



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**HEITER EWALD**

**ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE  
LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS  
MECÂNICOS DE PLANTAS SIDERÚRGICAS**

VITÓRIA

2011

HEITER EWALD

# **ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS MECÂNICOS DE PLANTAS SIDERÚRGICAS**

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 de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Cherlio Scandian.

VITÓRIA

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

E94e Ewald, Heiter, 1982-  
Estudo do desgaste por erosão de ligas metálicas utilizadas  
em sistemas mecânicos de plantas siderúrgicas / Heiter Ewald. –  
2011.  
93 f. : il.

Orientador: Cherlio Scandian.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Erosão. 2. Aço. 3. Ligas (Metalurgia). 4. Coifa de  
Convertedor LD. I. Scandian, Cherlio. II. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621

---

Heiter Ewald

# **ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS MECÂNICOS DE PLANTAS SIDERÚRGICAS**

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 de Materiais e Processos de Fabricação.

Aprovada em 16 de Dezembro de 2011.

## **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Profº. Dr. Cherlio Scandian**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Profº. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Profº. Dr. Adonias Ribeiro Franco Júnior**  
**Instituto Federal de Educação, Ciência e**  
**Tecnologia do Espírito Santo**

A memória de meu pai, Hermes Ewald, que me ensinou a seguir os caminhos do Senhor, que me conduziu a mais esta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato a muitas pessoas que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho de maneira direta ou indireta.

Aos colegas de mestrado pelo apoio durante todo o percurso. Aos professores e servidores do PPGEM por proporcionarem as condições para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Ifes – Aracruz pelo apoio e compreensão.

A Capes pelo apoio financeiro.

Ao mestrando Luiz Rafael Resende da Silva pelo apoio no desenvolvimento do erosímetro do TRICORRMAT – Ufes e na realização dos ensaios.

Ao grande amigo Felipe de Oliveira Palácio pelo apoio durante todo o período de mestrado bem como pela execução de diversas micrografias via MEV. Ao professor Drº Flávio José da Silva pela execução de micrografias via MEV bem como pelas dicas.

Ao professor Drº Marcelo Camargo Severo de Macêdo pelo eu interesse e valiosas dicas.

Ao professor Drº Cherlio Scandian pelas oportunidades a mim dispensadas e pelas preciosas orientações.

A minha mãe Clenda pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

A minha esposa Ana Joice pelo apoio, confiança e paciência durante as ocasiões em que estive ausente devido à dedicação a esta dissertação.

Principalmente a Deus, que sempre proporcionou as mais ricas benções em minha vida.

## RESUMO

A erosão por partículas sólidas é um sério e continuado problema em diversas aplicações industriais. Diversos sistemas mecânicos são expostos continuamente a ambientes onde há partículas duras dotadas de velocidade significativa que acabam por impactar e degradar os materiais ali empregados. Este trabalho visa estudar três materiais candidatos a serem utilizados em coifas de convertedores. O estudo baseou-se, inicialmente, nas condições apresentadas pela norma ASTM G 76 – 02 que rege a utilização de erosímetros a jato de ar – equipamento utilizado. Essas condições são: velocidades de 30 e 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Para aproximar este estudo das condições reais de coifas de convertedores, também se realizaram ensaios com ângulo de impacto de 30°. Os materiais utilizados foram o aço A36, o aço 15Mo3 e o Inconel 625. Os resultados dos testes confirmaram diversos conceitos e comportamentos já descritos nas literaturas sobre erosão e, ainda, apresentaram uma interessante variação no desempenho em desgaste do aço 15Mo3 com a variação da velocidade de impacto. Este comportamento foi atribuído aos diferentes módulos de tenacidade dos materiais.

## **ABSTRACT**

The solid particle erosion is a serious and continuing problem in many industrial operations. Several mechanical systems are continuously exposed to environments where there are hard particles travelling at substantial speed. These particles impact and degrade the materials used there. This work aims to study three candidate materials for use in coil converters. The study was based initially on conditions presented by ASTM G 76-02 which governs the use of air jet impingement erosion rig - equipment used. These conditions are: speeds of 30 and 70 m/s and impact angle of 90°. To approach this study of actual conditions of coil converters, also conducted tests on the impact angle of 30°. The materials used were A36 steel, steel 15Mo3 and Inconel 625. The test results confirmed several concepts and behaviors already described in the literature on erosion and also presented an interesting variation in performance wear steel 15Mo3 with the variation of impact velocity. This behavior was attributed to the different mechanical energy density of the materials.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2. 1 - Influência do material da partícula na taxa de erosão, para erosão de alumina cerâmica sinterizada por sílica como ligante, alumina e carboneto de silício, de 125-150  $\mu\text{m}$  de diâmetro, com ângulo de impacto de  $90^\circ$ . ..... 19
- Figura 2. 2 - Taxa de erosão em função da dureza da partícula erodente em ângulo de  $90^\circ$ : (a) 25 m/s e (b) 45 m/s. Ressalta-se que as escalas para a taxa de erosão para as figuras “a” e “b” são diferentes. ....21
- Figura 2. 3 - Micrografias via microscópio eletrônico de varredura de diferentes formas de partículas erodentes: a) Esferas de vidro (63 – 106  $\mu\text{m}$ ); b)  $\text{SiO}_2$  (106 – 125  $\mu\text{m}$ ); c)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (106 – 125  $\mu\text{m}$ ). .....22
- Figura 2. 4 – Diagrama esquemático apresentando a influência da forma das partículas na taxa de erosão. Na curva inferior o material foi impactado com esferas de vidro já na curva superior foram utilizadas como partículas erosivas vidro moído. ...22
- Figura 2. 5 - Taxas de desgaste do cobre sobre condições de abrasão de dois e três corpos e na erosão, devido a partículas de carbeto de silício de diferentes tamanhos. ....23
- Figura 2. 6 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de erosão do aço inoxidável AISI 304 SS em temperatura de 923 K. ....24
- Figura 2. 7 - Dependência típica da erosão (definida como perda de massa por unidade de massa de partículas que impactam) com o ângulo de impacto. ....27
- Figura 2. 8 - Predição da variação do volume removido com ângulo de impacto. ....27
- Figura 2. 9 - Efeito da dureza do material erodido na resistência a erosão. ....30
- Figura 2. 10 - Perfil de microdureza Knoop apresentado pelo latão recozido (0%CW) e pelo latão com 70% de trabalho a frio (70%CW) nas velocidades de 20 e 50 m/s. ....31
- Figura 2. 11 - Variação da taxa de erosão para algumas ligas. ....33

Figura 2. 12 - Efeito da temperatura na taxa de erosão de alguns metais e ligas.....	34
Figura 2. 13 - Seção transversal no local dos impactos de partículas duras em um metal dúctil, apresentando formas típicas. 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 que gira para frente; (c) corte tipo II por uma partícula angular que gira para trás. ....	36
Figura 2. 14 - Foto de uma coifa utilizada em convertedor LD. ....	41
Figura 2. 15 - Perfil de velocidades no interior da coifa de diâmetro de 4330 mm utilizada na ArcelorMittal Tubarão. ....	42
Figura 2. 16 - Desenho esquemático da coifa em estudo apresentando as duas principais regiões de desgaste. ....	42
Figura 3. 1 - Desenho esquemático do erosímetro TRICORRMAT/UFES .....	45
Figura 3. 2 - Mecanismo dos dois discos utilizados para medição da velocidade das partículas que irão impactar a amostra. Em "A" apresenta-se detalhe da marcação. ....	46
Figura 3. 3 – Em “A” o porta-amostra e em “B” o tubo cilíndrico de alumina. ....	47
Figura 3. 4 - Foto das amostras utilizadas nos ensaios. ....	48
Figura 3. 5 - Foto de duas amostras impactadas em ângulos de 30° (a) e 90° (b), respectivamente. ....	51
Figura 3. 6 - Desenho esquemático da seção transversal indentificando os pontos onde foram realizadas as medições de microdureza. ....	52
Figura 3. 7 - Amostras embutidas para medição de microdureza na região central da cratera de desgaste. As amostras embutidas possuem diâmetro de 25 mm. ....	53

Figura 4. 1 - Perfil gerado pelo perfilômetro já descrito em uma das três amostras analisadas. Pode ser facilmente visualizado a direção do lixamento efetuado na preparação das amostras.....	55
Figura 4. 2 - Micrografia eletrônica de varredura de alumina virgem. Em “a” com ampliação de 200x e em “b” com ampliação de 500x. ....	56
Figura 4. 3 - Gráfico da análise química por EDS realizada em alumina nova, onde pode ser visto a composição química principalmente formada por alumínio e oxigênio. ....	56
Figura 4. 4 - Micrografia eletrônica de varredura da alumina usada em ensaio a 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 500x. ....	57
Figura 4. 5 - Taxa de desgaste do aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 1 - velocidade de 30 m/s, ângulo de impacto de 90°. ....	58
Figura 4. 6 – Micrografias eletrônicas de varredura dos aços A36 (“a”) e 15Mo3 (“b”) impactados em velocidade de 30 m/s, ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x. ....	59
Figura 4. 7 - Micrografia eletrônica de varredura do Inconel 625 impactado em velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x. ....	60
Figura 4. 8 - Perfil da cratera de desgaste gerada nos três materiais ensaiados. Aço A36, aço 15Mo3 e Inconel 625 na condição 1 de ensaio. Observar a diferença nas escalas da profundidade para os aços e o Inconel 625. ....	61
Figura 4. 9 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 1 de ensaio. O desvio-padrão do Inconel 625 é muito pequeno, não sendo possível sua observação na figura. ....	62
Figura 4. 10 - Perfil de microdureza gerado a partir da superfície desgastada em	

velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 90° para o Aço A36, Aço 15Mo3 e Inconel 625.....	63
Figura 4. 11 - Taxa de desgaste do aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 2 - velocidade de 30 m/s, ângulo de impacto de 30°.....	64
Figura 4. 12 – Micrografia eletrônica de varredura do inconel 625 impactado em velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 30°. Ampliação de 2000x.....	65
Figura 4. 13 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 2 de ensaio. ....	65
Figura 4. 14 - Taxa de desgaste do aço A30, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 3 - velocidade de 70 m/s, ângulo de impacto de 90° e temperatura ambiente. ....	66
Figura 4. 15 – Micrografias eletrônicas de varredura dos aços A36 (“a”) e 15Mo3 (“b”) impactados em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x. ....	67
Figura 4. 16 - Micrografias eletrônicas de varredura do Inconel 625 impactado em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90°.. Ampliação de 2000x.....	68
Figura 4. 17 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 3 de ensaio. O desvio-padrão do Aço A36 é muito pequeno, não sendo possível sua observação na figura. ....	69
Figura 4. 18 - Perfil de microdureza gerado a partir da superfície desgastada em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90° para o Aço A36, Aço 15Mo3 e Inconel 625.....	70
Figura 4. 19 - Taxa de desgaste do aço A 36, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 4 - velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 30°.....	71
Figura 4. 20 – Micrografias eletrônicas de varredura dos aços A36 (“a”) e Inconel 625 (“b”) impactados em velocidade de 70 m/s, ângulo de impacto de 30°. Destaca-se,	

ainda, marcas de microcorte nos dois materiais, principalmente devido ao baixo ângulo de impacto. Ampliação de 2000x.....	72
Figura 4. 21 - Perfil da calota de desgaste do aço A36 e do Inconel 625 na condição 4. A direção do impacto das partículas aumenta na direção do refencial do eixo das abcissas. ....	73
Figura 4. 22 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 4 de ensaio. ....	73
Figura 4. 23 - Gráfico que apresenta todas as condições de ensaio e todos os materiais utilizados agrupados. ....	74
Figura 4. 24 - Micrografia do aço 15Mo3 impactado a 30 m/s em ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.....	76
Figura 4. 25 - Micrografia do aço 15Mo3 impactado a 70 m/s (b) em ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.....	76
Figura 4. 26 - Perfil da calota de desgaste do o aço 15Mo3 impactado a 30 m/s (a) e a 70 m/s (b) com ângulo de impacto de 90°. ....	77
Figura 4. 27 - Micrografia do aço A36 impactado a 70 m/s e 90°. Ampliação de 2000x. ....	78
Figura 4. 28 – Micrografia do aço A36 impactado a 70 m/s e 30° (b). A seta indica o sentido de impacto das partículas. Ampliação de 2000x.....	78
Figura 4. 29 - Perfil da calota de desgaste do o aço A36 impactado a 70 m/s e ângulo de impacto de 90 e 30°.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Dureza dos materiais utilizados no ensaio apresentado na figura 2.1.	19
Tabela 2. 2 - Propriedades das partículas erodentes utilizadas no ensaio apresentado na figura 2.2. ....	20
Tabela 3. 1 - Condição para realização dos ensaios segundo norma ASTM G 76.	43
Tabela 3. 2 - Composição química dos materiais ensaios.	49
Tabela 3. 3 - Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.	49
Tabela 4. 1 - Valores de "E <sub>0</sub> " e "p" para os três materiais ensaiados nos ângulos de 30° e 90°. ....	75
Tabela 4. 2 - Severidade do desgaste erosivo obtido pela relação entre velocidades. E <sub>70</sub> /E <sub>30</sub> . ....	79
Tabela 4. 3 - Severidade do desgaste erosivo obtido pela relação entre ângulos de impacto. E <sub>30°</sub> /E <sub>90°</sub> . ....	80

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
DESGASTE EROSIVO .....	17
PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESGASTE EROSIVO .....	18
Propriedades das partículas: dureza, forma, tamanho, velocidade de impacto, ângulo de impacto e fluxo de partículas .....	18
Propriedades do material: resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e coeficiente de encruamento .....	28
Propriedades do ambiente: temperatura .....	33
MECANISMOS E MODELOS DE EROSÃO .....	35
Desgaste erosivo por deformação plástica .....	35
Desgaste erosivo por fratura frágil .....	39
CONDIÇÕES REAIS EM COIFAS DE CONVERTEDORES .....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
CONDIÇÕES DE ENSAIO E NORMA ASTM G-76 - 02 .....	43
O EROSÍMETRO TRICORRMAT/UFES.....	44
MATERIAIS EMPREGADOS.....	47
PARTÍCULAS ERODENTES .....	50
PREPARAÇÃO, REALIZAÇÃO E ANÁLISE DO ENSAIO .....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	54
Caracterização das amostras.....	54
Caracterização da alumina.....	55
RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	57
Condição 1 – Velocidade de impacto = 30 m/s e ângulo = 90° .....	58
Condição 2 – Velocidade de impacto = 30 m/s e ângulo = 30° .....	64
Condição 3 – Velocidade de impacto = 70 m/s e ângulo = 90° .....	66
Condição 4 – Velocidade de impacto = 70 m/s e ângulo = 30° .....	71
Comparações entre as diversas condições.....	74
5. CONCLUSÕES .....	81
SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	82
6. REFERÊNCIAS.....	83



## 1. INTRODUÇÃO

Em 1966, o Departamento de Educação e Ciência da Inglaterra publicou o primeiro relatório sobre tribologia (JOST, 1966). Neste, estimava-se que as perdas econômicas causadas por falhas tribológicas na indústria da Inglaterra correspondiam a aproximadamente 0,5% PIB. Com o passar dos anos, novas estimativas foram feitas, chegando-se, então, a valores da ordem de 180 bilhões de dólares na indústria automotiva dos EUA – 6% do PIB – (RABINOWICZ, 1984). Jost (1990) sugere que é possível reduzir as perdas por desgaste em até 20% com aplicação de conceitos tribológicos existentes.

Segundo Hutchings (1992) o desgaste pode ser classificado em desgaste por deslizamento e desgaste por partículas duras – erosão e abrasão.

O desgaste erosivo, que ocorre quando partículas sólidas são arrastadas pelo escoamento de um fluido e acabam por impactar uma superfície, tem sido um sério e contínuo problema em muitas aplicações industriais, conforme indicado por Finnie (1995). Este, segundo Eyre (1976), é responsável por 8% do desgaste em indústrias.

Em diversas situações o desgaste erosivo está presente. Em indústrias de beneficiamento de minério, em indústrias siderúrgicas, na indústria aeronáutica e aeroespacial, na indústria petroquímica, entre outras. No Espírito Santo, diversas destas indústrias estão presentes de forma bem marcante. Os danos gerados causam perdas grandiosas em termos financeiros e, também, podem afetar a segurança de seus colaboradores ou do meio ambiente.

Este trabalho busca então estudar o comportamento em erosão de três ligas metálicas muito utilizadas em coifas de convertedores LD (Linz-Donawitz) em plantas siderúrgicas. Nestes equipamentos ocorre a presença de partículas duras misturadas a gases que estão em altas temperaturas oriundas do processo de oxidação do carbono na fabricação do aço.

O estudo inicial do comportamento destes materiais orientou-se pelas condições da norma ASTM G 76 (2002). Os ensaios foram então realizados em temperatura ambiente e nas velocidades de 30 e 70 m/s. Uma variação em relação à norma foi realizada no ângulo de impacto. Além do ângulo presente em norma – 90°, também realizou-se ensaios em 30°, ângulo em torno do qual caracteristicamente os metais apresentam máximo desgaste e ainda devido as condições reais em coifas de convertedores.

Na seção da revisão bibliográfica, foram abordados assuntos sobre o desgaste erosivo: propriedades importantes para caracterização das partículas erodentes, propriedades dos materiais desgastados e do ambiente, bem como o desgaste erosivo por deformação plástica e por fratura frágil além de condições reais em coifas de convertedores.

Na seção 3, são detalhadas as condições de ensaio e da norma ASTM G 76 (2002), bem como os materiais utilizados e suas principais características. Também, são apresentados os equipamentos utilizados bem como a preparação para os ensaios.

Nas seções 4 e 5, são apresentados os resultados obtidos desde a caracterização dos materiais ensaiados bem como os resultados do desgaste em erosão e ainda as conclusões. Os resultados foram apresentados inicialmente destacados por condições de ensaio sendo posteriormente, comparados entre si. Os resultados apresentaram concordância com a literatura, porém um interessante resultado foi obtido no aço 15Mo3, que proporcionou comportamento distinto nas velocidades de 30 /s e 70 m/s.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, são tratados os assuntos relativos ao desgaste erosivo. Inicialmente, serão apresentados definições e conceitos. Na sequência, os diversos parâmetros que influenciam a degradação de materiais por erosão são descritos segundo classificação que segue: propriedades das partículas (dureza, forma, tamanho, velocidade de impacto e ângulo de impacto), do material desgastado (resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e coeficiente de encruamento) e do ambiente (temperatura, pressão parcial de gases) (STACK; LEKATOS ;STOTT, 1995). Também, serão apresentados os principais mecanismos de desgaste erosivo. Neste tópico, também, serão abordadas aspectos relativos à norma ASTM G76 que dirige a realização de ensaios de erosão a frio em erosímetros a jato de ar.

### DESGASTE EROSIVO

Segundo a norma ASTM G40 (2002) erosão é a perda progressiva do material original de uma superfície devido a interação mecânica entre esta e um fluido, um fluido multicomponente ou o impingimento de líquidos ou sólidos. Pode-se definir mais especificamente a erosão por partículas duras como sendo a perda progressiva do material original de uma superfície sólida devido à exposição contínua a impactos por partículas duras (ASTM G40, 2002). Outra definição, segundo Roy (2006), é que a erosão por partículas sólidas é definida como a degradação do material devido ao impacto de partículas a alta velocidade.

Em diversas situações industriais o desgaste erosivo está presente. Em indústrias de beneficiamento de minério, ventiladores, acessórios (válvulas, conexões, etc.) e dutos sofrem desgaste erosivo (CALVI et al., 2006). Em indústrias siderúrgicas, queimadores instalados nos alto-fornos sofrem desgaste erosivo devido à passagem de carvão em pó e óleo para combustão. Os gases aquecidos retirados dos convertedores ainda promovem apreciável desgaste nestes equipamentos. Na indústria do petróleo, válvulas do tipo “Choke” causam grandes complicações econômicas e de segurança (HAUGEN et al., 1995). Outros exemplos são bocais de foguetes, motores de helicópteros que operam em terrenos com poeira (ROY, 2006). Mais recentemente, aeroportos do Brasil, da América do Sul e da Europa ficaram fechados para pousos e decolagens devido a grande quantidade de cinzas vulcânicas. As pequenas e duras partículas ali presentes são capazes de inutilizar turbinas e causar desastres devido ao desgaste erosivo que decorre dos sucessivos impactos entre partículas e componentes mecânicos da turbina.

O desgaste erosivo é influenciado por diversos parâmetros, os quais serão discutidos nos próximos tópicos.

## PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESGASTE EROSIVO

### ***Propriedades das partículas: dureza, forma, tamanho, velocidade de impacto, ângulo de impacto e fluxo de partículas***

As características das partículas que irão impingir à amostra podem causar importantes variações na maneira como irá ocorrer o desgaste. Em face disto, faz-se necessário caracterizar as propriedades das partículas erosivas como dureza, forma e tamanho das mesmas. A influência da velocidade e do ângulo de impacto, também, é apresentada.

### Dureza das partículas

A taxa de desgaste é fortemente influenciada pela dureza das partículas impactantes. O comportamento está relacionado à razão entre a dureza da partícula erosiva e a dureza do material desgastado. A figura 2.1 apresenta este comportamento. Quando as partículas empregadas no ensaio são carboneto de silício ou alumina, abrasivos comerciais que apresentam dureza significativamente superior a amostra o desgaste mostra-se até 10 vezes superior ao causado por partículas de sílica (HUTCHINGS, 2000). As condições de ensaio estão descritas na legenda sob a figura 2.1.

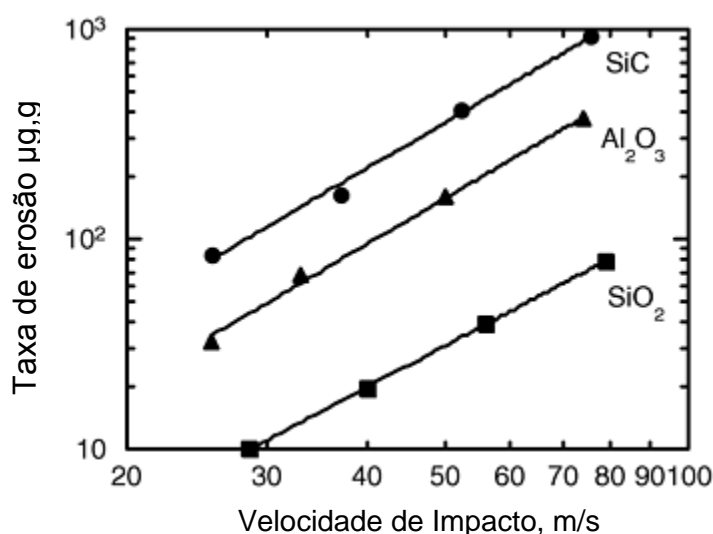


Figura 2. 1 - Influência do material da partícula na taxa de erosão, para erosão de alumina cerâmica sinterizada por sílica como ligante, alumina e carboneto de silício, de 125-150 µm de diâmetro, com ângulo de impacto de 90°.

Fonte: Hutchings (2000).

A tabela 2.1 apresenta a dureza dos materiais citados no ensaio descrito acima.

Tabela 2. 1 - Dureza dos materiais utilizados no ensaio apresentado na figura 2.1.

Material analisado (amostra ou abrasivo)	Microdureza Vickers	
	GPa	10 <sup>6</sup> psi
Amostra de alumina (alvo)	12.7	1.84
Partículas de carboneto de silício	33.4	4.84
Partículas de alumina	26.5	3.84
Partículas de sílica	13.1	1.90

Fonte: Hutchings (2000)

Comportamento semelhante foi descrito por Suresh Babu, Bikramjit Basu e Sundararajan (2011). Eles estudaram cinco diferentes materiais: um aço de baixo carbono e recobrimentos de WC-12Co com variações deste relativas às proporções de oxigênio e acetileno na fabricação do recobrimento. Estes materiais foram erodidos com partículas de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e SiC.

A tabela 2.2 apresenta propriedades relevantes destes materiais.

Tabela 2. 2 - Propriedades das partículas erodentes utilizadas no ensaio apresentado na figura 2.2.

Partícula Erodente	Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ )	Forma	Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	Dureza (GPa)	Dureza particular erodente/ Dureza amostra				
					OF-1.16	OF-1.5	OF-2.0	WC Bulk	Mild Steel
					$\text{SiO}_2$	147	Angular e paralelepipedica	2650	11,75
$\text{Al}_2\text{O}_3$	206	Angular e facetada	3950	20,50	2,23	1,84	1,86	1,6	10,25
SiC	227	Angular e paralelepipedica	3200	28,5	3,1	2,56	2,59	2,22	14,25

Fonte: Adaptado de P. Suresh Babu, Bikramjit Basu e G. Sundararajan (2011).

A figura 2.2 mostra o resultado dos ensaios onde observa-se crescimento na taxa de erosão com o aumento da dureza das partículas erodidas em todos os materiais testados, exceto para o aço. Este comportamento é creditado ao fato de que este material apresenta dureza muito inferior ao das partículas erodentes, fato que não ocorre com os demais materiais. O crescimento intermediário para o aço impactado por partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  deveu-se, provavelmente, ao fato destas serem mais facetadas que a  $\text{SiO}_2$  e o SiC.

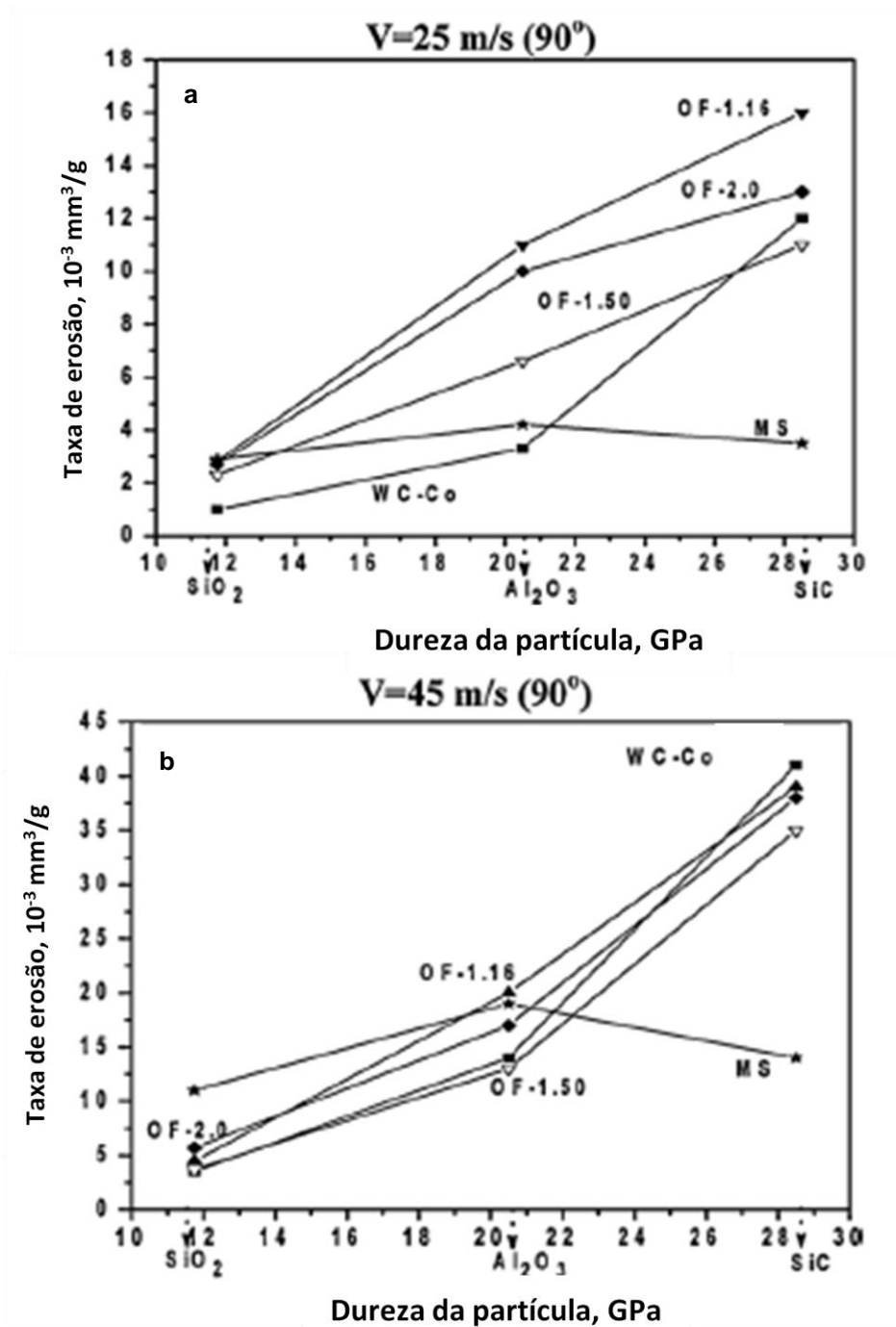


Figura 2. 2 - Taxa de erosão em função da dureza da partícula erodente em ângulo de 90°: (a) 25 m/s e (b) 45 m/s. Ressalta-se que as escalas para a taxa de erosão para as figuras "a" e "b" são diferentes.

Fonte: Adaptado de Suresh Babu, Bikramjit Basu e Sundararajan (2011).

### Forma das partículas

A taxa de desgaste é dependente da forma das partículas erodentes, onde partículas angulares causam maior desgaste que esféricas na maioria dos materiais metálicos (SUNDARARAJAN e ROY,1997).

A figura 2.3 apresenta diferentes formas de partículas que causam erosão.

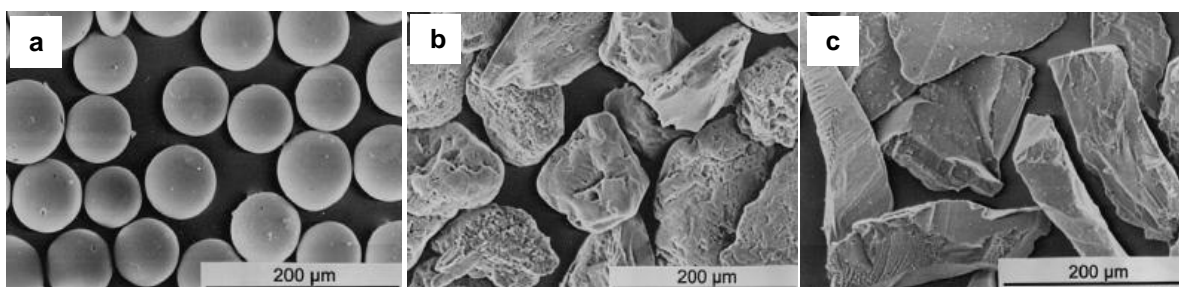


Figura 2. 3 - Micrografias via microscópio eletrônico de varredura de diferentes formas de partículas erodentes: a) Esferas de vidro (63 – 106  $\mu\text{m}$ ); b) SiO<sub>2</sub> (106 – 125  $\mu\text{m}$ ); c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (106 – 125  $\mu\text{m}$ ).

Fonte: Adaptado de Suresh Babu, Bikramjit Basu e Sundararajan (2011).

Um interessante comportamento descrito por Sundararajan e Roy (1997), a partir de pesquisas realizadas por Kleis, é a variação que ocorre no ângulo de máximo desgaste devido a diferenças nas formas das partículas erodentes. Com a mudança de partículas de vidro esféricas para vidro moído o ângulo de máximo desgaste modificou-se de 90° para 30°, respectivamente, conforme apresentado no gráfico 2.4.

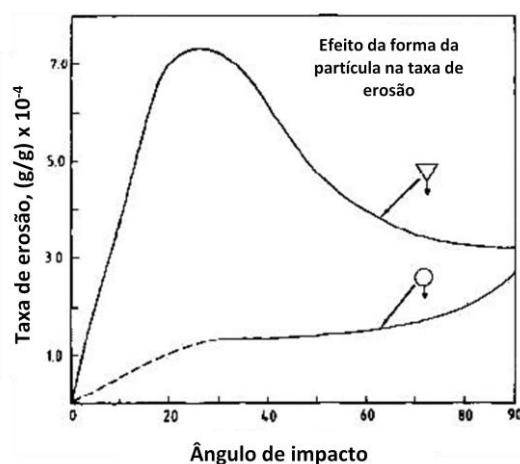


Figura 2. 4 – Diagrama esquemático apresentando a influência da forma das partículas na taxa de erosão. Na curva inferior o material foi impactado com esferas de vidro já na curva superior foram utilizadas como partículas erosivas vidro moído.

Fonte: Adaptado de Suresh Babu, Bikramjit Basu e Sundararajan (2011).



## Tamanho das partículas

Os tamanhos das partículas que ocorrem mais frequentemente no desgaste abrasivo e erosivo estão em torno de 5 a 500  $\mu\text{m}$ , embora possam estar presentes casos especiais, com tamanhos fora dessa faixa (HUTCHINGS, 1992).

Em experimentos de abrasão e erosão com metais e ligas, em laboratório, foi percebido um padrão de resposta consistente com o ilustrado na figura 2.5.

Se partículas de tamanhos diferentes fossem igualmente eficientes na remoção de material, a taxa de desgaste seria constante (em uma unidade que levasse em conta o tamanho e a massa removida).

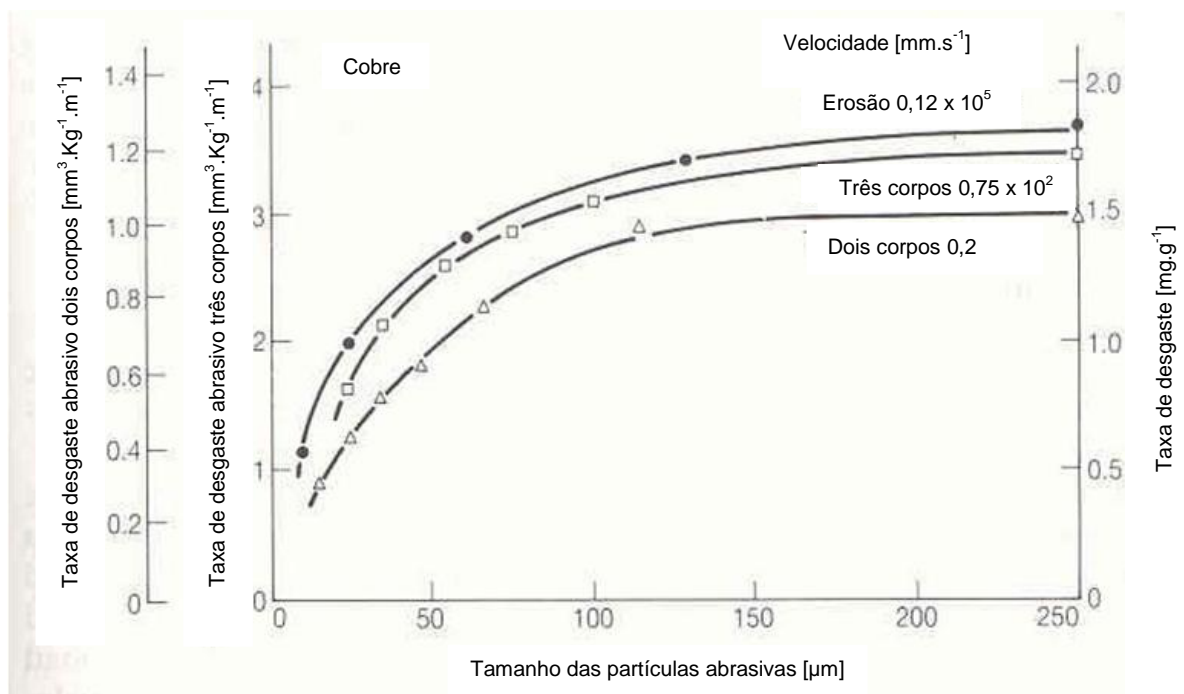


Figura 2. 5 - Taxas de desgaste do cobre sobre condições de abrasão de dois e três corpos e na erosão, devido a partículas de carbeto de silício de diferentes tamanhos.

Fonte: Hutchings (1992).

Mas a figura 2.5 mostra que as taxas de desgaste caem abruptamente para partículas menores que 100  $\mu\text{m}$  (aproximadamente).

Uma explicação razoável e aplicável em toda a faixa onde se observa este comportamento é a existência do efeito escala que afeta a resistência do cobre. A tensão que provoca o escoamento em um pequeno volume de material é mais alta que a necessária para escoar um maior volume, talvez em função da dificuldade para nucleação e movimentação de discordâncias no volume menor. O aumento na tensão de escoamento no caso de volumes pequenos leva a uma redução na taxa de desgaste por deformação plástica, que é o efeito escala.

O comportamento mostrado é percebido em materiais onde o desgaste ocorre por deformação plástica (dúcteis). Na sequencia, será visto que o desgaste de materiais frágeis pode envolver fratura, o que levará a um efeito escala ainda mais pronunciado.

Desempenho semelhante foi observado por Zhou e Bahadur (1989, apud ROY, 2006, p. 105), que investigaram o efeito do tamanho da partícula de SiC na erosão do aço inoxidável AISI 304 SS a 923K, ângulo de impacto de 30° e velocidade de 65 m/s. Estes resultados indicam que a taxa de erosão aumenta com o aumento no tamanho da partícula até 40 µm e depois disso torna-se independente do tamanho da partícula (figura 2.6).

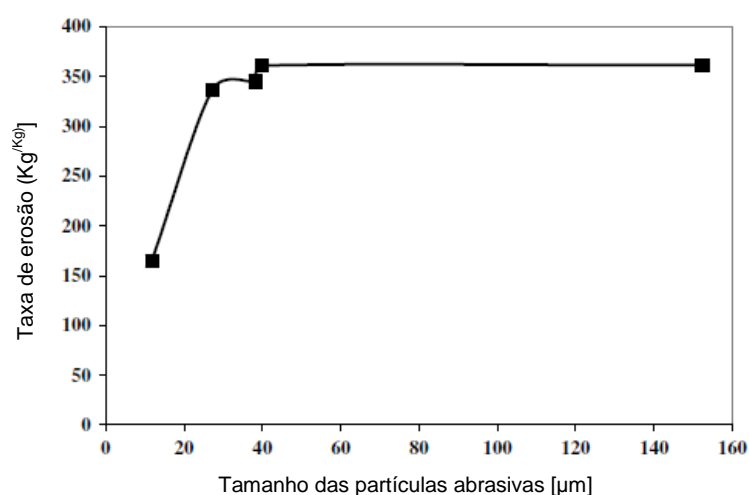


Figura 2. 6 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de erosão do aço inoxidável AISI 304 SS em temperatura de 923 K.

Fonte: Roy (2006).

Outros comportamentos também são citados na literatura. Em alguns casos ocorre aumento contínuo na taxa de erosão com o aumento no tamanho das partículas (Levy et al., apud ROY, 2006, p. 106).

### *Velocidade das partículas*

A velocidade da partícula no momento do impacto com a superfície desgastada tem grande influência na taxa de erosão (KLEIS e KULU, 2008).

A dependência da velocidade na taxa de erosão é caracterizada pelo expoente “ $p$ ”, dado por:

$$E = E_0 V^p \tag{2.1}$$

onde  $E_0$  é uma constante e  $V$  é a velocidade de impacto.

Inicialmente, para materiais dúcteis, Hutchings desenvolveu um modelo em que toda a energia cinética da partícula é convertida em deformação plástica, gerando dano. Neste caso, o valor do expoente “ $p$ ” é igual a 2. Porém, uma análise detalhada de grande quantidade de dados experimentais por Hutchings tem apresentado que em condições de impacto oblíquos, o expoente médio da velocidade é 2,4. Outra análise similar feita por Sundararajan e Shewmon indicam um valor médio de 2,55 para “ $p$ ” em ângulos normais de impacto. Em maiores velocidade de impacto “ $p$ ” parece estabilizar-se entre 2 e 3. Para cerâmicas estes valor média é de 3 e acima de 5 para polímeros, respectivamente (ROY, 2006)

O expoente da velocidade é, também, influenciado por outros fatores como o ângulo de impacto, tamanho da partícula, etc. (SUNDARARAJAN e ROY,1997).

Lindsley e Marder (1999), em seu trabalho, indicam que o valor do expoente “p” não é influenciado pelas propriedades dos materiais nem pelo mecanismo de remoção para as condições por eles empregadas. Eles ensaiaram em erosão latão 70Cu – 30Zn recozido e este mesmo material com 70% de trabalho a frio e, ainda, uma liga Fe-C com 0,6%C apenas temperada e a mesma liga temperada e revenida. Segundo suas conclusões, “p” está relacionado às condições de ensaio, e qualquer suave variação nesta causa mudança no valor do expoente. Ensaio realizados em diferentes datas apresentaram variação no valor de “p”.

### *Ângulo de impacto*

O ângulo de impacto é definido como o ângulo entre o movimento da partícula e o plano da superfície desgastada. O efeito do ângulo de impacto na taxa de erosão é bastante conhecido sendo determinado pela natureza do material desgastado. Conforme apresentado na figura 2.7, materiais dúcteis exibem uma máxima taxa de desgaste em ângulos rasos (por exemplo, entre 15° e 30°). Por outro lado, a máxima taxa de erosão de materiais frágeis é, normalmente, obtida em ângulos de 90° (SUNDARARAJAN e ROY,1997). Este comportamento é associado com condições de impacto mais favoráveis a remoção de material por micro-mecanismos dúcteis de sulcamento e corte (HUTCHINGS, 2000).

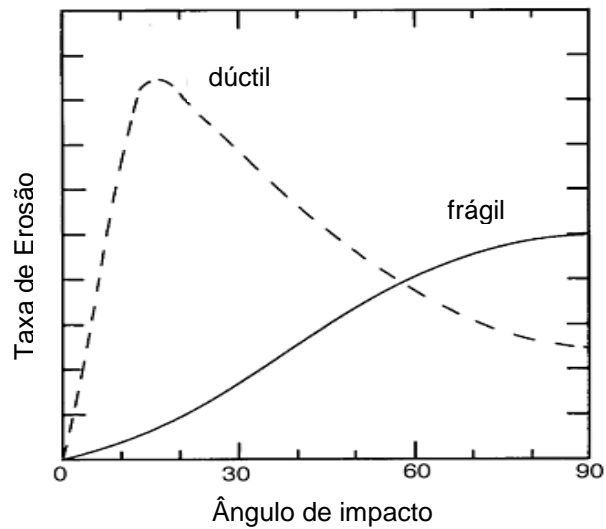


Figura 2. 7 - Dependência típica da erosão (definida como perda de massa por unidade de massa de partículas que impactam) com o ângulo de impacto.

Fonte: Hutchings (2000).

A figura 2.8 apresenta como ocorre a remoção de material com a variação do ângulo. Em ângulos rasos, este se dá principalmente através do microcorte da superfície. Quando, porém, o ângulo de impacto se aproxima de  $90^{\circ}$ , o arrancamento de material ocorre, sobretudo por microsulcamento.

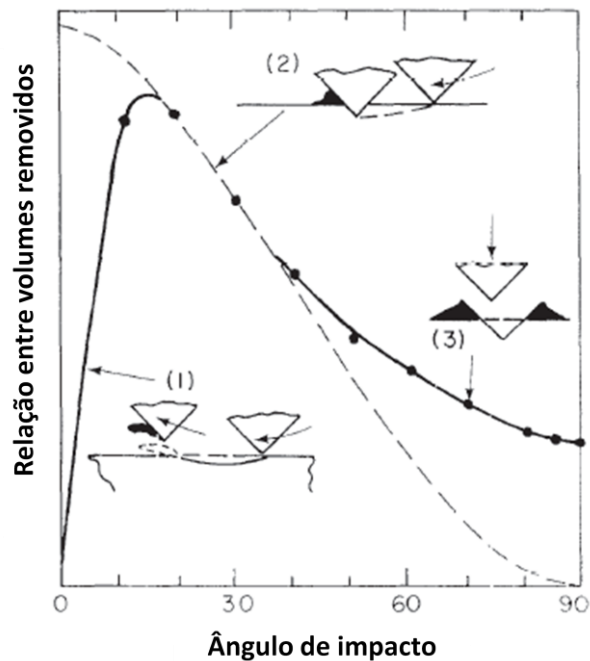


Figura 2. 8 - Predição da variação do volume removido com ângulo de impacto.

Fonte: Finnie (1995)

Das variáveis relacionadas as partículas erodentes, a forma destas tem uma influência considerável no comportamento da relação taxa de erosão – ângulo de impacto, conforme já descrito na seção “Forma das partículas” – figura 2.4.

### *Fluxo de partículas*

A relação entre o fluxo de partículas e a taxa de erosão apresenta diversos comportamentos.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2001), a taxa de erosão é proporcional à taxa de partículas que impactam o material até um valor limite de desgaste. Acredita-se que este comportamento seja causado pela interação entre as partículas que estão rebatendo na amostra e as que estão chegando. Quando este valor limite é alcançado a taxa de desgaste cai, marginalmente.

Para Sundararajan e Roy (1997) a taxa de partículas que impactam a amostra não apresenta influência significativa na erosão de materiais metálicos. Porém, altas taxas de partículas impactando a amostra, devido a interferência com outras partículas e com partículas que rebatem na amostra, as taxas de erosão diminuem.

### ***Propriedades do material: resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e coeficiente de encruamento***

As características dos materiais exercem um forte efeito sobre o desgaste erosivo e tem sido extensivamente estudadas. Porém, de forma semelhante ao que ocorre com

outras formas de desgaste, nem sempre melhorias nas propriedades mecânicas coincidem com resistência superior ao desgaste erosivo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001) e, nem sempre o efeito das propriedades mecânicas do material erodido no comportamento em erosão é completamente esclarecido (SUNDARARAJAN, 1995). Abaixo será apresentado, de maneira breve, a influência de algumas propriedades mecânicas no desgaste erosivo.

### *Resistência Mecânica*

A resistência de um material pode ser caracterizada pela sua dureza, limite de escoamento e limite de resistência a tração ou pelo coeficiente de resistência (SUNDARARAJAM, 1995). Diversos estudos tentaram correlacionar à resistência mecânica do material erodido com a resistência a erosão, porém essa relação mostrou-se muito difícil e aplicável em apenas situações particulares. Ainda, de maneira similar ao que acontece no desgaste abrasivo é consenso que nem sempre superiores propriedades mecânicas coincidem com aumento na resistência ao desgaste em erosão (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

A partir da figura 2.9, diversas observações podem ser feitas. A relação entre a resistência à erosão de metais puros recozidos relaciona-se aproximadamente linearmente com a dureza. Porém, com a mudança do ângulo de impacto de 15° para 90°, apesar da linearidade aproximada se manter, a resistência se modifica. Por exemplo, o cobre que apresenta o segundo pior comportamento em 15° se torna o segundo melhor. A inversão, também, pode ser comprovada com o cobalto, de melhor resistência em 15° passa a ser o terceiro menos resistente em 90°. Isso se deve ao fato de que a resistência ao desgaste erosivo é uma função não apenas de características do material desgastado, mas, também, de características gerais do sistema de erosão (STACHOWIAK e BACHELOR, 2001).

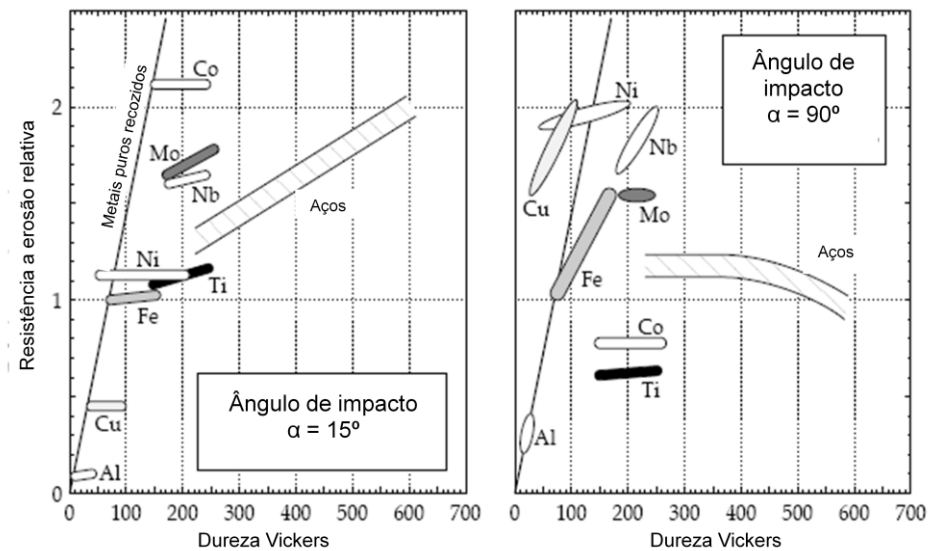


Figura 2. 9 - Efeito da dureza do material erodido na resistência a erosão.

Fonte: Stachowiak e Bachelor (2001)

O encruamento resulta em um pequeno benefício ou nenhuma melhora na resistência a erosão. Tratamentos térmicos em aços podem causar efeitos positivos, porém isso é diminuído com o aumento do ângulo de impacto (ZUM GAHR, 1987).

Outros pesquisadores buscaram encontrar encruamento superficial oriundo do próprio processo erosivo.

Lindsley e Marder (1999) analisaram o comportamento de latão (70Cu – 30Zn) no estado recozido e com 70% de trabalho a frio. As condições de ensaio foram velocidade de impacto de 20, 30, 40 e 50 m/s e as partículas erosivas utilizadas foram  $Al_2O_3$  com diâmetro médio 355  $\mu m$ . A taxa de alimentação de partículas não foi identificada, porém, a partir de um outro artigo dos autores estima-se que esse valor seja bem superior ao sugerido pela norma, que é de 2  $mg \cdot mm^{-2} \cdot s$ . A figura 2.10 apresenta o resultado de microdureza efetuado nos materiais.



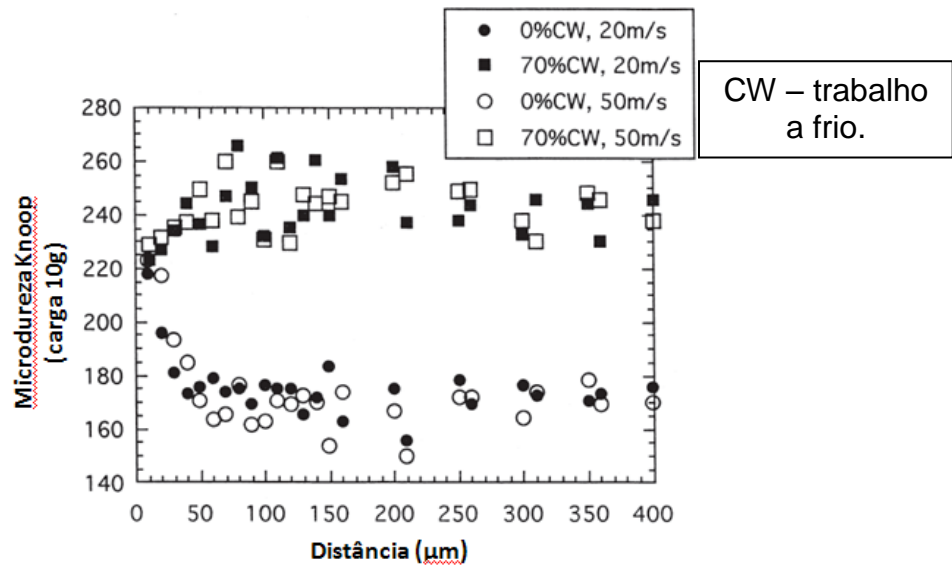


Figura 2. 10 - Perfil de microdureza Knoop apresentado pelo latão recozido (0%CW) e pelo latão com 70% de trabalho a frio (70%CW) nas velocidades de 20 e 50 m/s.

Fonte: Lindsley e Marder (1999)

O perfil de microdurezas apresentado acima demonstra que o latão recozido teve um aumento de dureza superficial numa faixa até, aproximadamente, 50  $\mu\text{m}$ . Já o latão trabalhado a frio acabou por ter sua dureza diminuída para as condições de ensaios.

Levin, Dupont e Marder (1998), também, encontraram apreciável aumento na dureza superficial de diversos materiais como Inconel 625, Stellite-6, aço inoxidável 316L entre outros. As condições de ensaio foram: velocidade de impacto de 40 m/s, temperatura de 400°C, ângulo de impacto de 90°, diâmetro médio das partículas erodentes de 350 a 450  $\mu\text{m}$  e taxa de alimentação de partículas de 8,56  $\text{mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}$ .

Por isso, Sundararajan (1995) conclui que a resistência a erosão de um material não pode ser prevista apenas baseada em sua resistência mecânica.

## *Ductilidade*

É esperado que quanto maior a ductilidade de um material (em um determinado tipo de liga) maior deverá ser a resistência à erosão. Porém, esta afirmação não é válida para diversos tipos de ligas como Al-Li, alguns aços inoxidáveis e algumas ligas de titânio. Nestes casos, o material com ductilidade mais baixa ou intermediária exibe as melhores propriedades em erosão (SUNDARARAJAN, 1995).

## *Densidade de energia mecânica – módulo de tenacidade*

A densidade de energia mecânica é definida como o produto  $(\sigma_y + \sigma_{UTS})\epsilon_f/2$ , onde  $\sigma_y$  é o limite de escoamento,  $\sigma_{UTS}$  é o limite de resistência a tração e  $\epsilon_f$  é a deformação total obtida no ensaio de tração. É esperado que a resistência a erosão esteja diretamente correlacionada com o módulo de tenacidade (SUNDARARAJAN, 1995). Apenas nos casos de ferros fundidos, compósitos de fibras reforçadas com alumínio, a expectativa foi alcançada. Em todos os outros casos considerados por Sundararajan essa relação falhou.

## *Coeficiente de encruamento*

O expoente  $n$  (coeficiente de encruamento) representa a taxa de encruamento do material durante a deformação. Um alto valor de  $n$  é sempre desejável, pois permite maior capacidade de absorção energética do material pela deformação plástica. Nos casos de ligas de Ni, Ni-Cr, MA 754 e 17-4 PH SS foi encontrada uma relação direta entre as taxas de erosão e  $n$ . Porém, no caso de aços inoxidáveis e ligas de cobre o material com mais alto valor de  $n$  não exibiu a melhor resistência a erosão.

### **Propriedades do ambiente: temperatura**

Segundo Roy (2006) o comportamento da taxa de erosão em relação a temperatura pode ser subdividido em três grupos.

No primeiro grupo, a taxa de erosão inicialmente diminui com o aumento da temperatura atingindo um mínimo e, então, começando a crescer com o aumento desta. Este comportamento pode ser visualizado na figura 2.11 para os materiais 410 SS, 17-4 PHSS e 5.0Cr-0,5Mo.

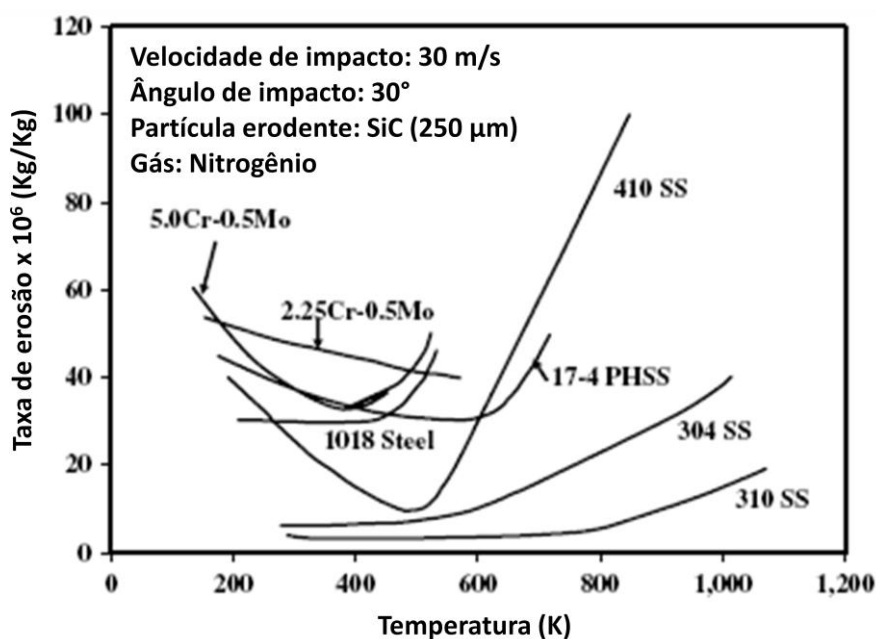


Figura 2. 11 - Variação da taxa de erosão para algumas ligas.

Fonte: Roy (2006).

O segundo grupo compreende materiais como o tântalo e o chumbo (para ângulos oblíquos de impacto) e ligas como a 304 SS e 310 SS (para ângulos oblíquos de impacto), aço 1018 e alumínio 1100 (para ângulos normais de impacto) que exibem independência da taxa de erosão com a temperatura até alcançar uma temperatura crítica seguido, então, por um aumento da taxa de erosão com a temperatura. Este comportamento pode ser observado na figura 2.11.

O terceiro grupo de materiais classificado por Roy (2006) apresenta um crescimento da taxa de erosão linear com o aumento da temperatura. Inco 600, aços 12Cr-1MoV e 2,25Cr-1.0Mo, chumbo e alumínio 20245 são alguns exemplos de materiais que apresentam este comportamento. A figura 2.12 apresenta alguns materiais que exibem este comportamento.

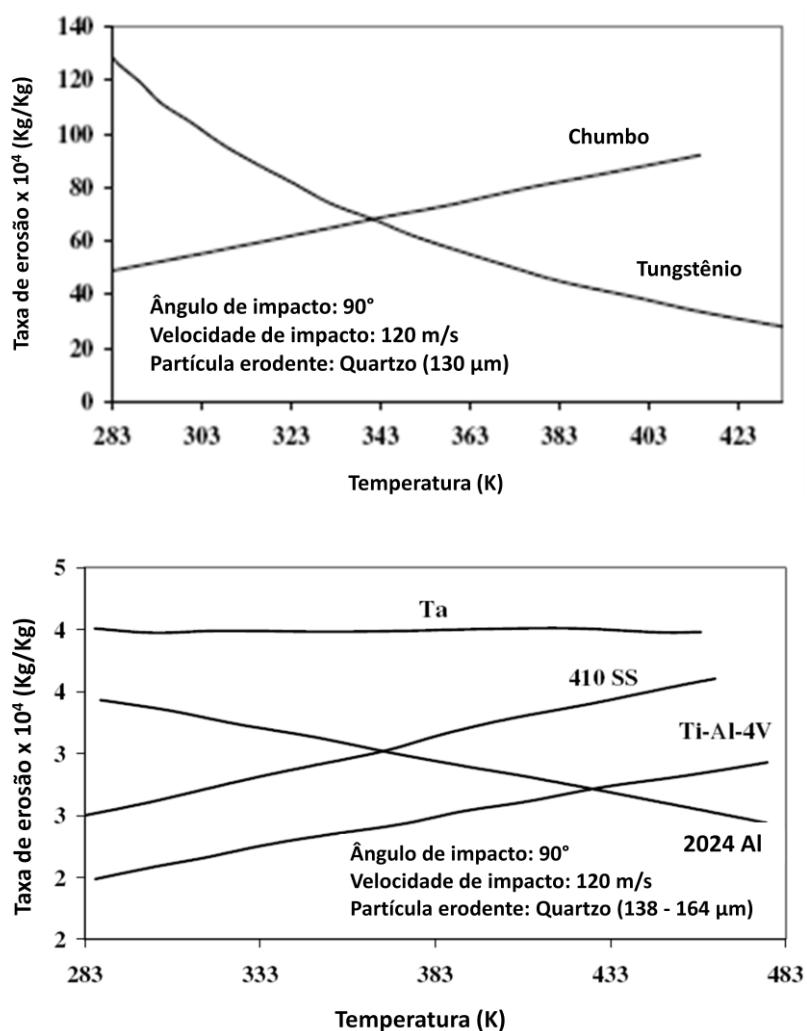


Figura 2. 12 - Efeito da temperatura na taxa de erosão de alguns metais e ligas.

Fonte: Roy (2006).

## MECANISMOS E MODELOS DE EROSÃO

Diversos mecanismos e modelos de desgaste por erosão têm sido propostos por vários autores. A maior parte destes é identificada através de estudos do impacto de uma única partícula uma vez que o impacto de múltiplas partículas envolve um fenômeno complexo – diferentes ângulos de incidência simultâneos, interação entre partículas, partículas engastadas na superfície, etc. (ZUM GAHR, 1987).

Serão apresentados dois mecanismos propostos por Hutchings (1992) – erosão por deformação plástica e erosão por fratura frágil.

Conforme apresentado por Wensink e Elwenspoek (2002) entre outros autores, o mecanismo dúctil não é apresentado apenas em materiais dúcteis, nem tão pouco o mecanismo frágil ocorre apenas em materiais frágeis. Quando não há energia cinética suficiente para iniciar trincas ocorre erosão dúctil ao invés de frágil mesmo em materiais frágeis.

O mecanismo frágil está relacionado a remoção de material devido a formação de trincas, enquanto o mecanismo dúctil relaciona-se a remoção de material por microcorte e microsulcamento (WENSINK e ELWENSPOEK, 2002)

### ***Desgaste erosivo por deformação plástica***

A geometria da deformação devido ao impacto de uma partícula dura depende da velocidade de impacto, da forma e orientação da partícula e do ângulo de impacto (HUTCHINGS, 1992).

Estudos do impacto de uma única partícula nos metais em ângulos de impacto de 30° apresentaram basicamente três tipos de danos conforme apresentados na figura 2.13. Partículas arredondadas deformam a superfície por sulcamento, deslocando material para o lado ou para frente da partícula (figura 2.13 - a). Impactos adicionais nas áreas vizinhas conduzem a remoção do material intensamente deformado. A deformação causada por partículas angulares depende de sua orientação no momento da colisão. Se a partícula rola para frente (na direção do movimento), teremos o modo de corte tipo I, penetrando a superfície e gerando uma protuberância vulnerável aos impactos seguintes (figura 2.13 - b). Se a partícula rolar para trás (direção oposta ao movimento) haverá uma usinagem, com a aresta do abrasivo removendo cavaco da superfície (figura 2.13 - c). Este é o corte tipo II (HUTCHINGS, 1992).

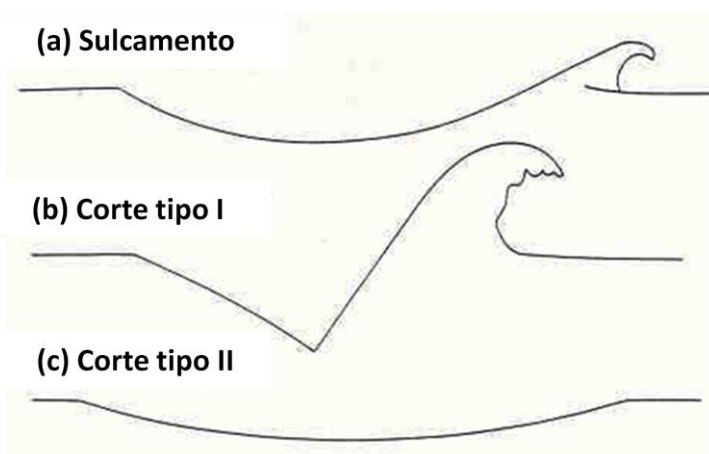


Figura 2. 13 - Seção transversal no local dos impactos de partículas duras em um metal dúctil, apresentando formas típicas. A direção do impacto foi da esquerda para a direita; (a) deformação por sulcamento por partículas esféricas; (b) corte tipo I por uma partícula angular que gira para frente; (c) corte tipo II por uma partícula angular que gira para trás.

Fonte: HUTCHINGS (1992)

Estes dois mecanismos podem ocorrer simultaneamente, e a erosão de comportamento dúctil é essencialmente uma combinação dos dois processos, com um sendo dominante sobre o outro dependendo do ângulo de impacto, das propriedades do material e da forma da partícula erodente (WELLMAN e NICHOLLS, 2004).

Conforme já apresentado na figura 2.7, o ângulo é um dos parâmetros mais influentes no mecanismo de erosão. O mecanismo dúctil apresenta o máximo desgaste em baixos ângulos, geralmente em torno de 20-30° (HUTCHINGS, 1992).

Nos últimos anos, diversos modelos de erosão têm surgido. Alguns complexos abrangendo um grande número de parâmetros. Modelos mais simples, também, ganharam destaque. Hutchings propôs dois modelos de erosão, um para ângulos rasos e outro para ângulos normais.

Para ângulos rasos, é assumindo que o material é removido por partículas unicamente pela ação de microcorte. Hutchings propôs a utilização da seguinte expressão:

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

(2.2)

Onde:

$E$  é a massa de material removido / massa de partículas que impactam a superfície;

$K$  é uma constante conhecida como coeficiente de desgaste;

$\rho$  é a densidade do material desgastado;

$U$  é a velocidade de impacto;

$H$  é a dureza do material desgastado;

$n$  é o expoente de velocidade e varia tipicamente entre 2,0 e 2,5 sendo também uma função do ângulo de impacto.

Já para ângulos retos e com partícula esférica, podem-se modelar de duas formas: assumindo que o material é removido quando a deformação plástica acumulada atinge um valor crítico ou tratando o problema como fadiga de baixo ciclo causada pela deformação plástica repetitiva (HUTCHINGS, 1992).

As duas aproximações levam ao mesmo resultado:

$$E = \frac{K_1 \rho \sigma^{1/2} U^3}{\varepsilon_c^2 H^{3/2}} \quad (2.3)$$

Onde:

$E$  é a massa de material removido / massa de partículas que impactam a superfície;

$K_1$  é uma constante conhecida como coeficiente de desgaste;

$\rho$  é a densidade do material desgastado;

$\sigma$  é a densidade das partículas erosivas esféricas;

$U$  é a velocidade de impacto;

$\varepsilon_c$  é a deformação plástica crítica, entendida como uma medida de ductilidade sob erosão;

$H$  é a dureza do material desgastado.

Podem-se observar que todos os modelos apresentados prevêem taxas de erosão inversamente proporcionais à dureza, com expoentes iguais a 1 ou 1,5. Para materiais dúcteis esta propriedade é muito importante. O último modelo também prevê a dependência para com a ductilidade do material.

De uma maneira geral, a dureza (macro dureza) não é uma boa referência para determinar a resistência à erosão dos metais. Relação melhor é obtida com a dureza da superfície encruada (com expoente menor que o previsto no modelo teórico) (HUTCHINGS, 1992).



### ***Desgaste erosivo por fratura frágil***

Quando o impacto de uma partícula erosiva causa fratura frágil, o material é removido da superfície pela formação e interseção de microtrincas na superfície e subsuperfície de um material. Isso causa um comportamento diferente em relação ao estabelecido no comportamento dúctil. Por exemplo, na figura 2.7, os materiais que apresentam fratura de comportamento frágil exibem maior desgaste em altos ângulos, ao contrario do ocorrido com materiais de comportamento dúctil.

Dois tipos de microtrincas são importantes: trincas Hertzianas, associadas com o impacto de partículas arredondadas e precedidas apenas por deformação puramente elástica e, trincas laterais, causadas pelo contato de partículas duras e angulares e estão associadas com um campo de tensões elasto-plásticas (LIU, 2003). Portanto, nestes casos, a resistência à erosão é uma função da tenacidade à fratura (WELLMAN e NICHOLLS, 2004).

Modelos para erosão por fratura frágil têm sido desenvolvidos principalmente para ângulos retos. Um dos modelos estima a força de contato exercida na partícula durante o impacto ou assume que a pressão resistente à penetração é a dureza quase-estática da superfície. Outro modelo utiliza o conceito de propagação dinâmica de ondas, obtendo as seguintes equações. As equações para o primeiro e segundo modelo apresentados, respectivamente, são:

$$\frac{E}{\rho} = r^{0,7} U^{2,4} \frac{\sigma^{0,2} H^{0,1}}{K_c^{1,3}} \quad (2.4)$$

e

$$\frac{E}{\rho} = r^{0,7} U^{3,2} \frac{\sigma^{0,6}}{K_c^{1,3} H^{0,25}} \quad (2.5)$$

Onde:

$E$  é a massa de material removido / massa de partículas que impactam a superfície;

$\rho$  é a densidade do material desgastado;

$r$  é o raio da partícula;

$U$  é a velocidade de impacto;

$\sigma$  é a densidade das partículas erosivas esféricas;

$Kc$  é a tenacidade à fratura,

$H$  é a dureza do material desgastado;

Observa-se pelas expressões acima que a propriedade do material mais determinante na resistência a erosão por fratura frágil é a tenacidade à fratura ( $Kc$ ), com a dureza ( $H$ ) tendo menor importância (HUTCHINGS, 1992).

## CONDIÇÕES REAIS EM COIFAS DE CONVERTEDORES

O desgaste erosivo é um dos grandes problemas em tubulações de despoejamento em convertedores LD de aciarias no setor siderúrgico.

A produção do aço em convertedor é acompanhada de considerável emissão de poeira junto com gás. A reação do carbono com o oxigênio gera esse gás, a uma temperatura de 1700°C, e devido à alta quantidade de energia envolvida sai pela boca do convertedor em alta velocidade, arrastando grande quantidade de pó, em torno de 2% do volume do aço (COSTA E FURTADO, 2007).

Atualmente, os convertedores possuem sistema de coleta e limpeza dos gases e sólidos gerados. Os pós são usados como carga para o próprio convertedor e, os gases para geração de energia elétrica nas centrais termoelétricas e outras aplicações.

A saia móvel é o componente de conexão entre o convertedor e o sistema de exaustão e está localizada acima da boca do convertedor para permitir melhor captação dos gases, os quais, através das coifas, móvel e fixa, são encaminhados para a torre de depuração.

A figura 2.14 apresenta uma destas coifas. A coifa é formada por um conjunto de tubos de aço conformados e soldados longitudinalmente. Pelo interior destes tubos circula água para sua indispensável refrigeração (Castro et al., 2008)

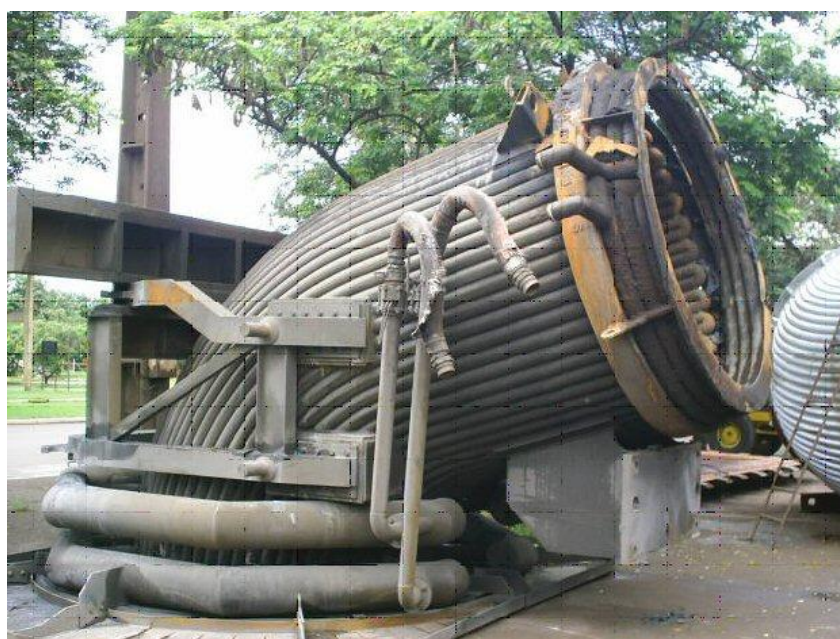


Figura 2. 14 - Foto de uma coifa utilizada em convertedor LD.

Fonte: Castro et al., 2008.

A partir de simulações computacionais, estima-se que as velocidades das partículas que escoam no interior da coifa são de aproximadamente 36 m/s na entrada da mesma alcançando 50 m/s de velocidade máxima em pontos intermediários. A figura 2.15 apresenta as velocidades das partículas no interior da coifa a partir de simulação computacional via CFD (*computational fluid dynamics*) (COSTA e FURTADO, 2007). Estima-se que as temperaturas na superfície impactada da coifa sejam de aproximadamente 250°C.

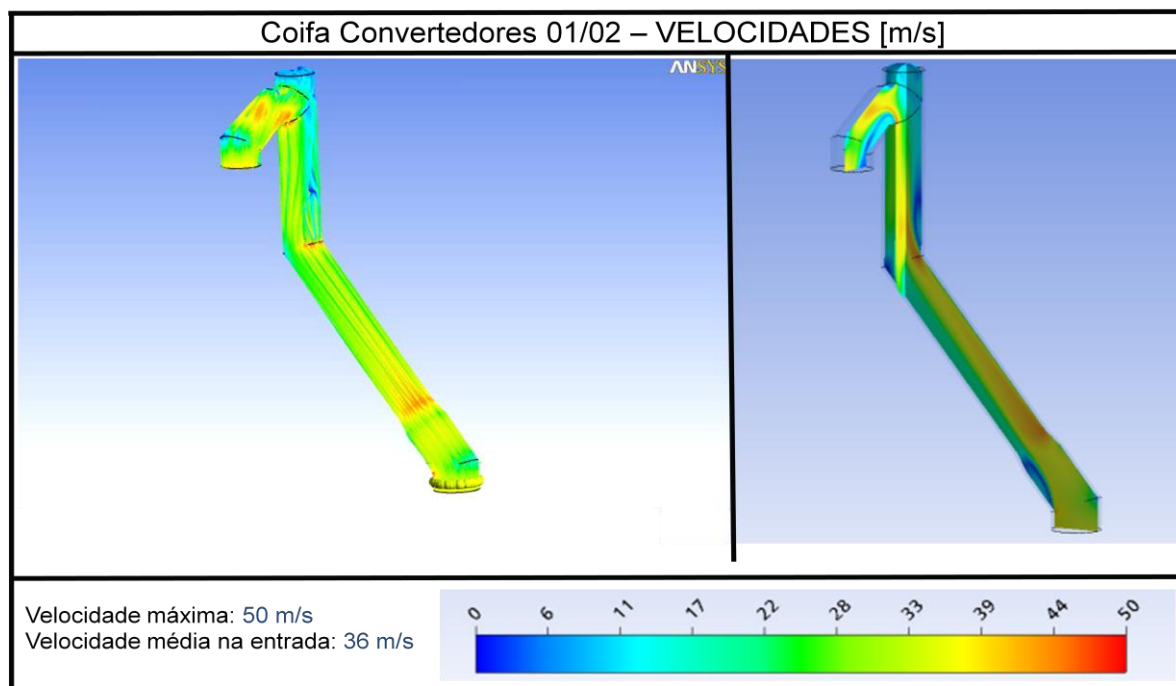


Figura 2. 15 - Perfil de velocidades no interior da coifa de diâmetro de 4330 mm utilizada na ArcelorMittal Tubarão.

Fonte: Costa e Furtado, 2007.

Diversas, também, são as regiões de desgaste da coifa, porém os maiores problemas têm ocorrido em duas regiões (figura 2.16), sendo estas as de principal interesse neste trabalho.

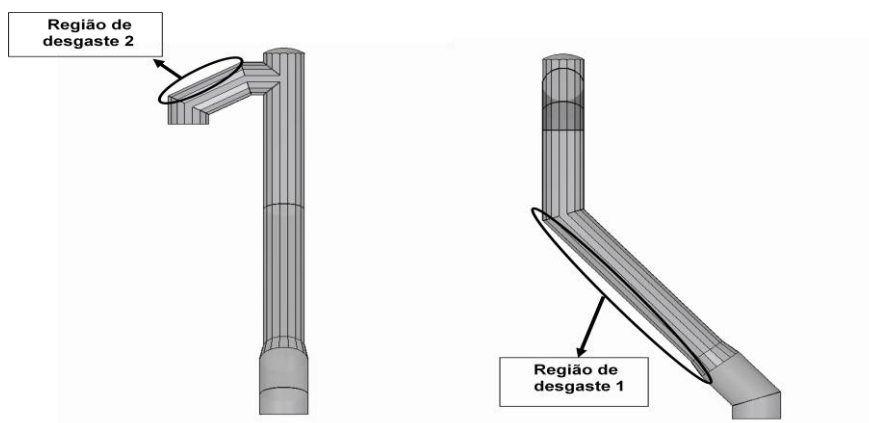


Figura 2. 16 - Desenho esquemático da coifa em estudo apresentando as duas principais regiões de desgaste.

Fonte: Costa e Furtado, 2007.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### CONDIÇÕES DE ENSAIO E NORMA ASTM G-76 - 02

As condições dos ensaios foram escolhidas, inicialmente, seguindo a norma ASTM G76 - 02, que define características de erosímetros a jato de ar bem como as condições e materiais para calibração deste.

Desta forma as condições definidas pela norma estão resumidas na tabela 3.1 que segue:

Tabela 3. 1 - Condição para realização dos ensaios segundo norma ASTM G 76.

<b>Parâmetro</b>	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>
Velocidade das partículas [m/s]	30	70
Material das partículas	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diâmetro médio das partículas [µm]	50	50
Duração do ensaio [min]	10	10
Ângulo de impacto [°]	90	90
Temperatura [°C]	18 a 28	18 a 28
Quantidade de amostras	10	10
Taxa de partículas que impactam a amostra [mg.mm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	2	2

Fonte: Adaptada de ASTM G 76 – 2002.

Porém, desejava-se conhecer, também, o comportamento dos materiais ensaiados sob erosão quando impactados em ângulos diferentes de 90° (devido às regiões de interesse na coifa). Por isso, foi escolhido o ângulo de 30°, ângulo em torno do qual materiais que apresentam mecanismo por deformação plástica sofrem maior desgaste conforme apresentado na seção 2 deste estudo. Dessa maneira os materiais foram ensaiados em quatro condições diferentes, variado ângulo e velocidade de impacto.

Outra variação foi quanto ao número de amostras ensaiadas. Apesar de a norma indicar o número de 10 amostras por condição, devido a experiência adquirida em trabalhos anteriores com este equipamento na realização dos ensaios realizados por Calvi (2009) e Ewald (2009) foram utilizadas 5 amostras por condição neste estudo.

## O EROSÍMETRO TRICORRMAT/UFES

A realização dos ensaios de erosão ocorreu no erosímetro a jato de ar construído na Universidade Federal do Espírito Santo. Este erosímetro, já calibrado segundo a norma ASTM G-76 - 02 (EWALD et al., 2009), foi desenvolvido para realizar ensaios em temperatura ambiente e elevada.

Seguem, abaixo, alguns dados de referência do projeto do equipamento:

Velocidade máxima das partículas: 90m/s.

Faixa de temperatura de ensaio: da ambiente até 450°C

Diâmetro característico das partículas: 5 a 500 µm

O erosímetro pode ser dividido em sete (7) setores, descritos na figura abaixo (figura 3.1):

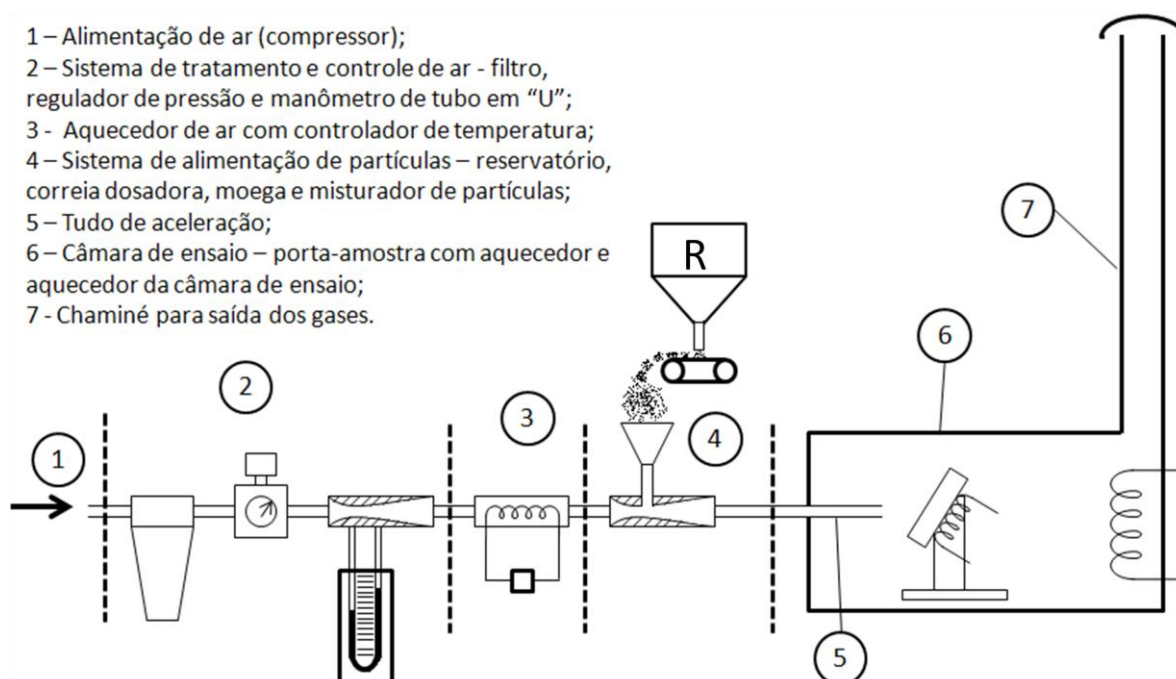


Figura 3. 1 - Desenho esquemático do erosímetro TRICORRMAT/UFES

Fonte: Adaptado de CALVI (2009)

O equipamento é basicamente composto por um compressor (1) que alimenta o erosímetro com um fluxo de ar com vazão e pressão necessárias ao ensaio.

Posteriormente ao compressor, existe uma central para filtragem, controle e medição do fluxo de ar comprimido (2). Para fornecer uma leitura da vazão do ar que escoar pelo equipamento, se utiliza um manômetro U. A leitura observada no manômetro U é utilizada para que se possa conseguir a reprodutibilidade da velocidade das partículas. A medida da velocidade das partículas é feita pelo método dos dois discos (RUFF e IVES, 1975) sendo, posteriormente, interrompido o fluxo de ar para que seja efetuada a troca do mecanismo que é utilizado para a medição da velocidade das partículas pelo porta-amostra.

A figura 3.2 apresenta fotos em detalhes do dispositivo dos dois discos utilizados para medição de velocidade.

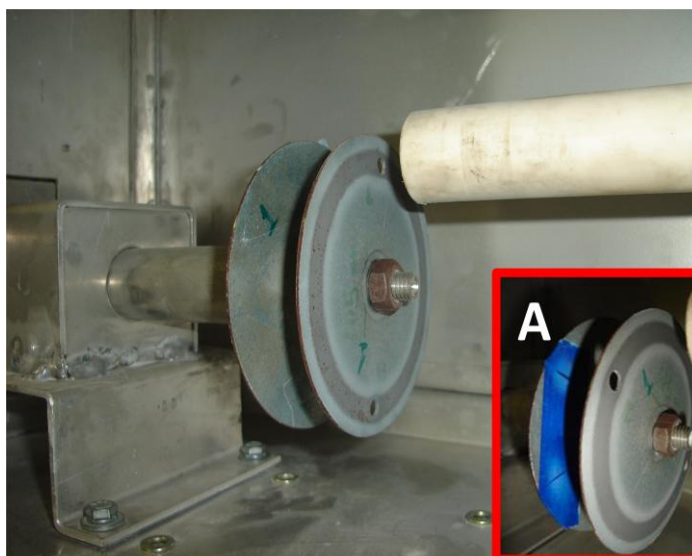


Figura 3. 2 - Mecanismo dos dois discos utilizados para medição da velocidade das partículas que irão impactar a amostra. Em "A" apresenta-se detalhe da marcação.

Após a passagem pelo tubo Venturi o ar passa pelo aquecedor (3), que pode ser utilizado para testes em temperatura elevada. Dois termopares medem a temperatura do escoamento e enviam os dados para um controlador PID, que então fornece a potência necessária para que a temperatura ajustada para o ensaio seja alcançada.

Posterior ao aquecedor, encontra-se o alimentador de partículas (4), que tem a função de inserir no fluxo de ar às partículas que irão impactar a amostra, para isso é necessário que ocorra uma pressão negativa na região de entrada das partículas - moega. Então, é utilizado um bico expensor que proporciona a pressão negativa nesta região a fim de ajudar a gravidade na introdução das partículas.

As partículas são armazenadas em um reservatório (figura 3.1 – R) que se localiza na parte superior do erosímetro. Um motor de corrente contínua controlado por um circuito PWM aciona uma correia de couro que conduz as partículas até a calha que leva as partículas para a moega e então as introduz no fluxo (4).



Após a inserção das partículas no escoamento, estas seguirão para o bocal cilíndrico (5), que as acelerará até a velocidade desejada.

A amostra, que sofrerá os impactos das partículas depois de devidamente preparada, deverá ser fixada no porta-amostra, que está acoplada no fundo da câmara de ensaio, conforme pode ser visualizado na figura 3.3.

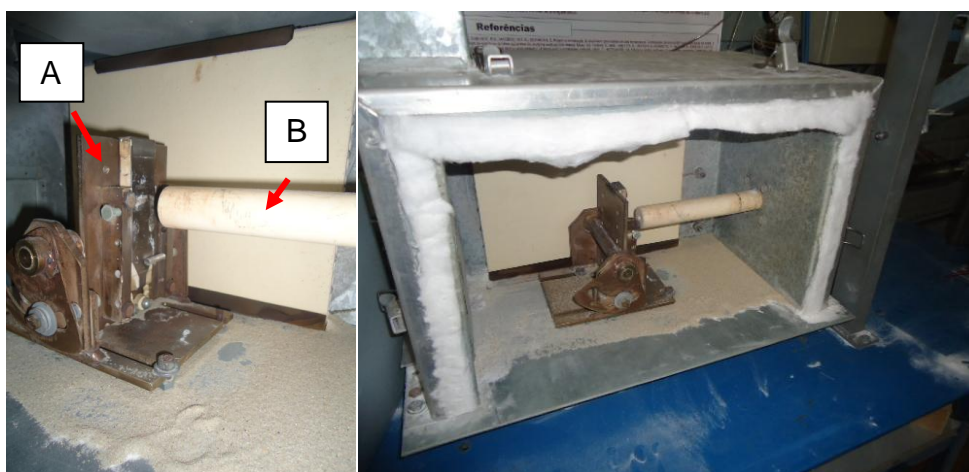


Figura 3. 3 – Em “A” o porta-amostra e em “B” o tubo cilíndrico de alumina.

## MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais utilizados nos ensaios foram escolhidos devido a serem materiais candidatos a aplicação em coifas de convertedores. Estes foram recebidos já cortados em amostras de aproximadamente 50 x 40 x 7 mm, figura 3.4. Seguindo, posteriormente, a preparação de acordo com os requisitos da norma ASTM G 76 - 02.

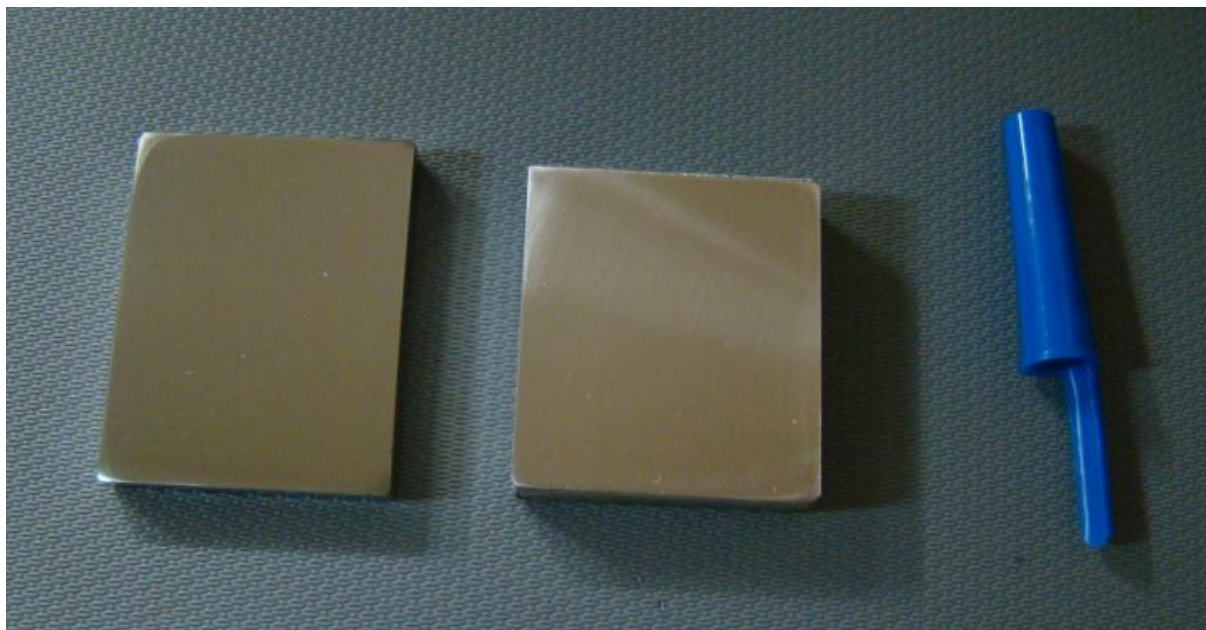


Figura 3. 4 - Foto das amostras utilizadas nos ensaios.

As amostras foram lixadas na seguinte seqüência granulométrica das lixas: 100, 220, 320 e 500 mesh. A norma contempla que seja feita a preparação com lixa de no mínimo 400 mesh. Depois de lixadas, as amostras foram lavadas com álcool e guardadas em dessecadores até sua utilização.

A fim de ser verificado se as amostras atendiam a solicitação da norma relativa a rugosidade superficial estas foram analisadas no Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo no analisador tridimensional de superfícies modo contato da Taylor Robson modelo CLI 1000 na região central de três amostras a fim de se avaliar a rugosidade superficial destas, cujos resultados poderão ser verificados na seção 4 do presente trabalho.

Os materiais utilizados foram aço ASTM A 36 para chapas, aço microligado ao molibdênio 15Mo3 e o terceiro material é uma superliga de níquel Inconel 625® depositada por solda.

Seguem, nas tabelas abaixo, a composição química e propriedades mecânicas destes materiais, respectivamente:

Tabela 3. 2 - Composição química dos materiais ensaios.

Material	Composição Química														
	C	Cu	Fe	Mn	Mo	P	Si	S	Ni	Cr	Al	Co	Nb	N	Ti
ASTM A 36 <sup>1</sup>	0,25 – 0,290	0,20	98	1,03	-	<= 0,040	0,280	<= 0,050	-	-					
15Mo3 <sup>2</sup>	0,12 – 0,20	0,30		0,40 – 0,90	0,25 – 0,35	<= 0,035	0,10 – 0,35	<= 0,030							
Inconel 625 <sup>1</sup>	<= 0,030		<= 5,0	<= 0,50	8,0 – 10	<= 0,015	<= 0,020	<= 0,015	>= 58,0	20,0 – 23,0	<= 0,040	<= 1,0	3,15 – 4,15	<= 0,20	<= 0,40

Fontes: <sup>1</sup> - <http://www.matweb.com/>;

<sup>2</sup> - DIN 17155;

Tabela 3. 3 - Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

Material	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência a tração [MPa]	Alongamento em 100mm [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Dureza [HV]	Dureza (desvio padrão)
ASTM A 36	250 <sup>1</sup>	400 – 550 <sup>1</sup>	20 <sup>1</sup>	200 <sup>1</sup>	147 <sup>3</sup>	4,3 <sup>3</sup>
15Mo3	260 – 270 <sup>2</sup>	450 – 600 <sup>2</sup>	20 – 22 <sup>2</sup>	200	144 <sup>3</sup>	5,7 <sup>3</sup>
Inconel 625	290 – 460 <sup>1</sup>	760 – 880 <sup>1</sup>	50 – 55 <sup>1</sup>	207 <sup>1</sup>	227 <sup>3</sup>	17,2 <sup>3</sup>

Fontes: <sup>1</sup> - <http://www.matweb.com/>;

<sup>2</sup> - DIN 17155;

<sup>3</sup> - Medição efetuada no TRICCORMAT/UFES.

## PARTÍCULAS ERODENTES

De acordo com a norma ASTM G 76 – 02, as partículas erosivas utilizadas nos ensaios devem possuir características uniformes em relação a tamanho, umidade e composição química.

A alumina utilizada nos ensaios foi adquirida junto à empresa Elfusa Geral de Eletrofusão Ltda, sendo analisada sua morfologia e granulometria por microscopia eletrônica de varredura feita no LCSM (Laboratório de Caracterização e Superfícies de Materiais) da Universidade Federal do Espírito Santo no Microscópio Eletrônico de Varredura modelo EVO 40 da ZEISS. As amostras de alumina foram metalizadas com ouro-platina e com carbono para que fosse realizada a análise topográfica bem como da composição do mesmo.

## PREPARAÇÃO, REALIZAÇÃO E ANÁLISE DO ENSAIO

Estando as amostras disponíveis para ensaio, inicia-se, então, a preparação do equipamento, onde deve ser conhecido o fluxo de partículas que atinge a amostra bem como a velocidade de impacto destas – já discutido no capítulo 3 no item “O erosímetro do TRICORRMAT – UFES”.

Para que se possa ajustar a quantidade de partículas que irão adentrar o fluxo de ar, devemos conhecer a taxa de partículas que atinge a amostra em uma determinada área, no caso da norma em questão, requer-se que este valor seja de  $2 \text{ mg.mm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Deve-se, então, conhecer a área que será impactada na amostra a fim de se encontrar o fluxo de partículas que deverá ser regulado no sistema de alimentação de partículas.

A partir de um teste prévio para se conhecer qual é a área impactada, multiplica-se essa área pelo fluxo recomendado pela norma.

A figura 3.5 apresenta duas amostras depois de ensaiadas. Observa-se que a amostra identificada como “b”, que foi ensaiada a 90°, apresenta a região desgastada como uma área circular. Já a amostra identificada por “a” apresenta a área impactada como uma elipse devido ao impacto em 30°.

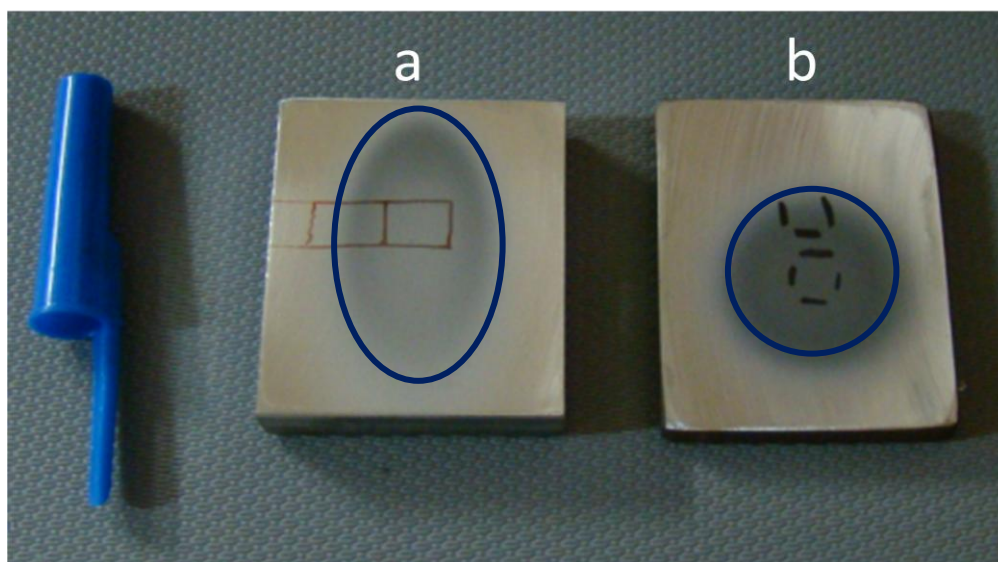


Figura 3. 5 - Foto de duas amostras impactadas em ângulos de 30° (a) e 90° (b), respectivamente.

Após essa preparação, foram realizados cinco ensaios em cada uma das condições.

Os ensaios foram realizados no Laboratório TRICORRMAT da Universidade Federal do Espírito Santo conforme os requisitos da norma e as adaptações citadas, durante 10 minutos e com as condições de ensaio como velocidade das partículas, fluxo de ar e taxa de partículas que adentram o escoamento de ar estabilizados. Os ângulos de impacto para as quatro condições de ensaio foram 30° e 90°.

As amostras foram pesadas em balança analítica Sartorius CP225D de precisão ( $10^{-4}$ ) antes e posterior ao ensaio a fim de se calcular a perda de massa bem como a taxa de erosão conforme norma ASTM G 76 - 02. Antes da pesagem, as amostras foram limpas em ultra-som com acetona por 10 minutos.

Após a realização dos ensaios as amostras foram analisadas em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo EVO 40 da ZEISS. As fotomicrografias foram realizadas em duas regiões conforme apresenta a figura 3.5. Todas as amostras foram analisadas na região central dos impactos e em região mais próxima a borda das crateras, estas regiões estão identificadas na figura 3.5 por marcações feitas com caneta hidrográfica.

Também, realizou-se a medição de dureza e microdureza nas amostras.

Os ensaios de dureza foram feitos em durômetro Vickers, onde foram extraídas duas amostras de cada material, já com a superfície preparada como citada na preparação das amostras, onde foram feitos onze ensaios em cada amostra. A dureza Vickers foi realizada com carga de 10 kgf, tempo de espera de 30 segundos e medido as diagonais no microscópio acoplado no aparelho.

Já para os ensaios de microdureza, foi utilizado o microdurômetro Pantec HXD-1000TM aferido. Foram feitas três linhas de microdurezas com carga de 10 gf na região central da cratera na seção transversal para cada condição ensaiada. As medições iniciaram a partir da superfície até a distância de 490  $\mu\text{m}$ , distanciando aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  entre cada medição, buscando correlacionar se houve encruamento na superfície de cada situação ensaiada no erosímetro.

A figura 3.6 apresenta um desenho esquemático da seção transversal das amostras e região onde foram tomadas as medições de microdureza.

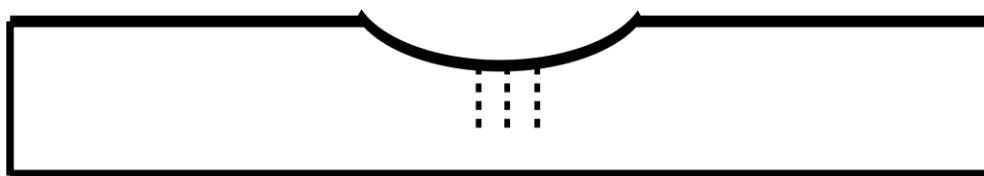


Figura 3. 6 - Desenho esquemático da seção transversal identificando os pontos onde foram realizadas as medições de microdureza.

A figura 3.7 apresenta as amostras utilizadas para medição de microdurezas e verificação de encruamento superficial.



Figura 3. 7 - Amostras embutidas para medição de microdureza na região central da cratera de desgaste. As amostras embutidas possuem diâmetro de 25 mm.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos na etapa de preparação dos ensaios bem como dos ensaios realizados nos materiais. Estes serão apresentados por condição de ensaio a fim de facilitar a discussão e comparação dos materiais ensaiados. No final da seção, serão apresentados todos os resultados e feita uma discussão entre as diferentes condições de ensaio.

### CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

#### ***Caracterização das amostras***

As amostras utilizadas devem possuir uma rugosidade superficial máxima de 1  $\mu\text{m}$ , o que segundo a norma seria alcançado mediante lixamento com lixa 400 mesh. Foram então separadas três amostras aleatoriamente e analisadas a sua rugosidade superficial no analisador tridimensional de superfícies. O valor de  $S_a$  foi de 0,076  $\mu\text{m}$  e o desvio padrão de 0,013  $\mu\text{m}$ , ou seja, muito abaixo do que a norma coloca como necessário.



O perfil superficial de uma amostra é apresentado na figura 4.1.

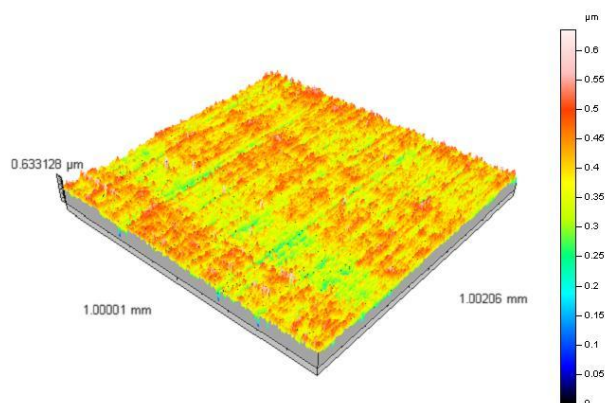


Figura 4. 1 - Perfil gerado pelo perfilômetro já descrito em uma das três amostras analisadas. Pode ser facilmente visualizado a direção do lixamento efetuado na preparação das amostras.

### ***Caracterização da alumina***

Conforme pôde ser observado na seção 2, o desgaste erosivo varia grandemente de acordo com a natureza do material erosivo como dureza, forma e tamanho. Por isso, fez-se necessário uma cuidadosa caracterização deste material através do microscópio eletrônico de varredura.

A seguir, encontra-se uma microscopia eletrônica de varredura de amostra de alumina virgem (figura 4.2), onde observa-se boa uniformidade no tamanho das partículas (de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ ), bem como a grande angulosidade na forma das partículas, que é ainda melhor observada na figura 4.2 “b”. Sendo estes requisitos da norma ASTM G 76 – 02.

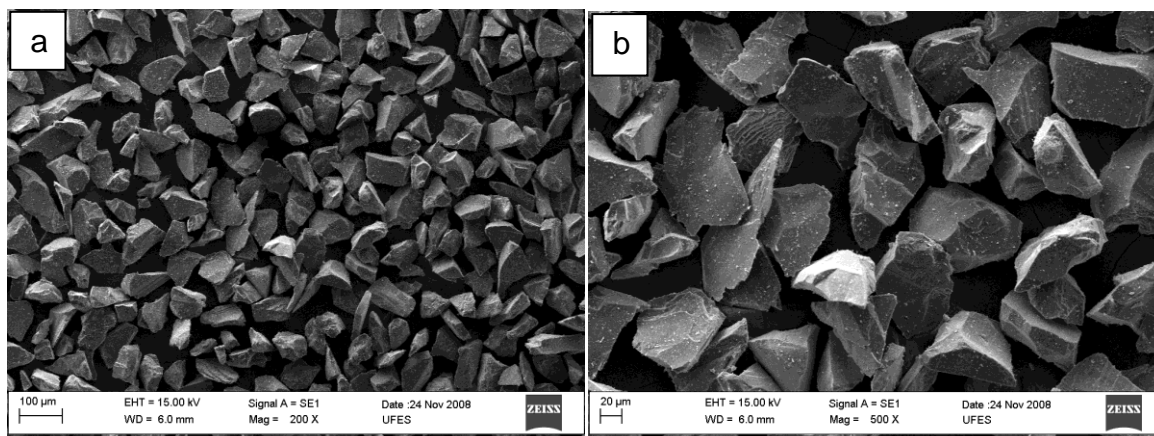


Figura 4. 2 - Micrografia eletrônica de varredura de alumina virgem. Em “a” com ampliação de 200x e em “b” com ampliação de 500x.

Outra análise realizada foi de composição química da alumina através da espectrometria de dispersão de energia (EDS). A análise comprovou que a composição química da alumina é basicamente alumínio e oxigênio e em pouca quantidade magnésio, conforme demonstra o gráfico 4.3.

A quantidade de carbono presente é devida ao processo de recobrimento com este elemento para que possa ser feita a análise química.

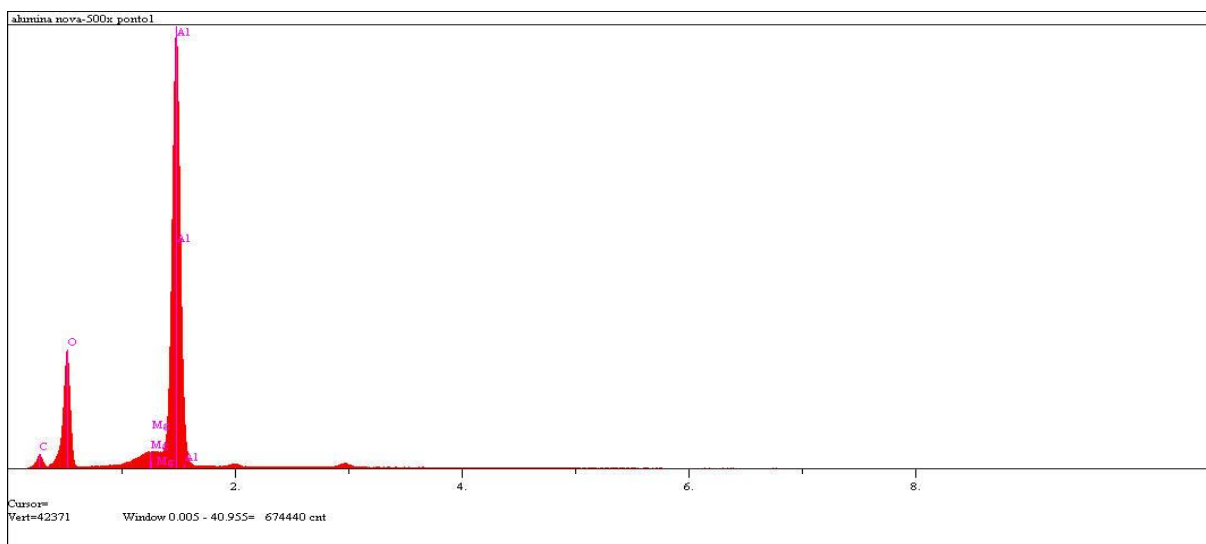


Figura 4. 3 - Gráfico da análise química por EDS realizada em alumina nova, onde pode ser visto a composição química principalmente formada por alumínio e oxigênio.

Também, foi feita a análise da alumina pós-ensaio, onde percebe-se a manutenção de sua forma facetada. Vê-se ainda a existência de pequenas partículas oriundas da cominuição da alumina, provavelmente, pelo impacto com a amostra e com outras partículas de alumina.

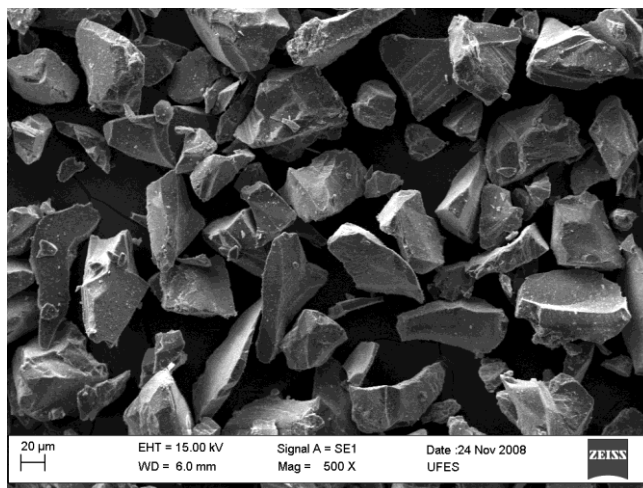


Figura 4. 4 - Micrografia eletrônica de varredura da alumina usada em ensaio a 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 500x.

## RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios realizados serão apresentados por condição. No final da seção será feita uma comparação de todos os resultados.

**Condição 1 – Velocidade de impacto = 30 m/s e ângulo = 90°**

Os primeiros ensaios a serem realizados utilizaram velocidade de 30 m/s e ângulo de 90°. A figura 4.5 apresenta os resultados nesta condição.

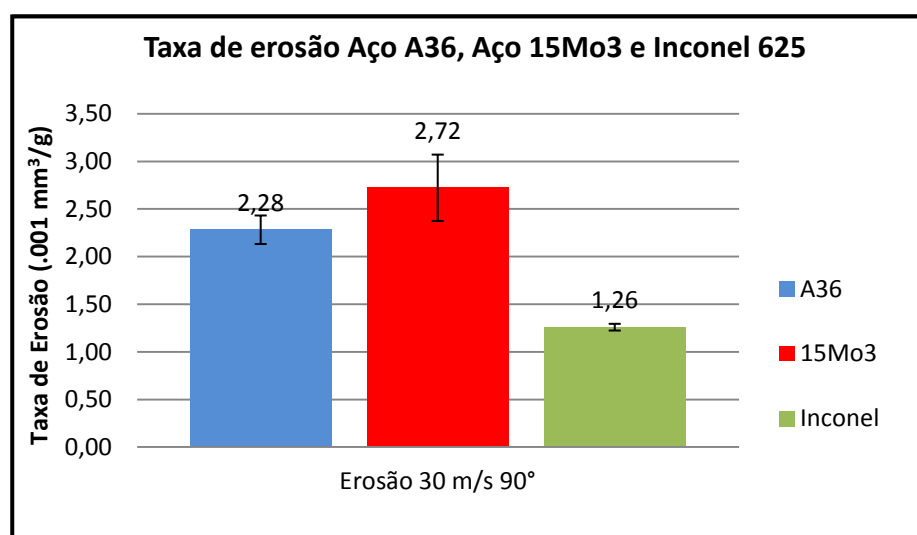


Figura 4. 5 - Taxa de desgaste do aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 1 - velocidade de 30 m/s, ângulo de impacto de 90°.

Na figura 4.6, abaixo, apresentam-se micrografias dos aços A36 e 15Mo3 na condição 1 especificada. Observa-se características de mecanismo por deformação plástica devido a deformação da superfície por microsulcamente e por microcorte conforme apresentado na seção 2.

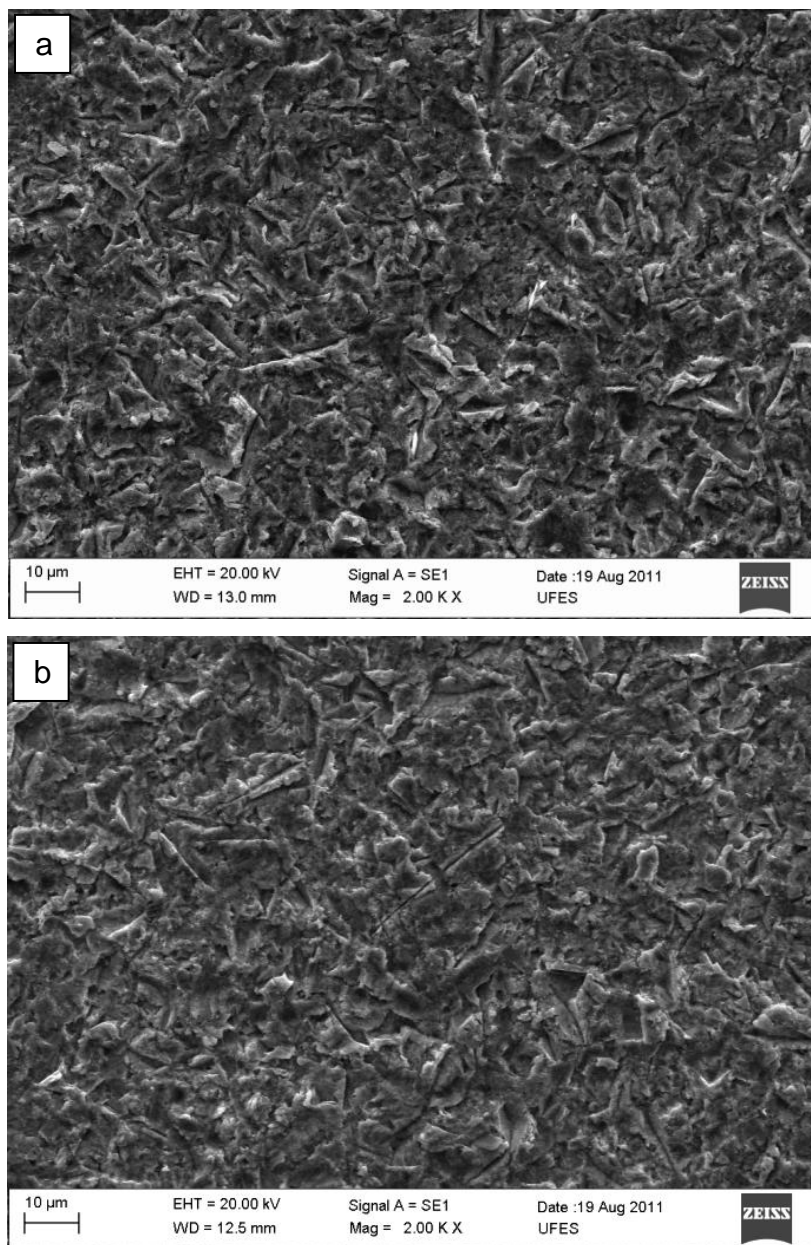


Figura 4. 6 – Micrografias eletrônicas de varredura dos aços A36 (“a”) e 15Mo3 (“b”) impactados em velocidade de 30 m/s, ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.

Comportamento interessante é apresentado pelos aços A36 e 15Mo3. A figura 4.5 mostra que apesar de as taxas de desgaste serem estatisticamente iguais parece ocorrer uma tendência suave de maior desgaste para o aço 15Mo3. Quando observada, porém, a tabela 3.3, verifica-se que as propriedades mecânicas destes materiais são equivalentes, existindo certa superioridade do aço 15Mo3 em relação ao A36. O resultado do Inconel 625 está dentro do esperado devido às propriedades elevadas deste material.

Uma possibilidade desse comportamento pode ser que em baixas velocidades de impacto a propriedade mais influente seja a dureza. Como poderá ser notado nos resultados posteriores, com velocidade de 70 m/s o comportamento se difere entre os materiais citados, devido talvez ao fato que nessa velocidade a tenacidade tenha efeito maior que propriedades relativas a resistência mecânica e dureza.

Na figura 4.7, observa-se a micrografia eletrônica de varredura para o Inconel 625. Nesta, observa-se que as marcas deixadas pelos impactos são menores que as vistas para os aços. Isso decorre da maior dureza do Inconel, resultando, em menor taxa de erosão.

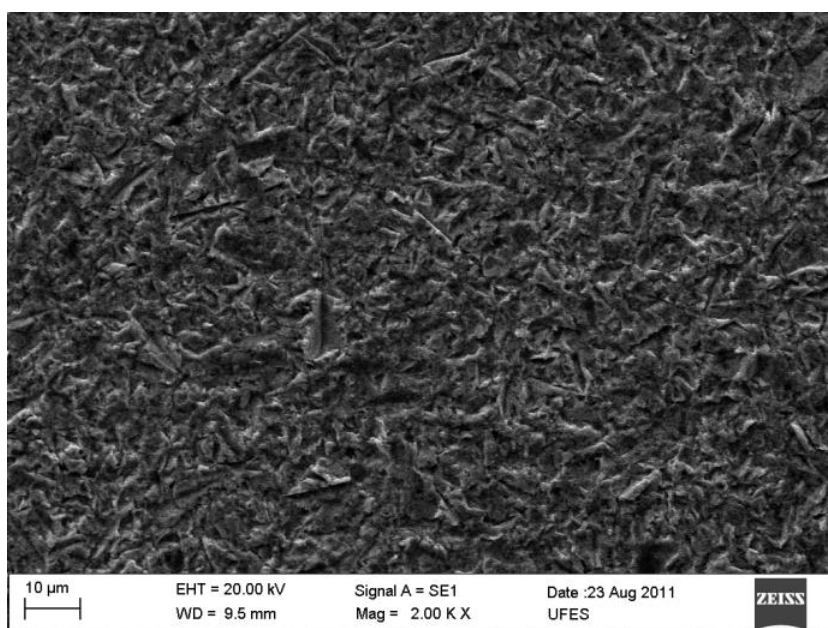


Figura 4. 7 - Micrografia eletrônica de varredura do Inconel 625 impactado em velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.

Na figura 4.8 pode observar-se o perfil da cratera de desgaste gerado pelo impacto das partículas durante o ensaio a partir do analisador tridimensional de superfície.

Observa-se que a profundidade na região de maior desgaste é muito próxima para o A 36 e o 15Mo3 – aproximadamente 40 µm. O diâmetro da região impactada (visualizado pelo início e fim da inclinação do perfil) também é muito próximo para os dois.

Porém, o Inconel 625 obteve uma profundidade de desgaste de aproximadamente metade do que foi encontrado para os dois aços.

Estes resultados corroboram com o que foi observado nas perdas de massa reveladas através da taxa de erosão para os três materiais.

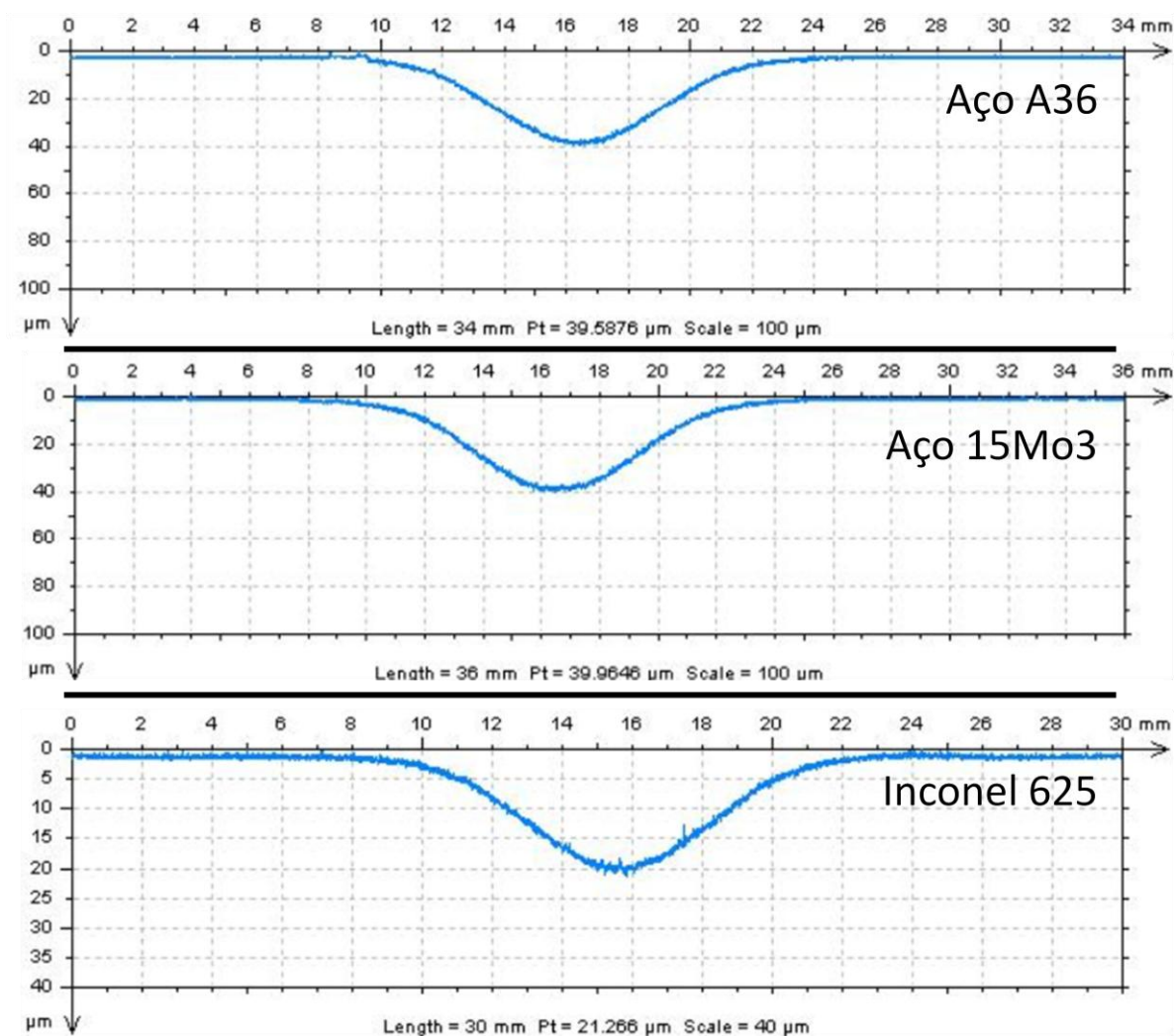


Figura 4. 8 - Perfil da cratera de desgaste gerada nos três materiais ensaiados. Aço A36, aço 15Mo3 e Inconel 625 na condição 1 de ensaio. Observar a diferença nas escalas da profundidade para os aços e o Inconel 625.

O gráfico 4.9 apresenta a relação entre a taxa de desgaste em erosão e a dureza dos materiais ensaiados. Estes resultados confirmam o que foi apresentado na seção deste estudo, que exprime que a dureza só pode ser correlacionada a resistência ao desgaste em relações particulares. Na situação abaixo apresentada, os dois aços que possuem durezas estatisticamente iguais obtiveram a mesma taxa de desgaste e o Inconel 625 que possui maior dureza apresentou menor taxa de desgaste. Porém, isso se aplica a esta situação específica. Como será observado adiante, em outras condições de ensaio, a relação não obteve boa concordância.

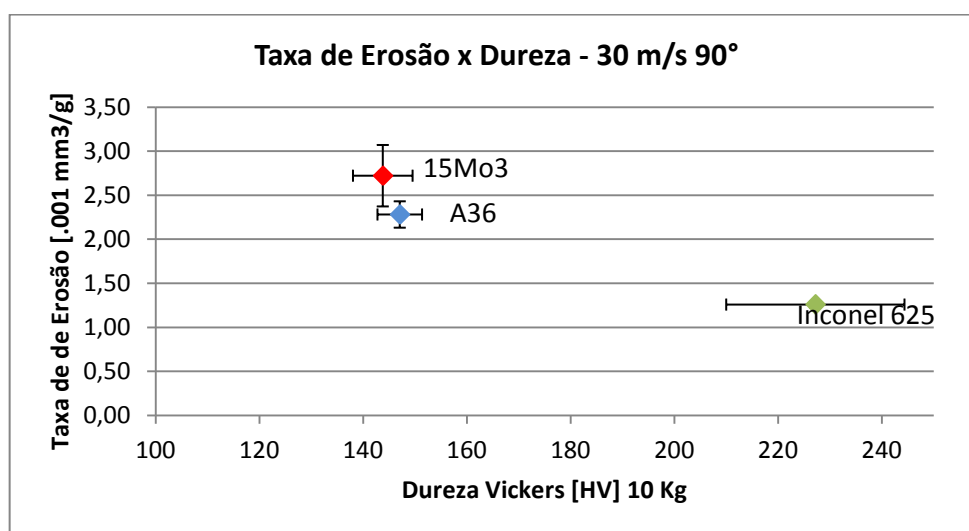


Figura 4. 9 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 1 de ensaio. O desvio-padrão do Inconel 625 é muito pequeno, não sendo possível sua observação na figura.

Também, foi analisado se ocorreu encruamento na superfície impactada através de ensaio de microdureza Vickers com carga de 10 gf. O resultado para os três materiais não apresentou variação de dureza na superfície do material, não indicando encruamento nesta condição. A fim de se verificar esse resultado, foram realizadas medições de microdureza Knoop, que permite impressões mais próximas umas as outras, principalmente na região próxima a superfície impactada. Porém, também não se verificou significativa variação na dureza superficial.

A figura 4.10 apresenta o perfil de microdureza gerado a partir da superfície desgastada para os três materiais estudado nas para as condições de ensaio 1.



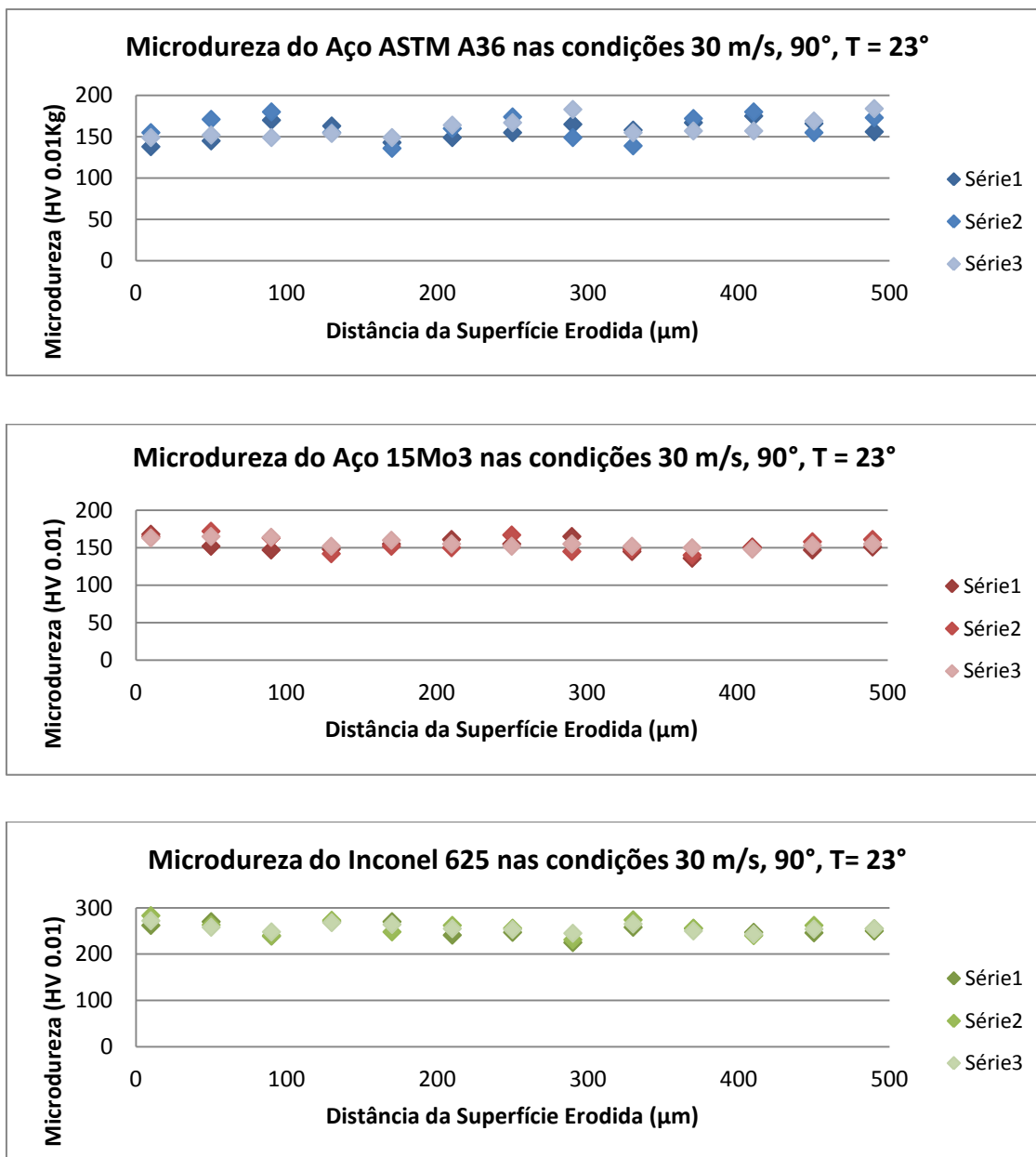


Figura 4. 10 - Perfil de microdureza gerado a partir da superfície desgastada em velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 90° para o Aço A36, Aço 15Mo3 e Inconel 625.

### **Condição 2 – Velocidade de impacto = 30 m/s e ângulo = 30°**

Na segunda condição de ensaio a velocidade de impacto foi mantida em 30 m/s, porém o ângulo de impacto passou de 90° para 30°. Conforme apresentado na seção 2 da deste estudo, por se tratar de materiais dúcteis, a taxa de erosão deve aumentar. Isso foi observado em todos os materiais conforme apresentado na figura 4.11.

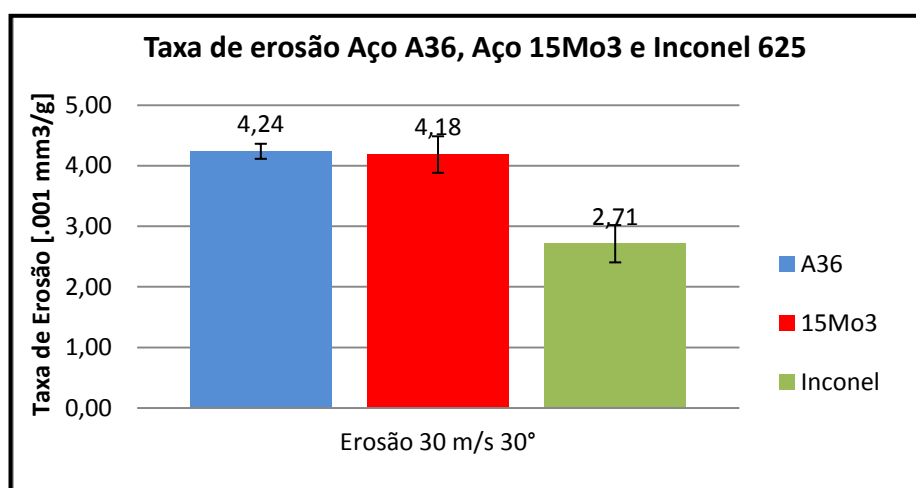


Figura 4. 11 - Taxa de desgaste do aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 2 - velocidade de 30 m/s, ângulo de impacto de 30°.

Pode-se destacar, ainda, que não houve modificação significativa no comportamento entre os materiais em relação a condição 1, apesar do aço 15Mo3 ter obtido taxa de erosão mais próxima ao aço A36, ainda que sendo estatisticamente iguais como no caso da condição anterior. O Inconel 625 manteve-se com taxa de erosão abaixo dos aços como era esperado.

A figura 4.12 apresenta uma micrografia do Inconel 625 para a condição 2 onde observa-se novamente mecanismo por deformação plástica composto por microcortes e microsulcamento devido aos sucessivos impactos.

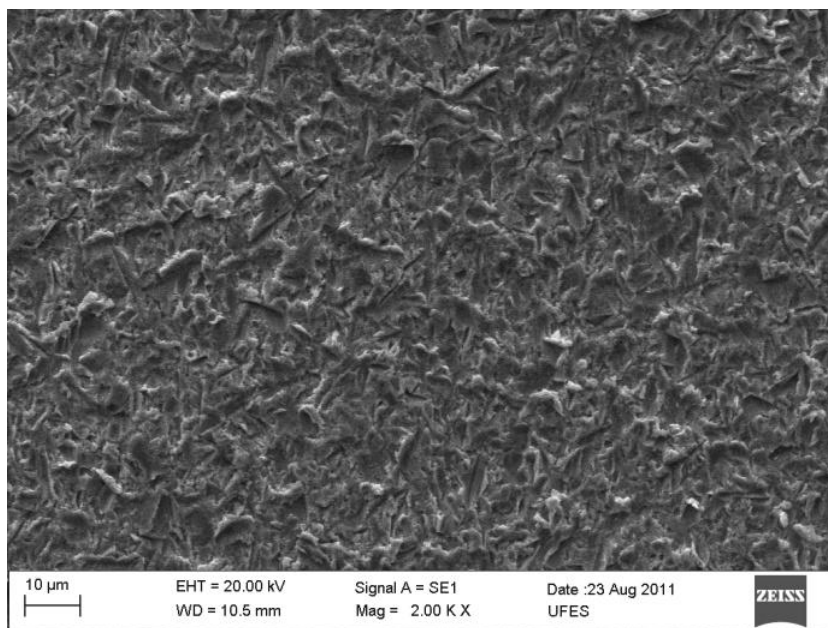


Figura 4. 12 – Micrografia eletrônica de varredura do incoel 625 impactado em velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 30°. Ampliação de 2000x.

A figura 4.13 apresenta a relação entre a taxa de erosão e a dureza para os três materiais. Conforme ocorre na condição 1, para a condição 2 a dureza apresentou boa concordância com a taxa de desgaste.

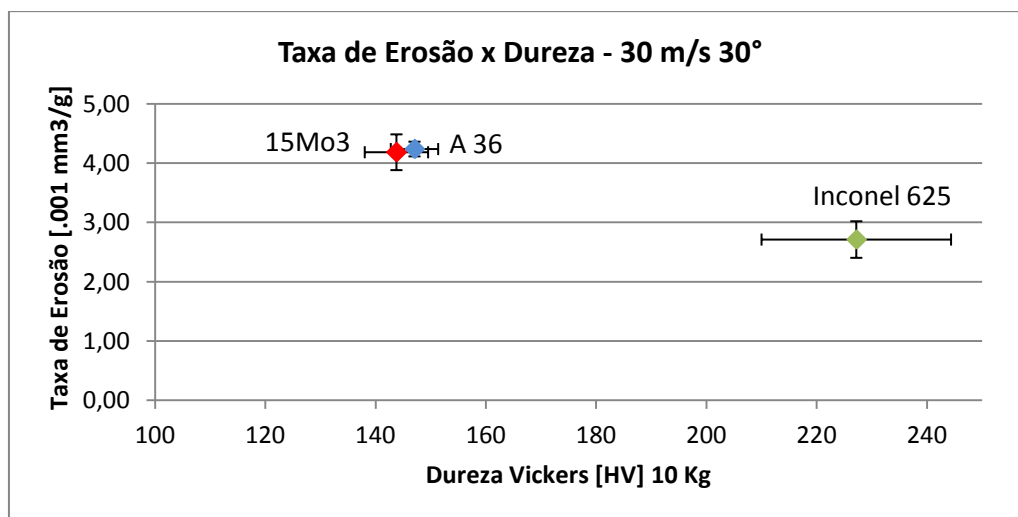


Figura 4. 13 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Incoel 625 com suas respectivas durezas para a condição 2 de ensaio.

Também, não se verificou encruamento na condição 2 através de ensaios de microdureza Vickers.

### Condição 3 – Velocidade de impacto = 70 m/s e ângulo = 90°

Na condição 3, os resultados apresentaram uma mudança de comportamento interessante. Com o aumento na velocidade de 30 para 70 m/s, os aços A36 e 15Mo3, que na condição 1 e 2 apresentavam estatisticamente a mesma taxa de desgaste, na condição 3 proporcionaram diferença apreciável. A figura 4.14 apresenta esses resultados.

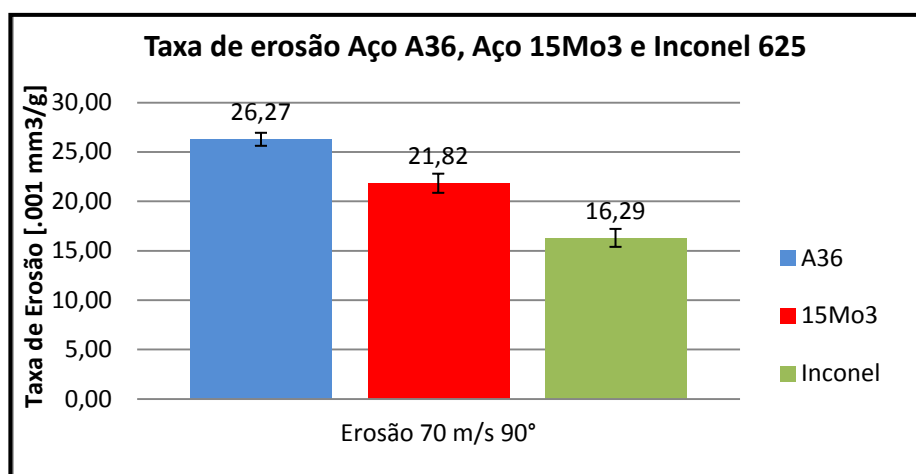


Figura 4. 14 - Taxa de desgaste do aço A30, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 3 - velocidade de 70 m/s, ângulo de impacto de 90° e temperatura ambiente.

Este comportamento apresentado na figura 4.14 confirma o exposto no capítulo 2 deste trabalho que demonstra que a dureza, apesar de ser um parâmetro importante na seleção de materiais para uso em erosão, em algumas situações tem menor influência na taxa de erosão.

No caso acima, os aços A36 e 15Mo3 possuem estatisticamente a mesma dureza, porém suas taxas de erosão são distintas. Pode-se tentar atribuir essa melhora no comportamento do aço 15Mo3 a sua maior tenacidade. Apesar de não se possuir dados do ensaio de tração do material recebido, a tabela 3.3 apresenta as propriedades mecânicas para os três materiais utilizados. Neste caso, devido aos maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência a tração do Aço 15Mo3 seu módulo de tenacidade será maior que o do aço A36.

A idéia de uma maior influência da propriedade tenacidade em detrimento da dureza parece razoável. Esta idéia é a base inclusive para explicar a diferença de comportamento entre materiais frágeis e dúcteis com o ângulo de impacto. Devido a maior energia cinética nas partículas, a tenacidade apresenta maior influência que a dureza, a qual é mais significativa quando as partículas possuem menor energia cinética.

A figura 4.15 apresenta micrografias dos aços A36 e 15Mo3 onde mais uma vez observa-se extensa deformação plástica devido aos mecanismos de sulcamento e corte. Não se observa expressivas diferenças entre as micrografias dos dois materiais.

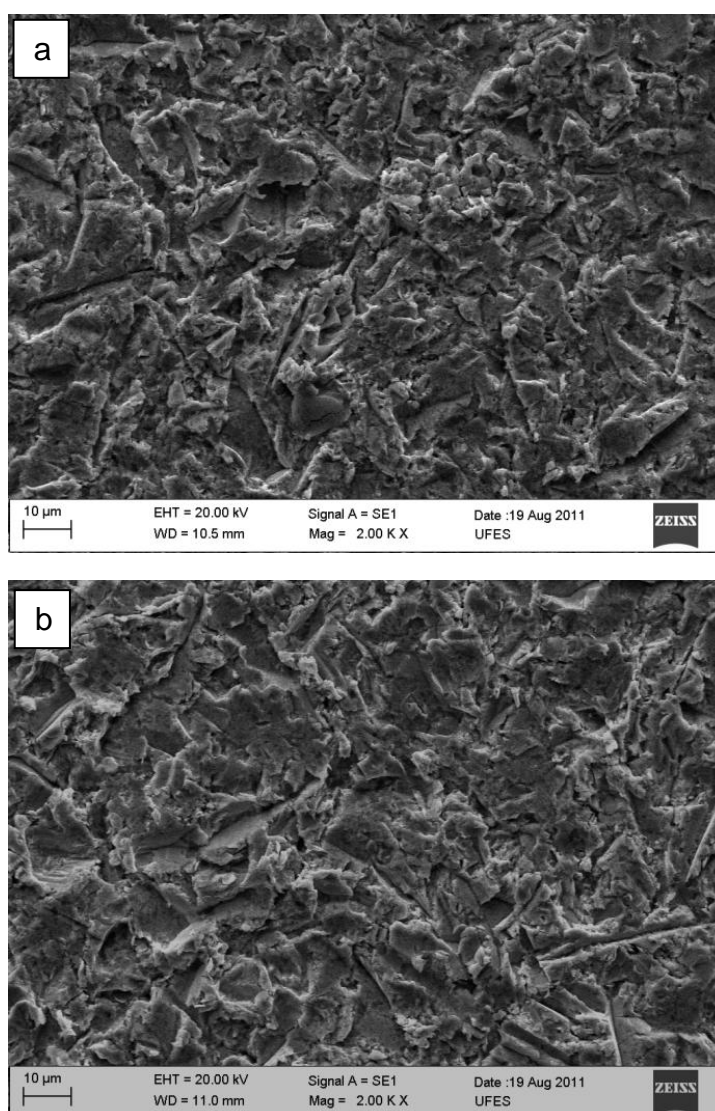


Figura 4. 15 – Micrografias eletrônicas de varredura dos aços A36 (“a”) e 15Mo3 (“b”) impactados em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.

A figura 4.16 apresenta uma micrografia eletrônica de varredura para o Inconel. Observa-se, novamente, que as marcas oriundas do impacto das partículas apresentam menor profundidade. Isso deve-se a sua maior dureza e excelente módulo de tenacidade. Por isso, mais uma vez, esse material apresenta o menor desgaste.

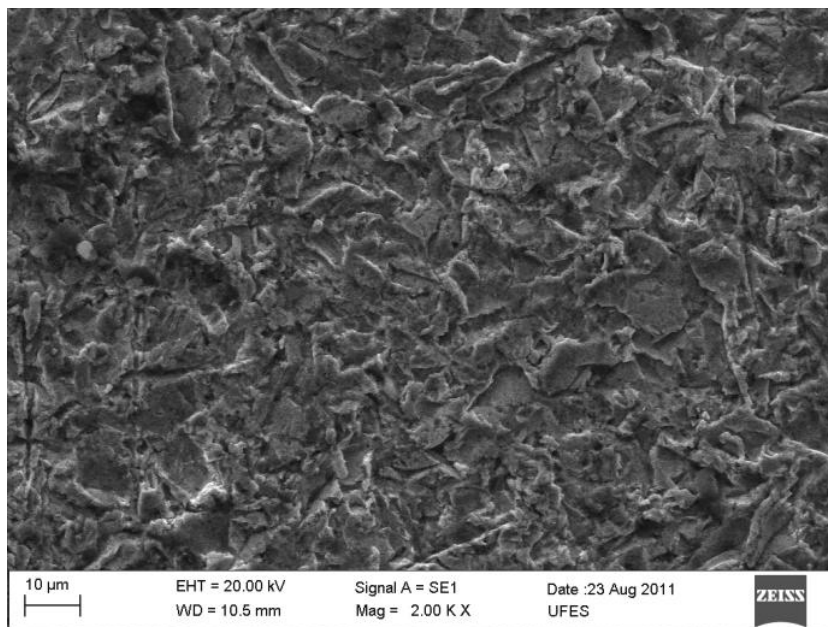


Figura 4. 16 - Micrografias eletrônicas de varredura do Inconel 625 impactado em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.

A figura 4.17 apresenta a relação entre a taxa de desgaste e a dureza dos materiais. Observa-se que esta relação não apresenta boa concordância. Os aços A36 e 15Mo3 possuem a mesma dureza, porém suas taxas de erosão são distintas. Conforme apresentado anteriormente, atribuiu-se esse resultado ao maior módulo de tenacidade do aço 15Mo3.

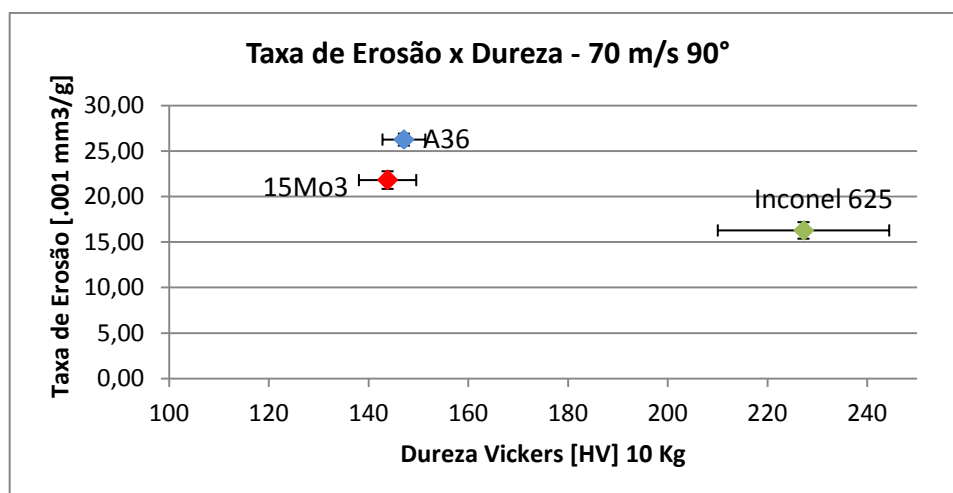


Figura 4. 17 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 3 de ensaio. O desvio-padrão do Aço A36 é muito pequeno, não sendo possível sua observação na figura.

Apesar de na condição 1, com velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 90°, não ter-se verificado encruamento na superfície dos materiais, poder-se-ia esperar que na condição 3, devido a maior velocidade e, conseqüentemente, maior energia oriunda do impacto ocorresse encruamento superficial. Porém, conforme observa-se na figura 4.18, também não se observou encruamento superficial.

Apesar de em estudos realizados por outros autores, aqui citados, ter-se observado o encruamento, as condições foram diferentes. Nos trabalhos apresentados por estes autores, o fluxo de partículas foi aproximadamente quatro vezes maior e o tamanho médio das partículas também foi muito superior. As partículas deste trabalho possuíam diâmetro médio de 50  $\mu\text{m}$ , contra 355  $\mu\text{m}$  em outros estudos.

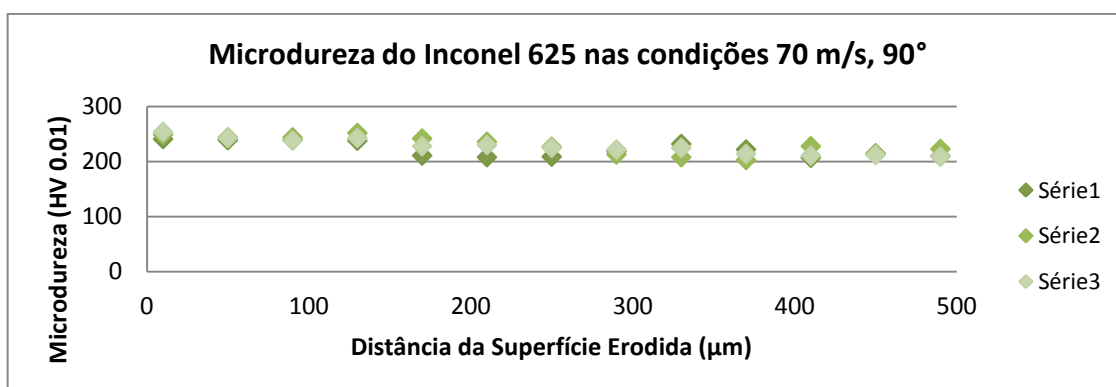
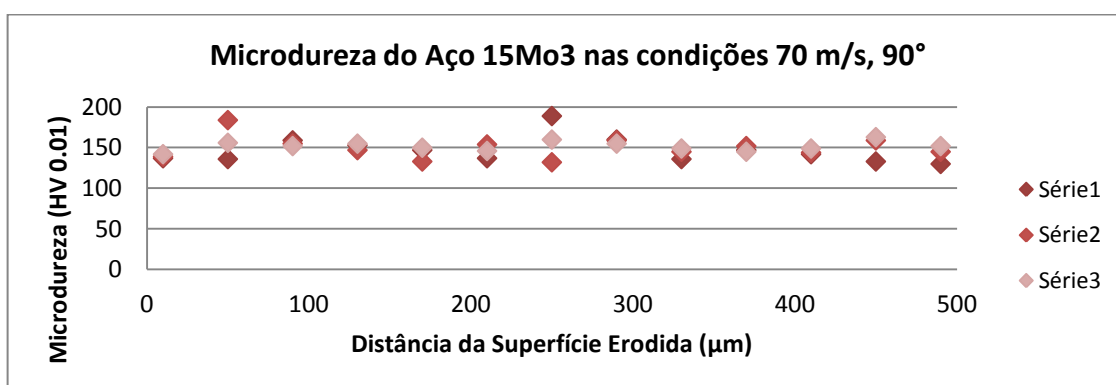
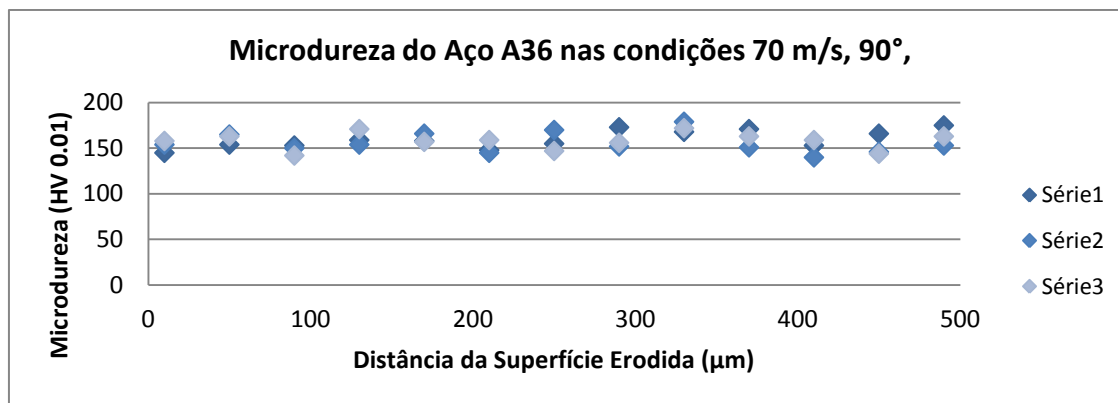


Figura 4. 18 - Perfil de microdureza gerado a partir da superfície desgastada em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90° para o Aço A36, Aço 15Mo3 e Inconel 625.



**Condição 4 – Velocidade de impacto = 70 m/s e ângulo = 30°**

Os resultados apresentados na condição 4 mantiveram a mesma tendência da condição 3.

O material de maior taxa de desgaste continuou sendo o Aço A36, seguido do Aço 15Mo3 e o que obteve a menor taxa de erosão foi o Inconel 625.

A figura 4.19 apresenta o resultado do ensaio na condição 4.

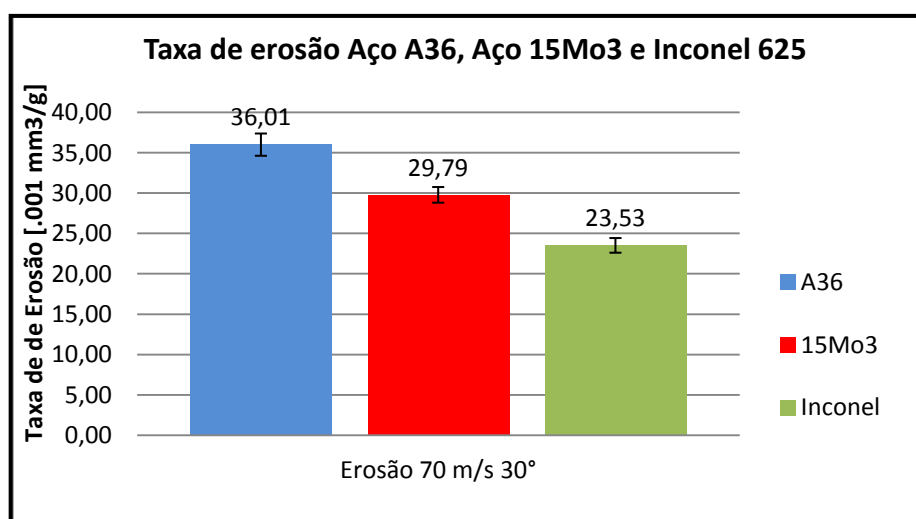


Figura 4. 19 - Taxa de desgaste do aço A 36, 15Mo3 e Inconel 625 na condição 4 - velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 30°.

Este comportamento também corrobora com o apresentado na seção 2, item “Ângulo de impacto”, para erosão em baixos ângulos. Onde se espera uma taxa de desgaste maior que a encontrada para impactos em ângulos retos.

A figura 4.20 apresenta micrografias de varredura eletrônica para o aço A36 e para o Inconel 625. Encontram-se em destaque marcas de microcorte, principalmente, devido ao baixo ângulo de impacto.

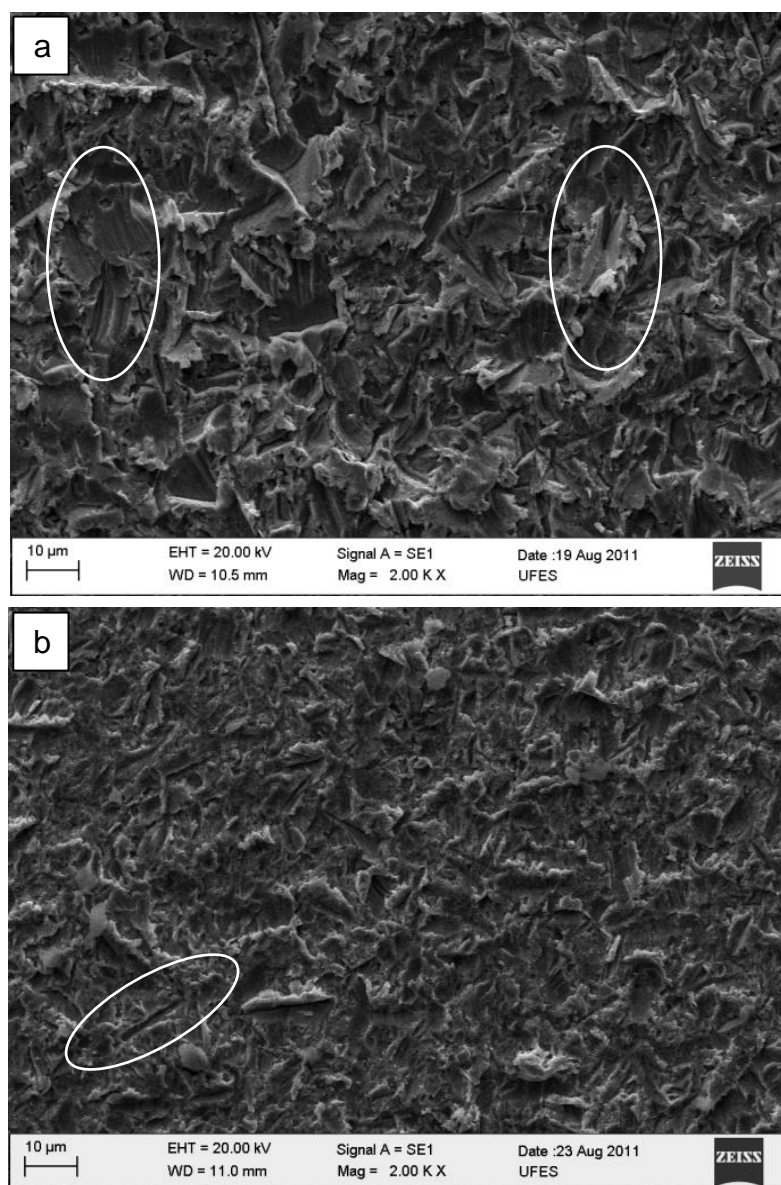


Figura 4. 20 – Micrografias eletrônicas de varredura dos aços A36 (“a”) e Inconel 625 (“b”) impactados em velocidade de 70 m/s, ângulo de impacto de 30°. Destaca-se, ainda, marcas de microcorte nos dois materiais, principalmente devido ao baixo ângulo de impacto. Ampliação de 2000x.

Nesta figura, observa-se que as marcas geradas pelos sucessivos impactos são menores no Inconel 625 quando comparados com as do Aço A36. Isso provavelmente deve-se a maior dureza e módulo de tenacidade encontrados no Inconel 625.

A figura 4.21 apresenta o perfil da cratera desgastada para o aço A36 e para o Inconel 625. A profundidade máxima de desgaste para o aço A36 é de aproximadamente 573 µm contra aproximadamente 335 µm para o Inconel. Essa diferença, obviamente, irá refletir na taxa de desgaste, apreciavelmente maior para o aço A36.

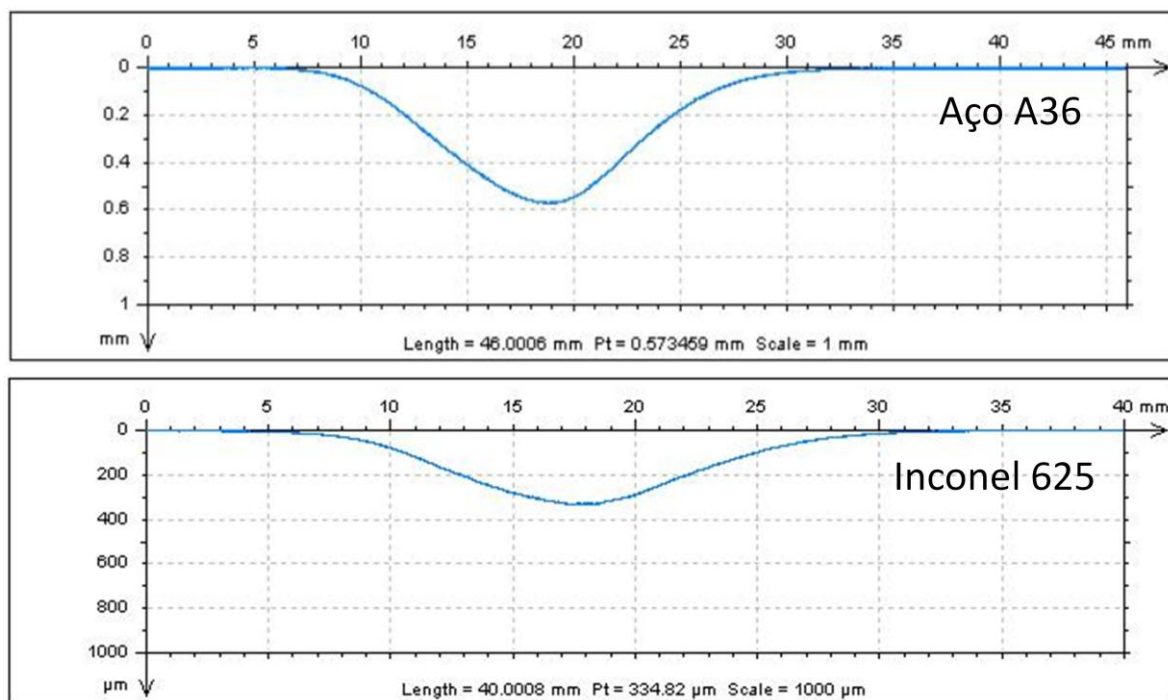


Figura 4. 21 - Perfil da calota de desgaste do aço A36 e do Inconel 625 na condição 4. A direção do impacto das partículas aumenta na direção do referencial do eixo das abscissas.

A figura 4.22 apresenta para a condição de ensaio 4, a relação entre a dureza dos materiais e sua taxa de erosão onde, assim como na condição 3, não há boa correlação entre a dureza e a taxa de desgaste destes materiais.

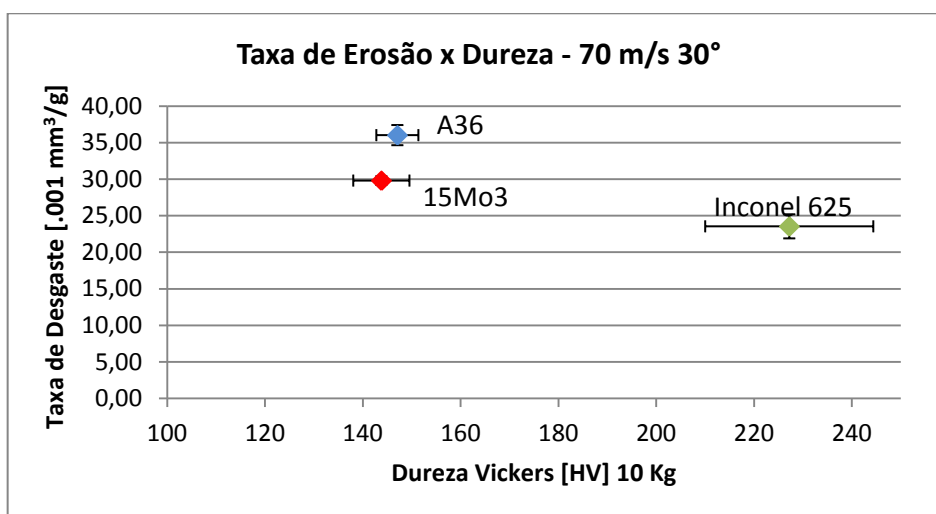


Figura 4. 22 - Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do Aço A36, 15Mo3 e Inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição 4 de ensaio.

## Comparações entre as diversas condições

É importante também comparar os resultados obtidos nas diferentes velocidades.

Para facilitar essa análise a figura 4.23 apresenta o resultado de todos os ensaios realizados agrupados por condição.

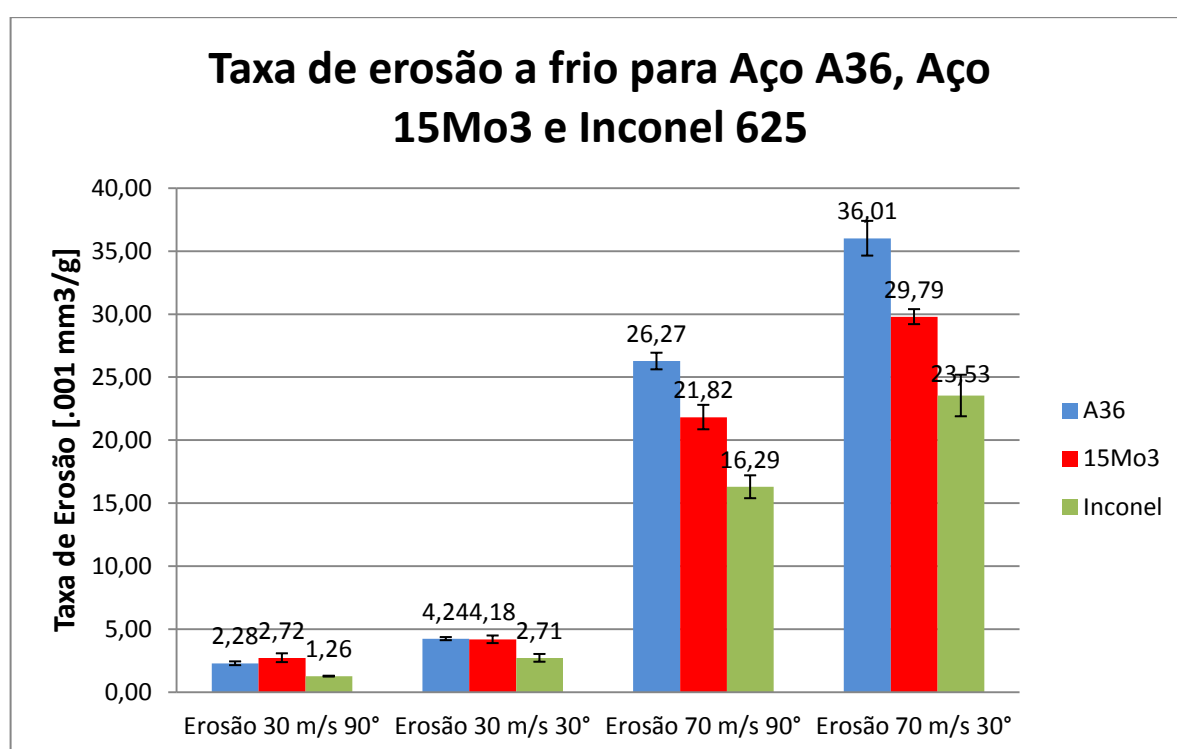


Figura 4. 23 - Gráfico que apresenta todas as condições de ensaio e todos os materiais utilizados agrupados.

Pode-se observar o grande aumento na taxa de desgaste quando a velocidade é aumentada de 30 para 70 m/s, uma vez que a taxa de desgaste se relaciona com a velocidade de impacto através de uma função exponencial, conforme já exposto na seção 2 do trabalho.

Buscou-se analisar, também, o comportamento do expoente “ $p$ ” da equação 2.1. A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4. 1 - Valores de "E<sub>0</sub>" e "p" para os três materiais ensaiados nos ângulos de 30° e 90°.

Material	30°		90°	
	E <sub>0</sub>	p	E <sub>0</sub>	p
<b>A36</b>	7,88E-04	2,5	1,26E-04	2,88
<b>15Mo3</b>	1,58E-03	2,3	6,41E-04	2,46
<b>Inconel</b>				
<b>625</b>	4,64E-04	2,6	4,34E-05	3,02

Conforme pode se observar, houve variação nos valores do expoente "p" entre os diferentes materiais bem como entre os ângulos de impacto.

Isto corrobora com a literatura na revisão bibliográfica apresentada, a qual exprime que o expoente "p" é também influenciado pelo ângulo de impacto. Para as condições de ensaio deste trabalho com o aumento do ângulo de impacto de 30° para 90° os valores do expoente também aumentaram.

Os valores do expoente "p" encontram-se entre os apresentados por Hutchings e Roy, variando entre 2 e 3 para metais e com variação de acordo com o ângulo de impacto.

Porém, não se observou como sugerido por Lindsley e Marder independência no valor de "p" em relação as propriedades dos materiais. Esta diferença nos valores do expoente foram mais pronunciadas para impactos em ângulos retos.

Chama atenção, porém, a maior diferença que ocorreu entre os valores do expoente de velocidade do aço 15Mo3. Os valores do aço A36 e do Inconel não apresentaram diferença tão acentuada tanto em 30° quanto em 90° ângulo de impacto.

Na figura 4.24 e 4.25, também, pode-se observar a grande diferença no tamanho das

marcas deixadas pelos múltiplos impactos nas duas velocidade utilizadas. Na figura 4.24 o aço 15Mo3 quando impactado por partículas com velocidade de 30 m/s apresenta um número muito maior de eventos porém tendo este tamanho inferiores aos apresentados pelo mesmo material em velocidade de 70 m/s.

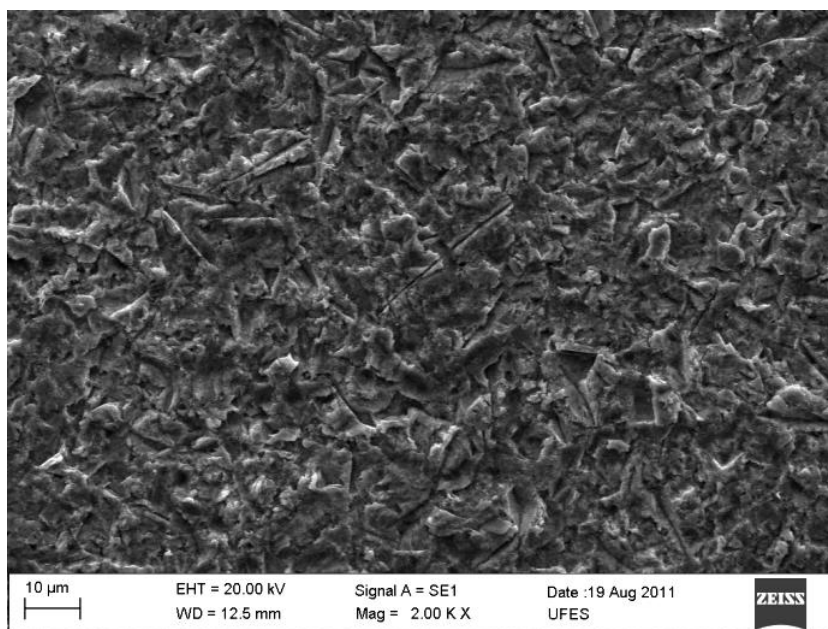


Figura 4. 24 - Micrografia do aço 15Mo3 impactado a 30 m/s em ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.

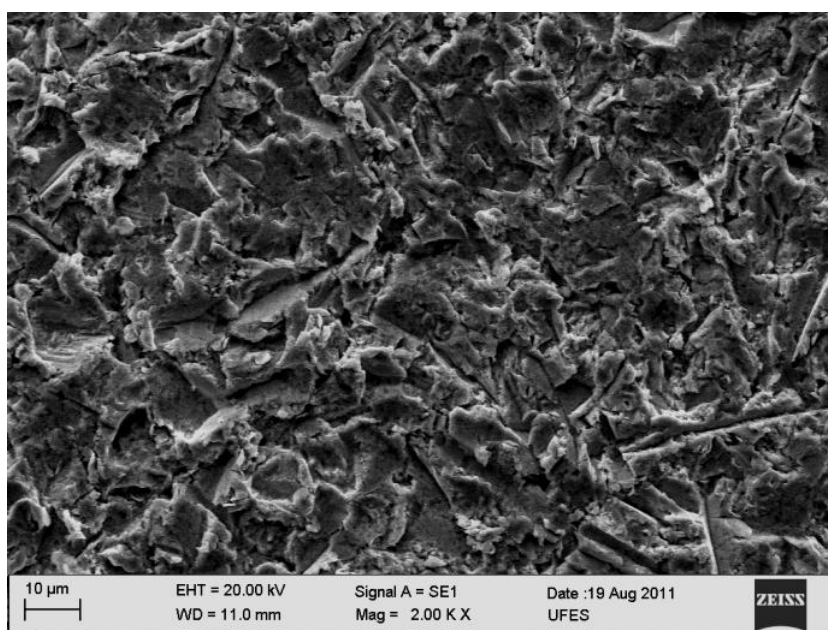


Figura 4. 25 - Micrografia do aço 15Mo3 impactado a 70 m/s (b) em ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2000x.

A maior energia cinética presente nas partículas a 70 m/s, também, aumenta muito a profundidade da cratera desgastada. A figura 4.26 mostra o perfil da cratera desgastada para o aço 15Mo3 em velocidades de 30 m/s e 70 m/s.

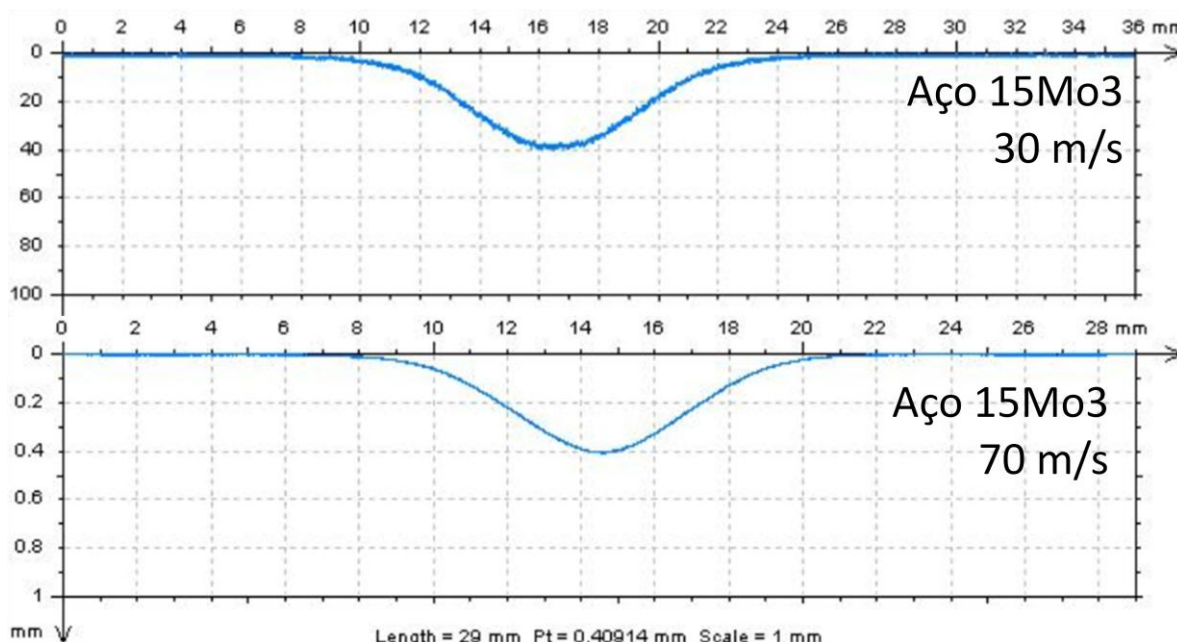


Figura 4. 26 - Perfil da calota de desgaste do o aço 15Mo3 impactado a 30 m/s (a) e a 70 m/s (b) com ângulo de impacto de 90°.

Observando a figura 4.26 nota-se que a profundidade da cratera foi de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  quando o material foi impactado a 30 m/s, porém com o aumento da velocidade a cratera passou a ter profundidade em torno de 400  $\mu\text{m}$ , 10 vezes maior quando impactado a 70 m/s.

Outra análise realizada foi com relação a comparação feita entre os impactos realizados a 90° e a 30°. A figura 4.27 e 4.28 apresentam micrografias do Aço A36 quando impactado a 70 m/s em 90° e 30°, respectivamente. Nesta figura podem-se observar diferenças nos modos de arrancamento de material. Na 4.27, observa-se maior sulcamente no mecanismo de desgaste, conforme detalhe na figura. Na figura 4.28, onde o impacto foi em ângulo de 30°, as marcas deixadas pelas partículas erosivas sugerem um movimento de corte, o que facilita o arrancamento de material, conforme detalhe. Este fato foi comprovado pelas maiores taxas de erosão. Também, é possível notar que após a perda de contato da partícula com o material, uma

pequena quantidade do material desgastado ainda fica preso, por uma curta região, sendo esta facilmente retirada em um próximo evento. Isso corrobora com o apresentado na seção 2 a partir de Hutchings.

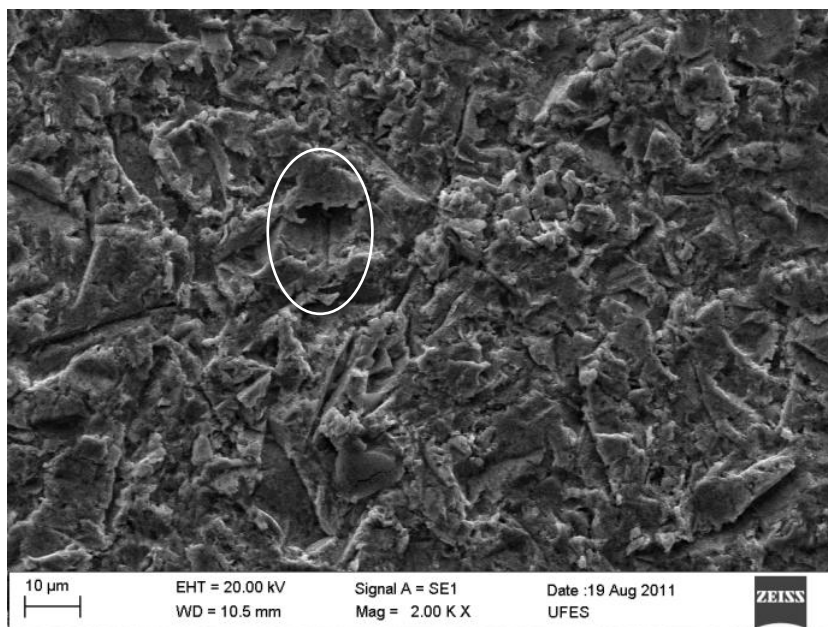


Figura 4. 27 - Micrografia do aço A36 impactado a 70 m/s e 90°. Ampliação de 2000x.

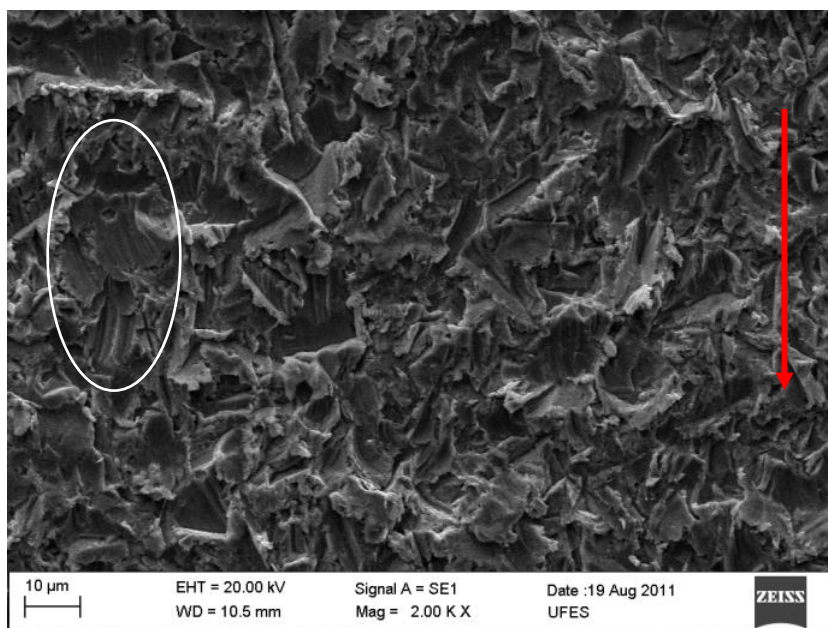


Figura 4. 28 – Micrografia do aço A36 impactado a 70 m/s e 30° (b). A seta indica o sentido de impacto das partículas. Ampliação de 2000x.



A figura 4.29 apresenta o perfil da cratera gerada pelo impacto das partículas erosivas no aço A36 na velocidade de 70 m/s com ângulos de impacto de 30° e 90°. Observa-se que o perfil para o qual o ângulo de impacto foi de 30° apresenta maior profundidade (aproximadamente 573 µm) que o impactado a 90° (aproximadamente 532 µm). Porém, vale ressaltar que o perfil da cratera gerado pelo impacto com ângulo de impacto de 30° é não uniforme, ao contrário do perfil de 90°.

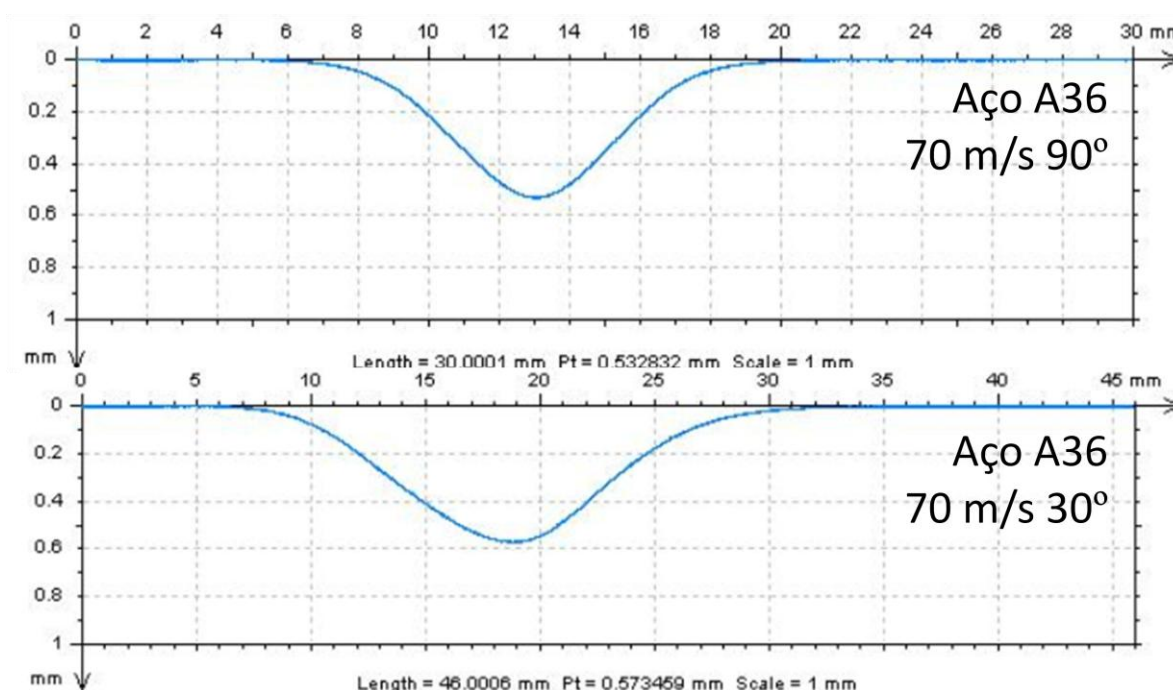


Figura 4. 29 - Perfil da calota de desgaste do o aço A36 impactado a 70 m/s e ângulo de impacto de 90 e 30°.

Outra análise realizada foi da severidade do desgaste. A tabela 4.2 apresenta a severidade do desgaste obtido pela relação entre a taxa de erosão em 70 m/s sobre a taxa de erosão a 30 m/s.

Tabela 4. 2 - Severidade do desgaste erosivo obtido pela relação entre velocidades.  $E_{70}/E_{30}$ .

<b>Severidade do desgaste</b>		
<b>Materiais</b>	<b>90°</b>	<b>30°</b>
<b>Aço A36</b>	11,5	8,39
<b>Aço 15Mo3</b>	6,01	7,4
<b>Inconel 625</b>	12,94	8,68

Observa-se pela tabela 4.2 que a severidade é muito alta principalmente para o aço A36 e o Inconel 625. E, mesmo a do aço 15Mo3 sendo menor, ainda é um valor elevado. Isto confirma, mais uma vez, o grande aumento na taxa de erosão com o aumento da velocidade.

A tabela 4.3 apresenta a severidade quando se relaciona as taxas de erosão com o ângulo de impacto. O valor é obtido dividindo-se a taxa de erosão em 30° pela taxa de erosão em 90°.

Tabela 4. 3 - Severidade do desgaste erosivo obtido pela relação entre ângulos de impacto. E30°/E90°.

<b>Severidade dos desgastes</b>		
<b>Materiais</b>	<b>30m/s</b>	<b>70m/s</b>
<b>Aço A36</b>	2,13	1,37
<b>Aço 15Mo3</b>	1,11	1,37
<b>Inconel 625</b>	2,15	1,44

Novamente, observa-se que os materiais com características dúcteis tende a elevar o desgaste com o aumento do ângulo de impacto.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios puderam-se obter as seguintes conclusões:

Os mecanismos de desgaste apresentados para os três materiais estudados e em todas as condições foram por deformação plástica.

Conforme era esperado o Inconel 625 obteve o melhor resultado nos ensaios de erosão em todas as condições.

Não se observou encruamento na seção transversal em nenhum dos materiais estudados em todas as condições de ensaio.

O expoente da velocidade apresentado na fórmula 2.1 seguiu os valores apresentados em literatura para materiais dúcteis

A variação da taxa de desgaste com a variação da velocidade e do ângulo de impacto seguiu o que se apresenta em literatura;

O Aço 15Mo3 apresentou grande diferença em seu comportamento, em baixa velocidade de impacto se comportou como o Aço A36, já em velocidade de 70 m/s teve um melhor comportamento que o Aço A36. Este comportamento provavelmente foi devido ao maior módulo de tenacidade do Aço 15Mo3 em relação ao A36.

## SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Seria importante realizar ensaios em temperatura elevada, em torno de 250°C. Essa temperatura é aproximadamente a que os materiais são utilizados na prática e podem apresentar novos mecanismos de desgaste devido a interação com a formação de óxidos. Pode-se ainda correlacionar as taxas de desgaste com outras propriedades mecânicas ou com propriedades a quente.

Também podem se realizar ensaios com maiores fluxo de partículas ou partículas maiores e assim, buscar encontrar encruamento superficial.

## 6. REFERÊNCIAS

- 1 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G76: Conducting erosive tests by solid particle impingement using gas jets.** West Conshohocken: Pennsylvania, 2002.
- 2 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G 40 - 02: Standard terminology relating to wear and erosion.** Pennsylvania, 2002.
- 3 CALVI, D. P. **Construção e validação de erosímetro a jato de ar.** Vitória: Dissertação, PPGEM, Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.
- 4 CALVI, D. P.; COSTA JUNIOR, W.G.; QUEIROZ, R.S.; MACÊDO, M.C.S.; SCANDIAN, C. **Projeto e construção de erosímetro de erosímetro para testes em alta temperatura.** Contribuição técnica ao 62<sup>a</sup> Congresso Anual da ABM, 2006: Vitória, Brasil.
- 5 CASTRO, J. T. P.; FREIRE, J.L.F.; MEGGIOLARO, M.A.; VIDAL, A.C.N.; ANDUEZA, A.; e VIEIRA, R.D. **Interação entre corrosão e fadiga térmica oligocíclica na coifa de um forno siderúrgico.** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2008.
- 6 COSTA, E.R.; FURTADO, R.G. **Simulação computacional do escoamento de gases ao longo da coifa do convertedor da aciaria da ArcelorMittal Tubarão.** Projeto de graduação - UFES - Vitória, 2007.
- 7 EWALD, H.; CALVI, D.P.; SILVA, F.J.; SCANDIAN, C. **Construção de erosímetro a jato de ar e sua validação inicial segundo a norma ASTM G 76.** Contribuição técnica ao 64<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 2009: Belo Horizonte, Brasil.
- 8 EYRE, T.S. **Wear characteristics of metals.** Tribology International, 1976: p. 203-212.

- 9 FINNIE, Ian. **Some reflections on the past and future of erosion.** Wear, 1995: p. 1- 10.
- 10 HAUGEN, K.; KVERNOLD O.; RONOLD A.; SANDBERG, R. **Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves.** Wear, 1995. p. 179-188.
- 11 HUTCHINGS, I. M. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials.** London: Arnold, 1992.
- 12 HUTCHINGS, I.M. **ASM HANDBOOK, Vol. 8 - Mechanical Testing and Evaluation.** 2000.
- 13 JOST, H.P. **Tribology - origin and future.** Wear, 1990: p. 1-17.
- 14 JOST, Peter. **Lubrication (tribology) education and research.** London: HMSO, 1966.
- 15 JOST, Peter. **Committee on tribology report.** ? : HMSO, 1968.
- 16 KLEIS, I.; KULU, P. **Solid particle erosion.** Estônia: Springer, 2008.
- 17 LEVIN, B. F.; DUPONT J.N.; MARDER A.R. **Solid particle erosion resistance of ductile wrought superalloys and their weld overlay coatings.** Journal of Materials Science, 1998: p. 2153-2163.
- 18 LINDSLEY, B. A.; MARDER, A. R. **The effect of velocity on the solid particle erosion rate of alloys.** Wear, 1999: p. 510-516.
- 19 LIU, X. **A study on the erosion and erosion-oxidation of metal matrix composites.** Tese de doutorado, 2003.
- 20 RABINOWICZ, E. **The least wear.** Wear, 1984: p. 533-541.
- 21 ROY, M. **Elevated temperature erosive wear of metallic materials.** Journal of physics D: Applied Physics, 2006: p. 101-124.

- 22 RUFF, A. W.; IVES, L. K. **Measure of solid particle velocity in erosive wear.** Metallurgy Division, National Bureau of Standards, 1975.
- 23 STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** Elsevier, 2001.
- 24 STACK, M.M.; LEKATOS, S.; STOTT, F.H. **Erosion-corrosion regimes: number, nomenclature and justification.** Tribology International, 1995: Vol. 28; p. 445-451.
- 25 SUCKLING, M.; ALLEN, C. **Critical variables in high temperature erosive wear.** Wear, 1997. p. 528-536.
- 26 SUNDARARAJAN, G. **The solid particle erosion of metallic materials: The rationalizations of the influence of material variables.** Wear, 1995. p. 129-144.
- 27 SUNDARARAJAN, G.; ROY, M. **Solid particle erosion behavior of metallic materials at room and elevated temperatures.** Tribology International, 1997. p. 339-359.
- 28 SUNDARARAJAN, G.; SHEWMON, P.G. **A new model for the erosion of metals at normal incidence.** Wear, 1983. p. 237-258.
- 29 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.
- 30 WELLMAN, R.G.; NICHOLLS, J.R. **High temperature erosion-corrosion mechanisms, maps and models.** Wear, 2004. p. 907-917.
- 31 WENSINK, H.; ELWENSPOEK, M.C. **A closer look at ductile-brittle transition in solid particle erosion.** Wear, 2002. p. 1035-1043.
- 32 ZUM GAHR, K.H. **Microstruture and wear of materials.** Netherlands: Elsevier, 1987.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**HEITER EWALD**

**ESTUDO DO DESGASTE POR EROSÃO DE  
LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS  
MECÂNICOS DE PLANTAS SIDERÚRGICAS**

VITÓRIA

2011