

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Dissertação de Mestrado

ANA PAULA MARQUES DE OLIVEIRA MACHADO

**ESTUDO DO DESGASTE EROSIVO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO AISI 201: UMA COMPARAÇÃO COM OS AÇOS
AISI 304 E AISI 410**

Belo Horizonte – MG

Outubro/2017

ANA PAULA MARQUES DE OLIVEIRA MACHADO

**ESTUDO DO DESGASTE EROSIVO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO AISI 201: UMA COMPARAÇÃO COM OS AÇOS
AISI 304 E AISI 410**

Dissertação de Mestrado submetida à Escola de
Engenharia da Universidade Federal de Minas
Gerais no Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química na área de Concentração –
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Manuel Houmard

Coorientadores: Dr. Willian da Silva Labiapari

Profa. Dra. Geralda Cristina Godoy

Belo Horizonte – MG

Outubro/2017

M149e

Machado, Ana Paula Marques de Oliveira.

Estudo do desgaste erosivo do aço inoxidável austenítico AISI 201 [manuscrito]: uma comparação com os aços AISI 304 e AISI 410 / Ana Paula Marques de Oliveira Machado. - 2017.

119 f., enc.: il.

Orientador: Manuel Houmard.

Coorientadores: Willian da Silva Labiapari.

Geralda Cristina Durães de Godoy.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Materiais - Teses. 2. Ciência dos materiais - Teses. 3. Aço inoxidável austenítico - Teses. 4. Materiais - Erosão - Teses. 5. Martensita - Teses.

I. Houmard, Manuel. II. Labiapari, Willian da Silva. III. Godoy, Geralda Cristina Durães de. IV. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 620(043)

AGRADECIMENTOS

*“Bendize, ó minha alma, ao Senhor, e tudo o que há em mim bendiga o seu santo nome.
Bendize, ó minha alma, ao Senhor, não te esqueças de nenhum de seus benefícios” (Sl 103:1e2)*

A Deus, que sempre me surpreende em cada detalhe, e me deu a oportunidade de realizar mais um sonho e colocou pessoas maravilhosas em meu caminho para realizar esse projeto.

Ao meu lindo marido, Bruno Machado, pelo incentivo, apoio e por ser meu maior companheiro em tudo.

Aos meus pais, Paulo e Denise, toda conquista da minha vida é fruto do trabalho de vocês. Obrigada por serem sempre presentes! Pai, você foi minha inspiração para essa pesquisa!

Ao meu querido irmão, André Marques, meu grande amigo que mais do que nunca esteve junto comigo com muito zelo, carinho e cuidado.

Ao Professor Manuel Houmard, pela orientação, flexibilidade, empenho e por me ensinar a trabalhar sempre buscando fazer o melhor em tudo.

À Professora Cristina Godoy pelos ensinamentos, conselhos e por ter me apresentado a Tribologia. Você é uma inspiração para todas as mulheres!

Ao Wilian Labiapari, um pesquisador gigante, que aceitou esse projeto e esteve comigo dia a dia construindo esse trabalho.

A todos do Centro de Pesquisa da Aperam South America pela parceria e apoio, em especial ao Ronildson que esteve presente em cada detalhe dessa pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade.

RESUMO

O desgaste erosivo é causado pela colisão com a superfície de partículas duras, carregadas por corrente líquida ou gasosa e é um fenômeno muito comum em várias etapas dos processos de mineração e da agroindústria como, por exemplo, nos pontos de transferências de materiais (chutes). Diversos fatores e parâmetros do sistema tribológico influenciam na erosão, sendo que tanto as características mecânicas quanto metalúrgicas dos materiais são fundamentais para essa análise. O objetivo global do presente trabalho é estudar a influência das estruturas dos aços inoxidáveis na resistência à erosão, sendo para isso escolhidos três tipos de aços inoxidáveis: o AISI 410, o AISI 304 e o AISI 201. Este último é o foco principal da pesquisa, pois ainda é um material menos estudado, mas com alto potencial para futuras aplicações e menor custo de produção. Também foi avaliada a influência da laminação a frio no desgaste erosivo. Os testes foram realizados com ângulos de incidência de 20° e 90° e as amostras erodidas foram caracterizadas através de ensaios metalográficos, de microdureza e de perfilometria. Para isso, fez-se a caracterização prévia dos aços através de análises químicas, metalográficas e mecânicas. Todos os casos apresentaram um comportamento erosivo característico sob o mecanismo de deformação plástica, sendo que o aço AISI 201 teve maior resistência ao desgaste erosivo. Sua alta ductilidade, taxa de encruamento e tendência de formação de martensita por deformação foram fundamentais para essa resposta. As taxas de erosão, razão entre a massa de material removido pela massa de partículas erosivas que colidem com a superfície em g/g, para o ângulo de incidência de 20° foram de $1,2 \cdot 10^{-6}$ para o aço AISI 201, $1,8 \cdot 10^{-6}$ para o aço AISI 304 e $5,7 \cdot 10^{-6}$ para o aço AISI 410 já para o ângulo de incidência de 90° foram de $0,011 \cdot 10^{-6}$ para o aço AISI 201, $0,110 \cdot 10^{-6}$ para o aço AISI 304 e $3,264 \cdot 10^{-6}$ para o aço AISI 410. Desta forma, o aço AISI 201 se apresentou como um material promissor para aplicações em equipamentos que sofrem desgaste erosivo. Entretanto, o encruamento prévio por laminação a frio do AISI 201, em percentuais de redução de 30% e 55%, não foi favorável nesse processo.

ABSTRACT

Erosive wear is caused by hard particles striking the surface, either carried by a gas stream or a flowing liquid. It is a phenomenon very common in mining and agroindustry processes where transfer materials points (transfer chutes) are present. Several factors and parameters of the tribological system influence the erosion, so mechanical and metallurgical materials characteristics are fundamental for this analysis. The objective of the work is to study the stainless steel structures influence on the erosion resistance. Three stainless steels were chosen: AISI 410, AISI 304 and AISI 201, the latter being the research main focus, since it is a less studied material, but with a high potential for future applications and a lower production cost. The influence of the cold rolling treatment of the AISI 201 on its erosive wear was also evaluated. The tests were performed with incidence angles of 20° and 90° and the eroded samples were characterized by metallographic, microhardness and profilometry tests. Besides, the as-received stainless steels were characterized through chemical, metallographic and mechanical analyzes. All studied materials presented erosive wear by plastic deformation, with a greater erosive wear resistance for the AISI 201 steel. Its high ductility, good hardening rate and great tendency to form martensite by deformation were fundamental for this behavior. Erosion rates, ratio of mass of material removed per mass of erosive particles that collide with a surface in g/g for incidence angle of 20° were $1.2 \cdot 10^{-6}$ for the AISI 201, $1.8 \cdot 10^{-6}$ for the AISI 304 and $5.7 \cdot 10^{-6}$ for AISI 410, and for incidence angle of 90° were $0.011 \cdot 10^{-6}$ for AISI 20, $0.110 \cdot 10^{-6}$ for AISI 304 and $3,264 \cdot 10^{-6}$ for AISI 410. In this way, the AISI 201 steel appeared as a promising material for applications in equipment that undergo erosive wear. However, the previous hardening of the AISI 201, with a reduction of 30% and 55%, was not favorable in this process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Defeito de empilhamento. (a) falha intrínseca e (b) falha extrínseca	23
Figura 3.2 – Influência da EFE em ligas austeníticas na formação de martensita induzida por deformação (Pinto, 2005).....	24
Figura 3.3 – Desenho esquemático do desgaste por deslizamento, abrasivo, por fadiga e triboquímico (Kato, 2001).	26
Figura 3.4 – Representação esquemática do desgaste erosivo.	28
Figura 3.5 – Variação da taxa de erosão em função da temperatura para algumas ligas metálicas (Pereira, 2010).....	29
Figura 3.6 – Desgaste erosivo de materiais dúcteis e frágeis em função do ângulo de impacto (Hutchings, 1992).	30
Figura 3.7 – Influências da dureza da partícula erosiva e da velocidade de impacto na taxa de erosão, no desgaste erosivo de alumina cerâmica. Ângulo de impacto: 90°. Tamanho das partículas: 125-150 µm. (adaptado de Hutchings, 2000).	32
Figura 3 – Taxa de erosão do AISI 1020 para partículas erosivas com diferentes durezas (adaptado de Levy e Chick, 1983).	33
Figura 3.9 – Influência da velocidade e do tamanho das partículas no desgaste erosivo, sendo ft/s= pés/s (Tilly, 1973).	34
Figura 3.10 – Seção do dano causado pelo impacto de uma partícula dura em uma superfície dúctil, de acordo com o formato e movimento das partículas: (a) “Arando”; (b) Corte tipo I; (b) Corte tipo II. (Hutchings, 1992).	36
Figura 3.11 – Superfície erodida do AI 7075-T6 com ângulo de incidência: (a) 30° e (b) 90° (Bellman e Levy, 1981).	38
Figura 3.12 – Processo de penetração de uma partícula dura com velocidade U em uma superfície dúctil em um intervalo de tempo T. (adaptado de Hutchings, 1992)	40
Figura 3.13 – Dependência da resistência a erosão em relação à dureza para alguns metais em vários estados de encruamento e tratamento térmico (Hutchings, 1992 apud Finnie et al., 1967). Sendo, steel = aço e tool steel = aço ferramenta.	45
Figura 3.14 – Comparação da taxa de erosão do aço AISI 316 com parâmetros constantes (20 m/s, 102 µm, temperatura ambiente) (DIVAKAR et al., 2005).	47
Figura 3.15 – O efeito do percentual de trabalho a frio na resistência à erosão do ferro puro (Preece, 1979).	48
Figura 3.16 – Taxa de erosão em estado estacionário para o cobre, aço inoxidável 304 e níquel. Partícula erosiva: Alumina 143 µm com velocidade de 75 m/s. Ângulo de incidência: (a) 90° e (b) 15°. (Goretta et al., 1991)	50
Figura 3.17 – Representação esquemática de chutes (adaptado de EDEM, 2010 e JENIKE)..	52
Figuras 4.1 – Fluxograma das etapas do trabalho.....	54
Figura 4.2 – Laminador Piloto - Centro de Pesquisa Aperam.....	56
Figura 5.1 – Suporte para controle do ângulo de incidência em ensaios de desgaste erosivo.	60

Figura 5.2 – Suporte para amostra em ensaios de desgaste erosivo.	60
Figura 5.3 – Silo externo adaptado à cabine de jateamento para ensaios de desgaste erosivo. 61	
Figura 5.4 – Análise granulométrica da granalha utilizada como agente erosivo nos ensaios de desgaste.	62
Figura 5.5 – Microestrutura representativa da granalha utilizada como erosivo nos ensaios de desgaste.	63
Figura 5.6 – Microestrutura da granalha utilizada como erosivo nos ensaios de desgaste. Ataque químico: Nital.	63
Figura 5.7 – Amostras dos materiais após sofrerem desgaste erosivo.	65
Figura 5.8 – Análise se superfície por MEV: (a) AISI 201, (b) AISI 304, (c) AISI 410.	67
Figura 5.9 – Microestruturas dos aços na condição inicial. (a) AISI 201- ataque de água régia (b) AISI 304 - ataque de água régia (c) AISI 201- ataque de Behara (d) AISI 304 - ataque de Behara.	68
Figura 5.10 – Microestrutura do aço AISI 410 na condição inicial. Ataque: Villela.	69
Figura 5.11 – Curva de tensão-deformação de engenharia do aços AISI 201, 304 e 410.	70
Figura 5.12 – Curva de tensão verdadeira - deformação verdadeira dos aços AISI 201,304 e 410.	71
Figura 5.13 – Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 20° para o aço AISI 201, AISI 304 e AISI 410.	75
Figura 5.14 – Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 90° para o aço AISI 201, AISI 304 e AISI 410.	75
Figura 5.15 – Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 20° para o aço AISI 201 e AISI 304.	79
Figura 5.16 – Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 90° para o aço AISI 201 e AISI 304.	79
Figura 5.17 – Superfícies dos materiais erodidos: (a) AISI 201/ 20°, (b) AISI 201/ 90°, (c) AISI 304/ 20°, (d) AISI 304/ 90°, (e) AISI 410/ 20° e (f) AISI 410/ 90°. Escala de 200 µm. 82	
Figura 5.18 – Micrografia ao longo da espessura do aço AISI 410 após sofrer desgaste erosivo: (a) ângulo de incidência de 20° e (b) ângulo de incidência de 90°. As imagens foram feitas na parte central da cratera formada pelo processo de erosão. Ataque: Vilela. Escala de 50 µm.	83
Figura 5.19 – Micrografia ao longo da espessura dos aços AISI 201 e AISI 304 após sofrer desgaste erosivo. (a) AISI 201/20°, (b) AISI 201/90°, (c) AISI 304/20° e (d) AISI 304/90°. As imagens foram feitas na parte central da cratera formada pelo processo de erosão. Ataque: Behara. Escala de 100 µm. A linha azul indica a superfície da amostra.	84
Figura 5.20 – Micrografia ao longo da espessura dos aços AISI 201 e AISI 304 após sofrer desgaste erosivo. (a) AISI 201/20°, (b) AISI 201/90°, (c) AISI 304/20° e (d) AISI 304/90°. As imagens foram feitas na parte central da cratera formada pelo processo de erosão. Ataque: Água régia. Escala de 100 µm. A linha azul indica a superfície da amostra.	85
Figura 5.21 – Microdureza Vickers ao longo da espessura dos materiais AISI 201, AISI 304 e AISI 410 após ensaio de desgaste erosivo.	87

Figura 5.22 – Correlação entre a taxa de desgaste erosivo “E” e a razão entre a dureza da partícula erosiva (He) pela dureza da superfície deformada ($H_{s\text{deformada}}$) para ângulos de incidência de 20° e 90°	88
Figura 5.23 – Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 20° : (a) AISI 201, (b) AISI 304 e (c) AISI 410.....	89
Figura 5.24– Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 90° : (a) AISI 201, (b) AISI 304 e (c) AISI 410.....	90
Figura 5.25 – Correlação entre a taxa de desgaste erosivo “E” e a razão entre a dureza da partícula erosiva (He) pela dureza da superfície deformada ($H_{s\text{deformada}}$) para ângulos de incidência de 20° e 90°	91
Figura 5.26 – Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 20° : (a) AISI 201 e (b) AISI 304.....	92
Figura 5.27 – Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 90° : (a) AISI 201 e (b) AISI 304.....	93
Figura 5.28 – Análise de superfície por MEV do AISI 201. Percentual de redução (a) 0%, (b) 30%, (c) 55%.....	95
Figura 5.29 – Microestrutura do AISI 201 laminado. Percentual de redução: (a) 0% (b) 10% (c) 20% (d) 30% (e) 40% (f) 50% e (g) 55%. Ataque: água régia. Escala de 20 μm	96
Figura 5.30 – Microestrutura do AISI 201 laminado. Percentual de redução: (a) 0% (b) 10% (c) 20% (d) 30% (e) 40% (f) 50% (g) 55%. Ataque: Behara. Escala de 20 μm	97
Figura 5.31 – Limite de resistência [MPa] do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.	98
Figura 5.32 – Ductilidade do aço AISI 201 por percentual de alongamento total em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.	99
Figura 5.33 – Limite de escoamento do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.	99
Figura 5.34 – Dureza do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.....	100
Figura 5.35 – Curva tensão-deformação do AISI 201 com percentual de redução de 0%, 30% e 55%.....	101
Figura 5.36 – Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 20° para o aço AISI 201 com redução de 0%, 30% e 55%	102
Figura 5.37 – Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 90° para o aço AISI 201 com redução de 0%, 30% e 55%	102
Figura 5.38 – Análise MEV. AISI 201 em diferentes percentuais de redução após desgaste erosivo: (a) Redução: 0%/Erosão à 20°, (b) Redução: 0%/Erosão à 90°, (c) Redução: 30%/Erosão à 20°, (d) Redução: 30%/Erosão à 90°, (e) Redução: 55%/Erosão à 20°, (f) Redução: 55%/ Erosão à 90°. Escala de 200 μm	106
Figura 5.39 – Análise de microscopia ótica do AISI 201 em diferentes percentuais de redução antes e após desgaste erosivo: (a) Redução: 0%/Não erodida, (b) Redução: 0%/Erosão à 20°, (c) Redução: 0%/Erosão à 90°, (d) Redução: 30%/ Não erodida, (e) Redução: 30%/Erosão à	

20°, (f) Redução: 30%/Erosão à 90°, (g) Redução/55%. Não erodida, (h) Redução: 55%/Erosão à 20° e (i) Redução: 55%/ Erosão à 90°. Ataque: Behara. Escala de 100 µm. A linha azul indica a superfície da amostra. 107

Figura 5.40 – Microdureza ao longo da espessura das amostras de AISI 201, pré-deformadas em diferentes percentuais de redução, após sofrerem desgaste erosivo. 108

Figura 5.41 – Análise de perfilometria – Superfície do AISI 201 em diferentes percentuais de redução após desgaste erosivo. Ângulo de incidência de 20°: (a) Percentual de redução:0%, (b) Percentual de redução:30% e (c) Percentual de redução:55%. 110

Figura 5.42 – Análise de perfilometria – Superfície do AISI 201 em diferentes percentuais de redução após desgaste erosivo. Ângulo de incidência de 90°: (a) Percentual de redução:0%, (b) Percentual de redução:30% e (c) Percentual de redução:55%. 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores típicos de algumas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos (adaptado de Aperam).....	20
Tabela 3.2 – Dureza do AISI 1020 e das partículas erosivas estudadas por Levy e Chick, (1983).....	33
Tabela 3.3 – Correlação entre a ação erosiva em materiais dúcteis com as características da partícula erosiva.....	37
Tabela 3.4 – Efeito da laminação a frio na taxa de erosão do aço 1075 (adaptado de Levy, 1986).....	46
Tabela 3.5 – Propriedades dos materiais pesquisados por Goretta et al., 1991. Sendo, C_p = calor específico e EFE = energia de falha de empilhamento.	49
Tabela 3.6 - Ângulos dos chutes comumente encontrados para alguns tipos de materiais transportados (GAVI, 2001).....	53
Tabela 5.1 – Composição química (% em massa) dos aços estudados.....	66
Tabela 5.2 – Tamanho de grão dos aços AISI 201 e AISI 304.....	69
Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas do AISI 201, 304 e 410.....	70
Tabela 5.4 – Valores de M_{d30} pela equação de Nohara (1977) e EFE pela equação de Schramm e Reed (1975) de dos aços AISI 201 e AISI 304.....	73
Tabela 5.5 – Coeficientes linear de erosão, E em g/g, dos aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410 para ângulos de incidência de 20° e 90°.....	76
Tabela 5.6 – Razão entre a taxa de desgaste erosivo “E” [g/g] pela área erodida para os aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410 para ângulos de incidência de 20° e 90°.....	91
Tabela 5.7 – Propriedades mecânicas do AISI 201 com percentual de redução de 0%, 30% e 55%.....	101
Tabela 5.8 – Coeficientes linear de erosão, E em g/g, do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução para ângulos de incidência de 20° e 90°.....	103
Tabela 5.9 – Razão entre a taxa de desgaste erosivo “E” pela área erodida para o aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução para ângulos de incidência de 20° e 90°.....	112

LISTA DE SÍMBOLOS

AIA	Aço inoxidável austenítico
AISI	<i>American iron and steel institute</i>
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
CCC	Cúbico de corpo centrado
CFC	Cúbico de face centrada
E	Taxa de desgaste erosivo
EFE	Energia de falha de empilhamento
H	Dureza
HV	Dureza Vickers
He	Dureza da partícula erosiva
Hs	Dureza da superfície erodida
σ	Tensão
ε	Deformação
L _E	Limite de escoamento (MPa)
L _R	Limite de resistência (MPa)
M _d	Temperatura abaixo da qual a tensão por deformação induz a transformação martensítica
M _s	Temperatura a partir da qual a austenita transforma-se em martensita pelo resfriamento
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MO	Microscopia óptica
TG	Tamanho de grão
U	Velocidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos Específicos.....	17
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1	Aços inoxidáveis	18
3.2	Aços inoxidáveis austeníticos	19
3.3	Formação da martensita	21
3.4	Influência da energia de falha de empilhamento	22
3.5	Encruamento	25
3.6	Desgaste	25
3.7	Desgaste erosivo.....	27
3.8	Parâmetros que afetam o desgaste erosivo	29
3.8.1	Parâmetros dependentes do sistema.....	29
3.8.2	Parâmetros dependentes da partícula erosiva.....	31
3.8.3	Parâmetros dependentes do material erodido.....	34
3.9	Mecanismo de desgaste erosivo.....	34
3.9.1	Desgaste erosivo por fratura frágil.....	35
3.9.2	Mecanismo de desgaste erosivo por deformação plástica.....	35
3.10	Modelos matemáticos para desgaste erosivo	38
3.11	Correlação entre desgaste erosivo e encruamento prévio do material	45
3.12	Resumo	51
3.13	Equipamentos sujeitos a desgaste erosivo	51
4	METODOLOGIA.....	54
4.1	Seleção de materiais	54
4.2	Laminação a frio	55
4.3	Caracterização dos materiais.....	56
4.3.1	Análises químicas	56
4.3.2	Análises metalográficas	57
4.3.3	Ensaio mecânicos	57
4.3.4	Perfilometria.....	58
4.4	Testes de erosão	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
5.1	Equipamento para ensaios de desgaste erosivo.....	59
5.1.1	Parâmetros do fluxo.....	59
5.1.2	Parâmetros das partículas erosivas.....	61
5.1.3	Parâmetros do material erodido.....	64
5.2	Comparação da influência da estrutura dos materiais no desgaste erosivo	65
5.2.1	Caracterização dos materiais.....	65
5.2.2	Formação de martensita induzida por deformação	73

5.2.3	Análise comparativa do desgaste erosivo	74
5.2.4	Caracterização das amostras erodidas	81
5.3	Estudo do efeito da laminação a frio do aço AISI 201 no desgaste erosivo	94
5.3.1	Caracterização dos materiais laminados	94
5.3.2	Análise do desgaste erosivo	101
5.3.3	Caracterização das amostras erodidas	105
6	CONCLUSÕES.....	113
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

1 INTRODUÇÃO

Em 1966, impulsionada pelo “Jost Report”, nascia uma nova ciência de perfil multidisciplinar, denominada Tribologia, definida como a “*Ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados*”. Nessa época já se enfatizava as grandes perdas econômicas causadas por falhas tribológicas. Com o crescimento industrial, essa abordagem tem se tornado ainda mais importante, pois como afirma Jost (1990) é possível reduzir as perdas por desgaste em até 20% com aplicação de conceitos tribológicos existentes. O controle desse processo nesses ambientes, além de otimizar o consumo energético, pode promover melhorias na eficiência, na vida útil e na segurança oferecida pelos equipamentos. Essa análise pode ser aplicada em diversos setores de extrema relevância, como indústria alimentícia, petrolífera, siderúrgica e mineração (Labiapari, 2015).

Existem várias classificações para os tipos de desgaste, mas, em geral, ele pode ser classificado em desgaste abrasivo, erosivo, por deslizamento, tribo-químico e por fadiga. O desgaste erosivo surge a partir da energia cinética de uma partícula dura fluindo em uma corrente líquida ou gasosa em uma determinada superfície. Nos sistemas em que as partículas se movem em altas velocidades, ele se torna ainda mais sério (Finnie, 1972). Esse processo é consequência de uma série de eventos de impacto que pode levar a degradação mecânica e perda de diversos materiais em várias aplicações industriais, como, leitos fluidizados, ciclones, tubulações, válvulas, conexões e queimadores (Ewald, 2011). Esse tipo de desgaste também é muito comum em maquinários presentes na mineração e na agroindústria, sendo exemplo os pontos de transferências de materiais, denominados chutes. Para minimizar essas perdas, é essencial que o projeto e a construção desses equipamentos sejam embasados no estudo de um material adequado a suas condições de uso.

Diversas variáveis do sistema tribológico, como: ângulo de impacto, velocidade, tamanho e forma das partículas sólidas, dureza e ductilidade do material, influenciam no desgaste erosivo. Essa variedade de parâmetros faz com que a previsão dos danos e a escolha de um material mais adequado para condições reais de campo sejam muito complicadas, sendo de extrema relevância que esses valores sejam preliminarmente determinados e estudados a partir

de teste laboratoriais de erosão e correlacionados com as propriedades do material em questão (Oka et.al, 1993).

Tanto as propriedades metalúrgicas como mecânicas exercem influência direta no desgaste erosivo e muito desses parâmetros são interdependentes. Com o objetivo de avaliar a influência de diferentes estruturas nesse processo, foram escolhidos três materiais: dois aços inoxidáveis austeníticos, AISI 201 e AISI 304, e um aço inoxidável ferrítico, AISI 410. Os aços inoxidáveis da série 200 são caracterizados por um menor custo de produção devido à substituição do níquel por outros elementos estabilizadores da austenita como manganês ou nitrogênio. Apesar de apresentarem uma menor resistência à corrosão, suas propriedades mecânicas podem ser superiores aos da classe 300. Nessa pesquisa, o aço AISI 201 foi o foco principal, pois é um material com um alto potencial para futuras aplicações, como por exemplo nos chutes que são equipamentos sujeitos ao desgaste erosivo e são pontos de gargalo em vários setores da indústria e do agronegócio. Os outros dois foram selecionados como parâmetros comparativos por terem alta aplicabilidade e serem bem referenciados na literatura (Morais, 2010).

Além disso, nesse trabalho foi estudado a influência da laminação a frio prévia no desgaste erosivo do aço AISI 201. Na literatura, existem diferentes resultados em relação ao efeito do encruamento na resistência à erosão, pois alguns autores (Divakar et al., 2005; Naim e Bahadur, 1984) apresentaram respostas positivas enquanto outros entenderam que esse processo não melhorou a resistência a erosão (Sundarajan, 1983). As diferenças entre os sistemas tribológicos podem influenciar nos resultados finais que devem ser, portanto, minuciosamente estudados para obter-se a devida interpretação do processo (Goretta et al., 1991). Desta forma, o estudo de cada material de forma detalhada e a sua correlação com o sistema tribológico envolvido é fundamental para compreensão e busca de maior resistência ao desgaste.

Esse trabalho apresenta uma revisão da literatura em que são abordados alguns temas essenciais para o estudo: aços inoxidáveis e suas principais particularidades, conceito dos tipos de desgaste e, de forma mais detalhada o desgaste erosivo. A metodologia experimental utilizada nas análises de caracterização e nos ensaios de erosão também é descrita. Os resultados experimentais e as discussões relevantes são apresentados divididos em dois

tópicos principais: influência da estrutura dos materiais e da laminação prévia no desgaste erosivo. Em fim, estão listadas as principais conclusões do estudo e algumas propostas de trabalhos futuros decorrentes das observações realizadas nessa dissertação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a influência da estrutura do aço inoxidável AISI 201 na resistência à erosão, em comparação aos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 410

2.2 Objetivos Específicos.

- Realizar a redução por laminação a frio do aço AISI 201 com diferentes porcentagens.
- Caracterizar mecanicamente e estruturalmente os materiais.
- Adaptar o equipamento de jateamento para realizar os testes de desgaste erosivo.
- Estudar a resistência à erosão do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.
- Estudar a influência do ângulo de incidência no desgaste erosivo.
- Estudar a influência da formação de martensita no desgaste erosivo .
- Comparar a resistência ao desgaste erosivo dos materiais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aços inoxidáveis

Aços inoxidáveis são ligas de ferro-carbono com teores de cromo mínimo de 10,5% em peso, podendo conter outros elementos, como: níquel, molibdênio, manganês, silício, cobre, alumínio e nitrogênio. A principal característica desses materiais é a alta resistência à corrosão e a oxidação, em virtude da formação de uma película passivadora de óxido de cromo em sua superfície (Padilha, 1996). Existem diferentes ligas desses materiais, pois as proporções e os componentes presentes podem variar. Normalmente, elas são agrupadas em classes de acordo com suas propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas, sendo que a principal classificação é sub-dividida em cinco categoriais (Silva, 2006):

- 1) Aços inoxidáveis ferríticos – são ligas ferro-cromo ferríticas, contendo 10 a 30% de cromo e baixo teor de carbono; de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) em todas as temperaturas; não endurecem por tratamento térmico, mas podem endurecer moderadamente por trabalho a frio. Neste grupo podemos citar os aços AISI 430, 446, 502, 405, 410, b409.
- 2) Aços inoxidáveis martensíticos – são essencialmente ligas de ferro-cromo, com teor de 0,1-1,0% de carbono e 11-18% de cromo, caracterizados pela estrutura cristalina tetragonal e muito utilizados quando a aplicação requer boas propriedades de tração, fadiga, e fluência combinadas com a resistência à corrosão. São ferromagnéticos e possuem alta resistência mecânica. Neste grupo temos como exemplo os aços AISI 403, 416, 420, 422.
- 3) Aços inoxidáveis austeníticos – são ligas a base de ferro-cromo(16-30%)-níquel(8-35%), e em geral possuem teor de carbono inferior a 0,08%. Possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Os aços inoxidáveis austeníticos (AIAs) mais comuns são os da série 300, como por exemplo, o AISI 301, 304, 308, 316. Por questões econômicas, parte do níquel pode ser substituída por manganês ou nitrogênio, formando, assim, outro sistema nessa família, a série 200, como os aços AISI 201, 202 e 204.
- 4) Aços inoxidáveis duplex – são ligas obtidas com composições balanceadas de ferro-cromo(23-30%)-níquel(2,5-7%)-molibdênio(1-4%) e outros elementos, como titânio. Fazem parte desta família os aços AISI 329, UNS S32304 e S31803. Esses materiais têm

microestrutura mista de ferrita e austenita, apresentando em certos meios resistência à corrosão e algumas propriedades mecânicas superiores aos dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.

- 5) Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação – são ligas ferro-cromo (12-17%), níquel (4-8%), molibdênio(0-2%) contendo adições de elementos que permitem o endurecimento pela precipitação de compostos intermetálicos, como alumínio, cobre, nióbio e/ou titânio. Podem ter uma matriz austenítica ou martensítica.

3.2 Aços inoxidáveis austeníticos

O desenvolvimento dos aços inoxidáveis austeníticos significou um grande avanço na área de materiais mais resistentes à corrosão e à oxidação e se destacam como os mais utilizados dentro da classe dos aços inoxidáveis. Suas aplicações abrangem principalmente a construção de equipamentos para indústria, para construção civil e para utensílios domésticos. Eles apresentam outras importantes características, como ampla faixa de propriedades mecânicas e boa soldabilidade. Além disso, combinam alto limite de resistência, alta taxa de encruamento e boa ductilidade, oferecendo assim ótimos aspectos para trabalho a frio. Outro ponto relevante, é que sua resistência mecânica pode ser aumentada através do encruamento devido à formação da martensita induzida por deformação, o que gera perda de ductilidade no material (Griffiths e Wright, 1968). Em geral, possuem excelentes propriedades criogênicas, não apresentam transição dúctil-frágil, e boa resistência mecânica em altas temperaturas (Silva, 2006).

Em relação aos aços inoxidáveis austeníticos os mais conhecidos são os da série 300, como por exemplo, os aços AISI 301, 304 e 316. Por questão de custo, parte do níquel presente nesses materiais pode ser substituída por manganês ou nitrogênio que também são elementos estabilizadores da austenita, podendo formar outro sistema na família, a série 200. São exemplos os aços AISI 201, 202 e 204. Em todos os casos a estrutura cristalina padrão dos aços inoxidáveis austeníticos é do tipo cúbica de face centrada (CFC).

A resistência mecânica dos materiais da série 200 é compatível ou até superior aos da categoria 300. Entretanto, reduzindo o teor de níquel, diminui-se também o teor máximo de cromo no aço, para mantê-lo austenítico, o que leva a uma menor resistência à corrosão e

acarreta sua não indicação para aplicações em plataformas marítimas de petróleo ou em condições que tenham contato direto com a água. Em geral, a aplicação dos aços da série 200 é justificável quando há a necessidade de resistência mecânica aliada a baixo custo. Um ponto relevante desses materiais é de apresentar boa combinação de resistência mecânica e ductilidade (ISSF, 2005).

Numerosas fases, tais como ferrita, carbonetos, fases intermetálicas, nitretos, sulfetos, boretos e martensita induzida por deformação podem estar presentes na microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos. A quantidade, o tamanho, a distribuição e a forma destas fases têm influência marcante nas propriedades do material (Herculano, 2004). Devido à excelente combinação de ductilidade, resistência mecânica e tenacidade dos aços inoxidáveis austeníticos, muitos trabalhos na literatura recomendam a possibilidade de sua aplicação (Reed, 1989; Speidel et.al., 1992). As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos irão variar de acordo com o tipo de material. A Tabela 3.1 apresenta alguns exemplos com valores típicos de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento.

Tabela 3.1 – Valores típicos de algumas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos (adaptado de Aperam).

AISI	ASTM (UNS)	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
301	S30100	910	320	46
301LN	S30153	700	400	50
304	S30400	600	280	58
304L	S30403	680	300	55
304H	S30409	710	320	58
310S	S31008	600	380	42
316	S31600	650	340	51
316L	S31603	650	340	51
317L	S31703	690	394	42
321	S32100	670	260	42
201	S20100	515	260	40
201	S20153	700	500	45

A formação de martensita induzida por deformação é uma importante característica desses materiais e tem influência direta nas propriedades mecânicas e metalúrgicas, sendo um processo dependente principalmente da composição química do aço, da quantidade de deformação plástica e da temperatura de conformação (Padilha, 1996).

3.3 Formação da martensita

Nos AIs metaestáveis a martensita pode ser formada a partir do resfriamento abaixo da temperatura ambiente ou em resposta a conformação a frio (Davis,1994). De forma geral, essa é uma transformação de fase adifusional, na qual os átomos se movem de maneira coordenada e simultânea por um mecanismo de cisalhamento da rede cristalina. Após a deformação a frio, parte da energia utilizada na deformação é armazenada no material na forma de defeitos cristalinos, como discordâncias e defeitos de empilhamento. A densidade e distribuição desses defeitos gerados na deformação plástica dependem de vários fatores como: a estrutura cristalina da liga, as fases presentes, energia de falha de empilhamento, velocidade e modo de deformação (Padilha e Siciliano, 2005).

A presença de martensita aumenta continuamente com a taxa de deformação, o que induz o aumento da resistência mecânica, englobando todos os parâmetros como dureza, limite de escoamento, de resistência, de fratura e taxa de encruamento. Essa transformação pode ser caracterizada por duas temperaturas diferentes (Cina, 1958):

- M_s - temperatura a partir da qual a austenita transforma-se em martensita pelo resfriamento
- M_d - maior temperatura em que se pode transformar austenita em martensita com auxílio da aplicação de tensão mecânica.

Eichelman e Hull (1953) desenvolveram uma relação matemática empírica baseada na composição química dos elementos de liga do aço 18/8, por regressão linear múltipla, para estimar a temperatura M_s , conforme representada pela equação 3.1. Ela demonstra que os solutos substitucionais, como cromo e níquel, têm efeito moderado sobre a M_s , quando comparados ao intenso efeito dos solutos intersticiais carbono e nitrogênio. Em geral a temperatura M_s dos AIs é a baixo de 0 °C.

$$M_s(^{\circ}C) = 1305 - [1667(\%C + \%N) + 28(\%Si) + 33(\%Mn) + 42(\%Cr) + 61(\%Ni)] \quad (3.1)$$

A martensita induzida por deformação pode formar-se em temperaturas superiores à M_s e está relacionada ao estado de tensão do processo. Nos AIAs, a estabilidade da austenita em relação à transformação martensítica induzida é determinada pela temperatura M_d , sendo que quanto menor for esse valor mais estável é o material, ou seja, menos martensita é formada por deformação. Essa avaliação pode ser feita pelo parâmetro M_{d30} , que é a temperatura na qual 50% de martensita é produzida após uma deformação verdadeira de 0,3. Ela pode ser estimada por várias equações que relacionam transformação martensítica com a composição química (% em massa). A seguir são citadas as equações propostas por Angel (1954) e Nohara (1977), equações 3.2 e 3.3, respectivamente.

$$M_{d30}(^{\circ}C) = 413 - [462(\%C + \%N) + 9,2(\%Si) + 8,1(\%Mn) + 13,7(\%Cr) + 9,5(\%Ni) + 18,5(\%Mo)] \quad (3.2)$$

$$M_{d30}(^{\circ}C) = 551 - [462(\%C + \%N) + 9,2(\%Si) + 8,1(\%Mn) + 13,7(\%Cr) + 29(\%Ni + \%Cu) + 18,5(\%Mo) + 68(\%Nb) + 1,42(d - 8)]$$

$$\text{"d"} \text{ representa o tamanho de grão ASTM da austenita} \quad (3.3)$$

O aumento na resistência mecânica devido à transformação induzida por deformação da austenita é chamado de efeito TRIP (TRansformation Induced Plasticity). Existe uma grande concordância na literatura de que a presença de martensita causa considerável aumento de resistência mecânica que pode ser notado no aumento do limite de escoamento, aumento na taxa de encruamento e aumento de dureza (Sales; 2006). Os aços AISI 201 e 304 estudados nesse trabalho apresentam esse efeito.

3.4 Influência da energia de falha de empilhamento

A estrutura cristalina dos aços inoxidáveis austeníticos é CFC e pode ser obtida por meio de empilhamento de planos de máxima densidade atômica {111} arrançados em uma sequência regular do tipo ABCABCABC. Esta sequência de empilhamento pode ser localmente alterada, dando origem a uma falha que pode ser do tipo extrínseca, quando se tem um plano extra, ou do tipo intrínseca, quando falta um pedaço de plano, como ilustrado na Figura 3.1. Elas são delimitadas por discordâncias parciais e um dos fatores que podem levar a sua formação é a

deformação plástica. A distribuição das discordâncias é fortemente dependente da energia de falha de empilhamento (EFE) (Pickering, 1984; Lee, 2010).

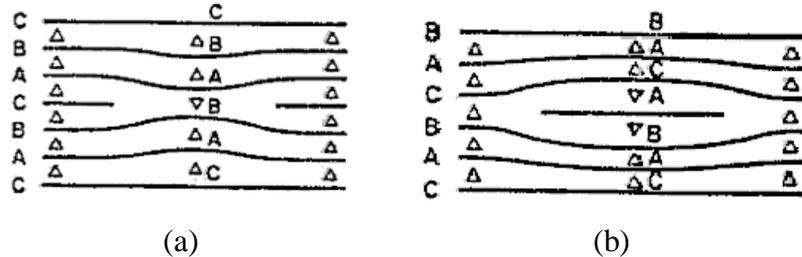


Figura 3.1 - Defeito de empilhamento. (a) falha intrínseca e (b) falha extrínseca

A influência da EFE é muito significativa nas propriedades dos materiais austeníticos. Quanto maior for a energia por unidade de área da falha empilhamento, mais próximas estarão as discordâncias parciais, de modo a minimizar a área defeituosa. Assim, um material com energia de falha de empilhamento baixa apresenta após deformação plástica maior densidade de discordâncias, distribuição mais uniforme de discordâncias e maior energia armazenada na deformação, do que um material com energia de falha de empilhamento alta e deformado nas mesmas condições. Além disto, os materiais com baixa EFE geralmente apresentam maior taxa de encruamento, maior resistência à fluência e maior vulnerabilidade à corrosão sob tensão que materiais com alta EFE (Padilha, 2000).

Deste modo, para um dado grau de deformação um metal de alta EFE apresenta menor densidade de discordâncias que um metal de baixa EFE, pois nesse caso elas possuem maior mobilidade e a ocorrência de aniquilação e rearranjo de discordâncias é mais frequente. Assim, em metais de alta EFE, as discordâncias têm um caminho livre médio maior que em metais com baixa EFE, ou seja, elas migram distâncias maiores antes de se tornarem imóveis.

Os aços inoxidáveis austeníticos são conhecidos por terem baixa EFE quando comparado aos outros metais com estrutura CFC. Além disso, a densidade de discordâncias e o encruamento desses materiais aumentam quando conformados a frio. Essa energia influi diretamente na natureza, na densidade e distribuição dos defeitos do retículo cristalino, de tal modo que, quanto menor for a EFE desses materiais, maior será a taxa de encruamento.

Outro ponto relevante é que a suscetibilidade à transformação martensítica induzida por deformação aumenta com o decréscimo da EFE. Na Figura 3.2 essa energia, para ligas de FeNiCr, é ordenada em relação a fração volumétrica de martensita formada após 80% de deformação plástica por testes de tração. Os parâmetros microestruturais, como tamanho de grão, fração volumétrica de inclusões e ferrita δ , que também afetam a resistência mecânica, não variaram consideravelmente para os aços austeníticos investigados nesse trabalho. Assim, uma conexão entre a EFE, o comportamento de deformação, a estabilidade microestrutural e o desempenho do desgaste é esperado nos testes de erosão (Pinto; 2005).

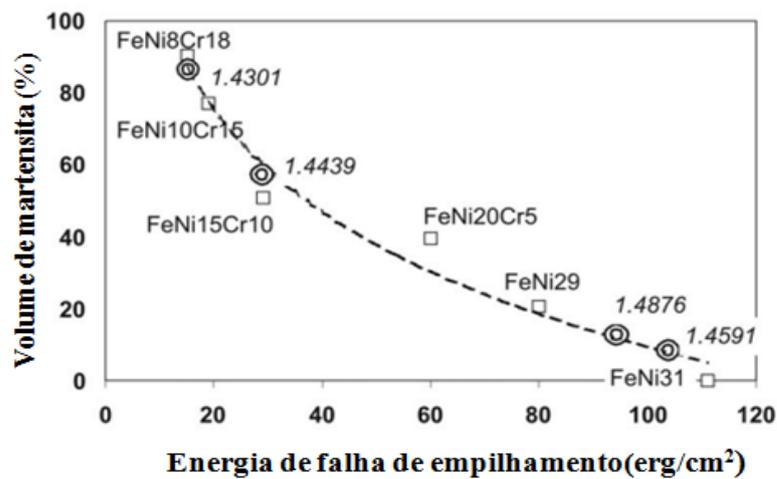


Figura 3.2 – Influência da EFE em ligas austeníticas na formação de martensita induzida por deformação (Pinto, 2005)

Schramm e Reed (1975) propuseram uma relação entre a composição química dos principais elementos de liga dos aços inoxidáveis austeníticos comerciais e a EFE, a partir de análise de regressão de valores obtidos por técnica de difração de raios X, conforme indicado na equação 3.4.

$$EFE \left(\frac{\text{mJ}}{\text{m}^2} \right) = -53 + 6,2(\%Ni) + 0,7(\%Cr) + 3,2(\%Mn) + 9,3(\%Mo) \quad (3.4)$$

A equação acima considera os solutos substitucionais dos materiais, porém não contempla os solutos intersticiais, como carbono e nitrogênio. Na literatura, a pesquisa de Schramm e Reed é considerada referência para o cálculo da EFE, apesar de haver trabalhos com opiniões divergentes. Vitos et.al. (2006), afirmam que não há uma equação universal relacionando a composição dos aços para medir a EFE. Assim, é importante destacar que a análise da

influência dos elementos de forma individual é muito complicada, devido aos múltiplos efeitos de interação existentes (Tavares et al., 2009). Entretanto, o valor da EFE calculado para os aços inoxidáveis austeníticos pode ser interpretado como a estabilidade termodinâmica e pode ser usado para efeito de comparação entre metais dessa família (Morais, 2010).

3.5 Encruamento

O encruamento é um aumento na dureza e na resistência de um metal dúctil à medida que ele é deformado plasticamente abaixo da sua temperatura de recristalização. Desta forma, uma tensão ainda maior será necessária para que se faça uma deformação adicional. Ele é um dos mais importantes métodos de endurecimento.

Um metal cristalino deforma plasticamente pelo movimento das discordâncias e estas interagem diretamente entre si, ou, indiretamente, com campos de tensões internos de várias imperfeições e obstáculos. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou com o encruamento, devido à multiplicação ou à formação de novas discordâncias. Consequentemente, a distância média de separação entre elas diminui. Na média, as interações de deformação discordâncias-discordâncias são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras. Essa interação leva a uma redução na mobilidade média da discordância, que é acompanhada por uma necessidade de maior tensão para realizar o seu movimento (Padilha, 1996).

3.6 Desgaste

O desgaste é definido como a *“perda progressiva de matéria da superfície de um corpo em consequência ao movimento relativo de outro corpo sobre o mesmo”*, sendo um fenômeno decorrente da ação mecânica e da interação entre as superfícies. Ele representa um alto custo para a economia, de acordo com Zum Gahr (1987), aproximadamente 5% do PIB das nações desenvolvidas poderia ser economizado em função dos danos provocados pelo desgaste de equipamentos e consumo extra de energia. Vale ressaltar, que com o crescimento industrial, essa perda pode ser ainda maior. O controle do desgaste nesses ambientes pode promover economia de energia, aumento da segurança, da vida útil e da eficiência dos equipamentos.

Essa avaliação é aplicável em diversos setores de extrema relevância, como indústria alimentícia, petrolífera, siderúrgica e mineração (Labiapari, 2015).

Existem várias classificações para os tipos de desgaste, mas, em geral, ele pode ser classificado em desgaste abrasivo, erosivo, por deslizamento, tribo-químico e por fadiga. Entretanto, numa situação real, o desgaste total do material raramente é resultado de um só mecanismo, pois dois ou mais tipos podem ocorrer simultaneamente (Eyre, 1976).

O desgaste erosivo é o foco principal desse trabalho, por isso esse tema será abordado de forma mais detalhada no item 3.7. Os outros tipos de desgastes citados são apresentados Figura 3.3 de forma esquemática, para simplificar a compreensão e demonstrar de forma mais clara a diferença entre eles.

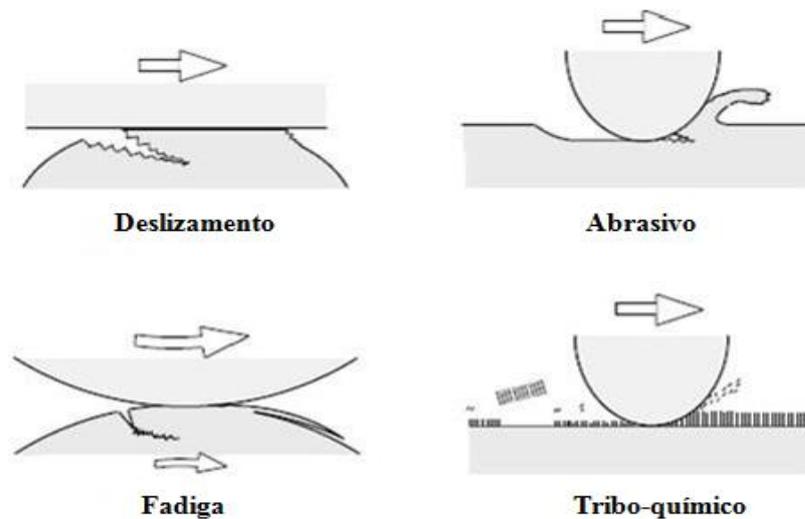


Figura 3.3 – Desenho esquemático do desgaste por deslizamento, abrasivo, por fadiga e tribo-químico (Kato, 2001).

Em uma análise global, pode-se perceber que o desgaste tem sido motivo de preocupação por milhares de anos, desde manter facas, machados e espadas afiadas até a busca de maneiras para otimização de equipamentos industriais. Nas últimas décadas, de acordo com Blau (1997), os estudos de desgaste são geralmente realizados para entender o comportamento de uma determinada família de materiais, apoiar o desenvolvimento de previsão ou modelos descritivos em tribosistemas específicos, compreender os efeitos de importantes variáveis

sobre um tipo particular de modo ou processo de desgaste e otimizar ou selecionar materiais mais pertinentes para uma determinada aplicação (simulação e rastreamento).

Nesse contexto, o teste é um componente vital da investigação, mas a geração de dados por si só não constitui pesquisa. Portanto, é necessário compreender o processo como um todo. Deve-se relacionar a estrutura e as propriedades de uma superfície a sua resposta ao desgaste e usar essa análise para desenvolver materiais mais resistentes às situações específicas (Blau, 1997). A complexidade do desgaste pode ser melhor entendida conhecendo e correlacionando as propriedades dos materiais (dureza, tenacidade, ductilidade, resistência, estrutura, composição, entre outras) com as variáveis envolvidas no processo, como velocidade da partícula erosiva, coeficiente de atrito, pressão, lubrificantes e acabamento superficial (Oliveira, 2015).

Desta forma, o desgaste não pode ser considerado como uma propriedade intrínseca dos materiais e não se pode dizer que a resistência de qualquer espécie é "boa" ou "ruim" sem também fornecer o contexto em que essa avaliação foi realizada. Além disso, esse processo é mais significativamente representado, quando utilizado para fazer seleções de materiais para uma determinada aplicação (Blau, 1997).

O estudo desse fenômeno é feito por uma ciência nova de perfil multidisciplinar, denominada Tribologia, que pode ser definida como: "*Ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados*" (Jost, 1966). As pesquisas e o interesse nessa área têm sido cada vez maiores tanto no meio acadêmico como industrial, pois ainda há muito a ser estudado e descoberto, o que com certeza representará grandes benefícios, crescimento e ganhos econômicos.

3.7 Desgaste erosivo

De acordo com a norma ASTM G40 (2002), erosão é a perda progressiva do material original de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre esta e, o fluido, um fluido multicomponente ou o impingimento de líquidos ou sólidos. Pode-se definir de forma mais específica a erosão por partículas duras como a perda progressiva do material original de uma superfície sólida devido à exposição contínua a impactos.

Hutchings (1992), interpreta a erosão como o desgaste causado pela colisão com a superfície de partículas duras carregadas por um fluxo de gás ou arrastadas em um líquido, ou seja, a tensão de contato surge a partir da energia cinética do impacto de um elemento sólido carregado por um fluido, conforme representado na Figura 3.4. O desgaste promovido pela erosão por partícula sólida é consequência de uma série de eventos de impacto, essencialmente similares e independentes. O contato entre as partículas duras e a superfície do material é muito rápido e, desse ponto de vista, a erosão também é completamente diferente de outros processos de desgaste, como abrasão e desgaste por deslizamento, em que o contato entre o abrasivo e o material é contínuo.

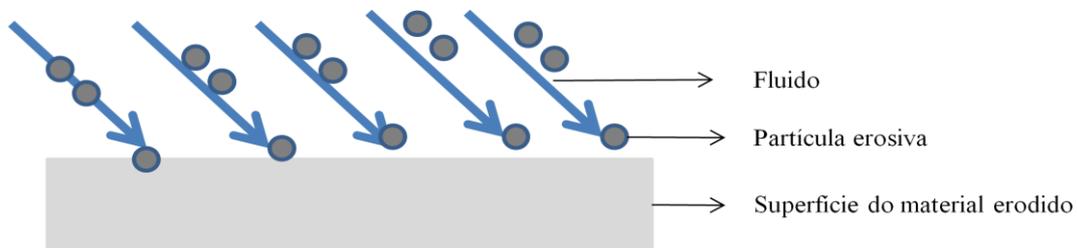


Figura 3.4 - Representação esquemática do desgaste erosivo.

A erosão pode levar a degradação mecânica e perda de diversos materiais em várias aplicações industriais como chutes, leitos fluidizados, ciclones, tubulações, válvulas, conexões e queimadores (Ewald, 2011). A taxa com que esse desgaste irá ocorrer é dependente das características do sistema, do tipo de partícula erosiva e também das propriedades do material erodido. Em muitos casos, a degradação do material não pode ser evitada, mas através de uma seleção adequada e uso de medidas preventivas, é possível projetar um sistema que atenda os requisitos e tenha a resistência necessária ao processo, garantindo uma maior eficiência e durabilidade, o que representaria ganhos econômicos e de segurança em vários setores, tais como o siderúrgico, o petrolífero, o de beneficiamento de minério, o agronegócio, dentre outros (Calvi., 2009; Haugen et al., 1995).

Este trabalho tem como foco o desgaste erosivo, por isso, esse tópico será abordado de forma mais detalhada.

3.8 Parâmetros que afetam o desgaste erosivo

O desgaste erosivo é extremamente complexo, pois envolve uma diversidade de parâmetros que exercem influência direta nesse processo (Bingley e O'Flynn, 2005). De forma geral, eles podem ser subdivididos em três grupos: parâmetros dependentes do sistema, da partícula erosiva e das propriedades do material erodido. Essas variáveis serão descritas nos subitens 3.8.1 ao 3.8.3.

3.8.1 Parâmetros dependentes do sistema.

O tipo de fluido, a temperatura, a velocidade e o ângulo de incidência são fatores determinantes nesse processo.

O efeito da temperatura na erosão varia de acordo com o material erodido. Existem alguns casos em que a erosão inicialmente diminui com o aumento da temperatura, alcança um mínimo e, a partir desse ponto, começa a aumentar. Outros metais apresentam uma taxa independente da temperatura, e também há exemplos em que esse aumento gera mais desgaste (Gat e Tabakoff, 1978; Pereira, 2010). A variação da taxa de erosão com a temperatura para alguns metais e ligas é mostrado na Figura 3.5.

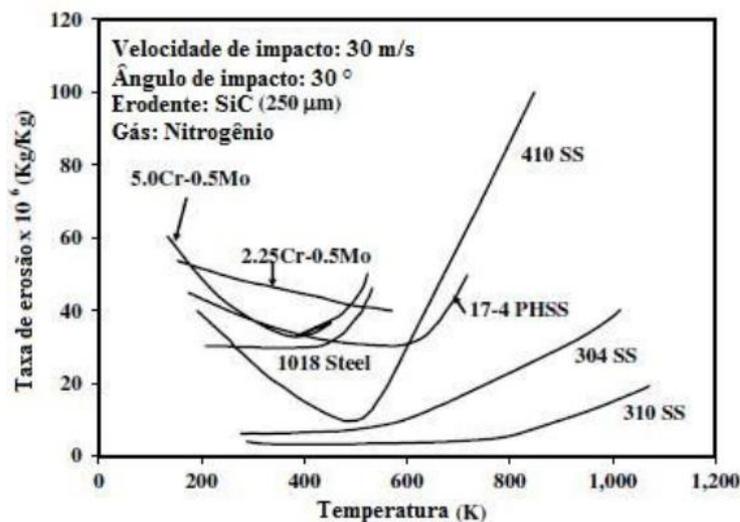


Figura 3.5– Variação da taxa de erosão em função da temperatura para algumas ligas metálicas (Pereira, 2010)

A velocidade da partícula é um parâmetro de extrema relevância em sistemas de desgaste por erosão. Quando uma partícula rígida colide com uma superfície, ela irá penetrá-la com uma profundidade relativa a uma fração do seu próprio diâmetro, deformando a superfície plasticamente de modo a formar uma concavidade que tem um raio de curvatura semelhante ao da partícula erosiva. Entretanto, quando a velocidade de colisão é muito alta, uma série de fenômenos diferentes passa a ocorrer, e crateras são formadas com uma profundidade e um diâmetro várias vezes maiores que o da partícula. Além disso, estas colisões são frequentemente acompanhadas por fenômenos de transferência de calor (Bitter, 1963). Um aumento da velocidade da partícula erosiva tende a ocasionar maiores taxas de desgaste no material, devido ao aumento da energia envolvida no processo.

O ângulo de impacto das partículas erodentes é definido como o ângulo formado entre a superfície do material alvo e a trajetória do fluxo de partículas. Sua influência nas taxas de erosão é dependente da natureza do material erodido. De forma geral, os materiais frágeis são mais resistentes à erosão em menores ângulos de impacto, já os materiais dúcteis têm o máximo de desgaste em torno de 20° a 30° e aumentam sua resistência com o aumento do ângulo de incidência, conforme apresentado na Figura 3.6. Essa mudança está diretamente a diferença no tipo de mecanismo no desgaste erosivo desses materiais e é discutida de forma mais detalhada no item 3.9.

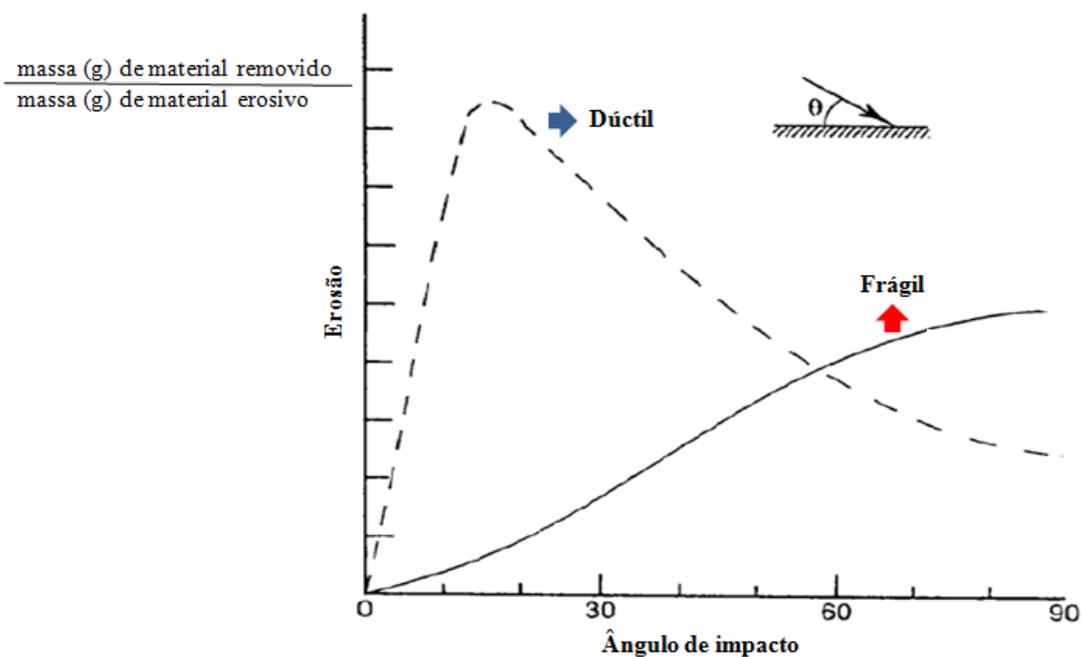


Figura 3.6 – Desgaste erosivo de matérias dúcteis e frágeis em função do ângulo de impacto (Hutchings, 1992).

A correlação entre o ângulo de impacto e a taxa de desgaste erosivo segue a mesma tendência observada por Bhushan (2013) e Finnie (1995) com um ponto máximo de desgaste para os materiais dúcteis entre 20° e 30°, já para os materiais frágeis a medida que o ângulo de impacto aumenta a taxa também aumenta. Entretanto um ponto importante que deve ser considerado é a escala da figura apresentada por Hutchings (1992), o mais coerente é que os materiais frágeis apresentem taxas de erosão maiores em relação aos dúcteis.

3.8.2 Parâmetros dependentes da partícula erosiva.

A influência nas taxas de erosão pelas partículas erosivas foi estudada em diversas pesquisas, sendo que grande parte da literatura entende que alguns fatores como a morfologia, dureza e tamanho alteram o desgaste e por consequência, as taxas de erosão (Vite, 2013; Liebhard e Levy, 1991; Clark e Hartwich, 2001).

Com relação ao formato das partículas, materiais metálicos apresentam taxa de erosão significativamente mais elevada para partículas angulares do que para partículas esféricas de mesmo tamanho. A forma influencia principalmente nas deformações sofridas pela superfície erodida, pois quando as partículas são mais arredondadas elas levam a uma deformação menos localizada, sendo necessária uma maior quantidade de impactos para que ocorra a remoção de material. A formação e propagação das trincas em materiais frágeis também são favorecidas pela incidência de erosivos angulares (Finnie, 1972; Hutching, 1992).

A taxa de desgaste também é influenciada pela dureza das partículas, esse comportamento está relacionado à razão entre a dureza da partícula erosiva e a dureza do material desgastado. De forma geral, a taxa de erosão aumenta para maiores durezas do erosivo. Essa tendência pode ser observado na Figura 3.7. Quando as partículas empregadas no ensaio são carboneto de silício ou alumina, abrasivos que apresentam durezas significativamente maiores que a da amostra, o desgaste é superior ao causado por partículas de sílica.

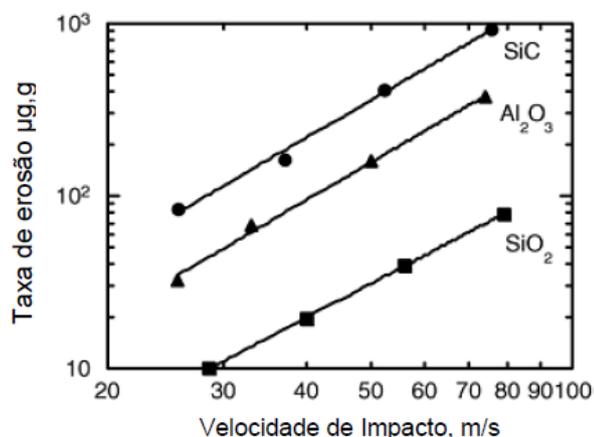


Figura 3.7- Influências da dureza da partícula erosiva e da velocidade de impacto na taxa de erosão, no desgaste erosivo de alumina cerâmica. Ângulo de impacto: 90°. Tamanho das partículas: 125-150 µm. (adaptado de Hutchings, 2000).

Entretanto, essa influência tem um limite, a partir de um determinado ponto em que a dureza da partícula é muito maior que a do material desgastado a taxa permanece constante, mesmo com aumento de dureza do erosivo (Levy e Chick, 1983). Quando as partículas são menos resistentes e mais friáveis, elas não conseguem manter sua integridade quando atingem a superfície do metal e acabam quebrando. Contudo, ao atingir um nível de força e integridade as partículas não fraturam durante o impacto, e como sua dureza é muito superior a do material erodido a taxa para partículas na mesma faixa de densidade, tamanho e forma torna-se aproximadamente a mesma.

Levy e Chick (1983) mostraram, usando partículas de SiO₂, SiC, Al₂O₃, CaCO₃ e Ca₅(PO₄)₃, que as taxas de erosão em um aço AISI 1020, com dureza de 150 HV, ficam similares, quando a dureza do erodente for maior que 700 HV. Esse comportamento é apresentado no gráfico da Figura 3.8 e a dureza dos principais materiais utilizados pelo autor é descrita na Tabela 3.2

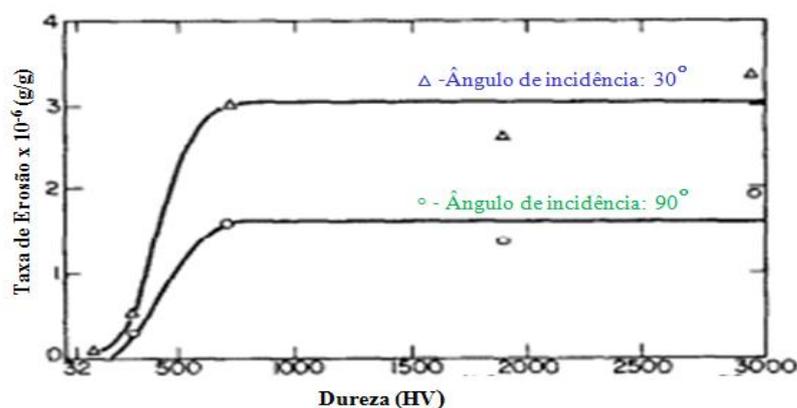


Figura 3.8- Taxa de erosão do AISI 1020 para partículas erosivas com diferentes durezas (adaptado de Levy e Chick, 1983).

Tabela 3.2 – Dureza do AISI 1020 e das partículas erosivas estudadas por Levy e Chick, (1983)

Material	Dureza(HV)
CaCO ₃	115
Ca ₅ (PO ₄) ₃	300
SiO ₂	700
Al ₂ O ₃	1900
SiC	3000
AISI 1020	150

O desgaste erosivo também é dependente do tamanho das partículas, sendo que partículas erosivas maiores, assim como as velocidades mais altas, ocasionam maior fragmentação. A influência desses dois parâmetros é apresentada na Figura 3.9. De forma geral, o aumento na velocidade e no tamanho das partículas contribui para um maior desgaste erosivo no material (Tilly, 1973).

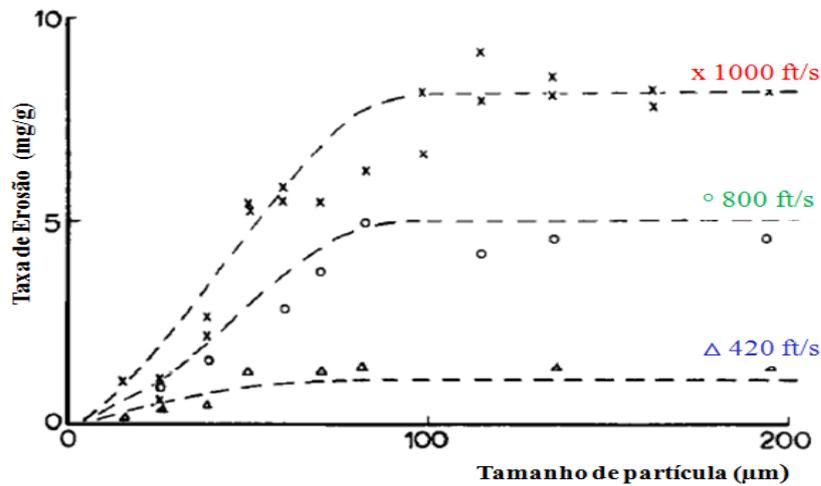


Figura 3.9 - Influência da velocidade e do tamanho das partículas no desgaste erosivo, sendo ft/s= pés/s (Tilly, 1973).

3.8.3 Parâmetros dependentes do material erodido.

Várias propriedades do material erodido irão exercer uma significativa influência na taxa e no mecanismo de desgaste. Dureza, microestrutura, nível de encruamento, módulo de elasticidade, ductilidade, tenacidade, são alguns parâmetros de extrema relevância na resistência a erosão (Kunioishi, 2004). Essas características e suas ligações com o processo serão descritas de forma mais detalhada nos demais itens.

Desta forma, para aumentar a resistência ao desgaste erosivo, é possível alterar diversas variáveis do sistema tribológico, como ângulo de impacto, velocidade de fluxo, tamanho de partícula, propriedades mecânicas da superfície erodida. Entretanto, nos casos de instalações industriais em que os parâmetros operacionais já estão pré-estabelecidos à escolha de um material com características adequadas às condições do processo se torna essencial (Eyre, 1976).

3.9 Mecanismo de desgaste erosivo

O mecanismo de desgaste erosivo é determinado de acordo com o comportamento do material erodido, sendo dividido em dois tipos: desgaste erosivo por deformação plástica e por fratura frágil. De forma generalizada, o primeiro é predominante em materiais dúcteis e o segundo nos materiais frágeis. Entretanto, os termos dúcteis e frágeis, dentro do contexto de erosão,

devem ser utilizados com cautela, pois o mesmo material pode apresentar mecanismos diferentes de acordo com as características de processamento e com o sistema tribológico.

3.9.1 Desgaste erosivo por fratura frágil.

No desgaste erosivo por fratura frágil o material é removido da superfície pela formação e interseção de trincas. Sendo que a extensão da trinca formada é maior quando o impacto ocorre no sentido normal à superfície. Para uma partícula erosiva angular, que é a mais comum em situações práticas, existem duas relações matemáticas que expressam esse mecanismo. A primeira assume que a pressão resistente à penetração é a dureza quase estática da superfície, enquanto a segunda usa um padrão de propagação de ondas para determinar a pressão de impacto, sendo tais modelos apresentados nas equações 3.5 e 3.6, respectivamente. As diferenças entre os resultados obtidos pelas equações são pequenas. Os modelos são semi empíricos e a análise prevê a extensão e profundidade das fissuras laterais formadas e, portanto, o volume de material removido.

$$\frac{E}{\rho} \propto r^{0,7} U^{2,4} \frac{\sigma^{0,2} H^{0,1}}{K_c^{1,3}} \quad (3.5)$$

$$\frac{E}{\rho} \propto r^{0,7} U^{3,2} \frac{\sigma^{0,6}}{K_c^{1,3} H^{0,25}} \quad (3.6)$$

Sendo, “E” a taxa de desgaste erosivo, “r” o raio, “σ” a densidade da partícula erosiva, “U” a velocidade da partícula erosiva, “H” e “ρ” a dureza e a densidade do material erodido.

Nesse caso, a propriedade mais importante do material é a resistência à fratura (K_C) o que faz com que a dureza se torne uma propriedade menos significativa. Este fator está correlacionado com a tenacidade do material (Huctchings, 1992).

3.9.2 Mecanismo de desgaste erosivo por deformação plástica

Esse mecanismo propõe que, quando a partícula erosiva colide com a superfície, o material deslocado pela penetração poderá apresentar três tipos de comportamento: ser acomodado pela deformação elástica, formar uma cratera devido à deformação plástica (conformação

mecânica) ou ter fragmentos removidos, ocasionando perda de massa e desgaste do material (Hutchings, 1992).

A forma como esse mecanismo ocorre é muito dependente das propriedades do material erodido, do tamanho e formato das partículas erosivas e do ângulo de incidência. Sendo que em ângulos rasos a partícula erosiva faz com que sejam formados sulcos na superfície do material o que leva a formação de bordas protuberantes que se tornam pontos de fragilidade. Quando outras partículas colidem com a superfície, essas bordas formadas são removidas como debris de desgaste. Assim, o processo é descrito, na prática, como dois tipos de estágios que ocorrem simultaneamente, a deformação plástica e a perda de material por corte, como se os debris fossem varridos da superfície (Bitter, 1963).

Durante o processo de desgaste por deformação plástica em ângulos oblíquos, podem ocorrer 3 tipos de danos de acordo como o formato e movimento da partícula erosiva, conforme ilustrado pela Figura 3.10.

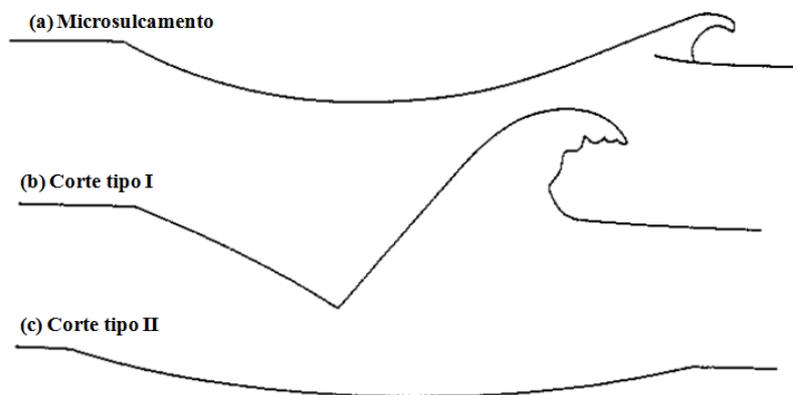


Figura 3.10 – Seção do dano causado pelo impacto de uma partícula dura em uma superfície dúctil, de acordo com o formato e movimento das partículas: (a) “Arando”; (b) Corte tipo I; (b) Corte tipo II. (Hutchings, 1992).

O formato e o movimento da partícula que caracterizam cada tipo de dano da ação erosiva são apresentados Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Correlação entre a ação erosiva em materiais dúcteis com as características da partícula erosiva.

Tipo de impacto	Ação erosiva	Formato da partícula	Movimento da partícula
Oblíquo	Microsulcamento	Esférica	Horário
Oblíquo	Corte tipo I	Angular	Horário
Oblíquo	Corte tipo II	Angular	Anti-horário

No primeiro, Figura 3.10 (a), as partículas erosivas arredondadas deformam a superfície deslocando o material para o lado no sentido horário. Nesse caso, os fragmentos poderão ser destacados ao longo da borda formada. Já o desgaste causado por uma partícula angular depende da sua orientação e da forma como ela rola na superfície durante o contato. Se a partícula rola no sentido horário, ocorrerá o corte I, Figura 3.10 (b), em que o material erodido forma uma aba proeminente que fica vulnerável de ser removida nos impactos seguintes. Caso a partícula role no sentido anti-horário, ocorrerá o corte II, Figura 3.10 (c), em que há remoção de uma lasca do material. Essas distinções são realizadas de forma teórica considerando uma única partícula erosiva, por isso em uma situação real em que várias partículas colidem com uma superfície com irregularidades é muito difícil diferenciar entre os três tipos apresentados.

O desgaste erosivo é associado ao destacamento de debris das bordas de cavidades ou abas formadas por deformação plástica. Apesar de cada impacto deslocar material ao longo da penetração, a ruptura de fragmentos não será frequente até que o material tenha sofrido vários ciclos de deformação plástica (esgotamento plástico). Desta forma, partículas erosivas mais arredondadas levam a menor deformação e mais impacto é necessário para iniciar a perda de massa do material.

Quando o processo ocorre com ângulos de incidência normal, a deformação é mais profunda e menos extensa. Nesse caso, os fragmentos só serão removidos após repetidos ciclos de deformação plástica e a superfície será bem diferente de uma erodida em um ângulo raso. Assim, em ângulo de 90°, dois modelos teóricos são considerados: a formação de debris se inicia quando o acúmulo de deformação plástica atinge um valor crítico ou o processo pode ser considerado como vários ciclos de fadiga causados pela deformação plástica associada a sucessivos impactos das partículas erosivas (Hutchings, 1992)

A Figura 3.11 apresenta a superfície de um aço erodido por partículas de carboneto de silício de 600 μm a uma velocidade de 100 pés/s, em um ângulo de incidência de 30° e 90°. Pode-se perceber que as superfícies erodidas têm aspectos desiguais, devido a diferença do processo de formação de debris. Em um ângulo normal a deformação é mais localizada e profunda já em um ângulo raso ela é mais abrangente e tem um aspecto como se a superfície do material estivesse sido varrida pelas partículas erosivas (Bellman e Levy, 1981).

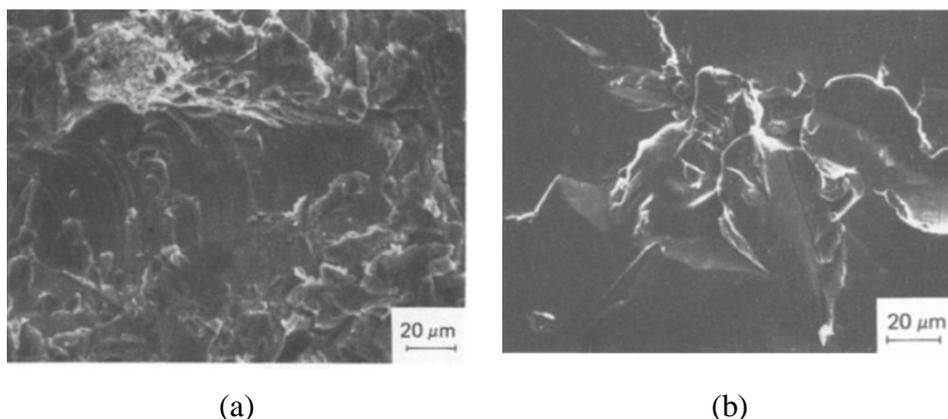


Figura 3.11 – Superfície erodida do AI 7075-T6 com ângulo de incidência: (a) 30° e (b) 90° (Bellman e Levy, 1981).

3.10 Modelos matemáticos para desgaste erosivo

Vários modelos matemáticos foram propostos a partir de pesquisas experimentais buscando uma maior compreensão e controle do desgaste erosivo. A modelagem pode ser usada para interpretar dados experimentais existentes ou para estender os resultados obtidos a condições que não podem ser testadas com as instalações físicas dos testes. De forma mais significativa, modelar o desgaste erosivo pode auxiliar tanto no projeto de melhoria das avaliações experimentais para caracterização de materiais como na concepção de componentes e sistemas industriais (Crocker, 2011).

Devido à complexidade do desgaste erosivo, não é surpreendente que não haja um único modelo preditivo com aceitação universal. No entanto, uma série de modelos foi desenvolvida ao longo dos anos. Estes variam desde os mais simples até os mais minuciosos, que envolvem interações computacionais e geometrias mais complexas.

Os modelos mais simples usam equações de perda de massa (ou volume) para prever a taxa de erosão. Normalmente, eles só são aplicáveis para materiais específicos em situações bem definidas, sendo mais recomendado em casos que já existam muitos dados experimentais. De forma geral, esses modelos são úteis principalmente para auxiliar na interpretação dos dados de testes erosivos, identificar parâmetros importantes nesse processo e em trabalhos comparativos (Bingley e O'Flynn, 2005).

Dentro desses modelos, o proposto por Hutchings (1992), é um dos primeiros que foi desenvolvido para compreender e explicar a erosão. Apesar de ser relativamente simplista, é capaz de prever algumas das tendências observadas no desgaste erosivo e descreve características importantes que influenciam nesse processo. O modelo correlaciona as propriedades do material com a taxa de erosão e é aplicável para metais puros e ligas simples. Conforme citado anteriormente, ele descreve o processo em dois mecanismos: erosão por fratura frágil e por deformação plástica (Paper, 2016).

Considerando o desgaste erosivo por deformação plástica, Hutchings (1992), obteve a taxa de erosão através da equação de movimento da partícula. Sendo que para realizar essa dedução foram estabelecidas as seguintes condições: a partícula erosiva não se deforma; a análise do problema pode ser realizada como um processo quase-estático, ou seja, o sistema pode ser considerado a qualquer momento como estando em um estado de equilíbrio; a única força exercida pela superfície é a de resistência a deformação plástica; e a dureza do material erodido permanece constante.

Desta forma, considerando uma superfície perfeitamente plástica com dureza constante e tendo em vista a ação de uma única partícula erosiva de massa “ m ”, em um determinado tempo “ $t=0$ ”, há o contato inicial com a partícula erosiva. A partícula vai penetrar à superfície ao longo do eixo x e atingir uma área “ $A(x)$ ”, conforme apresentado na Figura 3.12.

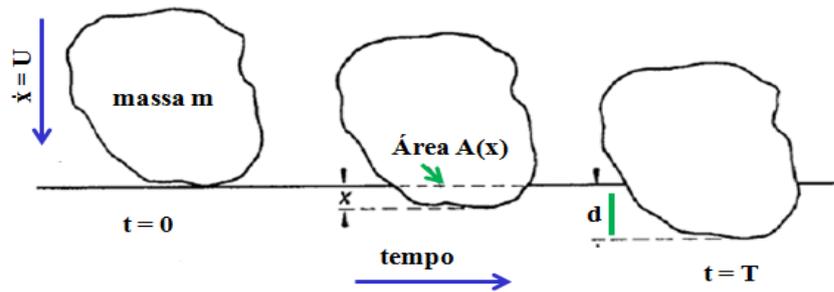


Figura 3.12 – Processo de penetração de uma partícula dura com velocidade U em uma superfície dúctil em um intervalo de tempo T . (adaptado de Hutchings, 1992)

De acordo com o mecanismo de desgaste erosivo por deformação plástica, a força contrária à penetração será devido à resistência de deformação plástica do material em “ $A(x)$ ”. Essa correlação pode ser descrita pela equação 3.7, sendo “ H ” a dureza do material erodido.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -HA(x) \quad (3.7)$$

Considerando a resistência à deformação plástica do material ao longo do eixo x , a energia envolvida nesse processo é representada de forma padrão pela força de resistência “ F ” multiplicada pelo deslocamento, “ dx ”. Por sua vez, a força “ F ” é obtida pela área “ $A(x)$ ” vezes a pressão, que é representada pela dureza “ H ” do material erodido e indica a resistência oferecida à penetração. Assim essa energia pode ser descrita pela equação 3.8.

$$\text{Energia de resistência} = Fdx = HA(x)dx \quad (3.8)$$

Considerando a energia envolvida na resistência à deformação plástica do material igual à energia cinética inicial da partícula erosiva, para uma penetração de profundidade “ d ” obtêm-se a equação 3.9. Sendo “ U ” a velocidade inicial da partícula.

$$\int_0^d HA(x)dx = \frac{1}{2} mU^2 \quad (3.9)$$

Para uma penetração de profundidade “ d ” o volume penetrado “ V ” (base x altura) pode ser determinado pela equação 3.10.

$$V = \int_0^d A(x)dx \quad (3.10)$$

Assumindo “H” como uma constante e igualando as equações 3.9 e 3.10 podemos obter o volume de material deslocado “V”, conforme apresentado na equação 3.11.

$$V = \frac{m U^2}{2H} \quad (3.11)$$

A partir da dedução realizada, é possível obter a massa de material removido pelo desgaste erosivo. Ela pode ser determinada multiplicando a equação 3.11 pela densidade da superfície erodida “ ρ ” e por um fator “K” que representa a fração de material perdido, conforme apresentado na equação 3.12. Esse fator é dependente da razão entre a dureza do material e o seu módulo de elasticidade. De forma geral, quanto maior a dureza maior o valor de “K”. (Huchings, 1992). Bingley e O’Flynn, 2005, sugerem que “K” também é dependente das propriedades de encruamento, ou seja, se o metal estiver em uma condição de endurecer, então parte da energia do impacto será transferida para a sub-superfície de deformação. Assim, quanto maior a capacidade de endurecimento do material, menor será a fração de material removido. Zum Gahr e Mewes também atribuem uma dependência de “K” ao formato da partícula erosiva e ao ângulo de incidência.

$$\text{massa de material removido} = K\rho \frac{m U^2}{2H} \quad (3.12)$$

Assim, para os processos por deformação plástica a relação linear, em estado estacionário, entre a massa de material removido pela massa de partículas erosivas que colidem com a superfície, pode ser definida como uma taxa de erosão (E). A equação 3.13 descreve esse parâmetro.

$$E = \frac{\text{massa de material removido}}{\text{massa de partículas erosivas que colidiram na superfície}} = K\rho \frac{U^2}{2H} \quad (3.13)$$

A equação apresentada ignora alguns fatores que também são muito importantes para o processo, como o ângulo de impacto das partículas erosivas “ θ ”. Tipicamente, para materiais dúcteis o processo erosivo atinge um ponto máximo entre 20° e 30° e tende a diminuir para um ângulo perpendicular de incidência. Além disso, o ponto de ação da força das partículas

também é modificado pelo ângulo de impacto. Assim, pode-se propor um modelo um pouco mais complexo para “E” em função de “ θ ”, conforme apresentado na equação 3.14. Sendo que expoente de velocidade “n” normalmente é um valor entre 2,0 e 2,5 e também é dependente de “ θ ”.

$$E = \frac{K\rho U^n}{H} f(\theta) \quad (3.14)$$

Este modelo apresentado é válido apenas para ângulos rasos de incidência e considera que o material é removido por partículas individuais em uma ação de corte. Sendo assim, é limitado a um intervalo de geometrias de partículas e orientações de impacto.

Em ângulos de incidência maiores, o método como ocorre o destacamento dos debris muda, sendo que a 90°, os fragmentos somente serão removidos quando o material atingir um limite de deformação plástica, conforme apresentado no item 3.9.2. De acordo com Hutchings (1992), esse mecanismo pode ser descrito pela equação 3.15.

$$E = \frac{K\rho\sigma^{\frac{1}{2}}U^3}{\varepsilon_c^{\frac{2}{3}}H^{\frac{3}{2}}} \quad (3.15)$$

Sendo “ σ ” a densidade da partícula erosiva e “ ε_c ” a tensão de falha a partir da qual o material é removido da superfície erodida. Considerando pequenos ciclos de fadiga, essa tensão pode ser obtida através da equação 3.16, proposta por Coffin-Manson.

$$\varepsilon_c = \Delta \varepsilon_p N_f^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Sendo N_f o número de ciclos que ocorre até o material falhar e $\Delta \varepsilon_p$ a média de deformação por impacto, que pode ser estimada usando a relação empírica de Tabor, apresentada na equação 3.17.

$$\Delta \varepsilon_p = 0,28 U^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2\sigma}{3H} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.17)$$

Substituindo as equações 3.16 e 3.17 na equação 3.15 apresentada por Hutchings tem-se que o desgaste erosivo a 90° é determinada pela equação 3.18.

$$E = \frac{K \rho U^2}{0,065HN_f} \quad (3.18)$$

Na prática, uma grande dificuldade em analisar o modelo proposto por Hutchings está em atribuir um valor para a tensão crítica ϵ_c , que denota a falha (remoção de material) durante um teste de erosão. Esse parâmetro não pode ser obtido em um teste mecânico convencional, porque além das taxas de deformação serem diferentes em cada caso, a microestrutura do material poderá sofrer expressivas modificações durante o desgaste. Entretanto, através de um ajuste empírico com as propriedades mecânicas convencionais e testes de desgaste erosivo é possível propor valores de ϵ_c para determinados materiais em condições pré-estabelecidas (Bingley e O'Flynn, 2005).

Em todas as equações apresentadas, há uma correlação com a dureza. Como durante o desgaste o material erodido pode ter essa característica modificada, usar a dureza inicial da superfície se torna um parâmetro muito pobre de avaliação. Assim, Hutchings (1992), sugere que seja considerada a dureza da superfície erodida, pois ela irá representar de forma mais real a dureza do material durante a erosão.

O modelo matemático proposto considera que toda a energia cinética da partícula erosiva é absorvida pelo material como uma resistência à deformação plástica. Entretanto, essa energia inicial pode ser convertida em energia térmica, em energia para rotação das próprias partículas erosivas, pode ser absorvida pelo material como energia para deformação elástica ou para deformação plástica. Assim, a forma como o material irá absorver a energia de impacto também terá forte influência no processo. Esse é um parâmetro importante que apesar de não estar na equação de Hutchings deve ser considerado durante a interpretação e estudo de desgaste erosivo (Bellman e Levy, 1981).

Levy (1986) demonstrou que, para um número de materiais, uma maior resistência à erosão também está associada a maior ductilidade, pois o material tem mais capacidade de se deformar plasticamente e absorver a força da energia cinética das partículas impactantes. É

importante salientar que esse mecanismo é caracterizado por fratura dúctil sendo que mais energia de deformação é necessária para induzir esse tipo de fratura. Desta forma, um material mais tenaz tende a ter melhores respostas.

Uma abordagem alternativa à modelagem empírica da erosão é o uso da dinâmica computacional dos fluidos (CFD). Este método é particularmente adequado para prever a erosão das partículas sólidas dentro das geometrias dos tubos. É uma técnica mais complicada e demanda mais tempo para ser realizada, por isso é mais adequada para geometrias complexas em situações específicas. Em simulações por CFD, programas de rastreamento de partículas e as equações de erosão podem ser usados em conjunto como uma ferramenta para prever os danos. Sendo assim, apesar de ser um método mais moderno, ainda é dependente de coeficientes determinados experimentalmente.

Existem também outros métodos de simulação computacional, como a Análise de Elementos Finitos (FEA) que aborda a erosão em um sentido mais amplo. Estes métodos não dependem de coeficientes de erosão determinados experimentalmente, usando apenas parâmetros do material e do processo, o que reduz o número de experimentos necessários para avaliação. Estes tipos de modelos são úteis para investigar os mecanismos responsáveis pela erosão, tendo a capacidade de prever medidas mensuráveis como falha e perda de material e também dados difíceis de determinar, como o estresse residual. Outra característica deste tipo de modelagem é o fato de que as previsões podem ser apresentadas visualmente aumentando a compreensão dos mecanismos que ocorrem no sistema.

Ao modelar a erosão, o tipo de abordagem selecionada precisa ser considerado de forma ponderada. A escolha do modelo dependerá principalmente da complexidade do cenário e dos resultados desejados. Um fator chave também é a disponibilidade de dados experimentais relevantes para aquele processo. Para os sistemas em que já existe uma grande quantidade de dados, é provável que seja mais viável usar os modelos mais simples em uma primeira avaliação. Entretanto, quando geometrias e processos mais complexos estão sendo considerados, é possível que os modelos baseados em simulação computacional, como CFD e FEA, se tornem mais econômicos, reduzindo a exigência de testes físicos extensivos. A área computacional também é um ramo interessante para pesquisa de desgaste erosivo através do desenvolvimento de métodos mais avançados, precisos e realistas (Crocker, 2011).

3.11 Correlação entre desgaste erosivo e encruamento prévio do material

O desgaste erosivo é muito dependente das propriedades mecânicas e da microestrutura do material, o que fez com que vários estudos fossem realizados para verificar a influência do trabalho a frio e do tratamento térmico nesse processo. Conforme apresentado por Hutchings (1992), vários metais apresentam uma relação linear entre resistência à erosão e dureza. Entretanto, algumas ligas, como o aço AISI 1045 e o aço ferramenta AISI O1, quando sofrem um endurecimento prévio, apesar de apresentarem um aumento de dureza, não exibem maior resistência à erosão. Pelo contrário, em alguns casos há um pequeno decréscimo, conforme retratado na Figura 3.13. Como citado anteriormente, é importante salientar que durante o desgaste, o material erodido poderá ter sua estrutura modificada o que irá interferir em suas propriedades mecânicas. Assim, a dureza inicial do material é considerada um parâmetro pobre de avaliação devendo ser avaliada a dureza final da superfície desgastada por erosão.

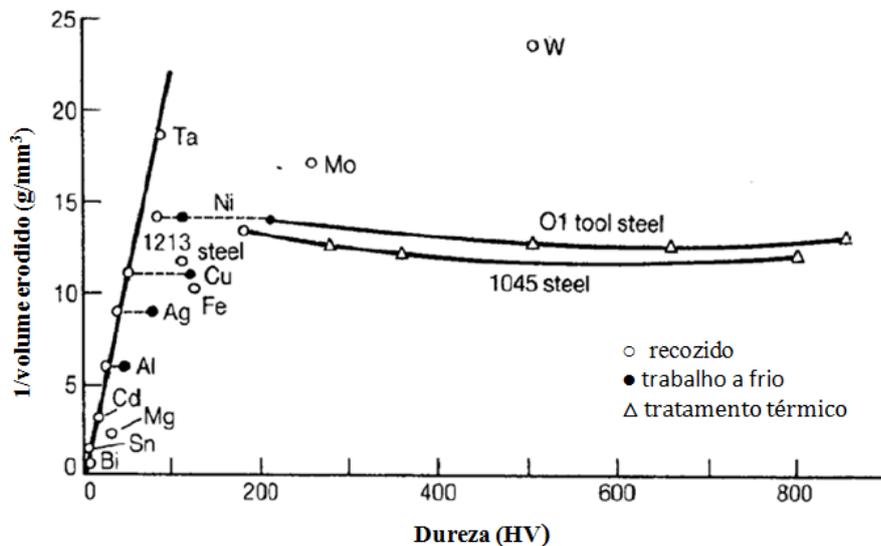


Figura 3.13 – Dependência da resistência a erosão em relação à dureza para alguns metais em vários estados de encruamento e tratamento térmico (Hutchings, 1992 apud Finnie et al., 1967). Sendo, steel = aço e tool steel = aço ferramenta.

Em outro estudo realizado por Levy (1986), o efeito de encruamento também foi investigado. Inicialmente, era esperada maior resistência à erosão devido ao aumento da dureza inicial do material e conseqüentemente maior capacidade de suportar a penetração. Entretanto, a taxa de desgaste inicial aumentou significativamente com o encruamento, conforme apresentado na

Tabela 3.4. Já a taxa de erosão em estado estacionário não sofreu modificação em sua magnitude com o percentual de laminação. Os experimentos foram realizados com aço 1075, utilizando partículas erosivas de Carbetto de Silício (SiC) a uma velocidade de 30 m/s e ângulo de impacto de 60°.

Tabela 3.4 - Efeito da laminação a frio na taxa de erosão do aço 1075 (adaptado de Levy, 1986)

Percentual de trabalho a frio (%)	Dureza (HV)	Taxa inicial de erosão x 10⁻⁴ g/g	Taxa de erosão em estado estacionário x 10⁻⁴ g/g
0	152	0,98	2,2
20	242	1,03	2,2
40	262	1,49	2,2
60	288	1,66	2,2
80	316	1,72	2,2

Os estudos realizados por Naim e Bahadur (1984), relataram que o trabalho a frio prévio aumenta o período de incubação, até que seja iniciada a erosão. Entretanto, devido a um aumento na deformação do material, foi observada maiores taxas de erosão, tanto para as condições de impacto normal quanto oblíquo. Sundararajan (1983) em um trabalho de revisão de literatura, concluiu que várias experiências realizadas têm mostrado claramente que tanto o tratamento térmico como o trabalho a frio não trazem melhorias em relação à resistência a erosão. Entretanto, essa conclusão não deve ser considerada como uma regra, pois outros autores tiveram resultados diferentes (Divakar et al., 2005), uma vez que existem estudos em que a variação da dureza do material influenciou de forma positiva na resistência ao desgaste.

Divakar et al. (2005) estudaram essa correlação em aço inox austenítico AISI 316. A variação de dureza do material foi realizada através de vários graus de deformação a frio e nitretação. Os ensaios de erosão foram realizados segundo a norma ASTM G76 (1995) utilizando sílica como erodente. Para as análises com uma velocidade de impacto de 20m/s à temperatura ambiente, observou-se que a taxa de erosão da amostra sem nenhum tratamento é cerca de duas a três vezes mais elevada quando comparado às amostras laminadas e nitretadas, conforme apresentado na Figura 3.14. A razão para diminuição das taxas de erosão foi atribuída ao aumento da dureza inicial do material. Há diferenças entre o aumento da dureza por encruamento prévio e por nitretação, no primeiro tem-se uma estrutura deformada, com

aumento grande na densidade de discordâncias, já no segundo caso, o aumento de dureza ocorre por solução sólida em aços austeníticos (austenita expandida). Essas diferenças nos mecanismos de endurecimento também influenciaram na variação das taxas de erosão obtidas pelos autores.

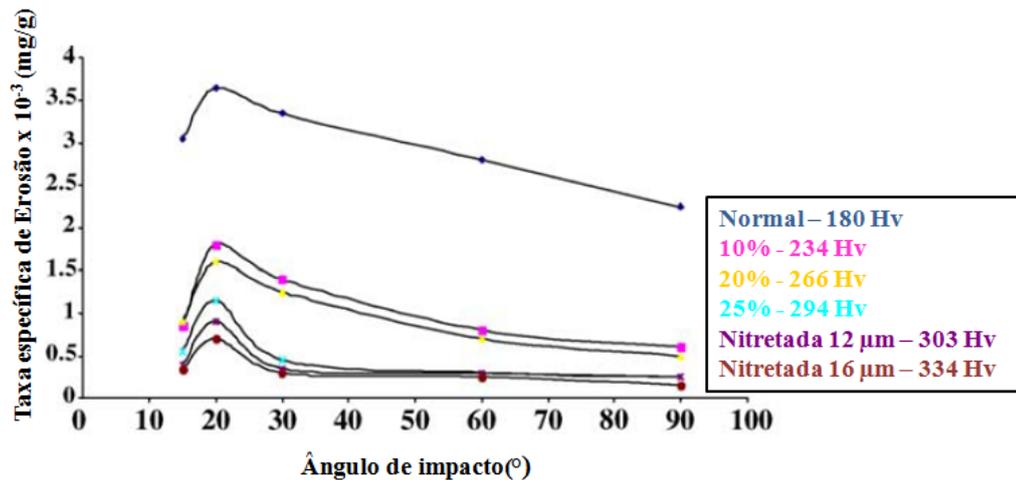


Figura 3.14 - Comparação da taxa de erosão do aço AISI 316 com parâmetros constantes (20 m/s, 102 μm, temperatura ambiente) (DIVAKAR et al., 2005).

Preece et al. (1979) também analisaram o processo de laminação a frio como uma maneira de aumentar a resistência ao desgaste erosivo. Foi enfatizado pelos autores que há um limite de deformação benéfico para o material. A laminação excessiva provoca uma redução na resistência à erosão do material, presumivelmente porque o metal já não é capaz de absorver a energia de deformação. Essa pesquisa foi realizada utilizando ferro puro, de estrutura cristalina CCC, e os resultados são apresentados na Figura 3.15. É importante enfatizar que os efeitos de encruamento em materiais austeníticos e ferríticos são diferentes, devido a grande discrepância existente em suas taxas de encruamento.

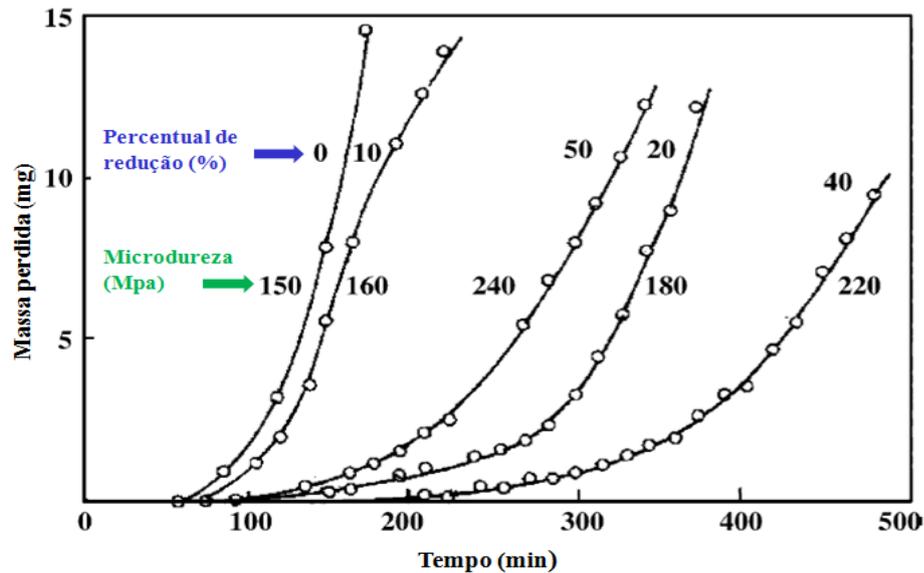


Figura 3.15 - O efeito do percentual de trabalho a frio na resistência à erosão do ferro puro (Preece, 1979).

Dentro desse contexto, pode-se perceber que as comparações entre os estudos realizados são difíceis de serem feitas, pois vários autores foram citados e há uma variação muito grande dos resultados. Os dados apresentados são de materiais diferentes em sistemas tribológicos distintos, o que explica essa variabilidade. Entretanto, é possível obter uma explicação teórica comum.

Importa destacar que várias propriedades influenciam no desgaste erosivo, tais como a dureza, a ductibilidade e o encruamento do material. De forma geral, o aumento da dureza, através de laminação a frio ou tratamento térmico prévio, proporciona maior resistência à penetração, o que deve resultar em taxas de erosão mais baixas. Se, no entanto, o material não retém ductibilidade o suficiente, o impacto de uma partícula erodente pode causar a geração de fragmentos, o metal apresentará menor tensão de ruptura e, conseqüentemente, a erosão irá aumentar. Esses efeitos concorrentes terão influência na taxa de erosão. Além disso, a capacidade de encruamento do material irá diminuir e durante o desgaste erosivo as tensões geradas poderão causar deformação plástica e encruamento da superfície.

Goretta et al. (1991) realizaram um trabalho muito relevante para avaliar esses parâmetros. Ele estudou a influência do encruamento prévio, através de diferentes reduções por laminação a frio, na resistência a erosão de três metais CFC, cobre, níquel e aço inoxidável 304, sendo que em todas as análises foram mantidas as mesmas condições de teste. Os dados

apresentados na Tabela 3.5 revelam diferenças-chave entre os três: o AISI 304 possui capacidade calorífica e ponto de fusão relativamente alto, maior limite de resistência, e tem uma ductilidade média em relação ao cobre e ao níquel. O cobre, por sua vez, tem temperatura de fusão, capacidade calorífica e limite de resistência baixos, mas tem alta ductilidade. Já o níquel possui ponto de fusão maior e menor ductilidade. As energias de falha de empilhamento do cobre e do níquel são bastante altas e a do aço AISI 304 é baixa. Uma reduzida EFE indica que o aço AISI 304 encrua mais quando deformado que os outros dois, ou seja, apresenta um maior aumento de resistência mecânica por deformação plástica.

Tabela 3.5- Propriedades dos materiais pesquisados por Goretta et al., 1991. Sendo, C_p = calor específico e EFE = energia de falha de empilhamento.

Metal	Ponto de fusão (K)	C_p (J/g.K)	EFE (J/m ²)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
Cobre	1356	0,387	0,16	209	60
Níquel	1726	0,444	0,30	317	30
304 SS	± 1700	0,469	0,02	500-600	30-55

Todos os materiais analisados apresentaram um comportamento característico de metais dúcteis, com menor taxa de desgaste em um ângulo reto. O foco do trabalho foi verificar a influência do encruamento prévio, conforme apresentado na Figura 3.16. O desvio padrão não foi indicado pelos autores. Os resultados de Goretta et al. (1991), demonstram que para o impacto a 90° (Figura 3.16 (a)), o cobre apresentou diminuição das taxas de erosão com o aumento da redução por trabalho a frio. Já o aço AISI 304 exibiu resposta inversa: as taxas de erosão aumentaram com a quantidade de trabalho frio. O níquel teve um resultado intermediário, pois a laminação levou a uma ligeira diminuição na taxa de erosão para uma pequena redução, mas o desgaste aumentou quando o encruamento prévio foi maior. Para o impacto a 15° (Figura 3.16 (b)), a tendência para o cobre de ter uma melhora na resistência à erosão com o aumento do endurecimento é a mesma que para o impacto de 90°. O comportamento do níquel também é o mesmo em relação a um ângulo normal, mas a magnitude da mudança é maior. Entretanto, para o aço AISI 304, as taxas diminuíram para pequenas reduções e depois aumentaram para grandes reduções.

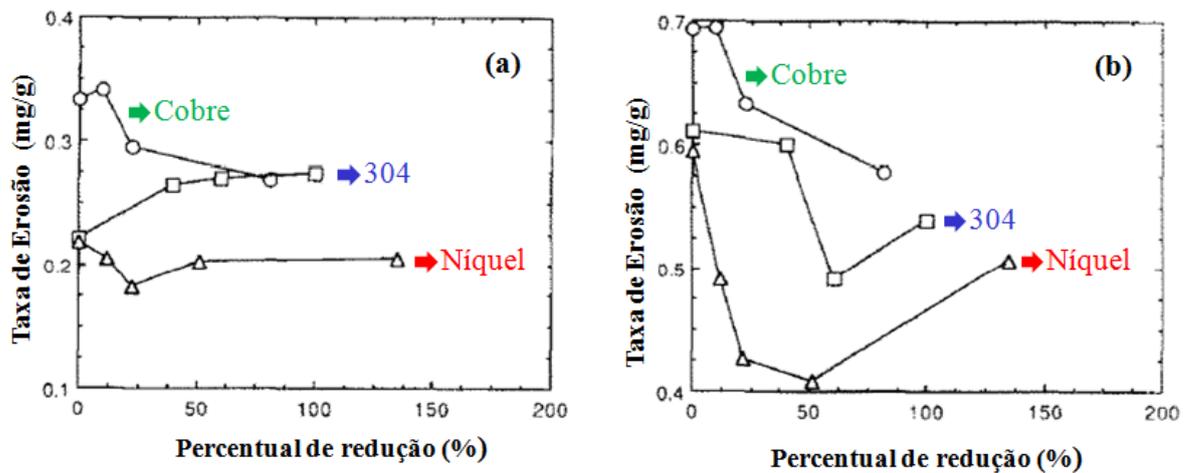


Figura 3.16 – Taxa de erosão em estado estacionário para o cobre, aço inoxidável 304 e níquel. Partícula erosiva: Alumina 143 μm com velocidade de 75 m/s. Ângulo de incidência: (a) 90° e (b) 15° . (Goretta et al., 1991)

Em resumo, para ambos os ângulos de incidência, o cobre, o metal com maior ductilidade, tornou-se mais resistente à erosão com o aumento da redução a frio. Já para o níquel e para o aço 304, o encruamento excessivo levou a um acréscimo da erosão. Estes aumentos foram relacionados à redução da ductilidade e formação de bandas de cisalhamento. Ou seja, maiores taxas de desgaste erosivo ocorrem em metais com menor ductilidade quando ela começa a ser esgotada pela combinação do encruamento prévio e danos do impacto. Os efeitos de bandas de cisalhamento foram mais evidentes para o impacto a 90° do que para o impacto a 15° . Este resultado pode ser uma consequência de uma diferença fundamental no mecanismo de remoção de material. Assim, para o impacto a 90° , os efeitos da ductilidade e da localização da tensão parecem ser predominantes.

A baixa energia de falha de empilhamento do aço 304 pode ter promovido as bandas de cisalhamento observadas por Goretta et.al. (1991). A menor resistência à erosão apresentada pelo aço 304 em altas reduções por trabalho a frio também pode ser remetida a sua baixa EFE, pois nesse caso o material tem maior encruamento, e conseqüentemente, perde mais tenacidade. Os dados deste estudo foram coletados para um conjunto de análise em estado estacionário em condições erosivas severas. É importante frisar que em condições diferentes os materiais podem apresentar respostas distintas, pois a resistência ao desgaste não pode ser relacionada a um único parâmetro. Um conjunto de variáveis interdependentes, como dureza,

ductilidade e encruamento, irá variar de acordo com o sistema tribológico. Entretanto, é possível identificar características importantes para melhorar a resistência à erosão.

3.12 Resumo

Através desses estudos, é possível perceber os efeitos benéficos da ductilidade na resistência à erosão. A maior dureza também será positiva se o metal conservar ductilidade suficiente, o que faz com que a redução seja mais indicada para materiais muito dúcteis. A baixa EFE também pode promover maiores taxas de erosão com aumento do percentual de trabalho a frio, pois o material encrua muito e perde mais ductilidade. Além disso, esse aumento de dureza será compensado por uma perda na taxa de encruamento, o que leva a uma maior remoção do material deslocado em cada impacto (aumento de K apresentado na equação 3.12). Outro ponto importante a ser considerado é que durante o desgaste as tensões podem ser tão grandes que o material é encruado durante o processo, o que em alguns casos pode fazer com que a laminação a frio prévia praticamente não influencie na resistência à erosão.

3.13 Equipamentos sujeitos a desgaste erosivo

Conforme apresentado, vários equipamentos industriais sofrem desgaste erosivo. Nesse trabalho foi dado enfoque aos chutes, que estão presentes em vários setores industriais e do agronegócio. Desta forma, é possível contextualizar e entender a aplicabilidade desse estudo.

Os chutes são utilizados em muitas indústrias para facilitar a transferência de material a granel de uma correia transportadora para outra ou para redirecionar o fluxo de um ponto de entrega para um processo ou equipamento. Sua principal função é realizar essa transferência de forma a minimizar a degradação do material transportado e permitir que esse flua suavemente, sem acúmulo, ou entupimento. Assim, os chutes são utilizados como um mecanismo de comunicação entre sistemas integrados atuando no controle do fluxo e da velocidade de descarga. São muito comuns em aplicações de silos e filtros de mangas, principalmente em processos com materiais em pó ou grão (Campos, 2013).

Embora, os chutes possam parecer ser apenas uma parte pequena ou de baixo custo do sistema de transporte, eles podem facilmente tornar-se um gargalo do processo. Eventuais falhas

nesses equipamentos podem ser dispendiosas e ocasionar atrasos, especialmente nos casos em que se manuseiam muitas toneladas de material, como ocorre nas operações agrícolas, mineração, carregamento e descarga de vagões e navios. Alguns dos problemas associados aos projetos de chutes de transferência são: obstrução, desgaste da superfície dos equipamentos, geração de poeira acima dos limites aceitáveis, desgaste excessivo da correia e atrito das partículas dos materiais (Veloso, 2014).

A Figura 3.17 demonstra a representação esquemática de chutes. Durante a sua operação irá ocorrer uma perda progressiva do material original de sua superfície devido à exposição contínua a impactos de partículas duras carregadas por um fluido, o que é característico de desgaste erosivo.

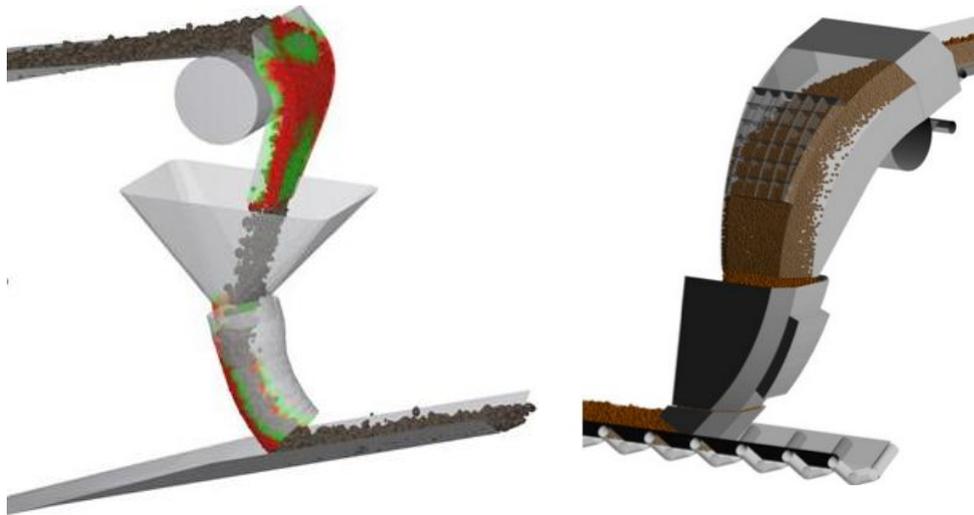


Figura 3.17– Representação esquemática de chutes (adaptado de EDEM, 2010 e JENIKE).

Para a construção de chutes é usual a utilização de chapas de aço carbono e de revestimento com chapas de cerâmica ou de outros tipos de materiais como carbetos de tungstênio, placas com soldas, etc. Nas situações, em que não é possível um desempenho satisfatório com os revestimentos comuns, podem-se utilizar chapas de aço inoxidável, ou chapas de polietileno.

O ângulo de inclinação do chute é determinado pela natureza do material transportado, conforme apresentado na Tabela 3.6, bem como pela velocidade de entrada e comprimento do sistema. O formato do equipamento também é definido de acordo com a operação. Todos

esses parâmetros irão influenciar diretamente no desgaste ocorrido na sua superfície. Desta forma, é essencial que os chutes sejam projetados com um material adequado ao processo, que seja capaz de aumentar a durabilidade desses equipamentos, diminuir o desgaste, aumentar a eficiência e conseqüentemente ter um menor custo final (GAVI, 2001).

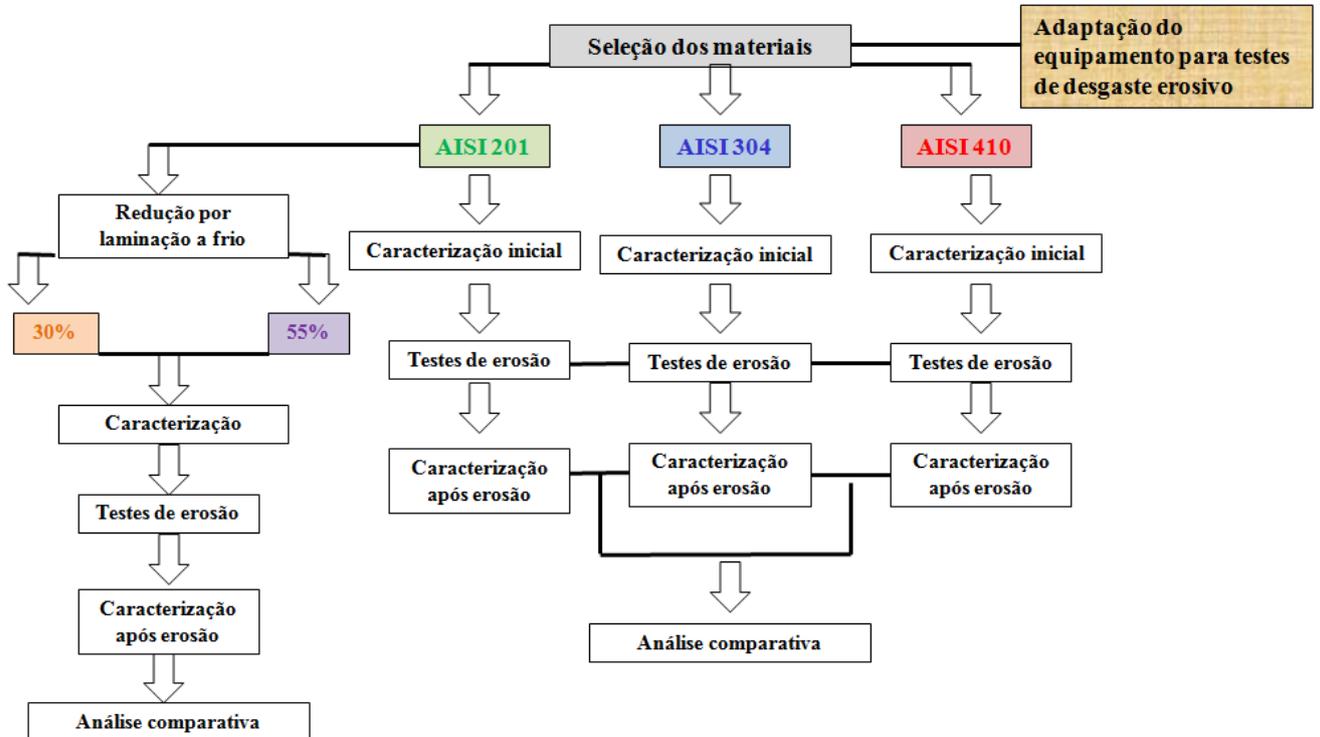
Tabela 3.6 - Ângulos dos chutes comumente encontrados para alguns tipos de materiais transportados (GAVI, 2001).

MATERIAL	ÂNGULO NORMAL ACIMA DA HORIZONTAL (GRAUS)
Material Filtrado (Filter Cake)	65 a 70
Material pegajosos, argila e finos	50 a 60
Carvão mineral, Pellets	35 a 45
Areia	35 a 40
Pedra britada primária	35 a 40
Pedregulho cascalho	30 a 35
Pedra peneirada	30 a 35
Sementes	35 a 40
Grãos	27 a 35
Polpa de toras de madeira	15

Dentro desse contexto, o estudo realizado apresenta uma grande aplicabilidade pois podem ser realizados testes em campo com partículas como grãos, pelotas e sementes tendo como referência os ensaios e materiais estudados nessa dissertação.

4 Metodologia

Um fluxograma geral das etapas realizadas nesse trabalho é apresentado abaixo:



Figuras 4.1 Fluxograma das etapas do trabalho.

Inicialmente, foi realizada a seleção dos materiais e de forma simultânea a adaptação do equipamento para testes de desgaste erosivo. Os três materiais selecionados, os aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410, foram previamente caracterizados, depois realizou-se os ensaios de desgaste e as amostras erodidas também foram avaliadas. Seguindo os mesmos padrões de caracterização foi estudado a influência da redução por laminação a frio no desgaste erosivo do aço AISI 201. Por fim, fez-se uma análise comparativa dos resultados obtidos.

4.1 Seleção de materiais

Para a pesquisa, foram selecionados dois aços inoxidáveis austeníticos, AISI 201 e AISI 304, com efeito TRIP, ou seja, são materiais que apresentam aumento na resistência mecânica devido à transformação induzida por deformação da austenita em martensita. Além disso, foi selecionado um aço ferrítico, AISI 410. Eles foram escolhidos para estudar a influência das diferentes estruturas no desgaste erosivo.

O aço AISI 201 é um aço tecnologicamente mais avançado, de menor custo e apresenta propriedades promissoras para a aplicação proposta, como alta taxa de encruamento, boa ductilidade e elevado aumento de resistência mecânica por efeito TRIP. Já o aço AISI 304 foi escolhido para ser um parâmetro de comparação, pois é um dos aços inoxidáveis austeníticos mais conhecidos e utilizados no mundo. Além disso, apesar desses materiais terem mesma estrutura cristalina (CFC), apresentam diferenças em relação a tendência de formação de martensita induzida por deformação e na taxa de encruamento (TAVARES et al., 2009). O aço AISI 410 tem estrutura cristalina CCC e também apresenta uma vasta gama de aplicações, por isso também foi selecionado como parâmetro de comparação.

Além da influência da estrutura dos materiais na erosão, nesse trabalho também foi investigado o efeito da laminação prévia. Sendo que para esse objetivo foi investigado o aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução. As amostras utilizadas foram produzidas na Aperam South America em Timóteo-MG.

4.2 Laminação a frio

Como mencionado previamente, a laminação a frio foi realizada apenas para o aço AISI 201. Todas as amostras apresentaram espessura inicial de 6 mm e foram submetidas a redução, utilizando-se laminador piloto (fabricante FENN, modelo 4_085) apresentado na Figura 4.2. Foram processadas amostras em 7 níveis diferentes de redução: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 55%, mas para os testes de desgaste erosivo foram selecionadas as amostras com percentual de redução de 0, 30 e 55%



Figura 4.2 - Laminador Piloto - Centro de Pesquisa Aperam.

4.3 Caracterização dos materiais

4.3.1 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas com diferentes equipamentos e técnicas de acordo com o tipo de elemento que se desejar analisar, garantindo assim maior precisão à análise. Essas técnicas são descritas abaixo:

- C e S - analisados pela técnica de absorção de infravermelho após fusão no equipamento da marca Leco, modelo CS444;
- N - analisado pela técnica de termocondutividade após fusão no equipamento da marca Leco, modelo TC436;
- Demais elementos químicos - analisados pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios x no equipamento da marca ThermoARL, modelo 9900;

4.3.2 Análises metalográficas

A preparação para as análises metalográficas foi composta das etapas de corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Os cortes foram inicialmente executados em tesoura guilhotina e, posteriormente, em um equipamento com disco abrasivo refrigerado. Em seguida, as amostras foram embutidas em resina polimérica utilizando-se a máquina do fabricante BUEHLER, modelo Simplimet 1000. Após esta etapa, foi realizado o lixamento e polimento utilizando o equipamento Abramin do fabricante Struers.

As amostras passaram por ataque químico de acordo com o tipo de material para revelar a microestrutura. Nos austeníticos, foram utilizados água-régia (30 mL de água destilada + 20 mL de ácido clorídrico + 15 mL de ácido nítrico) e Beraha (solução de estoque = 48 g de bifluoreto de amônia + 800 mL de água destilada + 400 mL de ácido clorídrico / solução de ataque = 100 mL da solução de estoque + 1 g de bissulfito de potássio). O objetivo desses ataques é identificar a estrutura dos grãos e a formação de martensita por deformação, respectivamente. Para o AISI 410 o ataque foi feito com Vilella (1 g de ácido pícrico + 5 mL de ácido clorídrico + 100 mL de álcool etílico) e para análise da granalha foi utilizado Nital (5 mL ácido nítrico + 95 mL de álcool etílico).

As análises estruturais foram realizadas em microscópio ótico do fornecedor Laica DMRM e em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (fabricante OXFORD, modelo 7509 série A4 161-5350-TV5-2614, 500V).

4.3.3 Ensaios mecânicos

Para a caracterização mecânica foram realizados ensaios de tração determinando o limite de escoamento, limite de resistência e alongamento do material. Além disso, foram feitos ensaios de dureza. Os ensaios de tração foram realizados em conformidade com a norma ASTM A370-12, utilizando-se uma máquina de tração do fabricante INSTRON, modelo 5583, com capacidade máxima de carga de 150 kN. Ela possui como acessório um extensômetro ótico que permite mensurar a deformação durante todo o ensaio. Os corpos de prova para os ensaios de tração foram preparados em uma fresadora CNC de acordo com as dimensões especificadas pela norma ASTM E8/E8M-11

Para os ensaios de dureza foi utilizado o durômetro Testor 930, do fabricante INSTRON WOLPERT. A dureza foi medida em HV.

4.3.4 Perfilometria

Os testes de perfilometria foram realizados utilizando um perfilômetro, da marca Hommel Werke, modelo T8000 com software de análise 3D Mountains Map.

4.4 Testes de erosão

Para a realização dos ensaios de erosão foram realizadas algumas modificações em um gabinete de jateamento por sucção da marca CMV, modelo GS-9075X, série 002/1996. O equipamento é composto basicamente por um silo de granalhas, pistola de jateamento acionada por pedal, válvula dosadora ar/abrasivo, filtro regulador de pressão e separador de umidade, exaustor com motor de 0,75 cv e iluminação.

Para controlar o fluxo de granalha e evitar a sua recirculação foi construído um silo externo. Além disso, foi construído um suporte para a pistola para variar a distância e o ângulo de incidência. A amostra também foi colocada em uma base própria para garantir que ela esteja alinhada com o fluxo e que fique fixa durante o experimento.

Em todos os testes a pressão de ar comprimido foi mantida constante em $6,0 \cdot 10^5$ Pa. Além disso foi estabelecido uma tamanho padrão das amostras de 80 x 100 mm.

Para verificar o desgaste erosivo foi calculada a diferença de massa antes e após o teste. As amostras foram lavadas, passadas no ultrassom durante 5 minutos e secadas, com objetivos de evitar a presença de contaminantes, resíduos de granalha e do material erodido. Os ensaios foram realizados em triplicata.

Foi determinado a taxa de desgaste erosivo calculando-se a razão entre a massa de material removido pela massa de partículas erosivas que colidiram com a superfície em g/g. Além disso, foi estabelecido a perda de massa por área, para isso foi medido a área total desgastada nas amostras para um ângulo de 20° e 90°.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa pesquisa foi dividida em três subtópicos:

- 1 – Desenvolvimento do projeto de adaptação do equipamento de jateamento de granalha para ensaios de desgaste erosivo.
- 2 – Influência da estrutura dos materiais no desgaste erosivo, sendo que, para essa análise foram escolhidos três aços inoxidáveis: AISI 201, AISI 304 e AISI 410
- 3 – Influência da laminação a frio no desgaste erosivo do aço AISI 201.

Desta forma, todos os itens presentes em resultados e discussão estão separados de acordo com os temas propostos.

5.1 Equipamento para ensaios de desgaste erosivo.

Todo o sistema tribológico exerce influência nos resultados de desgaste erosivo, por isso para comparar a resistência de diferentes materiais, é importante que todos os outros parâmetros sejam mantidos constantes. A adaptação do equipamento de jateamento para realização dos ensaios erosivos foi feita dentro desse foco. Nos subtópicos 1 ao 3 são apresentados como foram implementados os controles das principais variáveis.

5.1.1 Parâmetros do fluxo.

O tipo de fluido, a velocidade do fluxo, a temperatura e o ângulo de incidência são fatores determinantes para esse processo. Nesse trabalho, o arraste das partículas sólidas foi realizada por ar comprimido a temperatura ambiente, com velocidade constante, em um ângulo de incidência de 20° ou 90°.

Um aumento de velocidade tende a levar a uma maior taxa de desgaste, devido ao acréscimo da energia cinética envolvida. Apesar do equipamento não ter um instrumento para determinar de forma específica esse parâmetro, ele foi controlado através da pressão parcial do ar que durante todos os ensaios foi mantida a $6,0 \cdot 10^5$ Pa e do fluxo mássico de partículas erosivas que foi medido por diversas vezes resultando em 2,0 kg/min com uma variação de $\pm 0,0167$

kg/min. A densidade das partículas erosivas foi de $7,4 \text{ g/cm}^3$ e a abertura da pistola de jateamento é $7,1 \text{ mm}$. Desta forma, a energia total envolvida no processo, em relação a massa de partículas erosivas, pode ser estimada em $0,203 \text{ J/Kg}$. Considerando a energia potencial e cinética presentes e uma velocidade média das partículas de $0,114 \text{ m/s}$ calculada a partir dos parâmetros citados.

O controle do ângulo de incidência foi realizado com auxílio do suporte apresentado na Figura 5.1, a uma distância entre a pistola e o material erodido de 2 cm . A amostra também foi fixada em um suporte específico, conforme Figura 5.2. Além disso, foi projetado um silo externo, Figura 5.3, para garantir a reposição de granalhas novas e impedir a recuperação automática das partículas, assegurando um fluxo constante e homogêneo.

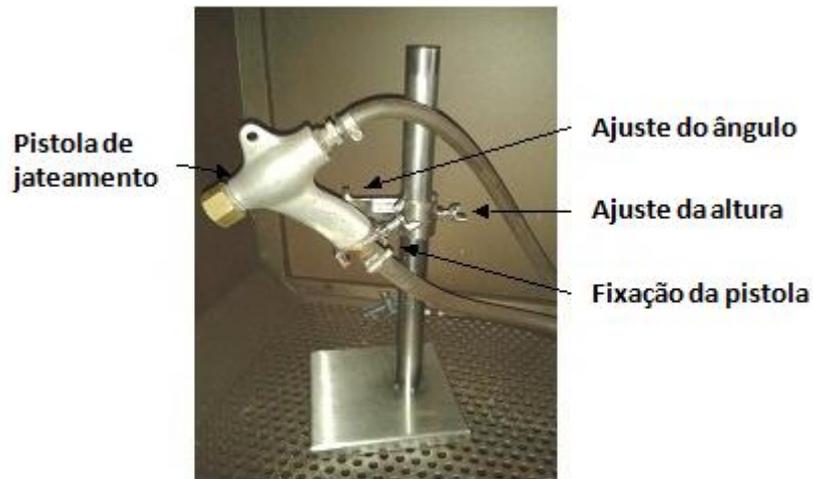


Figura 5.1 - Suporte para controle do ângulo de incidência em ensaios de desgaste erosivo.



Figura 5.2 - Suporte para amostra em ensaios de desgaste erosivo.



Figura 5.3 – Silo externo adaptado à cabine de jateamento para ensaios de desgaste erosivo.

Desta forma, foi possível garantir o controle e estabilidade desses parâmetros.

5.1.2 Parâmetros das partículas erosivas.

A influência da partícula erosiva nas taxas de erosão é um tema abordado por vários pesquisadores, sendo que há uma unanimidade na literatura de que alguns fatores como a morfologia, dureza e tamanho alteram de forma significativa o desgaste, e, conseqüentemente, as taxas de erosão. Nesse trabalho foram utilizadas granalhas de aço carbono como partículas erosivas, todo material foi caracterizado para garantir a homogeneidade e representatividade dos resultados. No total, foram gastos em torno de uma tonelada de granalha.

5.1.2.1 Tamanho das partículas erosivas

A certificação da distribuição granulométrica da granalha foi realizado através de técnica de granulometria a laser e os resultados são apresentados na Figura 5.4.

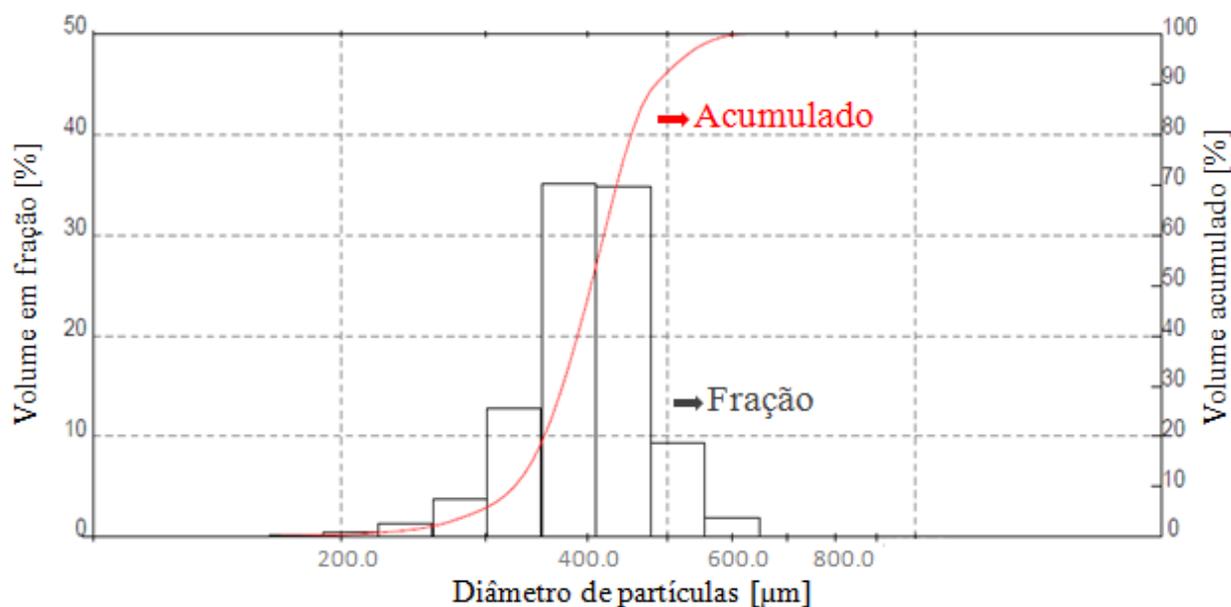


Figura 5.4 – Análise granulométrica da granalha utilizada como agente erosivo nos ensaios de desgaste.

A escala do lado esquerdo é referente à análise granulométrica diferencial, que é representada pelo gráfico de barras, e indica a porcentagem do volume de material acumulado em cada faixa. A curva, por sua vez, está correlacionada à escala da direita e representa a análise cumulativa, que é determinada pelo somatório da fração do volume de material retido. Esse formato de curva obtido descreve uma distribuição uniforme de partículas na amostra, com um intervalo de variação pequeno dos diâmetros e tamanho intermediário predominante. O diâmetro médio determinado nesse ensaio foi de $403,77 \pm 4,91 \mu\text{m}$.

5.1.2.2 Morfologia das partículas erosivas

A estrutura das granalhas foi analisada por microscopia ótica, e pode ser visualizada na Figura 5.5.

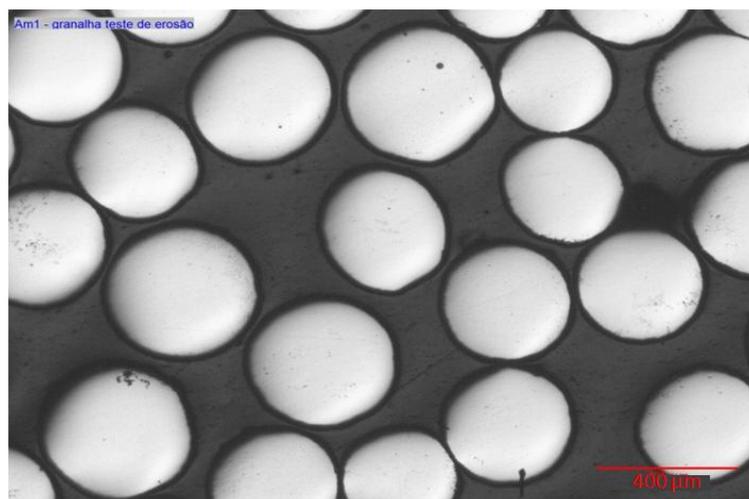


Figura 5.5 – Microestrutura representativa da granalha utilizada como erosivo nos ensaios de desgaste.

Além dessa descrição qualitativa, a esfericidade média das particulada foi determinada, sendo de $0,83 \pm 0,06$.

A microestrutura do material também foi avaliada. Após o ataque metalográfico com Nital obteve-se a imagem apresentada na Figura 5.6, que indicou a presença de uma única fase, martensítica.

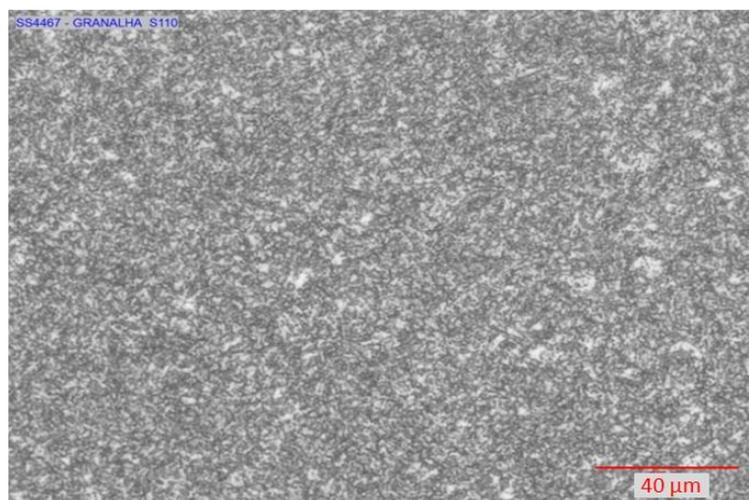


Figura 5.6– Microestrutura da granalha utilizada como erosivo nos ensaios de desgaste. Ataque químico: Nital.

Através dos dados apresentados é possível certificar a homogeneidade das granalhas utilizadas nos ensaios de desgaste erosivo. Esses fatores são fundamentais para garantir a confiabilidade e precisão dos resultados.

5.1.2.3 Dureza das partículas

A dureza das partículas erosivas foi determinada por meio de análises com microdurômetro e apresentou um resultado final de 532 ± 15 Hv.

De forma geral, quanto maior a dureza do material erosivo maior a taxa de desgaste do erodido, porém, há um limite a partir do qual a taxa de erosão não varia com o aumento de dureza. Levy e Chick (1983) em um estudo com aço AISI 1020 mostraram que quando se utiliza partículas de SiO_2 , SiC e Al_2O_3 , as taxas de erosão são similares, quando a dureza do erodente for cerca de 5 vezes maior que a do material erodido. Nesse estudo, a razão entre a dureza do abrasivo/dureza inicial do material foi de 2,43 para o aço AISI 201; 3,04 para o aço AISI 304 e 2,80 para o aço AISI 410. Para as amostras do aço AISI 201 que passaram por laminação a frio, a medida que a deformação aumentou a dureza do material também aumentou, sendo uma razão de 1,19 para a redução de 30% e 0,89 para a redução de 55%.

Assim, essa propriedade é muito importante para o desgaste erosivo, mas como o mesmo erodente foi utilizado em todos os ensaios, não gerou oscilações nos resultados.

5.1.3 Parâmetros do material erodido.

Várias propriedades do material erodido, como dureza, ductilidade, nível de encruamento, microestrutura, entre outras, exercem influência na resistência ao desgaste. Por isso, todos os aços pesquisados foram previamente caracterizados.

Os ensaios de erosão foram realizados em todos os materiais durante 15 minutos acompanhando a perda de massa do material a cada 5 min. Os testes foram realizados em ângulos de incidência de 20° e 90° . A Figura 5.7 apresenta as amostras de todos os aços após sofrerem desgaste erosivo, sendo que para o aço AISI 201 foram feitas análises para o material não laminado e para amostras reduzida a 30% e 55%. Já para os aços AISI 304 e AISI 410 todos testes foram executados sem nenhuma deformação prévia. Todas essas análises serão apresentadas e discutidas nos próximos itens.

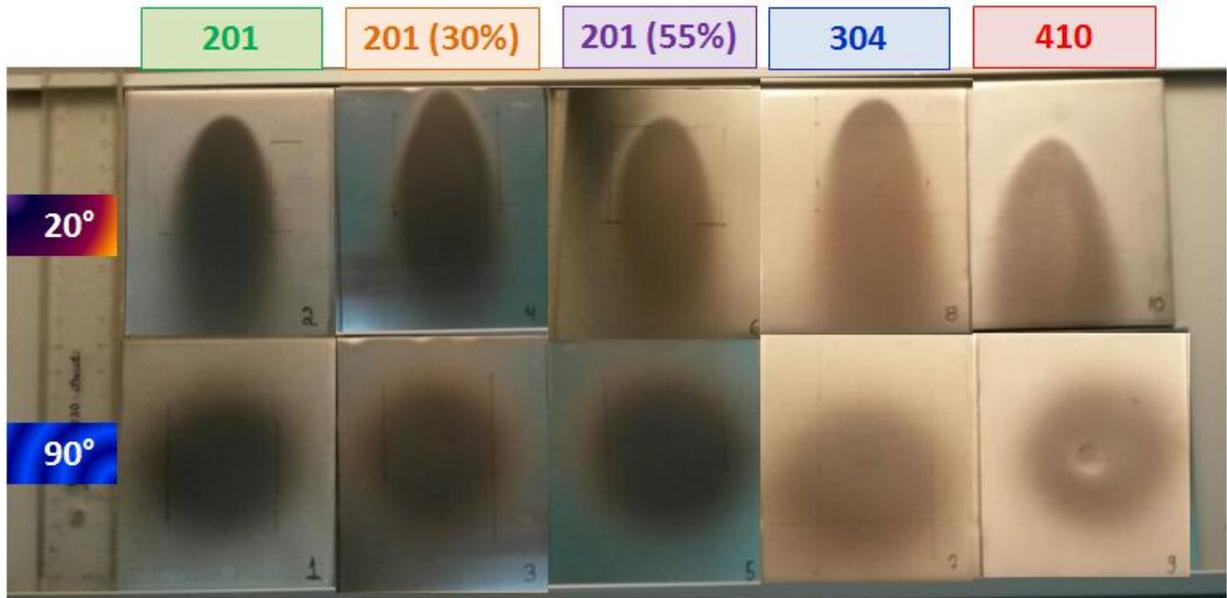


Figura 5.7 – Amostras dos materiais após sofrerem desgaste erosivo.

5.2 Comparação da influência da estrutura dos materiais no desgaste erosivo

Esse tópico aborda o estudo comparativo do desgaste erosivo para os aços inoxidáveis AISI 201, AISI 304 e AISI 410.

5.2.1 Caracterização dos materiais.

Os três materiais selecionados para a realização do trabalho foram inicialmente caracterizados na condição como recebida.

5.2.1.1 Composição Química

A composição química dos aços foi determinada para cada elemento de acordo com a metodologia descrita previamente. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.1.

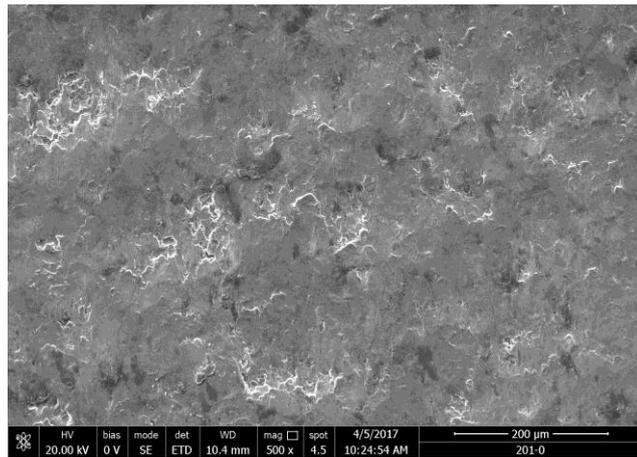
Tabela 5.1 – Composição química (% em massa) dos aços estudados.

Elementos	AISI 201	AISI 304	AISI 410
C	0,0332	0,0193	0,0148
Mn	6,9646	1,3635	0,5233
Si	0,4253	0,4616	0,5008
P	0,0309	0,033	0,0366
S	0,0002	0,0021	0,0004
Cr	17,001	18,1423	11,1143
Ni	4,0478	8,0448	0,3468
Mo	0,0207	0,1317	0,0261
Al	0,0043	0,0063	0,0019
Cu	0,0336	0,2497	0,0516
Co	0,0423	0,1861	0,0209
V	0,0436	0,0515	0,0307
Nb	0,012	0,0089	0,0267
B	0,0025	0,0005	-
Ti	0,0041	0,0038	0,003
Sn	0,0025	0,0106	0,0045
W	0,0127	0,0219	0,009
N	0,1506	0,0473	0,0184

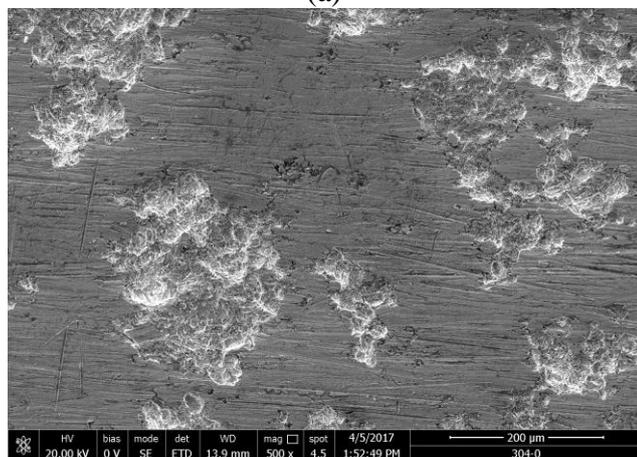
Os resultados apresentados estão de acordo com a especificação desses materiais.

5.2.1.2 Caracterização Metalográfica

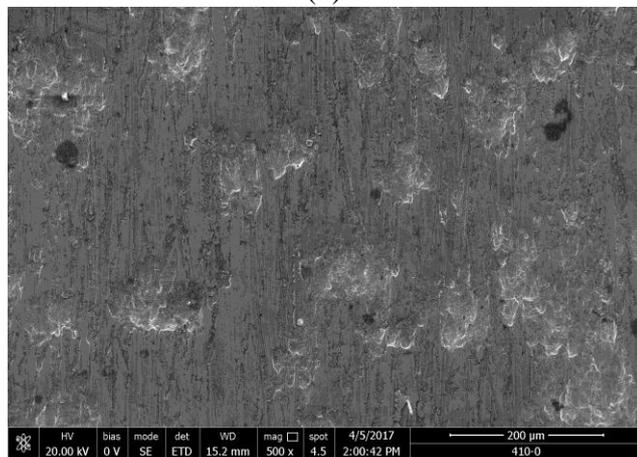
A caracterização metalográfica foi realizada através de análises da superfície e da estrutura dos materiais como recebidos. As superfícies dos materiais foram analisadas utilizando microscopia eletrônica de varredura conforme imagens apresentadas na Figura 5.8.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.8 - Análise se superfície por MEV: (a) AISI 201, (b) AISI 304, (c) AISI 410.

As superfícies foram bem irregulares, pois todos esses aços não passaram por nenhum processo de laminação a frio. A rugosidade desses materiais também foram medidas, tendo um parâmetro Ra de 2,3 μm para o aço AISI 201, 3,8 μm para o aço AISI 304 e 1,8 μm para o aço AISI 410,

Para caracterizar a estrutura dos materiais, as amostras estudadas foram caracterizadas por microscopia óptica (MO), ao longo de sua espessura. A Figura 5.9 mostra as microestruturas obtidas dos aços AISI 201 e AISI 304 após o ataque de água régia e Behara. Foram utilizados esses dois ataques para revelar de forma mais clara os grãos do material e a formação de martensita por deformação, respectivamente.

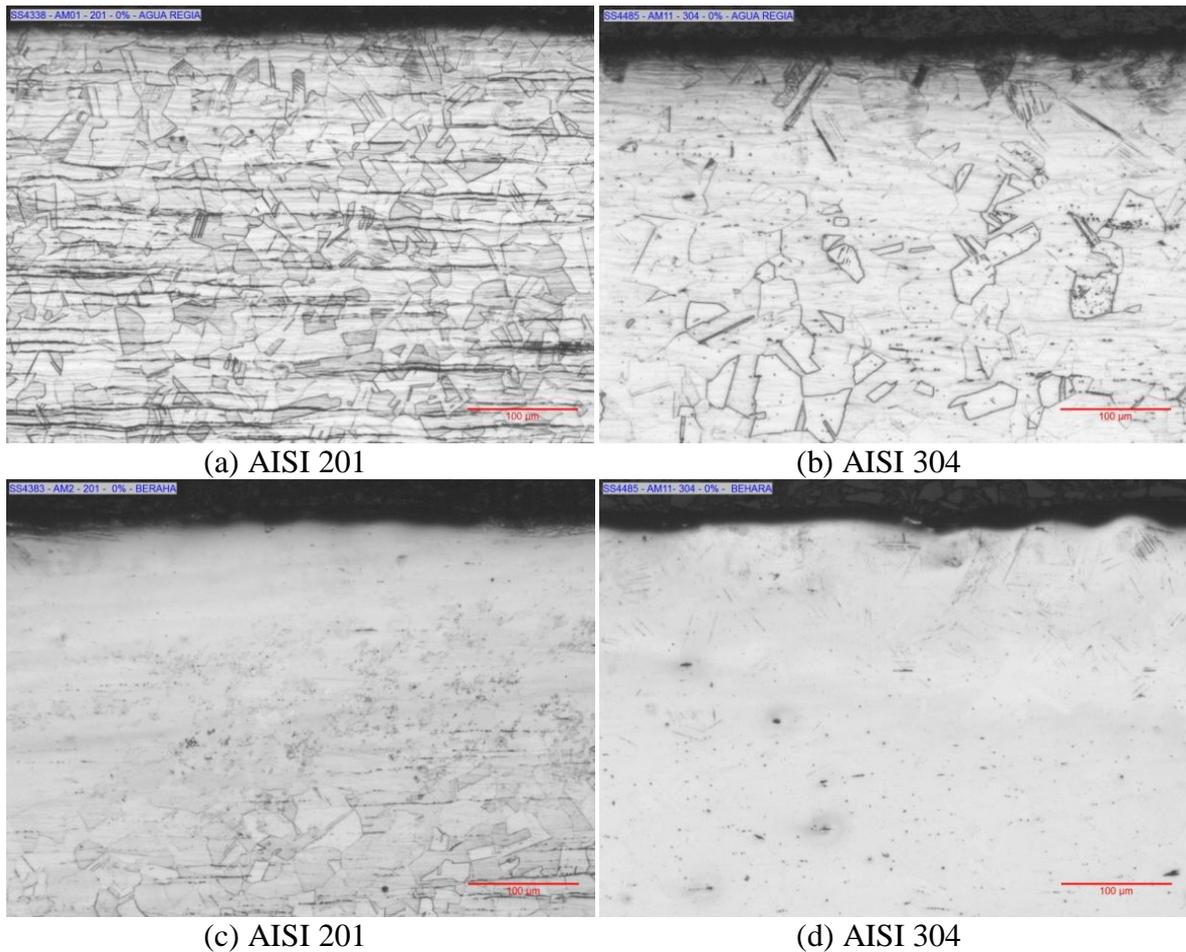


Figura 5.9 - Microestruturas dos aços na condição inicial. (a) AISI 201- ataque de água régia (b) AISI 304 - ataque de água régia (c) AISI 201- ataque de Behara (d) AISI 304 - ataque de Behara.

Os aços AISI 201 e 304 apresentaram grãos equiaxiais monofásicos de austenita, sem sinal de deformação plástica. Conforme esperado, em nenhum dos materiais foi observado a presença de martensita, pois eles ainda não haviam passado por nenhum processo de deformação.

O tamanho médio dos grãos desses materiais também foi medido e são apresentados na Tabela 5.2, sendo observado que os aços mencionados tiveram granulações relativamente próximas.

Tabela 5.2 – Tamanho de grão dos aços AISI 201 e AISI 304

Material	AISI 201	AISI 304
ASTM	7	8

Para o AISI 410, por se tratar de um aço ferrítico, foi usado Vilella no ataque, e a microestrutura revelada é apresentada na Figura 5.10. No material inicial nota-se uma matriz ferrítica sem indício de deformação plástica.

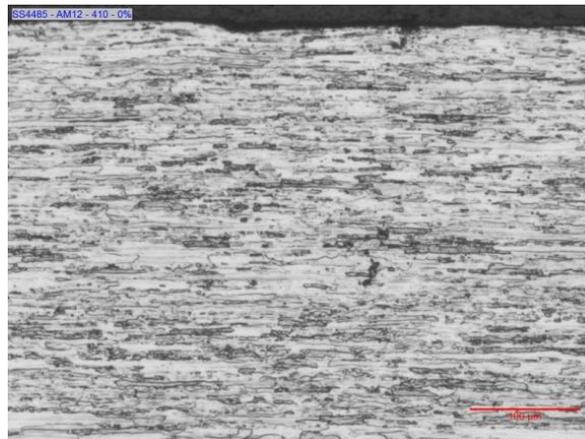


Figura 5.10 - Microestrutura do aço AISI 410 na condição inicial. Ataque: Vilella.

5.2.1.3 Caracterização mecânica

Para caracterização das propriedades mecânicas dos materiais estudados nesse trabalho, foram realizados ensaios de tração, conforme descrito na metodologia. As propriedades foram obtidas através da curva tensão-deformação de engenharia de cada material, apresentadas na Figura 5.11.

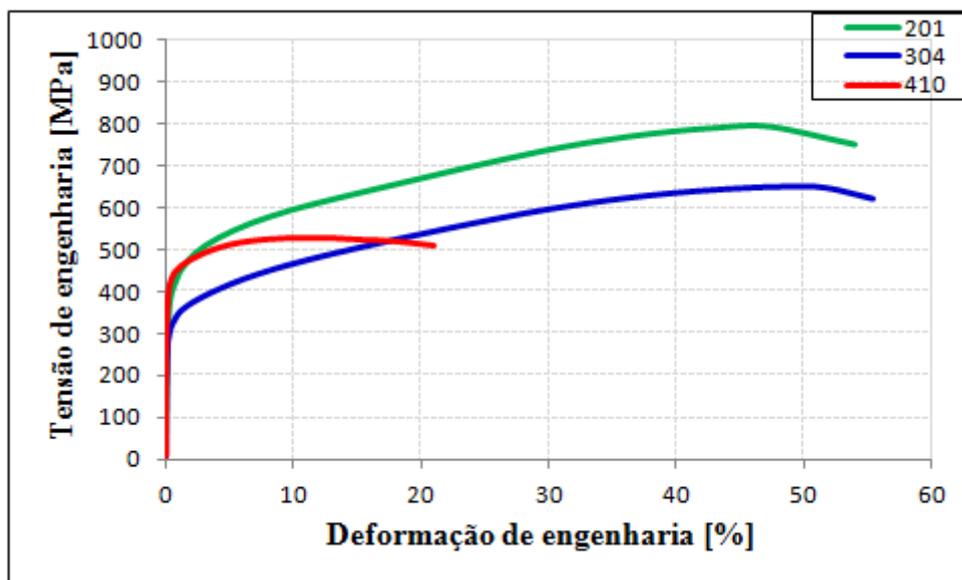


Figura 5.11 – Curva de tensão-deformação de engenharia do aços AISI 201, 304 e 410.

Os principais parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios de tração e a dureza inicial dos materiais são apresentados de forma compilada na Tabela 5.3. De forma geral, a ductilidade e a resistência mecânica do aço AISI 410 são bem menores que as dos aços AISI 201 e 304. Os aços autênticos tiveram uma ductilidade relativamente próxima, entretanto o aço AISI 201 apresentou maior resistência mecânica. A maior dureza inicial foi do aço AISI 201 seguido do aço AISI 410 e por último do aço AISI 304. Já em relação ao limite de escoamento o aço AISI 410 apresentou valor mais alto.

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas do AISI 201, 304 e 410.

Material	Le 0,2% [Mpa]	Lr [Mpa]	Dureza [HV _{0,1}]	Alongamento total [%]
AISI 201	405 ± 5	784 ± 20	219 ± 3	55 ± 0,7
AISI 304	310 ± 15	650 ± 3	175 ± 1	58 ± 0,7
AISI 410	427 ± 3	530 ± 2	190 ± 3	24 ± 2,0

Na curva de tensão-deformação de engenharia, a diminuição na tensão necessária para continuar a deformação após o ponto máximo dá uma falsa impressão que o material está apresentando menor resistência mecânica. Na realidade, como a área da seção reta está diminuindo na região de estrição, a capacidade do corpo de prova de suportar carga reduz. A tensão apresentada é dada com base na área da seção reta original antes de qualquer

deformação, e não leva em consideração essa diminuição de área. A tensão verdadeira é definida como sendo a carga dividida pela área da seção reta instantânea sobre a qual a deformação está ocorrendo.

As tensões e deformações verdadeiras e de engenharia estão relacionadas de acordo com as equações 5.1 e 5.2 que são válidas somente até o surgimento da estricção. Depois deste ponto, a tensão e a deformação verdadeiras devem ser determinadas a partir de medições da carga, da área da seção reta e do comprimento útil reais, o que irá resultar na curva corrigida de tensão e deformação verdadeiras.

$$\sigma_V = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_V = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.2)$$

Os dados do ensaio de tração foram utilizados para calcular a curva de tensão-deformação verdadeiras. A Figura 5.12 apresenta essas curvas, não corrigidas.

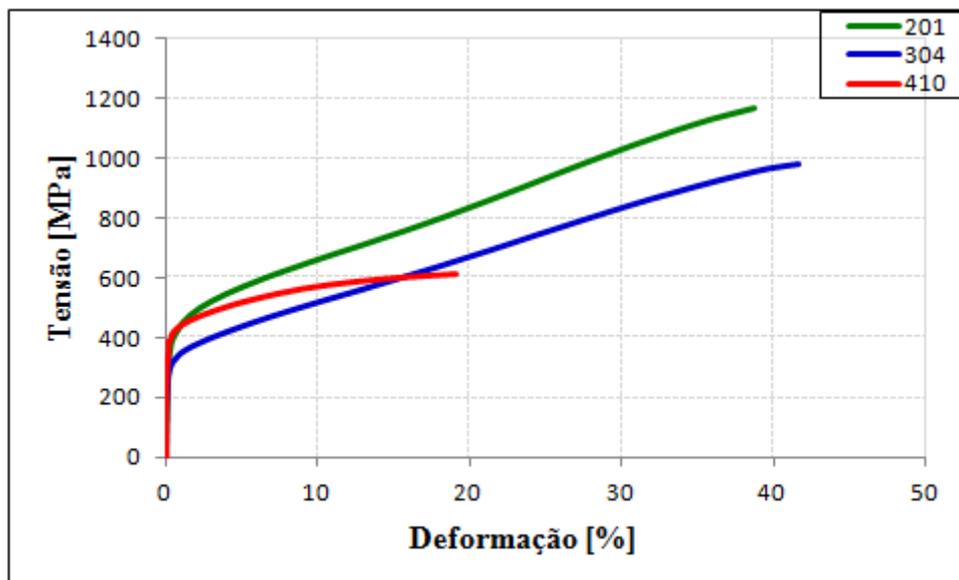


Figura 5.12 – Curva de tensão verdadeira - deformação verdadeira dos aços AISI 201,304 e 410.

Para alguns metais e ligas, a região da curva tensão-deformação verdadeiras desde o início da deformação plástica até o ponto onde começa a estricção pode ser aproximada pela relação apresentada na equação 5.3, onde “K” e “n” são constantes, cujo valores irão variar de um

material para outro. O parâmetro “n” é denominado coeficiente de encruamento e tem um valor menor que uma unidade.

$$\sigma_V = K \varepsilon_V^n \quad (5.3)$$

Através dos dados apresentados foi possível calcular o coeficiente de encruamento “n” para os aços austeníticos estudados, sendo de 0,51 para o aço AISI 201, 0,43 para o aço AISI 304 e 0,11 para o aço AISI 410. Quanto maior o valor de “n”, maior será a inclinação da curva tensão-deformação verdadeira e mais uniforme a distribuição das deformações na presença de um gradiente de tensões. O endurecimento ocorre, basicamente, porque os metais se deformam plasticamente através da geração e movimentação de discordâncias, que interagem diretamente entre si, com outros defeitos cristalinos, ou indiretamente com o campo de tensões internas. Como resultado, a mobilidade das discordâncias irá diminuir, e conseqüentemente haverá uma necessidade de maior tensão para provocar a deformação plástica (Dieter, 1981). Assim, esse valor indica a maior tendência do aço AISI 201 de sofrer encruamento. Além disso, para os aços inoxidáveis AISI 201 e AISI 304 ocorre a transformação da austenita em martensita induzida por deformação. Pode-se obter também a taxa de encruamento desses materiais através da razão entre a variação de tensão verdadeira pela variação de deformação verdadeira, que foi de $7,15 \pm 0,25$ MPa para o aço 201 e de $5,94 \pm 0,31$ MPa para o aço 304.

A tenacidade indica a capacidade de um material absorver energia até o momento da fratura e é representada pela área total sobre a curva $\sigma \times \varepsilon$. Assim, um material tenaz apresenta melhor compromisso entre resistência mecânica e ductilidade. Através das curvas apresentadas, percebe-se que o aço AISI 201 é mais tenaz em relação aos outros dois aços estudados.

5.2.2 Formação de martensita induzida por deformação

Para comparar a estabilidade da austenita nos aços AISI 201 e 304, foram calculadas as energias de falha de empilhamento e as temperaturas M_{d30} desses materiais, através das fórmulas propostas por Schramm e Reed (1975) e Nohara (1977), apresentadas na revisão bibliográfica nos itens 3.3 e 3.4, respectivamente. Os resultados dos cálculos são descritos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores de M_{d30} pela equação de Nohara (1977) e EFE pela equação de Schramm e Reed (1975) de dos aços AISI 201 e AISI 304.

Material	EFE	$M_{d30/50}$
	[mJ/m²]	[°C]
AISI 201	6,5	55
AISI 304	15,2	12,9

A M_d é definida como a temperatura máxima para formação da martensita α' por deformação, ou seja, acima desse valor a austenita se torna mais estável, o que inibe a formação da nova fase. Normalmente, esse parâmetro é avaliado através do M_{d30} que indica a temperatura na qual 50% da martensita α' é obtida para uma deformação verdadeira de 30% no ensaio de tração. Desta forma, o maior valor de M_{d30} apresentado pelo aço AISI 201 em relação ao AISI 304, indica a maior tendência desse material de formar martensita.

A maior estabilidade da austenita observada no aço AISI 304 está associada à diferença de composição química entre esses, que promove significativa alteração no parâmetro M_{d30} . A variação da temperatura M_{d30} para os aços pesquisados está associada principalmente com a diferença no teor de níquel que aumenta as falhas de empilhamento dos materiais, reduzindo a temperatura M_{d30} (Gonzales, 2003). Por consequência, o maior teor de níquel do AISI 304 resulta em maior estabilidade da austenita, retardando a formação de martensita na temperatura ambiente. Schramm e Reed (1975) afirmam que a presença dos elementos níquel e carbono tendem a aumentar a EFE.

A energia de falha de empilhamento calculada mostra que a EFE do aço AISI 201 é menor que a do aço AISI 304, o que também aponta que ele é mais suscetível a formação de martensita induzida por deformação (Padilha, 2000).

Esses resultados estão de acordo com outros valores da literatura (Morais, 2010; Tavares et al., 2009), conforme apresentado na revisão bibliográfica, os aços austeníticos da série 200 tem uma maior tendência de formar martensita por deformação e maior efeito TRIP em relação aos da série 300, devido a menor EFE e maior Md_{30} .

5.2.3 Análise comparativa do desgaste erosivo

Com o propósito de avaliar a influência da estrutura dos materiais no desgaste erosivo, foram realizados ensaios com os aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410. Para isso, foi determinada experimentalmente a perda de massa em relação ao tempo de erosão para um ângulo de 20° e 90°, os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14, respectivamente.

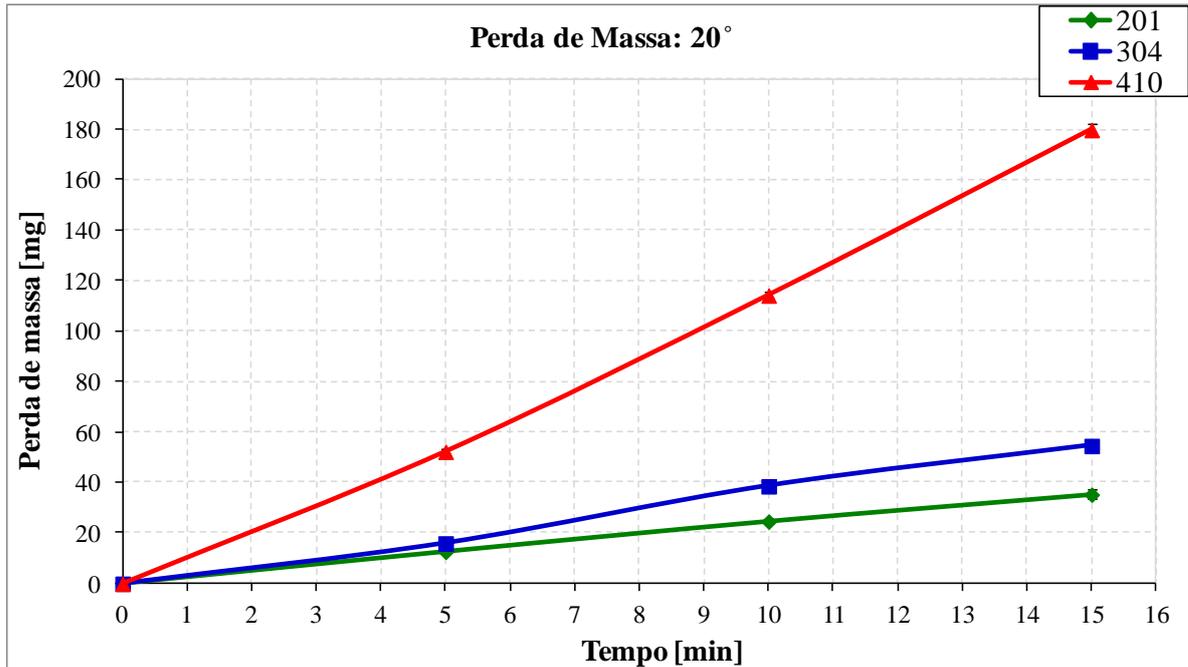


Figura 5.13 - Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 20° para o aço AISI 201, AISI 304 e AISI 410.

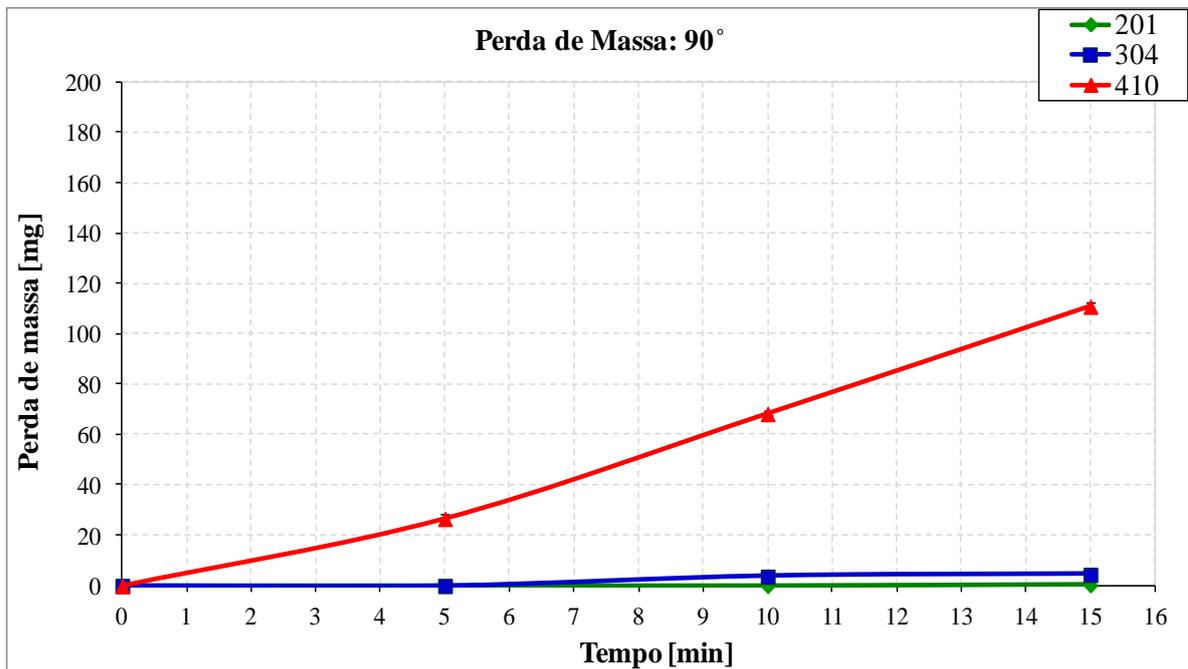


Figura 5.14 - Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 90° para o aço AISI 201, AISI 304 e AISI 410.

A taxa de desgaste erosivo em estado estacionário é caracterizada como uma relação linear entre a perda de material pela massa de partículas erosivas, de forma que, para um fluxo

constante ela terá o mesmo comportamento ao longo do tempo de erosão. Nos gráficos apresentados na parte inicial, tem-se um período de “*running*”, em que a evolução da perda de massa das superfícies em função do tempo apresenta um comportamento não linear, até que seja alcançado o equilíbrio e se estabeleça o regime permanente. Os períodos de “*running*” no desgaste são difíceis de reproduzir, de um ensaio a outro, sob as mesmas condições de operação. É por isto que a maioria dos estudos em tribologia coloca mais atenção aos regimes permanentes (Viáfara, 2010). Esse período não foi determinado de forma específica nesse trabalho, mas pode-se perceber que ocorreu entre os primeiros 5 minutos de análise.

Através das informações obtidas no ensaio de desgaste erosivo, foi calculada a taxa de erosão “E”, que representa a relação entre a massa de material removido pela massa de partículas erosivas que colidem com a superfície. Esses valores são apresentados na Tabela 5.5 e foram calculados a partir um fluxo mássico de granalha de 2,0 kg/min. Em um ângulo perpendicular, os desvios padrões das análises foram mais significativos, pois nesse caso a perda de massa foi muito pequena, o que dificulta a precisão dos dados. Para todos os materiais analisados a perda de massa em um ângulo de 20° foi maior que em 90°, indicando assim, que o mecanismo de deformação plástica pode ter sido operativo.

Tabela 5.5 – Coeficientes linear de erosão, E em g/g, dos aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410 para ângulos de incidência de 20° e 90°.

	E (x10⁻⁶)	E (x10⁻⁶)
	Ângulo de incidência: 20°	Ângulo de incidência: 90°
AISI 201	1,227 ± 0,026	0,011 ± 0,010
AISI 304	1,787 ± 0,098	0,110 ± 0,056
AISI 410	5,655 ± 0,224	3,264 ± 0,309

Conforme apresentado na revisão da literatura, o material deslocado pela indentação sofrida durante o desgaste erosivo pode se acomodar por deformação elástica, formar uma cratera por deformação plástica ou ser removido como debris de desgaste. A fração perdida é determinada pela constante “K”. Apesar de durante o impacto normalmente ocorrer a movimentação do material pela indentação, o desgaste erosivo é associado ao seu desprendimento. Em razão disso, a perda de massa (formação de debris), muita das vezes, só

acontecerá após vários ciclos de deformação plástica, e, após severo endurecimento (Hutchings, 1992).

Esse desprendimento é muito dependente do ângulo de incidência, sendo que, em um ângulo raso ocorre a ruptura das bordas das crateras formadas pelo deslocamento do material. À medida que ele aumenta, a deformação se torna mais profunda e com menor formação de bordas, o que faz com que sejam necessários mais impactos para remover cada fragmento de debris. Posto isso, em um ângulo de incidência normal só haverá desgaste quando se atingir um limite de fratura. Nessa condição, o material passará por mais ciclos de deformação plástica até ser removido, e a superfície é bem diferente da erodida em um ângulo raso.

Em ambos os ângulos testados, 20° e 90°, o desgaste sofrido pelo AISI 410 foi muito maior que o do AISI 201 e do AISI 304. Conforme apresentado no item 3.8.3, a taxa de desgaste erosivo por deformação plástica pode ser expressa pelas equações 3.11 e 3.15, em ângulos de incidência raso e normal, respectivamente. Ambas descrevem que o desgaste erosivo é inversamente proporcional à dureza, em um fator de 1,0 e 1,5, respectivamente. Contudo, é mais coerente correlacionar a taxa de desgaste com a dureza da superfície deformada ao invés de considerar a dureza inicial do material, tendo em vista que durante o impacto a superfície sofre encruamento e é endurecida por deformação plástica. Além disso, uma maior ductilidade do metal também será positiva para esse processo.

O aço AISI 410 é um aço ferrítico que apresenta estrutura CCC. Esses materiais sob trabalho a frio endurecem apenas de forma moderada. Já os aços AISI 201 e o AISI 304 são austeníticos com estrutura FCC e possuem como uma de suas principais características o efeito TRIP. Assim, apesar do AISI 410 ter uma dureza inicial intermediária em relação aos outros dois, ele irá sofrer um menor encruamento durante o desgaste erosivo o que contribui para a menor resistência à erosão observada nesse material.

Outro parâmetro importante que deve ser citado é a menor ductilidade do AISI410 o que leva a uma maior taxa de desgaste. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, quanto menos dúctil o material, menor a sua resistência ao desgaste erosivo, pois ele suporta uma menor deformação plástica. Desse modo, para o mesmo tempo de erosão o aço AISI 410 irá formar mais debris que os outros dois e o desgaste será mais intenso, pois ele apresenta menor

capacidade de absorver os impactos. No entanto, todos materiais sofreram mecanismo de deformação plástica, confirmado por uma taxa de maior erosão no ângulo de 90°.

Os metais com estrutura cristalina CCC apresentam uma transição de frágil para dúctil em função da temperatura, já os materiais CFC não apresentam essa mudança. Apesar da quantidade de sistemas de escorregamento para os metais CCC e CFC serem iguais, há uma diferença na distância entre os planos de escorregamento, que é maior para o sistema CCC o que dificulta o movimento das discordâncias. Essas análises são normalmente obtidas através de ensaios de resistência ao impacto (Charpy ou Izod). Apesar desses ensaios estarem relacionados com a variação de temperatura, eles também demonstram a capacidade do material de absorver e dissipar energia, indicando assim uma maior tenacidade do material austenítico em uma dada temperatura. Essa propriedade também pode ser visualizada nos ensaios mecânicos, área da curva de tensão verdadeira versus deformação verdadeira, que demonstra de forma clara que os aços AISI 201 e o AISI 304 apresentaram maior resistência mecânica e maior ductilidade, o que indica que eles são mais tenazes, ou seja, uma maior quantidade de energia é necessária para levar o material a romper. Além disso, essa propriedade contribui para que o material não sofra uma fratura frágil.

Todos os parâmetros citados atuam em conjunto durante a erosão, de forma que o sistema tribológico deve ser considerado como um todo, ou seja, não se pode associar a resistência ou a maior fragilidade a uma única causa. Assim, esses fatores apresentados ajudam a compreender o maior desgaste sofrido pelo AISI 410 em relação aos outros dois aços estudados.

O AISI 201 e o AISI 304 apesar de terem uma estrutura semelhante tiveram respostas diferentes em relação ao desgaste erosivo, o que também foi um ponto muito relevante na pesquisa. A comparação da perda de massa desses materiais é apresentada de forma mais específica nas Figuras 5.15 e 5.16, para um ângulo de incidência de 20° e 90°, respectivamente. Em ambos os casos a resistência ao desgaste erosivo foi maior para o aço AISI 201 do que para o aço AISI 304.

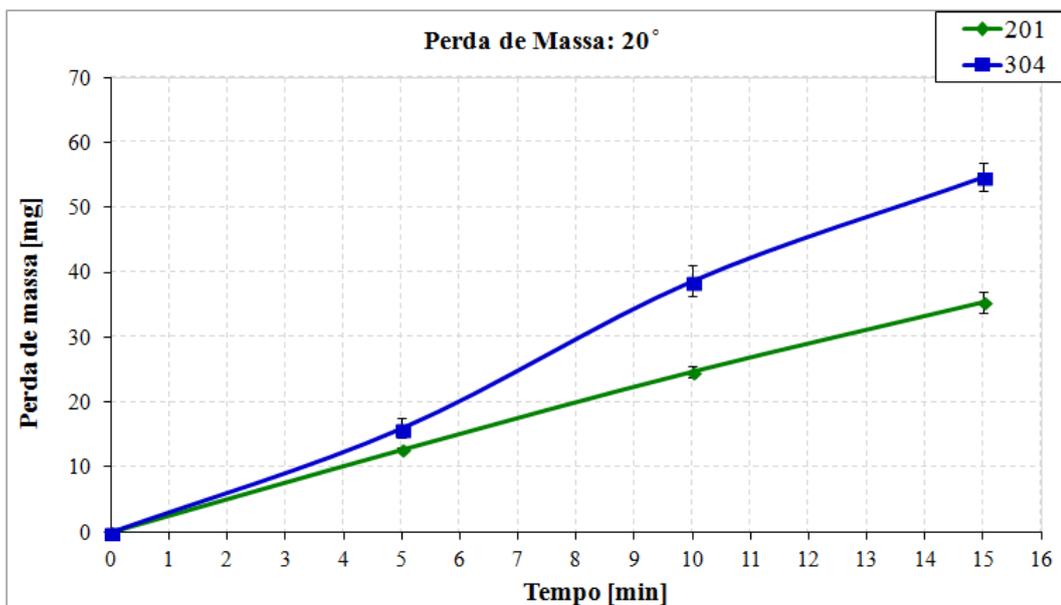


Figura 5.15 - Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 20° para o aço AISI 201 e AISI 304.

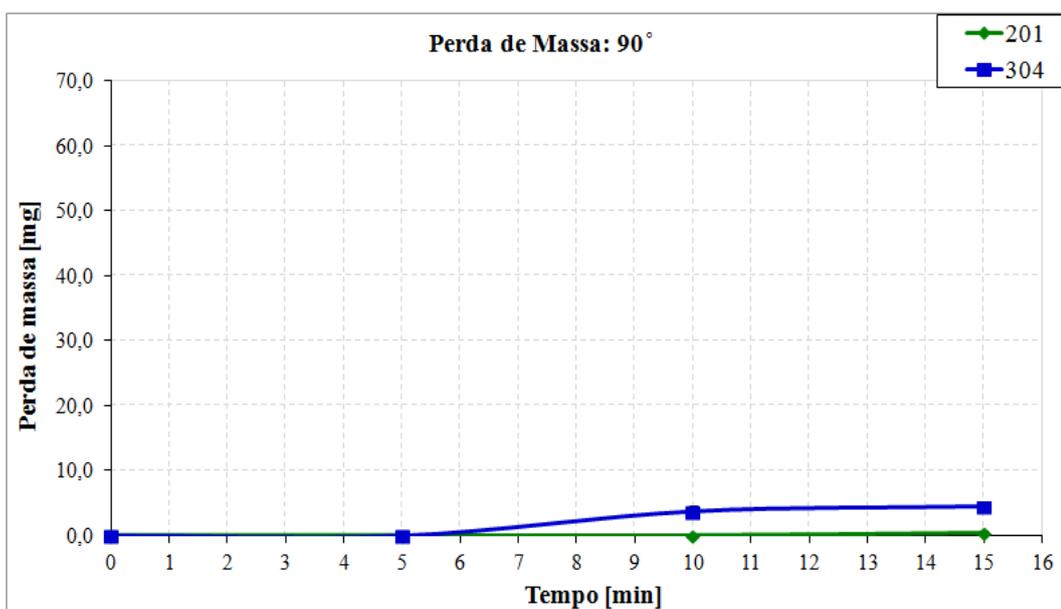


Figura 5.16 - Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 90° para o aço AISI 201 e AISI 304.

O AISI 201 apresenta uma menor EFE quando comparado ao AISI 304, permitindo que mais energia seja armazenada durante sua deformação, o que torna mais difícil o escorregamento com desvio e aumenta a sua taxa de encruamento. Essa maior energia armazenada no endurecimento por deformação plástica faz com que esse material consiga absorver mais o

impacto gerado durante a erosão. Logo, para haver formação de debris no AISI 201 será necessário um maior número de colisões, pois ele suporta mais ciclos de deformação.

Quando um metal de baixa EFE é deformado, suas discordâncias tem baixa mobilidade devido ao fato das discordâncias parciais estarem muito afastadas entre si, levando a uma distribuição homogênea das discordâncias na microestrutura. Assim, os aços austeníticos de menor EFE também apresentam maior uniformidade no arranjo das discordâncias e maior propensão à formação de martensita induzida por deformação. Outro parâmetro importante para essa análise é o M_{d30} , que indica a temperatura abaixo da qual a tensão por deformação induz à transformação martensítica. O aço AISI 201 tem um M_{d30} maior que o do AISI 304, o que evidencia uma menor estabilidade da austenita e maior tendência de transformação de fase. A formação da martensita ao longo do processo de desgaste erosivo foi positiva, pois aumentou a dureza superficial do material atuando como uma barreira à penetração, o que irá contribuir para sua resistência à erosão. É importante resaltar que as sub-camadas continuaram a ser de matriz austenítica, retendo a ductilidade que também é indispensável nesse processo. Wood et al. (2013) em ensaios de desgaste erosivo no aço AISI 316 também concluíram que a transformação da austenita em martensita devido aos impactos das partículas erosivas contribuiu para maior resistência do material.

Os resultados dos ensaios de tração demonstraram que a ductilidade desses dois materiais é bem parecida, porém, a tenacidade do AISI 201 é maior que a do AISI 304. Assim, é necessária uma maior energia mecânica para levar esse material à ruptura o que também contribui para maior resistência ao desgaste erosivo apresentado pelo AISI 201, pois ele irá suportar mais impacto quando comparado ao AISI 304 e favorece a não formação de fratura frágil. Essa diferença ocorreu nos ângulos de 20° e 90°, mas teve um percentual de aumento maior no ângulo perpendicular a superfície. Nesse caso, a formação de debris só inicia quando o material atinge um valor crítico de deformação plástica. Já no ângulo raso, o material sofre deformação plástica e desgasta, tendo as bordas das crateras varridas e removidas como fragmentos. Em relação às propriedades mecânicas, vale ressaltar que o AISI 201 tem maior coeficiente de encruamento, pois tem menor EFE, em relação ao AISI 304 o que também contribui para diminuir a fração de material desprendido no desgaste, menor valor de "K", e como já mencionado, o maior endurecimento da superfície ao longo do processo será positivo para resistência do material.

5.2.4 Caracterização das amostras erodidas

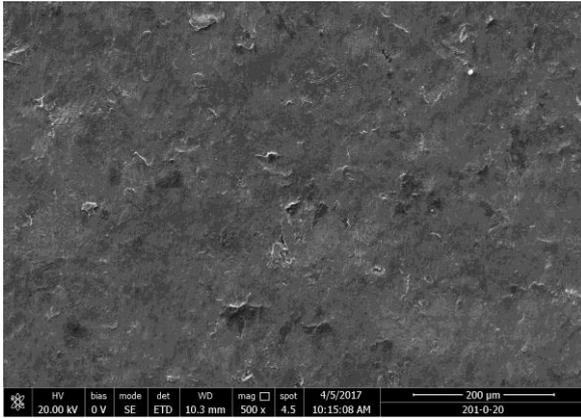
Após o processo de desgaste erosivo as amostras foram caracterizadas através de microscopia eletrônica de varredura, microscopia ótica, microdureza e perfilometria.

5.2.4.1 Análise de superfície (MEV)

A Figura 5.17 apresenta a micrografia do centro da superfície dos materiais após o desgaste erosivo. Em todos os três aços estudados, há diferença da superfície erodida em um ângulo de 20° e 90°, sendo que nas imagens do AISI 410 pode-se perceber que essa variação ocorreu de forma mais evidente, uma vez que ele apresentou maior taxa de desgaste.

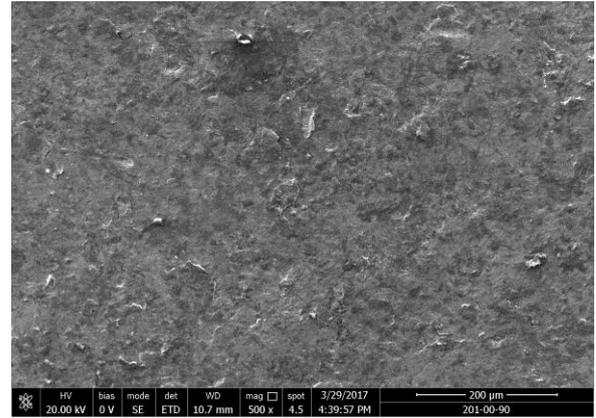
No ângulo de 20°, o material é varrido em fatias pela extremidade da partícula erosiva, e a 90°, a formação de debris ocorre em um limite de fratura mais alto o que faz com que o material necessite de uma deformação crítica maior para alcançar esta tensão de fratura, levando a uma menor perda de massa e alta deformação plástica local.

Ângulo de incidência: 20°

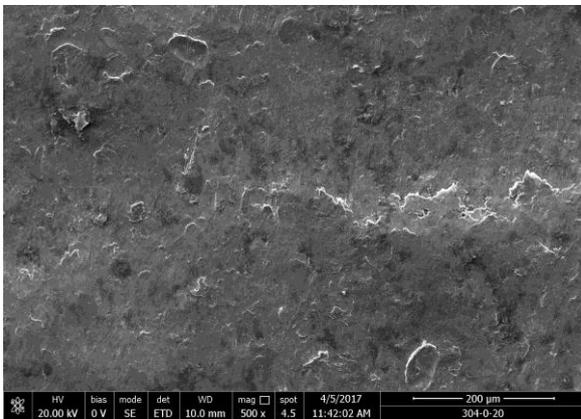


(a) - AISI 201

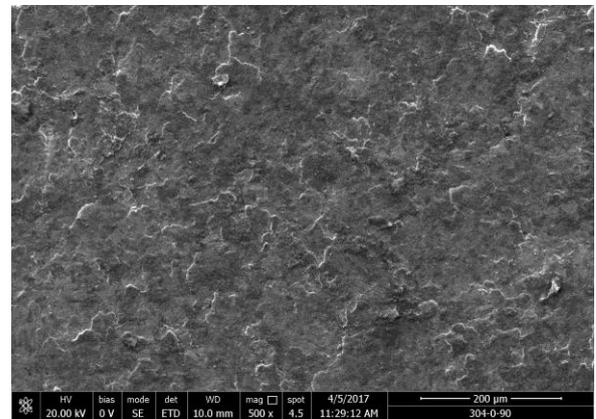
Ângulo de incidência: 90°



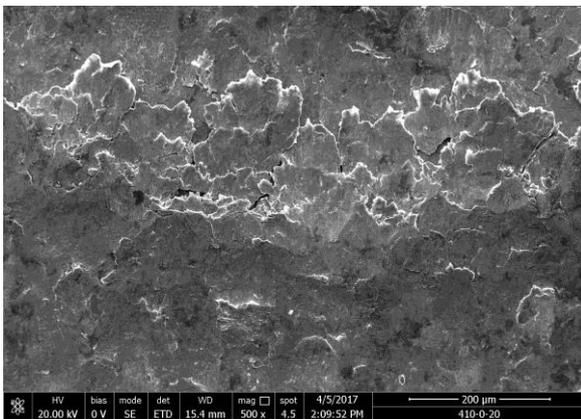
(b) - AISI 201



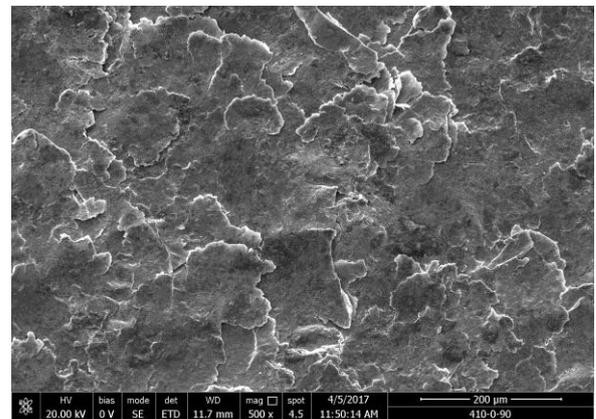
(c) - AISI 304



(d) - AISI 304



(e) - AISI 410



(f) - AISI 410

Figura 5.17 – Superfícies dos materiais erodidos: (a) AISI 201/ 20°, (b) AISI 201/ 90°, (c) AISI 304/ 20°, (d) AISI 304/ 90°, (e) AISI 410/ 20° e (f) AISI 410/ 90°. Escala de 200 µm.

5.2.4.2 Análise de microestrutura (MO)

Para microscopia ótica, foi realizado um ataque químico prévio nas amostras analisadas. No aço AISI 410 foi utilizado o Vilella para investigar a microestrutura do material e nos austeníticos Água Régia e Behara, com o objetivo de visualizar a microestrutura e a formação de martensita por deformação, respectivamente. Todas as análises foram realizadas ao longo da espessura do material, a partir de um corte perpendicular à superfície erodida.

A Figura 5.18 apresenta a seção transversal do aço AISI 410 após ter sofrido desgaste erosivo. Posteriormente ao ataque metalográfico, foi possível constatar que para um ângulo de incidência de 90°, a deformação plástica é mais profunda e mais intensa do que a 20°. No ângulo normal, a estrutura demonstra que o material está sendo compactado. Em um ângulo rasante, constata-se que ele é varrido (cortado) ao longo da superfície erodida. Além disso, na fotografia (a) verifica-se trincas que provavelmente levou a maior perda de material nessa condição.

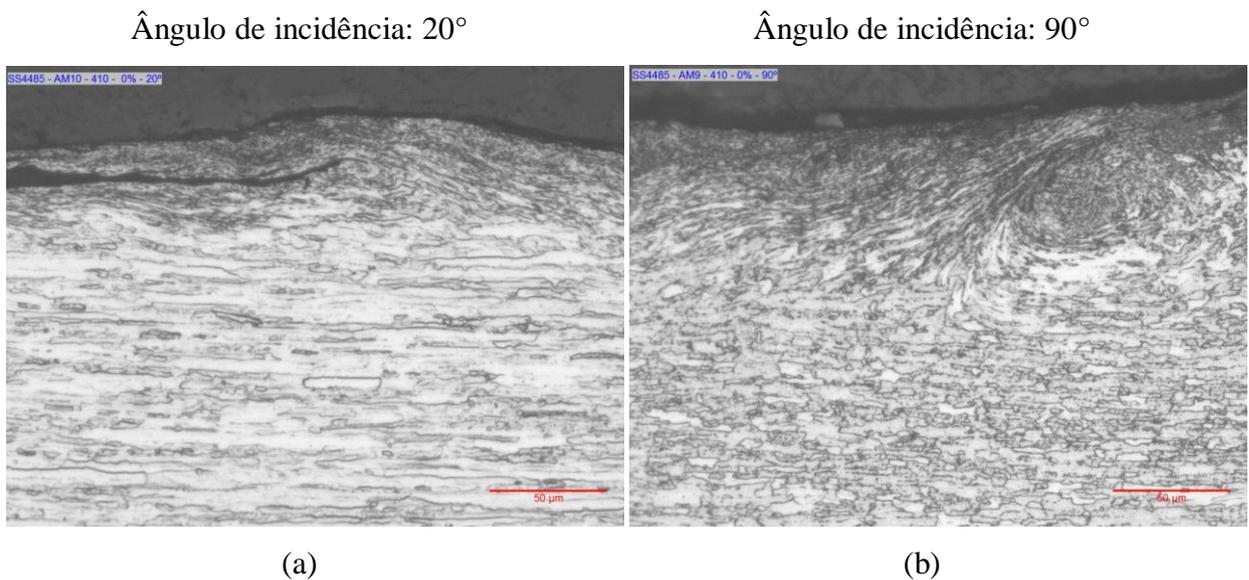


Figura 5.18 – Micrografia ao longo da espessura do aço AISI 410 após sofrer desgaste erosivo: (a) ângulo de incidência de 20° e (b) ângulo de incidência de 90°. As imagens foram feitas na parte central da cratera formada pelo processo de erosão. Ataque: Vilela. Escala de 50 µm.

Por meio dessa observação em microscopia ótica foi possível visualizar e comprovar claramente o mecanismo de desgaste erosivo por deformação plástica proposto, tanto para um

ângulo rasante quanto para o ângulo normal. Tanto os gráficos de desgaste erosivo quanto as imagens (a) e (b) acima fundamentam esse comportamento.

A análise ótica dos aços austeníticos pesquisados nesse trabalho foi realizada com Beahara e Água Régia, conforme Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente. As avaliações foram realizadas para um ângulo de incidência de 20° e 90° a partir da superfície erodida.

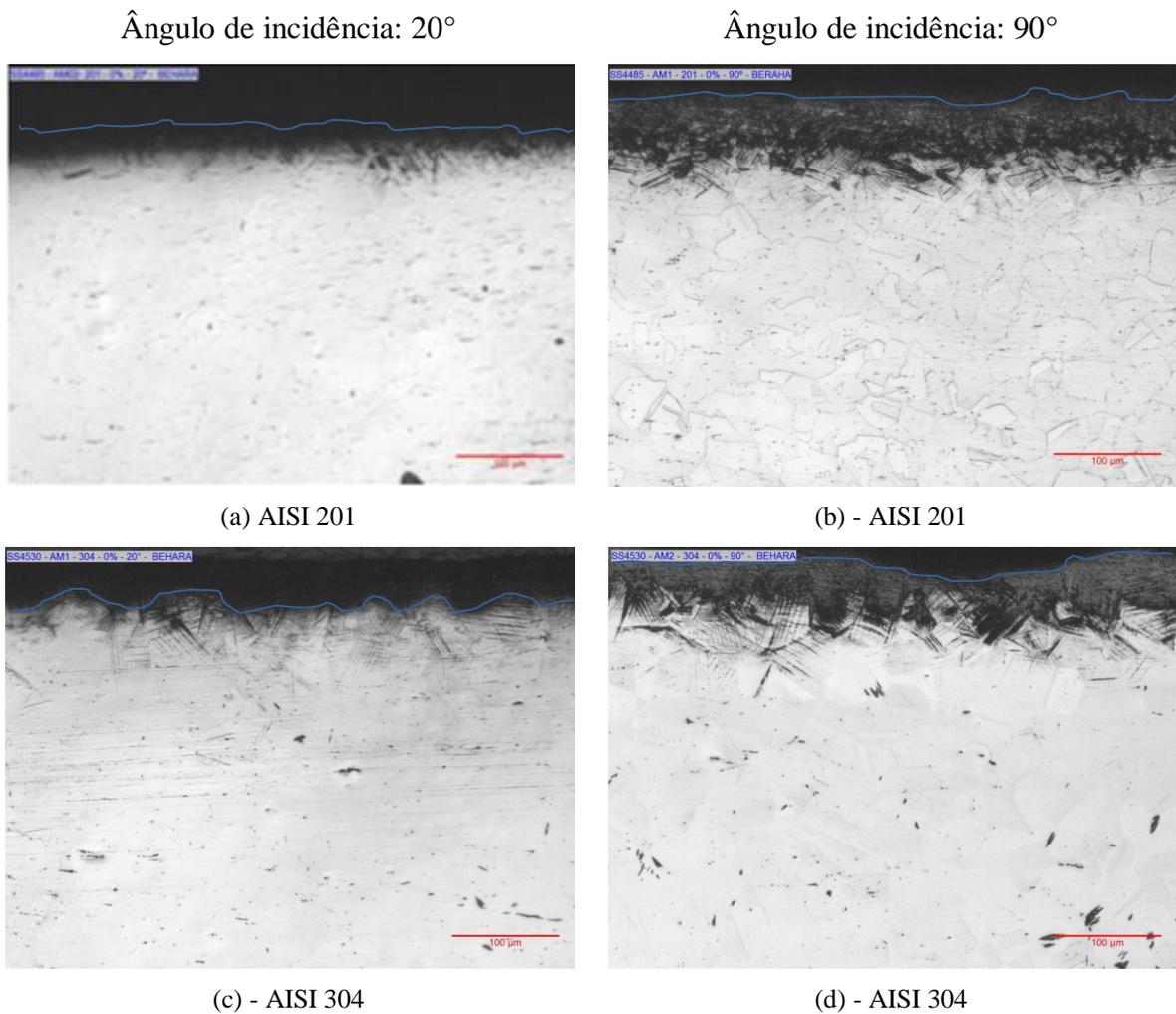
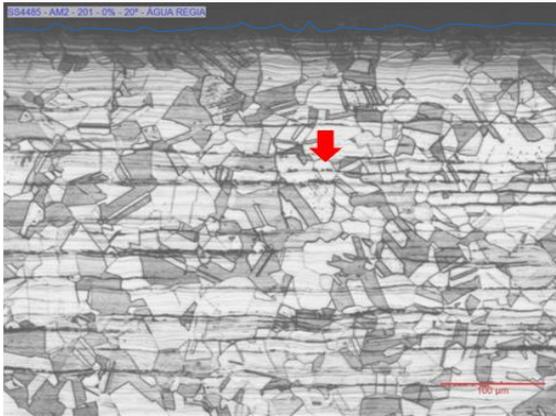


Figura 5.19 - Micrografia ao longo da espessura dos aços AISI 201 e AISI 304 após sofrer desgaste erosivo. (a) AISI 201/20°, (b) AISI 201/90°, (c) AISI 304/20° e (d) AISI 304/90°. As imagens foram feitas na parte central da cratera formada pelo processo de erosão. Ataque: Beahara. Escala de 100 μm. A linha azul indica a superfície da amostra.

Ângulo de incidência: 20°

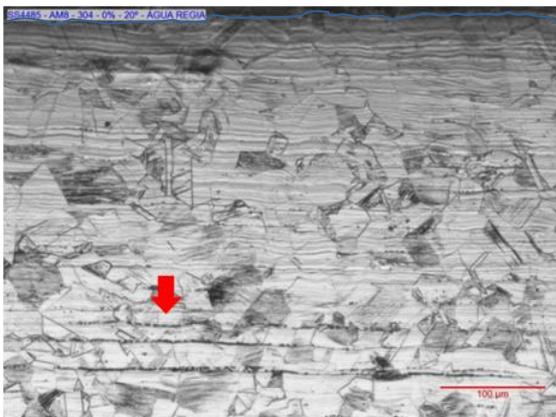


(a) AISI 201

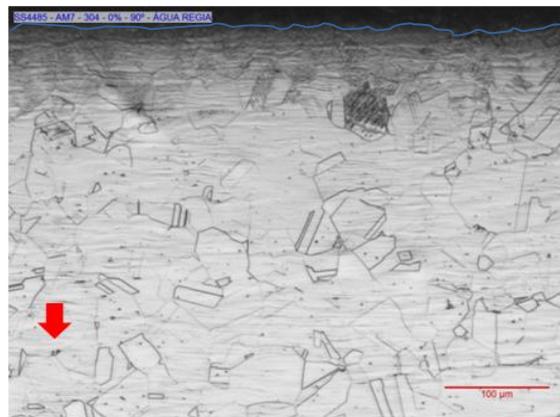
Ângulo de incidência: 90°



(b) - AISI 201



(c) - AISI 304



(d) - AISI 304

Figura 5.20 - Micrografia ao longo da espessura dos aços AISI 201 e AISI 304 após sofrer desgaste erosivo. (a) AISI 201/20°, (b) AISI 201/90°, (c) AISI 304/20° e (d) AISI 304/90°. As imagens foram feitas na parte central da cratera formada pelo processo de erosão. Ataque: Água régia. Escala de 100 µm. A linha azul indica a superfície da amostra.

Após o ataque metalográfico com Beahara é possível visualizar a austenita como a fase clara e a martensita formada por deformação como a fase escura. Na Figura 5.20, em todas as amostras analisadas, ocorreu a formação de martensita na superfície erodida. Tanto para o aço AISI 201 quanto para AISI 304 a formação de martensita foi mais expressiva para um ângulo de 90°. Em um ângulo perpendicular, o material passa por mais ciclos de deformação plástica até a formação de debris que em um ângulo rasante, o que gera superfície mais encruada e leva a maior formação de martensita por deformação.

Comparando o aço AISI 201 com o AISI 304, é possível perceber que ele apresentou maior formação de martensita. As imagens de MO demonstram que nesse material essa nova fase se

desenvolveu de forma mais compacta, e essa diferença fica ainda mais clara em um ângulo de 90°. O aço AISI 201 possui uma menor EFE e maior M_{d30} , o que representa uma maior tendência de formação de martensita. Esse perfil contribuiu de forma positiva para a resistência ao desgaste à erosão, pois além de armazenar mais energia na transformação e consequentemente absorver mais energia de impacto, essa nova fase atuou como uma barreira à penetração das partículas erosivas.

O ataque de Água Régia foi realizado para analisar a estrutura dos materiais, e foi possível observar que a 90° a deformação foi mais profunda que a 20°. Em um ângulo rasante o desgaste ocorreu através de cortes da superfície, gerando bandas longitudinais de deformação. Nas imagens também é perceptível a ferrita delta, indicada pelas setas vermelhas, é importante destacar que essa fase já estava presente no material antes dos ensaios de desgaste.

5.2.4.3 Microdureza

Para avaliar o efeito do encruamento e da progressão da transformação de fase induzida pela deformação da austenita para martensita, medidas de microdureza também foram realizadas ao longo da espessura do material. Isto posto, nas amostras apresentadas nas imagens MO, essa propriedade foi determinada a partir da superfície erodida. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 5.21.

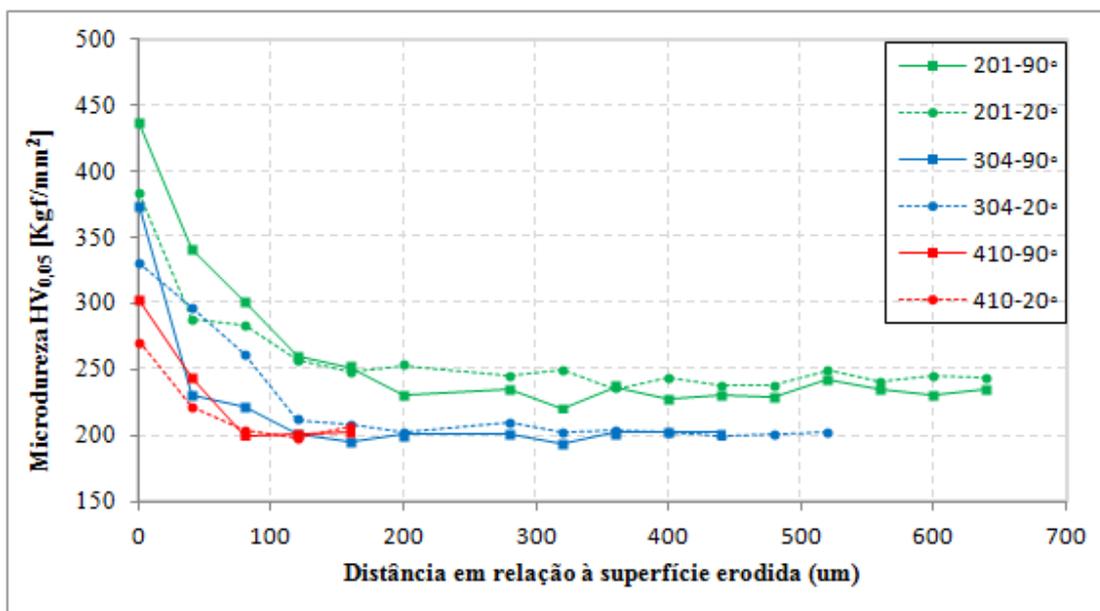


Figura 5.21 – Microdureza Vickers ao longo da espessura dos materiais AISI 201, AISI 304 e AISI 410 após ensaio de desgaste erosivo.

Para o aço AISI 410 ocorreu apenas um pequeno endurecimento superficial do material, devido à deformação. Esse comportamento contribuiu para menor resistência desse material ao desgaste erosivo.

Os aços austeníticos estudados apresentam efeito TRIP, por isso tiveram um maior encruamento da superfície pelas tensões de impacto das partículas erosivas, ou seja, esses metais foram endurecidos através da transformação por deformação da austenita em martensita o que não ocorreu no aço ferrítico AISI 410, tornando-se assim mais resistentes, o que faz com que uma tensão ainda maior seja necessária para que se gere uma deformação adicional e contribui para maior dureza apresentada. Em ambos os casos, o endurecimento foi maior a 90° do que a 20°, pois em um ângulo de incidência perpendicular à superfície o material passa por mais ciclos de deformação plástica. Outro ponto relevante a ser analisado é que o endurecimento do aço AISI 201 foi maior que o do AISI 304, o que reafirma a maior formação de martensita e maior encruamento da superfície desse material durante o desgaste erosivo.

A Figura 5.22 apresenta a correlação entre a taxa de desgaste erosivo e a razão entre a dureza da partícula erosiva (H_e) pela dureza da superfície deformada ($H_{s_{deformada}}$) para ângulos de incidência de 20° e 90°. Pode-se perceber de forma clara que quando a superfície deformada

apresenta uma dureza maior tem-se uma maior resistência ao desgaste erosivo. Assim, materiais com alta capacidade de encruamento tende a ter uma taxa de desgaste menor. Como comentado previamente, para um ângulo de incidência de 90° o desgaste é menor pois se tem um maior encruamento da superfície. Através da figura 5.22 também nota-se que essa diferença fica mais notória para as superfícies mais encruadas, quando a superfície apresenta uma menor dureza após ser deformada, a taxa de erosão em função de $H_{s_{deformada}}$ parece seguir a mesma tendência.

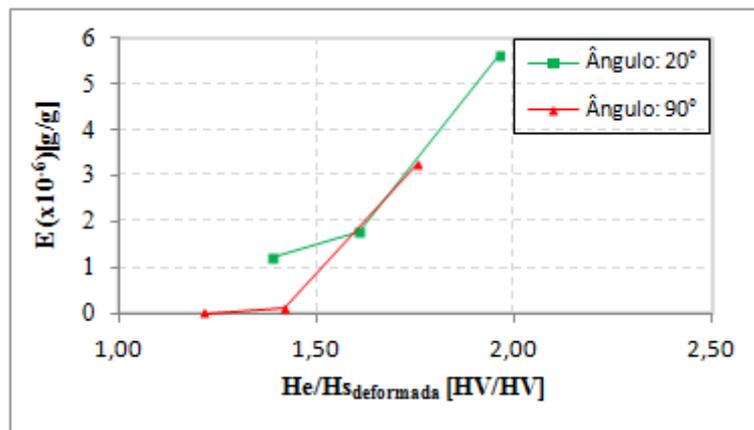
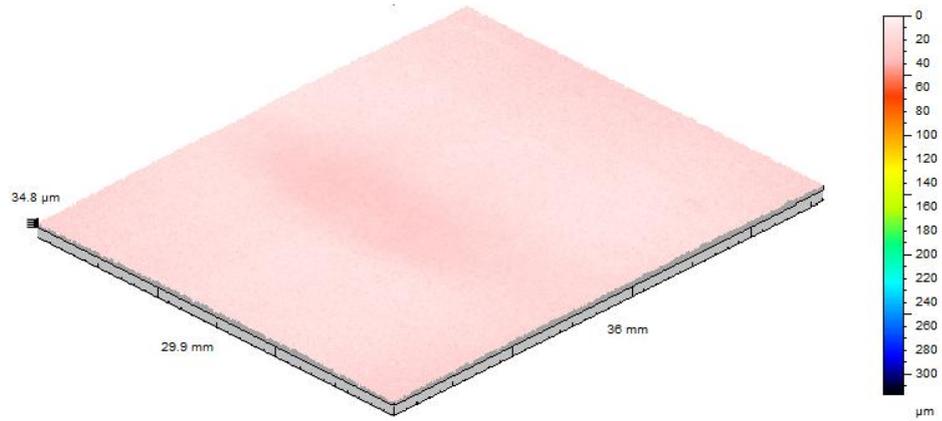


Figura 5.22 – Correlação entre a taxa de desgaste erosivo “E” e a razão entre a dureza da partícula erosiva (H_e) pela dureza da superfície deformada ($H_{s_{deformada}}$) para ângulos de incidência de 20° e 90°.

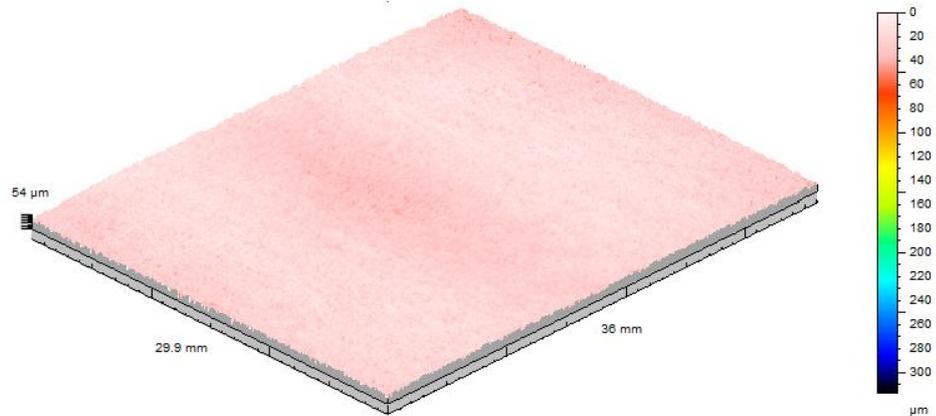
5.2.4.4 Perfilometria

Após os ensaios de erosão, os materiais também foram examinados por perfilometria para avaliação dos perfis de desgaste das superfícies erodidas. Os resultados são apresentados, em uma mesma escala, nas Figuras 5.23 e 5.24 para um ângulo de 20° e 90°, respectivamente.

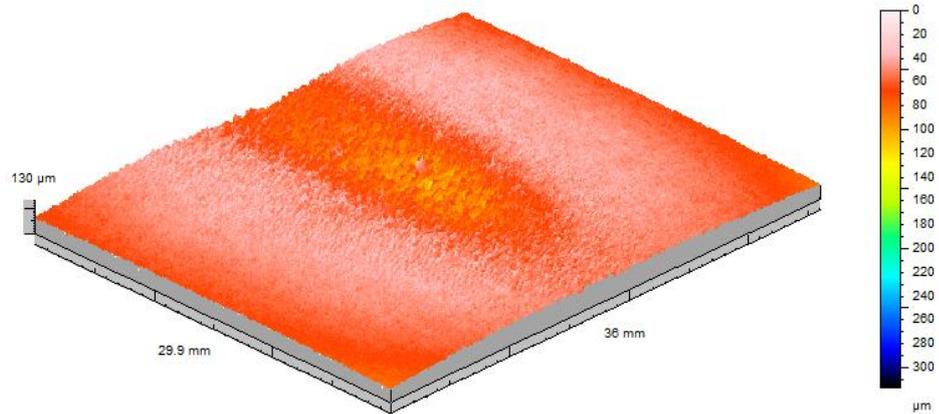
Ângulo de incidência: 20°



(a) - AISI 201



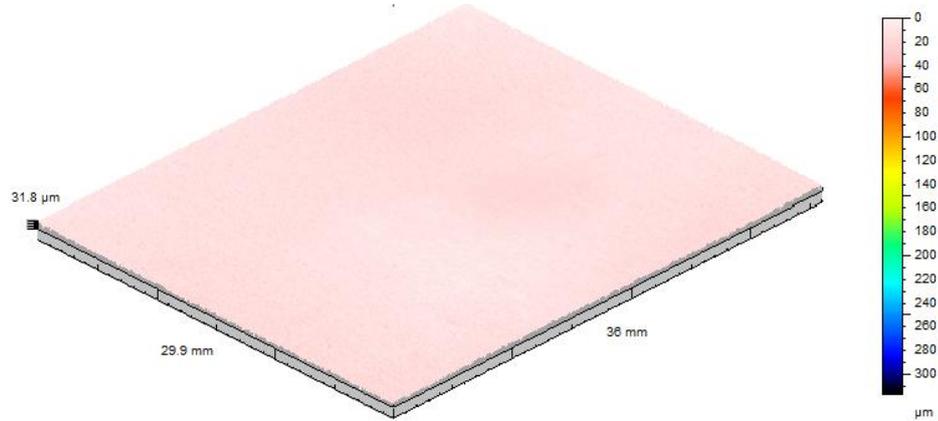
(b) - AISI 304



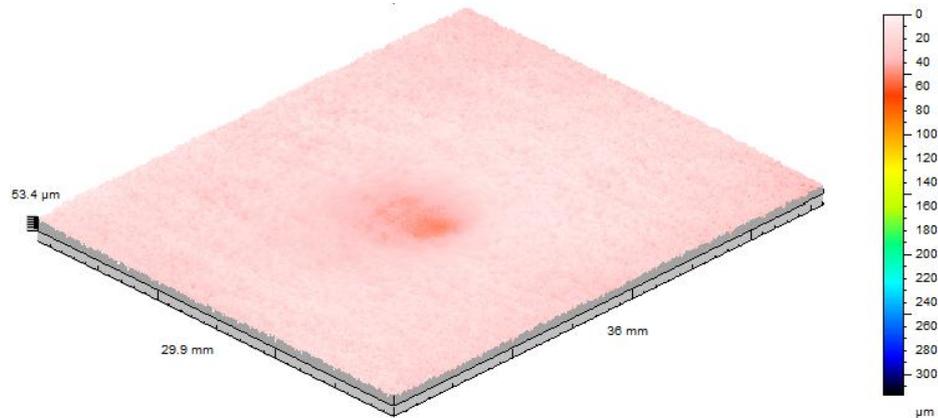
(c) - AISI 410

Figura 5.23– Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 20° : (a) AISI 201, (b) AISI 304 e (c) AISI 410.

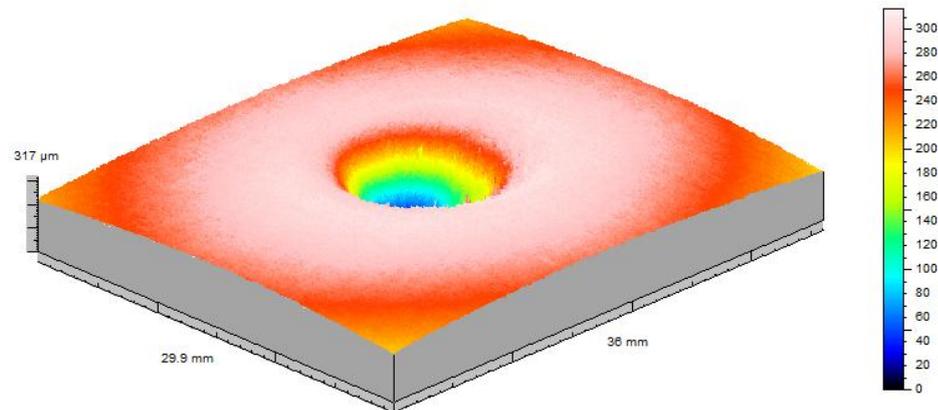
Ângulo de incidência: 90°



(a) - AISI 201



(b) - AISI 304



(c) - AISI 410

Figura 5.24– Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 90° : (a) AISI 201, (b) AISI 304 e (c) AISI 410.

Em um ângulo de 20°, para todos os aços o perfil de desgaste foi mais largo e menos profundo. A Tabela 5.6 apresenta a razão entre a taxa de desgaste erosivo “E”(massa de material removido pela massa de partícula erosiva) em relação a área erodida. Assim, apesar

de em um ângulo agudo ocorrer maior formação de debris, um material que recebe um fluxo erosivo perpendicular a sua superfície pode falhar primeiro, devido à deformação plástica localizada que gera perda de material de forma mais pontual. Essas informações também são apresentadas graficamente na Figura 5.25, considerando a taxa de desgaste erosivo por área erodida em relação a razão entre a dureza da partícula erosiva pela dureza da superfície deformada. O gráfico demonstra de forma clara, que apesar da taxa de desgaste erosivo ser menor para um ângulo de 90°, conforme apresentado na Figura 5.22, quando esse dado está correlacionado à área desgastada tem-se um comportamento contrário. Através dessa análise, também fica bem claro a maior perda de massa do aço AISI 410 em relação aos aços AISI 201 e AISI 304, o que contribui para certificar os resultados experimentais dos ensaios erosivos.

Tabela 5.6– Razão entre a taxa de desgaste erosivo “E” [g/g] pela área erodida para os aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410 para ângulos de incidência de 20° e 90°.

	$E (x10^{-6})/área [cm^{-2}]$ Ângulo de incidência: 20°	$E(x10^{-6})/área [cm^{-2}]$ Ângulo de incidência: 90°
AISI 201	0,030 ± 0,001	0,031 ± 0,008
AISI 304	0,045 ± 0,002	0,245 ± 0,125
AISI 410	0,141 ± 0,006	7,245 ± 0,686

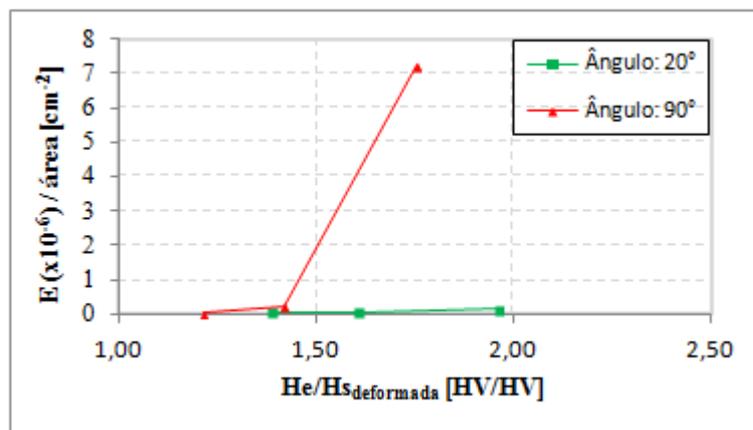


Figura 5.25 – Correlação entre a taxa de desgaste erosivo “E” e a razão entre a dureza da partícula erosiva (He) pela dureza da superfície deformada (Hsdeformada) para ângulos de incidência de 20° e 90°.

As Figuras 5.26 e 5.27, para visualizar melhor o comportamento desses materiais, apresentam os aços austeníticos estudados em uma escala menor. O aço AISI 201 apresentou maior

resistência ao desgaste à erosão em relação ao aço AISI 304, observando-se esse comportamento também nas imagens de perfilometria, pois as cavidades formadas tanto a 20° como a 90° para esse material são menores.

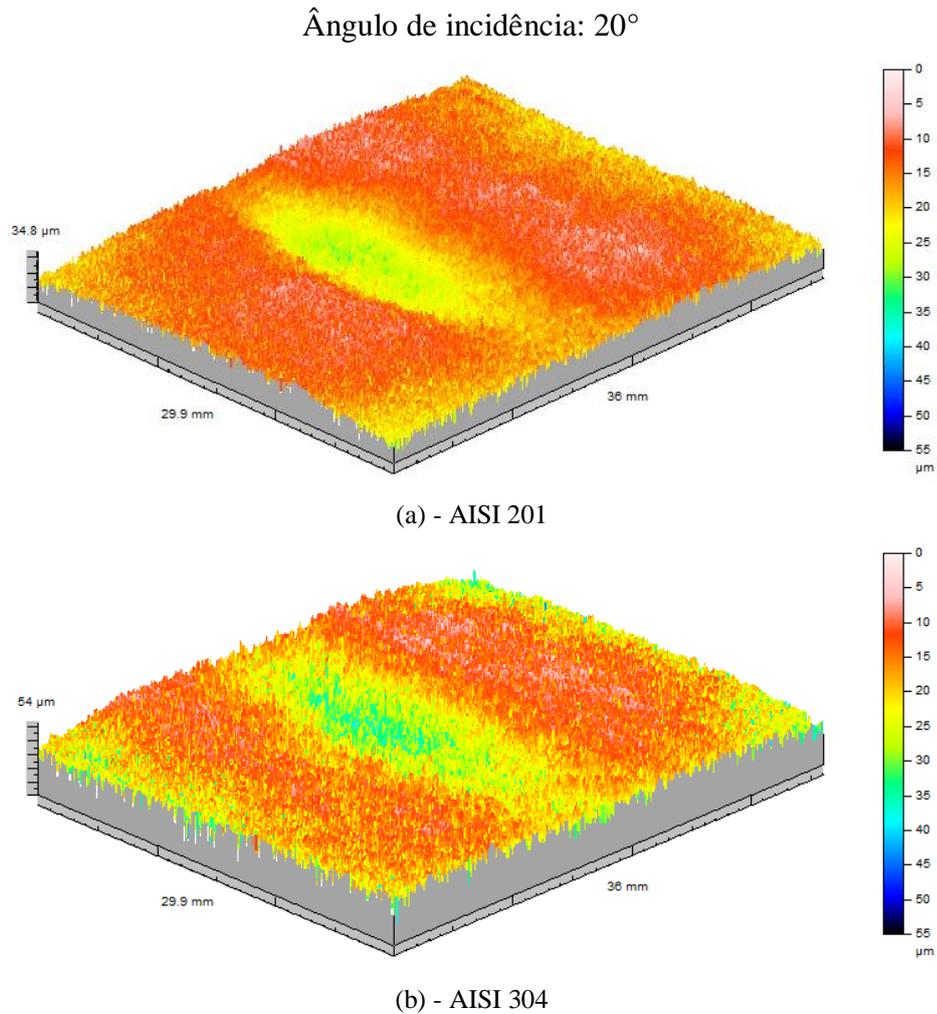
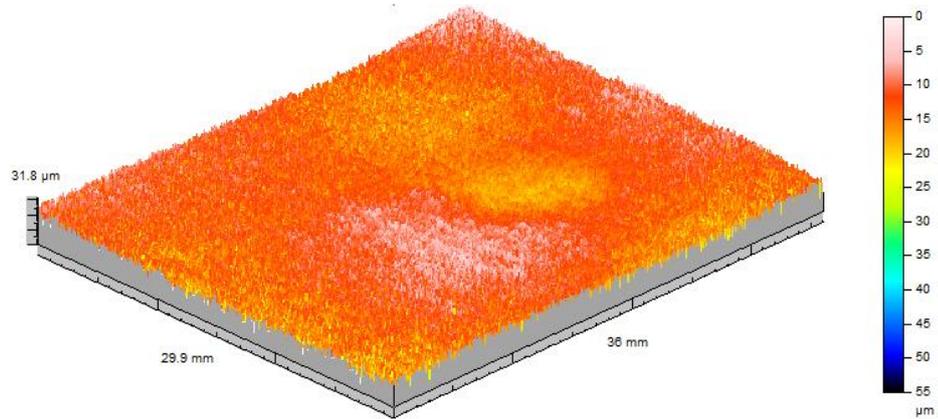
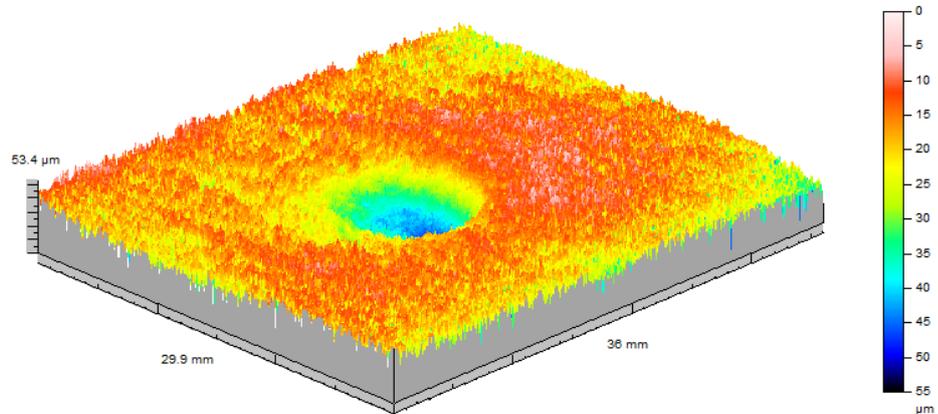


Figura 5.26– Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 20° : (a) AISI 201 e (b) AISI 304.

Ângulo de incidência: 90°



(a) - AISI 201



(b) - AISI 304

Figura 5.27– Análise de perfilometria - Superfícies dos materiais erodido com ângulo de incidência de 90° : (a) AISI 201 e (b) AISI 304.

Em suma, é relevante ressaltar que todas as análises de MO, microdureza e perfilometria obtidas apresentaram resultados compatíveis ao ensaio experimental de desgaste erosivo, o que demonstra a validade dos testes realizados. Além disso, através dessas caracterizações após a erosão, foi possível identificar parâmetros e propriedades importantes para maior resistência ao desgaste.

5.3 Estudo do efeito da laminação a frio do aço AISI 201 no desgaste erosivo

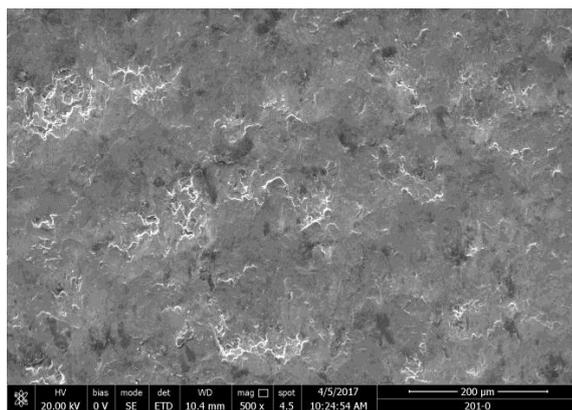
O aço AISI 201 foi previamente laminado em sete níveis diferentes de redução: 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 55%. Entretanto, para os ensaios de desgaste erosivo foram selecionadas as amostras com percentuais de redução de 0, 30 e 55%.

5.3.1 Caracterização dos materiais laminados

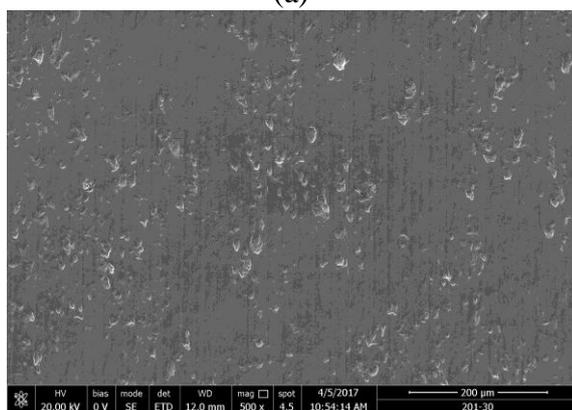
Após a laminação a frio as amostras reduzidas foram caracterizadas por ensaios mecânicos e metalográficos.

5.3.1.1 Caracterização Metalográfica

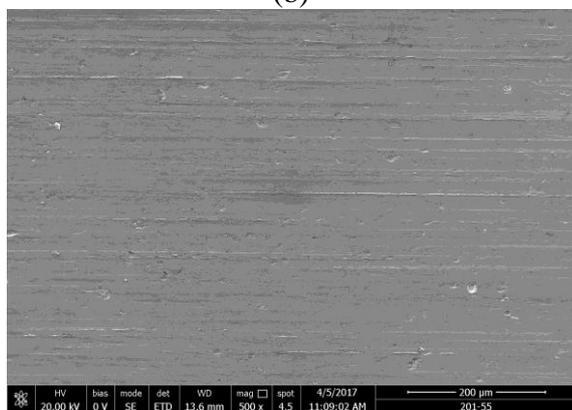
As superfícies dos materiais laminados foram analisadas por MEV e as imagens são apresentadas na Figura 5.28, para uma redução de 0%, 30% e 55%.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.28 - Análise de superfície por MEV do AISI 201. Percentual de redução (a) 0%, (b) 30%, (c) 55%.

Com o aumento do percentual de laminação a frio, a superfície do AISI 201 ficou mais homogênea, já que esse procedimento produz um acabamento superficial mais suave.

As amostras laminadas do AISI 201 também foram caracterizadas por microscopia ótica utilizando dois tipos de ataque: água régia e Behara, conforme apresentado nas Figuras 5.29 e 5.30, respectivamente. As imagens mostram a progressão das microestruturas do aço AISI201 a partir do material não deformado até a redução máxima realizada neste trabalho de 55%.

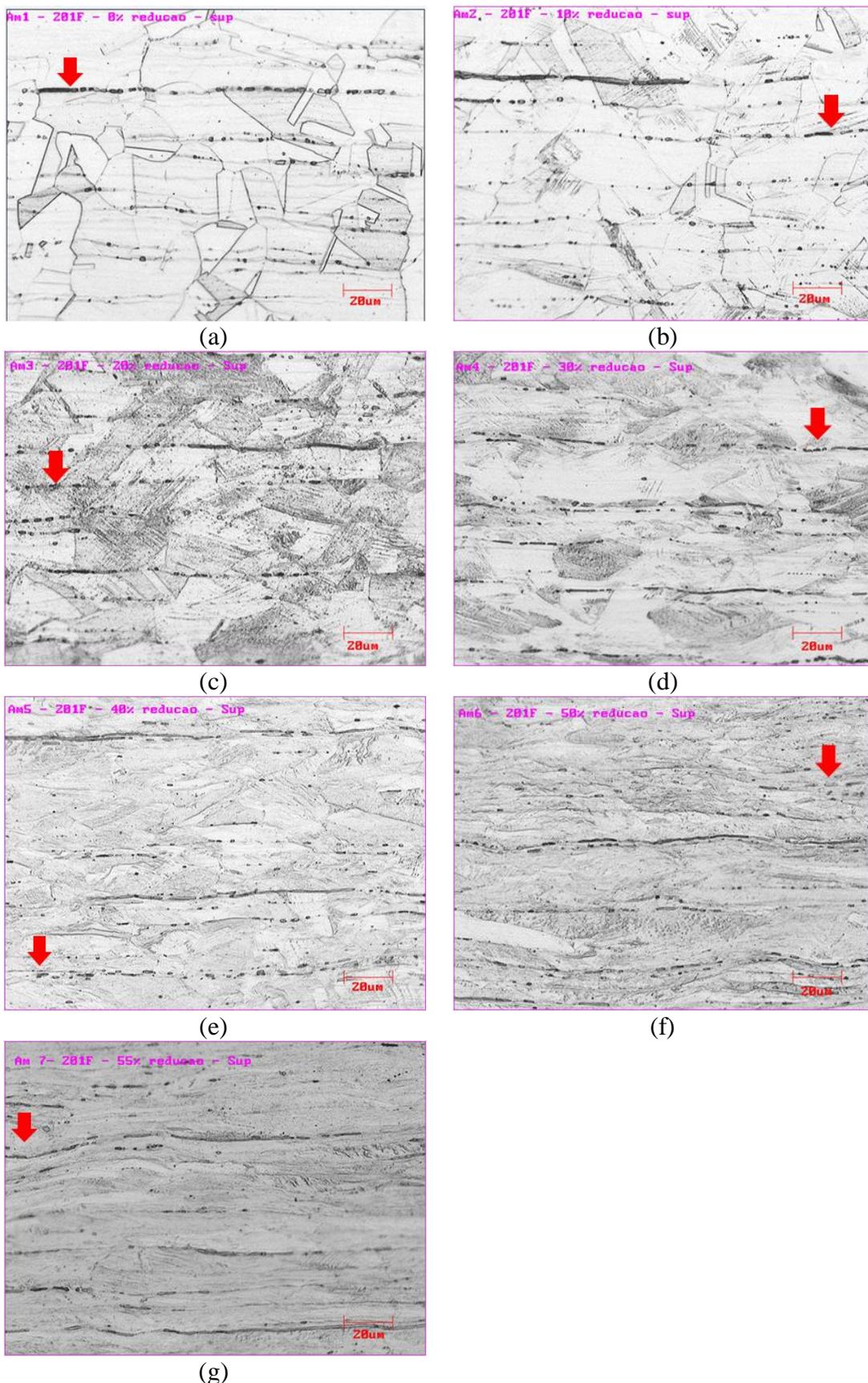


Figura 5.29 - Microestrutura do AISI 201 laminado. Percentual de redução: (a) 0% (b) 10% (c) 20% (d) 30% (e) 40% (f) 50% e (g) 55%. Ataque: água régia. Escala de 20 µm.

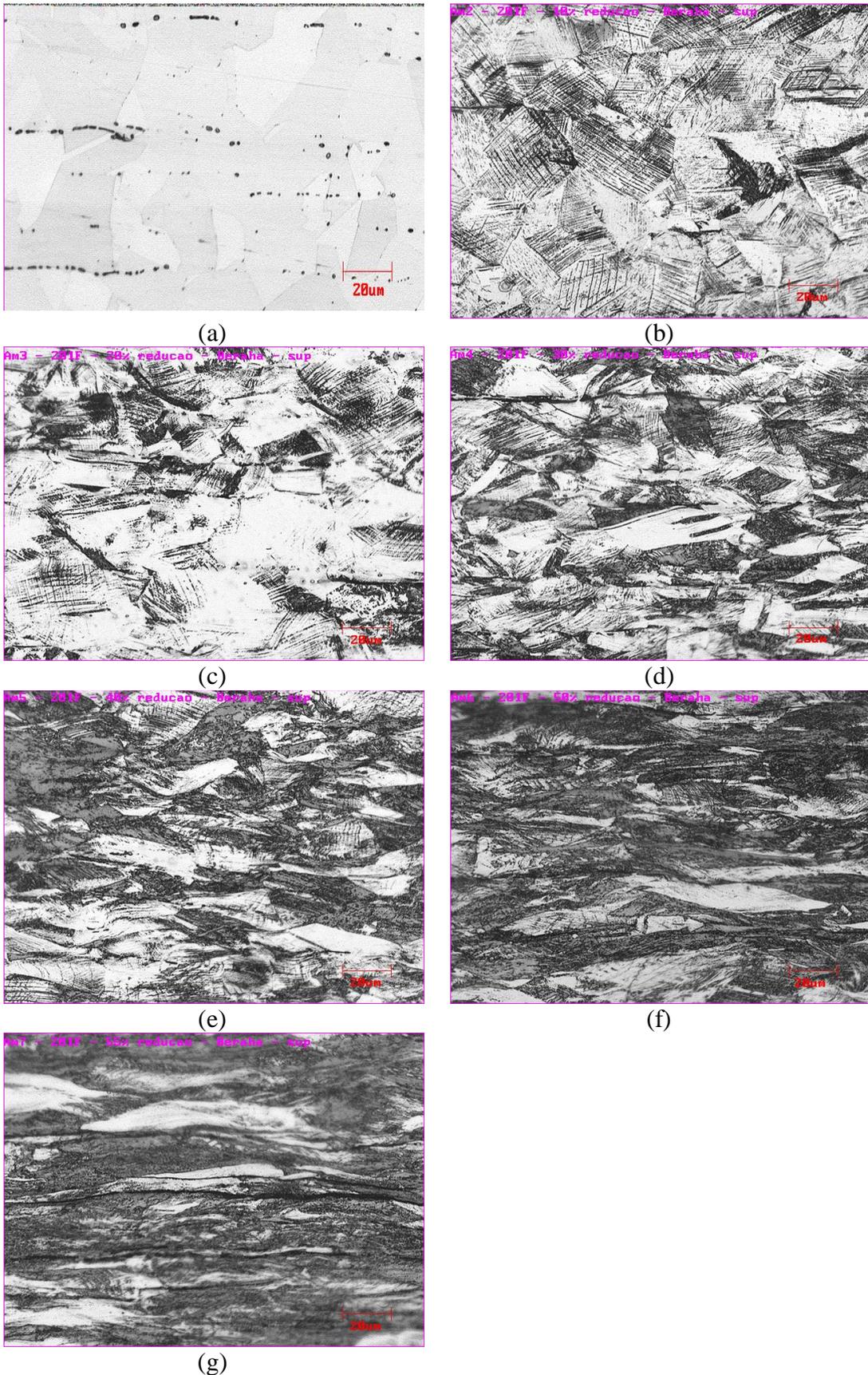


Figura 5.30 - Microestrutura do AISI 201 laminado. Percentual de redução: (a) 0% (b) 10% (c) 20% (d) 30% (e) 40% (f) 50% (g) 55%. Ataque: Behara. Escala de 20 µm.

Na Figura 5.29 pode-se verificar a presença de ferrita delta (δ), indicada pelas setas vermelhas. Conforme esperado, o processo de laminação levou a uma deformação dos grãos. Para a amostra reduzida em 30%, estes já não estão tão bem delimitados, sendo que a 55% as fronteiras entre eles são praticamente inexistentes. Após ataque metalográfico com Behara, Figura 5.30, nas amostras mais deformadas é possível visualizar a austenita como a fase clara e a martensita como a fase escura dentro dos grãos de austenita. Essa nova fase é gerada de forma heterogênea na estrutura do material.

Apesar da metalografia não ser uma análise que avalia com precisão o volume de martensita, qualitativamente foi observado que a geração dessa nova fase aumenta com a intensidade da redução (Hedayati, 2010), notando-se que para a amostra reduzida a 55%, a maior parte da austenita foi transformada em martensita. Essa análise confirma o efeito TRIP do aço AISI 201.

5.3.1.2 Caracterização mecânica

As propriedades mecânicas do AISI 201 com a deformação também foram avaliadas. Com essa finalidade, ensaios de tração do material não laminado até a redução máxima de 55%, utilizada nesse trabalho, foram feitos. As Figuras 5.31 até 5.34 apresentam os principais parâmetros avaliados.

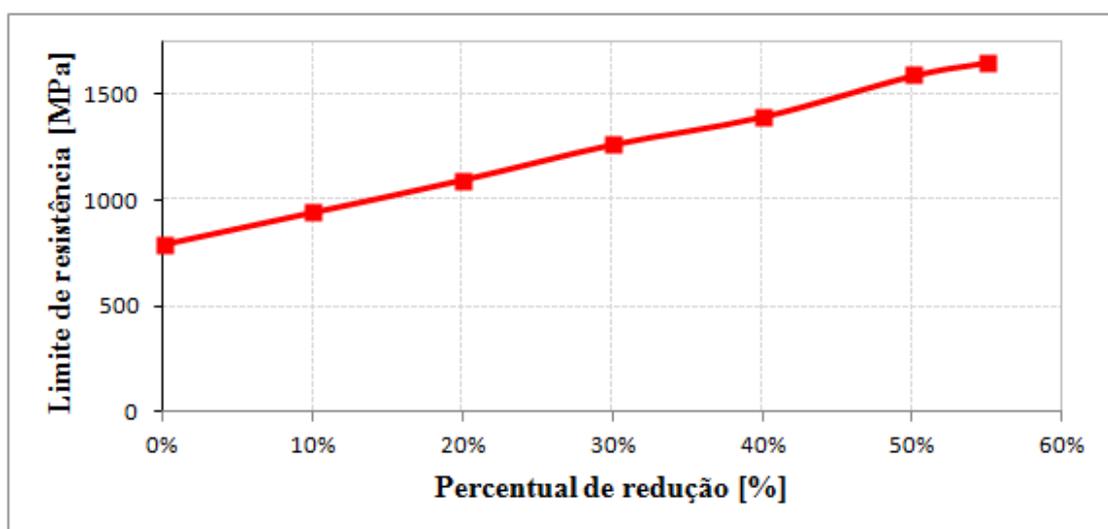


Figura 5.31- Limite de resistência [MPa] do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.

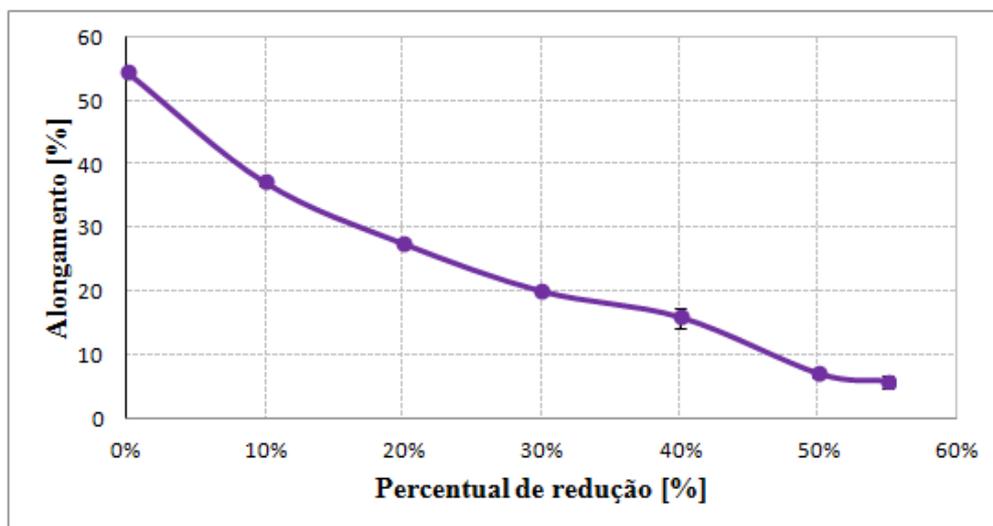


Figura 5.32- Ductilidade do aço AISI 201 por percentual de alongamento total em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.

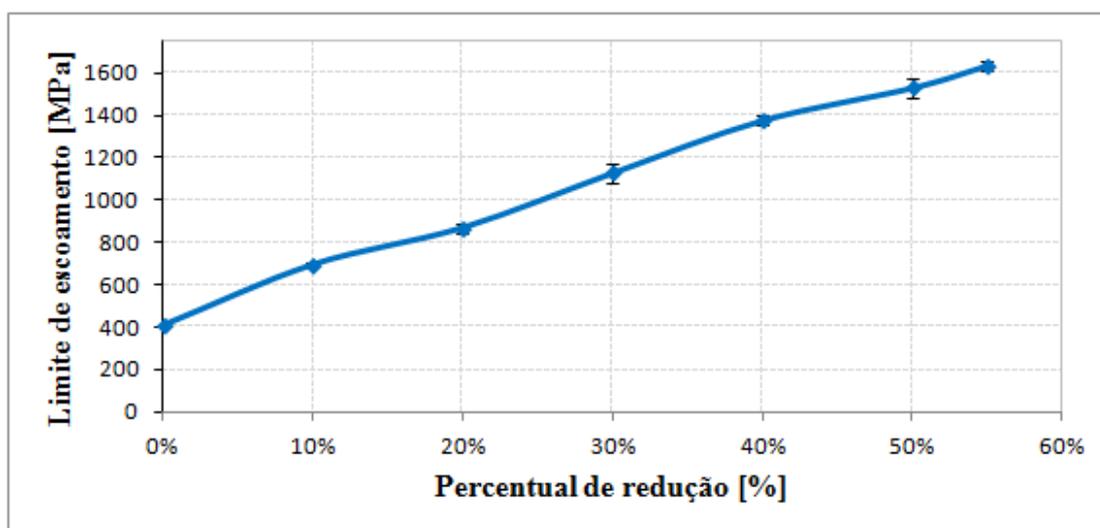


Figura 5.33 - Limite de escoamento do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio.

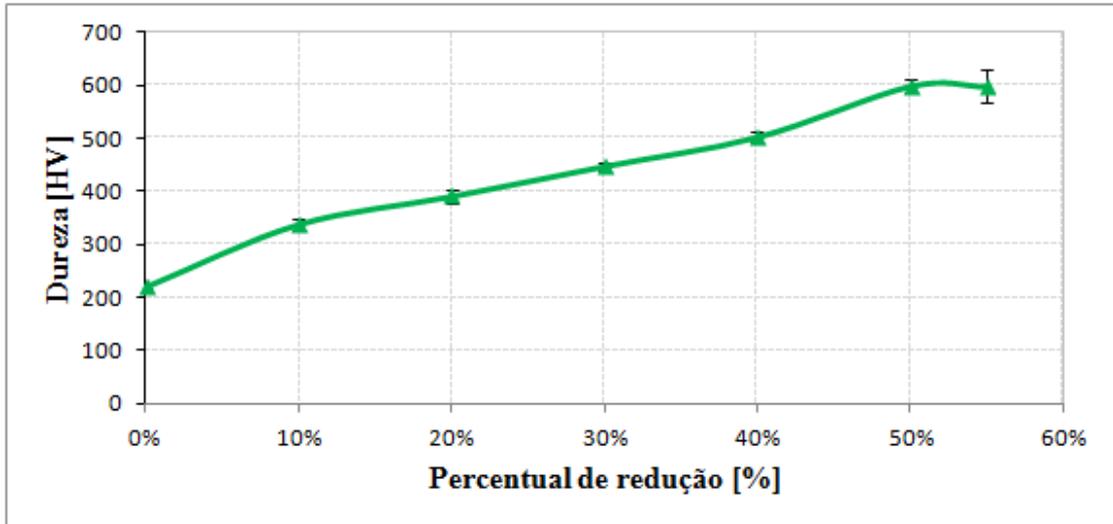


Figura 5.34- Dureza do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução por laminação a frio

Como o aço AISI 201 apresenta efeito TRIP, o aumento da porcentagem de redução do material faz com que ele tenha maior resistência mecânica devido ao encruamento dos grãos e formação de martensita por deformação. Nas Figuras 5.31, 5.33 e 5.34 pode-se perceber que o limite de escoamento, de resistência e a dureza do material aumentam ao longo da laminação. Em compensação, ele perde ductibilidade, conforme apresentado na Figura 5.32.

Para análise da influência da pré-deformação no desgaste erosivo, foram utilizadas as amostras com percentual de redução de 0%, 30% e 55%. As curvas de tensão-deformação de engenharia desses materiais são apresentadas na Figura 5.35.

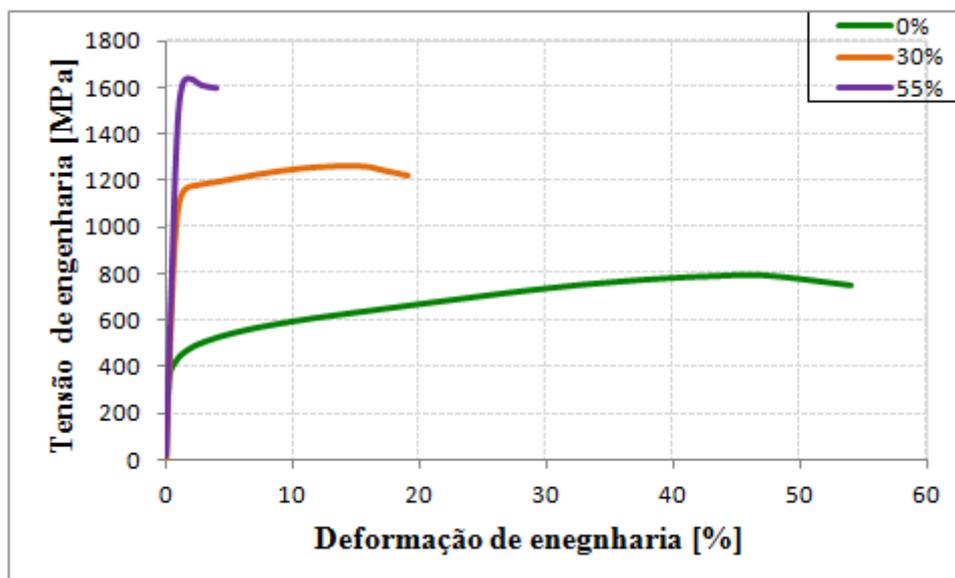


Figura 5.35 – Curva tensão-deformação do AISI 201 com percentual de redução de 0%, 30% e 55%.

A Tabela 5.7 descreve suas principais propriedades mecânicas. Como citado anteriormente, um aumento no percentual de redução leva a um aumento da resistência mecânica e diminuição da ductilidade.

Tabela 5.7 – Propriedades mecânicas do AISI 201 com percentual de redução de 0%, 30% e 55%.

AISI 201	Le 0,2%	Lr	Dureza	Alongamento total
Redução	[Mpa]	[Mpa]	[HV _{0,1}]	[%]
0%	405 ± 5	784 ± 20	219 ± 3	55 ± 0,7
30%	1128 ± 46	1263 ± 5	448 ± 8	20 ± 0,4
55%	1637 ± 23	1653 ± 16	598 ± 30	6 ± 1

5.3.2 Análise do desgaste erosivo

A influência da pré-deformação no desgaste erosivo também foi um tópico abordado nesse trabalho. Dentro desse enfoque, o aço AISI 201 foi o escolhido para realização dos testes, em virtude dos melhores resultados apresentados por esse material em relação aos aços AISI 410 e ao AISI 304. Para essa análise, foi definido um percentual de redução máximo de 55%, e um intermediário de 30%. Desta forma, as amostras foram previamente laminadas e, após essa etapa, iniciaram-se os ensaios de erosão. A perda de massa em relação ao tempo de

desgaste foi quantificada, e os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.36 e 5.37, para um ângulo de 20° e 90°, respectivamente.

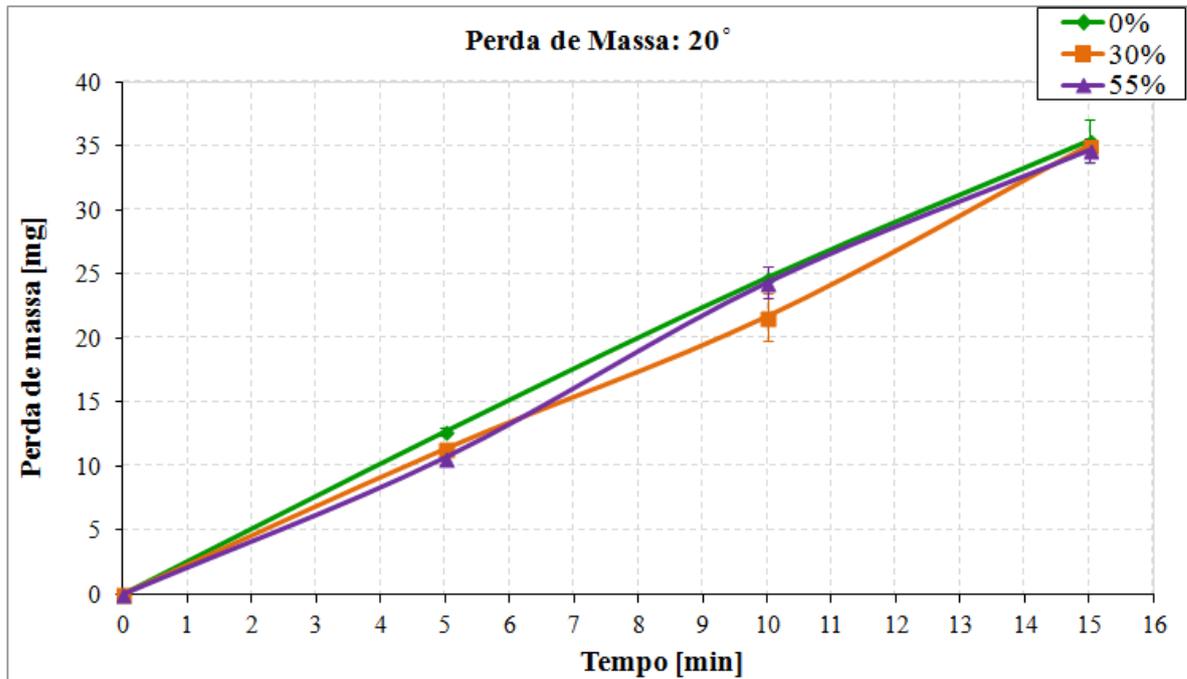


Figura 5.36– Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 20° para o aço AISI 201 com redução de 0%, 30% e 55% .

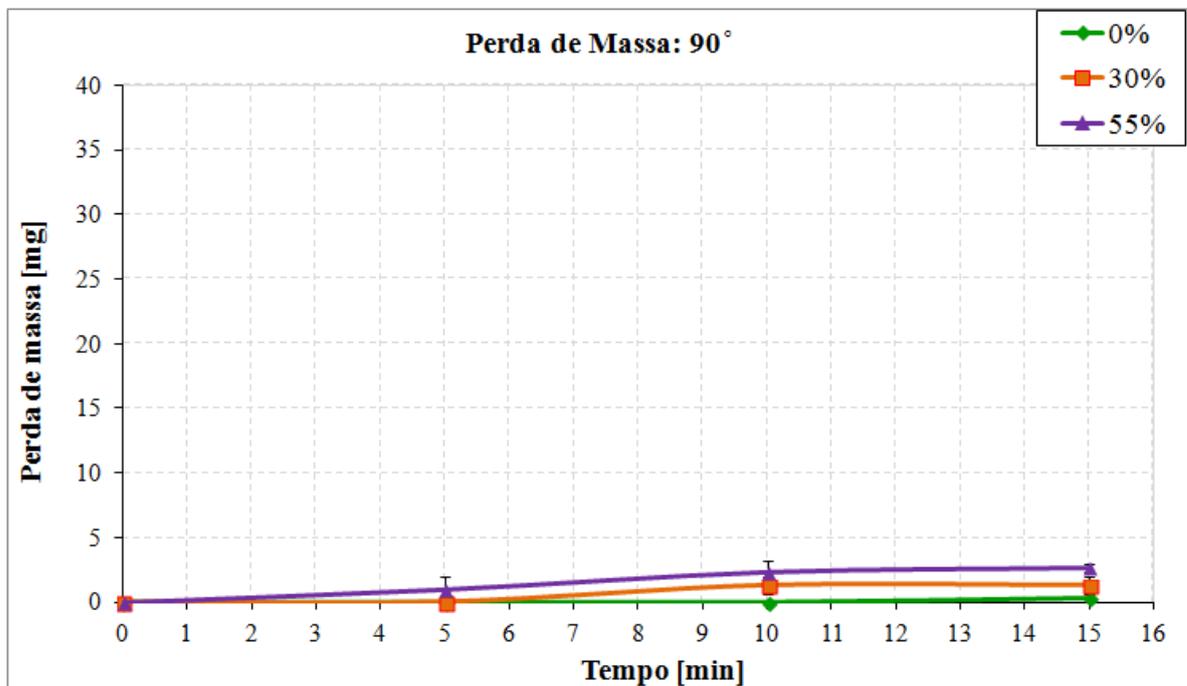


Figura 5.37- Perda de massa em relação ao tempo de desgaste erosivo à um ângulo de 90° para o aço AISI 201 com redução de 0%, 30% e 55% .

O estado estacionário de erosão, que ocorre após o período de “*running*”, é caracterizado por uma relação linear “E”, que expressa a taxa entre a massa de debris gerados pela massa de partículas erosivas que colidem com a superfície. Esse fator também foi calculado para os materiais laminados, considerando um fluxo constante de granalha de 2,0 kg/min, e é apresentado na Tabela 5.8. De forma semelhante às análises feitas no estudo das estruturas dos materiais, em um ângulo de 90°, os resultados tiveram uma maior instabilidade, pois a perda de massa foi muito pequena, o que levou a um desvio padrão mais significativo.

Tabela 5.8– Coeficientes linear de erosão, E em g/g, do aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução para ângulos de incidência de 20° e 90°.

AISI 201 Redução	E ($\times 10^{-6}$)	
	Ângulo de incidência: 20°	Ângulo de incidência: 90°
0%	1,227 ± 0,026	0,011 ± 0,010
30%	1,129 ± 0,024	0,037 ± 0,020
55%	1,147 ± 0,044	0,102 ± 0,008

Tanto o material não laminado quanto as amostras reduzidas a 30% e 55% apresentaram um comportamento característico de erosão por deformação plástica tendo um desgaste maior em um ângulo de 20° e uma maior resistência à erosão com aumento do ângulo de incidência (Hutchings, 1992).

As taxas de desgaste erosivo para um ângulo de 20° foram bem próximas. Já quando o ângulo de incidência foi perpendicular à superfície, a resistência diminuiu de forma significativa com a redução a frio do material.

A laminação a frio no aço AISI 201, além de promover um encruamento do material, induz a formação de martensita, o que acarreta um aumento na sua resistência mecânica (dureza, limite de escoamento e limite de resistência) e conseqüentemente perda de ductilidade. Todas essas propriedades exercem influência direta no desgaste, como citado anteriormente, a taxa de erosão é inversamente proporcional à dureza, sendo que, o mais coerente é fazer essa correlação com a dureza da superfície deformada, pois as tensões geradas também podem impulsionar o endurecimento do material. Além desse fator, um aumento da ductilidade e da

capacidade de encruamento diminuem o percentual de perda, ou seja, contribuem para uma melhor resistência.

À medida que o material sofre desgaste erosivo ele passa por um processo de deformação plástica e encruamento dos grãos. Assim, de certa forma, a laminação a frio está antecipando o que irá ocorrer durante a erosão (Hutchings, 1992). Para um ângulo de incidência de 20°, essa redução prévia teve uma pequena influência, pois nesse caso o material é varrido, sendo que o desenvolvimento dos debris ocorre de forma simultânea à deformação plástica e ao encruamento da superfície. Contudo, a 90° a taxa de desgaste aumentou de forma mais significativa com a redução, pois, nessa condição, a formação de fragmentos iniciará após o material atingir um limite de falha. Esse parâmetro é dependente do número de ciclos de deformação que o material é capaz de suportar. Como consequência, o desgaste se torna ainda mais dependente da ductilidade. O aumento da dureza proporciona maior resistência à penetração, mas se o material não retém ductilidade o suficiente, o impacto de uma partícula erodente acaba gerando mais fragmentos, pois o metal apresentará menor tensão de falha e, conseqüentemente, a taxa de erosão aumenta. Diante disso, os resultados foram menos satisfatórios para uma redução de 55%.

Convém lembrar que o encruamento e a formação de martensita também ocorrem ao longo da erosão. Na amostra não laminada, esse processo se inicia durante o desgaste e absorve uma parte maior da energia de impacto, o que contribuiu para resistência. Além disso, o material não reduzido possui uma maior tenacidade “disponível” para esse processo. Como o aço AISI 201 é um austenítico caracterizado pelo elevado efeito trip, a martensita por deformação e o encruamento na superfície do material ocorrem de forma expressiva com as próprias tensões geradas pela erosão. Essa maior dureza superficial é uma barreira importante para diminuir a penetração e aumentar a resistência à erosão.

Desta forma, para o aço AISI 201 neste sistema, o encruamento prévio não é indicado em aplicações que requerem maior resistência ao desgaste erosivo.

5.3.3 Caracterização das amostras erodidas

As amostras do aço AISI 201 que passaram pelo processo de pré-deformação também foram caracterizadas após sofrerem desgaste erosivo, semelhantemente às análises realizadas para os aços AISI 201, AISI 304 e AISI 410 não reduzidos.

5.3.3.1 Análise de superfície (MEV)

Para se caracterizar as superfícies erodidas, também foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura e os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.38.

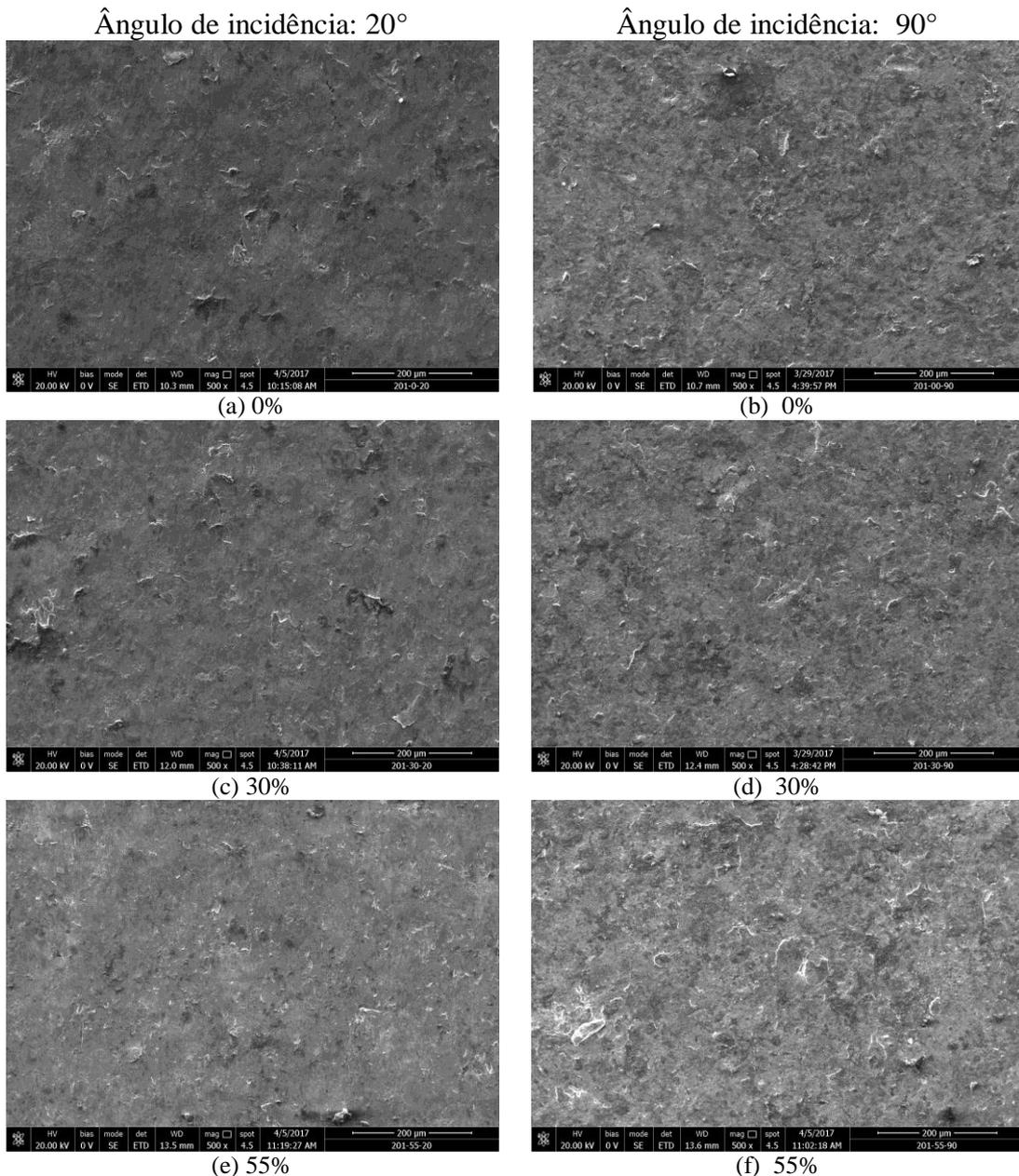


Figura 5.38- Análise MEV. AISI 201 em diferentes percentuais de redução após desgaste erosivo: (a) Redução: 0%/Erosão à 20°, (b) Redução: 0%/Erosão à 90°, (c) Redução: 30%/Erosão à 20°, (d) Redução: 30%/Erosão à 90°, (e) Redução: 55%/Erosão à 20°, (f) Redução: 55%/Erosão à 90°. Escala de 200 µm.

Como a perda de massa dos materiais laminados foi muito próxima, a análise de superfície por MEV não apresentou uma grande variabilidade entre as amostras. Entretanto, em todos os casos constatou-se maior deformação da superfície após a erosão, sendo que ela ocorre de forma mais significativa a 90°, pois nessa condição há maior encruamento. Esse comportamento foi também analisado por microdureza conforme apresentado no item 5.3.3.3

5.3.3.2 Análise de microestrutura (MO)

Para verificar a formação de martensita, foram realizadas análises de microscopia ao longo da espessura das amostras erodidas, seção transversal. A Figura 5.39 apresenta as fotos comparativas para um ângulo de incidência 20° e 90°.

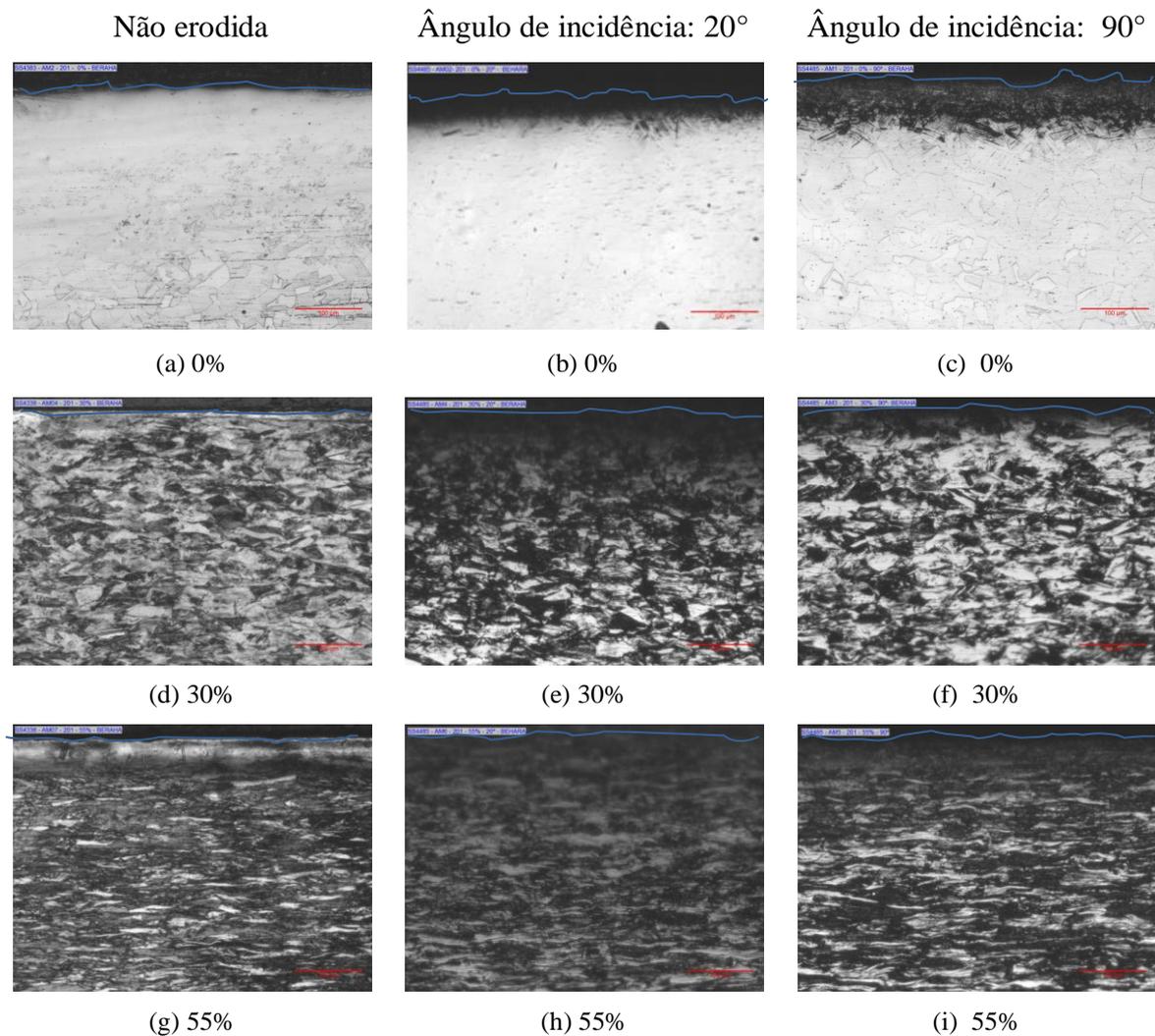


Figura 5.39 - Análise de microscopia ótica do AISI 201 em diferentes percentuais de redução antes e após desgaste erosivo: (a) Redução: 0%/Não erodida, (b) Redução: 0%/Erosão à 20°, (c) Redução: 0%/Erosão à 90°, (d) Redução: 30%/ Não erodida, (e) Redução: 30%/Erosão à 20°, (f) Redução: 30%/Erosão à 90°, (g) Redução/55%. Não erodida, (h) Redução: 55%/Erosão à 20° e (i) Redução: 55%/ Erosão à 90°. Ataque: Behara. Escala de 100 μm . A linha azul indica a superfície da amostra.

Nas imagens apresentadas é possível identificar a formação de martensita na superfície das amostras durante o desgaste erosivo, o que certifica que as tensões do processo promoveram a

transformação induzida por deformação da austenita. Esse fenômeno é característico do elevado efeito TRIP apresentado pelo AISI 201. As amostras reduzidas a 30% e a 55% já apresentavam uma grande quantidade de martensita formada durante a laminação a frio, por isso a visualização dessa transformação após a erosão ficou mais difícil de ser observada.

5.3.3.3 Microdureza

Para verificar a influência da erosão no encruamento do material, também foram realizados ensaios de microdureza ao longo da espessura nas amostras analisadas por MO, conforme apresentado no gráfico da Figura 5.40.

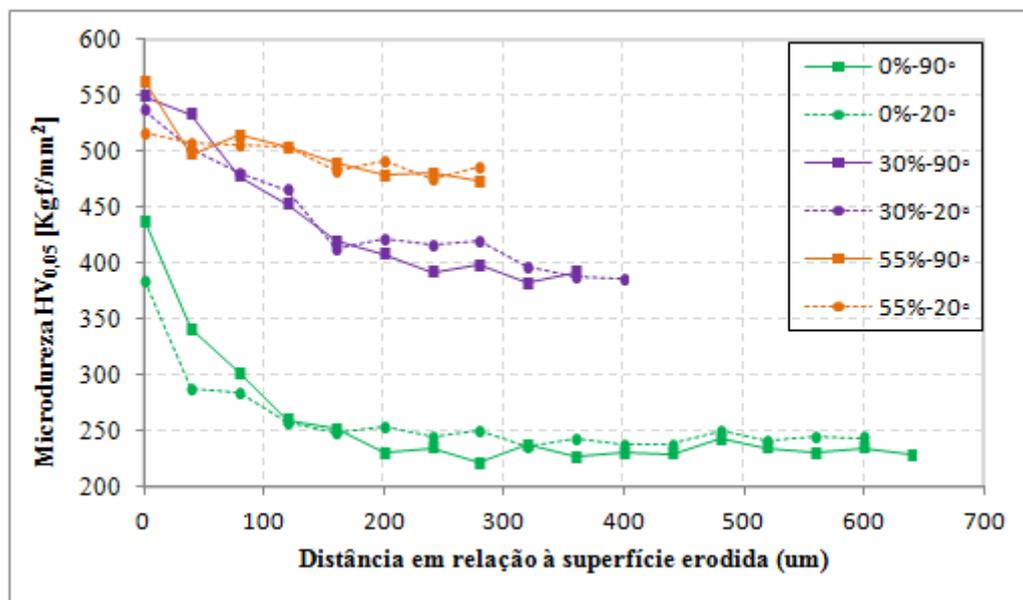


Figura 5.40 – Microdureza ao longo da espessura das amostras de AISI 201, pré-deformadas em diferentes percentuais de redução, após sofrerem desgaste erosivo.

Com essa análise, pode-se perceber que o encruamento foi maior para a amostra não laminada. A amostra reduzida a 30% também apresentou uma variação de dureza ao longo da espessura, já na amostra de 55% esse encruamento foi muito pequeno. Tal transformação foi extremamente importante para a resistência à erosão apresentada pelo material não laminado, pois apesar dele ter uma dureza inicial bem menor, no decorrer do processo ele foi endurecido o que diminuiu a sua taxa de desgaste.

Em todos os casos, o encruamento foi maior para um ângulo de incidência de 90°, pois nessa condição ocorre uma maior deformação plástica, já que as partículas erosivas colidem de forma perpendicular a superfície, compactando o material, e somente haverá formação de debris após o limite de falha ser atingido.

Diante dessas análises apresentadas, é possível perceber que a laminação a frio está antecipando o fenômeno que irá ocorrer na erosão.

5.3.3.4 Perfilometria

A análise de perfilometria foi realizada na superfície das amostras erodidas para a obtenção do perfil transversal de desgaste. Esses resultados são apresentados nas Figuras 5.41 e 5.42.

Ângulo de incidência: 20°

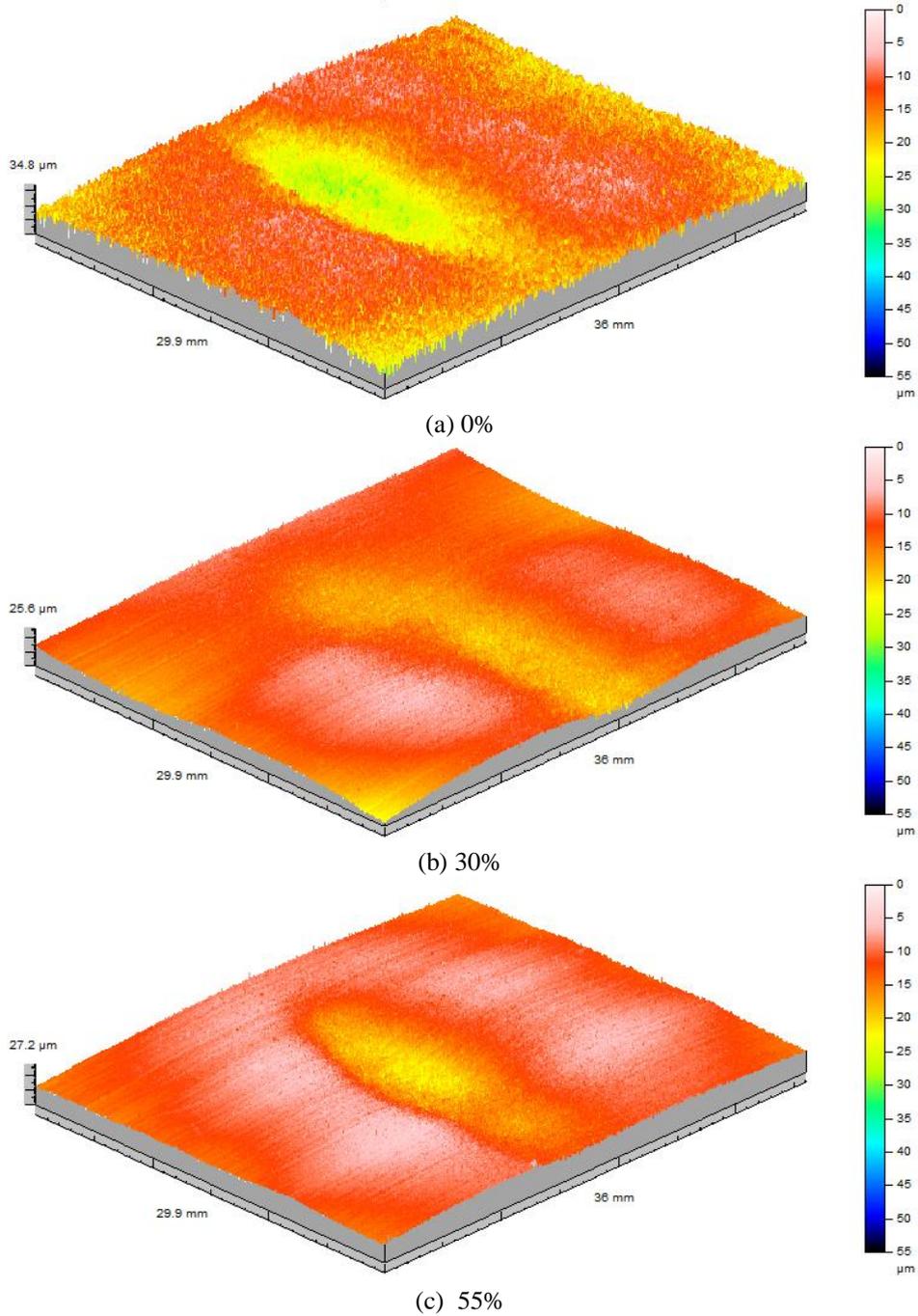


Figura 5.41 – Análise de perfilometria – Superfície do AISI 201 em diferentes percentuais de redução após desgaste erosivo. Ângulo de incidência de 20°: (a) Percentual de redução:0%, (b) Percentual de redução:30% e (c) Percentual de redução:55%.

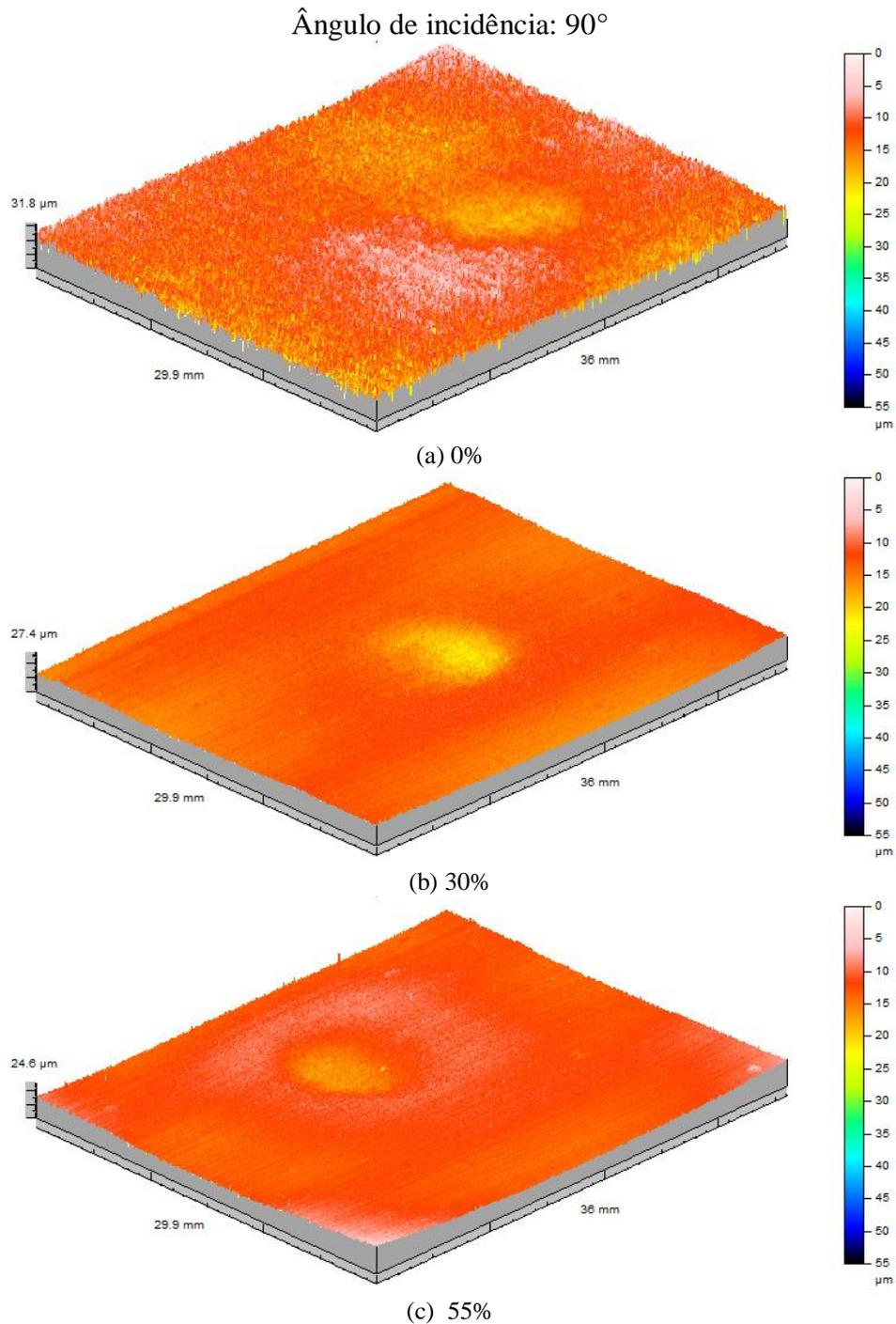


Figura 5.42– Análise de perfilometria – Superfície do AISI 201 em diferentes percentuais de redução após desgaste erosivo. Ângulo de incidência de 90°: (a) Percentual de redução:0%, (b) Percentual de redução:30% e (c) Percentual de redução:55%.

Em um ângulo de impacto perpendicular, a cavidade formada para amostra reduzida a 55% é maior, o que também valida os ensaios erosivos, ou seja, demonstra a maior suscetibilidade do aço AISI 201 laminado à erosão. O aumento de dureza acarreta uma perda de ductilidade,

o que não foi positivo para o sistema tribológico estudado. Além disso, esse aço apresenta elevado efeito TRIP o que faz com que essa transformação ocorra de forma expressiva durante o desgaste erosivo. A Tabela 5.9 apresenta a taxa de desgaste erosivo ‘E’ em relação a área erodida, demonstrando de forma quantitativa os resultados discutidos.

Tabela 5.9– Razão entre a taxa de desgaste erosivo “E” pela área erodida para o aço AISI 201 em diferentes percentuais de redução para ângulos de incidência de 20° e 90°.

AISI 201	E/área [cm⁻²]	E/área [cm⁻²]
Redução	Ângulo de incidência: 20°	Ângulo de incidência: 90°
0%	0,030 ± 0,001	0,031 ± 0,008
30%	0,028 ± 0,001	0,082 ± 0,044
55%	0,029 ± 0,001	0,227 ± 0,018

Conforme apresentado no tópico de caracterização dos materiais, antes do desgaste erosivo a amostra não laminada já apresentava uma superfície muito irregular. O encruamento resultante da redução a frio além de garantir maior resistência mecânica ao produto final, traz melhoria em seu aspecto superficial, o que resulta em uma menor rugosidade. Esse comportamento pode ser observado também nos perfis de perfilometria. Desta forma, apesar do aço AISI 201 não laminado ter tido uma menor taxa de desgaste, em um ângulo de incidência de 20° a cavidade formada foi mais profunda, pois a sua superfície já apresentava pontos de profundidades variáveis.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e das análises realizadas nesta dissertação, são sumarizadas as principais conclusões obtidas:

- O desenvolvimento do projeto de adaptação do equipamento de jateamento de granalha se mostrou muito eficaz para o estudo de desgaste erosivo. Todos os resultados apresentados nos testes de erosão desse trabalho puderam ser confirmados através das análises de caracterização. Assim, a metodologia estabelecida nessa dissertação para esses ensaios fica disponível às futuras pesquisas na área, que, com certeza, também trarão resultados enriquecedores.
- O aço AISI 201 apresentou menor EFE e maior M_{d30} em relação ao aço AISI 304 e conseqüentemente maior suscetibilidade para ocorrência da transformação de fase induzida por deformação.
- Todos os materiais estudados (AISI 201, AISI 304 e AISI 410) apresentaram comportamento erosivo característico sob o mecanismo de deformação plástica, apresentando maior suscetibilidade ao desgaste em um ângulo raso.
- O mecanismo de desgaste por deformação plástica proposto foi confirmado através das análises de microscopia das amostras.
- O aço AISI 410 apresentou uma menor resistência ao desgaste em relação aos aços AISI 201 e AISI 304. Vários fatores contribuíram para esse resultado, tais como a não formação de martensita por deformação, a menor ductilidade e menor taxa de encruamento desse material.
- A dureza, apesar de ser um parâmetro muito utilizado para caracterizar a resistência ao desgaste, é um fator muito pobre de avaliação, que não deve ser analisada de forma isolada. Vários outros parâmetros, como: ductilidade e capacidade de encruamento exercem influência direta nesse processo.

- Em relação aos aços inoxidáveis austeníticos, o AISI 201 apresentou maior resistência à erosão em comparação ao AISI 304. A maior taxa de encruamento e tendência de transformação de fase induzida, austenita para martensita, foi determinante para esse resultado.
- Apesar de todos os materiais estudados terem apresentado menor resistência à erosão em um ângulo de 20° a taxa de desgaste em relação a área erodida foi maior a 90°. Assim, um material que recebe um fluxo erosivo perpendicular a superfície pode falhar primeiro, devido à deformação plástica localizada que gera perda de massa de forma mais pontual.
- A laminação a frio prévia do AISI 201 não favoreceu a resistência ao desgaste erosivo. Apesar do encruamento ter aumentado a dureza, o que proporciona maior resistência à penetração, o material não reteve ductilidade o suficiente. Assim, o impacto de uma partícula erodente acaba gerando mais fragmentos, pois o metal apresentou menor tensão de falha. Esse efeito foi mais pronunciado em um ângulo de 90°.
- O encruamento prévio no aço AISI 201 antecipou o que ocorreu de forma natural na superfície do material durante o desgaste erosivo.
- O aço AISI 201 se apresentou como um material promissor para aplicações em equipamentos sujeitos ao desgaste erosivo.

Sugestões de Trabalhos futuros

- Realizar os ensaios de erosão utilizando partículas erosivas presentes em processos reais, como minério, areia e grãos. A granalha não é um abrasivo comum em aplicações industriais, entretanto, como o objetivo desse trabalho foi o estudo comparativo dos materiais, ela foi escolhida, pois possui propriedades bem homogêneas e permitiu uma padronização dos testes de erosão.
- Através do equipamento projetado, estudar o comportamento de materiais mais duros, como aços martensíticos carbono e inox (AISI 420, AISI 410 temperado), entre outros,

que tenham possibilidade de apresentarem mecanismo de desgaste erosivo por fratura frágil.

- Realizar um teste em campo para verificar a resistência ao desgaste dos materiais estudados e certificar a aplicabilidade dessa pesquisa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGEL, T.; Formation of martensite in austenitic stainless steels. *Journal of Iron and Steels Institute*, v. 177, p.165-174, 1954.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM G 40-02:Standard terminology relating to wear and erosion. Pennsylvania, 2002.

ASTM - American Standard for Testing Materials. A370-12, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products,ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM - American Standard for Testing Materials. E8/E8M-11. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM - American Society for Testing and Materials. G76-95 – Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gás Jet. Philadelphia, 1995, pag 1-5.

APERAM - Aço inoxidável: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável. <www.aperam.com>. Acesso em 15 maio 2017.

Bellman, R.; Levy, A. Erosion mechanism in ductile metals. *Wear*, v. 70, n. 1, p. 1–27, 1981.

Bingley, M. S.; O’Flynn, D. J. Examination and comparison of various erosive wear models. *Wear*, v. 258, n. 1, p. 511–525, 2005.

Bitter, J.G.A. A study of erosion phenomena part I. *Wear* v.6.n.1, 1963: p.5-21.

Bitter, J.G.A. A study of erosion phenomena: Part II. *Wear* v. 6.n.3, 1963: p.169-190.

Blau,P.J. Fifty years of research on the wear of metals. *Tribology International* v.30.n.5, 1997: p.321-331.

Bhushan, B. *Introduction to Tribology*, nd Edition, United States: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

Calvi, D. P. Construção e validação de erosímetro a jato de ar. Vitória: Dissertação, PPGEM, Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

Campos, A.L. Dimensionamento de um transportador contínuo inclinado de esteira côncava aplicado ao transporte de minério de bauxita considerando aspectos estáticos e dinâmicos. Monografia (Bacharelado em Engenharia Automotiva) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.p.79.

Cina, B. A transitional hcp phase in the $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation in certain Fe-base alloys. *Acta Metallurgica*, 1958: p.748-76.

Clark, H.; Hartwich, R.B.; Are-examination of the ‘particle size effect’ in slurryerosion, *Wear* 248. 2001

Crocker, L. A review of current methods for modelling erosive wear. National Physical Laboratory, 2011

Davis, J. R. ASM International Handbook. Specialty Handbook: Stainless Steels. Materials Park, ASM International, 1994. p. 25

Dieter, G. E. *Metalurgia Mecânica*. Editora Guanabara dois, Rio de Janeiro, 2 ed.,1981.

Divakar, M.; Agarwal V.K. e Singh.S.N. Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316. *Wear* v. 259.n.1, 2005: p.110-117.

EDEM - DEM Solutions, Leaders in Bulk Material Flow Simulation, Release Latest Enhancements to EDEM Software, 2010 Disponível em: < www.edemsimulation.com >. Acesso em 12 junho.2017.

- Eichelman, G.H.; HULL, F.C. The effect of composition on the temperature of spontaneous transformation of austenite to martensite in 18-8 type stainless steels. *Transactions of ASM*, v. 45, p.77-104, 1953.
- Ewald, H. Estudo do desgaste por erosão de ligas metálicas utilizadas em sistemas mecânicos de plantas siderúrgicas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011.
- Eyre, T.S. Wear characteristics of metals. *Tribology International*, v.10, p.203-212, 1976.
- Finnie, I. Some observations on the erosion of ductile metals. *Wear* v.19.n.1, 1972: p.81-90.
- Finnie, I. Some Reflections on the Past and Future of Erosion, *Wear*, 1995. p. 186-187.
- Finnie, I; Wolak.J; Kabil.Y. Erosion of solid metals by solid particles. *ASTM J Mater*, 1967.p. 682-700
- Gavi.J. Manual de Inspeção e manutenção de correias transportadoras. Geops. 4 ed. 2001.p.91
- Gat, N; Tabakoff. W. Some Effects of Temperature on the Erosion of Metals. *Wear*, v. 50, p 85-94,1978.
- Griffiths, A. J, e Wright J. C . Mechanical properties of austenitic and metastable stainless steel sheet and their relationships with pressforming behaviour. *Stainless steels*, ,1968: 52-67.
- Gonzales, B.M., Castro, C. S. B., Buono, V. T. L., Vilela. M. C., Andrade, M. S., Moraes, J. M. D., Mantel, M. J. The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel. *Materials Science and Engineering*, A343, 2003.
- Goretta, K. C. et al. Erosion of work-hardened copper, nickel, and 304 stainless steel. *Wear*, v. 147, n. 1, p. 145–154, 1991.
- Haugen. K.; Kvernfold. O.; Ronold.A.; Sanderbeg. R. Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves. *Wear*, 1995. p.179-188.
- Hedayat. A. et al. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, p. 1017-1022, 2010.
- Herculano, L. F. G. Desenvolvimento de uma metodologia de ensaio eletroquímico não destrutivo para avaliação da sensitização nos aços inoxidáveis austeníticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004, p. 85.
- Hutchings, I.M. *Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials*, London, Edward Arnold, 1992.
- Hutchings, I.M. *ASM Handbook - Mechanical Testing and Evaluation*. Vol. 8. USA. 2000.
- ISSF. New 200 series steels – An opportunity or a threat to the image of 127 stainless steel. Belgium. 2005, 14p. Disponível em: <www.worldstainless.org>. Acesso em 15.agosto.2017.
- Jenike- Transfer chutes. Disponível em: <<http://jenike.com>>. Acesso em 12 junho.2017.
- Jost, H.P. *Tribology - origin and future*. *Wear*, 1990: p. 1-17.
- Jost, Peter. Committee on tribology report. HMSO, 1968.
- Kuniooshi, C.T. Estudo do comportamento de erosão-oxidação de materiais Compósitos de'NI" CR'com WC e'CR IND. 3'C IND. 2. Tese (Doutorado), Programa De Pós-Graduação Do Ipen, São Paulo. 2004.
- Labiapari, W. S. Abrasão-corrosão em aços inoxidáveis ferríticos. 211 f. Tese de Doutorado em Engenharias - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- Lee, T.H., Shin, E., KIM, S.J. Correlation between stacking fault energy and deformation microstructure in high interstitial-alloyed austenitic steels. *Acta Materialia* 58.2010.

- Levy, A.V. The Platelet Mechanism of erosion of ductile metals. *Wear* v.108.n.1, 1986:p. 1-21.
- Levy, A.V. ; P. Chik, The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel. *Wear*, 1983.
- Liebhard, M.; Levy, A.; The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals, *Wear* 151. 1991.
- Morais, V. L. D. E. Estudo comparativo da deformação a frio e da resistência à corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 201 e AISI 304. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.
- Naim.M, Bahadur.S, The significance of the erosion parameter and the mechanisms of erosion in single-particle impacts, *Wear* 94. 1984: 219–232.
- Nohara, Kiyohiko, Yutaka Ono, and Nobuo Ohashi. "Composition and grain size dependencies of strain-induced martensitic transformation in metastable austenitic stainless steels." *Tetsu-to-Hagane* 63.5 (1977): 772-782.
- Oka, Y. I.; Matsumura, M. e Kawabata, T. Relationship between surface hardness and erosion damage caused by solid particle impact. *Wear* v.162 , 1993: p.688-695.
- Oliveira, D. L. Construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem. 84 f. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2015.
- Padilha, A. F., e Guedes L. C. Aços inoxidáveis austeníticos – Microestrutura e Propriedades. 1 ed. São Paulo: Hemus, , 1996, p. 170.
- Padilha, A.F.; Siciliano, F.Jr. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura, 3º ed., ABM, São Paulo, 2005, p.13.
- Padilha, A.F.; Materiais de engenharia - microestrutura e propriedades. Hemus, p.186-189, 2000.
- Paper, C. A Review : Erosion Wear Models. n. May, 2016.
- Pereira, C. H. S. Um estudo sobre a dureza e os mecanismos de desgaste de materiais metálicos em altas temperaturas. Monografia (Bacharelado em engenharia de materiais). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010.
- Pinto, H.; Effect of temperature and environment on the deformation mechanisms of austenitic steels during cryogenic wear, 1v. Tese (Doutorado) -Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 2005, p. 53.
- Pickering, F. B. Physical metallurgical developments of stainless steels. *Proc. Conf. Stainless steel*, 84, Gothenburg, 1984
- Post, C.B, e W.S Eberly. Stability of Austenite in Stainless Steels. *Trans. of the A.S.M.*, v.39,, , 1947: p. 868-890.
- Preece, Carolyn M. Cavitation erosion. *Treatise on Materials Science and Technology*, V. 16, Erosion 1979:P. 249-308.
- Reed, R. P. Nitrogen in austenitic stainless steels. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 41.3.1989.p. 16-21
- Sales, L. S. Envelhecimento na Martensita Induzida por Deformação em Aços Tipo AISI 304. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)- Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 89p.
- Schramm, R.E.; Reed, R.P.; Stacking Fault Energies of seven commercial austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions A*, v. 6A, p.1345-1351. 1975.

- Silva, A.L.V.C.; Mei, P.R.; Aços e Ligas Especiais, 2º ed., São Paulo, Edgard Blücher, 2006, p. 408-409.
- Speidel, M.O.; Pedrazzoli, R.M.; High nitrogen stainless steels in chloride solutions, *Materials Performance*, v. 31, n. 9, p. 59-62, 1992.
- Sundararajan.G, The solid particle erosion of metals and alloys, *Transact. Ind. Inst. Metals* 36 (1983) 474–495.
- Tavares, S; Pardal.J; Silva.M. Deformation induced martensitic transformation in a 201 modified austenitic stainless steel. *Materials Characterization*, v. 60, n. 8, p. 907–911, 2009.
- Tilly, G. P. A two stage mechanism of ductile erosion. *Wear*.v.23.n.1, 1973: p.87-96.
- Veloso, R.C. "Modelagem de curvas de degradação de correias transportadoras com base em covariáveis inerentes ao processo de mineração." Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2014.p.184.
- Viáfara, C. C. Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica. Teses.Usp.Br, p. 231, 2010.
- Vite-Torres, M.; Laguna-Camacho, J. R. ;Baldenebro-Castillo, R. E.; Gallardo Hernández, E. A.; Vera-Cárdena, E. E.; Vite-Torres, J.; Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round particles, *Wear* 301. 2013.p. 383-389.
- Vitos, L., Nilsson, J.O., Johansson, B..Alloying effects on the stacking energy in austenitic stainless steels from first-principles theory. *Acta Materialia*, v. 54, p.3821-3826, 2006.
- Wood, R. J. K ; Walker, J.C; Harvey, T.J; Wang.S;. Rajahram. SS. Influence of microstructure on the erosion and erosion – corrosion characteristics of 316 stainless steel. *Wear*, v. 306, n. 1–2, 2013. p. 254–262.
- Zum Gahr, K.H. Microestrutture and wear of materials. Tribology series, v10. Amsterdam: Elsevier, 1987: p.560.