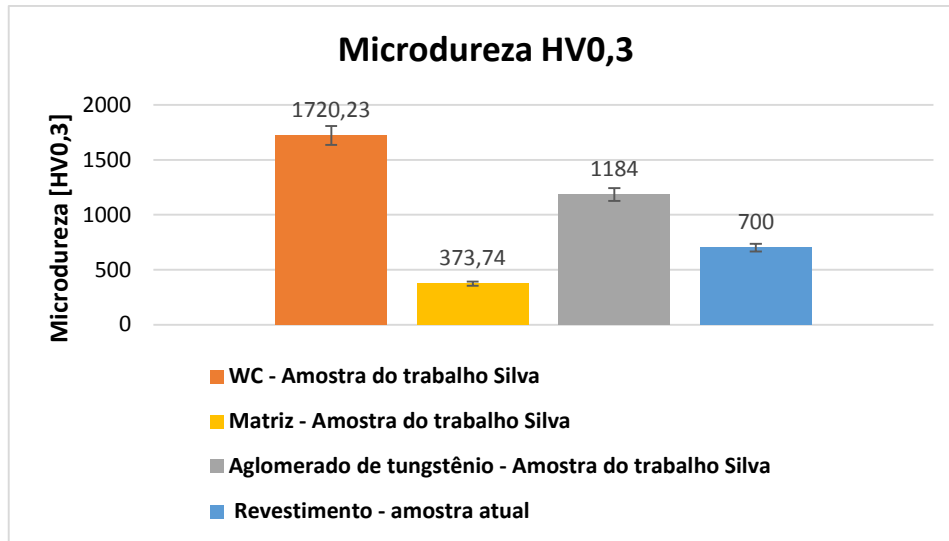


Figura 29 – Primeiro gráfico representando o resultado encontrado nos ensaios de microdureza vickers e também resultado do perfil de dureza média para carga de 300g a partir da superfície da amostra.

No entanto, haviam fissuras nas indentações (figura 30). Estas fissuras podem mascarar o resultado causando alívio de tensões e prejudicando a visualização dos vértices da indentação para a realização do ensaio de dureza, então foi realizado microdureza para uma carga mais baixa de 100 g e as fissuras não foram encontradas (figura 30), os valores encontrados foram próximo ao resultado anterior de 800HV0,1 e 470HV0,1.

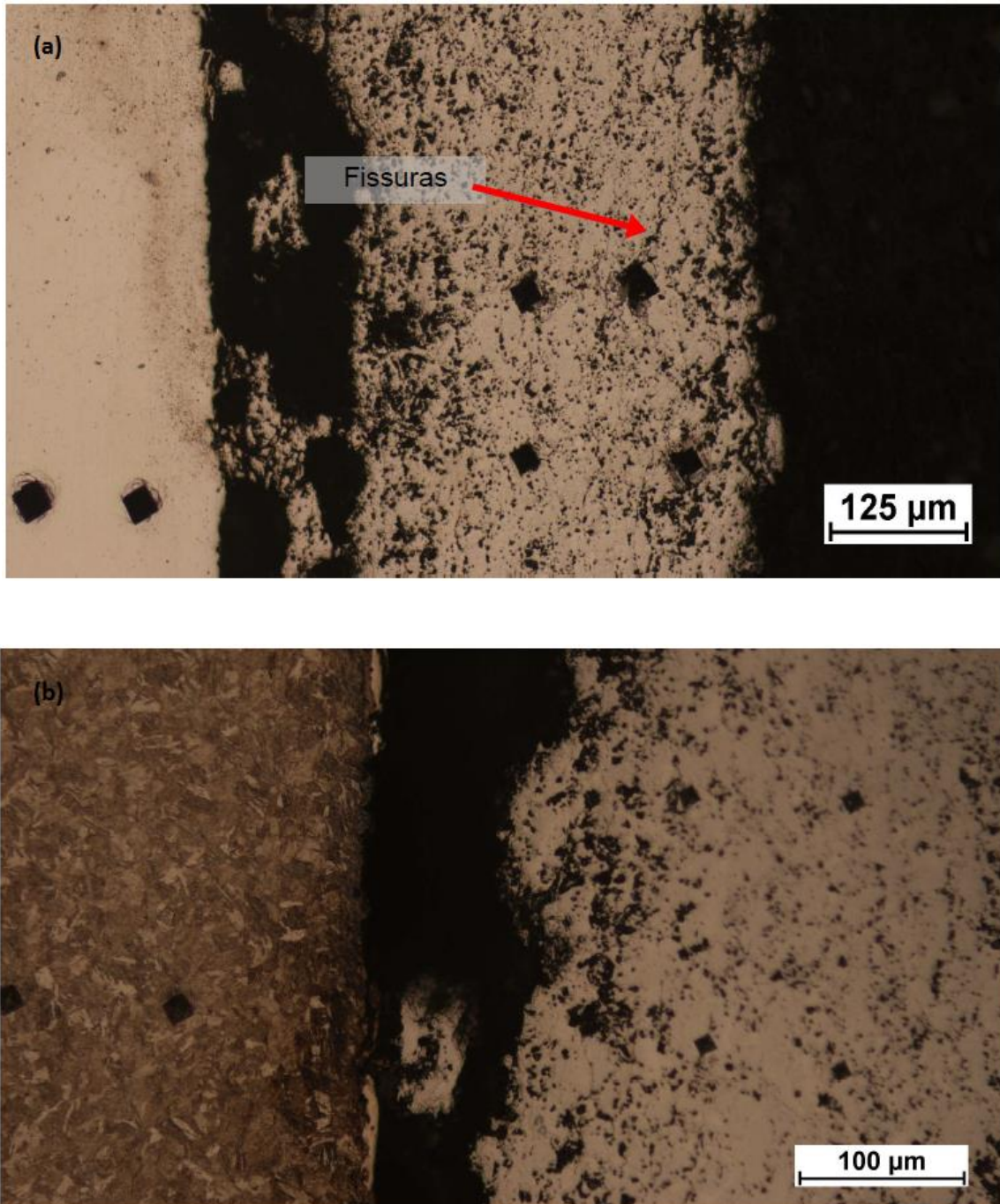


Figura 30 – Micrografia com ataque químico solução nital 10 %, da seção transversal da amostra e suas indentações de microdureza vickers. (a) indentações para carga 300g e (b) indentações para carga de 100g.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA PARTÍCULA

4.2.1 Morfologia da partícula

Para analisar a morfologia das partículas de alumina foram feitas micrografias no MEV das partículas não ensaiadas e das partículas ensaiadas, conforme figura 27. Após o ensaio, sua forma apresentou arestas fragmentadas.

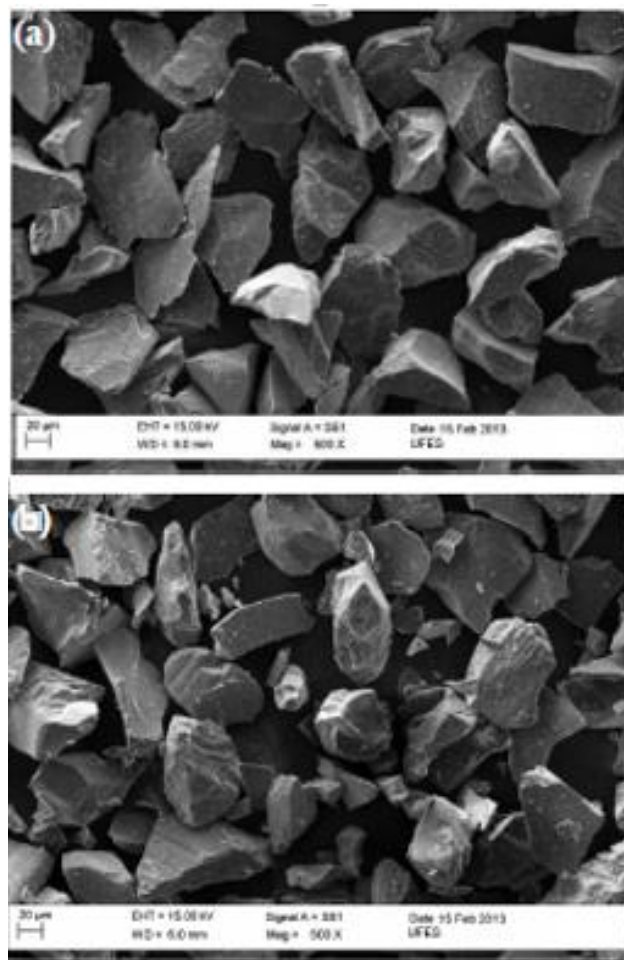


Figura 31 - Microscopia feita nas partículas antes e após a realização dos ensaios. (a) alumina antes do ensaio, (b) alumina após o ensaio. Fonte: Silva (2013, p. 44).

4.2.2 Distribuição granulométrica

O resultado da distribuição granulométrica, neste caso realizado pelo método sedimentação – peneiramento, que fornece a faixa de diâmetro médio do tamanho da

partícula. Pode ser observado que 80% da alumina está com diâmetro entre um intervalo entre 50 - 75 μm (figura 32).

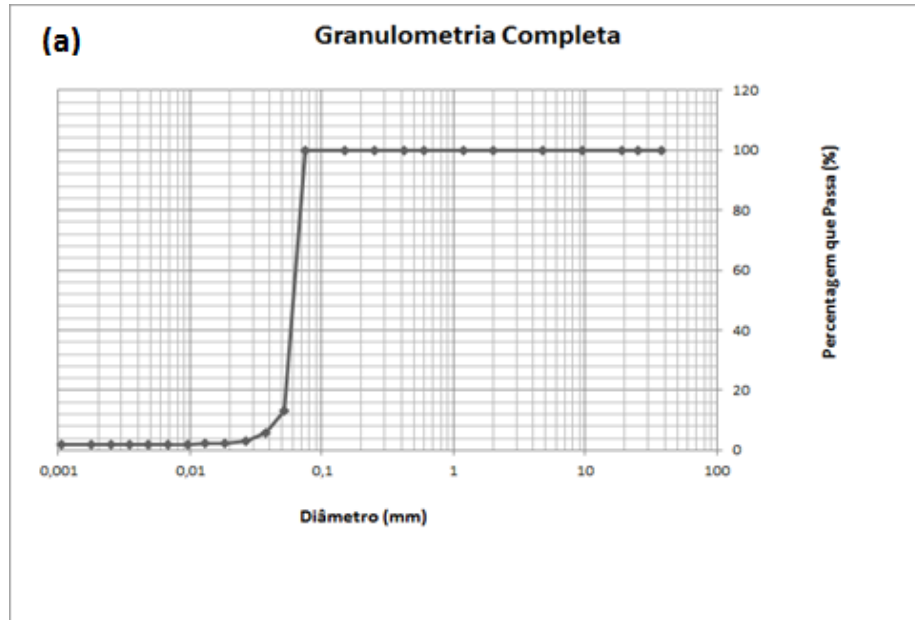


Figura 32 – Representação em escala logarítmica do diâmetro das partículas da alumina.

4.3 RESULTADO DO ENSAIO

Antes de realizarmos o ensaio com as amostras pertinentes a este trabalho, foi realizado ensaio de calibração do erosímetro com 5 (cinco) amostras de aço 1020 de acordo com o especificado na norma ASTM G-76. Observou-se que os valores da taxa de desgaste encontrado estava dentro do especificado (figura 33), após isto foi iniciado os ensaios.

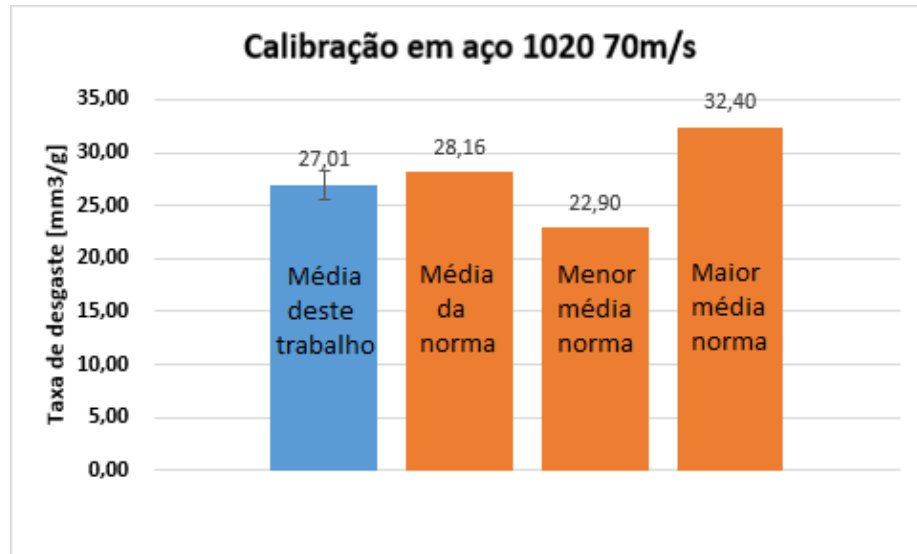


Figura 33 – Gráfico taxa de desgaste da calibração do erosímetro.

Para a condição determinada, a taxa de desgaste foi duas vezes maior comparado ao ensaio do revestimento similar realizado em 2013 (figura 34). A ocorrência deste fato está ligada a menor fração volumétrica de carbonetos dispersos na matriz e ao pequeno tamanho do carboneto presentes na amostra deste trabalho, a figura 35 exhibe a micrografia via MEV das duas amostras onde pode ser comparado esta diferença microestrutural. Segundo Juliot (apud SILVA, 2013, p. 23) a resistência à erosão nos revestimentos é proporcional à fração volumétrica de WC no ligante Co (figura 36).

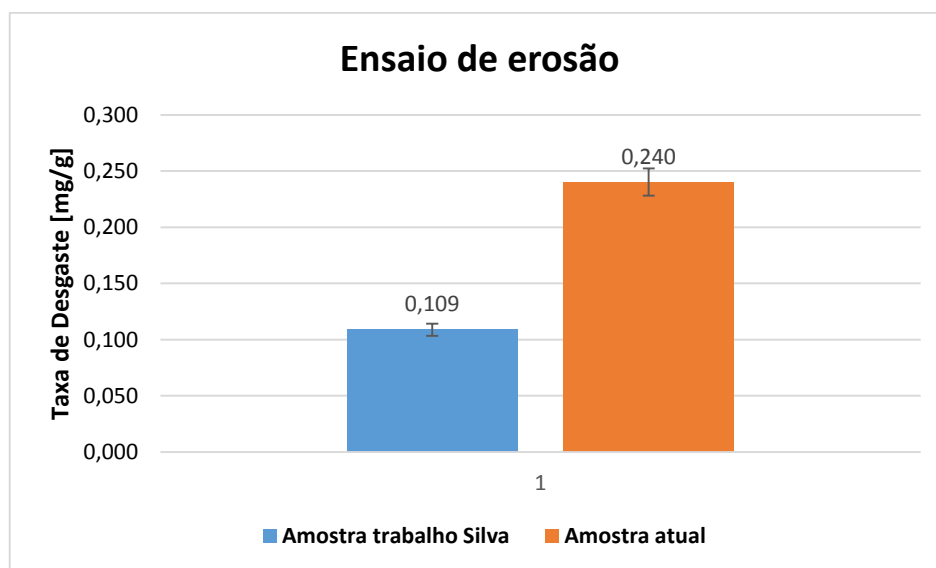


Figura 34 – Taxa de desgaste da condição de ensaio, ambas foram feitas com alumina em temperatura ambiente.

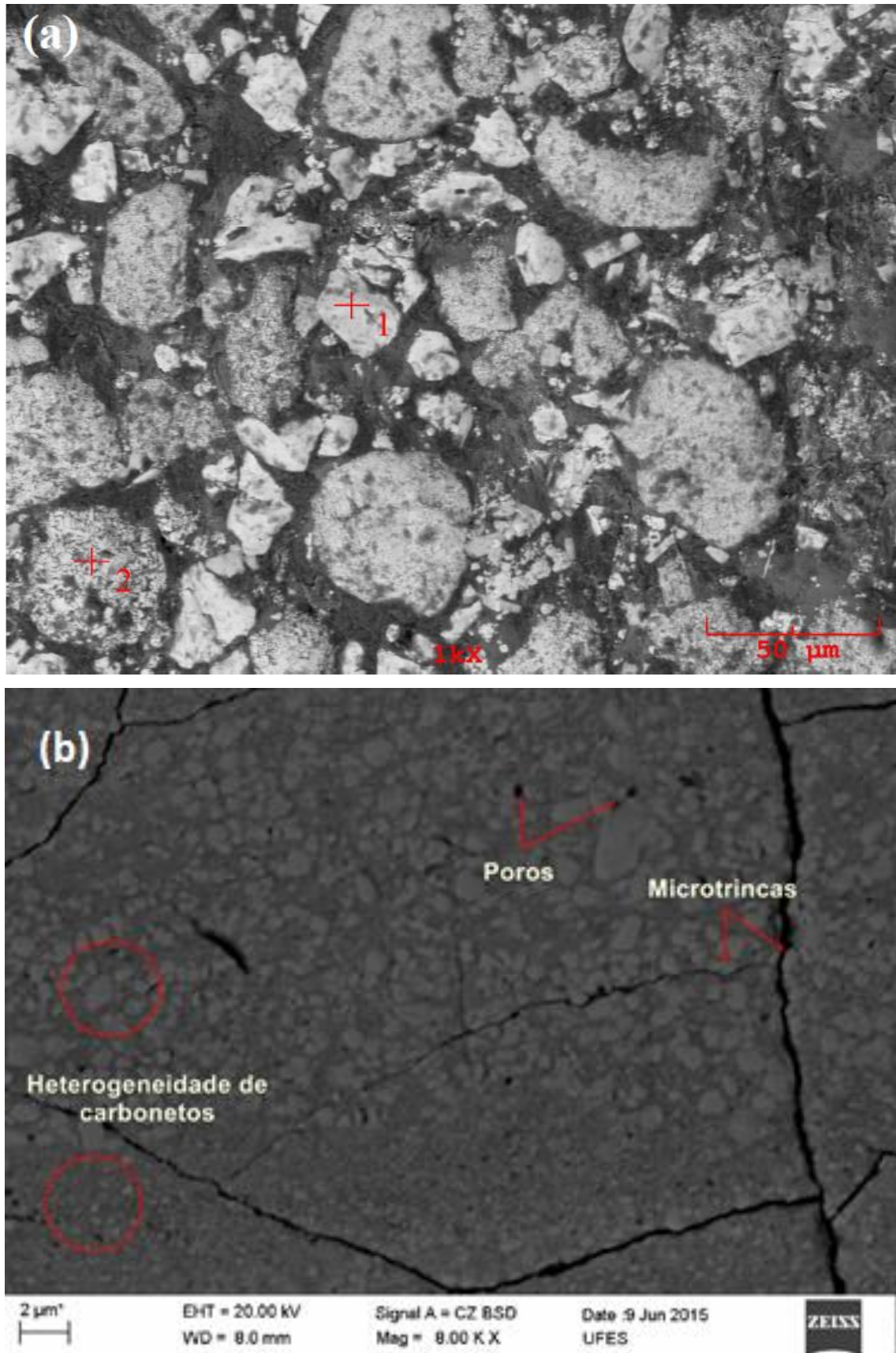


Figura 35 – Micrografias via MEV dos revestimentos mostrando a diferença da distribuição do carboneto na matriz. (a) Manta sinterizada da amostra do trabalho anterior amplitude 1000x. Fonte: Silva, 2013. (b) Manta sinterizada da amostra do trabalho atual, como os carbonetos são bem menores a diferença de amplitude das imagens foi necessária.

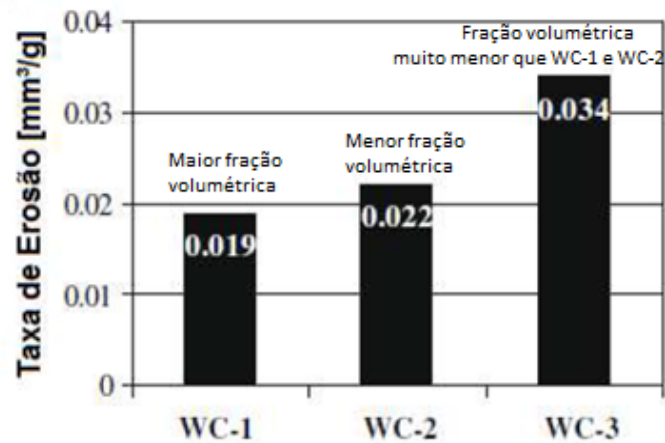
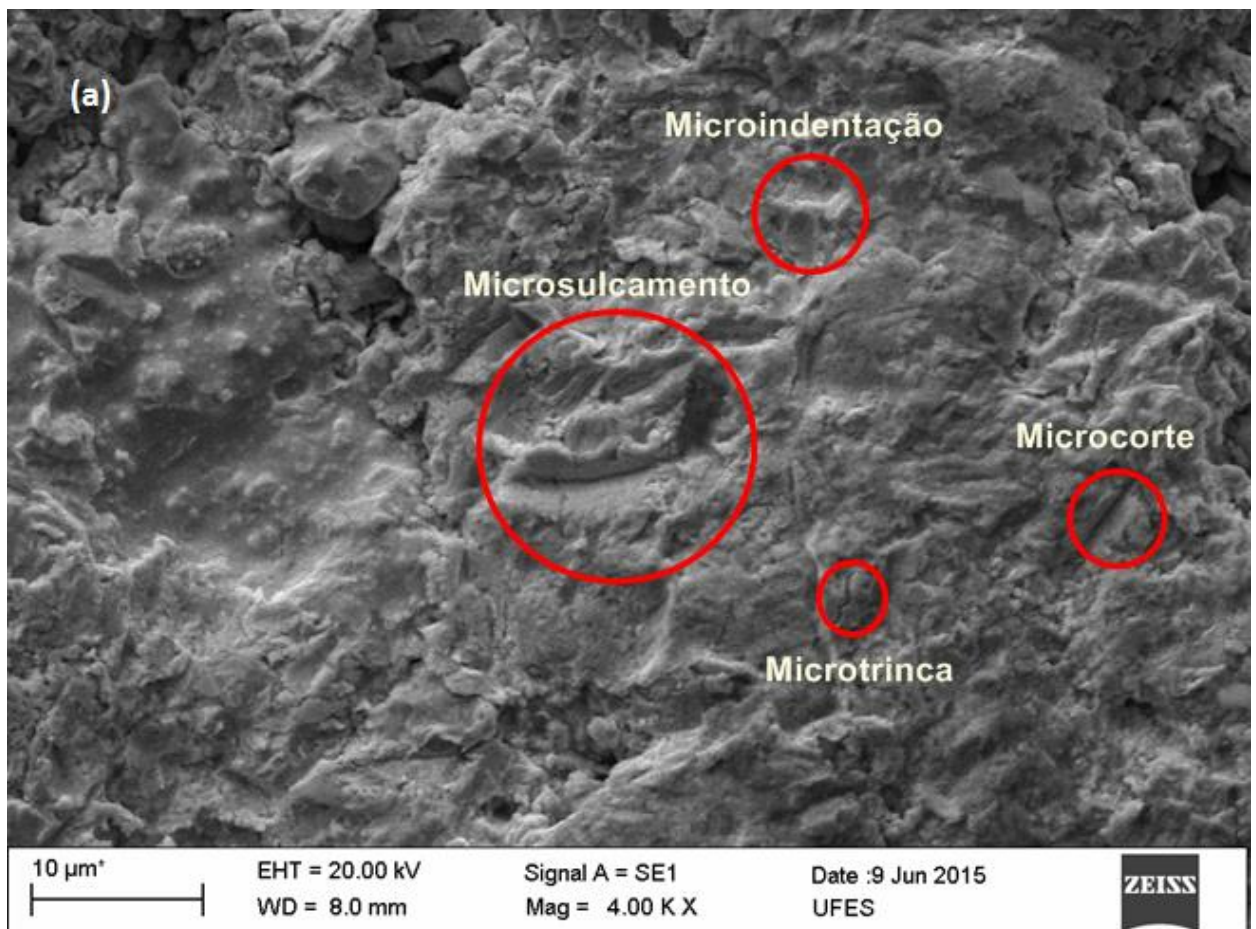


Figura 36 – Resultado do desgaste para WC-1, WC-2 e WC-3 onde WC-1 tem maior fração volumétrica de carbonetos, decrescendo para os demais. Ensaio realizado de acordo com a norma ASTM G76, velocidade 70m/s, alumina 50 μm , ângulo de impacto 45°. Fonte: Silva, 2013.

A matriz exposta torna-se vulnerável. Desta forma a partícula de alumina com maior dureza gera inúmeros microcorte, microindentações, microsulcamento no ligante e chegando até mesmo a arrancar os carbonetos (figura 37).



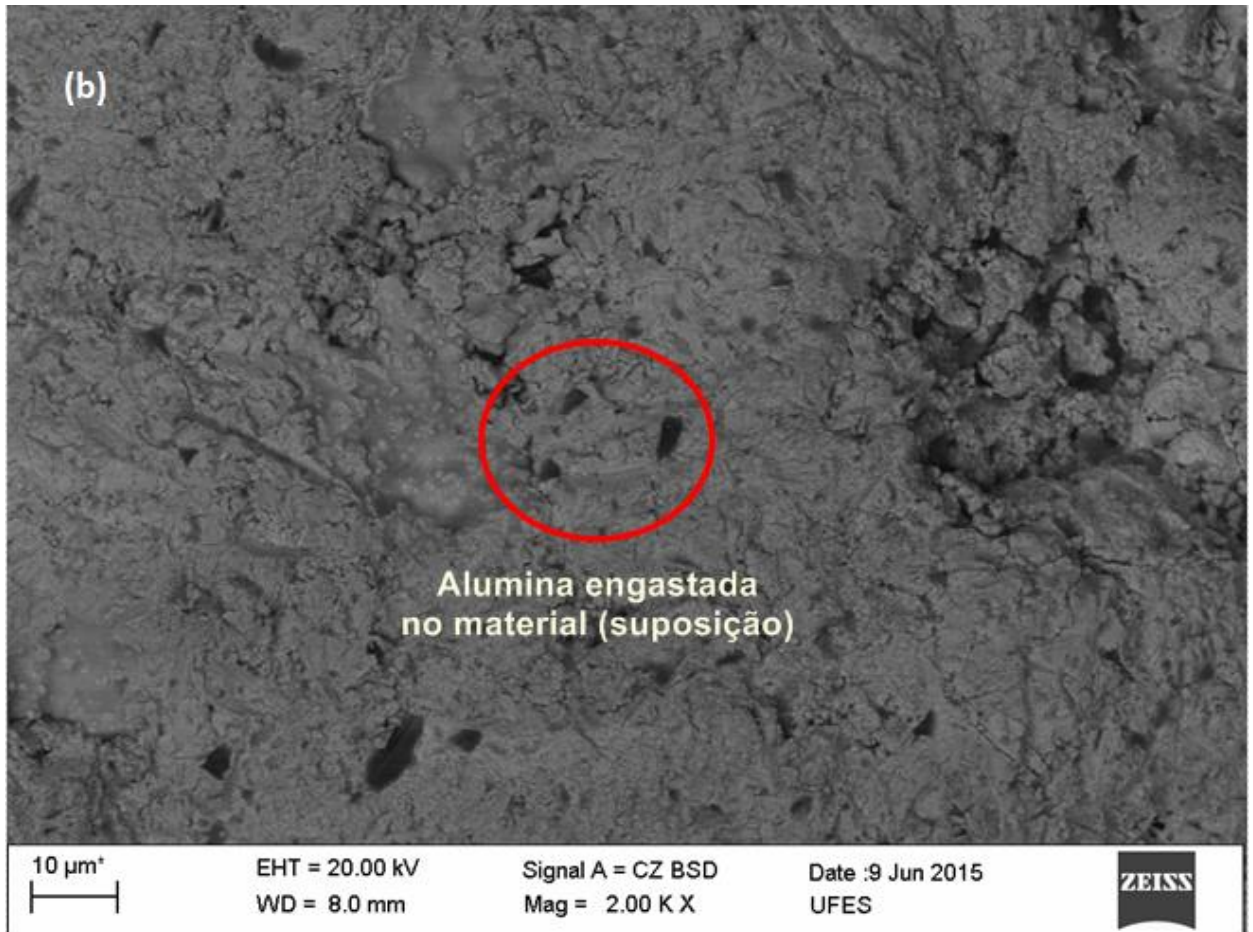


Figura 37 – Micrografias via MEV do revestimento após ensaio.

A fim de investigar outros motivos para a taxa de desgaste apresentar-se tão alta, já que se trata de revestimentos similares, realizou-se uma análise metalográfica no revestimento. Seguindo os procedimentos convencionais de preparação metalográfica com corte, lixamento, polimento e ataque químico usando o reagente nital 10%. Observou-se que o revestimento apresentava características que tenderiam a um desgaste realmente severo.

Foi constatado que o revestimento apresentava uma macrodureza menor que o revestimento do trabalho anterior como foi visto no tópico Caracterização do revestimento, outro ponto importante a ser citado é a baixa adesividade ao substrato, onde nota-se uma interface acometida de vazios, uma espessura inferior a 500 µm e poros como pode ser visto na figura 38.

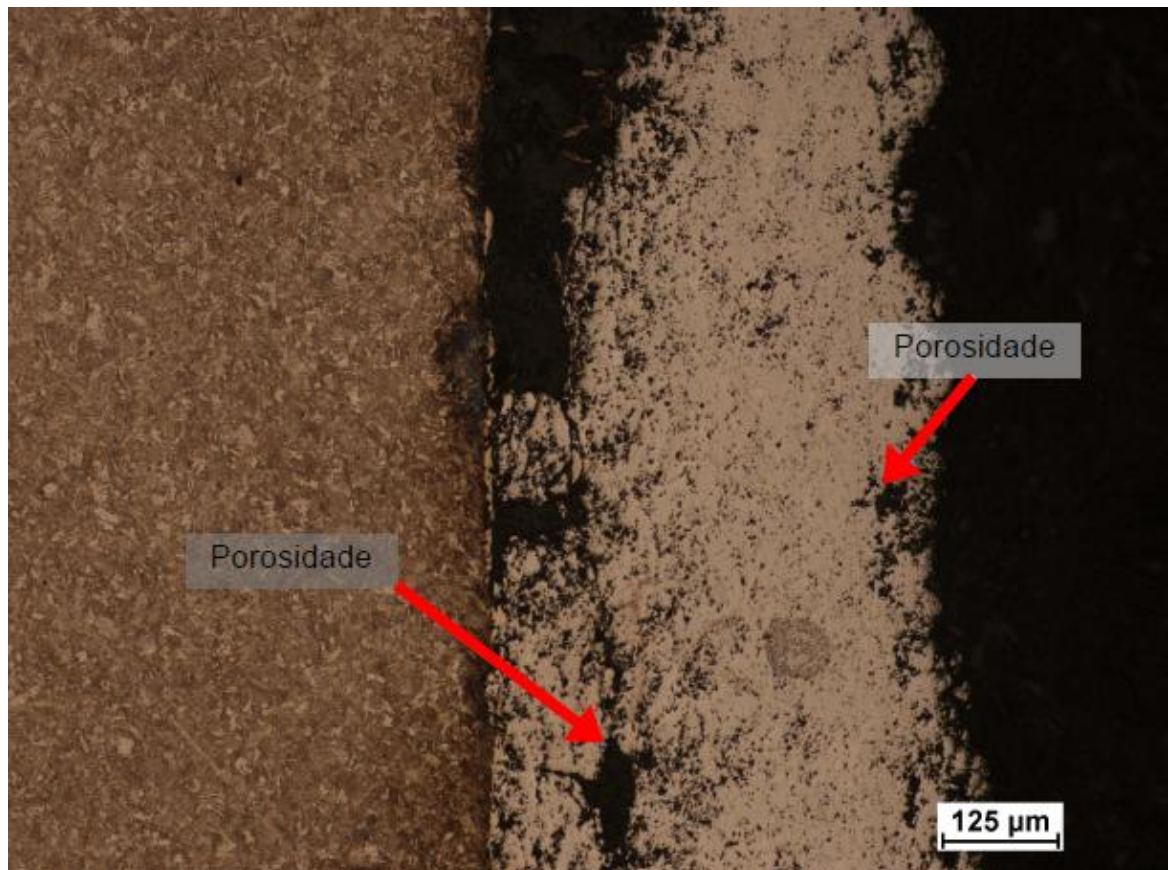
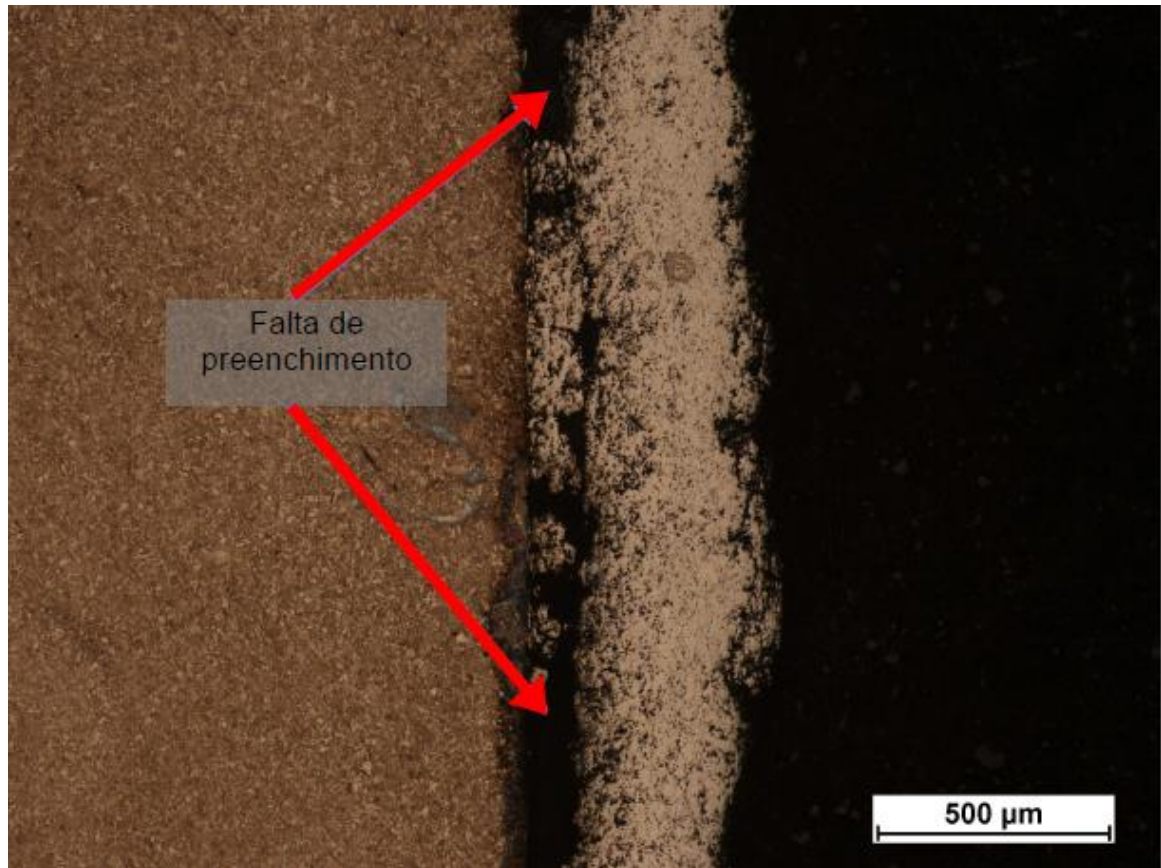


Figura 38 – Micrografia da seção transversal do revestimento.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho através da utilização do erosímetro, foi apresentado o estudo do desgaste erosivo por partículas sólidas em revestimento WC-Co-Cr depositado pelo processo de manta sinterizada. Utilizando um erosímetro validado pela Norma ASTM G76. Observou-se nos ensaios que a microestrutura influencia no desgaste erosivo.

Alicerçado nos resultados do ensaio foi possível concluir que a taxa de erosão apresentou um valor duas vezes maior ao comparado com ensaio anterior de um revestimento similar. Justifica-se tal fato devido a fração volumétrica de carbonetos dispersos na matriz ser menor, implicando em uma maior taxa de desgaste.

Outro ponto justificável foi a análise metalográfica, que constatou baixa macrodureza e uma estrutura de revestimento tênue com baixa adesividade na interface do substrato, apresentando várias regiões sem preenchimento, uma espessura inferior a 500 μm e presença de poros. Ao analisar o revestimento pelo MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) irregularidades no revestimento também foram encontradas, uma superfície coberta por trincas e com heterogeneidade de carbonetos no ligante.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G76: Conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jet.** West Conshohocken: Pennsylvania, 2002.
- 2 CZICHOS, H. and HABIG, K. H. (1992). *Tribologie Handbuch - Reibung Und Verschleis.* Braunschweig, Vieweg Verlag.
- 3 DOWNSON, D. **History of Tribology.** Longman, 1998.
- 4 EWALD, H.; **Estudo do Desgaste por Erosão de Ligas Metálicas Utilizadas em Sistemas Mecânicos de Plantas Siderúrgicas.** Vitória: Dissertação, PPGEM, Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
- 5 FINNIE, Ian. **Some reflections on the past and future of erosion.** *Wear*, 1995. p. 1-10.
- 6 HUTCHINGS, I.M. **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials.** London: Arnold, 1992.
- 7 HAUGEN, K. et al. **Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves.** *Wear*, Vol. 186-187, 1995. p. 179-188.
- 8 JOST, H. P. (1990). "Tribology - Origin and Future." *Wear* 136(1): 1-17.
- 9 ERDEMIR, A. (2009) "Innovative Design Concepts for the Development of Superhard and Low-friction Nano-composite Coatings" Plenary lecture, 64° Congresso Annual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- 10 SILVA, L.R.; **Estudo do desgaste por erosão a quente de revestimentos WC-Cr-Co.** Vitória: Dissertação, PPGEM, Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.
- 11 SUCKLING, M.; ALLEN, C. **Critical variables in high temperature erosive wear.** *Wear*, v. 203-204, p. 528-536, 1997.
- 12 SUNDARARAJAN, G.; ROY, M. **Solid particle erosion behavior of metallic materials at room and elevated temperatures.** *Tribology International*, 1997. p. 339-359.
- 13 SURESH BABU, S.; SUNDARARAJAN, G; BIKRAMJIT BASU. **The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings.** *Wear*, 2011. p. 903-913.
- 14 SURESH BABU, S.; SUNDARARAJAN, G; BIKRAMJIT BASU. **The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings.** *Wear*, 2011. p. 903-913.

15 **TUNGSTEK DO BRASIL. Processos de fabricação – Carbetos de Tungstênio em placas de desgaste e em manta.** Texto disponibilizado em 30 de Maio 2015. <<http://tungstek.com.br/site/>>. Acesso em: 30 de Maio 2015.

16 THAKUR, L. et al. **An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC-CoCr coatings.** Applied Surface Science, Vol. 258, 2011. p. 1225-1234.

17 ZUM GAHR, K.H. **Microstruture and wear of materials.** Netherlands: Elsevier, 1987.