

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

**INVESTIGAÇÃO DA EROSIVIDADE DE CINZAS ORIUNDAS DE COMBUSTÍVEL  
DERIVADO DE RESÍDUO EM AÇOS AISI 310 E AISI 321 TRATADOS  
TERMICAMENTE**

**RICARDO NOGUEIRA DE CASTRO**

VITÓRIA, ES

2021



**RICARDO NOGUEIRA DE CASTRO**

**INVESTIGAÇÃO DA EROSIVIDADE DE CINZAS ORIUNDAS DE COMBUSTÍVEL  
DERIVADO DE RESÍDUO EM AÇOS AISI 310 E AISI 321 TRATADOS  
TERMICAMENTE**

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

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian

Coorientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

**VITÓRIA-ES**

**2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo autor (SUBSTITUIR)

---

C355i Castro, Ricardo Nogueira de, 1987-  
INVESTIGAÇÃO DA EROSIVIDADE DE CINZAS  
ORIUNDAS DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO  
EM AÇOS AISI 310 E AISI 321 TRATADOS  
TERMICAMENTE / Ricardo Nogueira de Castro. - 2021.  
97 f. : il.

Orientador: Cherlio Scandian.  
Coorientador: Washington Martins da Silva Junior  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro  
Tecnológico.

1. Erosão. 2. Aço inoxidável austenítico. 3. Aço -  
Tratamento térmico. 4. Resíduos como combustível. I.  
Scandian, Cherlio. II. Silva Junior, Washington Martins da  
Silva Junior. III. Universidade Federal do Espírito Santo.  
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

---

**RICARDO NOGUEIRA DE CASTRO**

**INVESTIGAÇÃO DA EROSIVIDADE DE CINZAS ORIUNDAS DE COMBUSTÍVEL  
DERIVADO DE RESÍDUO EM AÇOS AISI 310 E AISI 321 TRATADOS  
TERMICAMENTE**

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

Aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

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

---

**Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior**  
**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Coorientador**

---

**Prof. Dr. Sérgio Souto Maior Tavares**  
**Universidade Federal de Fluminense**

---

**Prof. Dr. Nathan Fantecelle Strey**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**



Dedico ao meu mentor, e amigo; Dr.  
Cherlio Scandian.

Vivos: minhas desculpas por qualquer  
erro ou omissão;

Aos que já se foram: minhas homenagens  
e saudades.



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos que não me atrapalharam, mantendo-se profissionais na convivência, mesmo perante a ausência de afinidade pessoal;

A minha mãe que sempre batalhou pela minha formação educacional;

À Fundação de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da minha bolsa;

Ao diretor técnico Luciano Infiesta, da companhia Carbogás Energia Ltda. pela doação das cinzas e das amostras de aço inoxidável austenítico grau 310;

Ao coordenador e pesquisador de aços inoxidáveis Dr. Willian da Silva Labiapari, da empresa Aperam Inox América do Sul S.A. pela doação das amostras de aço inoxidável austenítico AISI 321.

À pesquisadora Dra. Valdicleide Silva Mello, do Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais do DEMAT/UFRN, pela obtenção das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV);

Ao técnico Carlos Alberto Rosa, do Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela execução de suas atribuições;

Aos colegas do mestrado e do Laboratório TRICORRMAT, pelas sugestões nas diversas atividades;

À especialista de desenvolvimento de materiais Michelli Siqueira Monteiro de Barros, do Laboratório de Materiais da empresa Prysmian Group filial Cariacica, pela obtenção das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), e também pelo carisma;

À amiga de mestrado e do Laboratório TRICORRMAT, Maysa Santos Pacheco de Oliveira, pelas ideias, discussões, ajuda nas diversas atividades, amizade e boa convivência;

Aos meus predecessores na área de estudo, MSc. Diego Pagoto Calvi e MSc Bruno Corveto Bragança, pelo apoio intelectual e técnico;

Ao amigo Eduardo de Almeida Bozzeda, pela parceria inestimável na execução dos ensaios;

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto Cardoso Passos, do Laboratório de Fenômeno de Transportes (LFT/UFES), pela concessão no uso do forno para os tratamentos térmicos das amostras, como também pela confiança;

Ao engenheiro de laboratório e professor Dr. Nathan Fantecelle Strey, do Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do

Espírito Santo (UFES) pelas importantes discussões, sugestões e paciência;

Ao professor Dr. Sérgio Souto Maior Tavares, do Universidade Federal Fluminense, pelo apoio intelectual na metalografia dos aços inoxidáveis, além de toda consideração e paciência;

Ao professor Dr. Washington Martins da Silva Junior, da Universidade Federal de Uberlândia, e que fora o carismático professor na Universidade Federal do Espírito Santo, por toda sua orientação, como também pelo trabalho de reunir todos os esforços em prol dessa dissertação;

E por último, mas mais importante, àquele que contribuiu para minha formação como engenheiro, reconhecendo minha capacidade e dedicação, que soube exigir e motivar ao mesmo tempo, que se preocupa com o ensino na sua essência, não confundindo memória com inteligência. Ao meu mentor, filósofo e amigo, Dr. Cherlio Scandian, minha eterna e sincera gratidão.

“Nunca confunda educação com  
inteligência, você pode fazer um  
doutorado e ainda ser um idiota.”

Richard P. Feynman



## RESUMO

A sociedade enfrenta atualmente dois desafios: desenvolver fontes de energia renováveis e economicamente viáveis; e buscar um destino sustentável para os resíduos. A produção de energia a partir de combustível derivado de resíduo pode solucionar parte de ambos problemas. Contudo, deve-se estudar o sistema tribológico envolvido nessa tecnologia para torná-la cada vez mais rentável. Assim, investigaram alguns fatores e comparou-se a resistência ao desgaste erosivo em condições próximas àsquelas encontradas nos ciclones, por meio de ensaios de erosão em amostras de aços inoxidáveis austeníticos, graus AISI 310 e AISI 321, após tratamentos térmicos, em erosímetro a jato de ar padronizado conforme ASTM G76-18. Realizaram-se tratamentos de solubilização e envelhecimento nos graus 310, e de solubilização e de estabilização nos graus 321. Avaliaram-se a dureza, a microestrutura e a rugosidade superficial das amostras antes dos tratamentos. Executaram os ensaios nas seguintes condições: a temperatura ambiente, a 30 g/min de fluxo de partículas durante 10 minutos, a 30° e 90° de ângulo de impacto, com alumina 50 µm e com cinzas (70% de 150 à 425 µm) provenientes de um reator termoquímico destinado a produção de combustível derivado de resíduo. Avaliou-se a erosividade das cinzas por meio de ensaios em amostras de aço inoxidável 304 a 30 m/s e 70 m/s, dos quais resultaram em taxas de erosão próximas das encontradas com alumina na norma. A análise sob microscópio eletrônico de varredura encontrou mecanismos dúcteis, como microssulcamento e microcorte, com predominância do primeiro quando ensaiado com as cinzas e do segundo quando ensaiado com alumina. As taxas de desgaste foram maiores que as das cinzas na maioria das condições. Quando ensaiado com alumina, desgasta-se mais à 30°, contudo, quando ensaiado com cinzas, desgasta-se mais à 90°. Percebeu-se um aumento da resistência a erosão do grau 310 quando envelhecido contra cinzas a 90°, e um aumento da resistência a erosão do grau 321 quando estabilizado contra alumina a 30°. As micrografias revelaram que a menor resistência dos aços tratados por solubilização ocorreu devido ao crescimento de grãos.

Palavras-chaves: Erosão a jato de ar. Cinzas. Alumina. Aço inoxidável austenítico. Grau AISI 310. Grau AISI 321. Tratamento térmico.



## ABSTRACT

Society currently faces two challenges: developing renewable and economically viable energy sources; and seek a sustainable destination for waste. The production of energy from fuel derived from waste can solve part of both problems. However, one must study the tribological system involved for this technology to make its increasingly profitable. Thus, some factors were investigated and resistance to erosive wear was compared under conditions close to those found in cyclones, by means of erosion tests on austenitic stainless steels, grades AISI 310 and AISI 321, after heat treatments, at air jet erosimeter standardized according to ASTM G76-18. The treatments were solubilization and aging in grades 310, and solubilization and stabilization in grades 321. The hardness, microstructure and surface roughness were evaluated before treatments. The test conditions were: at room temperature, at 30 g / min of particle flow for 10 minutes, at 30 ° and 90 ° of impact angle, with 50 µm alumina and ash (70% from 150 to 425 µm) from a thermochemical reactor for the production of fuel derived from waste. Ash erosivity was evaluated by testing samples of stainless steel 304 at 30 m/s and 70 m/s, which resulted in erosion rates close to those found with alumina in the standard. The analysis under scanning electron microscope found ductile mechanisms, such as microcracking and microcutting, with a predominance of the first when tested with ash and the second when tested with alumina. Wear rates were higher than ash in most conditions. When tested with alumina, it wears more at 30 °, however, when tested with ash, it wears more at 90 °. An increase in resistance against ash erosion at 90° of grade 310 was observed when aged, and an increase in resistance against erosion of alumina at 30° of grade 321 when stabilized. The micrographs revealed that the lower resistance of the steels treated by solubilization occurred due to the growth of grains

Keywords: Air jet erosion, alumina, ash, austenitic stainless steels, grade AISI 310, grade AISI 321, heat treatments.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Ilustração da diferença entre (a) abrasão dois corpos e (b) erosão por partículas duras em relação ao contato entre partícula e superfície e às forças atuantes .....  | 29 |
| Figura 2 - Desenho esquemático das forças atuando na partícula durante uma colisão com uma superfície horizontal.....   | 30 |
| Figura 3 - Ilustração esquemática de quatro métodos diferentes de exposição de amostras ao desgaste erosivo em testes de laboratório: (a) método de impacto a jato; (b) circuito de recirculação; (c) acelerador centrífugo; (d) equipamento de braço giratório ..... | 31 |
| Figura 4 - Seções transversais nos locais de impacto formados por partículas duras sobre um metal dúctil, mostrando típicas formas. A direção do impacto foi da esquerda para a direita .....   | 33 |
| Figura 5 - Gráficos da taxa de erosão em função da dureza da partícula com ângulo de impacto de 90°: (a) velocidade da partícula 25 m.s-1 e (b) velocidade da partícula 45 m.s-1 .....  | 34 |
| Figura 6 - Dependência da taxa de erosão em relação à dureza das partículas, tendo como superfície de ataque um aço endurecido C60H, ensaiado com partículas de vários materiais suspensas em gás .....   | 35 |
| Figura 7 - Diferença da taxa de erosão do aço inoxidável AISI 316 devido a esferas de vidro e a partículas angulosas (vidro moído), suspensas em água.....  | 36 |
| Figura 8 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de erosão do aço inoxidável austenítico AISI 304 SS em temperatura de 923 K.....  | 37 |
| Figura 9 - Ângulo de incidência de uma partícula causando erosão na superfície....  | 38 |
| Figura 10 -Fator de redução da tensão de escoamento dos aços inoxidáveis austeníticos em comparação com o limite de escoamento do aço carbono .....   | 40 |
| Figura 11- Curva TTT de diferentes precipitados em aço inoxidável austenítico AISI 321 obtido usando o software JMatPro .....   | 42 |
| Figura 12 - Curva TTT para a precipitação da fase sigma em graus (a) AISI 310 e (b) AISI 310S.....  | 43 |
| Figura 13 - Micrografia em MEV de uma superfície após impacto único .....   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 14 - Micrografia em MEV da superfície do aço AISI 304 após a erosão.....  | 46 |
| Figura 15 - Micrografia eletrônica do aço 304 erodido a 90° e a 40 m/s.....  | 47 |
| Figura 16 - Desenho esquemático de um ciclone.....   | 49 |
| Figura 17- Gráfico da taxa de erosão pelas partículas na parede do ciclone .....   | 49 |
| Figura 18 - Fotomicrografia via MEV da morfologia da alumina ensaios.....  | 53 |
| Figura 19 - Gráfico mostrando a distribuição granulométrica acumulada da alumina .....   | 54 |
| Figura 20 - Fotomicrografia via MEV mostrando a morfologia da das cinzas antes dos ensaios .....   | 55 |
| Figura 21 - Amostra de aço carbono 1020.....   | 55 |
| Figura 22 - Amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304.....  | 56 |
| Figura 23 - Amostras de aço inoxidável austenítico 310: a) envelhecida e b) solubilizada. A superfície escura deve-se a oxidação durante os tratamentos .....  | 57 |
| Figura 24 - Amostras antes dos ensaios de aço inoxidável 321: a) solubilizado e b) estabilizado. A superfície escura deve-se a oxidação durante os tratamentos .....   | 58 |
| Figura 25 - Desenho esquemático do erosímetro: (1) Alimentação e tratamento de ar; (2) Controle do fluxo de ar; (3) Alimentador de partículas; (4) Acelerador de partículas; (5) Câmara de ensaio; (6) Saída dos gases ..... | 60 |
| Figura 26 - Distribuição Granulométrica dos grãos das cinzas.....  | 66 |
| Figura 27 - Micrografia do aço AISI 1020 sob ataque químico por doze segundos de imersão em solução de Nital.....  | 67 |
| Figura 28 - Micrografia do aço inoxidável AISI 304. Ataque eletrolítico em solução de ácido oxálico durante um minuto .....  | 67 |
| Figura 29 - Micrografia de aço inoxidável austenítico 310 solubilizado a 1100 °C por 1 hora sob ataque eletrolítico em solução de 10% de ácido oxálico por 30 segundos   | 68 |
| Figura 30 - Micrografia de aço inoxidável austenítico 310 envelhecido a 800 °C por 1 hora sob ataque químico por solução de Vilella por seis minutos .....   | 69 |
| Figura 31 - Micrografia de aço inoxidável 321 solubilizado a 1100 °C por 1 hora. Ataque químico por solução de Vilella oxálico por seis minutos .....  | 70 |
| Figura 32 - Micrografia de aço inoxidável 321 estabilizado a 900 °C por 1 hora sob   |    |

|  |    |
|--|----|
| ataque eletrolítico por solução de 10% de ácido oxálico por trinta segundos .....  | 70 |
| Figura 33 - Velocidade das partículas abrasivas em função da pressão dinâmica ...  | 71 |
| Figura 34 - Amostra de aço carbono 1020 após ensaio de erosão por alumina 50 µm, a 30 m/s de velocidade, a 30 g/min de fluxo, 90° de ângulo de impacto das partículas e por 10 minutos.....  | 72 |
| Figura 35 - Amostra de aço inoxidável AISI 304 após ensaio de erosão por alumina 50 µm, a 30 m/s de velocidade, a 30 g/min de fluxo, 90° de ângulo de impacto das partículas e por 10 minutos .....  | 72 |
| Figura 36 - Desgaste em função do tempo de exposição para as amostras de aço carbono 1020 ensaiadas com alumina 50 µm a 30 m.s <sup>-1</sup> de velocidade, fluxo de 2 mg·mm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> e ângulo de impacto de 90° da partícula..... | 73 |
| Figura 37 - Amostras de aço carbono 1020 após ensaio de erosão por alumina 50 µm, a 30 m/s de velocidade, a 30 g/min de fluxo, 90° de ângulo de impacto das partículas e por 10 minutos.....   | 74 |
| Figura 38 - Micrografia via MEV da área erodida pela alumina a 90° do aço inoxidável 310 envelhecido, a 30 m/s de velocidade de partícula.....   | 75 |
| Figura 39 - Micrografia via MEV da área erodida pela alumina a 30° do aço inoxidável 321 solubilizado, a 30 m/s de velocidade de partícula .....   | 76 |
| Figura 40 - Micrografia via MEV da área erodida pelas cinzas a 90° do aço inoxidável austenítico 321 envelhecido, a 30 m/s de velocidade de partícula.....   | 76 |
| Figura 41 - Micrografia via MEV da área erodida pelas cinzas a 30° do aço inoxidável 310 solubilizado, a 30 m/s de velocidade de partícula .....   | 77 |
| Figura 42 - Efeito médio da partícula abrasiva na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula .....   | 79 |
| Figura 43 - Efeito médio do ângulo de impacto das partículas na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula.....  | 79 |
| Figura 44 - Efeito médio dos materiais (graus/tratamento) na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula.....   | 80 |

Figura 45 - Efeito médio combinado da partícula abrasiva com o material (grau/tratamento) na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula..... 81

Figura 46 - Efeito médio combinado da partícula abrasiva com o ângulo na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula ..... 82

Figura 47 - Efeito médio combinado da partícula abrasiva com o material (grau/tratamento), e com o ângulo de impacto na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula ..... 82

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Resultados dos ensaios entre laboratórios da norma ASTM G76-18 .....   | 32 |
| Tabela 2 - Fases e precipitados de aços inoxidáveis .....   | 40 |
| Tabela 3 - Resumo dos trabalhos de erosão a jato de ar em aços inoxidáveis .....  | 43 |
| Tabela 4 - Composições químicas de cinzas geradas em gaseificadores de RSU ...  | 50 |
| Tabela 5 - Composição química do aço inoxidável AISI 310 .....  | 56 |
| Tabela 6 - Composição química do aço inoxidável AISI 321 .....  | 57 |
| Tabela 7 - Durezas das amostras de aços inoxidáveis, graus 310 e 321 .....  | 65 |
| Tabela 8 - Ra das amostras de aços inoxidáveis, graus 310 e 321 .....   | 65 |
| Tabela 9 - Vazão mássica dos funis .....  | 71 |
| Tabela 10 - Taxas médias de erosão ( $(10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{g})$ ) em aço carbono 1020 e aço inoxidável 304 na condição de 30 m/s, 50 $\mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ , 30 g/min, a 90° ..... | 73 |
| Tabela 11 - Taxas de erosão ( $10^{-3} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ) em aço inoxidável austenítico AISI 304 com as cinzas nas condições da norma ASTM em G76-18 .....                      | 74 |
| Tabela 12 - Taxas médias de erosão (mg/g), a 30 m/s de velocidade de partícula, das amostras de aços inoxidáveis, grau 310 e grau 321, tratadas termicamente .....                                    | 77 |



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>27</b> |
| 2.1 TRIBOLOGIA.....  | 27        |
| 2.2 DESGASTE EROSIVO .....   | 28        |
| <b>2.2.1 Mecanismos de Desgaste por Deformação Plástica</b> .....                | <b>32</b> |
| <b>2.2.2 Parâmetros que Influenciam o Desgaste Erosivo por Fratura Dúctil.</b>   | <b>33</b> |
| 2.2.2.1 Dureza da Partícula.....   | 34        |
| 2.2.2.2 Forma da Partícula .....   | 36        |
| 2.2.2.3 Tamanho da Partícula .....   | 36        |
| 2.2.2.4 Velocidade da Partícula .....  | 37        |
| 2.2.2.5 Ângulo de Impacto.....   | 38        |
| 2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS .....   | 39        |
| <b>2.3.1 Erosão em Aços Inoxidáveis</b> .....                                    | <b>43</b> |
| 2.4 REATOR TERMOQUÍMICO.....   | 48        |
| 2.5 SEPARADOR CENTRÍFUGO CICLÔNICO .....   | 48        |
| <b>3 METODOLOGIA</b> .....   | <b>53</b> |
| 3.1 MATERIAIS.....   | 53        |
| <b>3.1.1 Abrasivos</b> .....   | <b>53</b> |
| 3.1.1.1 Alumina.....   | 53        |
| 3.1.1.2 Cinzas.....  | 54        |
| <b>3.1.2 Contracorpos</b> .....  | <b>55</b> |
| 3.1.2.1 Amostras de Aço Carbono AISI 1020.....                                   | 55        |
| 3.1.2.2 Amostras de Aço Inoxidável AISI 304 .....                                | 56        |
| 3.1.2.3 Amostras de Aço Inoxidável AISI 310 .....                                | 56        |
| 3.1.2.4 Amostras de Aço Inoxidável AISI 321 .....                                | 57        |
| 3.2 MÉTODOS.....   | 58        |
| <b>3.2.1 Ensaios de Durezas nas Amostras de Aços Inoxidáveis, graus AISI 310</b> |           |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>e AISI 321</b> .....   | <b>58</b> |
| <b>3.2.2 Acabamento Superficial das Amostras de Aços Inoxidáveis, graus AISI 310 e AISI 321</b> ..... | <b>58</b> |
| <b>3.2.3 Análise de Parâmetros de Rugosidade Superficial das Amostras</b> .....                       | <b>59</b> |
| <b>3.2.4 Tratamento Térmico nas Amostras de Aços Inoxidáveis, graus AISI 310 e AISI 321</b> .....     | <b>59</b> |
| <b>3.2.5 Análise da Distribuição Granulométrica dos Grãos das Cinzas</b> .....                        | <b>59</b> |
| <b>3.2.6 Metalografia das Amostras</b> .....  | <b>59</b> |
| <b>3.2.7 Ensaio Tribológicos</b> .....  | <b>60</b> |
| 3.2.7.1 Erosímetro TRICORRMAT/UFES .....  | 60        |
| 3.2.7.2 Controle do Fluxo de Partículas .....   | 60        |
| 3.2.7.3 Mensuração das Massas de Partículas Impactadas .....  | 61        |
| 3.2.7.4 Controle da Velocidade de Impacto das Partículas .....  | 61        |
| 3.2.7.5 Limpeza das Amostras .....  | 61        |
| 3.2.7.6 Mensuração das Massas das Amostras .....  | 61        |
| 3.2.7.7 Ensaio de Erosão para Calibração do Erosímetro .....  | 62        |
| 3.2.7.8 Ensaio de Erosão para Análise da Erosividade das Cinzas .....                                 | 62        |
| 3.2.7.9 Ensaio de Erosão das Amostras de Aço Inoxidável .....   | 62        |
| 3.2.7.8 Investigação dos Micromecanismos de Desgaste .....  | 62        |
| 3.2.7.9 Análise Estatística dos Resultados .....  | 63        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | <b>65</b> |
| 4.1 ENSAIOS DE DUREZA NOS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS, GRAUS AISI 310 E AISI 321 .....                       | 65        |
| 4.2 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS .....  | 65        |
| 4.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS .....   | 66        |
| 4.4 ANÁLISE DA MICROSTRUTURA DAS AMOSTRAS .....   | 66        |
| 4.5 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS .....  | 71        |
| <b>4.5.1 Controle do Fluxo de Partículas</b> .....  | <b>71</b> |
| <b>4.5.2 Controle da Velocidade de Impacto das Partículas</b> .....                                   | <b>71</b> |

|   |    |
|---|----|
| 4.5.3 Ensaio de Erosão para Validação do Erosímetro ..... | 72 |
| 4.5.4 Taxas de Erosão pelas Cinzas .....                  | 74 |
| 4.5.6 Efeito Médio dos Fatores na Taxa de Erosão .....    | 77 |
| 5 CONCLUSÕES .....  | 83 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                  | 85 |



## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as economias do mundo são impulsionadas por estilos de vida baseados no consumo, onde a produção de resíduos é o subproduto mais evidente e desfavorável. A taxa de geração desses Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) deverá aumentar para 2,2 bilhões de toneladas por ano até 2025 em todo o mundo. No entanto, nos países em desenvolvimento, a coleta, transporte e disposição de resíduos ainda é um desafio, enquanto nos países desenvolvidos novas tecnologias são usadas para converter os RSU em diferentes subprodutos, tais como: calor, eletricidade, adubo e biocombustíveis (MOYA, et al. 2017).

Além disso, outro problema que domina a discussão pública é a mudança climática. Uma crise climática põe em perigo o ambiente natural ao nosso redor, nosso bem-estar hoje e o bem-estar daqueles que virão depois de nós. E esse perigo é causado pela emissão de gases de efeito, da qual a produção de energia é responsável por 87% em escala global. Para acabar com a mudança climática, a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera precisa estabilizar-se e, para isso, as emissões mundiais de gases de efeito estufa devem cair para zero. Baixar as emissões para zero será um dos maiores desafios do mundo nos próximos anos (ROSER 2020).

A produção de energia a partir de resíduos pode solucionar parte de ambos os problemas. Os RSU armazenam energia na forma de ligações químicas entre moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio. Essas ligações químicas liberam grande quantidade de energia quando quebradas, podendo ser utilizados para geração de bioenergia, por meio de um processo de tratamento e separação de múltiplos estágios que produz o Combustível Derivado de Resíduo (CDR) (SIPRA, GAO e SARWAR 2018).

Resíduo Sólido Municipal (RSM), que contém resíduos da sociedade humana, incluindo embalagens de produtos, garrafas, baterias, resíduos orgânicos, finos, têxteis, tecidos sanitários, plásticos, vidro e metais, entre outros, foram utilizados em Boa Esperança, Minas Gerais, Brasil, para produção de CDR. Esse trabalho demonstrou que o CDR produzido pode ser usado como biocombustível em uma usina de gaseificação sem o uso de adição de combustível sólido ou fóssil, processando até 55 toneladas por dia de RSU equivalendo a uma produção estimada de 1,5 MWh de eletricidade (INFIESTA, et al. 2019).

Contudo, a conversão do CDR em gás de síntese gera, pela oxidação parcial, cinzas que precisam ser removidas por meio de um separador ciclônico centrífugo, denominado por vezes de ciclone. Uma vez que o equipamento opera em altas temperaturas e com velocidades relativamente altas, ocorrem considerável desgaste erosivo, limitando a vida útil e interrompendo a produção. Esse fenômeno ocorre em outros setores da engenharia, como nos ventiladores de indústrias de beneficiamento de minério, nos queimadores instalados nos altos-fornos em indústrias siderúrgicas devido à passagem de carvão em pó e óleo para combustão, nas válvulas do tipo “Choke”, nos bocais de foguetes, nos motores de helicópteros que operam em terrenos com poeira entre outros, e causam grandes complicações econômicas e de segurança (HAUGEN, et al. 1995) (ROY 2006).

Atualmente utiliza-se aço inoxidável austenítico grau AISI 310 para a construção dos separadores, pois possuem conhecidas boas propriedades anticorrosivas e de resistência mecânica em altas temperaturas, embora apresente resistência a erosão em temperatura ambiente regular. e possua custo elevado, pois possui alto teor de cromo e níquel. Trabalhos em temperatura ambiente foram realizados com diversos aços inoxidáveis, usando abrasivos padrões, como alumina, sílica e carboneto de silício, dos quais poucos deles foram executados com erosímetro a jato de ar.

Contudo, pouco se sabe sobre a influência da temperatura, ou de tratamentos térmicos, no comportamento em desgaste erosivo dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 310 e AISI 321, assim como a influência das cinzas, geradas no processo de produção de gás de síntese a partir de CDR, nos mecanismos de desgaste.

Assim, o objetivo desse trabalho é investigar fatores, em especial a cinzas, envolvidos no desgaste erosivo de ciclones de reatores termoquímicos, e comparar a resistência a erosão e o efeito da exposição a altas temperaturas ou a tratamentos térmicos, do aço inoxidável austenítico AISI 310 e do AISI 321.

Para alcançar tais objetivos o trabalho desenvolvido foi organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre a erosão em materiais dúcteis, assim como de aços inoxidáveis e de ciclones foi realizada; os materiais e as metodologias utilizadas são descritas no Capítulo 3; no Capítulo 4 os resultados são mostrados e discutidos confrontando-os com a literatura pertinente; no Capítulo 5 as conclusões e considerações finais sobre o trabalho são apresentadas e no final, as referências bibliográficas utilizadas ao longo de todo o trabalho são exibidas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão abordados nessa seção os conceitos relativos a Tribologia, abordando as definições e conceitos envolvidos ao tema. Em seguida, alguns parâmetros que influenciam os processos de desgaste erosivo, entre eles: propriedades da partícula erosiva (dureza, forma, tamanho, velocidade de impacto e ângulo de impacto), e também os mecanismos de desgaste erosivo dúctil. Além disso, será apresentado alguns trabalhos pertinentes sobre erosão em aços inoxidáveis. Por fim, será abordada as tecnologias alguns estudos de desgaste erosivo em separadores centrífugos ciclônicos.

### 2.1 TRIBOLOGIA

Nascida da experiência dos físicos, químicos e engenheiros mecânicos, como também pela contribuição de engenheiros de materiais e metalúrgicos, a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo, englobando o atrito, desgaste e lubrificação, é denominada pela primeira vez em 1966, por um comitê do governo britânico, como Tribologia, derivada da palavra grega “tribos” que significa esfregar ou atritar. Porém, o estudo dessa área de conhecimento remonta desde o período paleolítico, e o caso mais famoso é o das civilizações egípcias (1880 a.C.) na construção das pirâmides (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017)

Tribologia é uma área do conhecimento que exige uma análise sistêmica, pois suas variáveis são de elevada sensibilidade, dificilmente lineares ou quando são em um intervalo bem restrito. Considerada como a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo, abrange o estudo do atrito, da lubrificação e do desgaste (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017). Além disso, tribologia não é um assunto independente, sendo improvável que a aquisição de novos conhecimentos tribológicos por si só crie novas tecnologias. No entanto, a ausência do conhecimento necessário de tribologia já atuou no passado como um freio severo no desenvolvimento de novas tecnologias (JOST 1990).

A erosão por partículas duras difere da abrasão de três corpos, que também envolve partículas soltas, principalmente na origem das forças entre as partículas e a superfície de desgaste. Na abrasão, as partículas são pressionadas contra a superfície e se movem ao longo dela, geralmente porque estão presas entre duas superfícies deslizantes. Na erosão, várias forças de diferentes origens podem atuar

em uma partícula em contato com uma superfície sólida, como por exemplo, a força de arrasto devido ao escoamento do fluido, que pode ser líquido ou gasoso, responsável por pela velocidade da partícula. No entanto, a força dominante para o processo de desgaste, responsável principalmente por desacelerá-la de sua velocidade inicial de impacto, é a força de contato exercida pela superfície. Quando o fluido é gasoso a erosão é denominada *erosão a jato de ar*, e quando o fluido é líquido, *erosão por lama abrasiva* (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Como se pode perceber, os objetos de estudo da tribologia são comuns em diversas áreas da vida humana, e principalmente na indústria, tornando-a essencial para o desenvolvimento tecnológico e econômico. Como exemplo, pode-se citar que cerca de 20% de toda energia produzida pelo homem ser utilizada para superar a energia dissipada pelo atrito. No entanto, conhecimentos tribológicos resultaram em soluções inovadoras onde o atrito foi reduzido em até 50 a 90% do nível normalmente encontrado em veículos usados hoje em dia. Na área de desgaste, uso de novas soluções de materiais resultou em uma melhoria de cinco vezes na vida útil em moinhos semi-autógenos em comparação com o aço ligado ao manganês, que era o aço normalmente escolhido (HOLMBERG e ERDEMIR 2017).

Da mesma forma, o estudo da resistência à erosão de uma superfície interna dura de um tubo de aço AISI 1045 permitiu descobrir uma opção cinco vezes melhor em relação ao aço AISI 1020, que era o material de tubo de aço padrão no manuseio de lamas abrasivas. Outro exemplo foi a melhoria na vida útil em três vezes alcançada pelo uso de ferros fundidos branco ligado ao cromo em comparação com os graus convencionais em serviço de bombeamento de lamas abrasivas. Em outro caso, ao substituir todos os sistemas de bombeamento, a vida útil das bombas aumentou mais de 70% e a economia de energia foi de até 30% (HOLMBERG, et al. 2013). E em um recente trabalho, a volume perdido por cavitação foi reduzido a 46% quando aplicado um revestimento nano cerâmico de ZrC (DING, JIANG e XU 2019). Portanto será revisado alguns aspectos do desgaste erosivo, em com enfoque especial nos materiais dúcteis.

## 2.2 DESGASTE EROSIVO

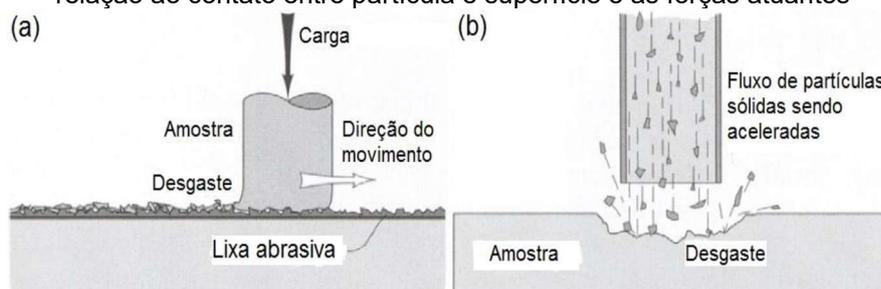
O desgaste erosivo encontra-se em processos nas indústrias de mineração, de siderurgia, de petróleo e gás, entre outras. Portanto, empresas desses setores têm mostrado interesse em investigar soluções que eliminem ou amenizem os danos

causados pela erosão, que corresponde a 8% do desgaste nas indústrias (EYRE 1976). Dowson afirma que cerca de 10% das falhas de desgaste têm como causa a erosão (DOWSON 1998).

De acordo com a norma ASTM G40/2002, erosão é definido a como a perda progressiva do material original de uma superfície devido à interação mecânica entre essa e um fluido, que pode ser constituído de um ou vários componentes. De forma semelhante, o desgaste erosivo por partículas duras é definido como a remoção de material ocasionado pelo impacto repetitivo de partículas que se movem com velocidades superiores a 5 m/s, constituindo um importante mecanismo de desgaste, observado em várias condições ambientais (SUNDARARAJAN e SHEWMON 1983). Portanto, a erosão por partículas duras difere de outros tipos de erosões, como aquela que ocorre pelo impacto de líquidos, ou por cavitação, ou por lama, entre outros (ROY 2006) (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS 2017).

Difere também da abrasão tanto no tempo de duração do contato entre a partícula e a superfície, sendo de menor duração na erosão, quanto na origem das forças envolvidas, pois enquanto o abrasivo é pressionado contra a superfície, na erosão, a partícula dura, a principal força envolvida é força de contato da superfície responsável pela desaceleração da partícula ao colidir com a superfície (Figura 1). Outras forças envolvidas são: a força de gravidade; forças de contato exercidas por partículas vizinhas e as forças de arrasto do fluido. A (Figura 2) mostra as forças mencionadas que agem sobre a partícula no momento da colisão contra uma superfície, danificando-a e removendo material. A erosão, também pode ser diferenciada da abrasão de acordo com a dimensão do dano causado pela partícula à superfície. Na erosão, a ordem de grandeza do dano é muito maior que a dimensão da partícula, devido à quantidade de energia cinética envolvida na colisão (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

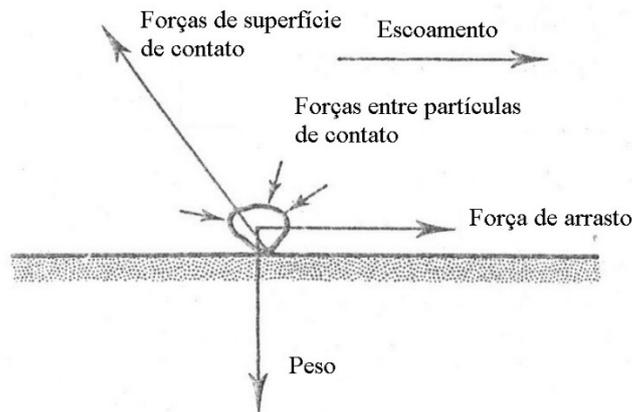
Figura 1 - Ilustração da diferença entre (a) abrasão dois corpos e (b) erosão por partículas duras em relação ao contato entre partícula e superfície e às forças atuantes



Fonte: (STACHOWIAK e STACHOWIAK 2004).

Nota: adaptado pelo autor

Figura 2 - Desenho esquemático das forças atuando na partícula durante uma colisão com uma superfície horizontal

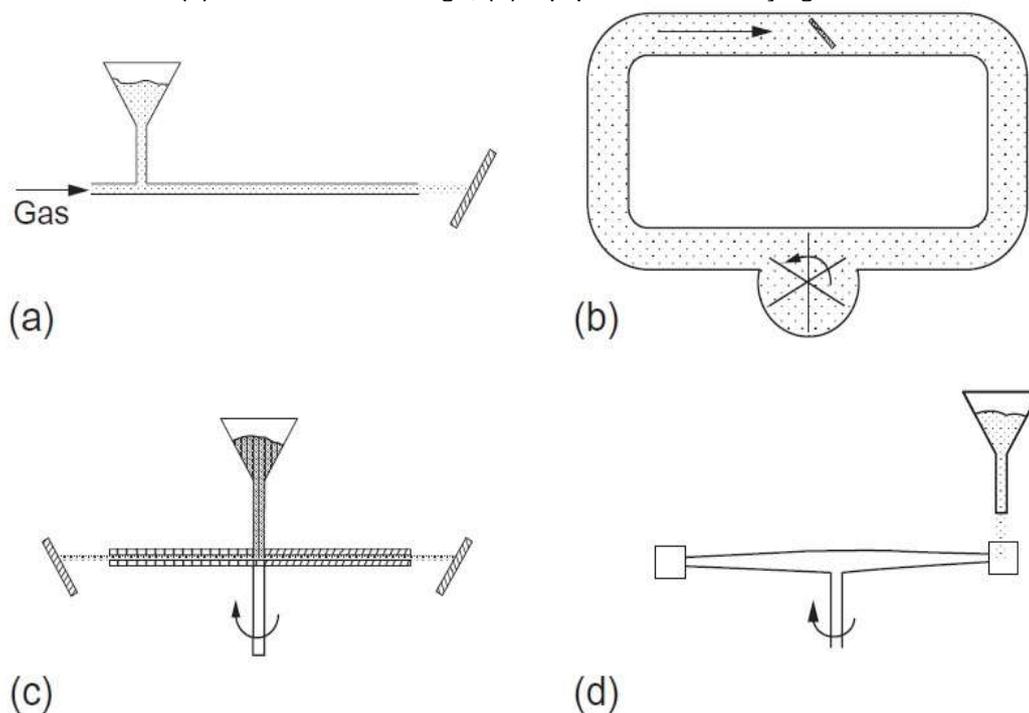


Fonte: Adaptado (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Nota: adaptado pelo autor.

Os métodos comumente usados para ensaios de erosão em laboratório podem ser divididos em aqueles em que as partículas são aceleradas em um fluxo de gás ou líquido e aqueles em que o movimento circular é usado para atingir a velocidade de impacto. A Figura 3 mostra diagramas esquemáticos de quatro tipos de método de teste. No método mostrado em (a), as partículas são aceleradas em uma corrente de fluido ao longo de um bocal, então atingem o material alvo que é mantido a alguma distância da extremidade do bico em um ângulo fixo. Este teste, frequentemente denominado erosão a jato, pode ser usado com partículas de gás (geralmente com ar como gás de arraste) ou com um fluido líquido, geralmente com óleo ou água. Bocais de dimensões muito diferentes podem ser usados para diferentes aplicações: os testes práticos cobrem a faixa de cerca de 1 a 50 mm de diâmetro. Um pequeno bocal resulta em uma área correspondentemente pequena de desgaste na amostra, mas requer apenas baixas taxas de alimentação de fluido e partículas. Um bico maior é mais adequado para testar materiais com microestruturas heterogêneas de grande escala, como alguns materiais cerâmicos de granulação grossa e compostos, mas exige um suprimento correspondentemente maior de fluido e erodente. As velocidades de impacto na faixa de 10 a 100 m/s são facilmente alcançáveis, embora com maiores comprimentos de bocal, velocidades mais altas sejam possíveis para partículas transportadas por gás. Na maioria dos ensaios desse tipo, as partículas são usadas apenas uma vez, evitando quaisquer problemas de degradação de partículas por impacto. Com bocais muito grandes, no entanto, torna necessário a recirculação, e deve-se tomar cuidado para garantir que a taxa de erosão não mude durante o teste devido à fragmentação ou atrito das partículas erodentes que alteram seus tamanhos ou e suas formas.

Figura 3 - Ilustração esquemática de quatro métodos diferentes de exposição de amostras ao desgaste erosivo em testes de laboratório: (a) método de impacto a jato; (b) circuito de recirculação; (c) acelerador centrífugo; (d) equipamento de braço giratório



Fonte: (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Nota: Adaptado pelo autor.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define taxa média de erosão ou taxa acumulada de erosão, no contexto de erosão por impacto, a quantidade total de material perdido de uma superfície sólida durante todos os períodos de exposição, desde que foi inicialmente exposto ao impacto a superfície recém preparada (a menos que indicado de outra forma pelo contexto, está implícito que as condições de impacto permaneceram os mesmos durante todos os períodos de exposição, ausente de acabamento superficial intermediária (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS 2017). A Tabela 1 abaixo lista os valores de taxa média de erosão encontrados por diferentes laboratórios (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018).

Para qualquer dos casos, a massa de material removido da superfície será tanto maior quanto maior for a soma das massas das partículas que colidem na superfície, com exceção ao período de incubação, que em alguns casos partículas abrasivas são embutidas no início do processo erosivo e assim aumentam a massa da amostra, em vez de diminuir como é esperado (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

A taxa varia em função das propriedades das partículas (dureza, forma, tamanho, velocidade de impacto, ângulo do impacto, intensidade do fluxo, entre outros), das

propriedades do material da superfície (dureza, tenacidade a fratura, etc.) e de parâmetros do meio ambiente (temperatura, umidade, entre outros). A combinação desses parâmetros determina a ocorrência de fratura frágil ou fratura dúctil, esse último será revisado a seguir alguns aspectos (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017)

Tabela 1- Resultados dos ensaios entre laboratórios da norma ASTM G76-18

| Condições do Ensaio  | Lab. | Nº de réplicas | Taxa média de erosão<br>( $10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{g}$ ) | Desvio padrão<br>( $10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{g}$ ) | Desvio da Média<br>( $10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{g}$ ) |
|--|------|----------------|--|---|---|
| Aço 1020, 30 m/s,<br>50 $\mu\text{m}$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 90°,<br>0,033 g/s | A    | 9              | 2,240  | 0,420   | -0,494  |
|  | B    | 9              | 3,130  | 0,130   | 0,396   |
|  | C    | 10             | 2,130  | 0,068   | -0,604  |
|  | D    | 10             | 3,720  | 0,680   | 0,986   |
|  | E    | 10             | 2,450  | 0,660   | -0,284  |
|  |      |                | 2,734  | 0,468   | 0,807   |
|  |      |                | <b>Média</b>   | <b><math>\sigma</math> dentro</b>                         | <b><math>\sigma</math> entre</b>                            |
|  |      |                |  | <b><math>\sigma</math> total</b>                          | 0,933   |
| Aço 1020, 70 m/s,<br>50 $\mu\text{m}$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 90°,<br>0,033 g/s | A    | 8              | 31,500   | 1,100   | 3,340   |
|  | B    | 8              | 23,200   | 0,040   | -4,960  |
|  | C    | 8              | 22,900   | 0,900   | -5,260  |
|  | D    | 4              | 32,400   | 0,650   | 4,240   |
|  | E    | 8              | 30,800   | 1,500   | 2,640   |
|  |      |                | 28,160   | 0,969   | 4,786   |
|  |      |                | <b>Média</b>   | <b><math>\sigma</math> dentro</b>                         | <b><math>\sigma</math> entre</b>                            |
|  |      |                |  | <b><math>\sigma</math> total</b>                          | 4,883   |
| Aço 304, 70 m/s,<br>50 $\mu\text{m}$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 90°,<br>0,033 g/s  | A    | 8              | 40,000   | 1,300   | 7,640   |
|  | B    | 8              | 25,400   | 0,120   | -6,960  |
|  | C    | 8              | 26,300   | 0,780   | -6,060  |
|  | D    | 4              | 38,000   | 1,200   | 5,640   |
|  | E    | 8              | 32,100   | 3,000   | -0,260  |
|  |      |                | 32,360   | 1,597   | 6,786   |
|  |      |                | <b>Média</b>   | <b><math>\sigma</math> dentro</b>                         | <b><math>\sigma</math> entre</b>                            |
|  |      |                |  | <b><math>\sigma</math> total</b>                          | 6,971   |

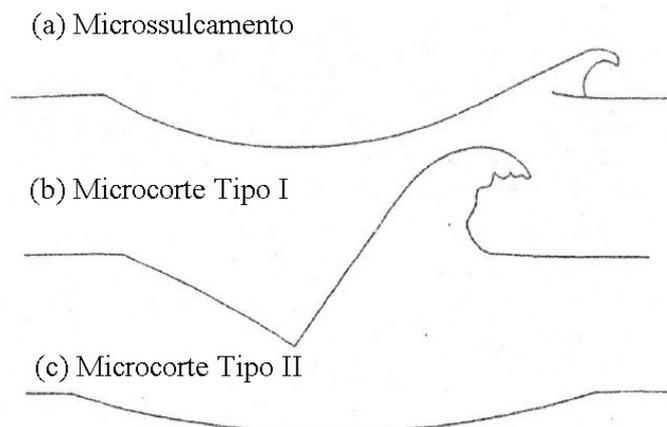
Fonte: (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018)(ASTM G76, 2018).

Nota: adaptado pelo autor.

### 2.2.1 Mecanismos de Desgaste por Deformação Plástica

Há diversos mecanismos de desgaste envolvidos na colisão de múltiplas partículas erosivas (STACHOWIAK e STACHOWIAK 2001). Contudo, a análise de múltiplas partículas incluiria eventos complexos, como diferentes ângulos de impacto, as interações entre partículas, partículas que se engastam na superfície, entre outros (ZUM GAHR, 1987). Dessa forma, os mecanismos dúcteis reúnem-se em três categorias, ilustradas na Figura 4 (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017):

Figura 4 - Seções transversais nos locais de impacto formados por partículas duras sobre um metal dúctil, mostrando típicas formas. A direção do impacto foi da esquerda para a direita



Fonte: Adaptado (HUTCHINGS, 2017).

Nota: Adaptado pelo autor.

O primeiro (a), o microsulcamento, representa a superfície impactada por uma partícula esférica, que desloca a massa (formação de proa lateral e frontal), removendo a massa da proa ou borda por fratura plástica devido às sucessivas colisões. No segundo (b), o microcorte tipo I, a partícula angular rola em direção ao movimento, penetrando na superfície e formando uma ondulação que ficará exposta para ser removida nos impactos subsequentes. No último caso (c), o microcorte tipo II, o sentido rotação da partícula ocorre em direção contrária ao de translação, levando a remoção de material semelhante a uma usinagem. Vale ressaltar que a razão entre o volume removido na forma de *debris* e o volume deslocado foi definida como fração  $f_{AB}$ , e seu valor é maior para o microcorte (portanto remove mais material), além de depender de outros com vários parâmetros, como por exemplo a dureza do material da superfície (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

### 2.2.2 Parâmetros que Influenciam o Desgaste Erosivo por Fratura Dúctil.

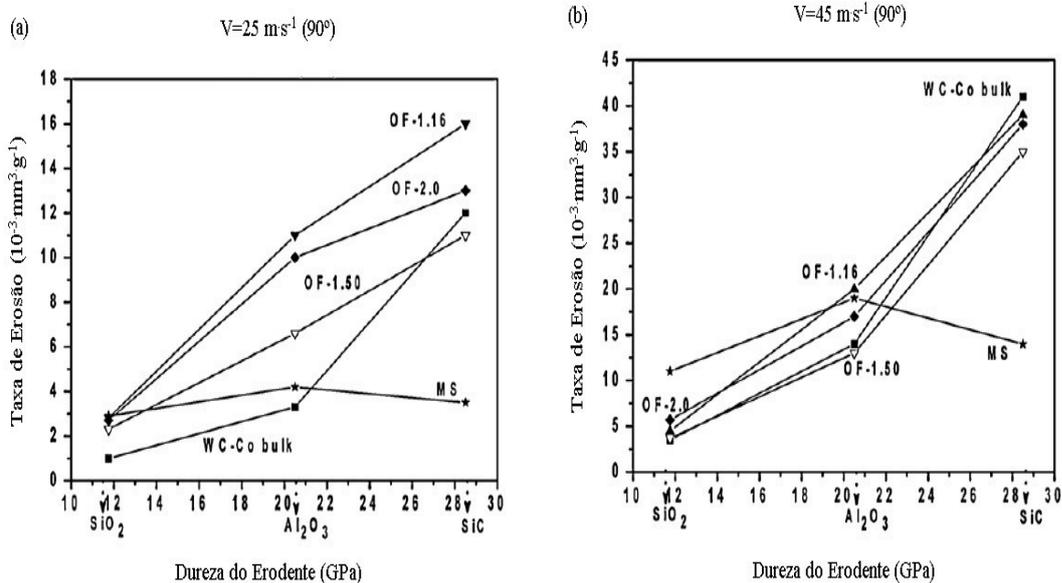
A fim de conhecer o funcionamento do fenômeno da perda de massa por erosão, investigaram-se diversos aspectos que intensificam ou reduzem a taxa de desgaste, dos quais muitos deles estão ligados ao erodente. Cada vez mais reconhecem a relevância, não somente no processo erosivo, mas também abrasivo, das propriedades e das características relacionadas à partícula de desgaste (STACHOWIAK e STACHOWIAK 2001). Portanto, a seguir, descrevem-se os principais parâmetros que influenciam o processo erosivo: razão de dureza, forma, tamanho, velocidade do impacto, ângulo de impacto e fluxo de partículas.

### 2.2.2.1 Dureza da Partícula

De maneira geral, partículas com durezas maiores que a dureza da superfície causam maiores taxas de desgaste do que partículas de menor dureza, e vice-versa, pois partículas de dureza menor apresentam dificuldade em penetrar superfícies de maior dureza (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Contudo, a taxa de desgaste nem sempre é sensível à razão de durezas, como exemplo o caso ilustrado na Figura 5, onde verificam-se que as taxas de desgaste erosivo de revestimentos de WC-12%Co sob de ação três abrasivos de diferentes durezas ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiC}$ ) aumenta com o aumento da dureza da partícula erosiva, para ângulos de impacto de  $30^\circ$  e  $90^\circ$  e para as velocidades de impacto de 25 e 45  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , exceto para o aço médio carbono, que apresenta dureza bem inferior a todos os abrasivos usados (BABU, BASU e SUNDARARAJAN 2011). Esses casos excepcionais ocorrem quando o aumento da razão de durezas atinge um valor limite, como está exemplificado na Figura 6, onde uma amostra de aço endurecido C60H foi erodida por erodentes de diferentes durezas (I. M. HUTCHINGS 1987).

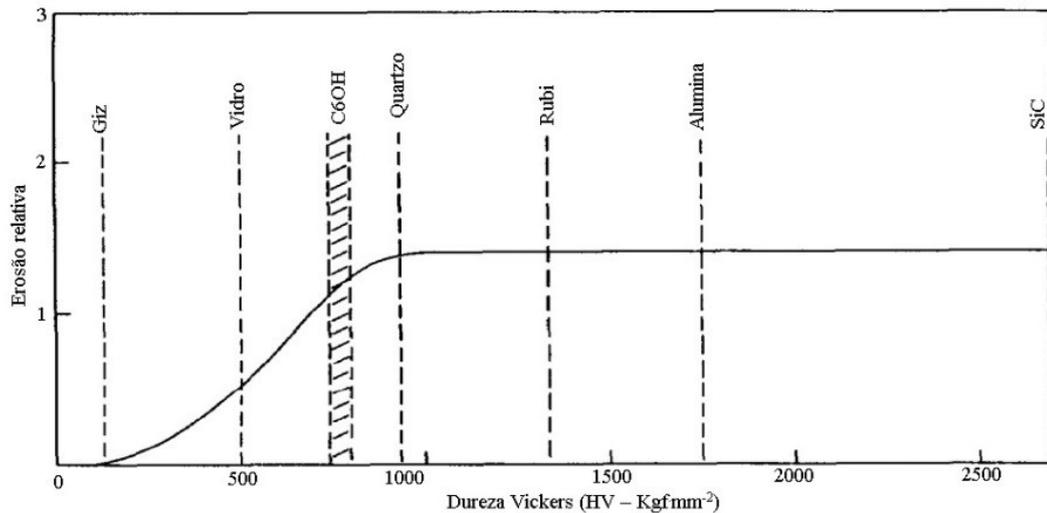
Figura 5 - Gráficos da taxa de erosão em função da dureza da partícula com ângulo de impacto de  $90^\circ$ : (a) velocidade da partícula 25  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  e (b) velocidade da partícula 45  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$



Fonte: (BABU, BASU e SUNDARARAJAN 2011)

Nota: adaptado pelo autor.

Figura 6 - Dependência da taxa de erosão em relação à dureza das partículas, tendo como superfície de ataque um aço endurecido C60H, ensaiado com partículas de vários materiais suspensas em gás



Fonte (I. M. HUTCHINGS 1987).

Nota: Adaptado pelo autor. Em seu trabalho Hutchings não explica a definição de erosão relativa a qual foi utilizada para a construção do gráfico.

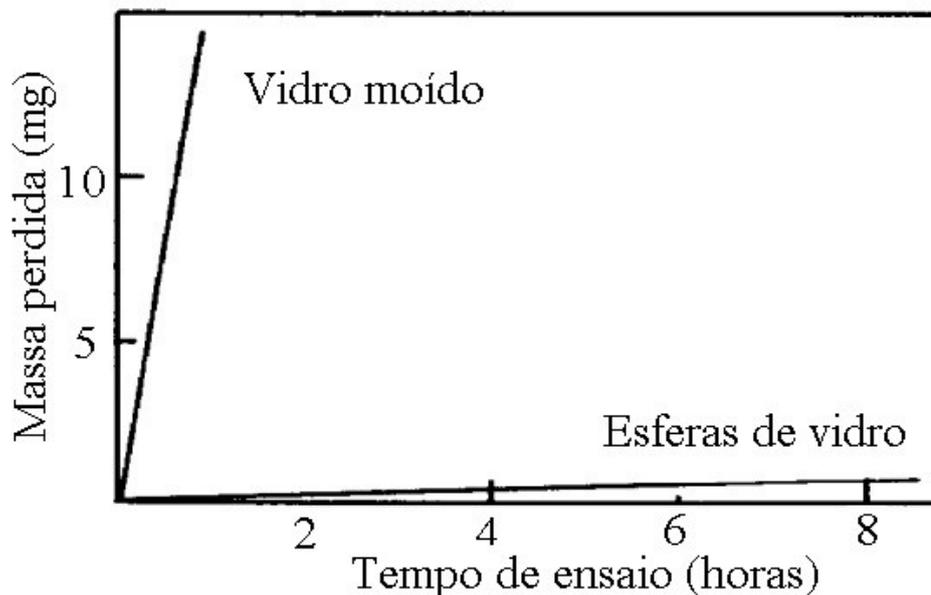
Contudo, ligas metálicas mostram notavelmente pouca diferença na taxa de erosão entre membros do mesmo sistema de ligas, apesar das diferenças substanciais na dureza. Isso porque nem todo aumento de dureza será benéfico para a resistência a erosão. A deformação causada por partículas erosivas normalmente ocorre em altíssimas taxas de deformação, logo, mecanismos convencionais de endurecimento, por exemplo solução sólida, têm muito menos influência do que teria em taxas mais baixas. Portanto, a liga apenas beneficiará na redução do desgaste desde que a dureza da mesma seja menor do que a das próprias partículas erodentes. Assim concluiu-se afirmando que a resistência superior à erosão dos aços rápidos deve-se ao alto teor de carbonetos duros (SODERBERG, et al. 1981).

Além disso, a erosão depende da escala dos contatos individuais das partículas quando está presente uma segunda fase dura. Se as partículas erosivas forem pequenas o suficiente, o desgaste pode ocorrer por erosão preferencial da matriz metálica, por meio de microcortes e eventual remoção de grãos de carboneto intactos. Se as regiões da matriz são muito pequenas para permitir esse tipo de ataque localizado, então a erosão geral do carboneto com a matriz, geralmente por mecanismos dúcteis se as partículas erodentes forem pequenas (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

### 2.2.2.2 Forma da Partícula

A forma das partículas é mensurada em função da sua semelhança a uma esfera, denominando esse parâmetro de *esfericidade*. A Figura 7 ilustra o efeito que uma diferença desse parâmetro causa, ao comparar o desgaste por partículas menos esféricas (mais angulosas), vidro moído, com o desgaste por partículas mais esféricas (ou menos angulosas), esferas de vidro, em uma chapa de aço inoxidável AISI 316 (I. M. HUTCHINGS 1987). Isso ocorre, pois, a forma das partículas abrasivas influencia o padrão de deformação plástica em torno de cada indentação e o fator  $f_{AB}$  (diminuindo com a esfericidade da partícula). Partículas mais arredondadas levam a menos deformação localizada e mais impactos são necessários para remover cada fragmento de detritos. Contudo, esse aspecto é difícil de ser medido, devido à dificuldade de definir as características geométricas tridimensionais que compõe a forma da partícula, por isso raramente é determinado (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Figura 7 - Diferença da taxa de erosão do aço inoxidável AISI 316 devido a esferas de vidro e a partículas angulosas (vidro moído), suspensas em água



Fonte (I. M. HUTCHINGS 1987).

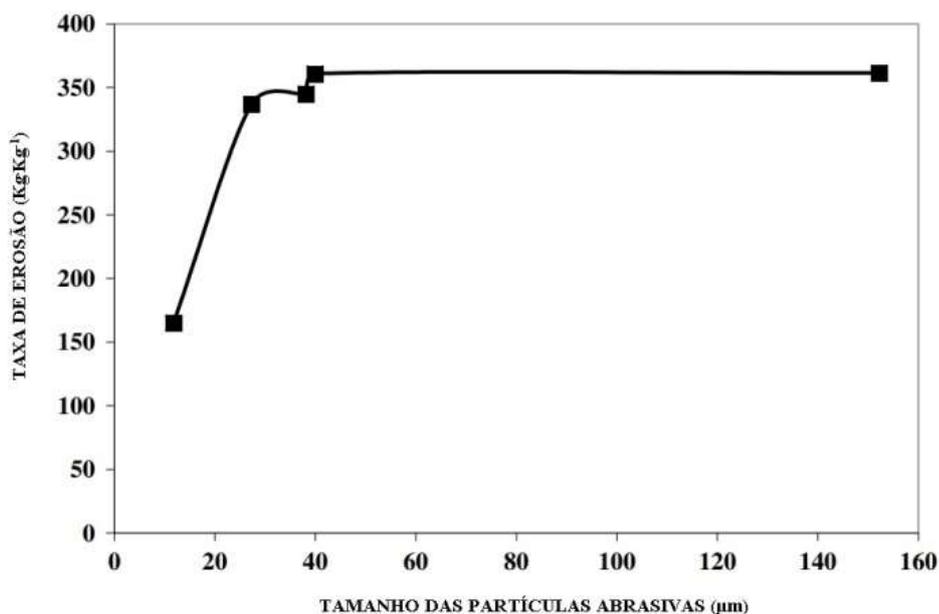
Nota: adaptado pelo autor.

### 2.2.2.3 Tamanho da Partícula

Os tamanhos das partículas que ocorrem mais frequentemente no desgaste abrasivo e erosivo estão em torno de 5 a 500  $\mu\text{m}$ , embora possam estar presentes casos especiais, com tamanhos fora dessa faixa (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017). A influência do tamanho está ilustrada

Figura 8, que mostra o efeito do tamanho das partículas de carbeto de silício (SiC) na erosão em ensaios de amostras de aço inoxidável austenítico AISI 304 SS a 923K, ângulo de impacto de 30° e velocidade de 65 m/s (ZHOU e BAHADUR 1989). A esse efeito, Hutchings, denominou de *Efeito de Escala (size effects)*. Ele também observa que acima de 100 µm, o tamanho da partícula praticamente não influencia a taxa de erosão (HUTCHINGS, 2017).

Figura 8 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de erosão do aço inoxidável austenítico AISI 304 SS em temperatura de 923 K



Fonte: (ZHOU e BAHADUR 1989).

Nota: adaptado pelo autor.

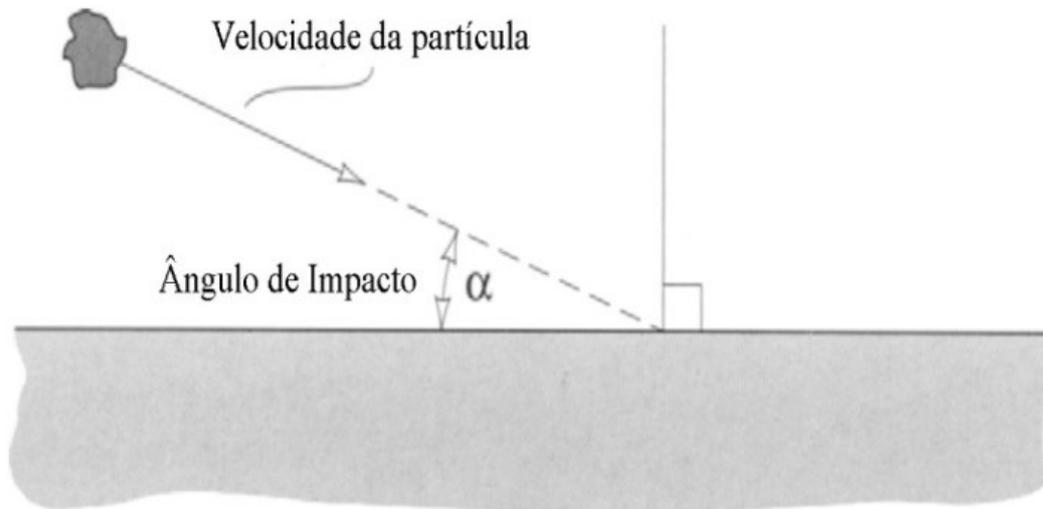
#### 2.2.2.4 Velocidade da Partícula

A velocidade da partícula no momento do impacto com a superfície desgastada tem grande influência na taxa de erosão (KLEIS e KULU 2008). Modelos e estudos experimentais mostram que a taxa de erosão é proporcional a velocidade de impacto de partícula elevado a um expoente “n”. Segundo um modelo para materiais dúcteis, onde toda energia cinética é convertida em deformação plástica, o valor do expoente “n” é igual a 2 (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017). Contudo, os resultados experimentais de ensaios, em condições de impacto oblíquo, encontram um expoente médio da velocidade de 2,4. Já nos ensaios em ângulo de impacto a 90°, indicam um valor médio de 2,55 (SUNDARARAJAN e SHEWMON 1983). Em maiores velocidade de impacto “n” parece estabilizar-se entre 2 e 3. Preece (1977) afirma que o valor de “n” varia de 2 a 3,5 para materiais metálicos. (SUNDARARAJAN e ROY 1997) afirmam que o expoente da velocidade é influenciado por outros fatores como o ângulo de impacto, tamanho da partícula, etc.

### 2.2.2.5 Ângulo de Impacto

Define-se o ângulo de impacto das partículas erodentes como o ângulo formado entre a trajetória da partícula e o plano da superfície do material alvo, dessa forma, varia entre de  $0^\circ$  até  $90^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 9 (STACHOWIAK e STACHOWIAK 2001):

Figura 9 - Ângulo de incidência de uma partícula causando erosão na superfície.



Fonte: (STACHOWIAK e STACHOWIAK 2001)  
Nota adaptado pelo autor.

A correlação da taxa de erosão com o ângulo é fortemente determinada pelo material da superfície impactada. Materiais dúcteis (como metais e ligas) exibem uma taxa máxima de erosão em ângulos entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$  (SUNDARARAJAN e ROY 1997). Explica-se esse comportamento, nos materiais dúcteis, ao associar a condição do impacto com os micromecanismos dúcteis (microsulcamento ou microcorte), que obtém taxas máximas em ângulos rasos, próximos aos valores encontrados experimentalmente, pois em ângulos retos a ocorrência de microcorte, que é o mecanismo mais severo, é mais rara, exigindo também uma geometria angulosa (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Um dos materiais usados para resistir a erosão e que possui comportamento dúctil é os aços inoxidáveis. Por isso será revisado na próxima seção alguns aspectos do desgaste erosivo nesses materiais.

## 2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

Não há dúvida de que os aços inoxidáveis são uma importante classe de ligas. Sua importância se manifesta na vasta possibilidades de aplicações, ainda que dependa de precauções no seu uso. Desde aplicações de baixo custo, como utensílios de cozinha e móveis, até aplicações muito sofisticadas, como veículos espaciais, o uso de aços inoxidáveis é indispensável. Na verdade, a onipresença dos aços inoxidáveis em nosso dia a dia torna impossível enumerar suas aplicações (LO, SHEK e LAI 2009).

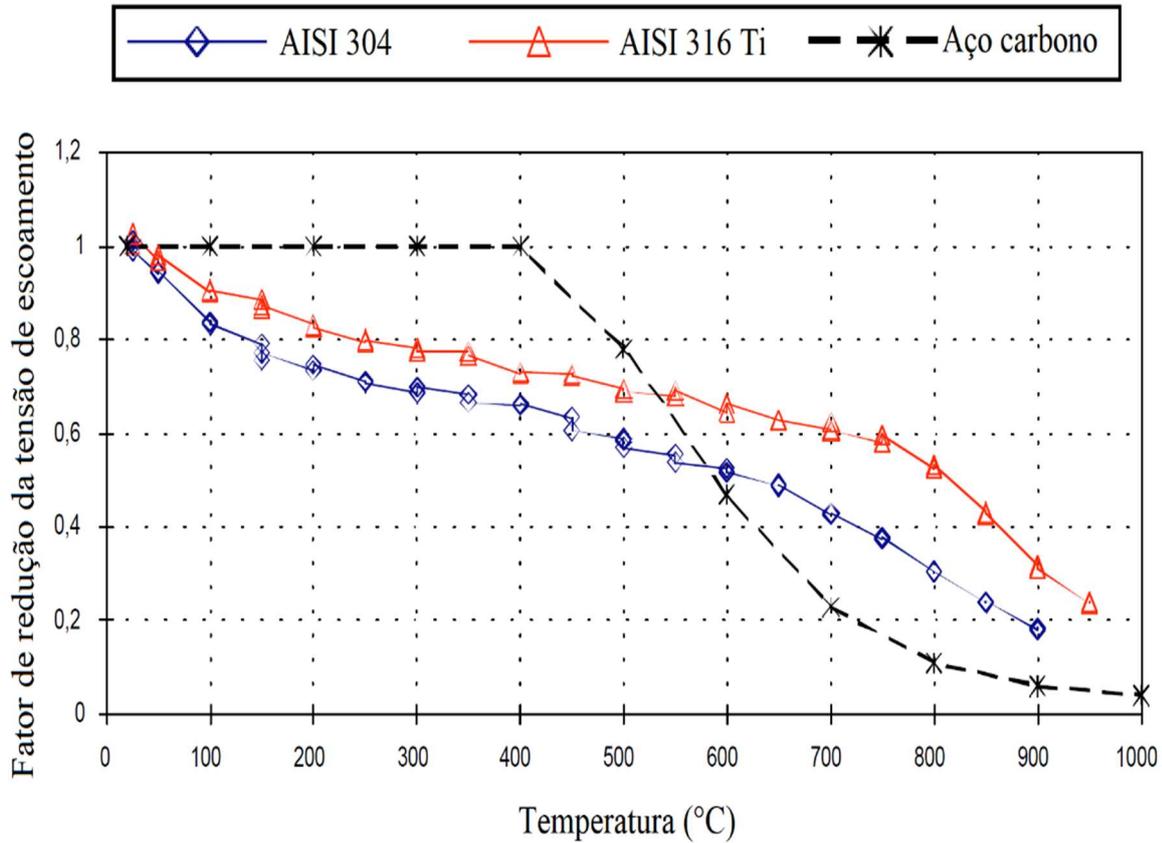
A palavra “aço” significa que o ferro constitui a maior parte do material, enquanto o uso do adjetivo “inoxidável” implica ausência de manchas, ferrugem ou corrosão em ambientes onde os aços “normais” são suscetíveis (por exemplo, em relativamente puro, seco ar). A fim de conferir “inoxidabilidade” aos aços, o cromo deve ser adicionado a pelo menos cerca de 11% em peso. Nesse nível de Cr, um óxido de cromo aderente e regenerativo pode se formar na superfície do aço em ambientes relativamente benignos. No entanto, para evitar corrosão e corrosão em ambientes mais hostis (digamos, em ambientes úmidos ou poluídos) ou na presença de elementos como o carbono, devem ser adicionados teores de Cr mais elevados (LO, SHEK e LAI 2009).

Existem três tipos principais de microestruturas nos aços inoxidáveis, isto é, ferrítico, austenítico e martensítico. Essas microestruturas podem ser obtidas ajustando adequadamente a química do aço. Destas três microestruturas principais, os aços inoxidáveis podem ser categorizados em várias classes principais. Estes são (1) aços inoxidáveis ferríticos, (2) aços inoxidáveis austeníticos, (3) aços inoxidáveis martensíticos, (4) aços inoxidáveis duplex, (5) aços inoxidáveis de endurecimento por precipitação e (6) aços inoxidáveis austeníticos com substituição por Mn-N. (LO, SHEK e LAI 2009). O presente trabalho se concentrou em dois tipos da classe austenítica.

Os aços inoxidáveis são dotados de boa resistência à oxidação em alta temperatura em ambientes de oxidação a seco devido à presença do óxido superficial rico em Cr  $\alpha$ -  $(Cr_xFe_{1-x})_2O_3$ . Além disso, os aços inoxidáveis apresentam menor redução da resistência em altas temperaturas, conforme é exemplificado na Figura 10. Por isso, os aços inoxidáveis são usados em temperaturas elevadas. Após a exposição a altas temperaturas, uma miríade de fases pode precipitar ( ) nas várias classes de aços inoxidáveis e sua precipitação tem profundas repercussões nas propriedades.

Algumas dessas fases, como o carboneto  $M_{23}C_6$ , podem ser comuns a todas as classes (LO, SHEK e LAI 2009).

Figura 10 -Fator de redução da tensão de escoamento dos aços inoxidáveis austeníticos em comparação com o limite de escoamento do aço carbono



Fonte: (ALA-OUTINEN 1966)

Nota: Adaptado pelo autor.

Tabela 2 - Fases e precipitados de aços inoxidáveis

| Fase           | Fórmula química         | Estrutura    | Faixa de temperatura de formação (°C) |
|----------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------|
| $\alpha$       |                         | CCC          |                                       |
| $\alpha'_{Cr}$ |                         | CCC          | 300-525                               |
| $\gamma$       |                         | CFC          |                                       |
| $\sigma$       | Fe-Cr-Mo                | Tetragonal   | 600-1000                              |
| $\chi$         | $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ | CCC          | 700-900                               |
| R              | Fe-Cr-Mo                | Trigonal     | 550-650                               |
| $\pi$          | $Fe_7Mo_{13}N_4$        | Cúbica       | 550-600                               |
| $\tau$         |                         | Ortorrômbica | 550-650                               |
| G              | $Ti_6Ni_{12}Si_{10}$    | CFC          | <500                                  |
| $Cr_2N$        | $Cr_2N$                 |              | 700-900                               |
| CrN            | CrN                     | Cúbica       |                                       |
| $M_{23}C_6$    | $M_{23}C_6$             | CFC          | 600-650                               |

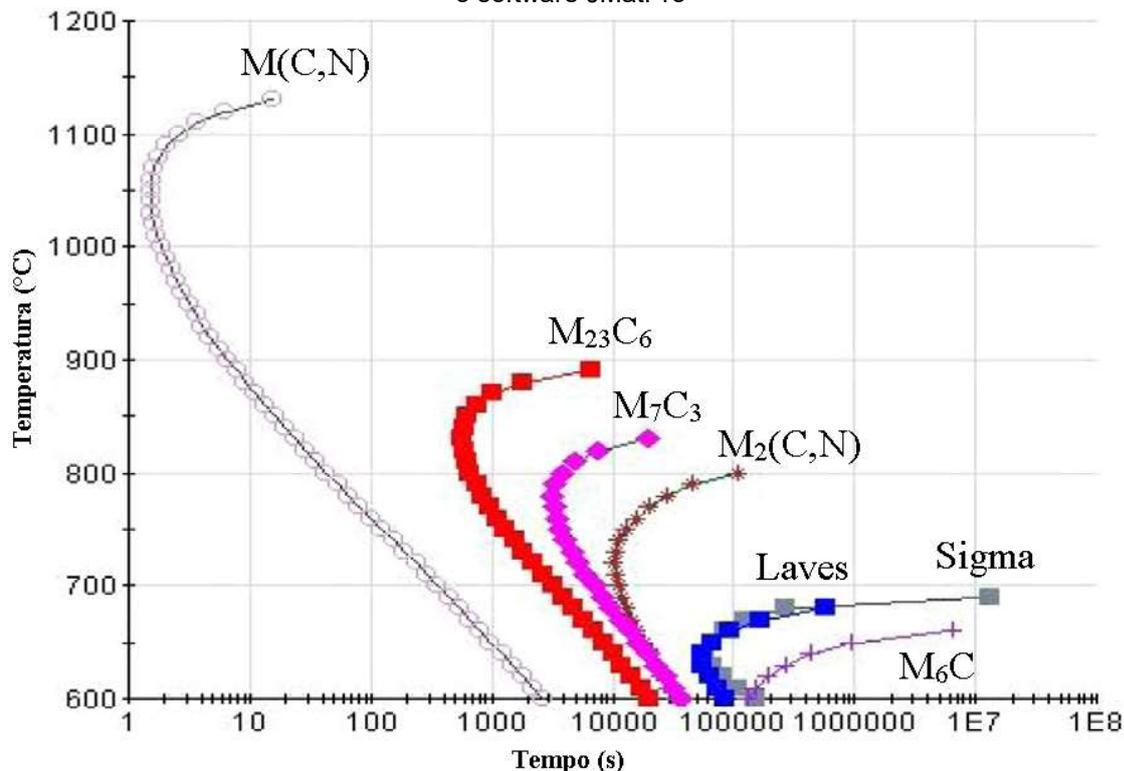
Fonte: (LO, SHEK e LAI 2009)

Nota: adaptado pelo autor.

Aços inoxidáveis austeníticos representam o mais largo grupo geral de aços inoxidáveis e são produzidos em maiores toneladas que qualquer outro grupo. Eles têm boa resistência a corrosão na maioria dos ambientes. Os aços inoxidáveis austeníticos têm resistência equivalente aquela dos aços carbonos, aproximadamente no mínimo 210 MPa de resistência ao escoamento em temperatura ambiente, e não são endurecíveis por transformação. Suas propriedades de impacto em baixas temperaturas dessas ligas são boas, fazendo eles útil em aplicações criogênicas. Temperatura de serviço pode ser de 760 °C ou ainda mais altas, mas a resistência mecânica e à corrosão da maioria desses aços são limitadas em tão alta temperatura. Aços inoxidáveis austeníticos podem ser endurecidos significativamente por trabalho a frio. Eles são geralmente usados em aplicações que requerem boa resistência à corrosão em temperatura atmosférica ou elevadas. São geralmente considerados soldáveis, se adequadas precauções forem seguidas. Aços inoxidáveis austeníticos em geral tem boa ductibilidade e tenacidade, exibindo significativa alongamento durante carregamento trativo. Eles são mais caros que os graus martensíticos e ferríticos de baixo a médio Cr, devido ao maior conteúdo de ligantes nessas ligas. Apesar do custo do aço, eles oferecem distintas vantagens de engenharia, particularmente com relação a formabilidade e soldabilidade, que geralmente reduz o custo em geral comparado a outros grupos de aços inoxidáveis. Aços inoxidáveis austeníticos incluem ambas as ligas da série 200 e 300, como designou a AISI (*American Iron and Steel Institute*). Embora haja uma gama variedade de aços inoxidáveis austeníticos, as ligas da série 300 são a mais antiga e mais comumente utilizada. Essa série tem menor nível de carbono e maior nível de níquel que a série 200. A maioria dessas ligas são baseadas no sistema 18Cr-8Ni, com adição de elementos ligantes ou modificações para fornecer propriedades únicas ou aprimoradas. Os *graus estabilizados*, 321 e 347, contêm pequenas adições de Ti e Nb, respectivamente, para combinar com o carbono e reduzir a tendência por corrosão intragranular devido à precipitação de carbonetos de Cr (LIPPOLD e KOTECKI 2005). Tratamentos térmicos conduzidos na faixa de temperatura de 550 a 650 °C produzem alívio de tensão nos aços inoxidáveis austeníticos. Essa faixa é abaixo do “nariz” da curva para precipitação de carbonetos e também acima da faixa de temperatura nas quais compostos fragilizantes formam-se. Tratamentos térmicos acima em temperaturas maiores podem ser executados a fim de aliviar as tensões residuais mais eficientemente ou para modificar a microestrutura. Contudo deve-se ter atenção especial na faixa de 650 a 900°C, uma vez que ambos carbonetos  $M_{23}C_6$  e fase sigma

formam-se rapidamente nessa faixa de temperatura. A primeira fase pode sensibilizar o material e a segunda podem levar a fragilização e perda de tenacidade. Tratamentos térmicos nessa faixa são possíveis se o aço inoxidável for totalmente austenítico e se o grau for de baixo carbono. Tratamentos térmicos na faixa de 950 °C a 1100 °C aliviarão completamente as tensões residuais e também resultarão na modificação da microestrutura sem formação de carbonetos ou fase sigma. Aquecimento acima de 950 °C seguido de rápida têmpera removerá quaisquer carbonetos na microestrutura original. Aquecimento a temperaturas próximas de 1100 °C dissolverá parte da ou toda ferrita, dependendo do tempo de manutenção na temperatura. Se esse extremo tratamento térmico for executado, rápido resfriamento até temperatura ambiente por têmpera à água geralmente é requerido uma vez que precipitação de carbonetos pode ocorrer durante um resfriamento lento (LIPPOLD e KOTECKI 2005). A Figura 11 e Figura 12 mostram as curvas tempo-temperatura transformação (TTT) para os graus AISI 310 e AISI 321.

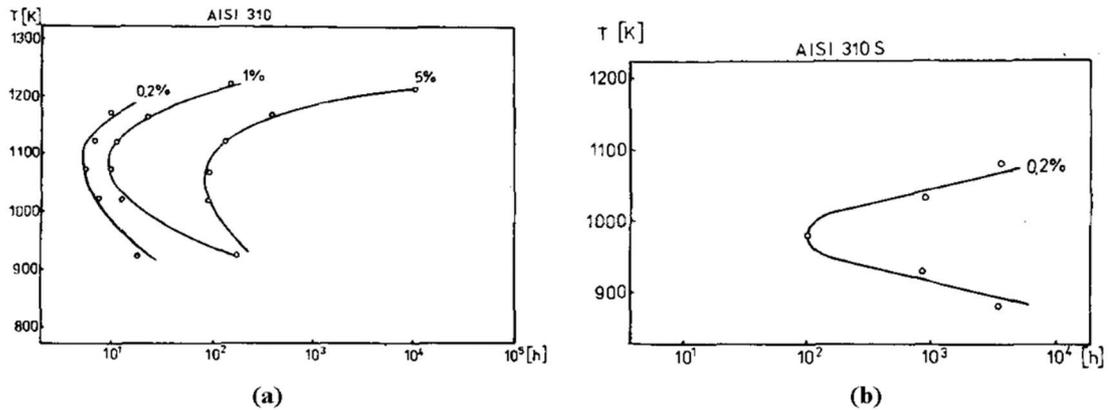
Figura 11- Curva TTT de diferentes precipitados em aço inoxidável austenítico AISI 321 obtido usando o software JMatPro



Fonte: (GHAZANI e EGHBALI, 2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 12 - Curva TTT para a precipitação da fase sigma em graus (a) AISI 310 e (b) AISI 310S.



Fonte: (GHAZANI e EGHBALI, 2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

Em condições de equilíbrio, a quantidade de fase sigma diminui de 600 ° C para 800 ° C. No entanto, como a reação  $\gamma \rightarrow \sigma$  é controlada por difusão, as observações experimentais mostram a tendência inversa, ou seja, o aumento da temperatura aumenta a precipitação  $\sigma$  em tempos de envelhecimento de até 210 horas. Porém, a precipitação do carboneto de cromo é intensa em outras faixas de temperatura, provavelmente devido à maior difusão do carboneto. Para os graus AISI 310 e AISI 321 a *World Steel Association* determina a dureza máxima de 95 e 80 HRB, respectivamente, correspondendo a 192 e 160 HV. A Aperam informa em seus catálogos que seu aço AISI 310S apresenta 80 HRB (World Steel Association 2019) (APERAM SOUTH AMERICA 2020).

### 2.3.1 Erosão em Aços Inoxidáveis

A Tabela 3 resume alguns dos trabalhos em erosão a jato de ar em aços inoxidáveis nos últimos anos:

Tabela 3 - Resumo dos trabalhos de erosão a jato de ar em aços inoxidáveis

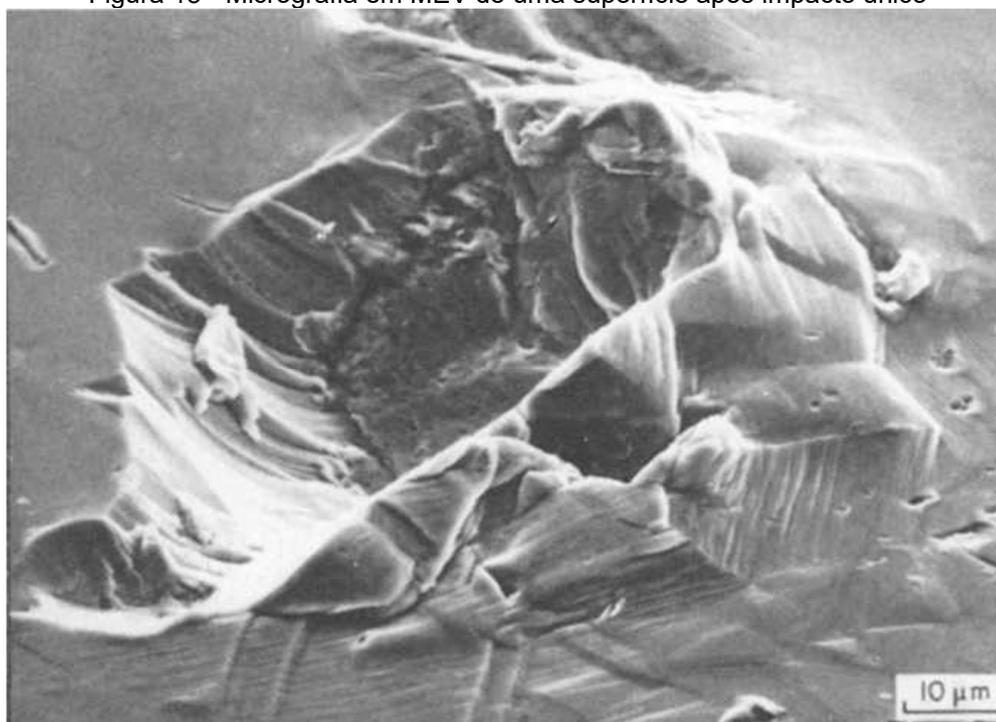
| Referência               | Material | $v$<br>m/s | Abra-<br>sivo    | $\phi$ dos<br>grãos<br>$\mu\text{m}$ | Ângulo | Erosão<br>mg/g |
|--------------------------|----------|------------|------------------|--------------------------------------|--------|----------------|
| (SODERBERG, et al. 1981) | AISI 310 | 66         | SiO <sub>2</sub> | 350-500                              | 45°    | 0,041          |
| (SODERBERG, et al. 1981) | AISI 316 | 66         | SiO <sub>2</sub> | 350-500                              | 45°    | 0,043          |
| (SODERBERG, et al. 1981) | AISI 444 | 66         | SiO <sub>2</sub> | 350-500                              | 45°    | 0,038          |

|                                    |                |    |                                |         |     |       |
|------------------------------------|----------------|----|--------------------------------|---------|-----|-------|
| (SODERBERG, et al. 1981)           | Inox.<br>17%Cr | 66 | SiO <sub>2</sub>               | 350-500 | 45° | 0,038 |
| (SODERBERG, et al. 1981)           | Inox.<br>25%Cr | 66 | SiO <sub>2</sub>               | 350-500 | 45° | 0,041 |
| (GORETTA, et al. 1991)             | AISI 304       | 75 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 143     | 15° | 0,620 |
| (GORETTA, et al. 1991)             | AISI 304       | 75 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 143     | 90° | 0,225 |
| (DIVAKAR, AGARWAL e<br>SINGH 2005) | AISI 316       | 32 | SiO <sub>2</sub>               | 102     | 30° | 0,006 |
| (DIVAKAR, AGARWAL e<br>SINGH 2005) | AISI 316       | 32 | SiO <sub>2</sub>               | 102     | 90° | 0,003 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 304       | 66 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 90° | 0,200 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 444       | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 90° | 0,050 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 439       | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 90° | 0,053 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 304       | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 90° | 0,053 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI<br>1010   | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 90° | 0,053 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 444       | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 30° | 0,100 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 439       | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 30° | 0,100 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI 304       | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 30° | 0,100 |
| (HUSSAIN, et al. 2012)             | AISI<br>1010   | 40 | SiO <sub>2</sub>               | 150-300 | 30° | 0,100 |
| (LAGUNA-CAMACHO, et al.<br>2013)   | AISI 304       | 24 | SiC                            | 420-450 | 30° | 0,462 |
| (LAGUNA-CAMACHO, et al.<br>2013)   | AISI 304       | 24 | SiC                            | 420-450 | 90° | 0,517 |
| (LAGUNA-CAMACHO, et al.<br>2013)   | AISI 316       | 24 | SiC                            | 420-450 | 30° | 0,375 |
| (LAGUNA-CAMACHO, et al.<br>2013)   | AISI 316       | 24 | SiC                            | 420-450 | 90° | 0,493 |
| (LAGUNA-CAMACHO, et al.<br>2013)   | AISI 420       | 24 | SiC                            | 420-450 | 30° | 0,674 |
| (LAGUNA-CAMACHO, et al.<br>2013)   | AISI 420       | 24 | SiC                            | 420-450 | 90° | 0,495 |

|   |                 |    |                                |         |     |       |
|---|-----------------|----|--------------------------------|---------|-----|-------|
| (VITE-TORRES, et al. 2013)                    | AISI 420        | 24 | SiC                            | 400-420 | 30° | 0,039 |
| (VITE-TORRES, et al. 2013)                    | AISI 420        | 24 | SiC                            | 400-420 | 90° | 0,014 |
| (VITE-TORRES, et al. 2013)                    | AISI 420        | 24 | Aço                            | 400-420 | 30° | 0,006 |
| (VITE-TORRES, et al. 2013)                    | AISI 420        | 24 | Aço                            | 400-420 | 90° | 0,039 |
| (PATEL, et al. 2016)                          | AISI 304        | 40 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 50      | 90° | 0,150 |
| (RUIZ-RIOS, LÓPEZ-GARCÍA e CAMPOS-SILVA 2020) | X12CrNi-MoV12-3 | 30 | SiO <sub>2</sub>               | 50      | 30° | 0,350 |
| (RUIZ-RIOS, LÓPEZ-GARCÍA e CAMPOS-SILVA 2020) | X12CrNi-MoV12-3 | 30 | SiO <sub>2</sub>               | 50      | 90° | 0,175 |

O aço austeníticos (AISI 304, AISI 310 e AISI 316), apresentaram microsulcamentos acompanhados de maclas de deformação, tanto em torno de impactos únicos quanto após vários impactos, como mostra a Figura 13. Nenhum dos metais mostra qualquer correlação significativa entre dureza e taxa de erosão. Isso sugere que a resistência à erosão se deve ao alto teor de partículas de carboneto duro (1-10 µm) e não à alta dureza da matriz (SODERBERG, et al. 1981).

Figura 13 - Micrografia em MEV de uma superfície após impacto único



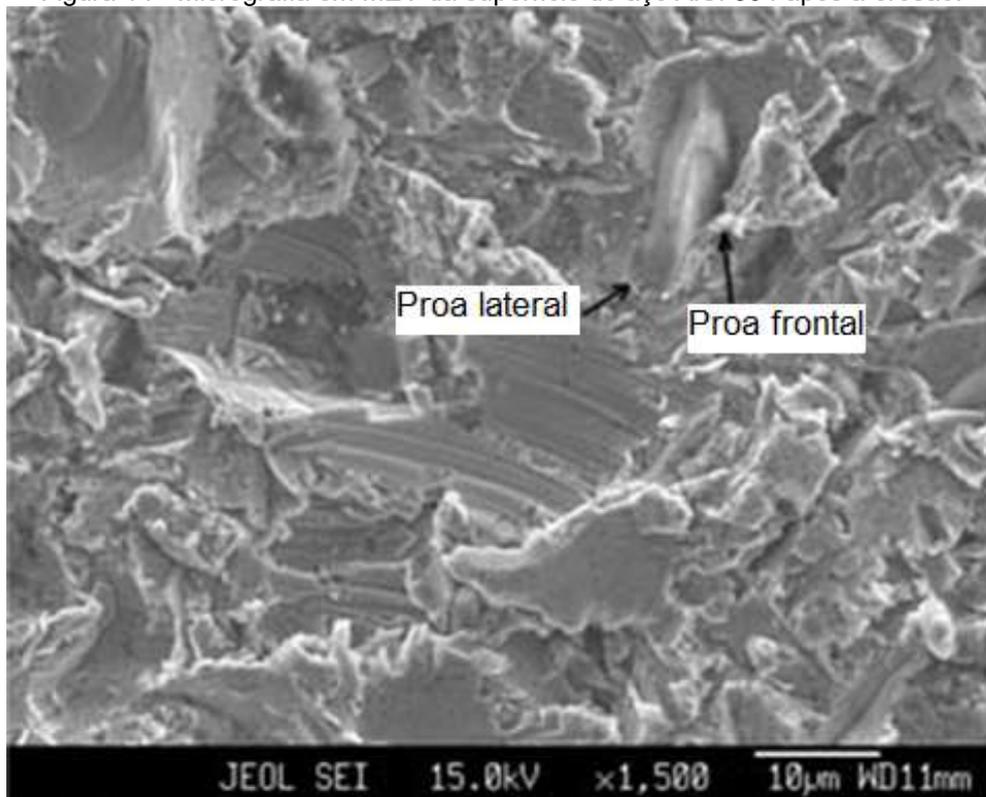
Fonte: (SODERBERG, et al. 1981).

Para o austenítico AISI 304, as taxas de erosão foram maiores a 15° do que a 90°, e aumentaram com a quantidade de trabalho a frio, pois sua pouca ductibilidade diminui

ainda mais com o encruamento. O mecanismo principal parece ter sido o microsulcamento, embora o microcorte também esteja presente. O fato de que para impactos normais o aço inoxidável 304 exibiu aumento das taxas de erosão com aumento do trabalho a frio pode estar relacionado à sua baixa energia de falha de empilhamento (que aumenta a capacidade de deformação plástica), pois em ângulos retos a materiais mais dúcteis alcançam maiores resistências à erosão (GORETTA, et al. 1991).

A ductibilidade do austenítico AISI 304 pode ser a razão para sua menor taxa de erosão nos ângulos de impacto 15, 30 e 45 em relação aos aços AISI 444, 439 e 1100. Nessas faixas de ângulos, a formação de proa lateral e frontal retrata o comportamento dúctil característico (Figura 14). A taxa máxima de erosão no AISI 304 ocorreu em um ângulo de impacto 30°. AISI 304 mostra efeito encruamento escasso em ângulo de impacto de 90°, que pode ser a possível razão da sua menor resistência à erosão (HUSSAIN, et al. 2012)

Figura 14 - Micrografia em MEV da superfície do aço AISI 304 após a erosão.



Fonte: (HUSSAIN, et al. 2012).

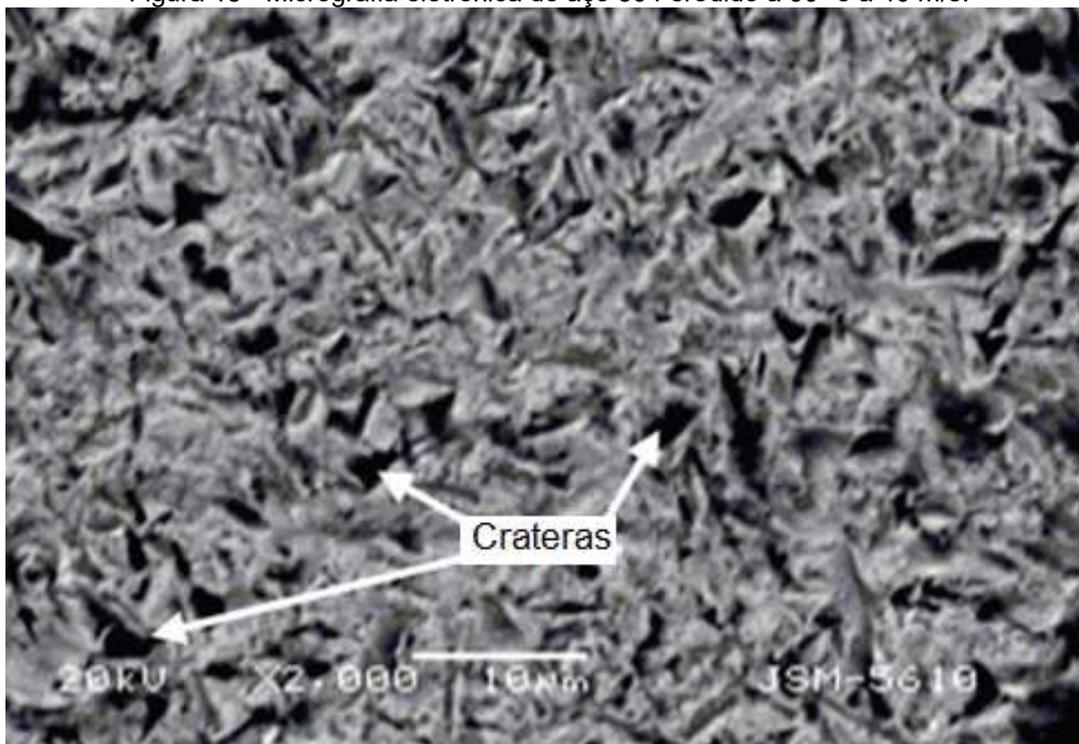
Nota: adaptado pelo autor.

AISI 316 e AISI 304 exibiram um desempenho semelhante, ambos apresentando um comportamento do tipo frágil com taxa máxima de erosão a 60°, devido ao alto destacamento de grandes fragmentos e microsulcamentos (LAGUNA-CAMACHO, et

al. 2013).

No aço AISI 304 (Figura 15), a erosão ocorre através da deformação plástica do material pelos microssulcamentos e formações de proas. As amostras erodidas no impacto a 30° mostram que a remoção do material ocorre por microssulcamento e por de cisalhamento. A taxa de erosão a 30° é um pouco maior do que a 90° e, portanto, o AISI 304 exibe o modo de erosão dúctil (PATEL, et al. 2016).

Figura 15 - Micrografia eletrônica do aço 304 erodido a 90° e a 40 m/s.



Fonte: (PATEL, et al. 2016).

Nota: adaptado pelo autor.

Geralmente, a composição dos aços inoxidáveis austeníticos é ajustada para atender aos requisitos de serviço em vários ambientes corrosivos. Sua excelente resistência à corrosão é geralmente prejudicada pela precipitação de carboneto do tipo  $M_{23}C_6$ , que é rico em cromo, nos contornos de grão em temperatura elevada, promovendo assim a corrosão intergranular. Para inibir essa indesejada segregação nos contornos de grão (sensibilização), o aço inoxidável austenítico AISI 321 estabilizado com Ti (derivado do AISI 304) foi desenvolvido para favorecer a formação preferencial de precipitados de  $TiC$ , mantendo assim o cromo em solução para proteção contra corrosão. O grau AISI 321 é, portanto, amplamente utilizado como material de escolha na fabricação de trocadores de calor para plantas de processos químicos, tubos de alta pressão, turbinas de motor para automóveis e aeronaves e em reatores nucleares. Dessa forma, pode também ser aplicado em para resistir ao desgaste erosivo.

Uma das aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos é em Separadores Centrífugos Ciclônicos de Reatores Termoquímicos, operados em altas temperaturas. A fim de esclarecer detalhes do desgaste erosivo nessas operações, será revisado a seguir alguns aspectos a respeito de reatores e ciclones.

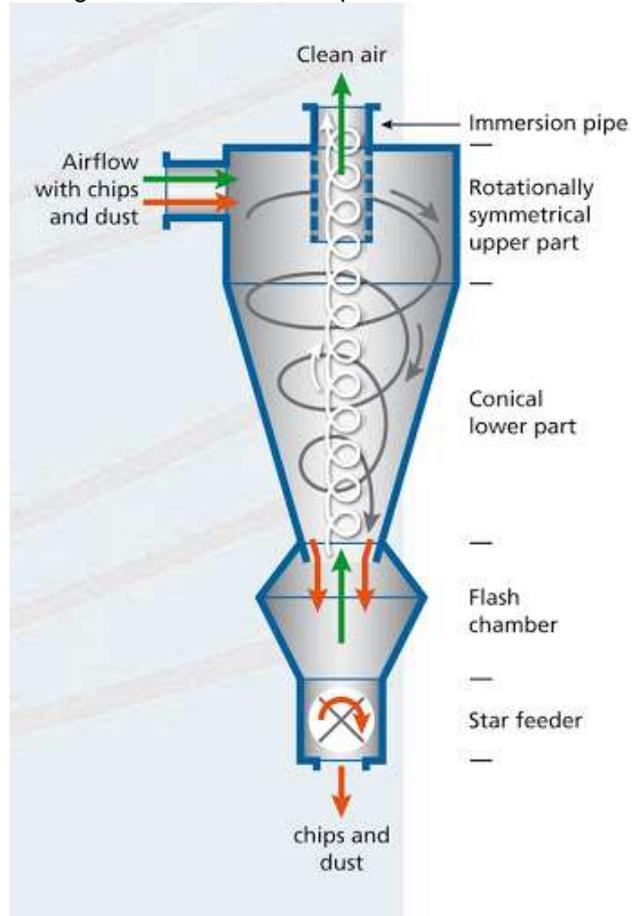
## 2.4 REATOR TERMOQUÍMICO

Reatores são os recipientes onde acontecem as reações. São categorizados em função do processo de produção: descontínuo ou contínuo. O processo contínuo, reagentes entram e produtos saem constantemente do recipiente, que pode ser na forma de tubo ou de tanque, sendo agitados mecanicamente ou pelo fluxo, diferindo pela derivada da composição em relação ao tempo e ao espaço (FOGLER 2016). Os reatores termoquímicos para gaseificação de combustíveis, por vezes denominados de gaseificadores, são equipamentos do tipo contínuo e geram de gás de síntese (gás rico em  $H_2$  e  $CO$ ), por meio de aquecimento controlado. O processo consiste na oxidação parcial da matéria-prima com o objetivo de convertê-la em formas gasosas, como o monóxido de carbono e o metano (SAFT 2007). Um dos abrasivos utilizados nesse presente trabalho foi oriundo de um gaseificador de leito fluidizado circulante autotérmico, de baixa temperatura ( $850\text{ }^{\circ}C$ ), operado à pressão ligeiramente acima da pressão atmosférica, de formação de cinzas secas, que utiliza o ar como agente oxidante, destinado a conversão de CDR em gás de síntese destinado à geração de energia elétrica em ciclos a vapor. A conversão de CDR gera cinzas que precisam ser separadas do gás de síntese, usando para isso separadores centrífugos ciclônicos, que é o tema da próxima seção.

## 2.5 SEPARADOR CENTRÍFUGO CICLÔNICO

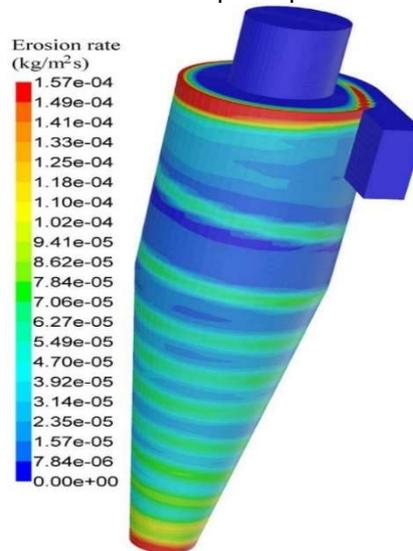
Separador Centrífugo Ciclônico, por vezes denominado apenas de Ciclone, é um dispositivo que separa a fase sólida de uma mistura fluida, geralmente gasosa, através da força centrífuga. Ciclone é o equipamento mais utilizado na coleta de pó, onde o gás carregado de pó entra tangencialmente em uma câmara cilíndrica iniciando um escoamento giratório e sai através de um duto central. A Figura 16 ilustra o princípio de funcionamento do ciclone (PERRY e GREEN, 2008) e a ilustra as áreas de maior desgaste erosivo, ilustrando as regiões de maiores desgastes: na entrada, devida a mudança da trajetória retilínea para circular, e na parte inferior do cone, devido ao maior tempo de residência da partícula no fluxo (DELTOID GmbH 2014).

Figura 16 - Desenho esquemático de um ciclone



Fonte: (DELTOID GmbH 2014)

Figura 17- Gráfico da taxa de erosão pelas partículas na parede do ciclone



Fonte: (PARVAZ, et al. 2018).

A fase sólida da mistura fluida no Ciclone tende a depositar-se no receptor de partículas, pois, à medida que o pó é arrastado pelo no fluxo helicoidal e espiral cônico, a força de inércia (comumente denominada de força centrífuga nesse caso) direciona as partículas sólidas a chocarem-se na parede do separador, diminuindo assim sua

velocidade, e por consequência a força de arrasto do fluido, assim a força gravitacional torna-se dominante e conduz o pó para o receptor. A mistura fluida inicia um escoamento giratório de alta velocidade, promovendo um incremento na intensidade de turbulência. Isso acarreta uma dispersão das quantidades de movimento que conduzem ao movimento giratório uma reversão de fluxo, permitindo a saída do gás pelo duto de saída (MEIER 1998).

Em um gaseificador de RSU, o Ciclone separa as cinzas, geradas pela queima parcial do CDR, do gás de síntese. As composições químicas das cinzas, de diferentes origens, foram estudadas em trabalhos anteriores, e a Tabela 4 abaixo mostra a porcentagem dos principais óxidos encontrados em cada caso.

Tabela 4 - Composições químicas de cinzas geradas em gaseificadores de RSU

| Óxido     | Concentração em peso (%) |        |       |        |           |        |
|-----------|--------------------------|--------|-------|--------|-----------|--------|
|           | Caso 1                   | Caso 2 | Caso3 | Caso 4 | Caso 5    | Caso 6 |
| $SiO_2$   | 19,86                    | 20,5   | 44,26 | 33,7   | 12,9 -    | 39,2   |
| $Al_2O_3$ | 13,39                    | 5,8    | 18,16 | 13,31  | 12,2 -    | 16,1   |
| $CaO$     | 44,67                    | 35,8   | 15,39 | 35     | 32,3 -    | 30,2   |
| $Fe_2O_3$ | 10,33                    | 3,2    | 9,27  | 5,37   | 5,3 - 7,7 | 4,2    |

Fontes: Caso 1 (CHANG, et al. 1997), Caso 2 (HAIYING, YOUCAI e JINGYU, Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile 2007), Caso 3 (FONTES 2008), Caso 4 (VIZCARRA 2010), Caso 5 (RAMBALDI, et al. 2010) e Caso 6 (HAIYING, YOUCAI e JINGYU, Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in ceramic brick: Product characterization and environmental toxicity 2011).

Nota: organizado pelo autor.

Um Gaseificador de Aglomeração de Cinzas feito de aço inoxidável austenítico grau 310 de 0,64 cm de espessura, separa carvão não queimado e outros particulados do fluxo de gás de combustão e recicla os sólidos na região do leito. O tamanho médio das partículas é de cerca de 400  $\mu\text{m}$  e a velocidade das partículas na entrada do ciclone é estimada em 18 a 45 m/s. A temperatura de operação do ciclone é 788 a 954 °C. A composição típica do gás (mol. %) com ar/vapor é 10 CO, 10 H<sub>2</sub>, 8 CO<sub>2</sub>, 62 N<sub>2</sub> e vapor de equilíbrio; a composição com vapor/oxigênio é 30 CO, 45 H<sub>2</sub>, 15 CO<sub>2</sub> e 10 N<sub>2</sub> (DANYLUK, SHACK e PARK 1980).

Realizaram estudos experimentais para um Ciclone de aço inoxidável austenítico 310 de uma planta piloto de gaseificação de carvão. Identificaram que o microcorte foi o micromecanismo dominante na diminuição da espessura e, por consequência, perfuração da parede do Ciclone (DANYLUK, SHACK e PARK 1980).

Realizaram simulação numérica para avaliar a erosão no Ciclonos do reator de uma

unidade de craqueamento catalítico fluidizado. Encontraram três regiões com alta probabilidade de erosão: sobre o lado curto da seção retangular de entrada do gás; no lado de cima da seção retangular de entrada do gás; e na parede oposta do corpo cilíndrico à entrada de gás. O modelo foi validado com experiência operacional e previu com precisão as localizações de máxima erosão (BLASER, THIBAUT e SEXTON 2013).

Encontraram quatro zonas preferenciais de erosão podem ser formadas dentro de um ciclone com base no tamanho da partícula. Para todos os tamanhos, a parte inferior do cone do ciclone é uma região crítica. Para partículas maiores que 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro, a parede a frente da entrada na região do cilindro é outra zona crítica do Ciclone. Partículas com diâmetros entre 15  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$  são presas por um vórtice de recirculação no topo do cilindro do ciclone e criam a terceira região criticamente erodida. A quarta região é formada devido ao aprisionamento de partículas com diâmetro 250  $\mu\text{m}$  a 600  $\mu\text{m}$  em faixas em forma de anel dentro do cone do ciclone (TOFIGHIAN, AMANI e SAFFAR-AVVAL 2020).



### 3 METODOLOGIA

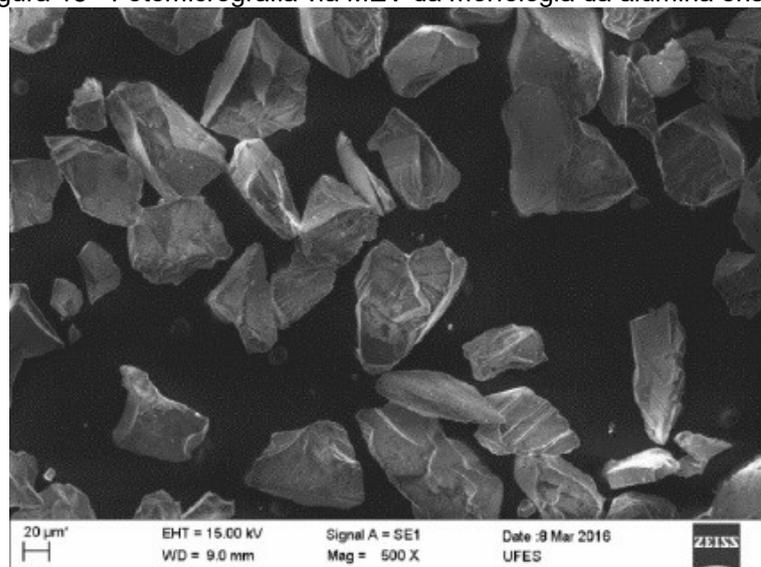
#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Abrasivos

###### 3.1.1.1 Alumina

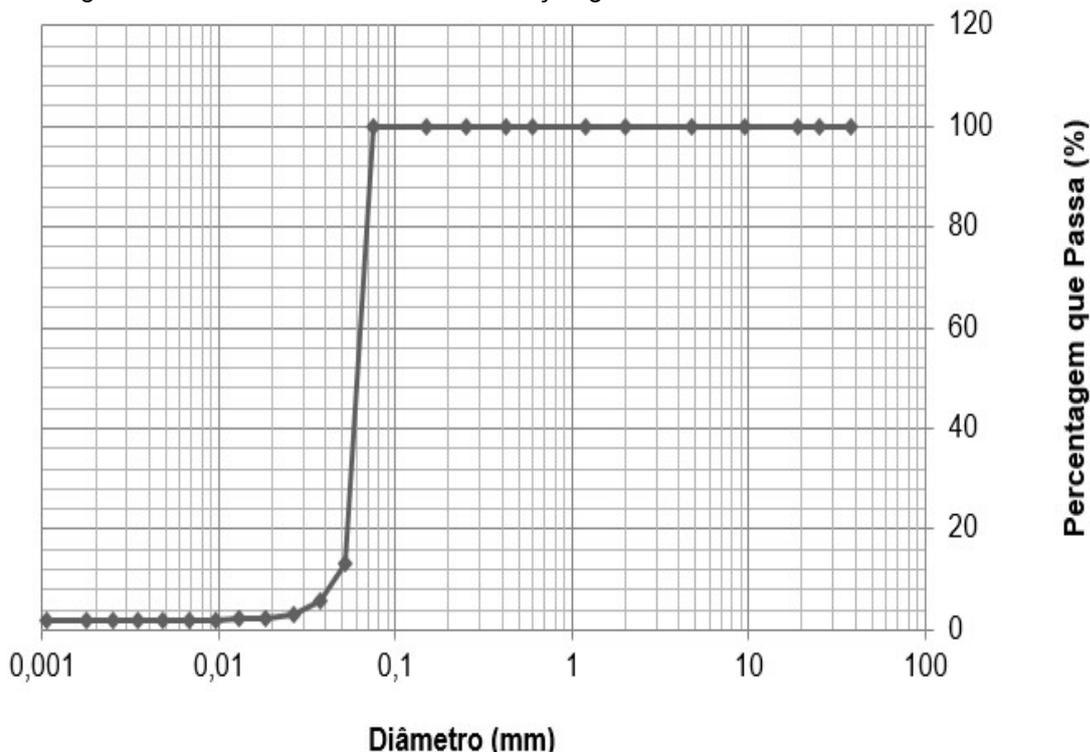
Seguindo as instruções da norma ASTM G76, as partículas devem possuir características uniformes em relação a forma, umidade e composição química, e granulometria de 50  $\mu\text{m}$ . A alumina utilizada nos ensaios foi adquirida junto à empresa Elfusa Geral de Eletrofusão Ltda, sendo analisada na época da aquisição sua morfologia e granulometria por microscopia eletrônica de varredura no LCSM (Laboratório de Caracterização e Superfícies de Materiais) da Universidade Federal do Espírito Santo no Microscópio Eletrônico de Varredura modelo EVO 40 da ZEISS, conforme ilustra a Figura 18 abaixo. Pode-se observar que a alumina possui muitas faces e arestas, com vértices bem pontiagudos, portanto, sua forma é angulosa. A análise granulométrica das partículas de alumina na NBR 7181 e os resultados são mostrados na Figura 19, onde pode-se observar que 100% da amostra analisada de alumina virgem possui tamanho menor que 75  $\mu\text{m}$ . Depois, apenas, aproximadamente, 13% possui tamanho menor que 50  $\mu\text{m}$ . Com isso, 87% da alumina possui tamanho entre 50 e 75  $\mu\text{m}$  (BRAGANÇA 2009).

Figura 18 - Fotomicrografia via MEV da morfologia da alumina ensaios



Fonte: Bragança (2016).

Figura 19 - Gráfico mostrando a distribuição granulométrica acumulada da alumina

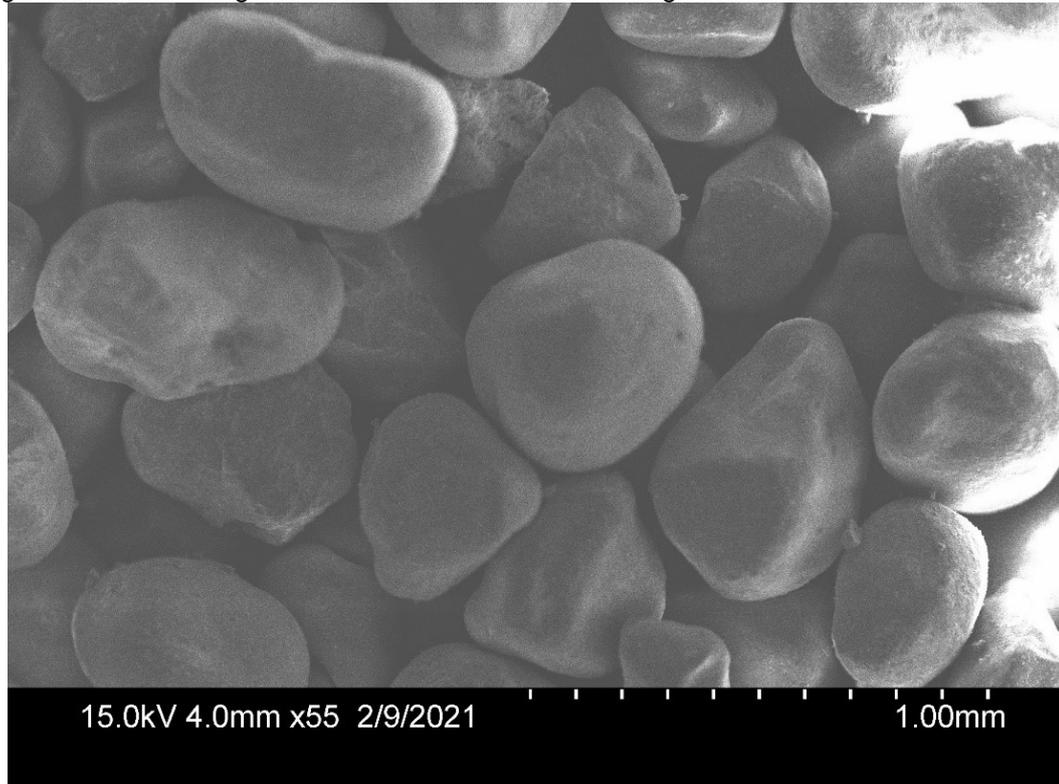


Fonte: Bragança (2016).

### 3.1.1.2 Cinzas

O segundo abrasivo utilizado foram as cinzas volante, Figura 20, geradas do reator termoquímico da Carbogas. O reator é um gaseificador de leito fluidizado circulante, auto térmico, de baixa temperatura (850°C), operado à pressão ligeiramente acima da pressão atmosférica, de formação de cinzas secas, que utiliza o ar como agente oxidante, destinado a conversão de CDR em gás de síntese. O equipamento da Carbogas Ltda., que opera à pressão de 1500 mmCA e tem potência de 3,54 Gcal/h (4 MWth). O mesmo tem a finalidade produção de gás de síntese destinado à geração de energia elétrica em ciclos a vapor. A Carbobras Ltda. forneceu a análise química das cinzas, que apresenta a concentração de metais mais abundantes: alumínio (4.326,7 mg/Kg), cálcio (19.163,9 mg/Kg), cobre (1.917,5 mg/Kg), enxofre (1.513,8 mg/Kg), ferro (5.982,4 mg/Kg), magnésio (1.611,7 mg/Kg), silício (3.347,6 mg/Kg), zinco (3.875,7 mg/Kg). Pela concentração dos elementos na forma metálica, pode-se supor uma estimativa da proporção de óxidos.

Figura 20 - Fotomicrografia via MEV mostrando a morfologia da das cinzas antes dos ensaios



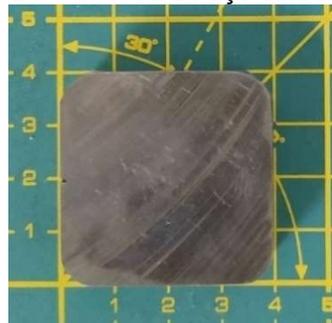
Fonte: o autor.

### 3.1.2 Contracorpos

#### 3.1.2.1 Amostras de Aço Carbono AISI 1020

Foram utilizadas 6 amostras (Figura 21) de aço carbono AIS 1020 comercial a fim de validar o erosímetro, e tiveram as superfícies abrasadas em sequência com as lixas P80, P180, P220, P320, P500, P800 e P1200 (FEPA) na Politriz Manual STRUERS DP-9 (disponível no Laboratório TRICORRMAT/UFES), a fim de atingir a rugosidade requerida conforme norma ASTM G76-18 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018)

Figura 21 - Amostra de aço carbono 1020



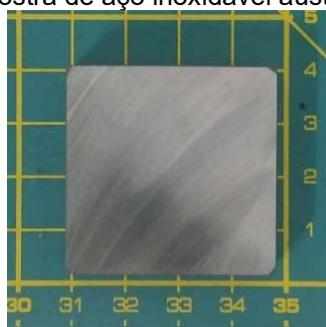
Fonte: o autor.

Nota: A graduação representa 1 cm.

### 3.1.2.2 Amostras de Aço Inoxidável AISI 304

Foram utilizadas 12 amostras (Figura 22) de aço inoxidável austenítico AISI 304, comercial, e tiveram as superfícies abradadas em sequência com as lixas P80, P180, P220, P320, P500, P800 e P1200 (FEPA) na Politriz Manual STRUERS DP-9, a fim de atingir a rugosidade requerida, usando 6 delas para validar o erosímetro, conforme norma ASTM G76-18 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018), e as outras 6 para comparar a erosividade das cinzas, ensaiando com velocidade de partícula de 30 m/s (3 amostras) e de 70 m/s (3 amostras).

Figura 22 - Amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304



Fonte: o autor Fonte: o autor.

Nota: A graduação representa 1 cm.

### 3.1.2.3 Amostras de Aço Inoxidável AISI 310

Foram utilizadas amostras (Figura 23) de aço inoxidável austenítico grau AISI 310, fornecido pela Aperam América do Sul S/A (APERAM SOUTH AMERICA 2020), que forneceu a composição química mostrado na Tabela 5:

Tabela 5 - Composição química do aço inoxidável AISI 310

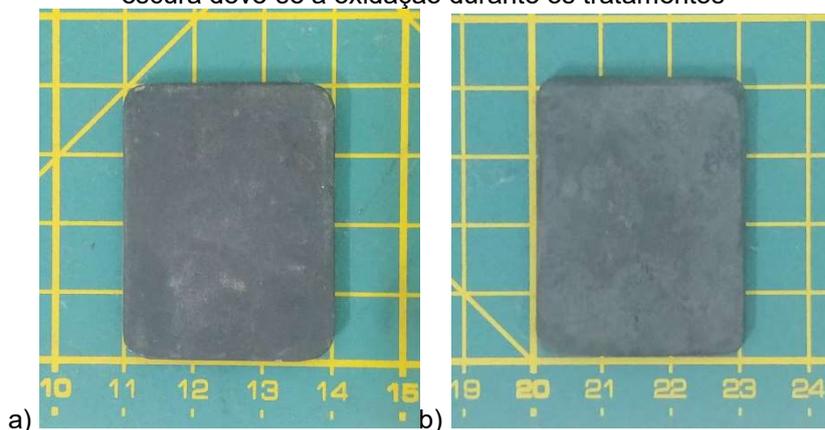
| <b>C</b>           | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> | <b>Al</b> | <b>Ti</b> | <b>N</b>     |
|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| <b>(% em peso)</b> |           |           |          |          |           |           |           |           |           | <b>(ppm)</b> |
| 0,047              | 1,49      | 0,47      | 0,031    | 0,0003   | 25,65     | 19,29     | 0,054     | 0,006     | 0,003     | 190          |

Fonte: (APERAM SOUTH AMERICA 2020).

As superfícies das amostras foram abradadas em sequência com as lixas P80, P180, P220, P320, P500, P800 (FEPA) na Politriz Automática STRUERS TegraPol-25, e P1200 (FEPA) na Politriz Manual STRUERS DP-9, a fim de atingir a rugosidade requerida na norma ASTM G76-18 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018). Logo após, mensuraram-se parâmetros de rugosidade da superfície por meio de 5 leituras no Rugosímetro Portátil TAYLOR HOBSON®PRECISION Surtronic 25, com 0,25 mm de comprimento de amostragem

e com 2,50 mm de comprimento de avaliação, em conformidade com a NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2002). No final, as amostras foram tratadas termicamente, a 800 °C durante 200 horas (envelhecimento) ou a 1100 °C durante 1 hora (solubilização), no Forno Mufla NOVA INSTRUMENTS NI 1384. Equipamentos disponíveis no laboratório TRICORRMAT/UFES.

Figura 23 - Amostras de aço inoxidável austenítico 310: a) envelhecida e b) solubilizada. A superfície escura deve-se a oxidação durante os tratamentos



Fonte: o autor.

Nota: A graduação representa 1 cm.

### 3.1.2.4 Amostras de Aço Inoxidável AISI 321

Foram utilizadas amostras (Figura 19) de aço inoxidável austenítico grau 321 (estabilizados com titânio), fornecido pela Aperam América do Sul S/A (APERAM SOUTH AMERICA 2020), que forneceu a composição química mostrado na Tabela 6:

Tabela 6 - Composição química do aço inoxidável AISI 321

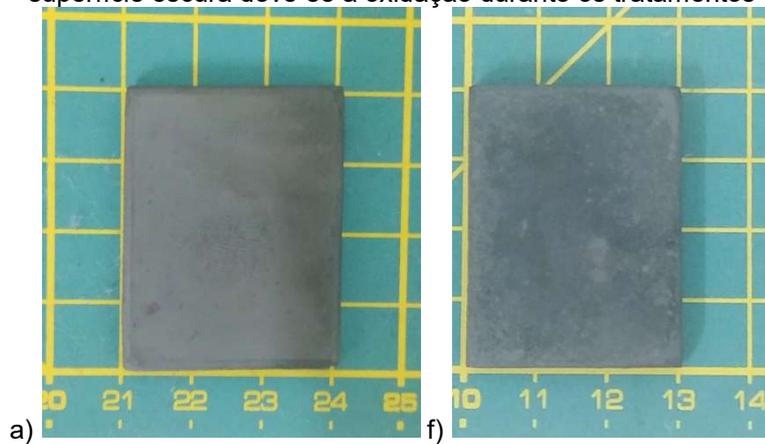
| <b>C</b>           | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> | <b>Al</b> | <b>Ti</b> | <b>N</b>     |
|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| <b>(% em peso)</b> |           |           |          |          |           |           |           |           |           | <b>(ppm)</b> |
| 0,0092             | 0,91      | 0,55      | 0,030    | 0,0007   | 17,16     | 9,053     | 0,078     | 0,006     | 0,151     | 100          |

Fonte: (APERAM SOUTH AMERICA 2020).

As superfícies das amostras foram abrasadas em sequência com as lixas P80, P180, P220, P320, P500, P800 (FEPA) na Politriz Automática STRUERS TegraPol-25, e P1200 (FEPA) na Politriz Manual STRUERS DP-9, a fim de atingir a rugosidade requerida na norma ASTM G76-18. Logo após, mensuraram-se parâmetros de rugosidade da superfície por meio de 5 leituras no Rugosímetro Portátil TAYLOR HOBSON®PRECISION Surtronic 25, com 0,25 mm de comprimento de amostragem e com 2,50 mm de comprimento de avaliação, em conformidade com a NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2002). No final, as

amostras foram tratadas termicamente, a 900 °C durante 1 hora (estabilização) ou a 1100 °C durante 1 hora (solubilização), no Forno Mufla NOVA INSTRUMENTS NI 1384. Equipamentos disponíveis no laboratório TRICORRMAT/UFES.

Figura 24 - Amostras antes dos ensaios de aço inoxidável 321: a) solubilizado e b) estabilizado. A superfície escura deve-se a oxidação durante os tratamentos



Fonte: o autor.

Nota: A graduação representa 1 cm.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Ensaios de Durezas nas Amostras de Aços Inoxidáveis, graus AISI 310 e AISI 321

Mensurou a dureza por meio do ensaio de Dureza Vickers, aplicando uma carga de 100 kgf em 4 diferentes regiões das 50 amostras de aço inoxidável austenítico 310 e das 55 amostras de aço inoxidável austenítico grau 321, por meio do Durômetro WOLPERT HT1a, e analisando a impressão gerada no Microscópio NIKON Invertido Eclipse MA200, seguindo os procedimentos indicados na norma ASTM E92-17 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS 2017). Equipamentos disponíveis no Laboratório TRICORRMAT/UFES.

### 3.2.2 Acabamento Superficial das Amostras de Aços Inoxidáveis, graus AISI 310 e AISI 321

Em seguida, as superfícies das amostras foram abrasadas em sequência com as lixas P80, P180, P220, P320, P500, P800 (FEPA) na Polítriz Automática STRUERS TegraPol-25, e P1200 (FEPA) na Polítriz Manual STRUERS DP-9, a fim de atingir a rugosidade requerida na norma ASTM G76 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018).

### **3.2.3 Análise de Parâmetros de Rugosidade Superficial das Amostras**

Mensurou-se a rugosidade da superfície das amostras de aços inoxidáveis austeníticos, grau AISI310 e grau AISI 321, por meio 5 leituras no Rugosímetro Portátil TAYLOR HOBSON®PRECISION Surtronic 25, com 0,25 mm de comprimento de amostragem e com 2,50 mm de comprimento de avaliação, em conformidade com a NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2002) Equipamentos disponíveis no Laboratório TRICORRMAT/UFES.

### **3.2.4 Tratamento Térmico nas Amostras de Aços Inoxidáveis, graus AISI 310 e AISI 321**

Após a preparação superficial, foram executados os tratamentos térmicos: de solubilização (1 hora a 1100 °C) ou de envelhecimento (200 horas a 800 °C) nas amostras de aço inoxidável austenítico 310, e de estabilização (1 hora a 900 °C) ou de solubilização (1 hora a 1100 °C) e nas amostras de aço inoxidável austenítico grau 321, no forno Mufla NOVA INSTRUMENTS NI 1384 do TRICORRMAT, ou forno Mufla do LFT - Laboratório de Fenômeno de Transportes.

### **3.2.5 Análise da Distribuição Granulométrica dos Grãos das Cinzas**

Amostras das cinzas foram peneiradas por 6 Peneiras Padronizadas (abertura de 500 µm, 425 µm, 300 µm, 250 µm, 150 µm e 75 µm) e os grãos retidos foram pesados na Balança SHIMADZU UX6200H (resolução de 0,01 g) a fim de estimar a distribuição granulométrica. Para os ensaios, foi decidido utilizar os grãos retidos no peneiramento com as Peneiras Padronizadas de 850 µm e 150 µm em virtude do tamanho do funil do Alimentador de partículas e para manter a velocidade de partículas em função do tamanho dos grãos uniformes, respectivamente. As peneiras foram disponibilizadas pelo laboratório LEMAC/UFES.

### **3.2.6 Metalografia das Amostras**

A análise das microestruturas foi realizada através de microscopia ótica no microscópio Nikon modelo Eclipse MA 200 pertencente ao TRICORRMAT/UFES. Realizaram-se a metalografia em: uma amostra de aço AISI 1020, uma amostra de aço inoxidável AISI 304, uma amostra de aço inoxidável AISI 310 após o tratamento

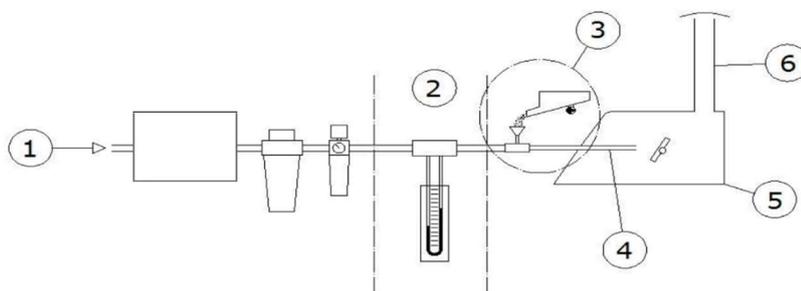
térmico de solubilização, uma amostra de aço inoxidável AISI 321 após o tratamento térmico de solubilização, uma amostra de aço inoxidável 310 após o tratamento térmico de envelhecimento, uma amostra de aço inoxidável 321 após o tratamento térmico de estabilização. Para revelar a microestrutura foi realizado: ataque químico por solução de Nital durante doze segundos de imersão na amostra de aço AISI 1020, ataque eletrolítico em solução de 10% de ácido oxálico ou ataque químico por solução de Vilella nas amostras de aço inoxidável AISI 310 e AISI 321. A preparação seguiu os procedimentos da norma ASTM E3-11 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS 2011).

### 3.2.7 Ensaios Tribológicos

#### 3.2.7.1 Erosímetro TRICORRMAT/UFES

O erosímetro, Figura 25, é do tipo a jato de ar, que proporciona através de um fluxo de ar uma aceleração às partículas que serão impactadas na superfície da amostra. O erosímetro pode ser dividido em seis (6) partes, a saber: Alimentação e tratamento de ar, por meio de um compressor e filtro; controle do fluxo de ar, por meio da leitura da pressão dinâmica via manômetro “U” instalado no tubo de Venturi que está localizado entre o filtro e o alimentador de partículas; alimentador de partículas; por meio de funil calibrado. Acelerador de partículas, por meio do bocal; Câmara de ensaio; Saída dos gases.

Figura 25 - Desenho esquemático do erosímetro: (1) Alimentação e tratamento de ar; (2) Controle do fluxo de ar; (3) Alimentador de partículas; (4) Acelerador de partículas; (5) Câmara de ensaio; (6) Saída dos gases



Fonte: (CALVI e COSTA JUNIOR 2009).

Nota: adaptado pelo autor.

#### 3.2.7.2 Controle do Fluxo de Partículas

O controle da massa de partículas foi feito por um funil, um para cada abrasivo.

Construído com chapa de aço inoxidável e com o tamanho do orifício de acordo com a vazão mássica desejada (30 g/min). Registraram-se cinco (5) medições para cada funil.

#### 3.2.7.3 Mensuração das Massas de Partículas Impactadas

Os pós abrasivos, alumina e cinzas, foram desumidificados na Estufa para Secagem NOVA INSTRUMENTS NI 1500 por 1 hora antes dos ensaios. Em seguida, 300 gramas de abrasivo foram selecionados e pesadas na Balança SHIMADZU UX6200H (resolução de 0,01 g) para os ensaios. Equipamentos disponíveis no TRICORRMAT/UFES.

#### 3.2.7.4 Controle da Velocidade de Impacto das Partículas

A velocidade de impacto das partículas é medida pelo método dos dois discos (RUFF e IVES 1975) e correlacionada com a pressão dinâmica medida pelo manômetro “U”, posicionado no tubo de Venturi que está instalado na tubulação de alimentação de ar. Foram registradas várias medições de velocidade para várias medições de pressão dinâmica, até encontrar a pressão dinâmica que atinge a velocidade desejada (30 e 70 m/s).

#### 3.2.7.5 Limpeza das Amostras

Todas as amostras foram limpas antes da mensuração da massa, com água e detergente, seguido com álcool e por fim com acetona, ambos na lavadora ultrassônica SANDERS SoniClean 2PS ou UNIQUE UltraCleaner USC800 durante 5 minutos em cada etapa. Equipamentos disponíveis no TRICORRMAT/UFES.

#### 3.2.7.6 Mensuração das Massas das Amostras

Todas as amostras foram pesadas, na Balança de Precisão SARTORIUS CPA225D (resolução de 0,01 mg), antes e após os ensaios de erosão, assim como logo após a limpeza e da desmagnetização das mesmas. Equipamento disponível no TRICORRMAT/UFES.

### 3.2.7.7 Ensaio de Erosão para Calibração do Erosímetro

Conforme as condições estabelecidas na norma ASTM G76 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018), ensaiaram-se as amostras de aço carbono 1020 por partículas de alumina de 50  $\mu\text{m}$ , com velocidade de impacto de 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ângulo de impacto 90°, duração de 10 minutos, temperatura ambiente (20 °C), e o fluxo de partículas de 30  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$  (equivalente a 2  $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$ ). Também conforme as condições estabelecidas na norma ASTM G76, ensaiaram-se 6 amostras de aço inoxidável 304 com alumina de abrasivo, velocidade de impacto das partículas de 70  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ângulo de impacto 90°, duração de 10 minutos, temperatura ambiente (20°C), e com fluxo de partículas de 30  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$  (equivalente a 2  $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$ ).

### 3.2.7.8 Ensaio de Erosão para Análise da Erosividade das Cinzas

Em seguida, ensaiaram-se amostras de aço inoxidável 304 com a cinza de abrasivo, velocidade de impacto das partículas de 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (3 amostras) e de 70  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (3 amostras), ângulo de impacto de 90°, duração de 10 minutos, na temperatura ambiente (20°C), e com fluxo de partículas de 30  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### 3.2.7.9 Ensaio de Erosão das Amostras de Aço Inoxidável

Já nas amostras de aços inoxidáveis austeníticos, graus 310 e 321, os ensaios foram realizados com ambos os abrasivos, alumina e cinzas, velocidade de impacto das partículas de 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ângulo de impacto 30° e 90°, duração de 10 minutos, na temperatura ambiente (20°C), e com fluxo de partículas de 30  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ . A ordem seguida foi uma sequência aleatória das 16 condições, que foi repetida em 3 baterias, e depois, feito posteriormente mais algumas réplicas para substituição das réplicas com valores *outliers* (definidas como aquelas que representam 0,5% da população normal).

### 3.2.7.8 Investigação dos Micromecanismos de Desgaste

A fim de investigar os micromecanismos, foram feitas micrografias via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), no Laboratório de Materiais da empresa Prysmian Group filial Cariacica, e no Laboratório da UFRN.

### 3.2.7.9 Análise Estatística dos Resultados

A análise dos dados dos resultados foi feita com auxílio do TIBCO® Statistica™ 13.3, estabelecendo intervalo de confiança de 95%, e excluindo os valores *outliers* (aquele que representam 0,5% da população). Foi escolhido para análise das variâncias o método fatorial com três (3) fatores: abrasivo (alumina e cinzas como níveis), ângulo de impacto (30° e 90° como níveis) e material (310 envelhecido, 310 solubilizado, 321 estabilizado e 321 solubilizado como níveis).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIOS DE DUREZA NOS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS, GRAUS AISI 310 E AISI 321

A média dos valores de dureza, encontrados nas 50 amostras de aço inoxidável austenítico 310 com 4 réplicas de medição, foi 179 HV 100. O resultado para o desvio padrão foi de 4 HV 100. A média dos valores de dureza, encontrados nas 55 amostras de aço inoxidável austenítico grau AISI 321 com 4 réplicas de medição, foi 163 HV 100. O resultado para o desvio padrão foi de 4 HV 100. A Tabela 7, resume os resultados.

Tabela 7 - Durezas das amostras de aços inoxidáveis, graus 310 e 321

| <b>Aço Inoxidável</b> | <b>Nº de amostras</b> | <b>Nº de réplicas</b> | <b>Média (HV 100)</b> | <b>s (HV 100)</b> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 310                   | 50                    | 4                     | 179                   | 4                 |
| 321                   | 55                    | 4                     | 163                   | 4                 |

Fonte: o autor.

Nota: "s" representa o desvio-padrão amostral.

### 4.2 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS

A média dos valores da rugosidade superficial Ra, encontrados nas 50 amostras de aço inoxidável austenítico com 5 réplicas de medição, foi de 0,05  $\mu\text{m}$ . O resultado para o desvio padrão de 0,01  $\mu\text{m}$ . A média dos valores da rugosidade superficial Ra, encontrados nas 55 amostras de aço inoxidável austenítico grau 321 com 5 réplicas de medição, foi de 0,04  $\mu\text{m}$ . O resultado para o desvio padrão foi de 0,01  $\mu\text{m}$ . A Tabela 8, resume os resultados.

Tabela 8 - Ra das amostras de aços inoxidáveis, graus 310 e 321

| <b>Aço Inoxidável</b> | <b>Nº de amostras</b> | <b>Nº de réplicas</b> | <b>Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>s (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|-------------------------------------|
| 310                   | 50                    | 5                     | 0,05                                    | 0,01                                |
| 321                   | 55                    | 5                     | 0,04                                    | 0,01                                |

Fonte: o autor.

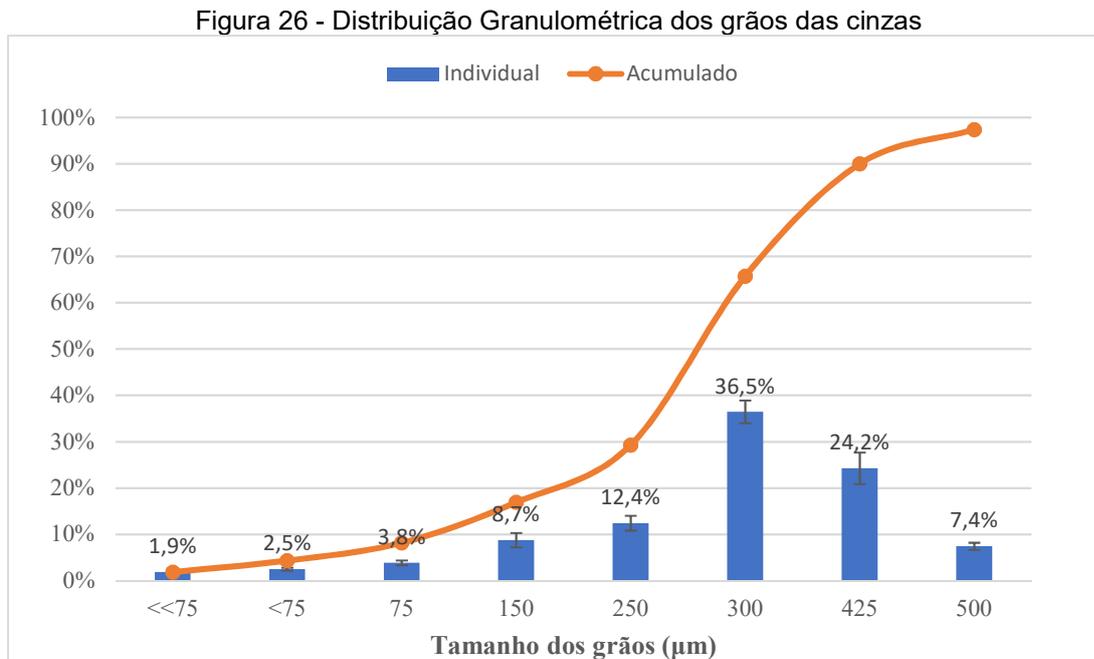
Nota: "s" representa o desvio-padrão amostral.

A norma ASTM G76-18, que exige rugosidade Rq de 1  $\mu\text{m}$ , alcança a rugosidade requerida pelo lixamento com lixa P600. No presente trabalho lixou-se até P1200 e sabe-se que para um perfil de rugosidade gaussiano o Rq é igual a 1,25 vezes o valor

do Ra. Assim, a rugosidade das amostras se encontra abaixo da requerida.

#### 4.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS

A Figura 26 abaixo ilustra a parcela percentual retida em cada peneira. Pode-se observar que 73,5% dos grãos das cinzas possuem diâmetro entre 250 a 425  $\mu\text{m}$ .



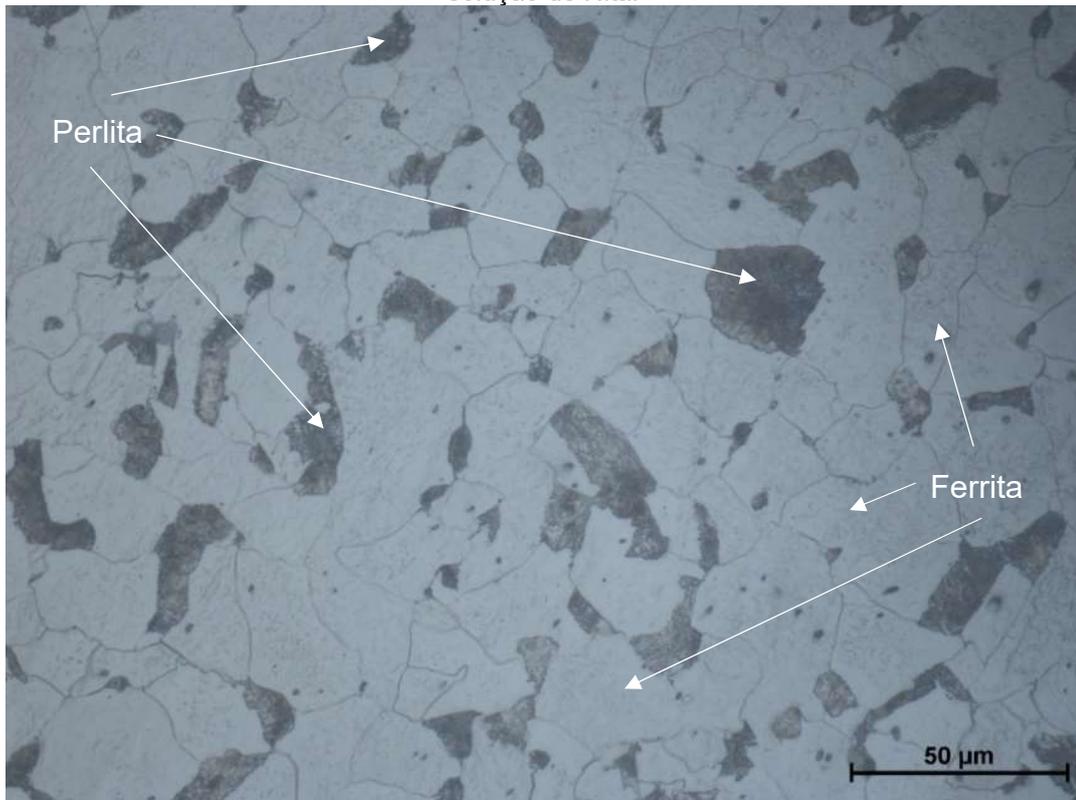
Fonte: o autor

Nota: '<75' se refere ao passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$  e '<<75'  $\mu\text{m}$  ao perdido durante todo peneiramento.

#### 4.4 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS

A Figura 27 mostra a microestrutura clássica de uma amostra de aço AISI 1020 obtida ataque químico por solução de Nital durante doze segundos, onde pode-se ver as fases ferrita (clara) e perlita (escura). Em seguida, a Figura 28 mostra a microestrutura revelada de uma amostra de aço inoxidável AISI 304, após o ataque eletrolítico por solução de 10% de ácido oxálico, onde pode-se observar as maclas de recozimento, típicas da microestrutura, com alguns artefatos do ataque metalográfico devido a uma possível oxidação (pontos escuros observados).

Figura 27 - Micrografia do aço AISI 1020 sob ataque químico por doze segundos de imersão em solução de Nital



Fonte: o autor.

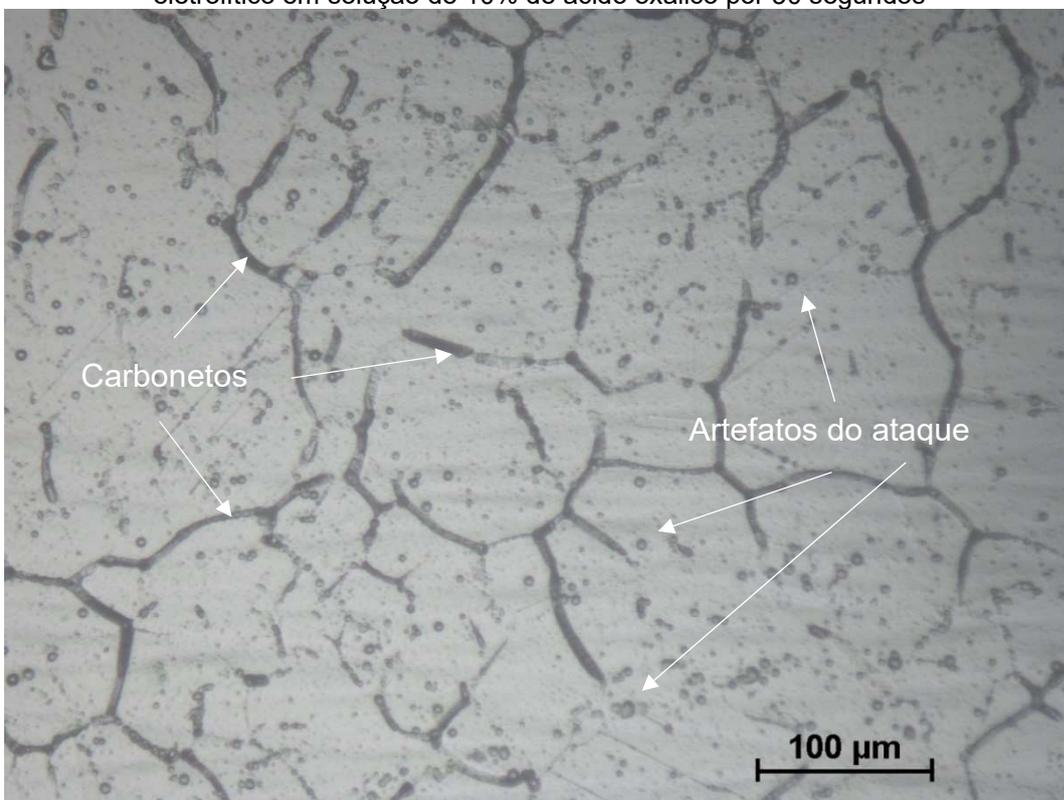
Figura 28 - Micrografia do aço inoxidável AISI 304. Ataque eletrolítico em solução de ácido oxálico durante um minuto



Fonte: o autor.

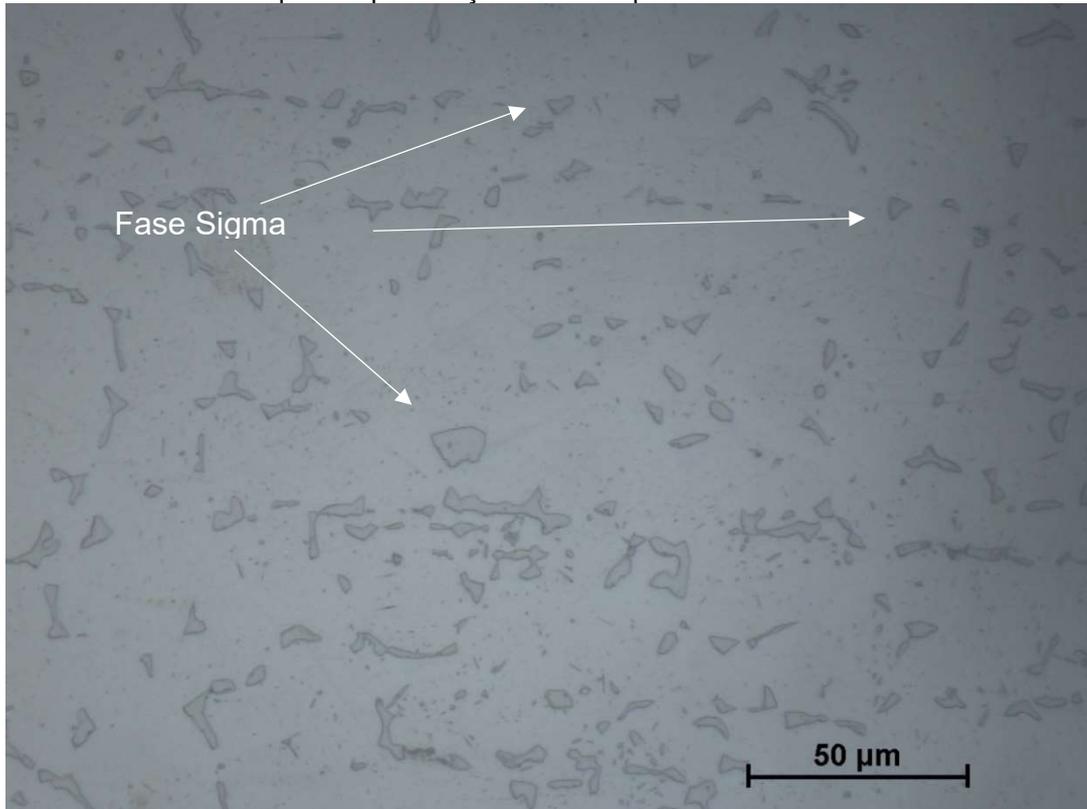
As Figura 29 à Figura 32 foram obtidas da metalografia das amostras de aços inoxidáveis, graus AISI 310 e AISI 321, após os tratamentos térmicos. Na Figura 29 tem-se a micrografia do aço inoxidável 310 solubilizado, onde o ataque eletrolítico, por solução de 10% de ácido oxálico durante 30 segundos, revela provavelmente os carbonetos precipitados nos contornos de grãos, não dissolvidos pelo tratamento térmico, assim como pontos de corrosão (artefatos do ataque). E, na Figura 30, tem-se a micrografia o aço inoxidável 310 envelhecido, revelado pelo ataque químico por solução de Vilella durante seis minutos, que mostra a intensa precipitação da fase sigma nos pontos tríplices e nos contornos de grão. Deve-se notar aqui, o maior aumento de grão na condição solubilizada que na envelhecida.

Figura 29 - Micrografia de aço inoxidável austenítico 310 solubilizado a 1100 °C por 1 hora sob ataque eletrolítico em solução de 10% de ácido oxálico por 30 segundos



Fonte: o autor.

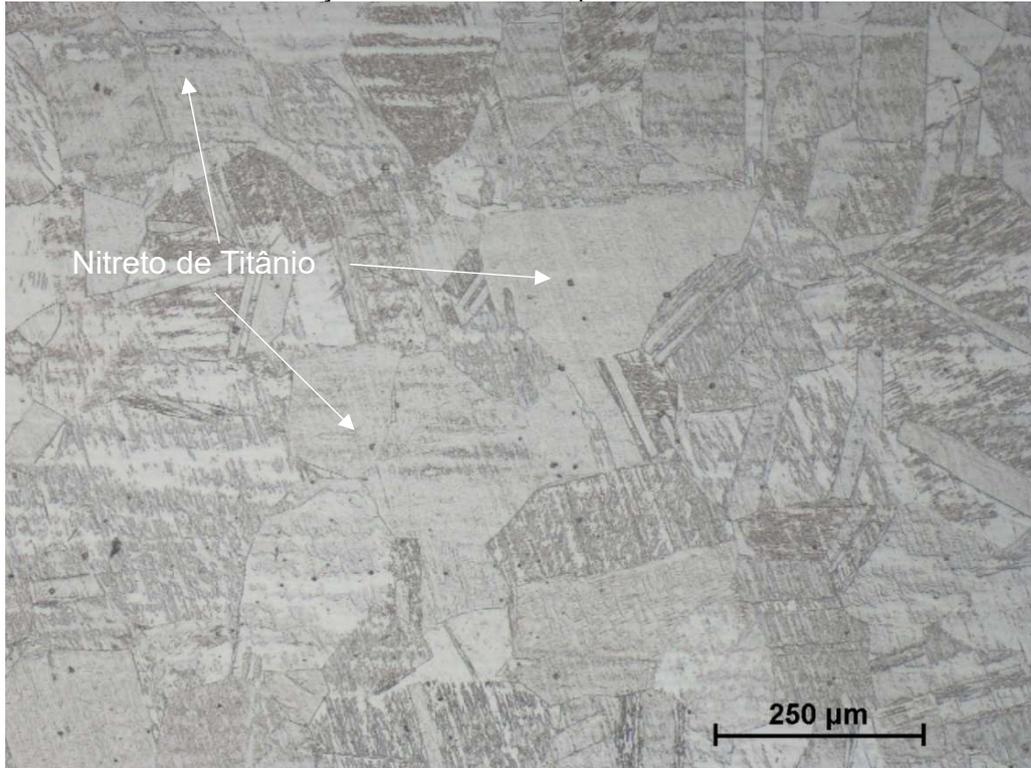
Figura 30 - Micrografia de aço inoxidável austenítico 310 envelhecido a 800 °C por 1 hora sob ataque químico por solução de Vilella por seis minutos



Fonte: o autor.

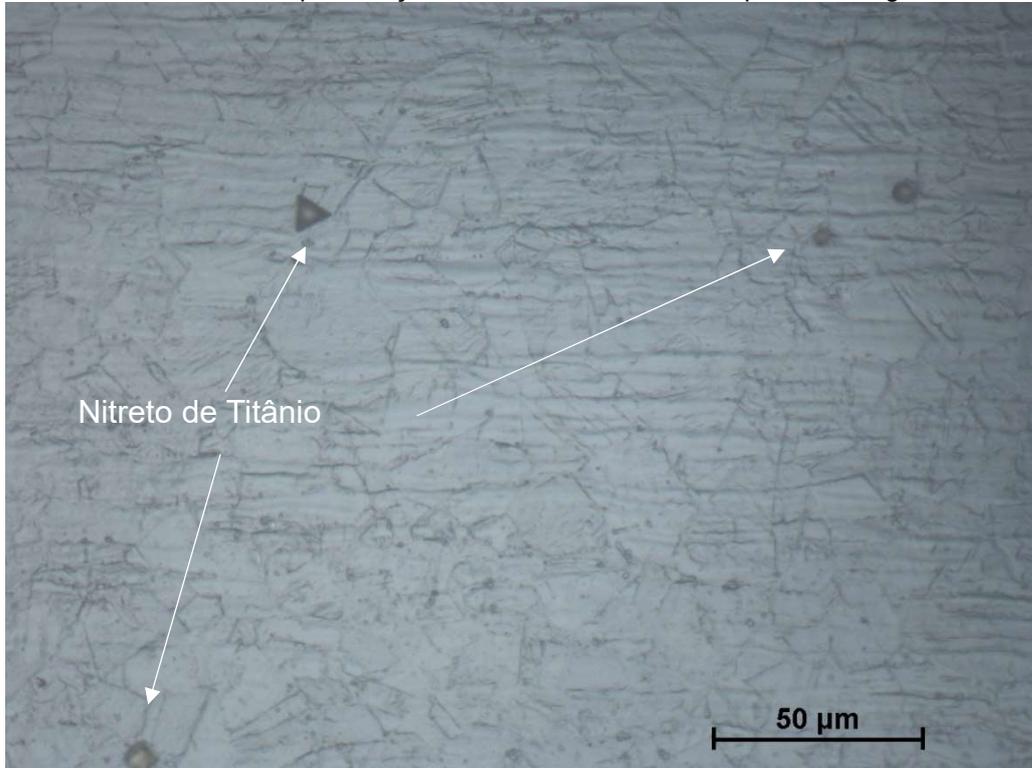
Na Figura 31, observa-se a micrografia do aço inoxidável grau AISI 321 solubilizado, atacado por solução de 10% de ácido oxálico por 30 segundos, onde podem-se observar pequenos nitretos de titânio não dissolvidos (pontos pretos). Por fim, na Figura 32, a micrografia do aço inoxidável grau 321 estabilizado, atacado por solução de 10% de ácido oxálico por 15 segundos, mostra em maior escala os nitretos de titânio, conforme era esperado para esse grau. Assim como antes, deve-se atentar para o maior tamanho de grão, atingido pela condição solubilizada.

Figura 31 - Micrografia de aço inoxidável 321 solubilizado a 1100 °C por 1 hora. Ataque químico por solução de Vilella oxálico por seis minutos



Fonte: o autor.

Figura 32 - Micrografia de aço inoxidável 321 estabilizado a 900 °C por 1 hora sob ataque eletrolítico por solução de 10% de ácido oxálico por trinta segundos



Fonte: o autor.

## 4.5 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

### 4.5.1 Controle do Fluxo de Partículas

Antes de realizar os ensaios normatizados, foi realizado medições do fluxo de partículas, que foi controlado vazão mássica de saída do funil para cada abrasivo. A média dos valores, encontrados com 5 réplicas de medição para o funil destinado à alumina, foi de 30,04 g/s. O resultado para o desvio padrão de 1,26 g/s. A média dos valores das vazões, encontrados com 5 réplicas de medição para o funil destinado às cinzas, foi de 29,52 g/s. O resultado para o desvio padrão foi de 0,85 g/s. A Tabela 9, resume os resultados.

Tabela 9 - Vazão mássica dos funis

| Funil para o abrasivo: | Nº de réplicas | Média | s |
|------------------------|----------------|-------|---|
| Alumina                | 5              | 30    | 1 |
| Cinzas                 | 5              | 29    | 1 |

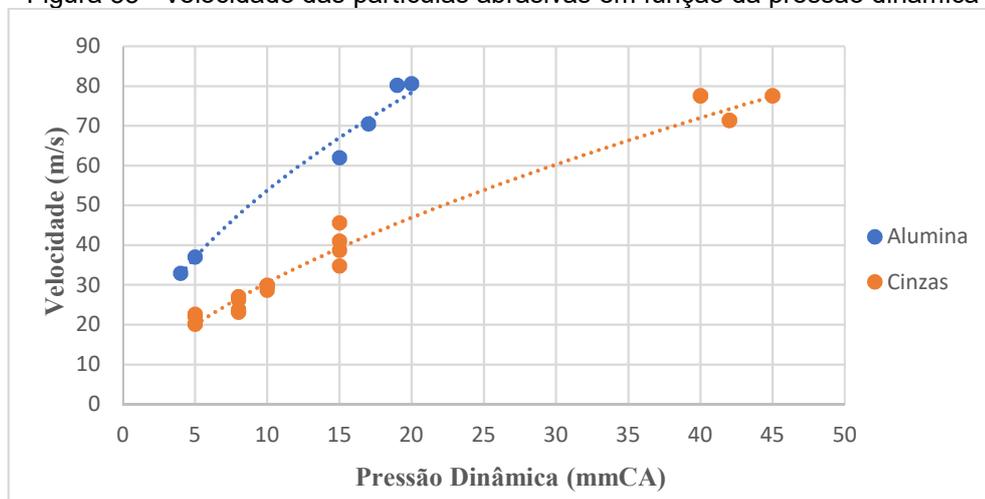
Fonte: o autor.

Nota: "s" representa o desvio-padrão amostral.

### 4.5.2 Controle da Velocidade de Impacto das Partículas

Em seguida, realizaram-se medições da velocidade de partícula em função da pressão dinâmica indicada pela altura de coluna d'água do manômetro 'U'. Figura 26 abaixo, ilustra a correlação entre a pressão dinâmica selecionada com a respectiva velocidade de partícula atingida, onde se percebe que a cinzas necessita de maiores pressões para atingir a mesma velocidade que a alumina, devido ao seu maior tamanho de grão.

Figura 33 - Velocidade das partículas abrasivas em função da pressão dinâmica



Fonte: o autor.

### 4.5.3 Ensaio de Erosão para Validação do Erosímetro

A Figura 34 e Figura 35 mostra a fotografia de uma das amostras ensaiadas, de aço 1020 e aço 304 respectivamente.

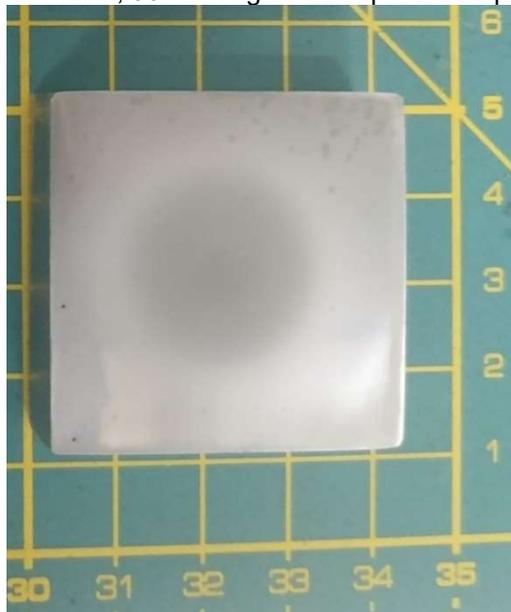
Figura 34 - Amostra de aço carbono 1020 após ensaio de erosão por alumina 50  $\mu\text{m}$ , a 30 m/s de velocidade, a 30 g/min de fluxo, 90° de ângulo de impacto das partículas e por 10 minutos



Fonte: o autor.

Nota: a graduação representa 1 cm

Figura 35 - Amostra de aço inoxidável AISI 304 após ensaio de erosão por alumina 50  $\mu\text{m}$ , a 30 m/s de velocidade, a 30 g/min de fluxo, 90° de ângulo de impacto das partículas e por 10 minutos

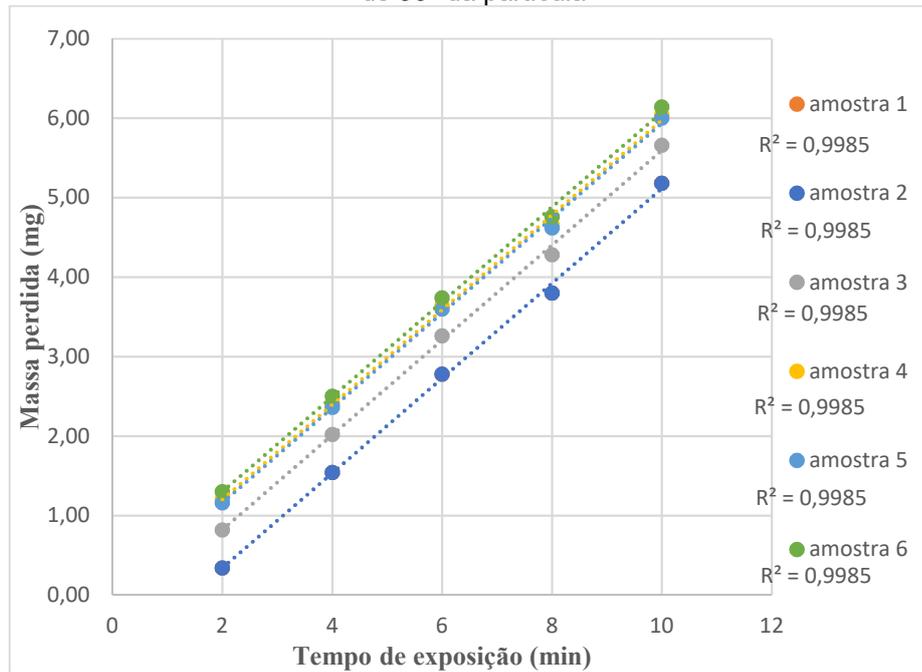


Fonte: o autor.

Nota: a graduação representa 1 cm.

Semelhante a norma ASTM G76, o gráfico abaixo (Figura 36), ilustra a evolução da massa das amostras perdida pela erosão em função do tempo de exposição para no ensaio com aço carbono 1020 com alumina de 50  $\mu\text{m}$  a 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidade, fluxo de 2  $\text{mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e ângulo de impacto de 90° da partícula:

Figura 36 - Desgaste em função do tempo de exposição para as amostras de aço carbono 1020 ensaiadas com alumina 50  $\mu\text{m}$  a 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidade, fluxo de 2  $\text{mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e ângulo de impacto de 90° da partícula



Fonte: o autor.

A norma ASTM G76 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018) estabelece, para o aço carbono 1020 com alumina de 50  $\mu\text{m}$  a 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidade, fluxo de 2  $\text{mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e ângulo de impacto de 90° da partícula, a taxa média de erosão de  $2,740\cdot 10^{-3}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ , um desvio dentro de laboratório de  $0,468\cdot 10^{-3}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$  e um desvio entre laboratórios de  $0,807\cdot 10^{-3}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ . Já para o aço inoxidável 304 com alumina de 50  $\mu\text{m}$  a 70  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidade, fluxo de 2  $\text{mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e ângulo de impacto de 90° da partícula, a norma ASTM G76 estabelece a taxa média de erosão de  $32,360\cdot 10^{-3}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ , um desvio dentro de laboratório de  $1,597\cdot 10^{-3}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$  e um desvio entre laboratório de  $6,786\cdot 10^{-3}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ . No o presente trabalho, foram encontrados os seguintes valores, mostrados na Tabela 10, para essas condições:

Tabela 10 - Taxas médias de erosão ( $10^{-3}\cdot\text{mm}^3/\text{g}$ ) em aço carbono 1020 e aço inoxidável 304 na condição de 30 m/s, 50  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 30 g/min, a 90°

| Material | Nº de réplicas | Média  | s     |
|----------|----------------|--------|-------|
| 1020     | 6              | 2,375  | 0,247 |
| 304      | 6              | 31,493 | 1,858 |

Fonte: o autor

Nota: "s" representa o desvio-padrão amostral.

#### 4.5.4 Taxas de Erosão pelas Cinzas

Foram realizados ensaios de erosão em aço inoxidável 304 com as cinzas de abrasivo, nas condições da norma ASTM G76-18 ( $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ou  $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidade de impacto, ângulo de impacto de  $90^\circ$  e duração 10 minutos) (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 2018) a fim de avaliar a erosividade das cinzas obtidas. A média das taxas de erosão, encontrados com 3 réplicas de medição para a velocidade de impacto de  $30 \text{ m/s}$ , foi de  $1,128 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ . O resultado para o desvio padrão de  $0,087 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ . A média das taxas de erosão, encontrados com 3 réplicas de medição para a velocidade de impacto de  $70 \text{ m/s}$ , foi de  $30,195 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ . O resultado para o desvio padrão foi de  $3,156 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ . A Tabela 11, resume os resultados.

Tabela 11 - Taxas de erosão ( $10^{-3} \text{ mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ) em aço inoxidável austenítico AISI 304 com as cinzas nas condições da norma ASTM em G76-18.

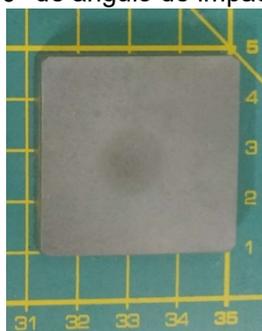
| Velocidade de impacto | Nº de réplicas | Média   | s     |
|-----------------------|----------------|---------|-------|
| 30                    | 3              | 1,128   | 0,087 |
| 70                    | 3              | 30,1952 | 3,156 |

Fonte: o autor.

Nota: "s" representa o desvio-padrão amostral.

Os resultados indicam que o maior tamanho dos grãos das cinzas compensa a menor dureza e menor angulosidade em relação aos dos grãos de alumina, quando comparados os resultados na velocidade de  $70 \text{ m/s}$ . Quanto aos resultados com velocidade de  $30 \text{ m/s}$ , não há valores na norma ASTM G76-18 para o aço inoxidável austenítico AISI 304 com alumina. Contudo (PATEL, et al. 2016) ensaiou nessa condição, encontrando o resultado de  $18,750 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$  ( $0,150 \text{ mg/g}$ ), conforme mostrado na Tabela 3 da revisão bibliográfica. Portanto, a erosividade das cinzas decresce em função da velocidade em maior intensidade do que alumina.

Figura 37 - Amostras de aço carbono 1020 após ensaio de erosão por alumina  $50 \mu\text{m}$ , a  $30 \text{ m/s}$  de velocidade, a  $30 \text{ g/min}$  de fluxo,  $90^\circ$  de ângulo de impacto das partículas e por 10 minutos



Fonte: o autor.

Nota: a graduação representa 1 cm.

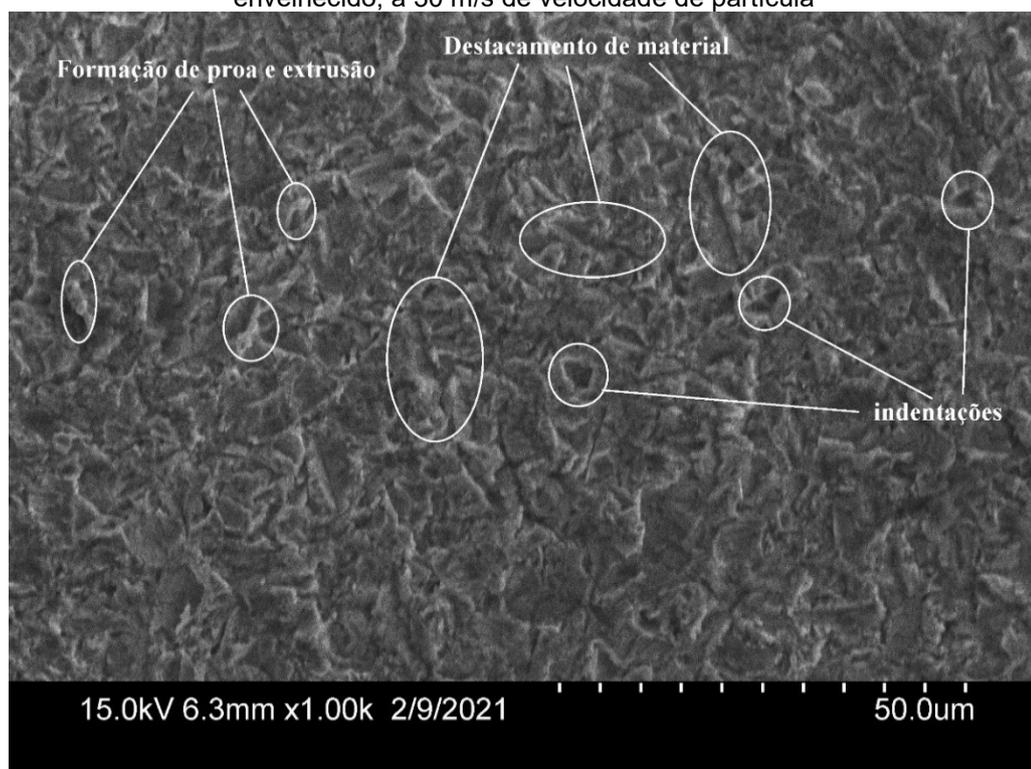
#### 4.5.5 Investigação dos Micromecanismos

A análise das micrografias via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das áreas erodidas mostra uma grande distinção de micromecanismos quando comparados em relação ao abrasivo e pequenas diferenças quando comparados com os outros fatores. Por exemplo, podem-se observar nas Figura 38 e

Figura 39, que a remoção de material ocorre por microcortes e por meio do destacamento das proas após sucessivos impactos. Quando comparados do ângulo de  $90^\circ$  para o de  $30^\circ$ , percebe-se um aumento na frequência de microcortes, tanto do tipo I quanto do tipo II. É possível também perceber uma menor profundidade das crateras nos aços não solubilizados.

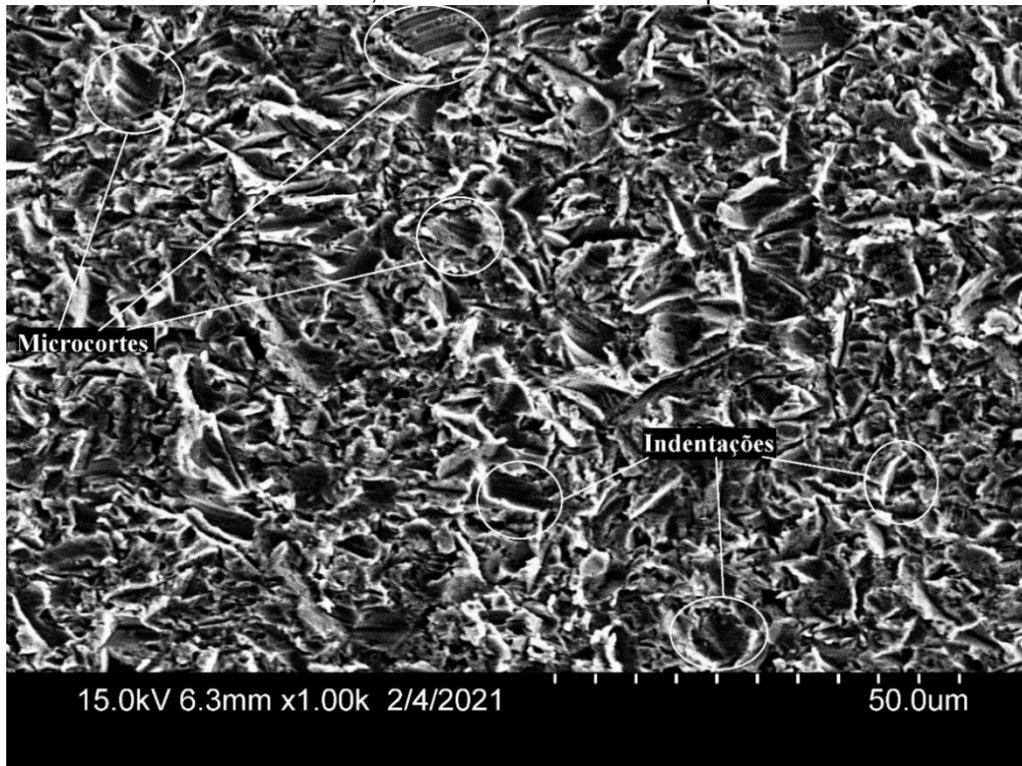
A Figura 40 e a Figura 41 ilustram o desgaste pelas cinzas, onde a formação e destacamento das proas é o micromecanismo principal, principalmente a  $90^\circ$ . Nos ângulos de  $30^\circ$ , e nos aços solubilizados, observam-se alguns casos de microindentações e microcortes em menor proporção. Quase nenhuma diferença se observa entre os aços inoxidáveis austeníticos, graus 310 e 321.

Figura 38 - Micrografia via MEV da área erodida pela alumina a  $90^\circ$  do aço inoxidável 310 envelhecido, a 30 m/s de velocidade de partícula



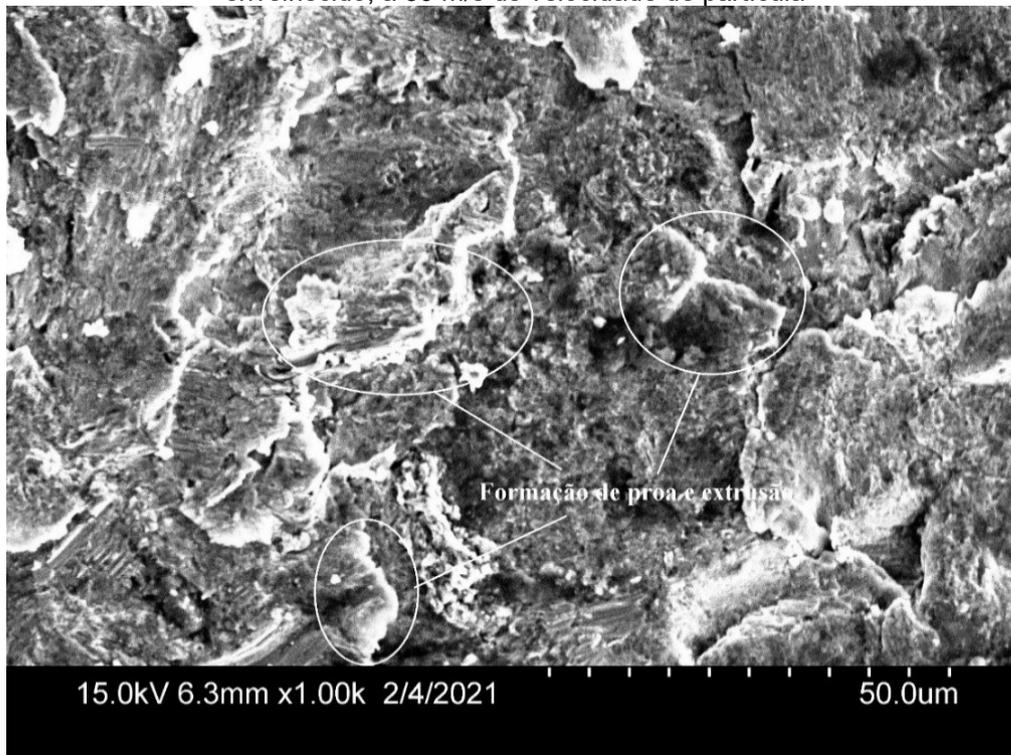
Fonte: o autor

Figura 39 - Micrografia via MEV da área erodida pela alumina a 30° do aço inoxidável 321 solubilizado, a 30 m/s de velocidade de partícula



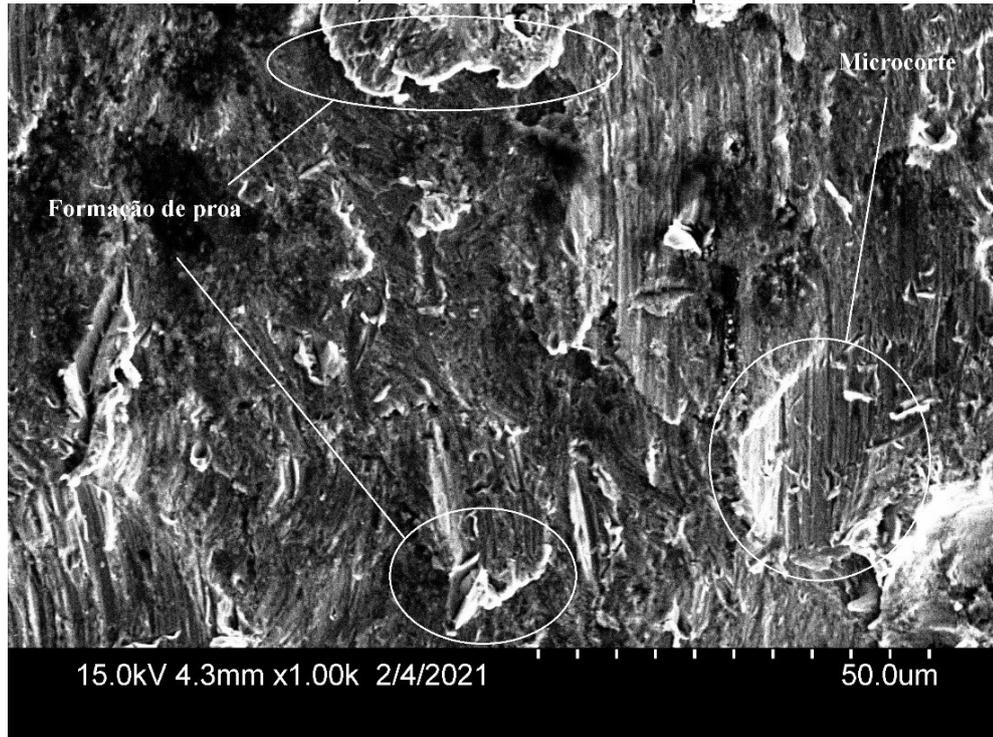
Fonte: o autor

Figura 40 - Micrografia via MEV da área erodida pelas cinzas a 90° do aço inoxidável austenítico 321 envelhecido, a 30 m/s de velocidade de partícula



Fonte: o autor

Figura 41 - Micrografia via MEV da área erodida pelas cinzas a 30° do aço inoxidável 310 solubilizado, a 30 m/s de velocidade de partícula



Fonte: o autor

#### 4.5.6 Efeito Médio dos Fatores na Taxa de Erosão

Os resultados dos ensaios realizados nos aços inoxidáveis austeníticos, graus 310 solubilizado (310S), grau 310 envelhecido (310E), grau 321 solubilizado (321S) e grau 321 estabilizado (321E) estão organizados na Tabela 12. No Apêndice A, encontra-se a *tabela da ANOVA* gerada pelo software.

Tabela 12 - Taxas médias de erosão (mg/g), a 30 m/s de velocidade de partícula, das amostras de aços inoxidáveis, grau 310 e grau 321, tratadas termicamente

| Abrasivo | Ângulo | Material | n | MÉDIA | MÉDIA  |          |
|----------|--------|----------|---|-------|--------|----------|
|          |        |          |   |       | Ângulo | Abrasivo |
| Alumina  | 310E   | 30°      | 3 | 0,059 | 0,062  | 0,053    |
| Alumina  | 310S   | 30°      | 4 | 0,066 |        |          |
| Alumina  | 321E   | 30°      | 3 | 0,041 | 0,061  |          |
| Alumina  | 321S   | 30°      | 4 | 0,080 |        |          |
| Alumina  | 310E   | 90°      | 3 | 0,037 | 0,042  |          |
| Alumina  | 310S   | 90°      | 4 | 0,047 |        |          |
| Alumina  | 321E   | 90°      | 4 | 0,038 | 0,046  |          |
| Alumina  | 321S   | 90°      | 4 | 0,054 |        |          |

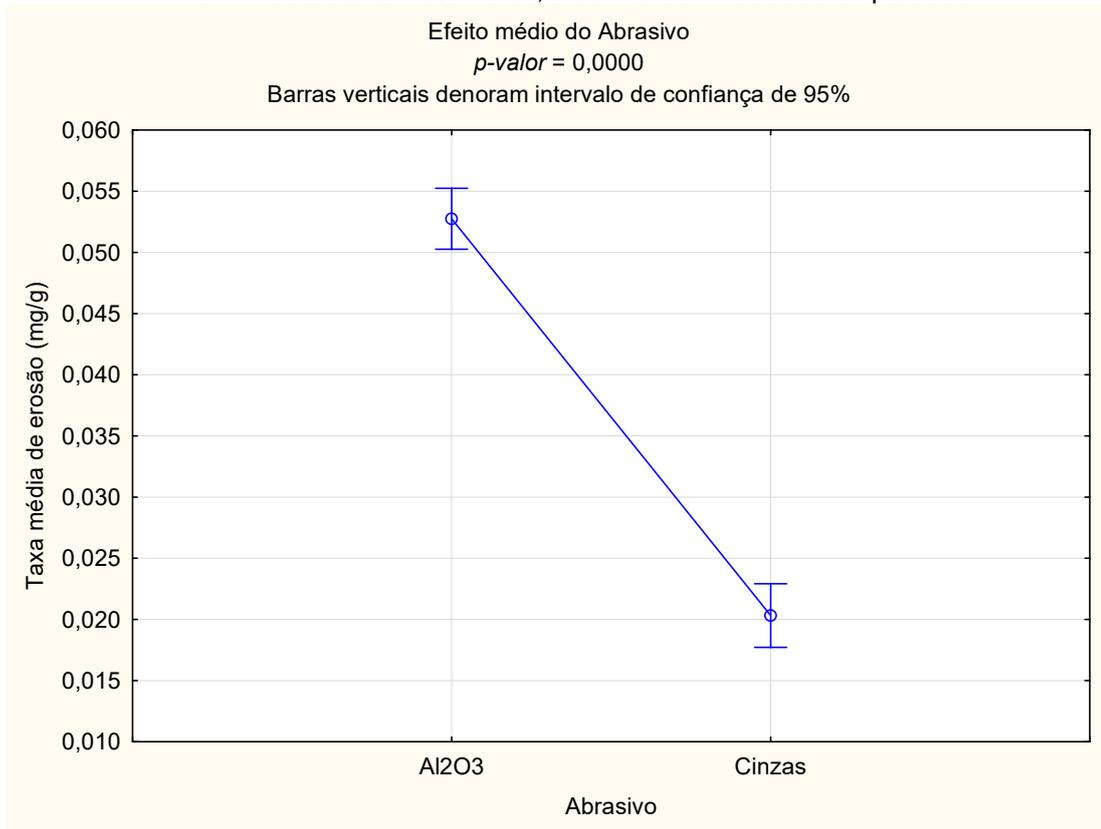
|        |      |     |   |              |              |              |
|--------|------|-----|---|--------------|--------------|--------------|
| Cinzas | 310E | 30° | 3 | <b>0,014</b> | <b>0,018</b> | <b>0,020</b> |
| Cinzas | 310S | 30° | 3 | <b>0,021</b> |              |              |
| Cinzas | 321E | 30° | 4 | <b>0,015</b> | <b>0,017</b> |              |
| Cinzas | 321S | 30° | 3 | <b>0,018</b> |              |              |
| Cinzas | 310E | 90° | 3 | <b>0,015</b> | <b>0,023</b> |              |
| Cinzas | 310S | 90° | 3 | <b>0,031</b> |              |              |
| Cinzas | 321E | 90° | 5 | <b>0,022</b> | <b>0,024</b> |              |
| Cinzas | 321S | 90° | 3 | <b>0,026</b> |              |              |

Fonte: o autor

A erosão com alumina de abrasivo alcançou maiores valores médios (mais que dobro) (Figura 42), da mesma maneira que ocorreu nos ensaios com aço inoxidável austenítico AISI 304. Isso se deve em parte devido a diferença de durezas entre os abrasivos, conforme demonstra (BABU, BASU e SUNDARARAJAN 2011) e em parte pela diferença de angulosidade, conforme demonstrado por (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017). O efeito da dureza também pode ser observado ao comparar o resultado de (SODERBERG, et al. 1981) para o aço 316 a 45°, 66 m/s e com SiO<sub>2</sub> em relação ao resultado de (LAGUNA-CAMACHO, et al. 2013) para o 316 a 30°, 24 m/s e com SiC, que mostra que a maior dureza gera maior desgaste ainda que a velocidade seja menor.

Já na Figura 43, mostra o efeito médio do ângulo, mostrando que a taxa de erosão está um pouco maior para o ângulo de 30°. Resultado esperado segundo a literatura (SUNDARARAJAN e SHEWMON 1983) (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017), uma vez que os materiais ensaiados são dúcteis. Recentes trabalhos confirmam esse comportamento em vários casos (Tabela 3), contudo há algumas exceções, assim acontece no presente trabalho com será observado adiante.

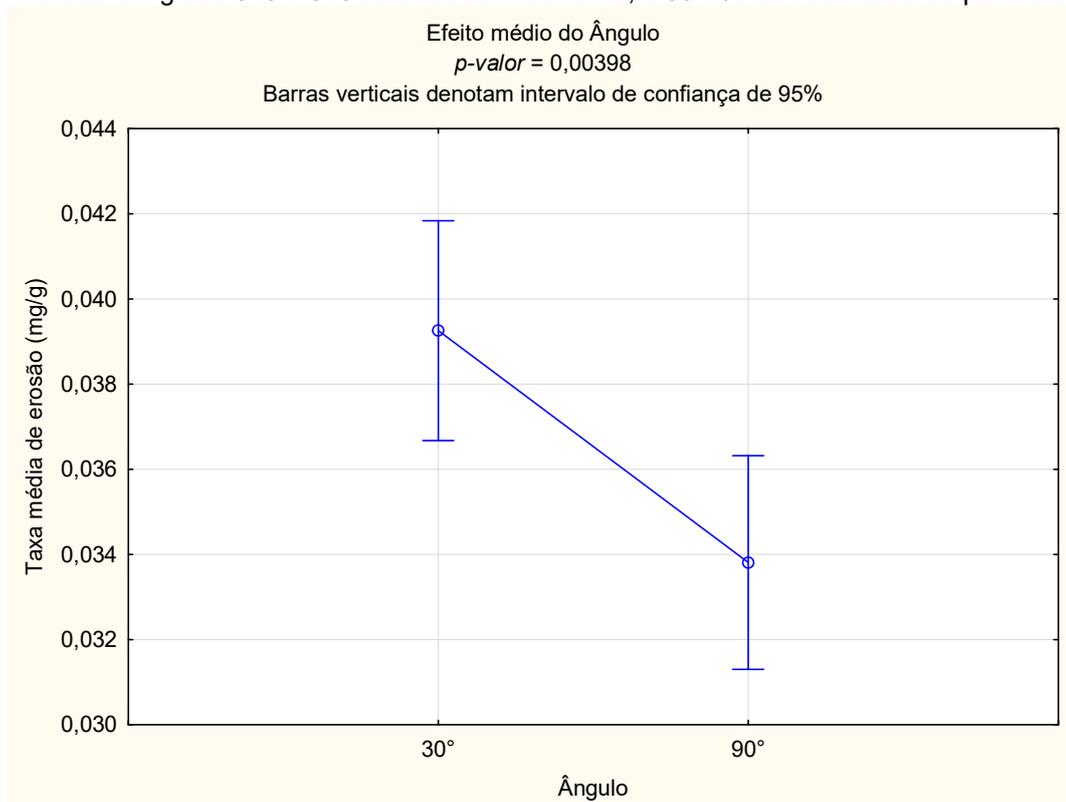
Figura 42 - Efeito médio da partícula abrasiva na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula



Fonte: (TIBCO® Statistica™ 13.3).

Nota: adaptado pelo autor.

Figura 43 - Efeito médio do ângulo de impacto das partículas na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula

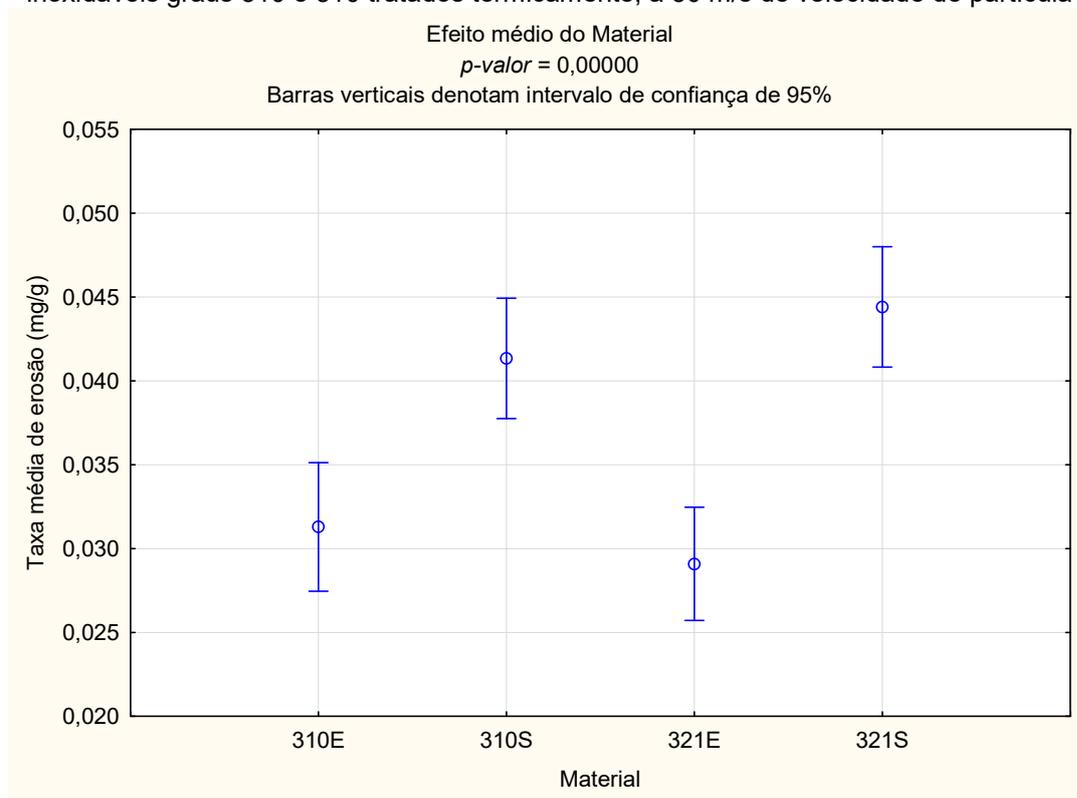


Fonte: (TIBCO® Statistica™ 13.3).

Nota: adaptado pelo autor.

Em relação ao grau do aço inoxidável em conjunto com a precipitação de segunda fase, a Figura 44 sugere que ambos precipitados, fase sigma ou carbonetos, causam a diminuição da taxa de erosão. Contudo, pode-se notar, que apesar do maior teor de cromo, e consequente maior dureza, ambos aços apresentam taxas próximas, demonstrando que o aumento de dureza por solução sólida contribui pouco o aumento da resistência a erosão, em acordo com a literatura, pois apenas mecanismos de endurecimento sob altas deformações contribui para a resistência ao desgaste (SODERBERG, 1981) (HUTCHINGS, 2017). Além disso, o aumento da resistência é alcançado mais rapidamente pelo grau 321, pois seu tempo necessário para a estabilização dos carbonetos de titânio é bem menor, de 1 hora contra 200 horas de envelhecimento.

Figura 44 - Efeito médio dos materiais (graus/tratamento) na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula



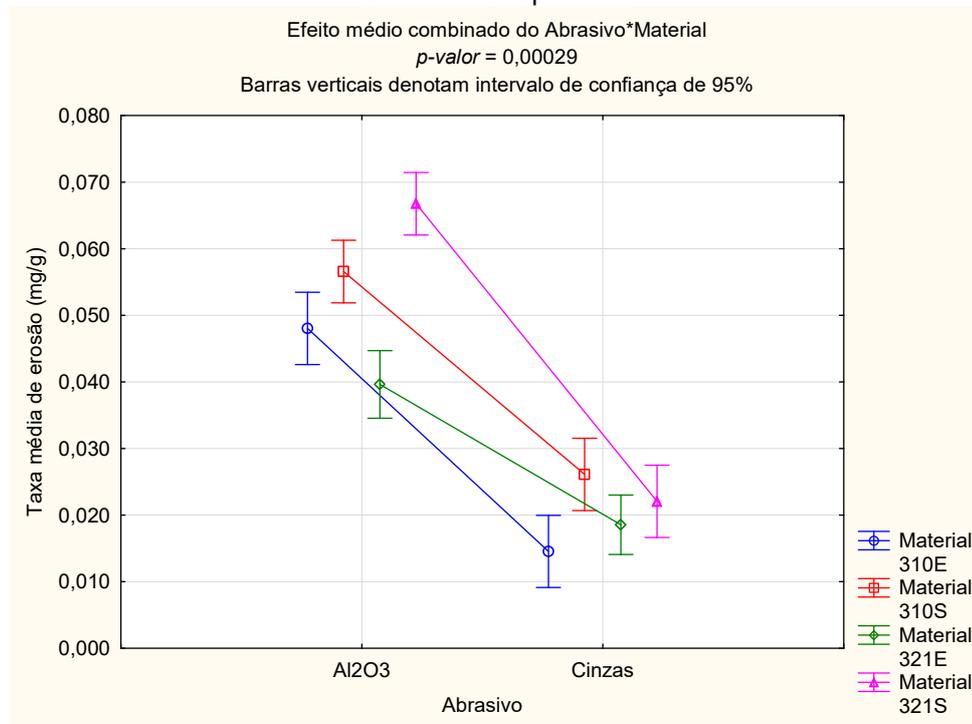
Fonte: (TIBCO® Statistica™ 13.3).

Nota: adaptado pelo autor.

Ao analisar o efeito médio combinado do abrasivo com o material (Figura 45), nota-se que o efeito benéfico do tratamento de estabilização no aço inoxidável austenítico grau 321 é mais preponderante no desgaste com alumina. Isso pode ser explicado em função do menor tamanho da alumina em comparação com as cinzas, em conjunto com o menor tamanho dos carbonetos, e maior coerência com a matriz, em relação a fase sigma. Uma vez que a alumina é menor, ela produz deformações mais localizadas

e preferencialmente no interior dos grãos. Dessa forma, o efeito endurecedor da fase sigma não contribui em aumento de resistência ao desgaste, conforme foi explicado na seção 2.3 por (HUTCHINGS e SHIPWAY 2017).

Figura 45 - Efeito médio combinado da partícula abrasiva com o material (grau/tratamento) na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula



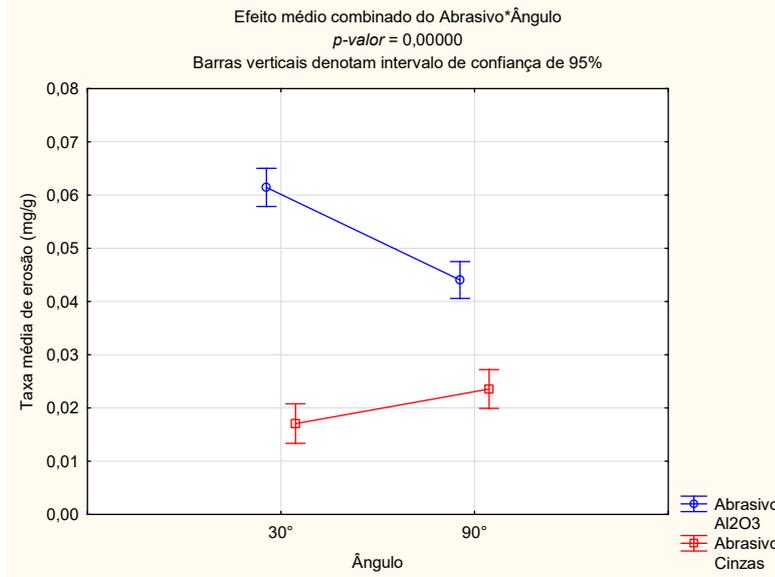
Fonte: (TIBCO® Statistica™ 13.3).

Nota: adaptado pelo autor.

A Figura 46 demonstra o efeito da forma das partículas na dominância do micromecanismo de desgaste, conforme descrito na seção 2.2.2.2. Para a cinzas, o microcorte tem baixa probabilidade de ocorrência devido a sua alta esfericidade. Isso pode explicar a maior taxa de erosão a 90°, pois a 30° o microcorte gera deformações plásticas menos localizadas, exigindo mais impactos para remoção de material. O contrário ocorre com a alumina, que devido a sua alta angulosidade, gera maior taxa de erosão a 30°, pois o microcorte gera maiores remoções de massa do que a remoção pelo esgotamento plástico dos microsulcamentos.

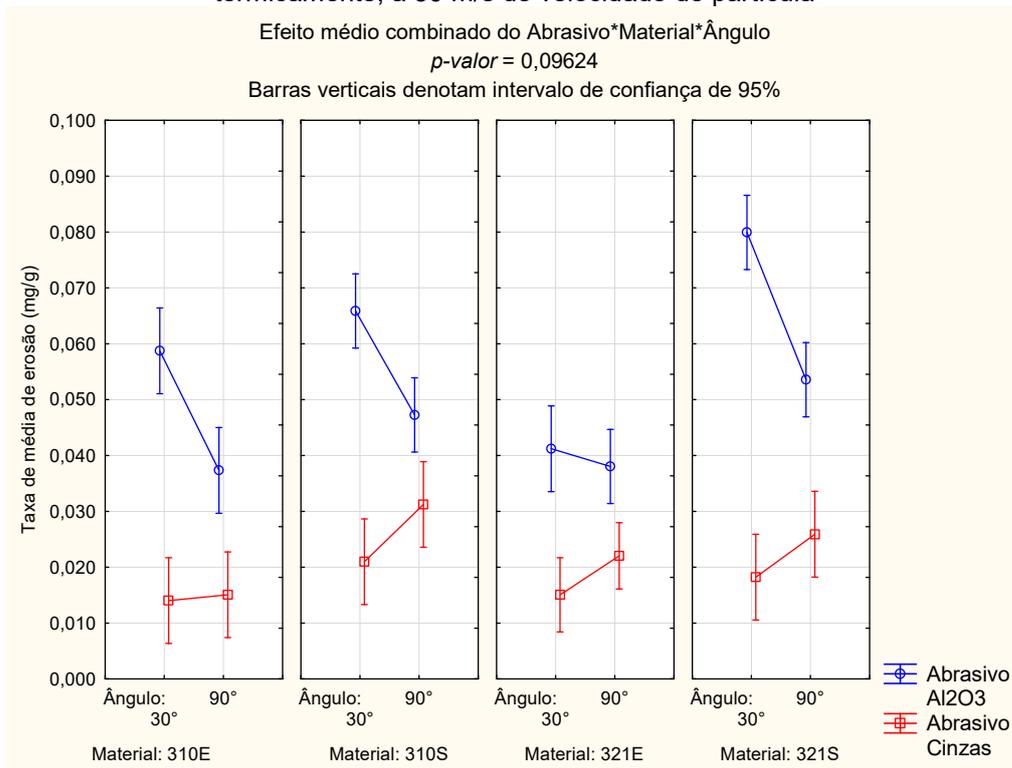
Por fim, a Figura 47 mostra a semelhança nos resultados nas condições ensaiadas, porém com dois casos destoantes. Um deles é o resultado do aço inoxidável 310 envelhecido erodido pelas cinzas a 90°, que obteve maior resistência em relação ao solubilizado. O outro é o resultado do aço inoxidável 321 estabilizado a 30°, que obteve maior resistência em relação ao solubilizado. Esses dois casos ocorrem devido ao menor tamanho de grão que foi produzido pelos respectivos tratamentos térmicos, conforme mostrado anteriormente.

Figura 46 - Efeito médio combinado da partícula abrasiva com o ângulo na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula



Fonte: (TIBCO® Statistica™ 13.3).  
 Nota: adaptado pelo autor.

Figura 47 - Efeito médio combinado da partícula abrasiva com o material (grau/tratamento), e com o ângulo de impacto na taxa média de erosão nos aços inoxidáveis graus 310 e 310 tratados termicamente, a 30 m/s de velocidade de partícula



Fonte: (TIBCO® Statistica™ 13.3).  
 Nota: adaptado pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

A análise da granulometria das cinzas estimou que 70% dos grãos das cinzas possuem entre 150 a 425  $\mu\text{m}$  de diâmetro, e a análise via MEV mostrou que a forma dos grãos é de alta esfericidade.

A taxa de erosão com cinzas de abrasivo em aço inoxidável austenítico AISI 304 na velocidade de 70 m/s atingiu valores similares ao encontrado pela norma ASTM G76-18 para a alumina nas mesmas condições, e quando ensaiados a 30 m/s apresentou valores menores que a metade dos encontrados pela norma para o aço carbono 1020 nas mesmas condições.

Os aços inoxidáveis austeníticos, de graus 310 e 321, tratados termicamente apresentaram mecanismos de desgaste dúcteis, microcorte quando ensaiados com alumina, e microsulcamento e formação de proa quando ensaiados com as cinzas, sendo mais severo com alumina. Além disso, nos ensaios com alumina as maiores taxas ocorreram a 30°, enquanto que com as cinzas foi a ligeiramente maior a 90°.

Apesar da diferença de composição química e fases, os aços inoxidáveis AISI 310 e AISI 321 obtiveram taxas de erosão semelhante na maioria das condições ensaiadas, sobretudo na condição mais próxima da operada no ciclone, demonstrando que os mecanismos de resistência têm pouca influência dos precipitados, assim como, também, a exposição em altas temperatura diminuiu a resistência em virtude do aumento do grão gerado. Portanto, os resultados são promissores para o uso de AISI 321 em ciclone, contudo, é necessário ensaios de erosão em altas temperaturas para investigar a influência da oxidação.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nas experiências do presente trabalho, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

Realizar ensaios de erosão com as cinzas na temperatura de 850 °C e sob atmosfera semelhante a encontrada no ciclone;

Realizar ensaios de erosão a frio (removendo a camada de óxido) em outros aços inoxidáveis austeníticos, como por exemplo o grau AISI347, após tratamentos térmicos a 850°C em diferentes tempos de exposição, assim como também a quente em atmosfera semelhante a operada no ciclone;

Investigar a composição química das cinzas em conjunto com a granulometria das mesmas, além de mensurar as propriedades mecânicas das mesmas (dureza, tenacidade a fratura);

Aprofundar a investigação dos micromecanismos com estéreo microscopia, metalografia e ensaios de microdureza das seções transversais à calota de desgaste;

Investigar se houve transformação martensítica induzida por deformação no aço durante a operação no ciclone, como também das amostras dos ensaios.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALA-OUTINEN, Tiina. "Fire resistance of austenitic stainless steels Polarit 725 (EN 1.4301) and Polarit 761 (EN 1.4571)." *Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland*, 1966: 17.
- APERAM SOUTH AMERICA. "brasil.aperam.com." 2020. <https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Aperam%20Inox%20Tubos%20Brasil%20-%20Cat%C3%A1logo%20de%20Produtos%20v2.pdf> (acesso em 21 de Fevereiro de 2021).
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "ASTM G76: Conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jet." *Annual Book of ASTM Standards*, 2018.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. "ASTM G-40: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion." *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.
- BABU, Suresh P., Bikramjit BASU, e G. SUNDARARAJAN. "The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings." *Wear* 240, nº 11-12 (2011): 903-913.
- BLASER, P., S. THIBAUT, e J. SEXTON. "Use of Computational Modeling for FCC Reactor Cyclone Erosion Reduction at the Marathon Petroleum Catlettsburg Refinery." *THE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUIDIZATION – FROM FUNDAMENTALS TO PRODUCTS*. NH Conference Centre Leeuwenhorst Noordwijkerhout: Anais...ECI Symposium Series, 2013.
- BRAGANÇA, Bruno Corveto. "DESGASTE EROSIVO DE REVESTIMENTOS WC-CR-CO DEPOSITADOS VIA PROCESSOS DE SOLDAGEM PTA-P E POR MANTA SINTERIZADA." (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico - Universidade Federal do Espírito Santo) Abril 2016.
- CHANG, N., H. P. WANG, W. L. HUANG, e K. S. LIN. "Comparison between MSW ash and RDF ash from incineration process." *North American Waste-to-Energy Conference*. Taiwan, 1997. 959-1055.
- DANYLUK, S., W. J. SHACK, e J. Y. PARK. "THE EROSION OF A TYPE 310 STAINLESS STEEL CYCLONE FROM A COAL GASIFICATION PILOT PLANT." *Wear* 63 (1980): 95-104.

- DELTOID GmbH. “<http://www.deltoid-lufttechnik.com/>.” 2014. [http://www.deltoid-lufttechnik.com/company.html?file=files/content/pdf/en/deltoid\\_brochure.pdf](http://www.deltoid-lufttechnik.com/company.html?file=files/content/pdf/en/deltoid_brochure.pdf) (acesso em 21 de Fevereiro de 21).
- DING, Hongqin, Shuyun JIANG, e Jiang XU. “Cavitation erosion resistance of ZrC nanoceramic coating.” *The Journal of Engineering Tribology*, 2019: 1-9.
- DIVAKAR, M., V.K. AGARWAL, e S.N. SINGH. “Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316.” *Wear* 259, nº 1-6 (July-August 2005): 110-117.
- DOWSON, Duncan. *History of Tribology*. New York: Longman, 1998.
- EYRE, T.S. “Wear characteristics of metals.” *Tribology International* 9, nº 5 (1976): 203-212.
- FOGLER, H. Scott. *ELEMENTS OF CHEMICAL REACTION ENGINEERING*. V. Michigan: Pearson Education, Inc., 2016.
- FONTES, Cintia Maria Ariani. “UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DE LODO DE ESGOTO E DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO.” Rio de Janeiro, 2008.
- GORETTA, K. C., R. C. ARROYO, C.-T. WU, e J. L. ROUTBORT. “Erosion of work-hardened copper, nickel, and 304 stainless steel.” *Wear* 147 (1991): 145-154.
- HAIYING, Zhang, Zhao YOUCAI , e Qi JINGYU. “Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in ceramic brick: Product characterization and environmental toxicity.” *Waste Management (Waste Management)*, 2011: 331-341.
- HAIYING, Zhang, Zhao YOUCAI, e Qi JINGYU. “Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile.” *Journal of Hazardous Materials* 141 (2007): 106-114.
- HAUGEN, K., O. KVERNOLD, A. RONOLD, e R. SANDBERG. “Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves.” *Wear*, 1995: 179-188.
- HOLMBERG, K., e A. ERDEMIR. “Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions.” *Friction* 5, 2017: 263-284.
- HOLMBERG, Kenneth, Roope SIILASTO, Tarja LAITINEN, Peter ANDERSSON, e Ari JÄSBERG. “Global energy consumption due to friction in paper machines.” *Tribology International* 62 (2013): 58-77.
- HUSSAIN, AAazad, SB WESLEY, HS GOYAL, e AP HARSHA. “Investigations on solid

- particle erosion behaviour of ferritic steels, austenitic steel and low carbon steel and correlation of erosion data with erosion model." *Journal of Engineering Tribology* 227, nº 3 (2012): 234-245.
- HUTCHINGS, I. M. "Wear by particulates." *Chemical Engineering Science* 42, nº 4 (1987): 869-878.
- HUTCHINGS, Ian, e Philip SHIPWAY. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London: Edward Arnold, 2017.
- INFIESTA, Luciano R., Cassius R.N. FERREIRA, Alam G. TROVÓ, Valério L. BORGES, e Solidônio R. CARVALHO. "Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel." *Journal of Environmental Management*, 2019: 715-719.
- JOST, H. Peter. "TRIBOLOGY - ORIGIN AND FUTURE." *Wear* 136 (1990): 1-17.
- KLEIS, Ilmar, e Priit KULU. *Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control*. London: Springer, 2008.
- LAGUNA-CAMACHO, J. R., A. MARQUINA-CHÁVEZ, J. V. MÉNDEZ-MÉNDEZ, M. VITE-TORRES, e E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. "Solid particle erosion of AISI 304, 316 and 420 stainless steels." *Wear* 301 (2013): 398-405.
- LIPPOLD, John C., e Damian KOTECKI. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- LO, K.H., C.H. SHEK, e J.K.L. LAI. "Recent developments in stainless steels." *Materials Science and Engineering R* 65 (2009): 39-104.
- MEIER, Henry França. "Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional." Campinas, 1998.
- MOYA, D, C ALDÁS, G LÓPEZ, e P KAPARAJU. "Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies." *Energy Procedia*, 2017: 286-295.
- PARVAZ, Farzad, Seyyed Hossein HOSSEINI, Khairy ELSAYED, e Goodarz AHMADI. "Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators." *Separation and Purification Technology* 201 (August 2018): 223-237.
- PATEL, Mayank, Darshan PATEL, S. SEKAR, P.B. TAILOR, e P.V. RAMANA. "Study of Solid Particle Erosion Behaviour of SS 304 at Room Temperature." *Procedia*

*Technology* 23 (2016): 288-295.

RAMBALDI, E., L. ESPOSITO, F. ANDREOLA, L. BARBIERI, I. LANCELLOTTI, e I. VASSURA. "The recycling of MSWI bottom ash in silicate based ceramic." *Ceramics International* 36 (2010): 2469–2476.

ROSER, M. *Global Change Data Lab*. 10 de Dezembro de 2020. <https://ourworldindata.org/worlds-energy-problem>.

ROY, Manish. "Elevated temperature erosive wear of metallic materials." *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006: 101-124.

RUIZ-RIOS, A., C. LÓPEZ-GARCÍA, e I. CAMPOS-SILVA. "The solid particle erosion on borided X12CrNiMoV12-3 stainless steel." *Materials Letters* 227 (October 2020): 128-381.

SAFT, Robert Jan. "Life cycle assessment of a pyrolysis/gasification plant for hazardous paint waste." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12, nº 4 (May 2007): 230-238.

SIPRA, Ayesha Tariq, Ningbo GAO, e Haris SARWAR. "Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts." *Fuel Processing Technology*, 2018: 131-147.

SODERBERG, S., S. HOGMARK, U. ENGMANT, e H. SWAHNT. "Erosion classification of materials using a centrifugal erosion tester." *Tribology International* 14, nº 6 (1981): 333-343.

STACHOWIAK, G. B., e G.W. STACHOWIAK. "Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles." *Wear* 256, nº 6 (2004): 600-607.

STACHOWIAK, G.W., e A.W. STACHOWIAK. *Engineering Tribology*. Butterworth-Heinemann, 2001.

SUNDARARAJAN, G., e P.G. SHEWMON. "A new model for the erosion of metals at normal incidence." *Wear* 84, nº 2 (1983): 237-258.

SUNDARARAJAN, Govindan, e Manish ROY. "Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures." *Tribology International* 30, nº 5 (1997): 339-359.

TOFIGHIAN, H., E. AMANI, e M. SAFFAR-AVVAL. "A large eddy simulation study of cyclones: The effect of sub-models on efficiency and erosion prediction." *Powder Technology* 360 (January 2020): 1237-1252.

VITE-TORRES, M., J.R. LAGUNA-CAMACHO, R.E. BALDENEBRO-CASTILLO, E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, E.E. VERA-CÁRDENAS, e J. VITE-TORRES. "Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles." *Wear* 301, nº 1-2 (April–May 2013): 383-389.

VIZCARRA, Gino Omar Calderón. "Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos." Rio de Janeiro, Março de 2010.

World Steel Association. "World Steel Association (worldsteel)." [www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org). 08 de November de 2019. [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/Tables\\_TechnicalProperties\\_EN.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf) (acesso em 01 de Fevereiro de 2021).

ZHOU, Jianren R., e S. BAHADUR. "High-Temperature Erosion-Corrosion Behavior of Stainless Steels." Edição: V. Srinivasan e K. Vedula. *Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 1989: 315.



# APÊNDICE



## APÊNDICES – A

TABELA DA ANOVA

| EFEITO                   | S.Q.     | Graus de       |          | F        | <i>p</i> -valor |
|--------------------------|----------|----------------|----------|----------|-----------------|
|                          |          | Liber-<br>dade | Q.M.     |          |                 |
| Intercepto               | 0,072700 | 1              | 0,072700 | 1682,010 | 0,000000        |
| Abrasivo                 | 0,014319 | 1              | 0,014319 | 331,293  | 0,000000        |
| Material                 | 0,002355 | 3              | 0,000785 | 18,163   | 0,000000        |
| Ângulo                   | 0,000404 | 1              | 0,000404 | 9,341    | 0,003981        |
| Abrasivo*Material        | 0,001029 | 3              | 0,000343 | 7,939    | 0,000286        |
| Abrasivo*Ângulo          | 0,001941 | 1              | 0,001941 | 44,917   | 0,000000        |
| Material*Ângulo          | 0,000332 | 3              | 0,000111 | 2,557    | 0,068648        |
| Abrasivo*Material*Ângulo | 0,000293 | 3              | 0,000098 | 2,260    | 0,096239        |
| Erro                     | 0,001729 | 40             | 0,000043 |          |                 |

Fonte: (TIBCO® Statistica™)