

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE ERODENTE À BASE DE ALUMINA NA
INCRUSTAÇÃO EM UM REVESTIMENTO FeCr, ASPERGIDO POR
ARCO ELÉTRICO, EMPREGADO EM ENSAIOS DE DESGASTE
EROSIVO, À TEMPERATURA AMBIENTE E A 400°C**

Matheus Araujo da Cunha

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre – RS

2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE ERODENTE À BASE DE ALUMINA NA
INCRUSTAÇÃO EM UM REVESTIMENTO DE FeCr, ASPERGIDO POR
ARCO ELÉTRICO, EMPREGADO EM ENSAIOS DE DESGASTE
EROSIVO, À TEMPERATURA AMBIENTE E A 400°C**

Matheus Araujo da Cunha

Engenheiro de Materiais

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antônio Shigueaki Takimi

Prof. Dr. André Ronaldo Frohlich

Prof. Dr. Afonso Reguly

Prof. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jorge Rogério Mattos da Cunha e Neusa Maria Araujo da Cunha, pelo apoio em momentos difíceis, por sempre acreditarem em mim e pela educação que me propiciaram.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann pela grande oportunidade, confiança, pelos ensinamentos e por disponibilizar uma estrutura física e técnica, no laboratório o qual coordena (LACER), de excelente qualidade aos seus alunos.

A Prof. Dra. Tânia Maria Basegio que foi minha primeira orientadora no LACER e sempre esteve ao meu lado durante todos esses anos me apoiando, pela sua amizade e confiança.

Aos colegas do LACER, em especial aos bolsistas que tenho a oportunidade de trabalhar diretamente: Ângelo Saorin, Bruno Bezerra, Brunno Frantz.

Ao amigo e colega Matheus A. Heck Sumny, pela grande participação e dedicação na parte experimental desse trabalho, e também por sempre estar disposto a me ajudar a resolver problemas do Laboratório.

Ao Mestre Eng. Andrei Locatelli pelos ensinamentos da área de pesquisa.

Aos meus amigos colegas que dividem sala comigo por terem muita calma e paciência com meu mau humor, em especial: Fabiana Souza, Gisele Leindecker, Rafael Hubert.

A Tamires Fogassi por estar presente nesse momento da minha vida sempre me incentivando e apoiando nos momentos mais complicados.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. ASPERSÃO TÉRMICA	5
3.1.1. Microestrutura de Revestimentos Aspergidos	7
3.1.2. Arco Elétrico	9
3.2. DESGASTE	10
3.2.1. Erosão	12
3.2.1.1. Fatores que Afetam a Erosão	12
3.2.2. Erodente	15
3.2.2.1. Morfologia	15
	IV

3.2.2.2.Tamanho das Partículas	17
3.2.2.3.Dureza e Friabilidade das Partículas	19
3.2.3. Erosão em Materiais Metálicos	19
3.3. ALUMINA	26
3.3.1. Propriedades da Alumina	27
3.3.2. Alumina como erodente	30
3.3.2.1.Alumina eletrofundida	30
3.3.2.2.Alumina calcinada	31
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
4.1. MATERIAIS	33
4.1.1. Revestimento	33
4.1.2. Erodente	33
4.1.2.1.Análise Química	33
4.1.2.2.Distribuição Granulométrica	34
4.1.2.3.Morfologia	34
4.2. MÉTODOS	35
4.2.1. Fabricação dos corpos-de-prova	35
4.2.2. Fabricação dos revestimentos	36
4.2.3. Caracterização do Revestimento	37
4.2.3.1. Medida da Espessura do Revestimento	37

4.2.3.2. Porosidade	37
4.2.3.3. Densidade Aparente	Erro! Indicador não definido.
4.2.3.4. Oxidação do Revestimento	38
4.2.3.5. Análise Microestrutural	38
4.2.4.1. Calibração do Equipamento e Parâmetros de Ensaio	41
4.2.4.1.1. Velocidade das Partículas de Erodente	41
4.2.4.1.2. Temperatura de Ensaio	44
4.2.4.1.3. Tempo de Ensaio	44
4.2.4.1.4. Ângulo de Incidência do Erodente	45
4.2.5. Ensaio de Erosão	45
4.2.5.1. Determinação da área erodida	46
4.2.5.2. Determinação da quantidade de alumina Incrustada	46
4.2.5.3. Determinação da taxa de erosão	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO REVESTIMENTO DE FeCr	49
5.2. ENSAIOS DE DESGASTE À TEMPERATURA AMBIENTE	51
5.2.1. Tamanho médio de partícula do erodente	51
5.2.2. Área Superficial dos Erodentes	52
5.2.3. Determinação da área erodida	53
5.2.4. Quantidade de alumina Incrustada	54
	VI

5.2.5. Taxa de Erosão	57
5.3. ENSAIOS DE DESGASTE A TEMPERATURA DE 400 °C	59
5.3.1. Tamanho médio de partícula do erodente	59
5.3.2. Área Superficial	60
5.3.3. Quantidade de alumina incrustada	61
5.3.4. Taxa de erosão	64
6. CONCLUSÕES	68
7. SUGESTÃO TRABALHOS FUTUROS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Princípio de funcionamento dos processos de aspersão térmica, partindo-se de matérias-primas, na forma de pó, arame ou barra, passando por uma fonte de calor para atingir um estado de alta plasticidade. Em seguida, é projetado contra um substrato para a formação do revestimento.	5
Figura 3-2: Classificação dos processos de aspersão térmica quanto à energia e tipo de consumível. Adaptado de <i>ASM Handbook Thermal Spray Processing</i> [8].	7
Figura 3-3: Detalhe da formação da microestrutura de uma liga metálica formada pelos processos de aspersão térmica. Mostrando as lamelas (partes em branco), poros, inclusões de óxidos e partículas não fundidas [10].	8
Figura 3-4: Detalhe da região de contato elétrico dos arames no processo de <i>arc-spray</i> [12].	9
Figura 3-5: Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico. Imagem adaptada de TWI-Global [13].	10
Figura 3-6: Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões [10].	11
Figura 3-7: Desgaste por erosão por partículas sólidas ocasionando o desprendimento de parte da do material da superfície.	12
Figura 3-8: Ângulo de impacto do erodente.	13
Figura 3-9: Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto na taxa de desgaste de materiais dúcteis e frágeis [17].	13
Figura 3-10: Erosão por partícula sólida do aço inox 304 a uma velocidade de 70 m/s como uma função do ângulo para as temperaturas de 24°C e 500°C [23].	15
Figura 3-11: Variação da taxa de erosão conforme a morfologia do erodente empregado. Adaptado de Reedy e Sundararajan [28].	16
Figura 3-12: Influência da velocidade para erodentes com morfologia distintas empregados em ensaios de elevadas temperaturas.	17
Figura 3-13: Variação da erosão conforme a distribuição do diâmetro médio de partículas para diferentes velocidades de teste.	18

Figura 3-14: Formas de remoção de material metálico dúctil erodido [20].....	22
Figura 3-15: Balanço da energia no impacto de partículas de erodentes esféricas no ângulo de impacto de 30° [18].....	23
Figura 3-16: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente angulares no ângulo de impacto de 30° [18].....	24
Figura 3-17: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente esféricos no ângulo de impacto de 90° [18].....	25
Figura 3-18: Variação da resistência à flexão de um material cerâmico à base de alumina em função da porosidade [42].	28
Figura 3-19: Variação do módulo de elasticidade em função da porosidade de uma alumina [42].....	29
Figura 3-20: Variação da resistência mecânica de uma alumina policristalina sem fase vítrea [44].	30
Figura 4-1: Apresenta um fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.	32
Figura 4-2: Morfologia da alumina eletrofundida (a) e calcinada (b) utilizadas como erodente. Aumento de 100x.....	35
Figura 4-3: Substrato empregado como suporte na obtenção dos revestimentos. ...	36
Figura 4-4: Esquema de uma instalação para aspersão térmica de arco elétrico [9].	37
Figura 4-5: Equipamento para ensaios de desgaste erosivo indicando as partes principais: (1) sistema de pré-aquecimento do ar, (2) sistema de alimentação de partículas erodentes; (3) Sistema venturi-acelerador de partículas e (4) Forno para os ensaios.....	39
Figura 4-6: Diagrama esquemático do venturi, dispositivo que suga as partículas erosivas misturando e homogeneizando-as com ao ar aquecido.	40
Figura 4-7: Ilustração da inserção do termopar no porta-amostra para que ocorra o contato com o corpo-de-prova.	41

Figura 4-8: Princípio do <i>double disk</i> utilizado para calibrar as velocidades das partículas erodentes nos ensaios de erosão.....	42
Figura 4-9: (a) Medidor de velocidade <i>double disk</i> projetado para o equipamento de desgaste erosivo. (b) Detalhe apresenta a zona de impacto deslocada em relação à posição abaixo da abertura do disco superior, destacando o ângulo entre a posição da abertura e o ponto médio da região de impacto [51].	43
Figura 5-1: Imagem por microscópio ótico de perfil do revestimento com ampliação 200x.	49
Figura 5-2: Imagem por microscópio ótico, com tratamento de imagem para contrastar claros e escuros para realização da quantificação dos poros. Ampliação de 200x.....	50
Figura 5-3: Imagem por MEV da vista superior do revestimento com magnitude de 400x.	50
Figura 5-4: Tamanho médio de partícula da alumina calcinada e da alumina eletrofundida, antes e após ensaios de resistência à erosão à temperatura ambiente, em função do ângulo de impacto.....	51
Figura 5-5: Diferença entre área de contato entre partícula esférica e angular adaptado de Desale [64].	53
Figura 5-6: Mapeamento do elemento alumínio por EDS nas superfícies dos revestimentos FeCr após ensaio de resistência à erosão à temperatura ambiente.	55
Figura 5-7: Estimativa da incrustação de alumina na superfície dos revestimentos FeCr, após ensaio de resistência à erosão utilizando alumina calcinada e alumina eletrofundida, à temperatura ambiente e a ângulos de impacto de 30° e 90°	56
Figura 5-8: Taxa de erosão do revestimento FeCr à temperatura ambiente, em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, calculada utilizando a Equação 4-5.....	58

Figura 5-9: Taxa de erosão à temperatura ambiente do revestimento FeCr em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, corrigida pela incrustação de alumina, estimada segundo a Equação 4-7.	58
Figura 5-10: Tamanho médio de partícula da alumina calcinada e da alumina eletrofundida, antes e após ensaios de resistência à erosão à temperatura de 400°C, em função do ângulo de impacto.	60
Figura 5-11: Imagens por MEV de topo do revestimento FeCr, contendo incrustações de alumínio após ensaio de resistência à erosão à temperatura de 400°C, com alumina calcinada (imagens superiores) e alumina eletrofundida (imagens inferiores), em função do ângulo de impacto (30°, esquerda e 90°, direita).....	62
Figura 5-12: Análise de alumínio na superfície dos revestimentos FeCr por EDS acoplada à MEV, após ensaio de resistência à erosão utilizando alumina calcinada e alumina eletrofundida, à temperatura de 400°C e a ângulos de impacto de 30° e 90°.....	63
Figura 5-13: Estimativa da incrustação de alumina na superfície dos revestimentos FeCr, após ensaio de resistência à erosão utilizando alumina calcinada e alumina eletrofundida, à temperatura de 400°C e a ângulos de impacto de 30° e 90°.....	64
Figura 5-0-16: Taxa de erosão do revestimento FeCr à temperatura de 400°C, em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, calculada utilizando a Equação 4-5.....	65
Figura 5-0-17: Taxa de erosão à temperatura de 400°C do revestimento FeCr em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, corrigida pela incrustação do alumínio, estimada segundo a Equação 4-7.	66
Figura 5-18: Análise termogravimétrica para o revestimento à base de FeCr.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-I: Características do processo de aspersão térmica a arco elétrico [8].	10
Tabela 3-II: Variação do tipo de dano como o número de Best [18].....	20
Tabela 4-I: Composição química da liga usada fornecida pelo fabricante [47].	33
Tabela 4-II: Composição química dos óxidos de alumínio utilizado como erodente.	34
Tabela 4-III: Análise granulométrica por difração a laser das aluminas.	34
Tabela 4-IV: Níveis usados na deposição do revestimento.....	36
Tabela 4-V: Temperaturas utilizadas para ensaios de erosão no forno de ensaio e de pré-aquecimento.	44
Tabela 5-I: Área superficial (em m ² /g) das aluminas inicialmente e após o uso em ensaios de erosão nos ângulos de 30 e 90°.	53
Tabela 5-II: Área superficial (m ² /g) das aluminas inicialmente e após o uso nos ângulos de 30 e 90° em temperatura de 400 °C.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ΔE – energia cinética

v – velocidade de impacto do erodente no corpo-de-prova

p – expoente adimensional que depende do tipo de material

HV – Medida de dureza escala *Vickers*

B – Número de Best ou Metz

β – Densidade do material alvo

σ_y – Limite de escoamento

$E_{translacional}$ – Energia translacional

$E_{rotacional}$ – Energia rotacional

$E_{elástica}$ – Energia elástica

$E_{cinética}$ – Energia cinética

HRC – Medida de dureza escala *Rockwell C*

D_{10} – tamanho de partícula onde 10% é passante (distribuição granulométrica)

D_{50} – tamanho de partícula onde 50% é passante (distribuição granulométrica)

D_{90} – tamanho de partícula onde 90% é passante (distribuição granulométrica)

psi – unidade de pressão

P_s – peso seco

P_u – peso úmido

P_i – peso imerso

P_{ap} – porosidade aparente

ρ_{ap} - densidade aparente

d_d – distância entre discos

V_{part} – velocidade partícula

V_ω – velocidade angular

α – ângulo

rpm – medida de velocidade em rotações por minuto

K – área erodida

q – valor obtido por EDS em %

ρ_{Al} – densidade do alumínio

L – espessura do revestimento

T_{v1} – taxa de erosão volumétrica

m_i – massa inicial da amostra

m_f – massa final da amostra

m_e – massa de erodente utilizada

m_{pe} - massa peça erodida

m_{Al} – massa alumínio

T_{v2} – taxa de erosão volumétrica corrigida

ASP - *Arc Spray Process*

BET – Teoria BET (autores Brunauer, Emmett, Teller) ou Teoria de Adsorção Multimolecular para determinação da área superficial de partículas

MEV – microscópio eletrônico de varredura

EDS - *energy dispersive detector* (espectroscopia de energia dispersiva)

RESUMO

Este trabalho investigou a influência do tipo de erodente à base de alumina na incrustação em um revestimento metálico à base de FeCr, aspergido por arco elétrico, empregados em ensaios de desgaste erosivo, tanto à temperatura ambiente como a 400°C, com ângulo de incidência entre o erodente e a superfície de 30° e 90° e velocidade de projeção de 25 m/s. Como erodente, utilizou-se alumina eletrofundida com faces anguladas e irregulares e também alumina calcinada com formando aglomerados esferoides. O revestimento dos corpos-de-prova foi caracterizado quanto à morfologia (MEV), porosidade, densidade aparente, análise térmica, espessura da camada depositada, taxa de erosão e mapeamento de elementos por espectrometria de energia dispersiva (EDS). Os erodentes foram caracterizados quanto a sua morfologia (MEV), distribuição granulométrica e área superficial (BET).

Os resultados mostraram que à temperatura ambiente os ensaios realizados com alumina calcinada com ângulo de 30° e alumina eletrofundida a 90° foram os que apresentaram maiores quantidades de alumínio incrustado no revestimento para uma mesma área de análise. Os ensaios realizados com a alumina eletrofundida com ângulo de 30° foi a que apresentou a maior taxa de erosão. Já a distribuição granulométrica e área superficial dos erodentes após ensaio de erosão apresentaram uma diminuição em relação aos valores de antes do ensaio. Os ensaios realizados a 400°C de temperatura mostraram que a alumina calcinada, para os dois ângulos de ensaio, resultou em maior incrustação no revestimento ensaiado, sendo maior para o ângulo de 90° do que para o ângulo de 30°. Para essa temperatura de ensaio, a maior taxa de erosão ocorreu para o ensaio conduzido com ângulo de 30°, utilizando alumina calcinada. Ainda para os ensaios a 400°C, os resultados para o tamanho médio de partícula na distribuição granulométrica indicaram uma redução nos valores iniciais para todos os ensaios realizados. No entanto, a área superficial de ambos erodentes permaneceu com valores muito próximos ao de antes do ensaio.

Palavras-chaves: Alumina, erodente, desgaste erosivo, revestimento FeCr, arco elétrico.

ABSTRACT

This work investigated the influence of the kind of erodent based on alumina embedded in a metallic coating based on FeCr, sprayed by arc electric technique, used in erosive wear test at room temperature and 400°C with angle of incidence between the erodent and the surface of 30° and 90° and erodent velocity of 25 m/s. As erodent was used fused alumina that showed angled and irregular surfaces and also calcined alumina forming spheroids agglomerates. The coating of the samples was characterized morphology (SEM), porosity, density, thermal analysis, the layer thickness, erosion rate and mapping of elements by energy dispersive spectrometry (EDS). The erodent was characterized by their morphology (SEM), particle size distribution and surface area (BET).

The results showed that the room temperature tests performed with alumina calcined with angle of 30° and fused alumina with angle of 90° were those with larger amounts of aluminum embedded in the coating to the same area of analysis. Tests performed with the electro alumina with angle of 30° were presented the highest rate of erosion. Already the particle size distribution and surface area of erodent after testing erosion showed a decrease compared to the values before the test. The tests performed at 400°C temperature showed that the calcined alumina for the both angles test resulted in greater embedded of aluminum in the tested coating, being higher for the 90° angle than the angle of 30°. For this test temperature, the higher erosion rate occurred for the experiment with 30° angle using calcined alumina. Also for the tests at 400°C, the results for the average particle size in the particle size distribution showed a reduction in initial values for all tests. However, the surface area of erodent remained with both values very close to that of before the test.

Keywords: Alumina, erodent, erosive wear, FeCr coating, electric arc spray.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados em Engenharia estão cada vez mais sendo exigidos em termos de desempenho, durabilidade e confiabilidade. Em decorrência, muitas ligas metálicas e não metálicas, e até mesmo composições dessas, têm surgido para melhorar o desempenho de peças mecânicas quando em serviço. Algumas aplicações podem tolerar perda por degradação de quantidades de material antes da necessidade de substituição ou de manutenção, enquanto outras aplicações são bastante restritivas quanto à diminuição de suas dimensões em serviço.

Para atender a demanda industrial, o avanço da Ciência dos Materiais possibilitou a combinação de diferentes elementos a nível microestrutural propiciando o surgimento de ligas e materiais com propriedades ímpares, não alcançadas pelos constituintes individuais. Da mesma forma, diferentes técnicas da Engenharia de Superfície têm sido empregadas para que sejam aplicadas camadas de materiais (revestimentos) sobre os componentes mecânicos formando uma superfície protetora. As técnicas de aspersão térmica empregadas para esse fim têm em comum uma fonte de calor pela qual passa o material a serem aspergidos para formar o revestimento.

Cada técnica de deposição por aspersão térmica possui suas variáveis exclusivas e também cada material depositado possui suas próprias variáveis de deposição. Uma dessas técnicas é o processo de spray em arco elétrico (*arc electric spray*) que confere propriedades ao revestimento como elevada dureza, resistência mecânica, resistência ao desgaste e baixo custo de processo. E um dos materiais que podem ser aspergidos pela técnica é o revestimento à base de FeCr, com grande potencial de aplicação na Engenharia de Superfícies.

Uma das solicitações mais comuns a que os materiais são submetidos em serviço é o desgaste, que pode ocorrer sob diferentes formas e mecanismos. A norma DIN 50320 cita quatro diferentes mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, erosão e corrosão-desgaste (triboquímica) [1]. A erosão é definida pela norma ASTM G40-92 como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluido, um fluido multicomponente ou partículas líquidas ou sólidas impactando ciclicamente contra a superfície de um

material [2]. Como resultado, o material tende a ser danificado, dependendo de suas características estruturais e propriedades a estas associadas.

Alguns pesquisadores têm utilizado o ensaio de desgaste por erosão como uma forma de caracterização dos materiais utilizados em Engenharia. Esse ensaio consiste em projetar partículas sólidas (erodentes) em velocidade contra o revestimento que se quer avaliar. Algumas dessas partículas retiram material da superfície, outras acabam aderindo ao revestimento, incrustando-se ao corpo-de-prova. Esses erodentes aderidos ao revestimento acabam formando uma proteção ao revestimento, retardando o desgaste, e/ou, por sua vez, distorcendo os resultados.

Na realização desses ensaios, pode-se utilizar diversos tipos de materiais como erodentes. Os mais usados são microesferas de vidro, granalha de aço, óxido e carbeto de silício, e alumina. Os critérios de escolha quanto a qual tipo de erodente será empregado se baseia em propriedades como elevada resistência mecânica e dureza, além de se comportar de maneira agressiva ao revestimento. Com essas características se encontram as aluminas, que pela sua via de obtenção adquirem propriedades morfológicas distintas.

A alumina calcinada obtida pela calcinação moderada do hidróxido de alumínio a partir da purificação da bauxita através do processo Bayer possui uma morfologia esferoide. Já a alumina eletrofundida é obtida pela mistura de bauxito calcinado com coque de petróleo, ilmenita e cavaco de ferro em processo de fusão em fornos elétricos, e após o resfriamento ocorre o britamento em pedras menores. A partir desse processo a alumina eletrofundida adquire morfologia irregular.

Considerando essas diferenças entre dois tipos de alumina, pode-se esperar que seu desempenho como erodente em ensaios de erosão leve a resultados diferentes. Quanto significativa é essa diferença na avaliação da resistência à erosão de materiais submetidos em serviço a situações de desgaste erosivo é uma questão em aberto. A busca, portanto, de subsídios para a escolha de erodentes em ensaios de erosão, que avaliem o desempenho de materiais, como um revestimento metálico à base de ferro-cromo, aspergido pela técnica de arco elétrico sobre um substrato de aço inoxidável, sob ataque erosivo a quente e a frio, e a diferentes

ângulos de impacto, pode ser assim justificada. É neste contexto que insere este trabalho.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi investigar a influência do tipo de erodente à base de alumina na incrustação em um revestimento metálico à base de FeCr, aspergido por arco elétrico sobre aço inoxidável, empregados em ensaios de desgaste erosivo, à temperatura ambiente e a 400°C, com ângulo de impacto de 30° e 90°, e velocidade de 25 m/s.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para realização desse trabalho foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- i. Obtenção dos corpos-de-prova com revestimento a base de FeCr depositados pela técnica de arco elétrico *spray*.
- ii. Caracterização dos corpos-de-prova quanto à sua microestrutura, porosidade, espessura do revestimento, densidade aparente.
- iii. Realização dos ensaios erosivos com as variáveis de ângulo de impacto (30° e 90°) e temperatura (ambiente e 400°C).
- iv. Determinação da taxa de desgaste do revestimento ensaiado nas variáveis propostas pelo trabalho.
- v. Quantificação da presença de alumina incrustada no revestimento após os ensaios.
- vi. Relacionar a quantidade de alumínio presente com características dos erodentes como morfologia, distribuição granulométrica e área superficial (antes e após os ensaios).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aspersão térmica

A aspersão térmica envolve um grupo de processos onde um material (na forma de pó, arame ou barra) é aquecido e projetado como partículas individuais em forma de gotas sobre uma superfície. O equipamento de aspersão fornece o calor necessário através de gases combustíveis ou por arco elétrico.

Os materiais são aquecidos até atingirem um estado de alta plasticidade e então são acelerados ao substrato utilizando gás comprimido. As partículas projetadas impactam na superfície fria do substrato, achatando-se e formando placas lamelares finas, que aumentam a sobreposição de partículas, aderindo às irregularidades da superfície preparada e entre si. A Figura 3-1 ilustra o princípio de funcionamento dos processos de aspersão térmica.

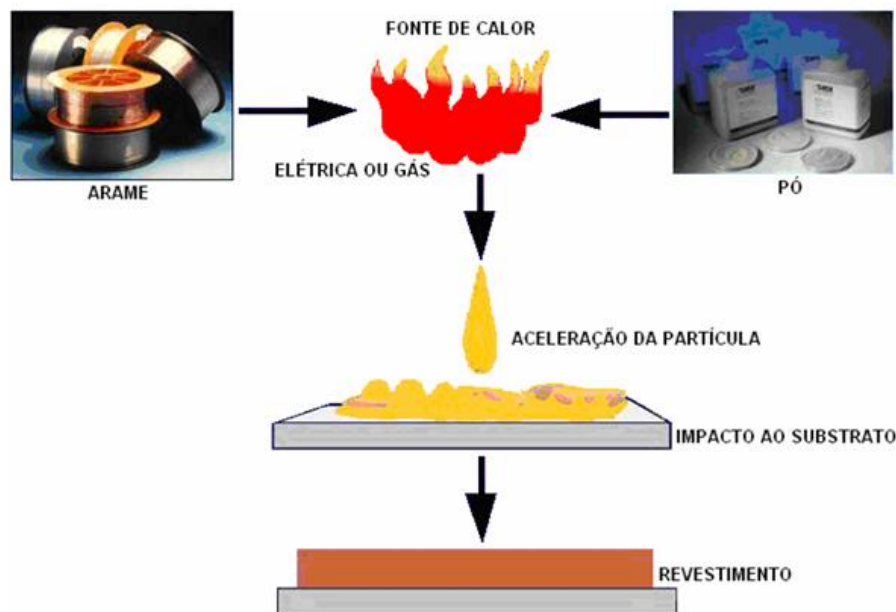


Figura 3-1: Princípio de funcionamento dos processos de aspersão térmica, partindo-se de matérias-primas, na forma de pó, arame ou barra, passando por uma fonte de calor para atingir um estado de alta plasticidade. Em seguida, é projetado contra um substrato para a formação do revestimento.

Os materiais utilizados para aspersão podem ser metálicos, cerâmicos, poliméricos e suas combinações. Esses materiais podem ser aplicados nas condições atmosféricas normais ou especiais. No processo de aspersão por arco elétrico, são aspergidos metais na forma de arames. Isso representa uma vantagem em relação a materiais na forma de barras, por exemplo, de materiais cerâmicos, que, por serem curtas, exigem interrupções frequentes para troca, o que traz consequências nem sempre desejáveis na microestrutura do revestimento em formação [3].

Os substratos sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados incluem metais, óxidos, cerâmicos, vidros e mesmo plásticos. Peças revestidas por aspersão térmica ficam disponíveis para acabamento ou para uso imediatamente após aplicação, não necessitando de tempos de espera para secagem ou endurecimento. A adesão entre o substrato e o revestimento pode ser mecânica, química-metalúrgica ou uma combinação de ambas. [4, 5].

As propriedades de interesse tecnológico do revestimento dependem, em primeira instância, do material aspergido, do processo de aspersão térmica, dos parâmetros aplicados e do pós-tratamento. Os revestimentos aspergidos podem ser aplicados também para proporcionar resistência ao desgaste, à corrosão, condutividade ou isolamento elétrico e térmico, na obtenção de formas autônomas e restauração de componentes [6, 7].

Revestimentos termicamente aspergidos têm sido usados intensivamente nas indústrias automotiva, de petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia, e particularmente aeroespacial. Em manutenção, a aspersão térmica tem sido responsável pela economia de tempo e de recursos milhões, tanto em oficina como no campo, no revestimento de estruturas e partes de equipamentos.

São vários os processos utilizados para deposição de revestimentos por aspersão térmica, como por exemplo: aspersão a chama convencional (*Flame Spray* – FS), aspersão por detonação (*Detonation Gun* – D-Gun), aspersão a chama supersônica (*High Velocity Oxygen Fuel* – HVOF), aspersão a arco elétrico (*Arc Spraying* – ASP), aspersão a plasma (*Atmospheric Plasma Spraying* – APS) e aspersão a frio (*Cold Gas Spraying* – CGS). Porém, todos esses processos e

algumas variações podem ser classificados em função do material a ser aplicado, do método de aquecimento e do método de aceleração das partículas em direção ao substrato, podendo ser divididos em dois grupos básicos, dependendo da fonte de calor: combustão e elétricos, como mostrado no esquema da Figura 3-2.

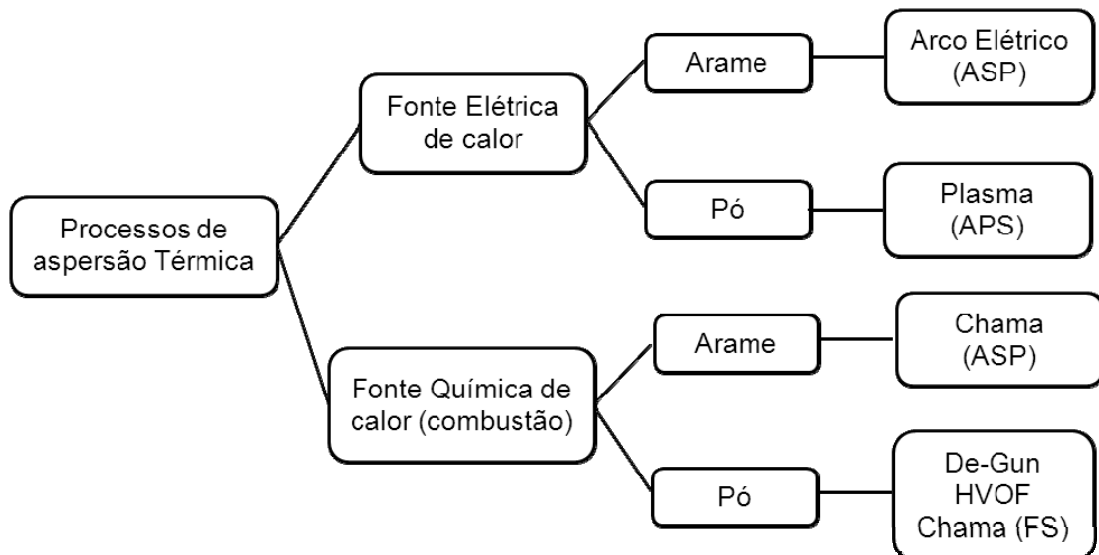


Figura 3-2: Classificação dos processos de aspersão térmica quanto à energia e tipo de consumível. Adaptado de *ASM Handbook Thermal Spray Processing* [8].

3.1.1. Microestrutura de revestimentos aspergidos

A microestrutura típica de revestimentos obtidos por aspersão térmica é apresentada na Figura 3-3. Ao colidirem contra o substrato, as partículas aspergidas tornam-se aplainadas e aderem às irregularidades da superfície que encontram, formando uma estrutura lamelar com poros, partículas não fundidas e inclusões de óxidos (isto para revestimentos com metais) [9].

A porosidade consiste em cavidades isoladas e de poros interconectados. É importante ressaltar que, através da aspersão térmica, obtêm-se revestimentos com porosidade variável, normalmente considerada inerente a estes processos. Ela afeta diretamente propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato.

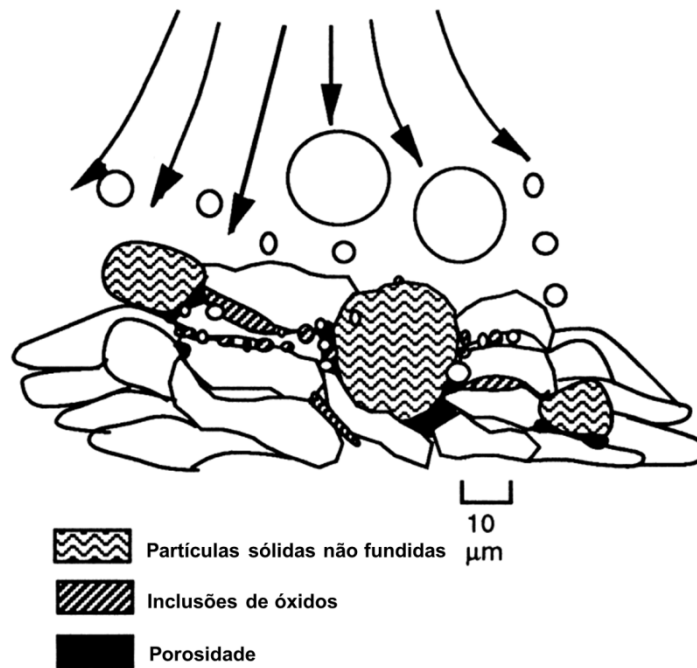


Figura 3-3: Detalhe da formação da microestrutura de uma liga metálica formada pelos processos de aspersão térmica. Mostrando as lamelas (partes em branco), poros, inclusões de óxidos e partículas não fundidas [10].

A quantidade de poros nos revestimentos aspergidos termicamente depende do material e das condições de aspersão de cada processo como, por exemplo, temperatura da chama ou do arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas, distância da pistola e substrato e qualidade do substrato a ser aspergido [8, 11].

No processo que utiliza ar comprimido para transferir as partículas fundidas até o substrato, os teores de óxidos variam de 2,5 - 3% a 15%. A oxidação das partículas depende da fonte de calor, da distância entre pistola e substrato e pressão do ar comprimido [7-9, 11].

Além disso, a distância pistola/substrato (menor que 150 mm) é considerada fundamental na obtenção de níveis baixos (menor que 5%) de porosidade [7-9, 11].

3.1.2. Arco elétrico

A aspersão térmica a arco elétrico, também denominado *ASP* (*Arc Spray Process*), utiliza calor gerado a partir de um arco elétrico para realizar a fusão do material que se quer depositar. É comparável em custo ao sistema de chama, evitando os produtos inerentes da combustão. Via-de-regra é de fácil emprego, e utiliza materiais amplamente disponíveis (qualquer material condutor que pode ser moldado na forma de arame pode ser utilizado como matéria-prima).

São usados dois arames, como eletrodos consumíveis e também material de aporte, ligados a uma fonte de tensão elétrica. A diferença de potencial gerada pela fonte em cada um dos arames (um ligado ao polo positivo e outro ao polo negativo) induz o arco elétrico que funde o material no bocal da pistola de aspersão. A Figura 3-4 mostra em detalhe os arames em contato elétrico, em seguida o arame fundido (em amarelo) e partículas não fundidas (em azul) sendo projetados.

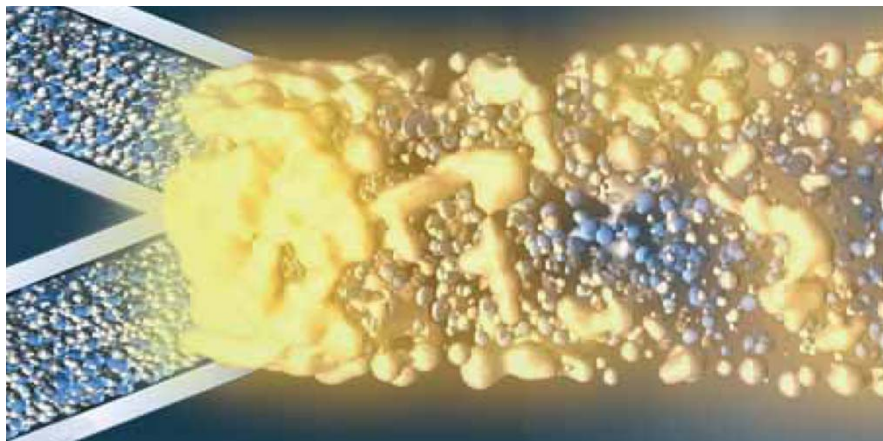


Figura 3-4: Detalhe da região de contato elétrico dos arames no processo de *arc-spray* [12].

Esse material é lançado, na forma de *spray*, por um jato de ar comprimido, de encontro ao substrato (Figura 3-5). A alimentação dos arames é feita por meio de um motor elétrico ou por uma turbina de ar comprimido, e a velocidade de avanço do mesmo é regulada em função da corrente induzida pela fonte. A Tabela 3-1 apresenta algumas das principais características do processo.

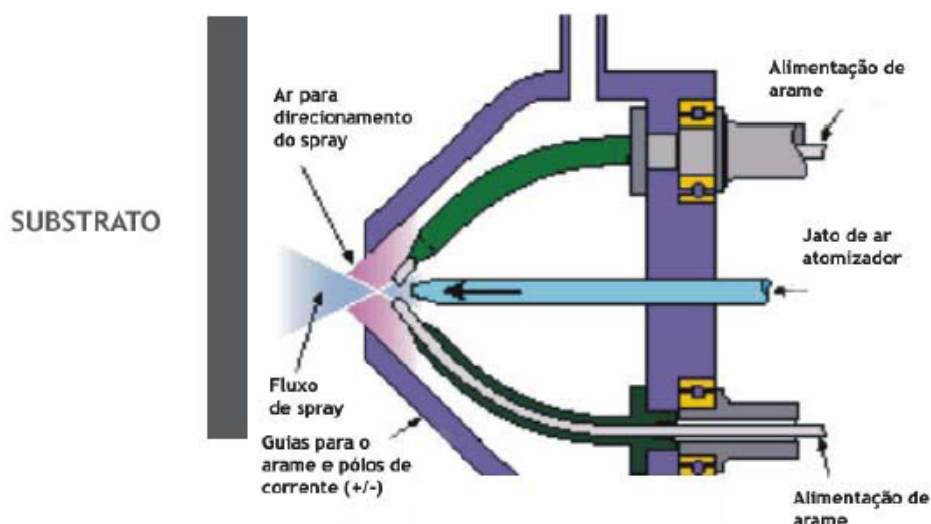


Figura 3-5: Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico. Imagem adaptada de TWI-Global [13].

Tabela 3-I: Características do processo de aspersão térmica a arco elétrico [8].

Características	Exemplos
Arames	Todos os tipos (sólidos e tubulares) que sejam condutores elétricos. Diâmetros comuns entre 1,6 e 5 mm
Potência Elétrica (kW)	5-10
Temperatura do arco (°C)	4000-6000
Velocidade das partículas (m/s)	Até 250
Deposição (g/min)	50-300

3.2. Desgaste

Tribologia é o estudo da interação entre superfícies com movimento relativo entre si e fenômenos que disso decorrem [14]. A tribologia engloba fenômenos como atrito, desgaste, e lubrificação, e trabalha com os aspectos físicos, mecânicos, metalúrgicos e químicos dos movimentos relativos.

O desgaste pode ser definido como o dano a uma superfície sólida causada pela remoção ou alteração do material pela ação mecânica de um sólido, líquido ou gás em contato [15]. Nesta interação, atuam os chamados mecanismos de

desgaste, que envolvem uma série de fenômenos físicos e químicos e se torna preocupante na medida em que o dano causado afeta a microestrutura de um material em serviço.

Não existe consenso quando se trata de definir e classificar os muitos processos de desgaste. Cada processo de desgaste envolve fenômenos que o caracterizam, em muitas situações, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros [8, 10].

A norma DIN 50320 [1] cita quatro mecanismos diferentes de desgaste: adesão, abrasão, erosão e reação triboquímica (corrosão-desgaste). Esta mesma norma cita ainda que, além destes mecanismos, existem outros tipos de desgaste tais como: por cavitação, fadiga de contato, *fretting* e *scuffing*, que também são causas de deterioração do material. Outra classificação muito utilizada e difundida é a de Burdinski [16]. O desgaste é dividido em quatro categorias: abrasão, erosão, adesão e fadiga superficial. A Figura 3-6 apresenta as subdivisões destes grupos.

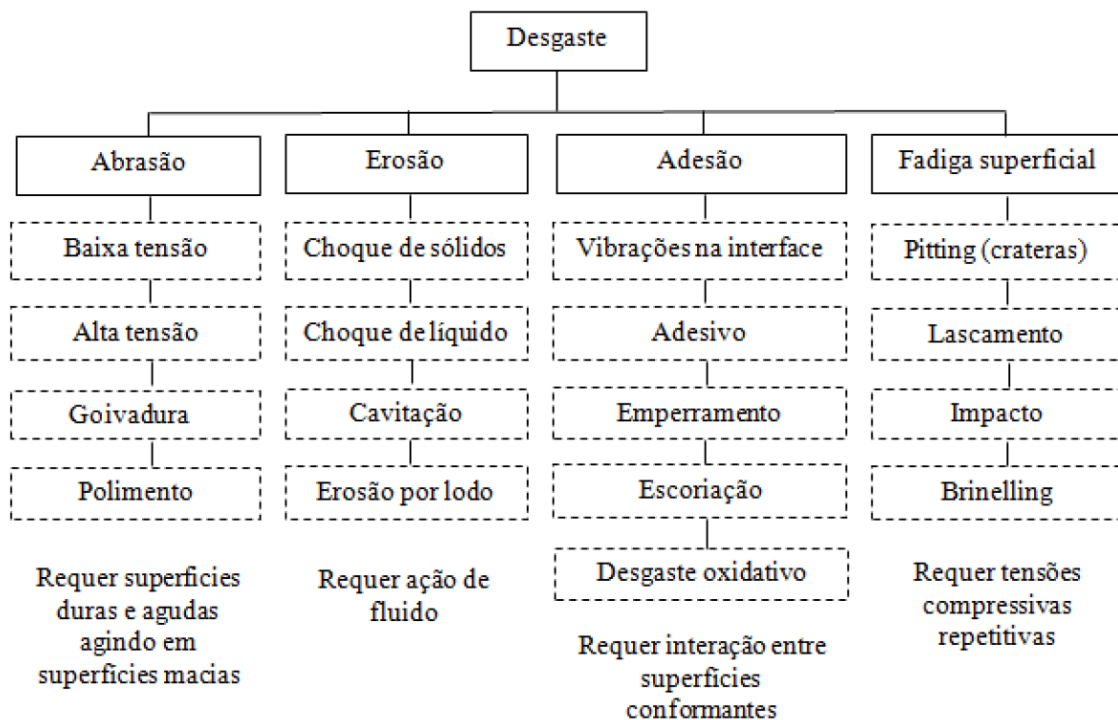


Figura 3-6: Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões [10].

3.2.1. Erosão

O desgaste erosivo por partículas sólidas é a perda de material da superfície causadas pelos impactos repetidos de pequenas partículas sólidas (Figura 3-7). Sua ocorrência é esperada quando partículas duras contidas em um gás, líquido ou fluido incidem em um sólido a uma velocidade significativa (maior que 1 m/s). As formas que esse desgaste se manifesta são pela redução ou afinamento dos componentes, marcas macroscópicas que seguem a linha de fluxo do fluido atuante, aumento na rugosidade da superfície, ausência de ranhuras direcionadas como na abrasão, e em alguns casos, surgimento de um padrão ondulatório na superfície [10].

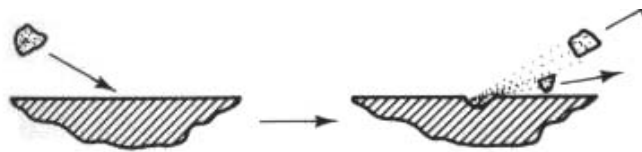


Figura 3-7: Desgaste por erosão por partículas sólidas ocasionando o desprendimento de parte da do material da superfície.

Existem três classes principais de variáveis que afetam a erosão: variáveis que descrevem o impacto e o fluxo de partículas, que descrevem as partículas propriamente ditas e variáveis do material. Na primeira classe, são relevantes a velocidade das partículas, o ângulo de incidência (ângulo entre a direção de impacto e a superfície atingida) e o fluxo (concentração de partículas). Quanto à característica das partículas incluem o formato, tamanho, dureza e a friabilidade (facilidade em fraturar). E quanto ao material, são relevantes propriedades como dureza, comportamento frente à deformação e microestrutura.

3.2.1.1. Fatores que afetam a erosão

Ângulo de impacto

O ângulo de impacto é definido como o ângulo entre a superfície do material alvo e a trajetória da partícula impactada, como mostrado na Figura 3-8.

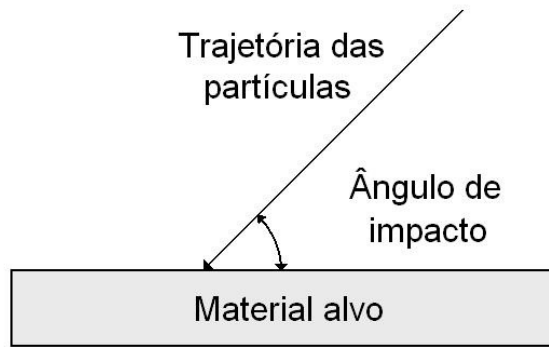


Figura 3-8: Ângulo de impacto do erodente.

A influência do ângulo de impacto nas taxas de erosão se dá em função da natureza do material alvo. Em materiais dúcteis, como os metálicos, a taxa de erosão apresenta um crescimento até um valor máximo em torno de 30° e um posterior decréscimo contínuo até o ângulo de 90° . Em contraste, para materiais frágeis, a taxa máxima de erosão se dá em ângulos próximos a normal – 90° (Figura 3-9).

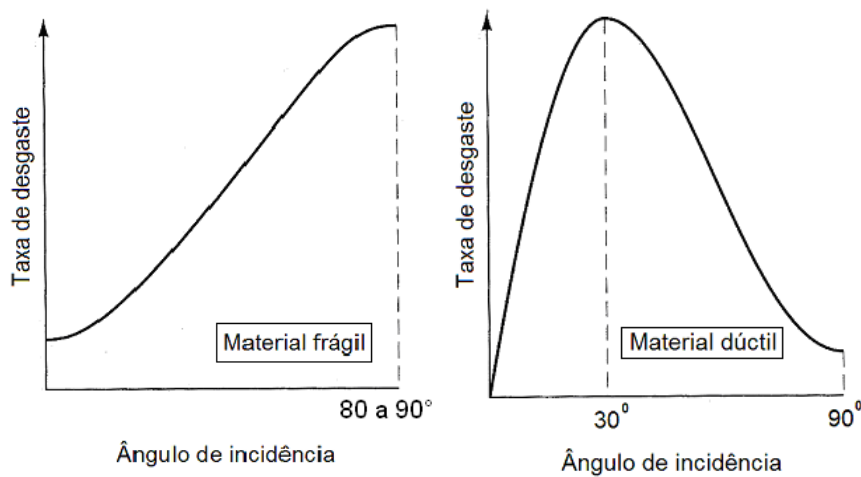


Figura 3-9: Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto na taxa de desgaste de materiais dúcteis e frágeis [17].

Velocidade de impacto

A energia cinética é fundamental para a remoção de material quando a

superfície é impactada. Na Equação 3-1 a velocidade de impacto é denotada por V e a taxa de erosão por ΔE . O expoente p depende do tipo de material.

$$\Delta E \propto V^p \quad \text{Equação 3-1}$$

Hutchings [18] encontrou um valor de expoente em torno de 2,4 para condições de impacto em baixos ângulos para metais e ligas, enquanto Sundararajan e Shewmon [19] indicaram um valor médio de 2,55 para p . Estes valores diferem dos encontrados para cerâmicos e polímeros que são de 3 e 5, respectivamente [20].

O expoente da velocidade depende de outros fatores como ângulo de impacto, tamanho de partículas erodentes e temperatura dos testes. Segundo Stack *et al.* [21], ocorre uma transição em p com o aumento da temperatura. A transição encontrada pode ser associada com diferentes regimes de danos, isto é, erosão dominante, erosão-corrosão dominante e corrosão dominante.

Influência da temperatura no desgaste erosivo

Suckling e Allen [22] observaram que a temperatura influencia diretamente o processo de erosão por atuar tanto nas propriedades dos materiais envolvidos no processo (partículas erodentes e material alvo) quanto nas variáveis processuais. Vários experimentos mostraram que o efeito da temperatura em metais com ausência de corrosão pode ser menor do que o esperado. Isto se dá porque as alterações causadas pela temperatura em propriedades diretamente relacionadas com o processo de erosão, como a dureza, são relativamente pequenas. A Figura 3-10 mostra como isto acontece em um material de aço inox 304 atingido por partículas sólidas a uma velocidade de 70 m/s para diferentes ângulos e diferentes temperaturas.

Roy e Sundararajan [23] apresentam três classificações distintas da dependência da taxa de erosão com a temperatura para materiais metálicos

submetidos ao desgaste erosivo por partículas angulares e em altas velocidades: i) a taxa de erosão diminui com a temperatura, atinge um mínimo e então começa a aumentar com o acréscimo de temperatura; ii) a taxa de erosão independe da temperatura até um valor crítico desta, a partir do qual ocorre um incremento da taxa com a temperatura e iii) a taxa de erosão aumenta continuamente com a temperatura. Os experimentos consideraram a erosão-oxidação de materiais metálicos e os diferentes regimes pelos quais os materiais sofrem até sua completa degradação. No entanto, em um estudo erosão-oxidação, deve-se considerar que as partículas que atingem a superfície podem estar erodindo primeiramente um óxido formado na oxidação.

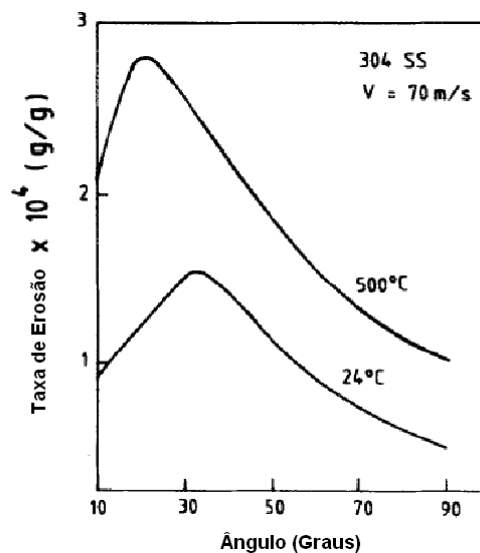


Figura 3-10: Erosão por partícula sólida do aço inox 304 a uma velocidade de 70 m/s como uma função do ângulo para as temperaturas de 24°C e 500°C [23].

3.2.2. Erodente

3.2.2.1. Morfologia

A influência das partículas de erodentes nas taxas de erosão tem sido estudada por diversos pesquisadores. Brown *et al.* [24], Levy e Chick [25] e Liebhard e Levy [26] observaram significativo aumento de taxa de erosão em diversos materiais metálicos quando erodidos por partículas de morfologia irregular. De acordo com Kleis [27], a maior taxa de erosão em função do ângulo de impacto

muda de 90° para 30° quando microesferas de vidro são substituídas por partículas angulosas de vidro como erodente.

Reddy e Sudararajan [28] observaram a maior taxa de erosão para o cobre e suas ligas em impactos a ângulos normais, sendo usada granalha de aço esférica como erodente. Suas observações estão mostradas na Figura 3-11, na qual se observa que quando partículas angulares (não esféricas) de SiC são utilizadas como erodente, o mesmo cobre e ligas de cobre aproxima-se de um comportamento dúctil. Desta forma, quanto mais angular for a partícula de ataque, mais similar ao comportamento dúctil da Figura 3-11 será a do material sob erosão. Ou seja, um máximo de desgaste ocorre para ângulos de ataque crescente, à medida que a partícula se torna mais esférica.

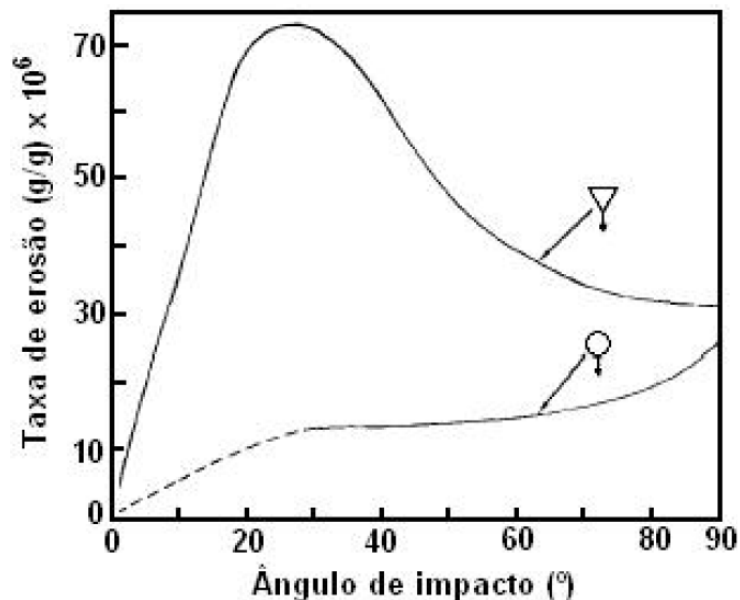


Figura 3-11: Variação da taxa de erosão conforme a morfologia do erodente empregado. Adaptado de Reedy e Sundararajan [28].

Em temperaturas elevadas, a influência da forma das partículas não foi amplamente estudada [23]. Segundo Levy *et al.* [29], alguns estudos apontam que para o aço ligado ao cromo como material alvo, e erodido em temperaturas de 850°C, a taxa de erosão aumenta consideravelmente quando se utiliza um erodente com partículas angulares (no caso, o SiC). Além disso, a dependência da taxa de

erosão com a velocidade é influenciada pela forma do erodente utilizado, conforme Figura 3-12.

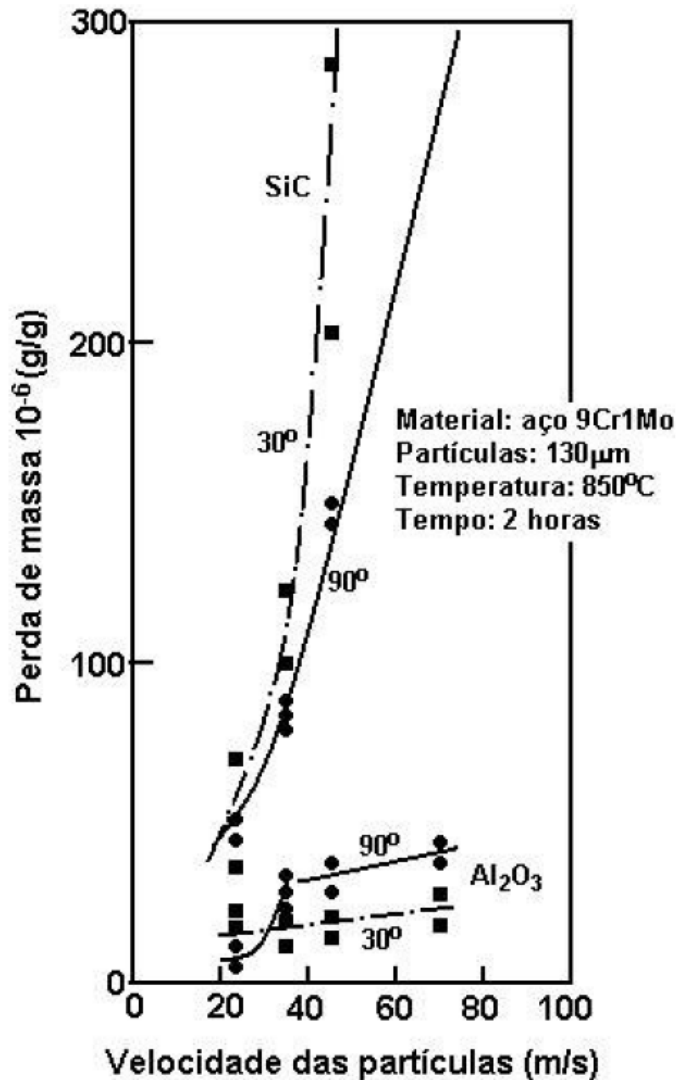


Figura 3-12: Influência da velocidade para erodentes com morfologia distintas empregados em ensaios de elevadas temperaturas.

3.2.2.2. Tamanho das partículas

O tamanho de partículas também é uma importante variável no estudo do comportamento da erosão. Conforme a Figura 3-13 [30], a taxa de erosão aumenta em função do aumento do tamanho de partículas de erodente. Essa relação se dá

com partículas de tamanho entre 50 a 100 μm . A partir de 100 μm , a taxa de erosão não depende mais do tamanho de partícula do erodente. Zhou e Bahadur [31], Yerramerredy e Bahadur [32] e Bahadur e Badruddin [33] obtiveram resultados similares. Estes últimos autores, entretanto, investigaram a erosão de aço martensítico por partículas de SiC, Al_2O_3 e SiO_2 , e constataram que a taxa de erosão aumentou com o aumento do tamanho de partículas do erodente para os casos de Al_2O_3 e SiC. Para partículas de SiO_2 , ocorreu o inverso.

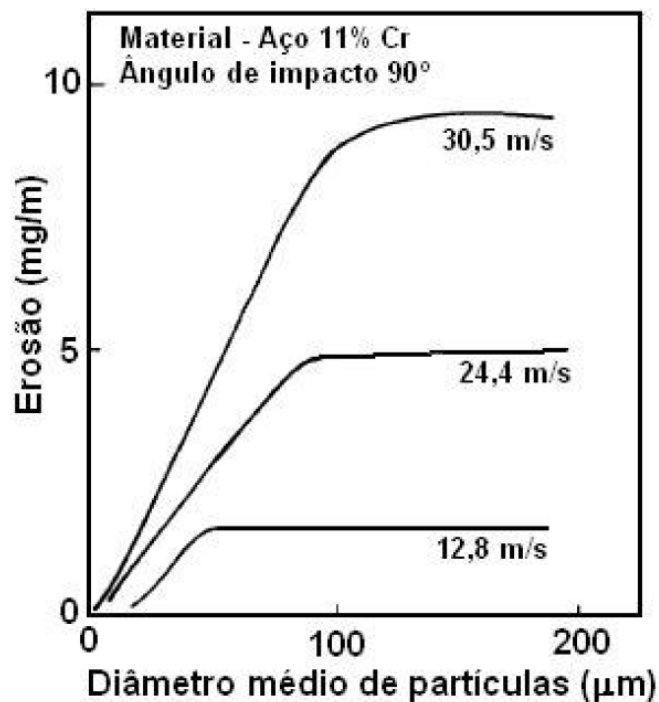


Figura 3-13: Variação da erosão conforme a distribuição do diâmetro médio de partículas para diferentes velocidades de teste.

Em temperaturas elevadas, acima de 500°C, foram investigados dois materiais erosivos diferentes, SiO_2 e SiC, em dois intervalos de tamanho de partículas erodentes: 63-106 μm e 106-125 μm . Os resultados evidenciaram que partículas de erodentes menores resultam em um desgaste 100% maior que partículas grandes. Como esperado, a erosão aumenta com a temperatura, particularmente acima de 300°C, quando começa a haver significativas mudanças nas propriedades mecânicas do material alvo com a temperatura. Este resultado

sugere que apesar do alvo estar sujeito à massa similar de diferentes tamanhos dos erosivos com quantidade equivalente de energia cinética, em princípio no impacto das amostras, as partículas de erodentes menores é mais efetivo na remoção do material da superfície [22].

Estas diferenças nas taxas de erosão com a troca do tamanho de partículas de erodentes são difíceis de explicar quantitativamente, pois geralmente é encontrado que um número de fatores combinado influencia a perda de massa, isto é o número de partículas de erodente atingindo o alvo, sua velocidade e energia cinética, sua forma e ângulo de impacto, sem considerar o choque entre as partículas incidentes e as que ricochetearam após o impacto contra a superfície do material submetido à erosão [26].

3.2.2.3. Dureza e friabilidade das partículas

Levy investigou a influência da dureza e das partículas do erodente na taxa de erosão de aços, comparando diferentes tipos de materiais erosivos. SiC, SiO₂, Al₂O₃ e cinza de carvão mineral [29]. Em seu estudo, notou que para partículas de erodentes com dureza pelo menos duas vezes maior que a do material alvo, não havia influência desta propriedade na taxa de erosão. Para partículas com dureza semelhante ao material alvo, a taxa de erosão caiu consideravelmente.

As partículas de SiC apresentava morfologia angular, com microdureza de 2481HV. Já o erodente SiO₂ constituía-se de partículas com morfologia mais esférica que o SiO, com poros na superfície e microdureza de 1374 HV. Apesar dessas diferenças o resultado da erosão foi similar para todas as temperaturas

Levy e Chick [25] mostraram que quando se utiliza partículas de SiO₂, SiC e Al₂O₃, as taxas de erosão em um aço dúctil são similares, quando a dureza do erodente for maior que 700 HV.

3.2.3. Erosão em materiais metálicos

Para descrever os mecanismos responsáveis pelo desgaste erosivo em

materiais metálicos, é necessário o conhecimento das solicitações (força, tensão, deformação) envolvidas no impacto de uma partícula sólida na superfície de um material, bem como a resposta deste a frente às solicitações.

Quando uma partícula atinge a superfície de um metal, a resposta deste material pode ser uma deformação elástica ou plástica, dependendo principalmente de sua tensão de escoamento. Para Hutchings [18], uma forma para se conhecer a extensão do dano causado pelo impacto de uma partícula em um material dúctil pode ser estimada através do cálculo do número de Best ou Metz (B), conforme a Equação 3-2.

$$B = \beta \times \frac{v^2}{\sigma_y} \quad \text{Equação 3-2}$$

onde:

B = número de Best ou Metz (adimensional);

β = densidade do material alvo (mg/m^3);

v = velocidade de impacto (m/s);

σ_y = limite de escoamento do material alvo (MPa).

A Tabela 3-II apresenta o tipo de deformação esperada pelo impacto de uma partícula para uma larga faixa do número de Best.

Tabela 3-II: Variação do tipo de dano como o número de Best [18].

Número de Best	Regime do dano
10^{-5}	Elástico, quase estático
10^{-3}	Início da deformação plástica
10^1	Deformação plástica extensiva
10^3	Fenômeno da híper-velocidade

Analisando-se os valores obtidos para o número de Best, e avaliando os valores de velocidades encontradas na maioria das aplicações onde se constata o

desgaste erosivo, observa-se que o dano causado a um material metálico está, na maioria das vezes, no regime de deformação plástica, ou seja, para número de Best entre 10^{-3} e 10^1 .

Assim, supondo-se apenas a deformação plástica de um metal quando sua superfície é atingida pelo impacto de partículas erodente rígidas, podem-se considerar três mecanismos de desgastes distintos, de acordo com Hutchings [18], Hutchings [34, 35], Hutchings [36] e Finnie [20]:

- i) Em impactos oblíquos, o mecanismo de corte (*Cutting*) (tipos I e II);
- ii) Sulcamento (*ploughing*);
- iii) Para impactos próximos à normal, o desprendimento por *platelet*.

Segundos esses autores, os mecanismos de remoção de material no impacto oblíquo já estão bem definidos, enquanto que para impactos próximos à normal não há um consenso na literatura.

Finnie tentou sumarizar os três mecanismos em uma única figura, como mostrado pela Figura 3-14, a partir dos seus estudos experimentais, sem considerar a possível rotação da partícula quando do impacto com a superfície [20]. No primeiro caso, para ângulos menores que 20° Figura 3-14 (1), o autor sugere que a partícula impactante lasca o metal como em um corte. Já no segundo ângulo, ângulo próximo a 30° Figura 3-14 (2), sugere um acúmulo de material empilhado no final da cratera, que pode ser retirado com o impacto de partículas subsequentes. No último caso, ângulos próximos à normal Figura 3-14 (3), muito menos material seriam arrancados da superfície e muitos mecanismos foram propostos para tal, mas nesta pesquisa Finnie apenas sugere os mecanismos:

- i) Comportamento frágil do metal devido ao endurecimento da superfície;
- ii) Fragmentação das partículas;
- iii) Fadiga de baixo ciclo;
- iv) Efeitos da temperatura devido às altas taxas de deformação, desgaste por delaminação e extrusão.

A partir da observação de Finnie, pode-se constatar que a fração de volume

deslocada ou arrancada por uma partícula durante o impacto varia consideravelmente com a forma da partícula, orientação, velocidade e ângulo de impacto.

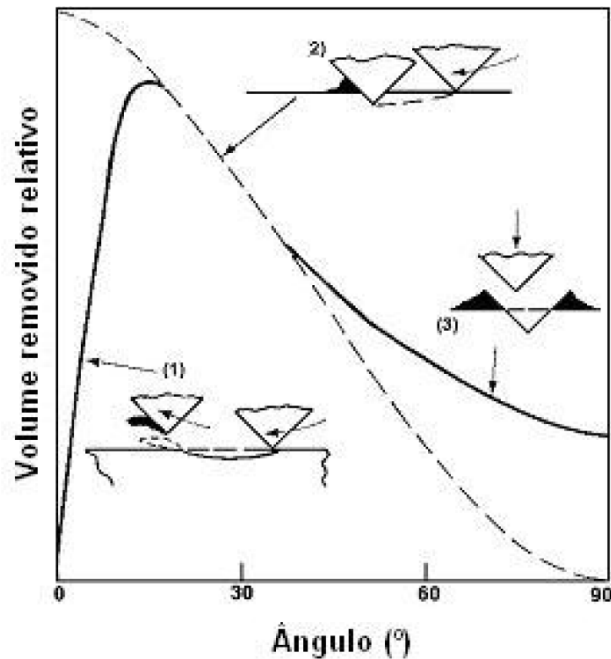


Figura 3-14: Formas de remoção de material metálico dúctil erodido [20].

No mecanismo de sulcamento (*ploughing*) o metal deslocado é extrudado em uma borda no final da cratera de impacto e dependendo do Ângulo de impacto e velocidade, a borda pode se destacar, formando uma fonte de perda de massa [37]. O balanço energético que ocorre entre a partícula incidente e o material é descrito por Hutchings e apresentado na Figura 3-15 [18]. A Figura 3-15, baseada nos resultados de Hutchings *et al.* [37], indica que para o impacto por formação de sulcos no material de uma partícula esférica no ângulo de 30°, cerca de 40% da energia inicial estão disponíveis para formar indentação e assim causar erosão.

O mecanismo de corte I considera que a partícula angular gira para frente no impacto indentando o metal e levantando uma grande lasca de material no final da cratera. Embora esta lasca não seja geralmente desprendida em um único impacto, é vulnerável à remoção pelo impacto de uma partícula subsequente apropriadamente orientada. Nesse caso, o balanço energético que ocorre entre a

partícula incidente e o material atingido é mais complexo, uma vez que a forma e a orientação da partícula são importantes. A Figura 3-16, baseada nos resultados de Hutchings [18], demonstra que a energia cinética rotacional do ricocheteamento da partícula pode ser apreciável, estimando que 40-80% da energia cinética seja dissipada no trabalho plástico.

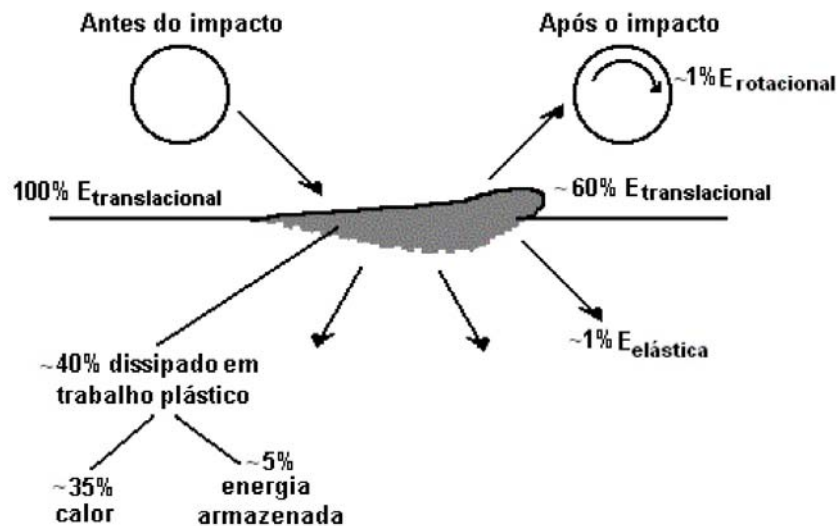


Figura 3-15: Balanço da energia no impacto de partículas de erodentes esféricas no ângulo de impacto de 30° [18].

No corte tipo II, a partícula gira para trás durante o impacto, removendo uma lasca do material como se estivesse usinando. Esse corte é favorecido por apenas uma pequena faixa de ângulos de impacto e orientações da partícula e, portanto ocorre com muito menos frequência do que o modo de corte tipo I.

Hutchings [36] descreve que o mecanismo de erosão em materiais metálicos para impactos próximos à normal pode ser dividido em três fases distintas que ocorrem sequencialmente. Na fase inicial, o impacto da partícula forma uma cratera e o material é extrudado ou desprendido dessa cratera, formando e/ou aumentando a bordada cratera. Na segunda fase, o metal deslocado é deformado por impactos subsequentes, podendo conduzir a um deslocamento lateral do material, o qual é destacado da superfície, ou ainda ser acompanhado por uma fratura dúctil nas

regiões mais deformadas. Finalmente, após poucos impactos, o material deslocado se torna muito deformado, e então é removido da superfície por uma fratura dúctil. Esse mecanismo tem sido chamado de *platelet* [25] e difere do modelo por microcorte sugerido por Finnie [38], no qual é postulado que em muitos casos é necessário o impacto de diversas partículas para remover um fragmento de metal da superfície.

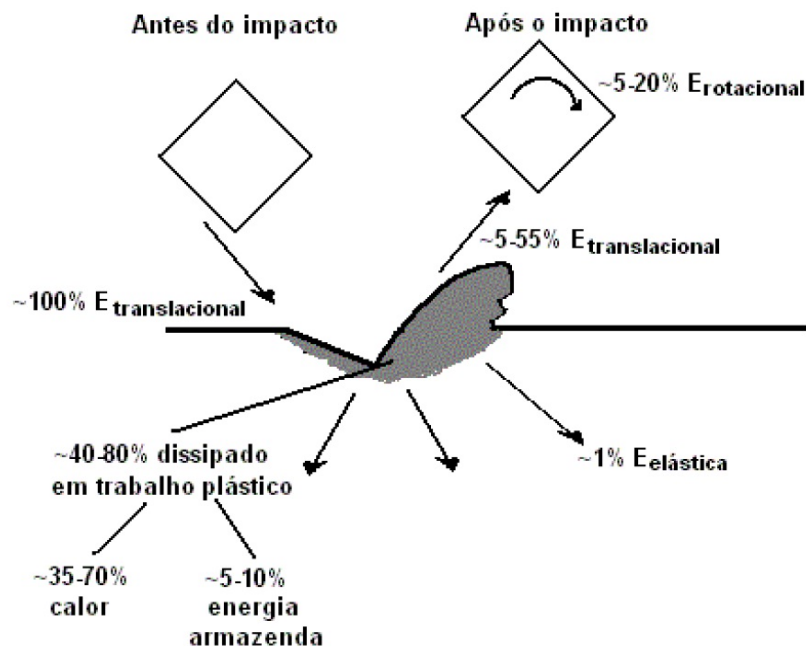


Figura 3-16: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente angulares no ângulo de impacto de 30° [18].

Hutchings [36] destaca ainda que este mecanismo de *Platelet* pode ocorrer e é observado para todos os ângulos de impacto até 90° , porém em ângulos menores de (20° ou menos) as três fases do mecanismo podem ocorrer simultaneamente e fica muito difícil de distingui-lo do mecanismo por microcorte.

Em trabalho anterior, Cousens e Hutchings [39] observaram que este mecanismo de *platelet* pode gerar um fluxo de metal durante a erosão, modificando a superfície do material erodido. Isto significa que durante estágios iniciais da erosão, estabelece-se uma estrutura subsuperficial, com uma camada

microestrutural modificada em forma de lâmina, contendo trincas e partículas de erodente incrustadas. Esta camada é considerada mais dura que o material base. Desta forma, a tensão compressiva resultante nesse material causa a indentação na superfície, erodindo o material com um processo de extrusão na forma de plaquetas.

Um balanço energético do impacto de partículas sólidas na superfície de um metal, em ângulo de 90° é mostrado na Figura 3-17.

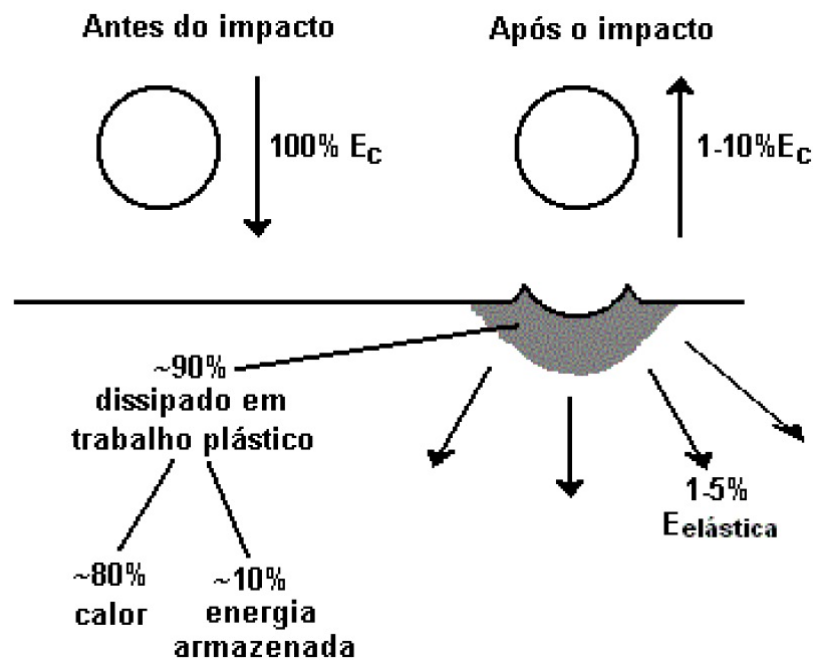


Figura 3-17: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente esféricos no ângulo de impacto de 90° [18].

Conforme apresentado pela Figura 3-17, 1 a 10% da energia cinética inicial de uma partícula de chocando normalmente (assumida como esférica) é restituída à partícula por forças elásticas. Muito da energia inicial é dissipada no alvo. A energia contida no campo de onda elástico, o qual não pode contribuir para erosão, pode ser estimado, e é descrito como 1 a 5% da energia inicial, deixando cerca de 90% gasto no trabalho plástico. Para isso, até 10% será armazenado no metal em discordâncias e outras imperfeições cristalinas, deixando 80% da energia cinética da partícula que deve ser degradada em calor. Metais fortemente encruados, a fração de energia armazenada será menor e mais energia será dissipada como calor.

3.3. Alumina

Segundo Brown *et al.* [40], a alumina é encontrada na crosta terrestre como um componente em minerais de aluminossilicatos como a bauxita. Sua principal forma de obtenção é através do processo *Bayer*, ao final do qual ocorre a calcinação do hidróxido de alumínio, formando óxido de alumínio.

A temperatura e o tempo de calcinação definem determinadas especificações físicas e químicas, assim como na pureza da alumina obtida. Durante a calcinação, fases complexas de coríndon (Al_2O_3), mulita, silicatos e titanato de alumínio (em menor quantidade) podem ser formados. As aluminas de alta pureza derivadas do processo *Bayer* são classificadas como: alumina tabular, alumina fundida e alumina calcinada.

A alumina tabular é produzida pela calcinação em alta temperatura ($\sim 2000^\circ\text{C}$) em grandes fornos rotatórios a óleo. A alumina fundida é produzida pela fusão elétrica da alumina calcinada. Ambas as aluminas contêm mais de 99,5 % de Al_2O_3 com Na_2O como a maior impureza ($\leq 0,3\%$) e porosidade menor que 5%. As aluminas tabular e fundida são utilizadas na indústria de refratários nas formas moída e graduada para uso em uma grande quantidade de produtos de alta qualidade como refratários para fundição e monolíticos em aplicações em altos fornos e na indústria petroquímica.

Os pós de alumina calcinada são a maior matéria-prima pura bruta utilizada na indústria cerâmica para aplicações de Engenharia. Os pós são produzidos em uma grande quantidade de graduações para alcançar exatamente especificações químicas, tamanho de partícula e forma cristalina para atender um grande número de produtos.

3.3.1. Propriedades da alumina

Um grande número de estruturas transitórias de Al_2O_3 pode ser formado na etapa de calcinação, até atingir-se irreversivelmente a $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$ (coríndon), de estrutura cristalina de simetria hexagonal.

Devido a uma forte ligação química entre os íons Al^+ e O^- (pois tem alto calor de formação (-400Kcal/mol)), a alumina tem uma estabilidade química até muito próximo do seu ponto de fusão (2050°C), a maior dureza dentre os óxidos industrialmente utilizados e alta resistência mecânica. Quanto as suas propriedades físicas e mecânicas, pode-se observar que a resistência mecânica é alta em temperatura ambiente, mas diminui bastante a partir de temperaturas acima de 1100°C. Entretanto, como o coeficiente de expansão térmica é elevado, a resistência ao choque térmico é menor que para materiais como Si_3N_4 e SiC , que também são materiais de alta resistência. A tenacidade a fratura (K_{IC}) em temperatura ambiente varia de 3,85 a 3,95MPa.m^{0,5} para uma alumina sinterizada com uma densidade relativa de 95% e tamanho de grão de 2µm. Para uma alumina prensada à quente com densidade relativa de 99,5% e tamanho de grão de 2µm, K_{IC} varia de 4,18 a 5,9MPa.m^{0,5} [41].

Assim como para os materiais cerâmicos em geral, a alumina tem muitas de suas propriedades de interesse como material para Engenharia vinculada a sua microestrutura. A perda da resistência mecânica com o aumento da porosidade é bem conhecida para os materiais cerâmicos [42]. A Equação 3-3, de origem empírica, descreve esta relação para corpos cerâmicos à base de alumina, onde a resistência à flexão (σ_{rf}) diminui exponencialmente em função da fração volumétrica da porosidade (P). O gráfico de pontos experimentais é apresentado na Figura 3-18

$$\sigma_{rf} = \sigma \times \exp(-nP) \quad \text{Equação 3-3}$$

onde:

σ_{rf} = resistência à flexão do material com porosidade (MPa);

n = constante experimental;

P = porosidade (fração volumétrica).

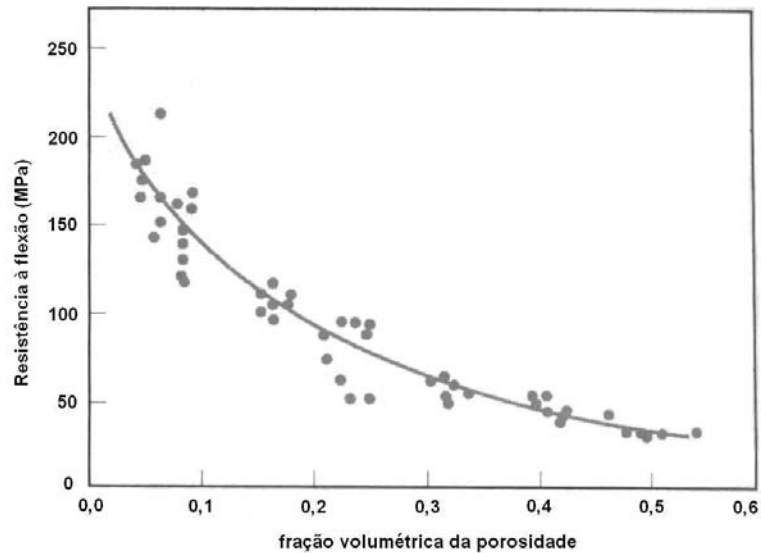


Figura 3-18: Variação da resistência à flexão de um material cerâmico à base de alumina em função da porosidade [42].

Além da resistência mecânica, o módulo de elasticidade de um material cerâmico também está sujeito a mudanças em função de sua porosidade. Um aumento da fração de porosidade de um corpo cerâmico deve levar a uma diminuição na rigidez, o que provoca uma queda no módulo de elasticidade [42]. A relação entre estas propriedades está descrita na Equação 3-4. O gráfico que representa esta relação está mostrado na Figura 3-19.

$$E = E_0(1 - 1,9P + 0,9P^2) \quad \text{Equação 3-4}$$

onde:

E_0 = módulo de elasticidade sem a presença da porosidade, teórico (GPa);

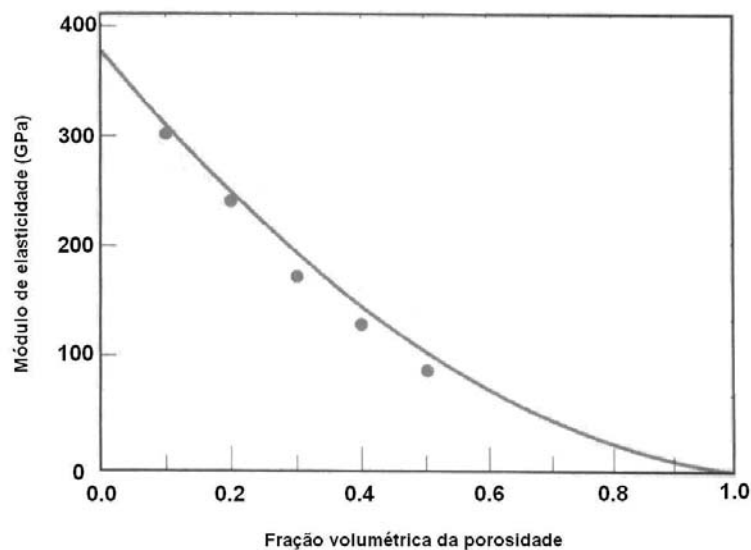


Figura 3-19: Variação do módulo de elasticidade em função da porosidade de uma alumina [42].

O efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas da alumina pode ser resumido pela Figura 3-20. A temperatura provoca uma diminuição da resistência mecânica, bastante acentuada para temperaturas maiores que 1000°C. Na verdade, o gráfico da Figura 3-20 pode ser dividido em 3 áreas. Uma, até ~500°C, onde a fratura é frágil, e a resistência mecânica é determinada pelos defeitos pré-existentes. Segundo alguns autores, poderia aqui haver uma união entre defeitos localizados na superfície com outros imediatamente abaixo desta, fazendo com que a resistência mecânica caia em função do aumento do defeito principal [43]. Uma segunda região, entre ~500°C e ~1100°C, de estabilidade da resistência mecânica. A terceira região, para temperaturas acima de 1100°C, é caracterizada pela deformação plástica ocorrente no contorno de grão, antes da clássica deformação plástica por movimento de discordâncias, a altas temperaturas (>1400°C) [43].

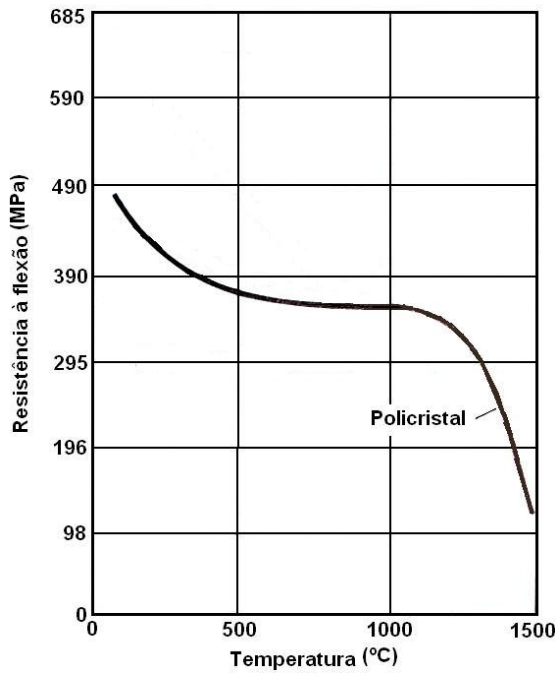


Figura 3-20: Variação da resistência mecânica de uma alumina policristalina sem fase vítrea [44].

3.3.2. Alumina como erodente

O óxido de alumínio ou alumina é um material muito utilizado como erodente para ensaios de resistência ao desgaste de materiais de interesse em Engenharia. Concorrem para isso propriedades como resistência mecânica, dureza, densidade e friabilidade. Para esse fim, são muitos os produtos comerciais disponíveis no mercado, destacando-se duas famílias de produtos: as aluminas eletrofundidas e as calcinadas.

3.3.2.1. Alumina eletrofundida

A alumina eletrofundida é utilizada na indústria de abrasivos e refratários onde a matéria-prima principal é o bauxita calcinada que, em mistura com coque de petróleo, ilmenita e cavaco de ferro, sofre um processo de fusão em fornos elétricos especiais, formando após o resfriamento, blocos do produto desejado. O bloco

fundido obtido, após resfriamento adequado, é quebrado em pedras que são reduzidas a tamanho menores. Os pedaços de óxido de alumínio eletrofundido são encaminhados para o processo de britagem, secagem e separação eletromagnética, obtendo-se dessa forma produtos de diversas granulometrias. Possui peso específico $3,85 \text{ g/cm}^3$ e dureza aproximada de 2000 *Knoop* [45].

3.3.2.2. Alumina calcinada

A alumina calcinada é utilizada em revestimentos cerâmicos para elevar a resistência química e a abrasão, e na área de abrasivos para polimento. Produzida industrialmente pela calcinação moderada do hidróxido de alumínio obtido a partir da purificação da bauxita através do chamado processo Bayer. Suas partículas constituem-se de aglomerados de fases cristalinas, intermediárias do processo de conversão para alumina alfa, apresentando, portanto área superficial relativamente alta e, em consequência, boa facilidade de fusão. Possui densidade compactada aproximada de $1,20 \text{ g/cm}^3$ [46] e dureza de 2000 *Knoop* [45].

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 4-1 apresenta um fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

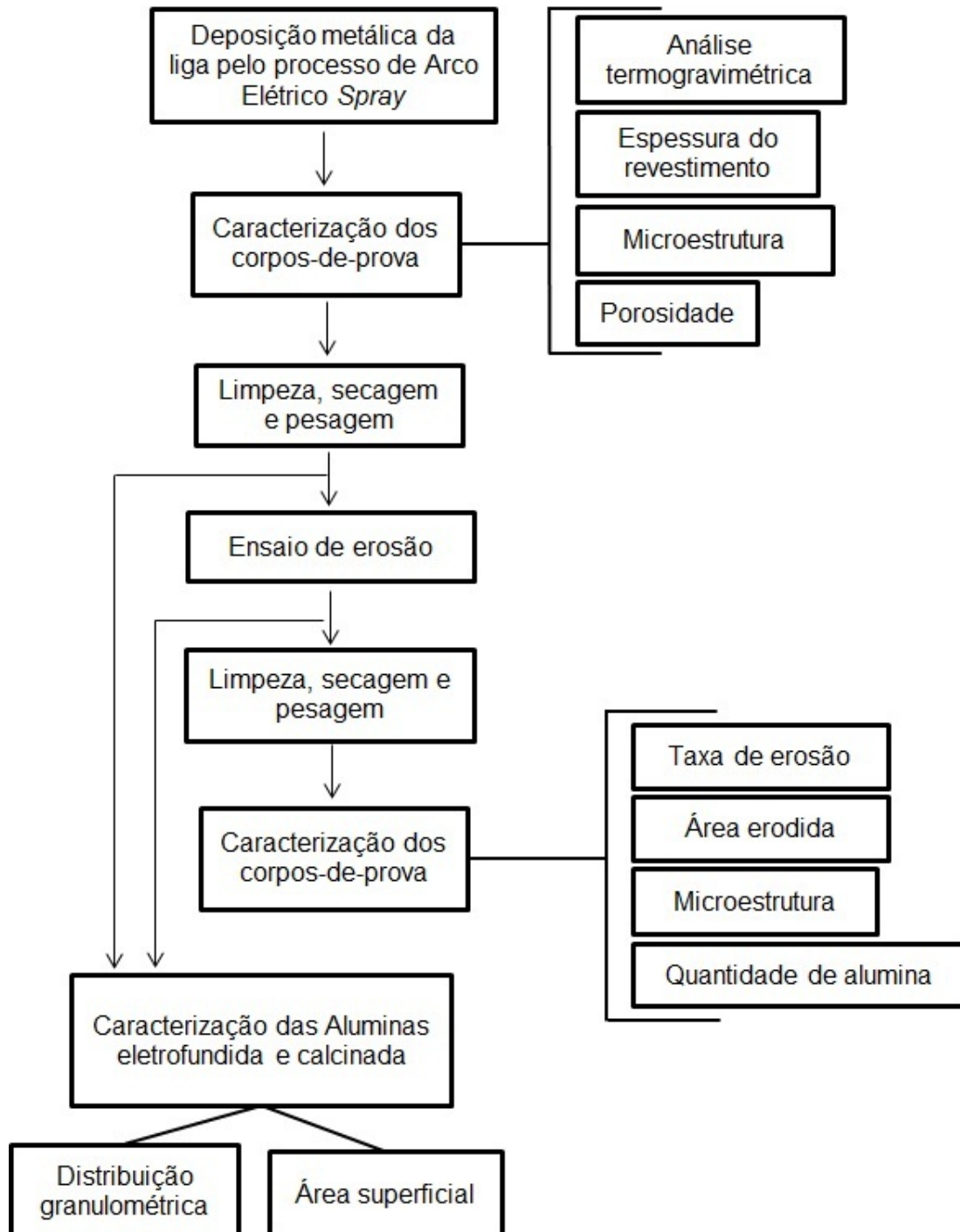


Figura 3-21: Apresenta um fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

4.1. Materiais

4.1.1. Revestimento

Para a realização de trabalho, utilizou-se um arame comercial fabricado pela empresa Eutectic Castolin Ltda., comercializado pelo nome de *Eutronic Arc 593 T*. Esta liga foi desenvolvida para produzir revestimentos com boas características quanto à dureza, desgaste por erosão, abrasão e ao choque térmico em temperaturas de até 650°C [47].

A composição química da liga, segundo o fabricante, encontra-se na Tabela 4-I. Segundo o fabricante, esta liga possui uma boa propriedade de ancoramento ao substrato, não sendo necessária uma camada intermediária, apresentando uma dureza de 63 HRc (aproximadamente 770 HV) [47]. A aplicação dessa liga é recomendada para placas de resfriamento em fornos de cimento, tubulação de parede d'água de caldeiras e ciclones de alta temperatura, entre outros. Comercialmente, vendido na forma de arame tubular com diâmetro de 1,6 mm.

Tabela 3-III: Composição química da liga usada fornecida pelo fabricante [47].

Elementos	Cr	B	C	Mn	S	Fe	Al
%	21,29	1,45	0,04	0,74	0,02	Bal.	-

4.1.2. Erodente

Os erodentes utilizados foram duas aluminas uma calcinada, fornecida pela Alcoa, de nome comercial A1 [48]. A alumina eletrofundida foi fornecida pela Treibacher, denominada EC31R [45].

4.1.2.1. Análise química

A análise química dos erodentes foi realizada através da microsonda EDS da marca Oxford Instruments, modelo Swift ED3000, acoplada ao MEV de bancada

(Hitachi, modelo TM 3000). Para a amostra eletrofundida, verifica-se a presença de elementos como cálcio e titânio além do alumínio, conforme mostrado na Tabela 4-II. Já a amostra calcinada apresenta a presença de elementos como sódio e silício além do alumínio, como são mostrado pela mesma Tabela 4-II.

Tabela 3-IV: Composição química dos óxidos de alumínio utilizado como erodente.

Qtd. em peso (%)	O	Al	C	Ca	Ti	F	Fe	Na	Si
Eletrofundida	41,7	21,8	11,8	9,9	8,3	3,1	2,3	-	-
Calcinada	53,5	40,3	5,7	-	-	-	-	0,4	0,05

4.1.2.2. Distribuição granulométrica

Para avaliar a distribuição granulométrica, utilizou-se um granulômetro a Laser, marca Cilas, modelo 1180. A faixa de detecção deste equipamento situa-se entre 0,04 a 2500 μm . As amostras analisadas por esta técnica foram dispersas em álcool isopropílico e submetidas à agitação por ultrassom durante 180 segundos para desaglomeração.

A Tabela 4-III apresenta dados da distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida e calcinada utilizadas neste trabalho. O tamanho médio das partículas das aluminas eletrofundida e calcinada foi de 93,83 μm e 87,71 μm , respectivamente.

Tabela 3-V: Análise granulométrica por difração a laser das aluminas.

Erodente	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{\text{médio}}$ (μm)
Eletrofundida	42,16	92,55	148,21	93,83
Calcinada	52,60	87,65	126,99	87,71

4.1.2.3. Morfologia

A Figura 4-2 (a) apresenta a morfologia da alumina eletrofundida utilizada

como erodente neste trabalho. A partir da análise desta imagem, observa-se que o erodente é constituído de partículas irregulares, angulares. A Figura 4-2 (b) apresenta a morfologia da alumina calcinada, onde se observa que este erodente é constituído de partículas aglomeradas com formato arredondado (esferóide).

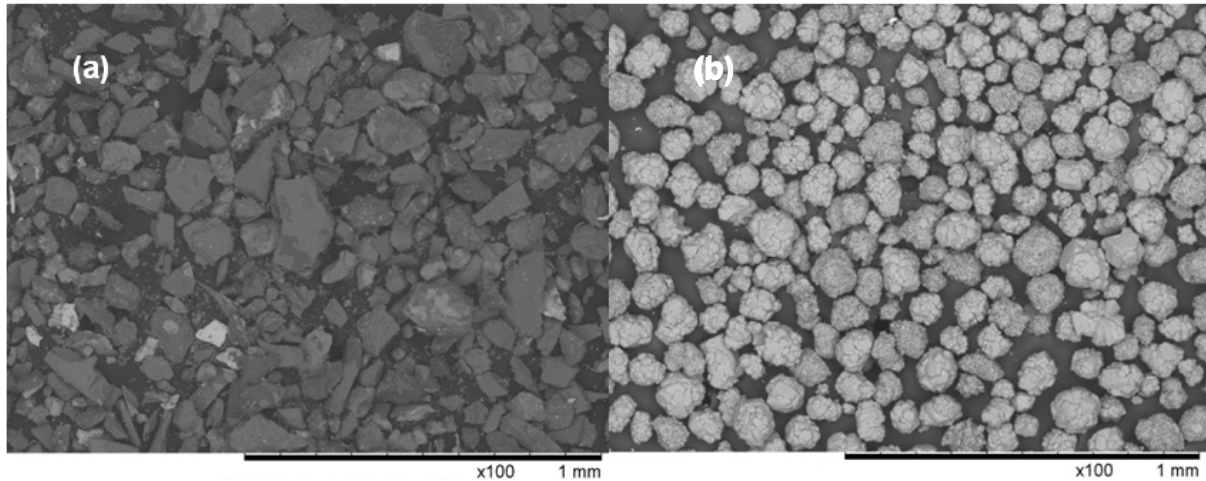


Figura 3-22: Morfologia da alumina eletrofundida (a) e calcinada (b) utilizadas como erodente. Aumento de 100x.

4.2. Métodos

4.2.1. Fabricação dos corpos-de-prova

A fabricação dos corpos-de-prova para serem revestidos por aspersão térmica envolveu a seguinte sequência de etapas: preparação do substrato, aspersão da liga, caracterização e preparação de corpos-de-prova para o ensaio de erosão. Um jateamento com microesferas abrasivas de aço foi feito para gerar limpeza superficial do substrato visando melhorar a adesão o revestimento e o substrato. Após, a superfície do corpo-de-prova foi limpa com ar comprimido para afastar resíduos decorrentes do jateamento, e então o revestimento foi aplicado.

Os corpos-de-prova (substratos) de aço inoxidável AISI 310 na forma de cilindro com 30mm de diâmetro e 6 mm e altura (Figura 4-3) possuíam um orifício na face oposta ao revestimento para o controle da temperatura durante o ensaio de

erosão, onde um termopar de 1,5 mm de espessura era inserido até que ficasse a uma distância aproximada de 1,5 mm da face oposta.

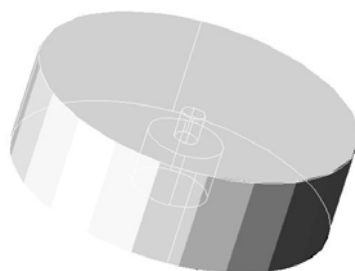


Figura 3-23: Substrato empregado como suporte na obtenção dos revestimentos.

4.2.2. Fabricação dos revestimentos

O equipamento fabricação dos revestimentos utilizou a técnica de arco elétrico a partir do de um equipamento como o da Figura 4-4.

O equipamento utilizado para a fabricação dos revestimentos por *arco spray* foi o Eutronic Arc Spray 4, fabricado pela Castolin Eutectic. Este equipamento pode atingir até 350 A de corrente e utiliza arames contínuos de 1,6 mm a 2,5 mm de diâmetro, podendo ser condutores sólidos ou tubulares. Os parâmetros de deposição utilizados no processo basearam-se no catálogo da empresa fabricante e estão descritos na Tabela 4-IV. Os corpos-de-prova foram aspergidos na empresa fabricante do equipamento e da liga. A Figura 4-4 apresenta esquematicamente o equipamento empregado.

Tabela 3-VI: Níveis usados na deposição do revestimento.

Parâmetros	Valores
Tensão (V)	32
Corrente (A)	260
Espessura do revestimento [μm]	300
Pressão do Ar [psi]	72
Distância de Aspersão [mm]	100

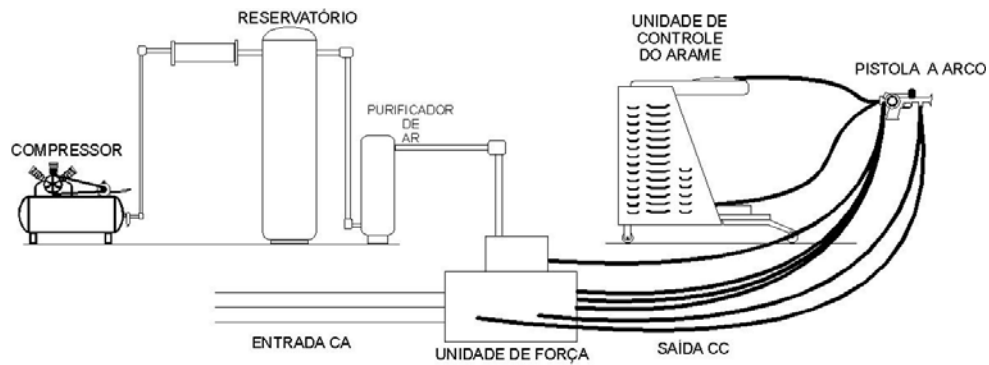


Figura 3-24: Esquema de uma instalação para aspensão térmica de arco elétrico [9].

4.2.3. Caracterização do revestimento

4.2.3.1. Medida da espessura do revestimento

Para realizar a medida da espessura dos revestimentos, fez-se o uso da microscopia óptica através de um microscópio Olympus BXS1M e uma câmera *Infinity1* a ele acoplada. A partir das micrografias de seções transversais, onde os aumentos variaram de acordo com a espessura, utilizou-se o programa *ImageJ* (*software* gratuito para *download*) para determinar a espessura de cada revestimento [49]. Assim, um padrão de comprimento foi gerado a partir da barra de comprimento existente na micrografia. Foram realizadas medidas em 8 peças distintas para que pudesse obter uma média aritmética simples.

4.2.3.2. Porosidade

Para a determinação da porosidade total dos revestimentos, os corpos-de-prova foram previamente preparados para a análise metalográfica, isto é, cortados, embutidos, lixados e polidos. Após, foram feitas micrografias óticas em um microscópio Olympus modelo BXS1M.

A partir destas micrografias, utilizou-se o programa *ImageJ* para determinar a proporção de áreas escuras (poros + óxidos) e área clara (revestimento) [49]. Foram feitas 3 análises do revestimento em corpos-de-prova distintos e a partir destas

determinou-se a média da porosidade total do revestimento.

A eficácia deste método para revestimentos aplicados por aspersão térmica foi abordada por Deshpande *et al.* [50], comparando com métodos convencionais como a absorção de água, porosimetria de mercúrio, picnometria de hélio e métodos avançados como dispersão de neutros em pequenos ângulos. A partir da comparação dos resultados pelas diferentes técnicas, os autores puderam validar a técnica de análise da porosidade por imagem.

4.2.3.3. Oxidação do revestimento

O aumento da temperatura durante a erosão pode causar, além da incrustação, um ganho de massa através da oxidação do revestimento e mesmo do do substrato. A caracterização dos revestimentos quanto à oxidação foi realizada através da quantificação do ganho de massa em uma balança termogravimétrica da marca Mettler Toledo, modelo TGA/STDA 851e. Para tanto, um corpo-de-prova de alumínio foi utilizado como substrato para a aspersão do revestimento de FeCr, para que a retirada do revestimento fosse facilitada, simplesmente pela contração diferenciada no resfriamento. Então, o revestimento destacado foi limpo em banho de ultrassom por 10 min, e enxaguado com acetona e posteriormente secos em estufa por aproximadamente 10 min. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 850°C sem patamar. A atmosfera utilizada foi ar sintético com mistura de Oxigênio (20% ± 0,5) e Nitrogênio (80% ± 0,5) e vazão de 10 ml/min.

Para avaliar o possível ganho de massa do substrato de aço inoxidável uma peça sem revestimento foi colocada em condições semelhantes de ensaio, com temperatura de 400°C, mesma vazão de ar e tempo, e mesmo procedimento de limpeza descrito acima.

4.2.3.4. Análise microestrutural

A análise microestrutural foi procedida antes e após o ensaio de desgaste, com objetivo também de identificar e quantificar no revestimento a incrustação de

alumínio, proveniente da alumina utilizada como erodente. A técnica empregada para a avaliação da microestrutura foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV de bancada, Hitachi, modelo TM 3000) com microssonda EDS acoplada (EDS da marca Oxford Instruments, modelo SwiftED3000).

4.2.4. Equipamento de desgaste

O equipamento é composto por um forno de pré-aquecimento de ar, um sistema de alimentação de partículas erodentes, um sistema venturi – acelerador de partículas e o forno para os ensaios. A Figura 4-5 apresenta esquematicamente o equipamento utilizado para os ensaios de erosão, anteriormente descrito por Marques e Vicenzi [51, 52].

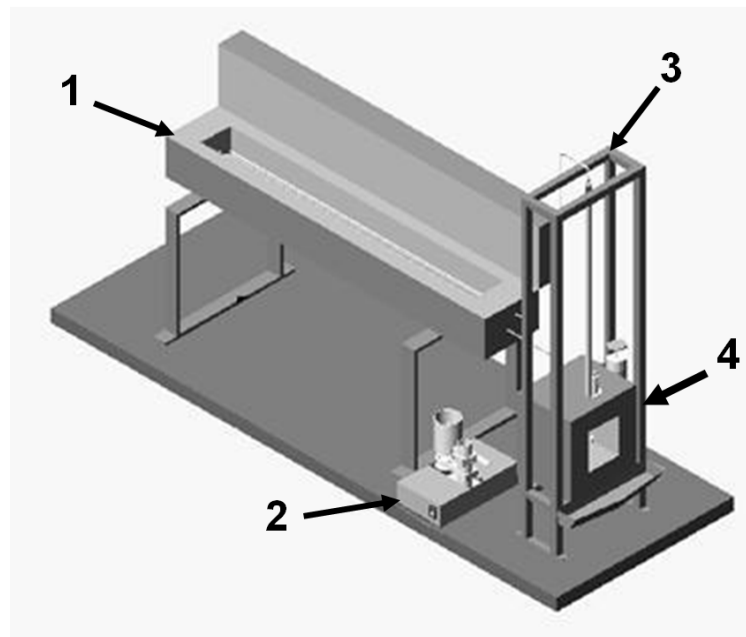


Figura 3-25: Equipamento para ensaios de desgaste erosivo indicando as partes principais: (1) sistema de pré-aquecimento do ar, (2) sistema de alimentação de partículas erodentes; (3) Sistema venturi-acelerador de partículas e (4) Forno para os ensaios.

O sistema de pré-aquecimento do ar tem por objetivo proporcionar o aquecimento do ar comprimido quando os ensaios são realizados em temperaturas

elevadas, evitando o resfriamento do corpo-de-prova. Este aquecimento é feito em um forno elétrico com serpentinas internas de aço inoxidável. O ar é aquecido ao passar pelo interior das serpentinas. O forno tem capacidade de atingir temperaturas de 1100°C com uma vazão de ar de 25m³/h. O limitador de ar é um fluxômetro acoplado na entrada das serpentinas, externo ao forno. Na saída, o ar é enviado ao início do sistema de aceleração de partículas por um venturi.

O sistema de alimentação de partículas tem por objetivo proporcionar a alimentação constante do sistema de alimentação de partículas. Para este trabalho a alimentação de partículas de erodente foi padronizada em 8,667g/min.

O sistema de aceleração de partículas e desgaste erosivo tem a função de misturar o ar aquecido com as partículas e acelerá-las até o material alvo, proporcionando o fenômeno da erosão. O sistema de aceleração inicia-se em um venturi, produzido em aço inoxidável, com uma entrada para o ar aquecido, e outra para as partículas do erodente, como é mostrado esquematicamente na Figura 4-6. O carregamento das partículas só é possível devido a estricção dentro do venturi, e cria uma diferença de pressão capaz de sugar as partículas e misturá-las ao ar. O fluxo de partículas erosivas é, então, injetado e acelerado em um longo tubo de aço.

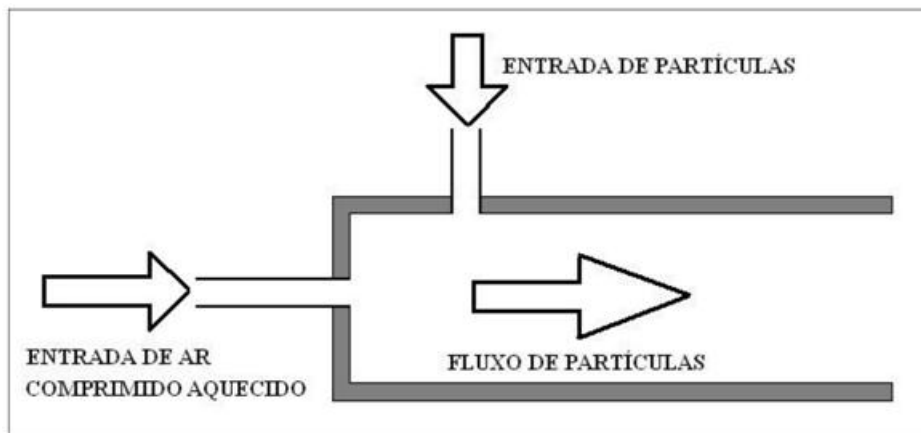


Figura 3-26: Diagrama esquemático do venturi, dispositivo que suga as partículas erosivas misturando e homogeneizando-as com ao ar aquecido.

O forno de ensaios é o local onde ocorre o ensaio de desgaste erosivo. O

porta-amostra é fixado no interior do forno, preso em uma haste acoplada a sistema de rolamentos. Este sistema é capaz de girar o porta-amostra entre 10° e 90°, o que torna possível o estudo do fenômeno de erosão em função do ângulo de incidência das partículas erosivas. Um termopar é inserido na parte inferior do porta-amostra, conforme Figura 4-7, entrando em contato com o corpo-de-prova, fazendo-se possível obter uma temperatura mais próxima a qual está a superfície que está sendo erodida. Sendo assim, os ensaios iniciam no momento em que o corpo-de-prova atinge a temperatura desejada e o sistema entra em equilíbrio térmico.

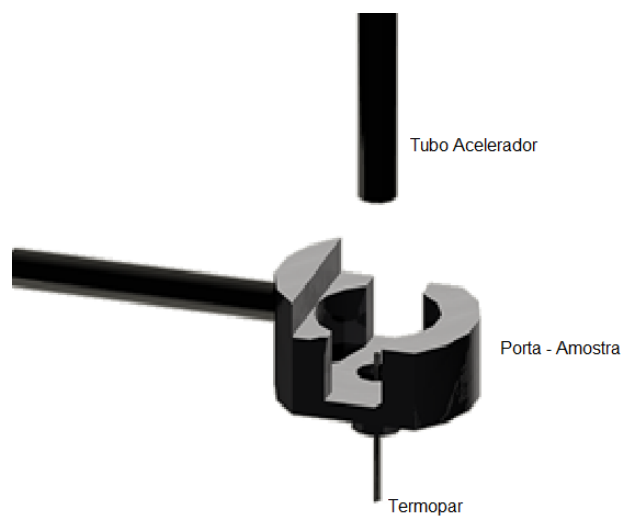


Figura 3-27: Ilustração da inserção do termopar no porta-amostra para que ocorra o contato com o corpo-de-prova.

4.2.4.1. Calibração do equipamento e parâmetros de ensaio

4.2.4.1.1. Velocidade das partículas de erodente

A velocidade das partículas erodentes foi medida utilizando-se o método proposto por Hovis *et al.* [53] conhecido por *double disk*, esquematicamente representado na Figura 4-8 e já foi utilizado em diversos trabalhos [54-57]. O método consiste na utilização de dois discos que giram em um mesmo eixo e são colocados logo abaixo da extremidade do tubo acelerador, por onde são expelidos ar e

erodente. No disco mais próximo da extremidade do tubo acelerador fez-se uma abertura que permite a passagem de erodente. Uma vez que os discos giram com velocidade igual, as partículas, ao passarem pelo rasgo, deverão atingir o disco inferior, porém, em uma posição deslocada em S da posição logo abaixo da abertura. Sendo assim, sabendo-se a velocidade de giro e a distância entre os discos, é possível pelo deslocamento S , determinar a velocidade das partículas erodentes através da Equação 4-3.

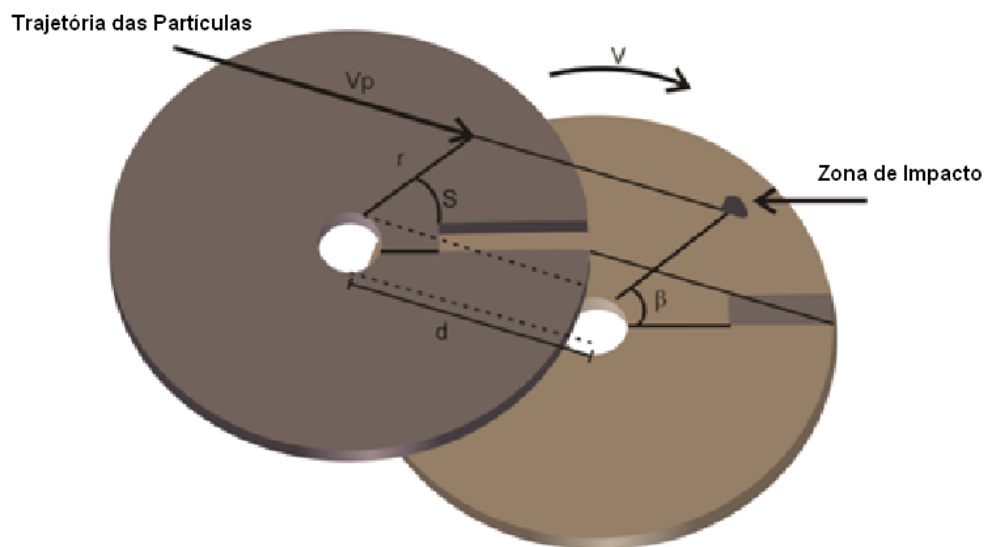


Figura 3-28: Princípio do *double disk* utilizado para calibrar as velocidades das partículas erodentes nos ensaios de erosão.

O deslocamento S é medido no centro da zona de impacto e representa a velocidade média das partículas.

$$V_{part} = \frac{d_d \cdot \omega}{\alpha} \quad \text{Equação 3-5}$$

onde:

$V_{Part.}$ = velocidade média das partículas (m/s);

d_d = distância entre os discos (m);

ω = velocidade angular medida com o auxílio de um tacômetro (rad/s);

α = ângulo entre a abertura e o ponto médio da região de impacto (rad).

A Figura 4-9 (a) apresenta o sistema de medição de velocidade *double disk* na posição de avaliação da velocidade. A Figura 4-9 (b) apresenta a indicação do ângulo entre a posição da abertura e o ponto médio da região de impacto.

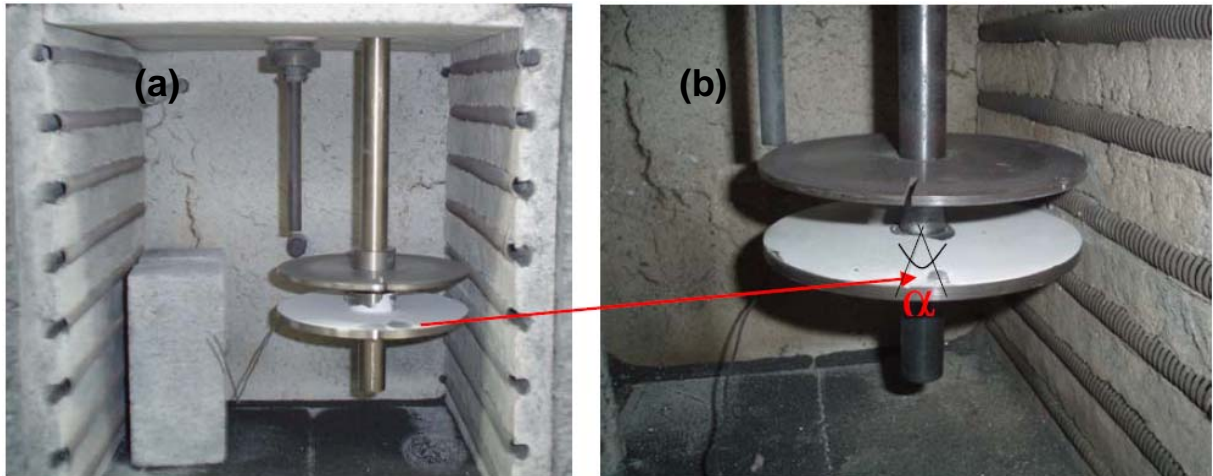


Figura 3-29: (a) Medidor de velocidade *double disk* projetado para o equipamento de desgaste erosivo. (b) Detalhe apresenta a zona de impacto deslocada em relação à posição abaixo da abertura do disco superior, destacando o ângulo entre a posição da abertura e o ponto médio da região de impacto [51].

A sequência utilizada para determinar a velocidade média das partículas foi a seguinte:

- i) fixação dos discos no eixo dentro do forno com uma distância entre o disco e o tubo acelerador de 20mm e entre os discos de 30mm. Além disso, o disco inferior foi pintado com uma barbotina de alumina e água, para determinar a marca da zona de impacto das partículas;
- ii) aquecimento do ar até a temperatura desejada;
- iii) acionamento do motor para por os discos em rotação;
- iv) acionamento do fluxo de erodente por 30s;
- v) determinação da rotação do eixo com o auxílio de um tacômetro

digital, modelo MDT 2238A, marca Minipa (resolução de 2,5 rpm a 100.000 rpm para leitura foto), durante o impacto de partículas.

Com esse procedimento é possível através da Equação 4-3 determinar a velocidade média das partículas. Assim, os ensaios de erosão foram realizados com os erodentes a uma velocidade de $25\text{m/s} \pm 3,6$.

4.2.4.1.2. Temperatura de ensaio

Para a realização do ensaio de desgaste erosivo na temperatura desejada, foi necessário ajustar corretamente as temperaturas dos dois fornos, o de ensaio e o de pré-aquecimento. A medição da temperatura dos corpos-de-prova foi realizada pelo termopar conforme Figura 4-7.

Uma pré-calibragem do equipamento em função da temperatura de ensaio - temperatura no corpo-de-prova – levou à adoção dos parâmetros apresentados na Tabela 4-V para os fornos de ensaio e pré-aquecimento. A partir das temperaturas calibradas em cada forno, foi possível realizar os ensaios de erosão nas temperaturas objetivadas, isto é: 25 e 400 °C.

Tabela 3-VII: Temperaturas utilizadas para ensaios de erosão no forno de ensaio e de pré-aquecimento.

Temperatura (°C)		
Corpo-de-prova	Forno de ensaio	Forno pré-aquecimento
25	25	25
400	400	750

4.2.4.1.3. Tempo de ensaio

Para realização dos ensaios de desgaste erosivo, foram necessários pré-testes a fim de determinar o tempo de ensaio, que deveria ser suficientemente longo para possibilitar a determinação da taxa de erosão em regime estacionário e não

poderia ser excessivo, levando à perda do revestimento até atingir o metal. Para isso o pré-teste foi realizado na situação mais crítica esperada, ou seja, onde ocorreria o maior desgaste. Então, utilizou-se uma velocidade de 25 m/s e a alumina eletrofundida, visto que, esta por apresentar formas mais angulares, é mais severa no desgaste ao revestimento, segundo trabalhos já publicados [26, 58]. A temperatura de corpo-de-prova foi de 400°C. Ao final desse teste, definiu-se o tempo de 60 minutos para a realização dos ensaios.

4.2.4.1.4. Ângulo de incidência do erodente

O porta-amostra permite girar a superfície revestida entre 10° e 90° e para a realização deste trabalho os ângulos de incidência avaliados foram de 30° e 90°. Considera-se ângulo de incidência o ângulo formado entre a superfície do corpo-de-prova e a linha percorrida pelo erodente. Esses ângulos foram escolhidos por serem os mais empregados nesses tipos de ensaios, uma vez que materiais metálicos possuem maior desgaste em ângulos de 30° e materiais cerâmicos em 90° devido ao mecanismo de remoção do material que age de forma diferente para esses materiais [20, 35].

4.2.5. Ensaio de erosão

Antes do ensaio de erosão, os corpos-de-prova foram limpos, mergulhando-os em água deionizada e colocando-os em ultrassom por 10 min. Em seguida, a sua superfície era limpa com álcool, e então a peça era colocada em estufa por 20 minutos. Após a retirada da peça da estufa e seu resfriamento à temperatura ambiente, e imediatamente antes do ensaio, os corpos-de-prova foram pesados em balança analítica e então, colocados no porta-amostra, para a realização do ensaio.

Atingida a temperatura de ensaio, o fluxo de erodente era aberto. Ao fim do tempo de ataque erosivo, o fluxo de erodente era interrompido e a amostra retirada do forno. Então, seguia-se a mesma sequência de limpeza descrita acima para então ser pesada novamente.

4.2.5.1. Determinação da área erodida

Com o auxílio de uma lupa eletrônica Olympus modelo SZ61 e da câmera *Infinity1*, fez-se a aquisição de imagens para que posteriormente com o programa *ImageJ* fosse possível ser estimada uma média da área desgastada pelos erodentes [49]. Realizou-se medidas em 3 peças para cada ângulo e temperatura. Tais medidas se fizeram necessárias uma vez que a área de colisão modifica muito em função do ângulo empregado.

4.2.5.2. Determinação da quantidade de alumina Incrustada

A estimativa da incrustação de partículas de erodentes foi feita utilizando o mapeamento de elementos por imagem com microsonda EDS acoplada à microscopia eletrônica de varredura, após a erosão em ângulos de 30° e 90°.

A quantidade de erodente incrustada foi calculada considerando-se a quantidade de Al obtido na análise por microsonda EDS de cada amostra, na área erodida do revestimento. A Equação 4-4 mostra como foram empregados os valores. Foi utilizado o valor de 2,7 g/cm³ para a densidade do alumínio.

$$Al = \left(\left(K \times \frac{q}{100} \right) \right) \times \rho_{Al} \times L \quad \text{Equação 3-6}$$

onde:

K: área erodida para o ângulo equivalente (cm²);

q: valor obtido pela varredura de elementos por EDS;

ρ_{Al} : densidade do alumínio (2,7 g/cm³);

L: espessura do revestimento (cm).

4.2.5.3. Determinação da taxa de erosão

A taxa de erosão foi determinada pela perda de volume, a partir da perda de massa, considerando a densidade aparente do revestimento utilizado, em relação à

massa de erodente utilizada no ensaio, de acordo com a Equação 4-5. Para a determinação da massa dos corpos-de-prova antes e após ensaio de erosão, foi utilizada uma balança analítica Mettler Toledo 210G, com precisão de 0,0005g.

$$T_{v1} = \frac{(m_i - m_f)}{\rho_{ap} \times m_e} \quad \text{Equação 3-7}$$

onde:

T_{v1} = taxa de erosão volumétrica ($\text{cm}^3_{\text{alvo}}/\text{g}_{\text{erodente}}$);

ρ_{ap} = densidade aparente do revestimento (g/cm^3);

m_i = massa inicial da amostra (g);

m_f = massa final da amostra (g);

m_e = massa de erodente utilizada (g).

No entanto, essa fórmula não considera o ganho de massa devido à incrustação do erodente no revestimento, gerando possivelmente erro na interpretação dos resultados. Assim, utilizou-se a mesma Equação 4-5 com uma pequena alteração na variável m_f , como é mostrado abaixo pela Equação 4-6, onde a massa final da amostra é a massa da amostra erodida subtraindo-se a massa de alumínio encontrada pela Equação 4-4.

$$m_f = m_{P.E} + m_{Al} \quad \text{Equação 3-8}$$

onde:

m_f = massa final da amostra (g);

$m_{P.E}$ = massa da peça erodida (g);

m_{Al} = massa de alumínio (g);

Substituindo na Equação 4-5, obtém-se a Equação 4-7.

$$T_{v2} = \frac{(m_i - m_{P.E} - m_{Al})}{\rho_{ap} \times m_e} \quad \text{Equação 3-9}$$

onde:

T_{v2} = taxa de erosão volumétrica corrigida ($\text{cm}^3_{\text{alvo}}/\text{g}_{\text{erodente}}$);

ρ_{ap} = densidade aparente do revestimento (g/cm^3);

m_i = massa inicial da amostra (g);

$m_{P.E}$ = massa final da amostra erodida(g);

m_{Al} = massa de alumínio (g);

m_e = massa de erodente utilizada (g).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização microestrutural do revestimento de FeCr

A Figura 5-1 mostra uma imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da microestrutura do revestimento de FeCr antes de ser submetido ao ensaio de erosão. Pode-se constatar a presença de lamelas de diversos tamanhos, com aspecto de deformação plástica devido ao seu impacto, ainda aquecidas, contra a superfície do substrato, durante o processo de aspersão por arco elétrico. Através dessa técnica de metalização, obtém-se um alto grau de porosidade, conforme Pawlowski [3], que menciona que os processos de arco elétrico resultam em revestimentos com porosidade entre 10% a 20%.

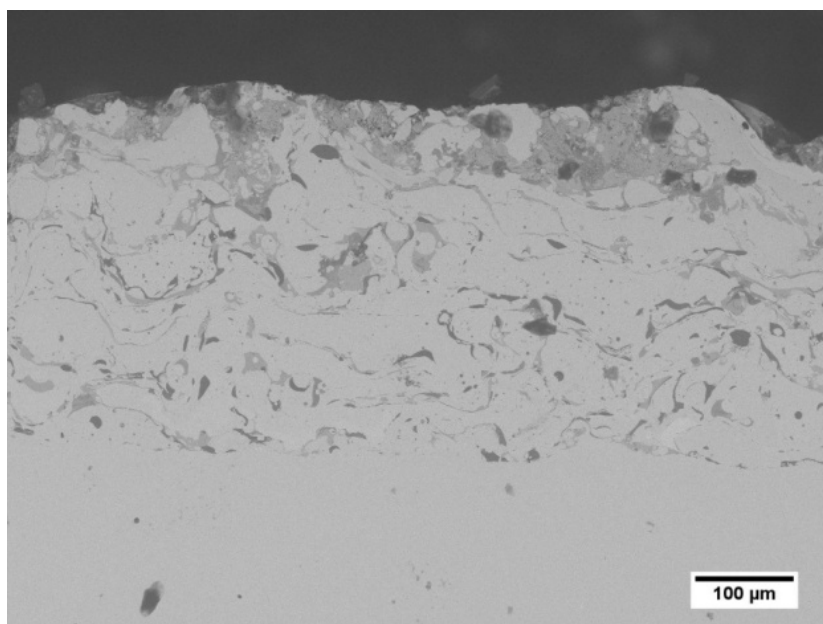


Figura 5-1: Imagem por microscópio óptico de perfil do revestimento com ampliação 200x.

A Figura 5-2 evidencia o contraste de cores claras e escuras usada pelo software *ImageJ* para quantificar a área escura como poros. Após análise de 3 amostras, a porosidade média foi quantificada em 6,2%. Cooke obteve percentuais de porosidade entre 2,5 e 14,7% para uma mesma liga aspergida e para mesma

técnica utilizada nesse trabalho. Essa variação deve-se a modificações nos parâmetros adotados para a deposição [59]. A Figura 5-3 mostra uma imagem por MEV da vista superior do revestimento.

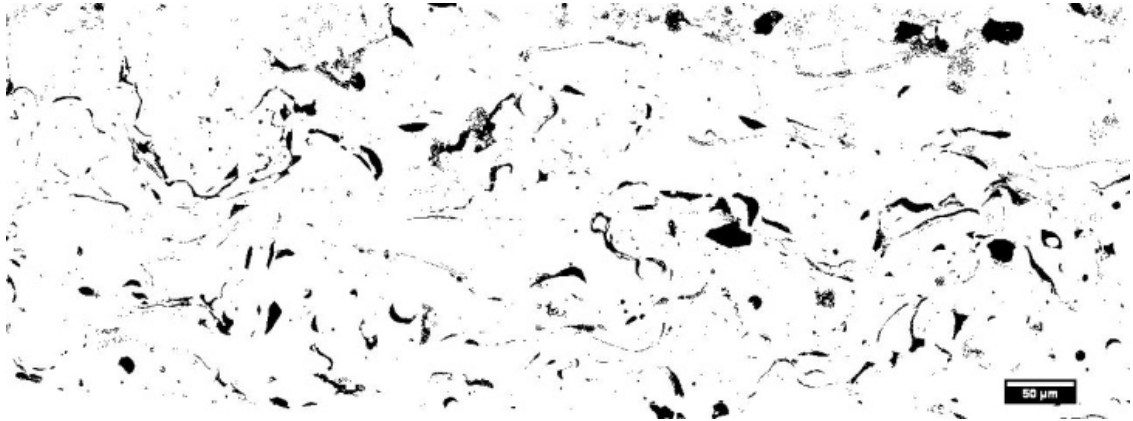


Figura 5-2: Imagem por microscópio ótico, com tratamento de imagem para contrastar claros e escuros para realização da quantificação dos poros. Ampliação de 200x.

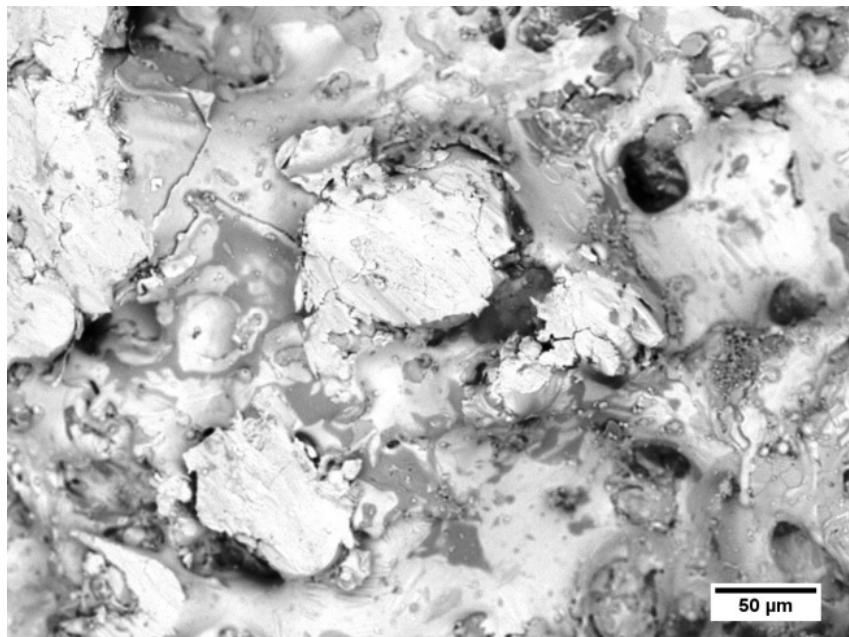


Figura 5-3: Imagem por MEV da vista superior do revestimento com magnitude de 400x.

A densidade aparente do revestimento, obtida pela Equação 4-2, foi de 11,43 g/cm³. E para a espessura, chegou-se ao valor médio de 317 ± 37 µm. No entanto,

para uma densidade aparente medida pela massa e dimensões de parte de revestimento destacada do substrato, obteve-se o valor de $7,76 \text{ g/cm}^3$. Essa diferença pode ser imputada à dificuldade de se diferenciar pelo método de análise de imagem o poro e óxido e outras partículas escuras na imagem por MEV.

5.2. Ensaios de Desgaste à Temperatura Ambiente

5.2.1. Tamanho médio de partícula do erodente

A Figura 5-4 mostra o tamanho médio de partícula dos erodentes à base de alumina, antes e após os ensaios de resistência à erosão à temperatura ambiente dos revestimentos de FeCr. Pode-se ver que a alumina eletrofundida praticamente não modificou seu tamanho médio de partícula, sugerindo que a energia da partícula durante o ataque erosivo não foi consumida para sua cominuição, sendo assim utilizada para a remoção do material da superfície ou para sua incrustação no revestimento.

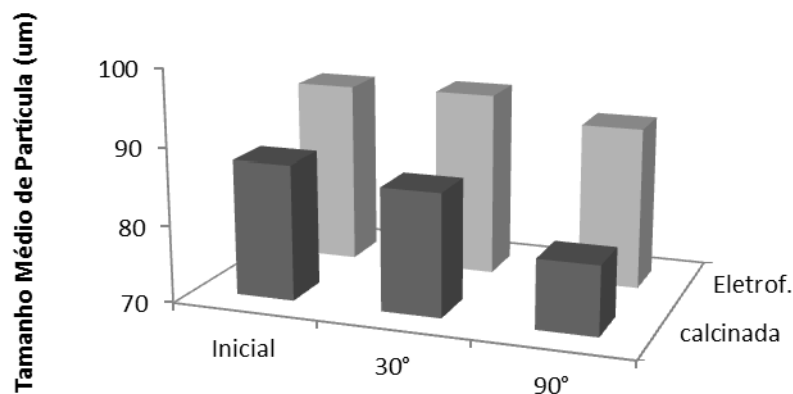


Figura 5-4: Tamanho médio de partícula da alumina calcinada e da alumina eletrofundida, antes e após ensaios de resistência à erosão à temperatura ambiente, em função do ângulo de impacto.

Por outro lado, a alumina calcinada apresentou uma significativa diminuição de tamanho quando empregada em ângulo de 90°. Isto sugere que uma parte da sua energia cinética foi utilizada para a remoção do material do corpo-de-prova, e outra parte foi consumida para sua redução de tamanho. Tal redução está ligada ao fato de que esta alumina é formada por aglomerados, que se caracterizam por possuir baixa resistência mecânica. Aminul Slam cita que para ensaios com ângulos agudos, partículas colidem contra o substrato e são projetadas para cima, podendo colidir com outras partículas que estão em sentido oposto, o que facilitaria a quebra de algumas partículas, enquanto que em ensaios a 30°, as partículas ricocheteadas não interferem no movimento das partículas subsequentes [60].

Outro ponto que contribui para essa diminuição seria a fratura do erodente pela colisão entre o erodente fixado no revestimento e o erodente em movimento, dessa forma o erodente fixado age como uma blindagem dificultando a retirada de material da superfície [61-63]

5.2.2. Área superficial dos erodentes

A Tabela 5-1 mostra a área superficial dos erodentes antes e após os ensaios à temperatura ambiente. Para todos os erodentes avaliados, constatou-se uma redução da área superficial. A maior variação foi observada para as aluminas utilizadas nos ensaios com ângulo de impacto de 90°, e entre estas a alumina calcinada apresentou o maior aumento de área superficial. Este resultado pode estar associado à remoção de material da superfície do corpo-de-prova que fica aderido ao erodente modificando sua área superficial. Tal suposição se deve à maior área de contato existente entre o erodente e o revestimento para a morfologia esférica, conforme sugere a Figura 5-5 [60].

Nos ensaios onde houve pouca mudança em relação ao valor inicial (30°) pode-se supor uma decomposição da velocidade, onde a componente vertical é utilizada para fixar o erodente no revestimento e a componente horizontal para retirar o material da superfície [60]. Então, com essa decomposição, o erodente teria menor energia para retirar o material e este permaneceria aderido ao erodente.

Tabela 5-I: Área superficial (em m²/g) das aluminas inicialmente e após o uso em ensaios de erosão nos ângulos de 30 e 90°.

	Inicial	30°	90°
Calcinada	66,607	64,508	63,315
Eletrofundida	7,009	6,175	4,266

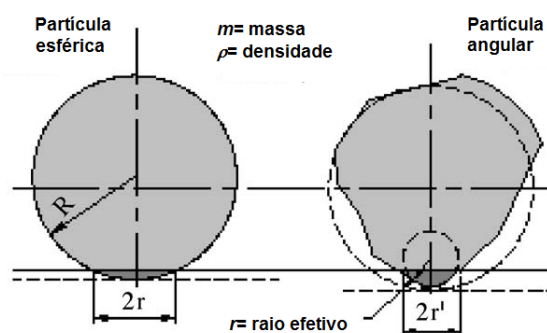


Figura 5-5: Diferença entre área de contato entre partícula esférica e angular adaptado de Desale [64].

5.2.3. Determinação da área erodida

O resultado da quantificação da área atingida pelos erodentes mostrou como resultado um valor médio de $149,60 \pm 6,67 \text{ mm}^2$ para ângulos de 30°. Já as amostras ensaiadas em 90° tiveram uma área desgastada bem menor, apresentando como resultado médio de $65,05 \pm 3,16 \text{ mm}^2$. Esses resultados foram os mesmos para os ensaios a temperatura de 400°C.

Estudo de erosão realizado em tubos de aço variando ângulo de impacto e velocidade mostrou que amostras ensaiadas em ângulo de 90° ficavam com uma marca de um círculo na superfície, enquanto que as amostras ensaiadas a 30° mostraram uma marca na forma de uma elipse [65, 66]. A mesma pesquisa também mostrou que para ângulos de 90° ocorre um desgaste mais profundo em relação às peças ensaiadas a 30°, respectivamente uma profundidade de $96 \pm 2 \mu\text{m}$ e $70 \pm 2 \mu\text{m}$ [60]. No entanto, outra pesquisa que investigou o mecanismo de erosão para

diferentes tipos de ferros fundidos mostrou que amostras ensaiadas a 30° foram as que apresentaram maior perfil de profundidade [66].

5.2.4. Quantidade de alumina Incrustada

A Figura 5-6 mostra imagens por microscópio eletrônico (MEV) da superfície de topo dos revestimentos FeCr após ensaio de resistência à erosão à temperatura ambiente. As imagens superiores são relativas aos ensaios utilizando a alumina calcinada e as imagens inferiores aos ensaios realizados com a alumina eletrofundida. Na esquerda, as imagens são referentes aos ensaios em 30° e as imagens à direita, aos ensaios de 90°. Através dessas micrografias pode-se constatar regiões mais escuras que são as aluminas incrustadas no revestimento.

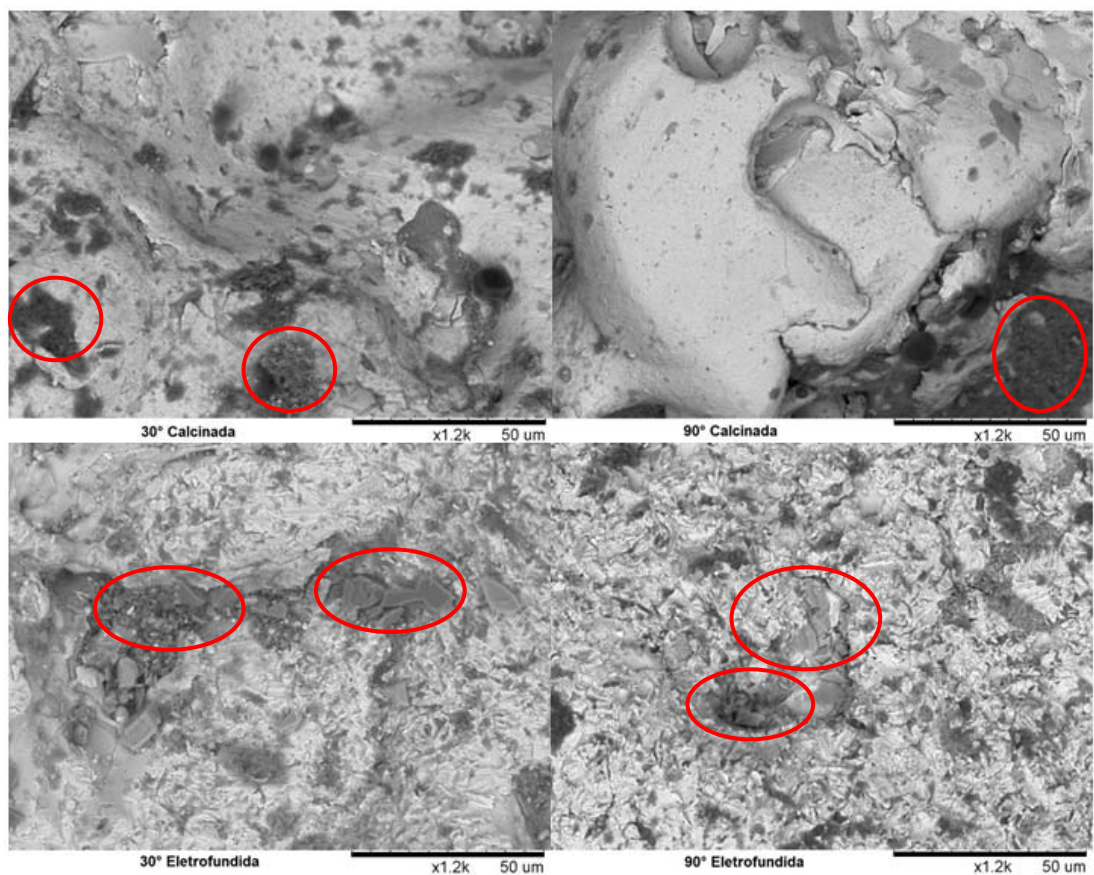


Figura 5-6: Imagens por MEV de topo do revestimento FeCr, contendo incrustações de alumina após ensaio de resistência à erosão à temperatura ambiente, com alumina calcinada (imagens superiores) e alumina eletrofundida (imagens inferiores), em função do ângulo de impacto (30°, esquerda e 90°, direita).

Após os ensaios, foi realizado um mapeamento de elementos por imagem com microsonda EDS acoplada à microscopia eletrônica de varredura. Esse mapeamento foi realizado com um aumento de 400 vezes e o resultado é apresentado na Figura 5-7. Como área de varredura nessa ampliação se considerou $8,75 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2$ [52].

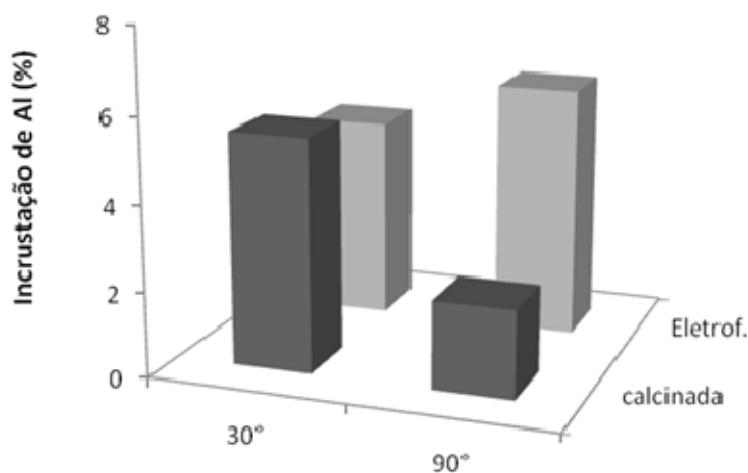


Figura 5-6: Mapeamento do elemento alumínio por EDS nas superfícies dos revestimentos FeCr após ensaio de resistência à erosão à temperatura ambiente.

Avaliando sobre uma área específica todas as condições de trabalho, pode-se constatar que as amostras com alumina calcinada em 30° e eletrofundida em 90° apresentaram valores muito próximos para a presença de alumínio incrustado no revestimento FeCr. Para a alumina eletrofundida, o elevado valor se deve ao fato de possuir sua maior energia cinética a 90°, visto que os vetores de velocidades não estão decompostos [60]. Outro fator é quanto à morfologia do erodente que, como foi mostrado por Desale, partículas anguladas dissipam maior energia em pequenas áreas de contato, dessa forma favorecendo à adesão da partícula ao revestimento FeCr [64].

Em relação à alumina calcinada, o maior valor foi para a mostra ensaiada a 30°. Este resultado pode estar ligado à menor energia cinética dissipada por unidade de área como já foi relatada anteriormente. A 30°, essa pouca energia favorece a adesão por ter maior área de contato entre partícula e revestimento. Outro possível fator atuante a decomposição dos vetores da quantidade de movimento, fazendo com que a partícula chegue com menor energia no impacto contra a superfície do revestimento. Isto facilitaria sua incrustação no revestimento. Por esse motivo, o ensaio com alumina eletrofundida a 30° também apresentou valor elevado para a incrustação. Segundo Islam, para ensaios em baixo ângulo (30°) a componente vertical da energia cinética do erodente é consumida para penetrar no revestimento, enquanto que a componente horizontal é usada para raspar a superfície do revestimento, retirando o material [60].

Com o resultado obtido da presença de alumínio pela varredura da microsonda EDS acoplada ao MEV, e utilizando-se a Equação 4-4, determinou-se a quantidade de alumínio presente nas amostras ensaiadas, relacionando com a área danificada da superfície da amostra. Este resultado está mostrado na Figura 5-8.

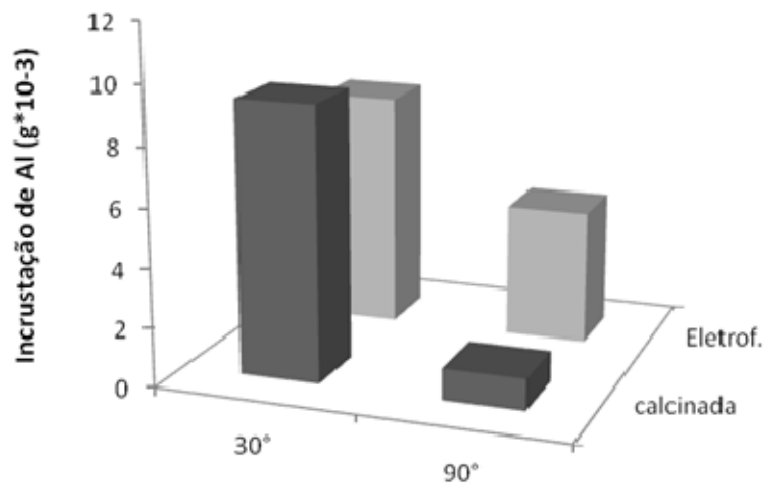


Figura 5-7: Estimativa da incrustação de alumina na superfície dos revestimentos FeCr, após ensaio de resistência à erosão utilizando alumina calcinada e alumina eletrofundida, à temperatura ambiente e a ângulos de impacto de 30° e 90°.

A presença de elevada incrustação de alumina para os ensaios em 30° é devido possivelmente à maior área de contato entre amostra e erodente nesse ângulo, formando uma marca em formato de elipse no revestimento. Desta forma, uma maior área do revestimento está exposta ao erodente, e também ao fato de que as partículas ricocheteadas nesse ângulo são projetadas em direção diferente ao de projeção. Já os menores valores em ângulo de 90° são relacionados à menor área de exposição do revestimento, e essa característica também favorece à colisão entre o erodente aderido e o que está em projeção, visto que a possibilidade de encontro entre os erodentes é maior.

5.2.5. Taxa de Erosão

O resultado da taxa de desgaste obtido pela Equação 4-5 é apresentado pela Figura 5-9, por onde se pode verificar que a alumina eletrofundida, de formato irregular, como erodente apresentou uma maior agressividade ao revestimento para os dois ângulos de impacto, quando comparada aos resultados da alumina calcinada. Também pode-se observar uma maior taxa de erosão para os ensaios empregados a 90° com as duas morfologias utilizadas de erodente. No entanto, esses resultados não estão de acordo com diversos autores que citam que revestimentos metálicos apresentam maior taxa de desgaste em ângulos inferiores a 30° [15, 58].

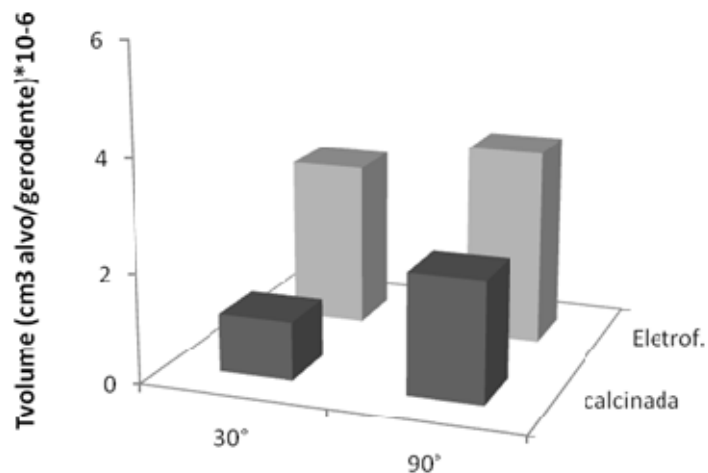


Figura 5-8: Taxa de erosão do revestimento FeCr à temperatura ambiente, em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, calculada utilizando a Equação 4-5.

Então, a fim de verificar a influência da quantidade de alumina incrustada no revestimento para o cálculo da taxa de desgaste, fez-se o uso da Equação 4-7. O resultado é mostrado na Figura 5-10, pelo qual se constata uma alteração, a alumina eletrofundida foi mais agressiva ao revestimento para ambos os ângulos de ensaio quando comparada à alumina calcinada, ficando esse resultado coerente com diversas pesquisas já realizadas [15, 58].

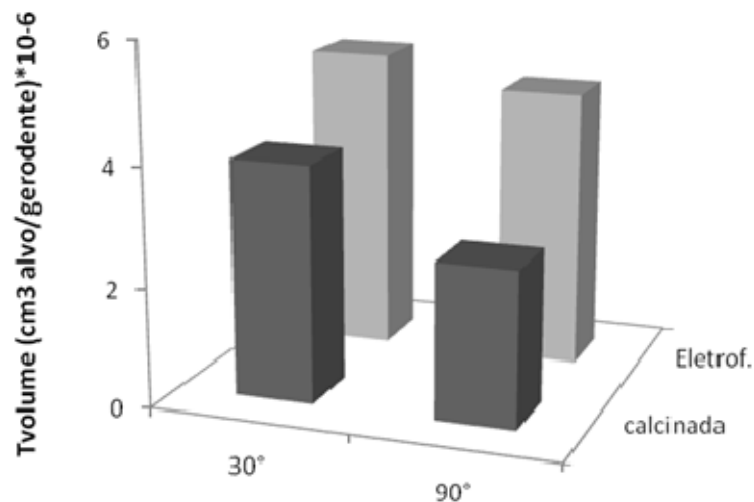


Figura 5-9: Taxa de erosão à temperatura ambiente do revestimento FeCr em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, corrigida pela incrustação de alumina, estimada segundo a Equação 4-7.

Verifica-se assim que a maior taxa de erosão com os dois erodentes foi obtida para o ângulo de 30°, embora os mecanismos de remoção de material do revestimento FeCr nesse ângulo sejam supostamente diferentes: por corte (*cutting*), para a alumina eletrofundida, e por sulcamento (*ploughing*) para alumina calcinada, através sucessivas deformações plásticas até retirada de material [67, 68]. Avaliando a incrustação para esse mesmo ângulo, e corrigido pela área atacada

(Equação 4-7), observa-se que a taxa de erosão seria ainda maior se as partículas não fossem aderidas ao revestimento. Em especial, a alumina calcinada que apresentou valores de incrustação maior que a eletrofundida e taxa de erosão menor.

A maior incrustação a 30° pode ser resultado da maior área de contato do erodente (dissipando menor energia por área de contato) e menor velocidade de impacto, pela decomposição dos vetores da quantidade de movimento, em termos de retirar o material da superfície, penetrar no revestimento e cominuir o erodente. Tais resultados estão de acordo com o resultado da análise granulométrica onde não houve significativa alteração no tamanho de partícula das aluminas, evidenciando que a energia não foi suficiente para quebrar o erodente em partículas menores, mas o suficiente para provocar o desgaste e incrustação no revestimento.

Os resultados dos ensaios em ângulo reto (90°), conforme Equação 4-7 mostraram uma menor taxa de erosão. Para tanto, concorreu possivelmente o encruamento superficial do revestimento em função do impacto contínuo do erodente [20]. O outro fator seria a presença de erodente aderido à superfície, que nessa situação onde a área de colisão do erodente no corpo-de-prova é menor, possibilita um aumento na probabilidade de colisão entre erodente-erodente, gerando uma blindagem ao revestimento. Desta forma, a colisão erodente-erodente provocaria uma diminuição do tamanho médio do erodente como foi mostrado pela Figura 5-4 e sugerido anteriormente por Finnie [20].

5.3. Ensaio de Desgaste a Temperatura de 400°C

5.3.1. Tamanho médio de partícula do erodente

A Figura 5-11 apresenta a variação do tamanho médio de partícula dos erodentes à base de alumina, antes e após os ensaios de resistência à erosão à temperatura de 400°C dos revestimentos de FeCr, em função do ângulo de impacto. Constata-se que para todas as situações empregadas houve uma diminuição do tamanho médio de partícula do erodente sugerindo que a resistência mecânica das aluminas diminuiu significativamente com o aumento da temperatura [51]. Etienne,

estudando o mecanismo de erosão sólida para revestimentos duros, também obteve uma redução na distribuição das suas partículas de erodente e relacionou tal resultado a velocidade de impacto entre partícula e revestimento [69].

A alumina calcinada foi a que apresentou maiores variações de tamanho médio de partícula, o que pode ser devido ao enfraquecimento das ligações entre as partículas que formam os aglomerados.

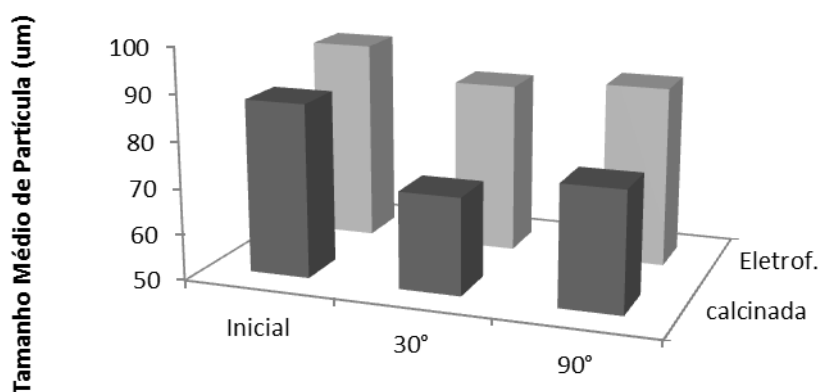


Figura 5-10: Tamanho médio de partícula da alumina calcinada e da alumina eletrofundida, antes e após ensaios de resistência à erosão à temperatura de 400°C, em função do ângulo de impacto.

Para ambas aluminas a maior variação ocorreu no ângulo de 30°, pois ao se colidir contra o revestimento nessa angulação, o erodente recebe uma tensão cisalhante, enquanto que as amostras utilizadas em 90° tem seu impacto absorvido pela superfície do corpo-de-prova devido ao aumento da sua plasticidade ocasionada pelo aumento da temperatura de ensaio [52].

5.3.2. Área superficial

O resultado para a área superficial é apresentado na Tabela 5-II. Pode-se observar que após ensaio de erosão a alumina calcinada praticamente não alterou sua área superficial, no entanto houve uma redução no tamanho médio de partícula.

Esse resultado não esperado, pois menor tamanho de partícula resultaria em maior área superfície após ensaio, poderia ser explicado por duas hipóteses não excludentes: i) o aglomerado formado por pequenas partículas é permeável ao gás nitrogênio que adere à superfície dessas partículas, da mesma forma e intensidade, estando elas no aglomerado ou não; ii) parte da alumina após ensaio tem sua superfície com presença de revestimento, resultado do processo erosivo.

Tabela 5-II: Área superficial (m^2/g) das aluminas inicialmente e após o uso nos ângulos de 30 e 90° em temperatura de 400 °C.

	<i>Inicial</i>	<i>30°</i>	<i>90°</i>
<i>Calcinada</i>	66,607	66,035	66,564
<i>Eletrofundida</i>	7,009	4,342	5,735

Em relação à alumina eletrofundida ocorre o mesmo mecanismo que a calcinada, no entanto as reduções das áreas superficiais são maiores devido a maior agressividade dessa alumina, como já fora abordado anteriormente, resultando numa maior quantidade de revestimento retirado da superfície do corpo-de-prova e ficando preso no erodente.

5.3.3. Quantidade de alumina incrustada

A Figura 5-12 mostra imagens obtidas por MEV das amostras ensaiadas a 400°C. Acima, estão as amostras ensaiadas com alumina calcinada e abaixo com a alumina eletrofundida. Na esquerda, são imagens das amostras erodidas a 30° e a direita as com ângulo de 90°. Pode-se identificar diversas regiões escuras espalhadas pelo revestimento, possivelmente incrustações de alumina.

Os resultados obtidos com o mapeamento de elementos por imagem com microsonda EDS acoplada à microscopia eletrônica de varredura são mostrados pela Figura 5-13. A alumina calcinada foi a que apresentou maior incrustação no revestimento para os dois ângulos empregados. Esse resultado é devido possivelmente à menor energia dissipada por área de contato que ocorre no impacto

da alumina calcinada na superfície do revestimento por sua morfologia, como anteriormente discutido (Figura 5-5). Desta forma, a adesão ao revestimento é favorecida. Por outro lado, a alumina eletrofundida, por apresentar supostamente maior energia dissipada por unidade de área, é capaz de remover o material da superfície e não ficar aderida ao revestimento.

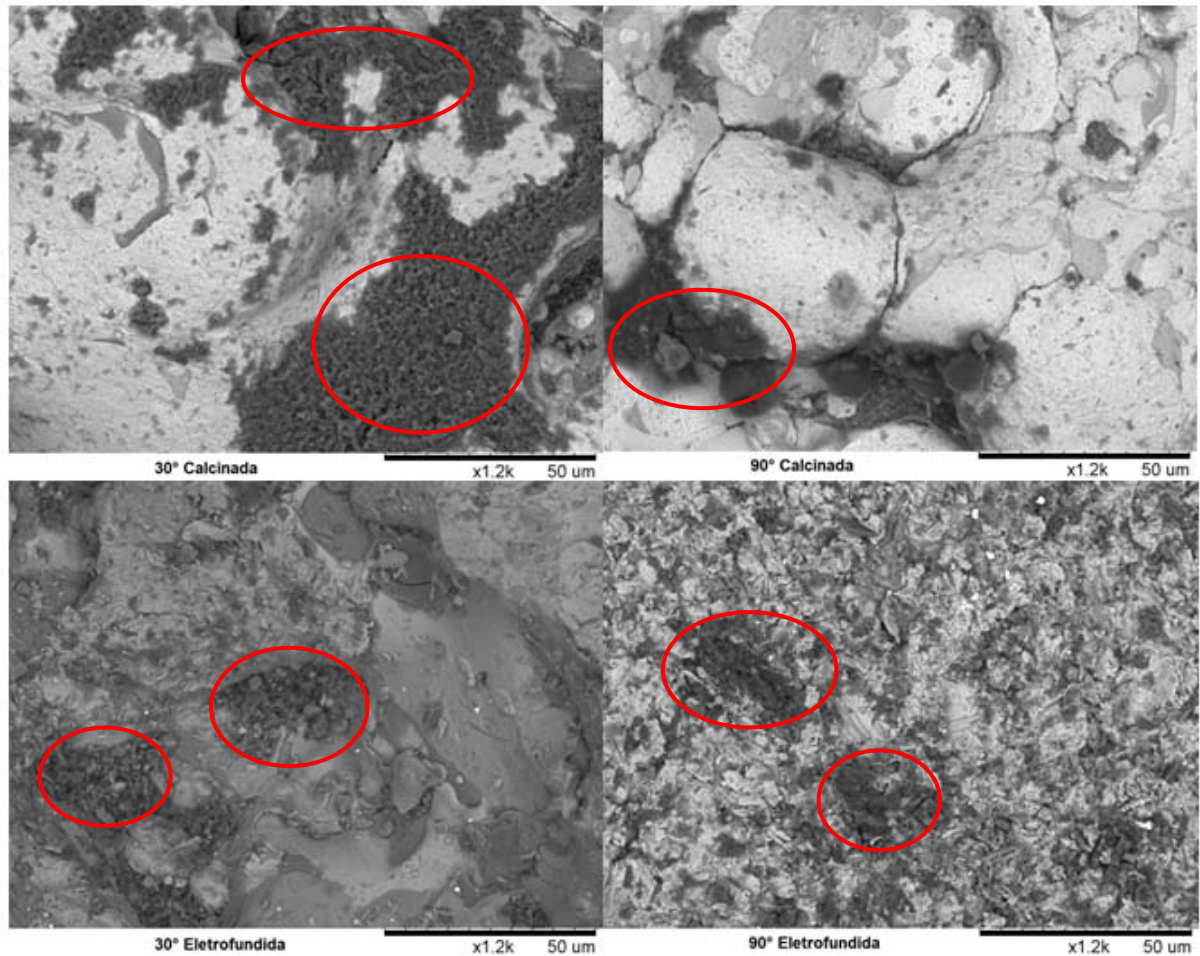


Figura 5-11: Imagens por MEV de topo do revestimento FeCr, contendo incrustações de alumínio após ensaio de resistência à erosão à temperatura de 400°C, com alumina calcinada (imagens superiores) e alumina eletrofundida (imagens inferiores), em função do ângulo de impacto (30°, esquerda e 90°, direita).

As amostras erodidas a 90°, para ambas as aluminas, apresentaram os maiores valores de incrustação por apresentarem maior energia cinética ao impactarem com o revestimento em uma área menor de contato efetivo.

No entanto, a diminuição de tamanho médio para ambas as aluminas provavelmente ocorreu pela maior incrustação de alumina na superfície do revestimento (afetado pelo aumento da temperatura) fazendo com que a alumina projetada contra a superfície encontre uma superfície já incrustada, endurecida. Como resultado, uma maior fragmentação da alumina incidente. A maior variação ocorreu para a calcinada devido ao fato de ser constituída de partículas aglomeradas, caracterizadas por ter baixa resistência mecânica.

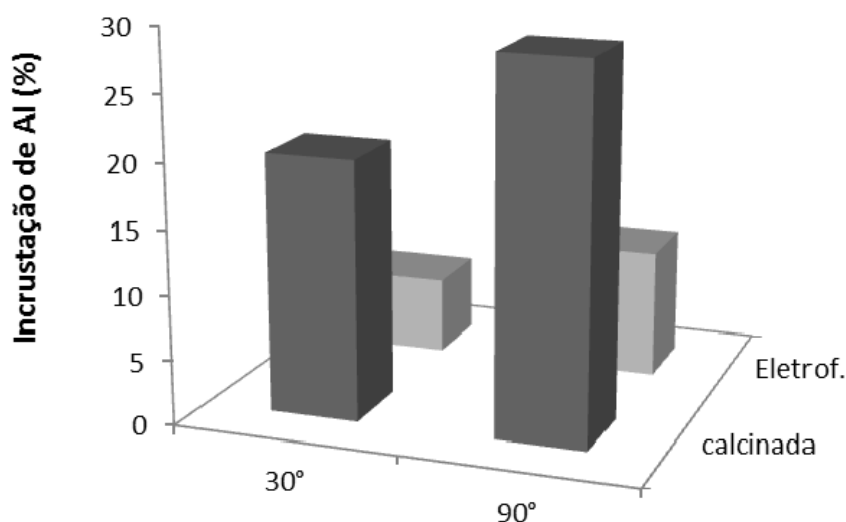


Figura 5-12: Análise de alumínio na superfície dos revestimentos FeCr por EDS acoplada à MEV, após ensaio de resistência à erosão utilizando alumina calcinada e alumina eletrofundida, à temperatura de 400°C e a ângulos de impacto de 30° e 90°.

Aplicando o resultado da incrustação na Equação 4-4, obteve-se os dados apresentados na Figura 5-14, onde novamente os maiores valores encontrados são referentes as amostras ensaiadas em ângulo de 30°, justamente por essa equação utilizar a área desgastada pelo erodente.

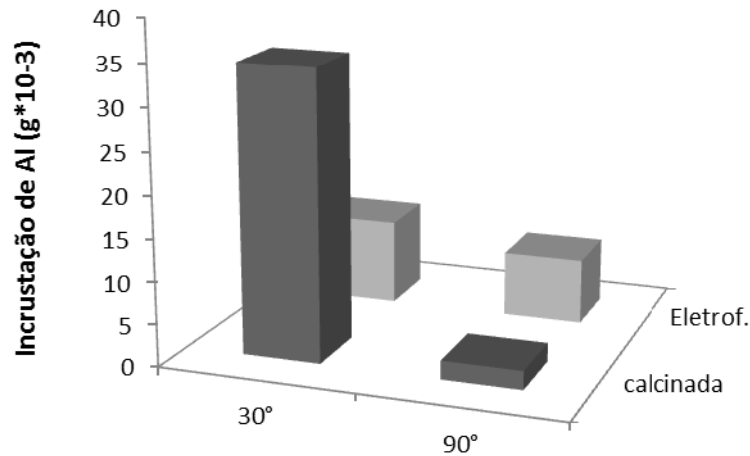


Figura 5-13: Estimativa da incrustação de alumina na superfície dos revestimentos FeCr, após ensaio de resistência à erosão utilizando alumina calcinada e alumina eletrofundida, à temperatura de 400°C e a ângulos de impacto de 30° e 90°.

5.3.4. Taxa de erosão

A Figura 5-16 apresenta a taxa de erosão, segundo a Equação 4-5, obtida nos ensaios de resistência à erosão à temperatura de 400°C, utilizando-se como erodente a alumina calcinada e a alumina eletrofundida, em função do ângulo de impacto. Pode-se constatar que a taxa de desgaste para uma mesma alumina como erodente variou pouco. No entanto, o uso de alumina eletrofundida como erodente provocou uma taxa de erosão significativamente maior que a obtida com alumina calcinada (duas vezes maior).

A Figura 5-17 mostra os resultados obtidos pela Equação 4-7, onde é feita a correção da quantidade de alumínio presente no revestimento FeCr, a partir do mapeamento do alumínio por imagem por EDS acoplada ao MEV. Pode-se verificar que a maior taxa de desgaste foi obtida para um ângulo de impacto de 30°, o que está coerente com o esperado para materiais metálicos que sofrem maior desgaste erosivo a ângulos menores que 90°.

Outro resultado a ser avaliado é verificado no ensaio de erosão com ângulo de impacto de 30° utilizando com alumina calcinada, onde ocorreu uma maior

quantidade de alumínio incrustado na região atacada, possivelmente agindo como proteção ao revestimento, e mesmo assim apresentando elevada taxa de desgaste.

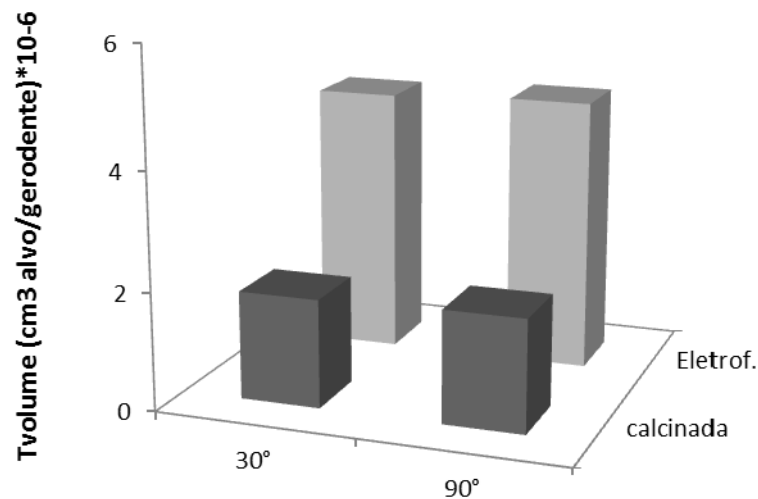


Figura 5-0-16: Taxa de erosão do revestimento FeCr à temperatura de 400°C, em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, calculada utilizando a Equação 4-5.

Outra questão a ser considerada no fato das duas aluminas apresentarem os menores valores em 30° são os choques e colisões dentro do tubo acelerador de partículas que aumentam com a expansão do ar em temperaturas altas, fazendo com que muitas partículas não colidam contra o revestimento, e também ao fato de terem menor energia pela decomposição dos vetores de velocidades.

Os ensaios de erosão realizados a 400°C com ângulo de impacto de 90° apresentou menor taxa de erosão e também menor incrustação. Ires e Ruff sugerem que pequenas partículas se fixam sobre a superfície e partículas maiores se quebram ao colidirem com essas partículas já fixadas na superfície, dessa forma as primeiras partículas entrariam em pontos mais profundos do revestimento [70]. Com o transcorrer do processo se formariam regiões mais dura do que o material original, por consequência do erodente fixado na superfície. E essa formação de uma região mais dura provoca uma mudança no mecanismo de erosão, passando agora o

material a ter mecanismo semelhante ao de material frágil [20]. A mudança de mecanismo gerada pela temperatura já foi abordada por outros pesquisadores. Levy e Wang salientam a possível modificação do balanço energético, devido à modificação das propriedades do material alvo [71]. Já Kulu e Veinthal observaram que em temperaturas elevadas o mecanismo de desgaste erosivo é semelhante para ângulos de impacto de 30° e 90° [72].

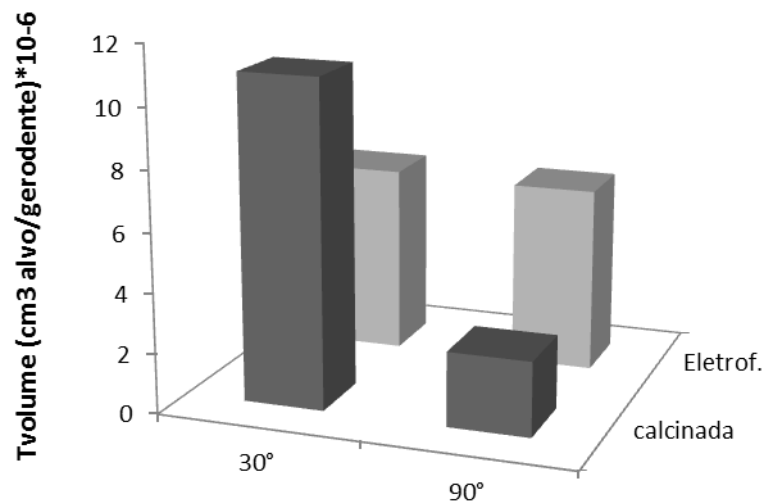


Figura 5-0-17: Taxa de erosão à temperatura de 400°C do revestimento FeCr em função da alumina utilizada e do ângulo de impacto, corrigida pela incrustação do alumínio, estimada segundo a Equação 4-7.

Contudo, é bastante provável que algumas partículas ao colidirem contra o revestimento se quebrem, sendo que uma parte dessas partículas acaba contribuindo para a redução do tamanho médio de partícula e outra parte remove o material da superfície ocasionando o decréscimo da área superficial. Sendo que umas parcelas desses erodentes também ficariam no revestimento proporcionando a incrustação, o que diminuiria a taxa de erosão do revestimento.

Ainda, para os ensaios a temperatura de 400°C, a questão da oxidação promovida pela reação do oxigênio com o metal à base de FeCr, pode ser averiguada pela análise termogravimétrica do revestimento como aspergido. A

Figura 5-18 apresenta o gráfico resultado da análise térmica onde se constata que o revestimento de FeCr só começa a ganhar massa através da oxidação a partir de 450°C. Quanto ao incremento de massa devido à oxidação do substrato - aço inox 310 – também não houve nenhum ganho até a temperatura de ensaio de 400°C. Esses resultados estão de acordo com a literatura, onde a oxidação passa a ser efetiva somente para temperaturas maiores que 800°C [52].

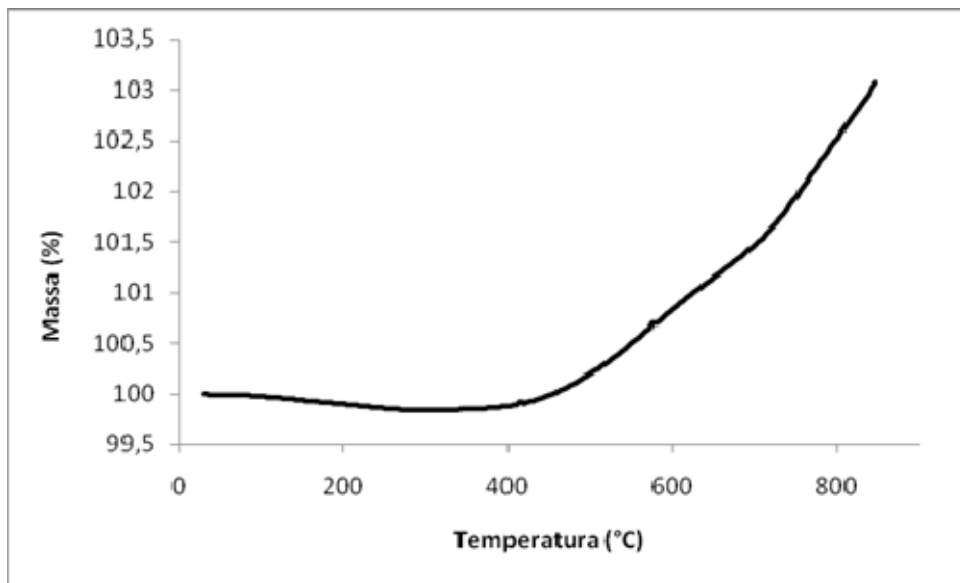


Figura 5-18: Análise termogravimétrica para o revestimento à base de FeCr.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no escopo deste trabalho, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- Foi possível depositar a liga à base de FeCr sobre um substrato de aço inoxidável 310. O revestimento apresentou uma camada com espessura média de 317 μm , com porosidade média de 6,2%. Pela análise térmica do revestimento, constatou-se ganho de massa para somente para temperaturas acima de 450°C.

Alumina como erodente em ensaios de erosão à temperatura ambiente:

- Pode-se ver uma pequena diminuição do tamanho de partícula para os ensaios realizados à temperatura ambiente. A alumina eletrofundida não mostrou grande alteração, evidenciando que a energia envolvida no impacto foi convertida para remoção do material e para sua incrustação no revestimento. Já a alumina calcinada apresentou uma maior redução na distribuição granulométrica quando utilizada em 90°, o que foi relacionado com uma parte da sua energia empregada para remoção do material da superfície e outra parte consumida para sua redução de tamanho.
- Constatou-se uma redução na área superficial para todas as amostras, onde a maior variação ocorreu para a alumina calcinada a 90° devido à remoção do material da superfície e ficando aderido ao erodente.
- A análise de alumina incrustada no revestimento para a área específica de varredura do MEV revelou que a alumina calcinada em 30° e eletrofundida em 90° apresentaram valores muito próximos. Para a alumina eletrofundida, este resultado está ligado ao fato de apresentar menor área de contato no choque com a superfície, devido à morfologia angulada, dissipando maior energia. Já o resultado para a alumina calcinada está relacionado à sua morfologia esférica, que dissipa menos energia por área de contato. Deve-se considerar também, a menor energia cinética no choque, devido à decomposição dos vetores de velocidade, pois parte dessa energia é utilizada na sua fragmentação.

- O resultado da taxa de desgaste, sem a correção pela incrustação, mostrou que alumina eletrofundida apresentou uma maior agressividade para o ensaio e também uma maior taxa de erosão para os ensaios empregados a 90°. Utilizando-se a correção pela incrustação, notou-se uma mudança no resultado quanto ao ângulo de maior desgaste, passando a maior taxa de erosão para o ângulo de 30° para os dois erodentes.

Alumina como erodente em ensaios de erosão à temperatura de 400°C:

- O tamanho médio de partícula dos erodentes diminuiu após erosão para ambas as aluminas nos ensaios à temperatura de 400°C. Possivelmente, isso ocorreu pela maior incrustação de alumina na superfície do revestimento (afetado pelo aumento da temperatura) fazendo com que a alumina projetada contra a superfície encontra-se uma superfície já incrustada, endurecida. Como resultado, uma maior fragmentação da alumina incidente. A maior variação ocorreu para a calcinada devido ao fato de ser constituída de partículas aglomeradas, caracterizadas por ter baixa resistência mecânica.
- A área superficial teve seus valores pouco modificados, diferentemente do que poderia ser esperado pela redução do tamanho de partícula. Para isso, deve ter contribuído o fato de que pela maior temperatura parte do revestimento ficaria aderida ao erodente, após a erosão, ocasionando assim uma mudança na área superficial, deixando com valor próximo ao inicial.
- A quantidade de alumínio na área de varredura no MEV foi maior para a calcinada nos dois ângulos de ensaio, sendo o resultado devido à energia disponível durante o contato e ao aumento da ductilidade do revestimento a 400°C. E quanto ao fato de que as duas aluminas apresentarem os menores valores em 30° possivelmente é devido aos choques e colisões dentro do tubo acelerador de partículas que aumentam com a expansão do ar em temperaturas altas, fazendo com que muitas partículas não colidam contra o revestimento, e também ao fato de terem menor energia pela decomposição dos vetores de velocidades. Os resultados aplicados para as áreas desgastadas mostraram maiores valores para as amostras de 30°.
- A taxa de erosão, sem a correção, não mostrou diferença em função do

ângulo de impacto, apenas pela diferença de morfologia, e isso se deve ao fato que em 90° os erodentes possuem energia suficiente para penetrar no metal e em 30° os erodentes não se tornam tão agressivos devido às colisões sofridas dentro do tubo acelerador devido à expansão do ar. Com a correção, utilizando a massa de alumina incrustada, foi observada uma maior taxa de desgaste para as amostras em 30°. E a taxa de erosão está ligada a quantidade de alumina incrustada, visto que se formam regiões mais duras no local e que modificam o mecanismo de erosão.

7. SUGESTÃO TRABALHOS FUTUROS

Após a realização desse trabalho, é possível fazer as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

- i. Aprofundar o estudo dos mecanismos de erosão atuantes pela existência de incrustação de erodente no revestimento;
- ii. Avaliar a incrustação de erodente utilizando diferentes velocidades;
- iii. Avaliar a influência do diferentes tamanhos de partículas para a incrustação do erodente no revestimento;
- iv. Avaliar a incrustação de erodentes com diferentes morfologias para revestimentos cerâmicos e cermets;
- v. Avaliar a incrustação para diferentes técnicas de deposição metálica para que se possa relacionar com o grau de porosidade do revestimento.

BIBLIOGRAFIA

1. DIN, N., *Análise Sistemática dos Processos de Desgaste. Classificação dos Fenômenos de Desgaste. Metalurgia & Materiais*. 1997. p. 619 - 622.
2. ASTM, G 40-92, *Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*, in *Annual Book of ASTM Standards*. 1992. p. 160.
3. Pawlowski, L., *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. 2008: Wiley.
4. Chief, B.F.a.M., Jose G., *Thermal Spraying Materials Survey*, in *California Environmental Protection Agency*. 2003.
5. Tipton, A., *The Effect of HVOF Thermal Spray on the Elevated Temperature High Cycle Fatigue Behavior of a Martensitic Stainless Steel*. TP101, 2002.
6. Herman, H.Y.S., S, *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application : Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 10-12 May, 2004, Osaka, Japan*. 2004: A S M International.
7. Berndt, M.L.a.B., Christopher C., *Thermal Spray Coatings*. 2003.
8. ASM, N., *Introduction to Thermal Spray Processing*, in *Handbook of Thermal Spray Technology*. 2004.
9. Lima, C.C.T., R., *Aspersão térmica – fundamentos e aplicações*. 1ed ed. 2001, São Paulo: Artliber Editora.
10. ASM, N.I., *ASM Handbook - Friction, Lubrication and Wear Technology*, in 18. 1992.
11. Davis, J.R. and A.S.M.I.T.S.S.T. Committee, *Handbook of Thermal Spray Technology*. 2004: ASM International.
12. Castolin, E., *Catálogo Geral de Aspersão Térmica - Metalização*, E. Castolin, Editor. 2013: São Paulo. p. 11.
13. TWI-Global. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-types-of-arc-spraying-equipment-are-available/>. 2014 [cited 2014 April].
14. C. Kajdas, S.S.K.H., *Encyclopedia of Tribology*. Tribology and Interface Engineering. 1990: Elsevier.
15. Bayer, R.G., *Mechanical wear prediction and prevention*. 1994: M. Dekker.

16. Budinski, K.G., *Surface engineering for wear resistance*. 1988: Prentice Hall.
17. Zum-Gahr, K.-H., *Microstructure and Wear of Materials*. Tribology Series. 1987: Elsevier. 1-6.
18. Hutchings, I.M., *Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals*. 1979: Proc. Conf. on Corrosion-Erosion of Coal Conversion System Materials.
19. Sundararajan, G. and P.G. Shewmon, *A new model for the erosion of metals at normal incidence*. *Wear*, 1983. **84**(2): p. 237-258.
20. Finnie, I., *Some reflections on the past and future of erosion*. *Wear*, 1995. **186–187, Part 1**(0): p. 1-10.
21. Stack, M.M., F.H. Stott, and G.C. Wood, *Review of mechanisms of erosion-corrosion of alloys at elevated temperatures*. *Wear*, 1993. **162–164, Part B**(0): p. 706-712.
22. Suckling, M. and C. Allen, *Critical variables in high temperature erosive wear*. *Wear*, 1997. **203–204**(0): p. 528-536.
23. Roy, M., Y. Tirupataiah, and G. Sundararajan, *Effect of particle shape on the erosion of Cu and its alloys*. *Materials Science and Engineering: A*, 1993. **165**(1): p. 51-63.
24. Brown, R.S.K., E.J. Jun, *The effect of particle shape and size on erosion of aluminum alloy 1100 at 90° impact angles*, in *Wear*. 1983.
25. Levy, A.V. and P. Chik, *The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel*. *Wear*, 1983. **89**(2): p. 151-162.
26. Liebhard, M. and A. Levy, *The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals*. *Wear*, 1991. **151**(2): p. 381-390.
27. Kleis, I., *Probleme der Bestimmung des Strahlverschleisses bei metallen*. *Wear*, 1969. **13**(3): p. 199-215.
28. Reddy, A.V. and G. Sundararajan, *The influence of grain size on the erosion rate of metals*. *Metallurgical Transactions A*, 1987. **18**(13): p. 1043-1052.
29. Levy, A.V., *Solid Particle Erosion and Erosion-corrosion of Materials*. 1995: ASM International.
30. Goodwin, J.E.S., W.; Tilly, G.P., *Process Instrumental of Mechanical Engineering*. 1970.
31. Zhou, J.R. and S. Bahadur, *Effect of blending of silicon carbide particles in varying sizes on the erosion of Ti-6Al-4V*. *Wear*, 1989. **132**(2): p. 235-246.

32. Yerramareddy, S. and S. Bahadur, *Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V*. Wear, 1991. **142**(2): p. 253-263.
33. Bahadur, S. and R. Badruddin, *Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion*. Wear, 1990. **138**(1–2): p. 189-208.
34. Hutchings, I.M. and T.J. O'Brien, *Normal impact of metal projectiles against a rigid target at low velocities*. International Journal of Mechanical Sciences, 1981. **23**(5): p. 255-261.
35. Hutchings, I.M., *A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence*. Wear, 1981. **70**(3): p. 269-281.
36. Hutchings, I.M. and A.V. Levy, *Thermal effects in the erosion of ductile metals*. Wear, 1989. **131**(1): p. 105-121.
37. Hutchings, R.E.W.J.E.F.I.M., *Proc. Roy. Soc.* . 1976: London p. 348.
38. Finnie, I., *Erosion of surfaces by solid particles*. Wear, 1960. **3**(2): p. 87-103.
39. Cousens, I.M.H.A.K., *Proc. 6th. Int. Conf. on Erosion By Liquid and Solid Impacts*. 1983.
40. Brown, A.J.B., J., Lawson., J.M., Winbow, H.D., Witek, S, *Raw materials. Ceramics and Glasses*, ed. E.m. Handbook. 1991.
41. Gallagher, P.K., *Chemical Synthesis Engineered materials Handbook - Ceramics and Glasses*, ed. D.o.C.a.M.S.a. Engineering. Vol. 4. 1991, Ohio: The Ohio State University. 52 - 64.
42. Callister, W.D. and D.G. Rethwisch, *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 2012: Wiley.
43. Davidge, R.W., *Mechanical Behavior of ceramics*. 1979: Cambridge University Press.
44. Miyayama, M., KOUMOTO, K., YANAGIDA, H., , *Engineering properties of single oxides*. Ceramics and Glasses, ed. E.m. Handbook. Vol. 4. 1991. 748 - 757.
45. Metallographic. <http://www.metallographic.com/Brochures/alumina2.pdf>. 2014.
46. Treibacher. <http://www.treibacher.com.br/treibacher-schleifmittel-brasil-portugues-processos-micronizacao.php>. 2014 [cited 2014 April].

47. Castolin, E. http://www.eutectic.com.br/folhetos_tecnicos_aspersao.html. 2012.
48. Alcoa, https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/alumina_calcinada/A-1.pdf. 2014.
49. ImageJ, <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>. 2014.
50. Deshpande, S., et al., *Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering*. Surface and Coatings Technology, 2004. **187**(1): p. 6-16.
51. Marques, C.M., *Relação entre microestrutura e desgaste erosivo a frio e a quente em materiais cerâmicos à base de alumina*, in *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais*. 2006, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
52. Vicenzi, J., *Relação entre microestrutura e erosão (a frio e a quente) de revestimentos do sistema NiCr-Cr3C2 obtidos por aspersão térmica*, in *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais*. 2007, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
53. Hovis, S.K., et al., *A new method of velocity calibration for erosion testing*. Wear, 1985. **101**(1): p. 69-76.
54. Humphrey, J.A.C., *Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1990. **11**(3): p. 170-195.
55. Vicenzi, J., C.M. Marques, and C.P. Bergmann, *Development of an apparatus to determine high-temperature erosive wear up to 800 °C*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2011. **225**(1): p. 13-22.
56. Manish, R., *Elevated temperature erosive wear of metallic materials*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006. **39**(6): p. R101.
57. Harsha, A.P. and D.K. Bhaskar, *Solid particle erosion behaviour of ferrous and non-ferrous materials and correlation of erosion data with erosion models*. Materials & Design, 2008. **29**(9): p. 1745-1754.
58. Chen, Q. and D.Y. Li, *Computer simulation of solid particle erosion*. Wear, 2003. **254**(3-4): p. 203-210.
59. Cooke, K., et al., *Optimisation of the electric wire arc-spraying process for improved wear resistance of sugar mill roller shells*. Surface and Coatings Technology, 2007. **202**(1): p. 185-188.

60. Islam, M.A. and Z.N. Farhat, *Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate*. *Wear*, 2014. **311**(1–2): p. 180-190.
61. Zu, J.B., G.T. Burstein, and I.M. Hutchings, *A comparative study of the slurry erosion and free-fall particle erosion of aluminium*. *Wear*, 1991. **149**(1–2): p. 73-84.
62. Kim, J.J., *Erosion of a reaction bonded silicon nitride*. *Journal of Materials Science*, 2004. **39**(11): p. 3849-3851.
63. Zhou, J. and S. Bahadur, *Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment*. *Wear*, 1995. **186–187**, Part 1(0): p. 332-339.
64. Desale, G.R., B.K. Gandhi, and S.C. Jain, *Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials*. *Wear*, 2006. **261**(7–8): p. 914-921.
65. Vite-Torres, M., et al., *Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles*. *Wear*, 2013. **301**(1–2): p. 383-389.
66. Yıldızlı, K., M.B. Karamış, and F. Nair, *Erosion mechanisms of nodular and gray cast irons at different impact angles*. *Wear*, 2006. **261**(5–6): p. 622-633.
67. O'Flynn, D.J., et al., *A model to predict the solid particle erosion rate of metals and its assessment using heat-treated steels*. *Wear*, 2001. **248**(1–2): p. 162-177.
68. Papini, M. and J.K. Spelt, *The plowing erosion of organic coatings by spherical particles*. *Wear*, 1998. **222**(1): p. 38-48.
69. Bousser, E., L. Martinu, and J.E. Klemberg-Sapieha, *Solid particle erosion mechanisms of hard protective coatings*. *Surface and Coatings Technology*, 2013. **235**(0): p. 383-393.
70. Ives, L.K., *ASTM Spec. Tech.* , in *ASTM*. 1979.
71. Levy, A.V. and W. Buqian, *Erosion of hard material coating systems*. *Wear*, 1988. **121**(3): p. 325-346.
72. Kulu, P. and R. Veinthal. *Wear resistance of high velocity thermal sprayed coatings*. in *NORDTRIB 2000: 9 th Nordic Symposium on Tribology*. 2000.