



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**QUANTIFICAÇÃO E INFLUÊNCIA DA INCRUSTAÇÃO
DO ERODENTE À BASE DE ALUMINA EM ENSAIOS DE
DESGASTE EROSIVO DE UM REVESTIMENTO FeCr
ASPERGIDO POR ARCO ELÉTRICO**

Autor: Matheus Antonio Heck Sumny

Matrícula: 00151766

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre, julho de 14

Índice

Índice	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
1 Introdução	1
2 Objetivos	3
2.1 Objetivos específicos	3
3 Revisão Bibliográfica	4
3.1 Aspersão térmica	4
3.2 Desgaste	7
3.2.1.1 Fatores que afetam a erosão	8
3.2.1.2 Incrustação de partículas erodentes	9
3.3 Erodente	10
3.3.1 Tamanho das partículas erodentes	10
3.3.2 Morfologia	11
3.3.3 Dureza e friabilidade das partículas	11
3.4 Erosão em materiais metálicos	12
3.5 Espectroscopia por dispersão de raios x	17
4 Procedimento Experimental	18
4.1 Materiais	18
4.1.1 Arame para obtenção do revestimento	18
4.1.2 Erodente	19
4.1.2.1 Distribuição Granulométrica	19
4.1.2.2 Análise morfológica	20
4.2 Métodos	20
4.2.1 Fabricação dos corpos-de-prova	20
4.2.2 Caracterização do revestimento	22
4.2.2.1 Medida da espessura do revestimento	22
4.2.2.2 Porosidade	22
4.2.2.3 Massa específica aparente	22
4.2.2.4 Análise microestrutural	22
4.2.3 Equipamento para desgaste erosivo	22
4.2.4 Calibração do equipamento para desgaste erosivo	24
4.2.4.1 Velocidade das partículas erodentes	24
4.2.4.2 Ângulo de ensaio	25
4.2.4.3 Tempo de ensaio	25
4.2.5 Ensaio de desgaste erosivo	26
4.2.5.1 Determinação da Taxa de Erosão	26
4.2.6 Incrustação de partículas erodentes	26
4.2.6.1 Determinação da área erodida	27
4.2.6.2 Determinação da incrustação de partículas erodentes	27
4.2.6.3 Correção da taxa de erosão	28

5	Resultados e Discussões	29
5.1	Revestimento	29
5.2	Taxa de Erosão	30
5.3	Quantidade relativa de alumina incrustada	32
5.3.1	Efeitos gerados pela incrustação	33
5.4	Tamanho médio de partícula	36
6	Considerações Finais	38
7	Conclusão	40
8	Sugestões para trabalhos futuros	41
9	Referências Bibliográficas	42

Agradecimentos

A minha família, por TUDO, especialmente o sacrifício para eu, enfim, escrever este trabalho.

Aos meus amigos. Os de sempre e os que eu fiz durante a faculdade para sempre, que contribuíram para formar quem sou.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann pela confiança, pelos ensinamentos, pela oportunidade de começar minha carreira e por disponibilizar uma estrutura física e técnica, no laboratório que coordena (LACER).

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Materiais, excelentes sem exceção e muito acessíveis, por me propiciar levar seus ensinamentos por toda vida.

Aos meus chefes Caio e Andrei, que ensinaram-me todo o possível sobre erosão e foram minhas referências nessa área. E especialmente ao último deles, Matheus Araújo da Cunha, que me deu todo suporte necessário para a realização deste trabalho.

A todos os colegas de Iniciação Científica, nessa minha longa jornada no LACER, e outros bolsistas de pós-graduação que foram de grande importância no meu crescimento intelectual. Ao Antonio Takimi, pela força de sempre.

Ao meu amor. À vida.

É para você, mãe!

Resumo

Este trabalho desenvolveu um método de quantificação relativa da incrustação de partículas erodentes e investigou a influência desta na taxa de erosão em um revestimento metálico à base de FeCr, aspergido por arco elétrico, em ensaios de desgaste erosivo, tanto à alta (50 m.s^{-1}) quanto à baixa velocidade (25 m.s^{-1}) e com ângulo de incidência entre o erodente e a superfície de 30° e 90° . Como erodente, utilizou-se alumina eletrofundida com faces anguladas e irregulares. O revestimento dos corpos-de-prova foi caracterizado quanto à morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV), porosidade, massa específica, 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) e distribuição granulométrica.

Os resultados mostraram que os ensaios realizados com ângulo de incidência de 30° e baixa velocidade foram os que apresentaram a maior taxa de erosão, ao passo que os ensaios a 90° e 25 m.s^{-1} foram os que obtiveram maior incrustação relativa. Foi investigado então o que esta influenciaria nos mecanismos de erosão nas diferentes condições de ensaio. Já a distribuição granulométrica dos erodentes após ensaio de erosão apresentou uma diminuição em relação aos valores de antes do ensaio, com um maior decréscimo para alta velocidade e alto ângulo.

Palavras-chaves: Erosão, alumina eletrofundida, incrustação, mecanismos, revestimento FeCr, arco elétrico.

Lista de Figuras

Figura 3.1: Processos que ocorrem na aspersão térmica: matéria-prima pó ou arame (1) é aquecido (2) e acelerado (3) sobre um substrato preparado (4) se sobrepõe até formar o revestimento protetor (5).	4
Figura 3.2: Esquema da classificação dos processos de aspersão térmica quanto à energia e tipo de consumível. Diagrama adaptado de <i>ASM Handbook Thermal Spray Processing</i> . ^[3]	5
Figura 3.3: Formação da micruestrutura de uma liga metálica através de aspersão térmica: partículas fundidas de revestimento se aproximando, lamelas sobrepostas, inclusões de óxidos e partículas não fundidas. ^[4]	5
Figura 3.4: Detalhe da região de arco elétrico dos arames utilizados como eletrodos. Em amarelo o material fundido e, em azul, as partículas não fundidas sendo projetados. ^[5]	6
Figura 3.5: Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico. ^[6]	6
Figura 3.6: Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões segundo Burdinski. ^[11]	7
Figura 3.7: Desenho esquemático do ângulo de impacto das partículas erodentes, formado entre a trajetória das partículas e a superfície do material alvo.	8
Figura 3.8: Gráficos da taxa de desgaste em função do ângulo de incidência das partículas erodentes em materiais frágeis e dúcteis. ^[21]	9
Figura 3.9: Gráfico da variação da erosão conforme diferentes velocidades de ataque e segundo a distribuição do diâmetro médio de partículas ^[33]	10
Figura 3.10: Variação da taxa de erosão, em vários ângulos, utilizando erodentes com morfologias diferentes. Erodentes angulares representados pelo triângulo e erodentes esféricos pelo círculo. ^[40]	11
Figura 3.11: Formas de remoção de material metálico dúctil erodido conforme o ângulo de incidência de erodente ^[46]	13
Figura 3.12: Balanço da energia no impacto de partículas de erodentes esféricas no ângulo de impacto de 30° ^[42]	14
Figura 3.13: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente angulares no ângulo de impacto de 30° ^[42]	15
Figura 3.14: Desenho esquemático da incrustação de partículas e o ricocheteio do abrasivo num ataque subsequente removendo material e deixando fragmento na superfície. ^[26]	16
Figura 3.15: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente esféricos no ângulo de impacto de 90° ^[42]	16
Figura 4.1: Fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.....	18
Figura 4.2: Distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida de tamanho médio de partícula de 302,77 µm.....	20
Figura 4.3: Morfologia da alumina eletrofundida marrom utilizada como erodente. Aumento de 200x.	20

Figura 4.4: Esquema da instalação do equipamento para aspersão térmica via arco elétrico ^[4]	21
Figura 4.5: Desenho do substrato usado para obtenção dos corpos-de-prova.	21
Figura 4.6: Diagrama esquemático do equipamento utilizado para desgaste erosivo por partículas sólidas.	23
Figura 4.7: Diagrama esquemático do <i>Venturi</i> , dispositivo responsável por sugar e misturar as partículas com o ar, mandando-as para o sistema acelerador de partículas. .	24
Figura 4.8: Esquema representativo do método <i>Double-Disk</i> , onde V_p : Velocidade das partículas; d : Distância entre os discos; β : Distância angular da fenda à zona de impacto; S : Deslocamento da incidência em relação aos discos; e V : Velocidade angular.	25
Figura 5.1: Imagem por microscópio óptico do perfil do revestimento, em 200x.	29
Figura 5.2: Imagem por microscópio óptico, com tratamento de imagem para contrastar claros e escuros para realização da quantificação dos poros. Ampliação de 200x.....	29
Figura 5.3: Imagem por MEV da vista superior do revestimento, aumento de 400x.....	30
Figura 5.4: Taxa de erosão em função do ângulo de ataque e velocidade.....	30
Figura 5.5: Superfície das amostras erodidas nas diferentes velocidades e em 90°. Nos círculos amarelos as “ilhas” de erodente e as setas indicando os vestígios dos mecanismos presentes. Aumento de 800x e 1200x.....	31
Figura 5.6: Superfície das amostras erodidas nas diferentes velocidades e 30°. Nos círculos amarelos as “ilhas” de erodente e as setas indicando os vestígios dos mecanismos presentes. Aumento de 800x e 1200x.....	32
Figura 5.7: Mapeamento da distribuição do alumínio nas marcas de erosão à (a) 25 m/s e 30°, (b) 25 m/s e 90°, (c) 50 m/s e 30° e (d) 50 m/s e 90°. Aumento de 400x.	32
Figura 5.8: Quantidade relativa de alumina incrustada (Q_a) em 30° e 90° a 25 e 50 m/s..	33
Figura 5.9: Micrografias das amostras erodidas a 90°. À esquerda, aumento de 800x, em 25 m.s ⁻¹ , à direita, em 400x, com 50 m.s ⁻¹ . Apontados pelas setas exemplos de deformação plástica e, circulados, presença de ilhas de fragmentos e incrustação (acompanhadas de microtrincas).	34
Figura 5.10: Micrografias das amostras erodidas a 30°. À esquerda, em 800x, em baixa velocidade, incrustação e trincas (círculos) e sulcamento (<i>ploughing</i> – setas). À direita, em 400x, incrustação e trincas adjacentes (círculos), <i>ploughing</i> e microcorte (setas).	35
Figura 5.11: Tamanho médio do erodente (μm) antes e após o ensaio de erosão conforme velocidade e ângulo de ataque.....	36

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Características típicas do processo de aspersão térmica a arco elétrico. ^[3]	7
Tabela 3.2: Variação do tipo de dano como o número de Best ^[42]	12
Tabela 4.1: Composição química do revestimento estudado, o arame EuTronic Arc 593 T [®] antes da aspersão. ^[5]	19
Tabela 4.2: Composição química da alumina eletrofundida marrom ^[49]	19
Tabela 4.1: Análise granulométrica por difração à laser da alumina erodente.....	19
Tabela 4.4: Parâmetros usados no equipamento para deposição do revestimento.....	21
Tabela 4.5: Parâmetros do ensaio de erosão à temperatura ambiente.....	26

1 Introdução

Os materiais utilizados em Engenharia estão cada vez mais sendo exigidos em termos de desempenho, durabilidade e confiabilidade. Em decorrência disso muitas ligas metálicas e não metálicas, e até mesmo composições destas, 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, como a de petróleo, gás e mineração, 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 submetidas em serviço é o desgaste, que pode ocorrer sob diferentes formas e mecanismos. Os mecanismos de desgaste conhecidos são geralmente classificados em: adesão, abrasão, erosão e corrosão-desgaste (triboquímica). A erosão é usualmente definida 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. Como resultado, o material tende a ser danificado, e dependendo de suas características estruturais e propriedades a estas associadas, pode comprometer seu uso.

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.

Nos ensaios erosivos por partículas sólidas as taxas em que um material é erodido dependem de inúmeros fatores, como diferentes propriedades, velocidades e ângulos de impacto da partícula erosiva, assim como o material do alvo. 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, pelo acréscimo mássico posterior ao ensaio, e afetando os mecanismos presentes, conforme as condições de ataque do abrasivo ao revestimento.

Considerando essas diferenças entre as variáveis, pode-se esperar que o desempenho do revestimento frente ao desgaste em ensaios de erosão leve a resultados diferentes de incrustação e, conseqüentemente, de taxas de erosão. 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, da quantificação da incrustação e dos efeitos causados por esta presença 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 alta e baixa velocidade, e em diferentes ângulos de impacto, pode ser assim justificado. É neste contexto que se insere este trabalho.

2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi quantificar e investigar a influência da incrustação de partículas erodentes de alumina eletrofundida num revestimento metálico, à base de FeCr, em desgastes erosivos em diferentes ângulos de incidência (30° e 90°) e diferentes velocidades (25 e 50 m.s⁻¹), ao se elaborar um método para quantificação relativa desta incrustação de erodente.

2.1 Objetivos específicos

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

- Caracterização dos corpos-de-prova quanto à sua microestrutura, porosidade, espessura do revestimento e massa específica aparente;
- Realização dos ensaios erosivos com as variáveis de ângulo de impacto (30° e 90°) e velocidade (25 e 50 m.s⁻¹);
- Determinação da taxa de desgaste do revestimento ensaiado e da área da marca de erosão nas variáveis propostas pelo trabalho;
- Quantificação da presença de alumina incrustada no revestimento após os ensaios;
- Relacionar a quantidade relativa de erodente presente nos ensaios com os efeitos prováveis nos ensaios de erosão nas diferentes condições analisadas;
- Relacionar o tamanho médio da partícula erodente (antes e após os ensaios) com a incrustação desta e com os mecanismos atuantes nos ensaios erosivos.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Aspersão térmica

A deposição de revestimento por aspersão térmica é composta de um grupo de processos onde este material (em forma de arame, barra ou pó) é aquecido e projetado, tal como partículas individuais de gotas, sobre uma superfície propiciamente preparada.

O equipamento para aspersão térmica fornece calor ao material, através de uma fonte elétrica de calor ou uma fonte química de calor (combustão) utilizando gases combustíveis. Ao atingir um estado de alta plasticidade é então acelerado de encontro ao substrato, usando para tanto gás comprimido. Ao se chocarem com a superfície, as partículas achatam-se e formam placas lamelares delgadas, primeiro aderindo às irregularidades da superfície previamente preparada e sobrepondo-se, posteriormente. O princípio de funcionamento da aspersão térmica pode ser observado na Figura 3.1.

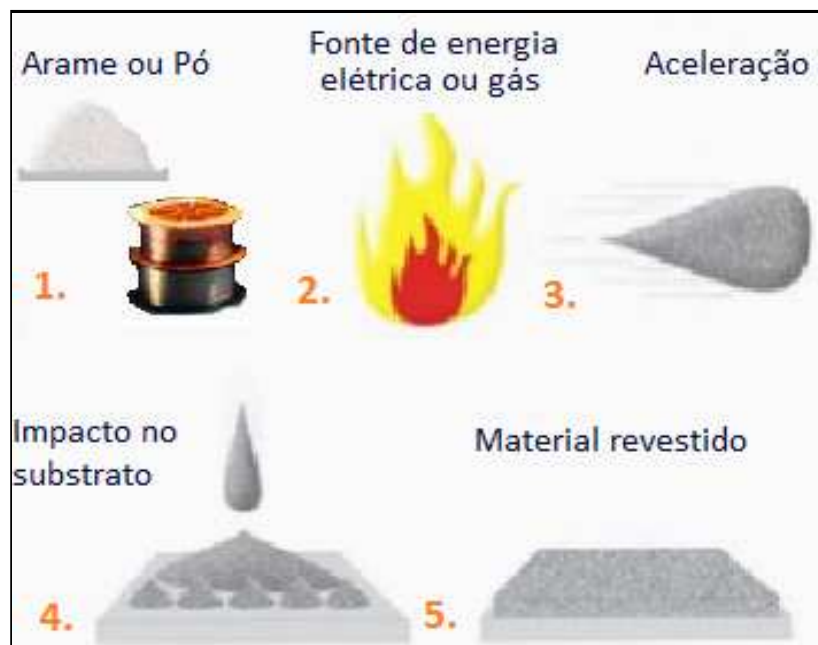


Figura 3.1: Processos que ocorrem na aspersão térmica: matéria-prima pó ou arame (1) é aquecido (2) e acelerado (3) sobre um substrato preparado (4) se sobrepõe até formar o revestimento protetor (5).

Materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos, bem como suas combinações, são utilizados como matéria-prima para aspersão sobre inúmeros substratos. Esses materiais são aplicados em condições atmosféricas normais ou especiais, dependendo da técnica de deposição e tipo de solicitação requerida pelo revestimento. A adesão entre a camada protetora e o revestimento pode ser química-metalúrgica, mecânica ou uma combinação destas.^[1]

As propriedades de interesse tecnológico do revestimento aspergido dependem, a priori, do material aspergido, do processo de aspersão térmica, dos parâmetros aplicados e do pós-tratamento. Eles podem ser aplicados, dependendo da solicitação que a

aplicação exige, para proporcionar resistência à corrosão e ao desgaste, condutividade ou isolamento elétrico e térmico, como também para restauração de componentes.^[2]

São inúmeros os processos utilizados de aspersão térmica para deposição de revestimentos, como por exemplo a aspersão à chama convencional (*Flame Spray*), aspersão à chama hipersônica (*High Velocity Oxygen Fuel*), aspersão a arco elétrico (*Arc Spraying*), aspersão à plasma (*Atmosferic Plasma Spraying*) e aspersão a frio (*Cold Gas Spraying*). Esses processos e suas 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 material a ser revestido, mas são comumente divididos em dois grupos básicos, como descrito esquematicamente na Figura 3.2.^[3]

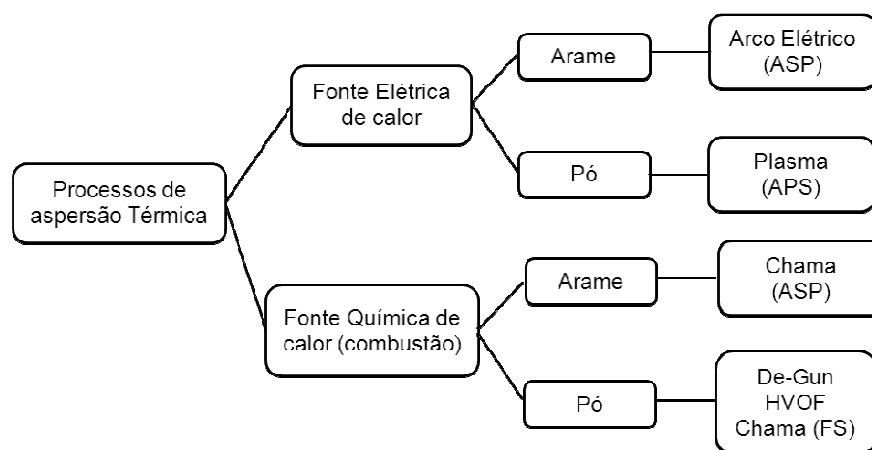


Figura 3.2: Esquema da classificação dos processos de aspersão térmica quanto à energia e tipo de consumível. Diagrama adaptado de *ASM Handbook Thermal Spray Processing*.^[3]

3.1.1 Microestrutura de revestimentos aspergidos

Ao se colidirem contra o substrato, as partículas fundidas do revestimento aplainam-se e aderem às irregularidades da superfície (naturais ou provenientes de preparação, como o jateamento) e formam uma estrutura lamelar, porosa e com inclusões de óxidos (no caso de revestimento metálicos) e de partículas não fundidas do revestimento^[4]. A Figura 3.3 apresenta a microestrutura típica de revestimentos obtidos por aspersão térmica.

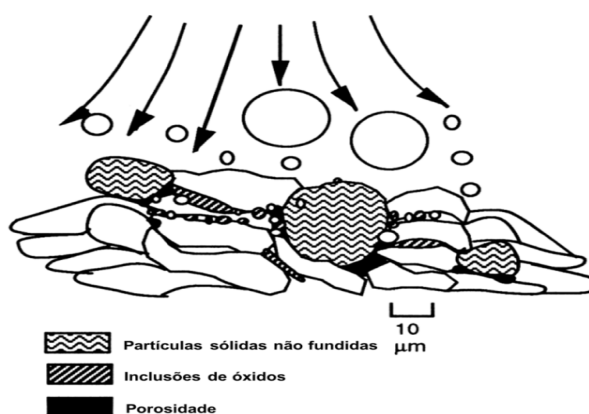


Figura 3.3: Formação da microestrutura de uma liga metálica através de aspersão térmica: partículas fundidas de revestimento se aproximando, lamelas sobrepostas, inclusões de óxidos e partículas não fundidas.^[4]

O material utilizado e as condições dos diferentes processos como, por exemplo, temperatura do arco elétrico ou da chama, velocidade das partículas, gás de transporte e distância entre a pistola e o alvo da aspersão, são os principais fatores que determinam a quantidade de poros nos revestimentos.^[3]

3.1.2 Aspersão térmica por arco elétrico

Também conhecido por ASP (Arc Spray Process), a aspersão térmica a arco elétrico utiliza o calor gerado por uma diferença de potencial entre dois arames do material (um ligado ao polo positivo e outro ao negativo), que funcionam como eletrodos consumíveis, induzindo o arco elétrico que funde o revestimento no bocal da pistola de aspersão. A Figura 3.4 mostra os detalhes do contato elétrico fundindo o material aspergido.

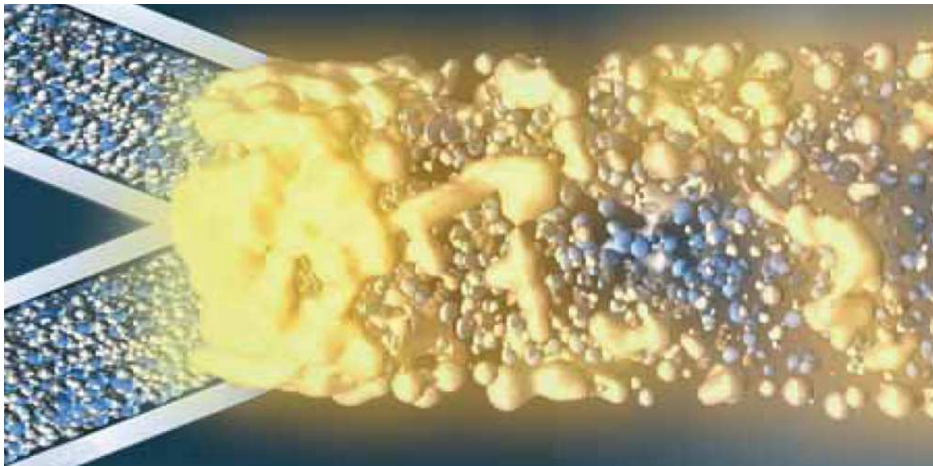


Figura 3.4: Detalhe da região de arco elétrico dos arames utilizados como eletrodos. Em amarelo o material fundido e, em azul, as partículas não fundidas sendo projetadas.^[5]

É comparável, em relação ao custo, com sistemas que empregam chama. Porém é mais vantajoso pois evitam os produtos inerentes da combustão além de ser de fácil emprego e por se ter uma ampla disponibilidade de matéria-prima, pois a maioria dos materiais condutores podem ser moldados na forma de arame.

O material é acelerado de encontro ao substrato na forma de spray, por um jato de ar comprimido, conforme ilustrado na Figura 3.5. A alimentação dos arames é feito por um motor elétrico ou turbina de ar comprimido com o controle do avanço regulado em função da corrente induzida pela fonte. As principais características do processo estão descritos na Tabela 3.1.

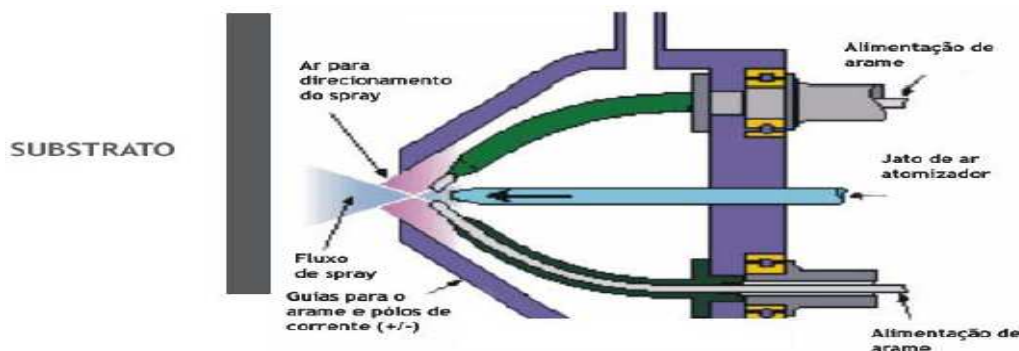


Figura 3.5: Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico.^[6]

Tabela 3.1: Características típicas do processo de aspersão térmica a arco elétrico.^[3]

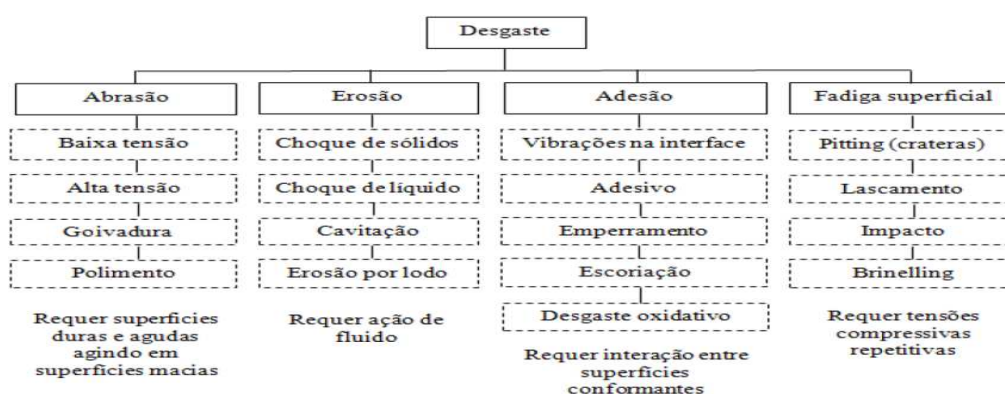
Características	Exemplos
Arames	Sólidos/tubulares e condutores. Diâmetros comuns entre 1,6 e 5 mm.
Potência Elétrica (kW)	5-10
Temperatura do arco (°C)	4000-6000
Velocidade das partículas (m/s)	Até 250
Deposição (g/min)	50-300

3.2 Desgaste

A tribologia é definida como o estudo da interação entre superfícies com movimento relativo entre si e os fenômenos que disso decorrem^[7], dentre eles atrito, desgaste e lubrificação, visando evidenciar os aspectos físicos, mecânicos, metalúrgicos e químicos desses movimentos relativos. O desgaste, que é entendido como o dano a uma superfície sólida causada pela remoção ou alteração do material por ação mecânica de um gás, líquido ou sólido que entram em contato.^[8]

Os chamados mecanismos de desgaste atuam nesta interação e envolvem uma série de fenômenos químicos e físicos. A medida que o dano causado afeta a microestrutura de um material em serviço, o desgaste se torna um fator preocupante na concepção de um projeto.

Na literatura não se tem um consenso quando se trata de classificar os diferentes processos de desgaste^[3, 9]. Segundo a norma DIN 50320^[10], os mecanismos de desgaste são divididos em quatro tipos: adesão, abrasão, erosão e reação triboquímica (corrosão-desgaste), além de citar outros, como cavitação e fadiga de contato, que também são causas de deterioração de material. Na classificação de acordo com Burdinski^[11], muito utilizada, o desgaste é dividido em quatro categorias (abrasão, erosão, adesão e fadiga superficial) que são subdivididos conforme características intrínsecas, como na Figura 3.6.

**Figura 3.6:** Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões segundo Burdinski^[11].

3.2.1 Desgaste erosivo

O desgaste erosivo por partículas sólidas, estudado neste trabalho, pode ser descrito como um processo de desgaste mecânico, que gradualmente remove material por ações de corte e deformação repetidas causadas por sucessivos choques de partículas sólidas. A Indústria de petróleo e gás gasta uma grande quantia de dinheiro todos os anos ao lidar com os problemas causados por este fenômeno em componentes em serviço. Por isso, a erosão tem recebido atenção significativa entre pesquisadores nos últimos anos^[12-15]. Boa parte dos estudos tem sido dirigida no sentido de proporcionar uma compreensão fundamental dos modelos e mecanismos de falha dos materiais erodidos e propondo explicações sobre as taxas de erosão observadas.

A erosão é dependente das propriedades das partículas impactantes (densidade, dureza, tamanho e forma), dos materiais alvo, da taxa de alimentação de partículas, da temperatura e do ângulo de impacto e da velocidade das partículas erosivas. Atualmente está bem estabelecido que as partículas abrasivas angulares provocam maior remoção de material do que partículas esféricas^[16-19].

3.2.1.1 Fatores que afetam a erosão

O ângulo de impacto das partículas erodentes é definido como o ângulo formado entre a superfície do material alvo e a trajetória do fluxo de partículas, da mesma forma que é mostrado na Figura 3.7.

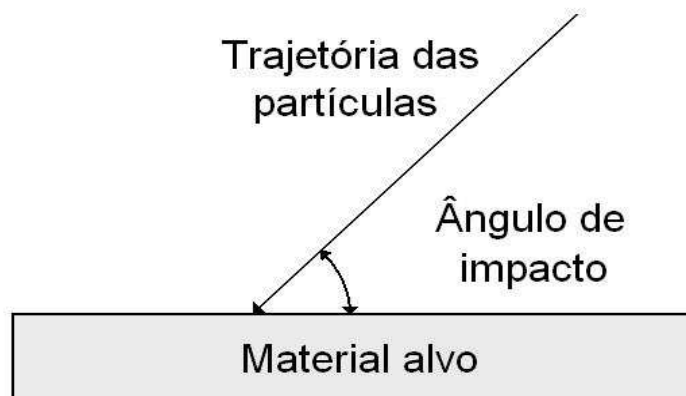


Figura 3.7: Desenho esquemático do ângulo de impacto das partículas erodentes, formado entre a trajetória das partículas e a superfície do material alvo.

O ângulo influencia nas taxas de erosão de acordo com a natureza do material erodido. Em materiais dúcteis, a taxa de erosão aumenta até um valor máximo próximo a 30° e posteriormente decresce continuamente conforme se aproxima de altos ângulos (90°). Ao contrário, para materiais frágeis, a taxa máxima de erosão se dá em ângulos próximos à normal²⁰. Esse contraste pode-se ser verificado na Figura 3.8.

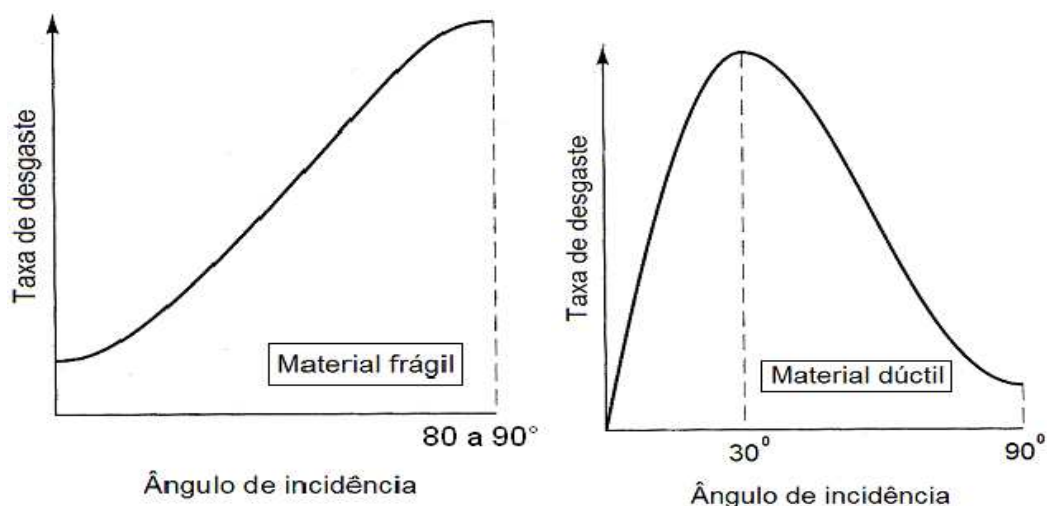


Figura 3.8: Gráficos da taxa de desgaste em função do ângulo de incidência das partículas erodentes em materiais frágeis e dúcteis^[21].

A velocidade de impacto das partículas e a energia cinética associada é fundamental para a remoção de material quando a superfície sofre sucessivas colisões. Lopez^[22] confirmou em seu estudo que a taxa de erosão cresce com o aumento da velocidade de impacto do abrasivo. A taxa de erosão segue uma lei empírica relacionada com a velocidade^[23-25] conforme a Equação 3.1.

$$\Delta E = k \times V^n \quad (3.1)$$

Onde:

V = velocidade das partículas erodentes;

K = uma constante;

n = expoente da velocidade e tem valores entre 2 e 3,5 para materiais metálicos.

O aumento na taxa de erosão com a velocidade é associado com o aumento da energia cinética do erodente, que causa um dano mais efetivo na superfície do metal. A componente vertical da velocidade de impacto é responsável pela penetração na matriz e a horizontal pela forma da marca que a erosão deixa na face do material^[26].

3.2.1.2 Incrustação de partículas erodentes

Durante o processo de erosão, as partículas erodentes, ao se chocarem contra a superfície do revestimento, podem acabar por se incrustar. Alguns investigadores^[27-31] têm observado uma influência considerável da incorporação de fragmentos de partículas erosivas na superfície da amostra, contribuindo para ganhos de massa da superfície erodida.

Ives e Ruff^[29] descreveram modelos quantitativos de remoção de material que deram origem a uma incrustação contínua, no qual as partículas incidentes não interferiam diretamente sobre o metal do substrato. Kosel et al.^[31], numa investigação para erosão de níquel por partículas de alumina, em incidência normal, mostraram que a superfície apresentava aspectos uma camada compósita contínua, constituído por fragmentos de partículas erodentes misturadas com pedaços de metais erodidos, indicando que

fragmentos do abrasivo embutidos são posteriormente refragmentados pelo impacto subsequente de partículas.

Com aumento do ângulo de impacto das partículas abrasivas, uma maior quantidade de partículas erodentes se incorpora na matriz e acabam por agir como uma barreira para uma posterior erosão. Observações em MEV revelam que com um aumento no ângulo de impacto (30° a 90°), a quantidade de partículas de alumina incrustadas é significativamente aumentada. Estas partículas incorporadas, reduzem a taxa de erosão específica, resultando em um menor expoente da velocidade (relativo a Equação 3.1) para altos ângulos de impacto^[26].

A incrustação das partículas erodentes também pode ser responsável pela modificação dos mecanismos de desgastes atuantes. Estas acabam por aumentar o encruamento da superfície atingida pelo fluxo de erodente, provocando a formação de elevações adjacentes a profundos pontos de incrustação, interconexões de trincas e arrancamento de material por fratura menos dúctil a até mesmo frágil, sendo estes mecanismos mais agressivos de desgaste, que acabam por aumentar a taxa de erosão^[26,32].

3.3 Erodente

A influência nas taxas de erosão pelas partículas erodentes vem sendo estudada por diversos pesquisadores^[14-16,18,33]. Alguns fatores como a morfologia, dureza e tamanho alteram a forma do desgaste e por consequência, as taxas de erosão.

3.3.1 Tamanho das partículas erodentes

O tamanho do erodente é uma importante variável no estudo da erosão. Como pode-se observar na Figura 3.9, a taxa de erosão cresce em função do aumento do tamanho das partículas erodentes, com partículas entre 50 e 100 μm . A partir daí, a taxa de erosão é pouco influenciada pelo tamanho do erodente^[33].

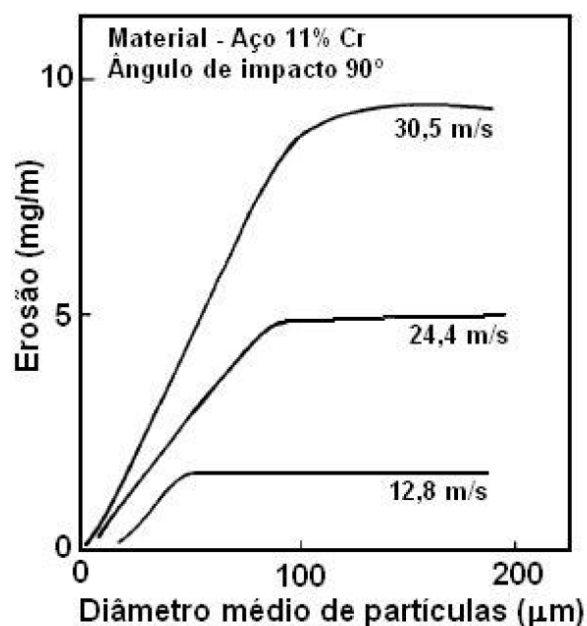


Figura 3.9: Gráfico da variação da erosão conforme diferentes velocidades de ataque e segundo a distribuição do diâmetro médio de partículas^[33].

Vários investigadores obtiveram resultados similares^[34-35], com exceção de Bahadur e Badruddin^[36], que constataram que a taxa de erosão de um aço martensítico por partículas de SiO₂ decresceu com o aumento do tamanho do erodente.

3.3.2 Morfologia

A morfologia da partícula erodente altera os mecanismos de desgaste atuantes sobre a superfície de um material e, subsequentemente, a taxa em que um material é erodido. Brown *et al*^[37], Levy e Chick^[38] e Liebhard e Levy^[16] observaram significativo aumento da taxa de erosão em diversos materiais metálicos quando erodidos por partículas de morfologia irregular. De acordo com Kleis^[39], 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.

Num estudo, Reddy e Sudararajan^[40] observaram que a maior taxa de erosão, para o cobre e suas ligas, é em impactos próximos a ângulos normais, usando granalha de aço esférica como erodente. O resultado pode ser observado na Figura 3.10, onde percebe-se que quando partículas angulares de SiC são utilizadas como erodente, o cobre e suas ligas aproximam-se de um comportamento dúctil. Desta forma, o material sob erosão será mais similar ao comportamento dúctil, onde o máximo de desgaste ocorre para menores ângulos de ataque (15° – 30°), à medida que a partícula se torna mais angular.

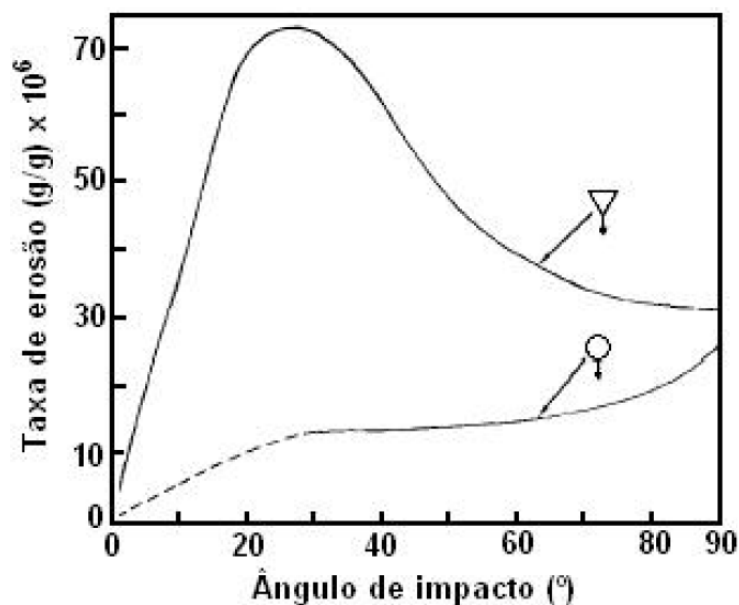


Figura 3.10: Variação da taxa de erosão, em vários ângulos, utilizando erodentes com morfologias diferentes. Erodentes angulares representados pelo triângulo e erodentes esféricos pelo círculo.^[40]

3.3.3 Dureza e friabilidade das partículas

A dureza das partículas erodentes é determinante na taxa de erosão de um material. Sabe-se que para partículas com dureza semelhante ao material do alvo a taxa de erosão é baixa. A partir daí a taxa de erosão aumenta com o acréscimo de dureza do erodente, até que se torna invariante para abrasivos com dureza de pelo menos duas vezes maior que do material erodido.

Levy investigou a influência da dureza das partículas do erodente na taxa de erosão de aços, comparando diferentes tipos de materiais erosivos. SiC, SiO₂, Al₂O₃ e cinza de carvão mineral. Em seu estudo, notou que para erodentes com dureza pelo menos duas vezes maior que a do material alvo, não havia influência desta propriedade na taxa de erosão. Mas para partículas com dureza semelhante ao material alvo, a taxa de erosão caiu consideravelmente.^[41]

Levy e Chick^[38] 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.

3.4 Erosão em materiais metálicos

Ao descrever os mecanismos atuantes durante o 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. Hutchings^[42] descreve uma forma para se avaliar a extensão do dano causado pelo impacto de uma partícula em um material dúctil, que pode ser estimada através do cálculo do número de Best ou Metz (*B*). Através da Tabela 3.2 é apresentado o tipo de deformação esperada pelo impacto de uma partícula para uma larga faixa do número de Best.

Tabela 3.2: Variação do tipo de dano como o número de Best^[42].

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 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^[42-44], Hutchings e Levy^[45] e Finnie^[46]:

- i) Em impactos oblíquos, o mecanismo de corte (*microcorte/cutting*) (tipos I e II);
- ii) Sulcamento (*ploughing*);

iii) Para impactos próximos à normal, o desprendimento por *platelet*.

Segundo 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 3.11, a partir dos seus estudos experimentais, sem considerar a possível rotação da partícula quando do impacto com a superfície^[46]. No primeiro caso, para ângulos menores que 20°, Figura 3.11 (1), o autor sugere que a partícula impactante lasca o metal como em um corte. Já no segundo ângulo, ângulo próximo a 30°, Figura 3.11 (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 3.11 (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.

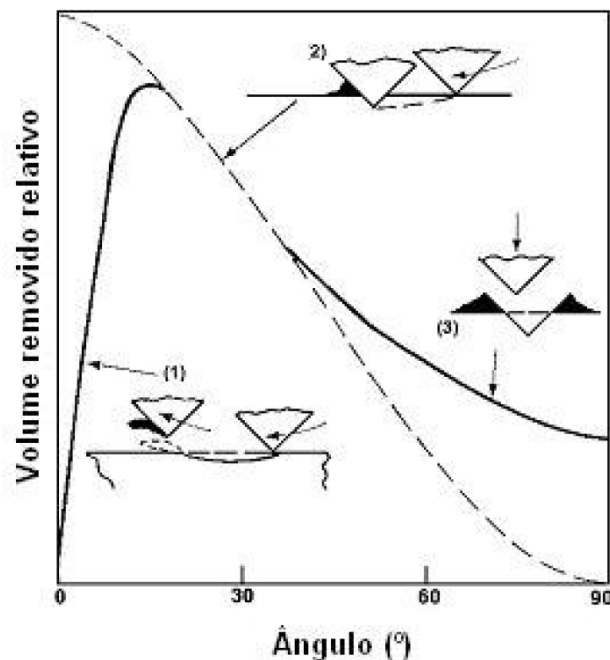


Figura 3.11: Formas de remoção de material metálico dúctil erodido conforme o ângulo de incidência de erodente^[46].

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. O balanço energético que ocorre entre a partícula incidente e o material é descrito por Hutchings e apresentado na Figura 3.12^[42]. A figura, baseada nos resultados de Hutchings, 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.

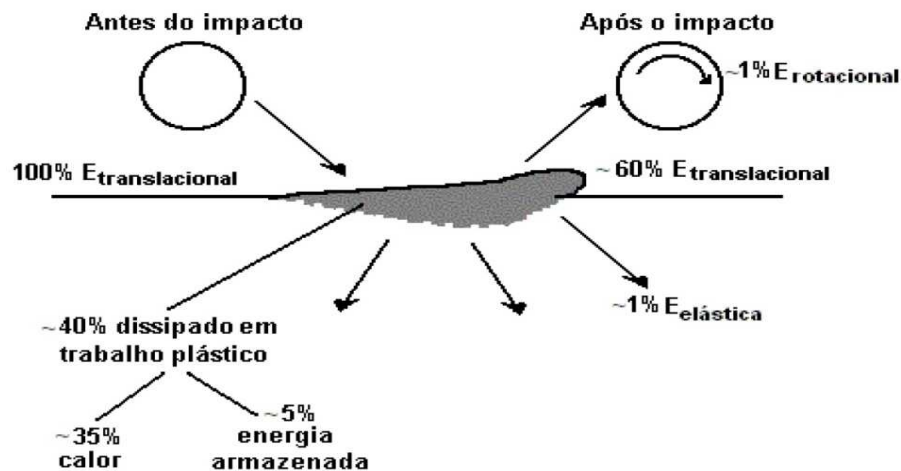


Figura 3.12: Balanço da energia no impacto de partículas de erodentes esféricas no ângulo de impacto de 30°^[42].

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 despreendida 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 3.13, baseada nos resultados de Hutchings^[42], demonstra que a energia cinética rotacional do ricochetear da partícula pode ser apreciável, estimando que 40-80% da energia cinética seja dissipada no trabalho plástico.

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 descreve que o mecanismo de erosão em materiais metálicos para impactos próximos à normal pode ser dividido em três fases distintas que ocorrem sequencialmente^[45]. Na fase inicial, o impacto da partícula forma uma cratera e o material é extrudado ou despreendido 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*^[38].

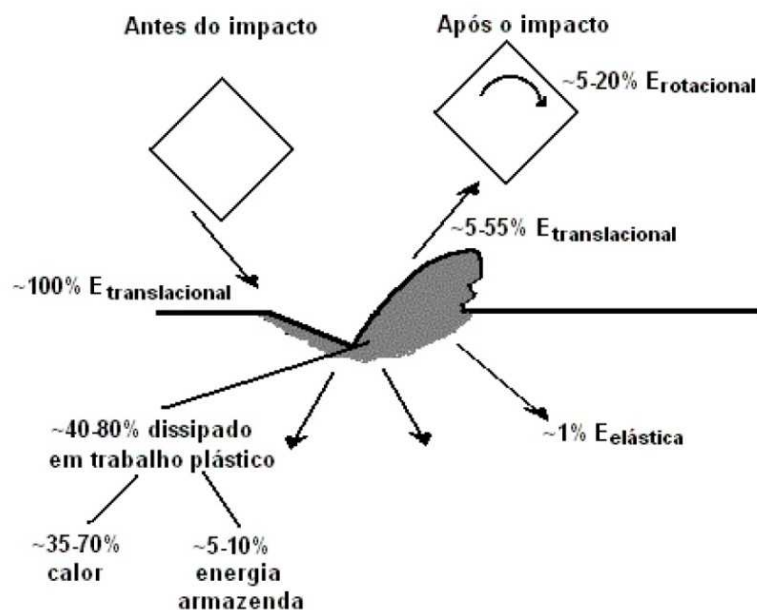


Figura 3.13: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente angulares no ângulo de impacto de 30° [42].

Hutchings 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 [45].

Em trabalho anterior, Cousens observou que este mecanismo de *platelet* pode gerar um fluxo de metal durante a erosão, modificando a superfície do material erodido [47]. 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, mais agressivo que a forma de erosão anterior.

Recentemente, pesquisadores sugeriram que acúmulo de incrustação juntamente com o endurecimento superficial ocasionado pelas sucessivas colisões de partículas, causariam a interconexão de trincas na superfície e na subsuperfície do material estudado, acarretando num desprendimento de material de maneira frágil, denominados *microcracks* [32]. Além de causar formações análogas ao *platelet*, mas em que o encruamento se dá nas elevações adjacentes aos pontos de incrustação, profundos, e o material das bordas e picos das elevações é removido pelo ataque contínuo de abrasivo [26].

Para alta energia cinética e alto ângulo de impacto também mostram que o montante de abrasivo incrustado na superfície do material a ser erodido é maior e altera os mecanismos de erosão presentes [26]. As partículas incrustadas atuam blindando os ataques seguintes (mais difícil de ocorrer a baixo ângulo por ter mais área livre de incrustação, já que a marca da erosão é maior), e o ricocheteio das partículas pode remover material adjacente, como ilustrado na Figura 3.14, chamado de *remoção secundária de metal*. Este ricocheteio, próximo à normal também atenua o fluxo subsequente de partículas que se aproximam em direção semelhante, mas sentido

oposto, diminuindo a taxa de erosão juntamente com os ataques a partículas incrustadas, que promovem somente deformação ao material atacado.^[26]

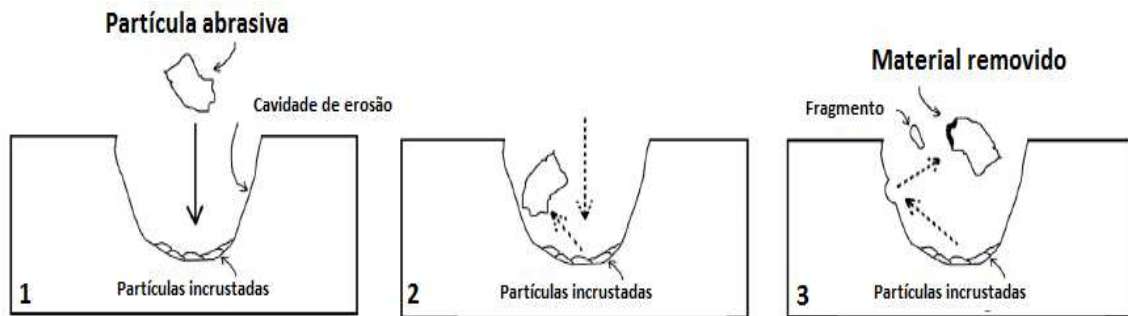


Figura 3.14: Desenho esquemático da incrustação de partículas e o ricocheteio do abrasivo num ataque subsequente removendo material e deixando fragmento na superfície.^[26]

Um balanço energético do impacto de partículas sólidas na superfície de um metal, em ângulo de 90° é mostrado na Figura 3.15.

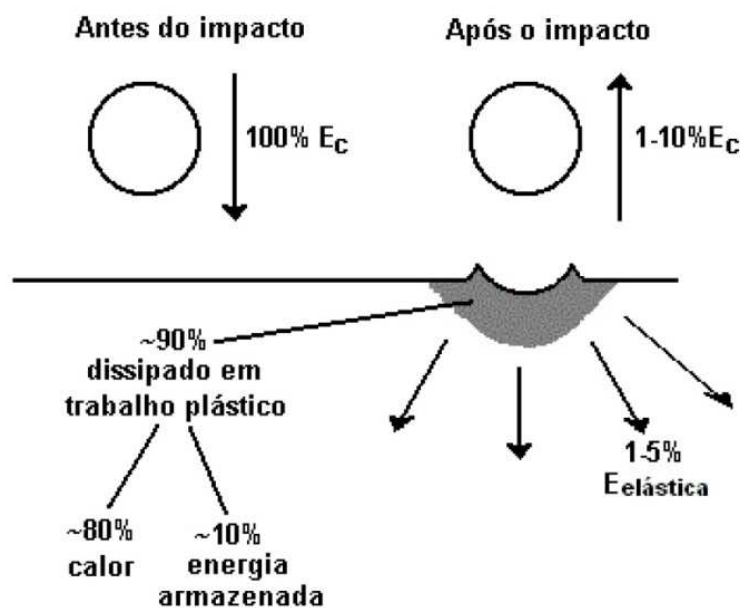


Figura 3.15: Balanço da energia no impacto de partículas de erodente esféricas no ângulo de impacto de 90° .^[42]

Conforme apresentado pela Figura 3.15, 1 a 10% da energia cinética inicial de uma partícula chocando-se normalmente (esta 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.

3.5 Espectroscopia por dispersão de raios x na caracterização de uma superfície

Na espectroscopia por raios x característicos, como na espectroscopia por dispersão em energia (EDS), o feixe incidente pode interagir com as camadas de elétrons dos átomos presentes na amostra, arrancando um elétron de seu orbital, ocasionando uma vacância e assim acaba por deixar o átomo como um íon em seu estado excitado. Instantaneamente, o átomo retorna ao seu estado normal, com a emissão de energia característica da transição ocorrida entre os níveis de elétrons (K, L e M). As energias dos elétrons em cada nível são bem definidas, com valores característicos para cada átomo, possibilitando a identificação e quantificação dos elementos químicos através de uma série de técnicas instrumentais.

O espectro de raios x resultante da interação elétrons com a amostra é constituído por dois componentes distintos. O característico permite identificar e quantificar os elementos presentes, e o contínuo é responsável pelo “background” em todos os níveis de energia.

Para se ter a geração de uma linha espectral característica é necessário que a energia dos elétrons incidentes (E_0) seja superior à energia crítica de excitação desta linha do elemento analisado (E_c). Operacionalmente, para se gerar uma intensidade razoável de raios X característicos, a energia do feixe incidente deve ser pelo menos duas vezes superior à energia crítica de excitação^[48]. A Figura 3.16 mostra as interações entre elétrons e amostra e a profundidade que são geradas.

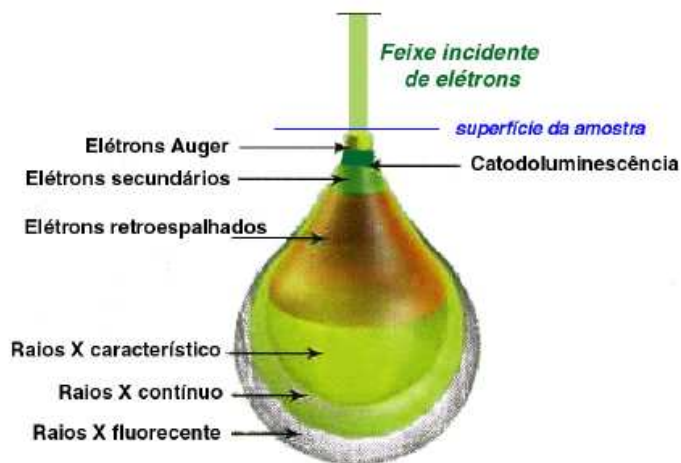


Figura 3.16: Efeitos da interação do feixe de elétrons com a amostra. No detalhe as interações resultantes e as profundidades nas quais estas são geradas.

4 Procedimento Experimental

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma da parte experimental desenvolvida no presente trabalho.

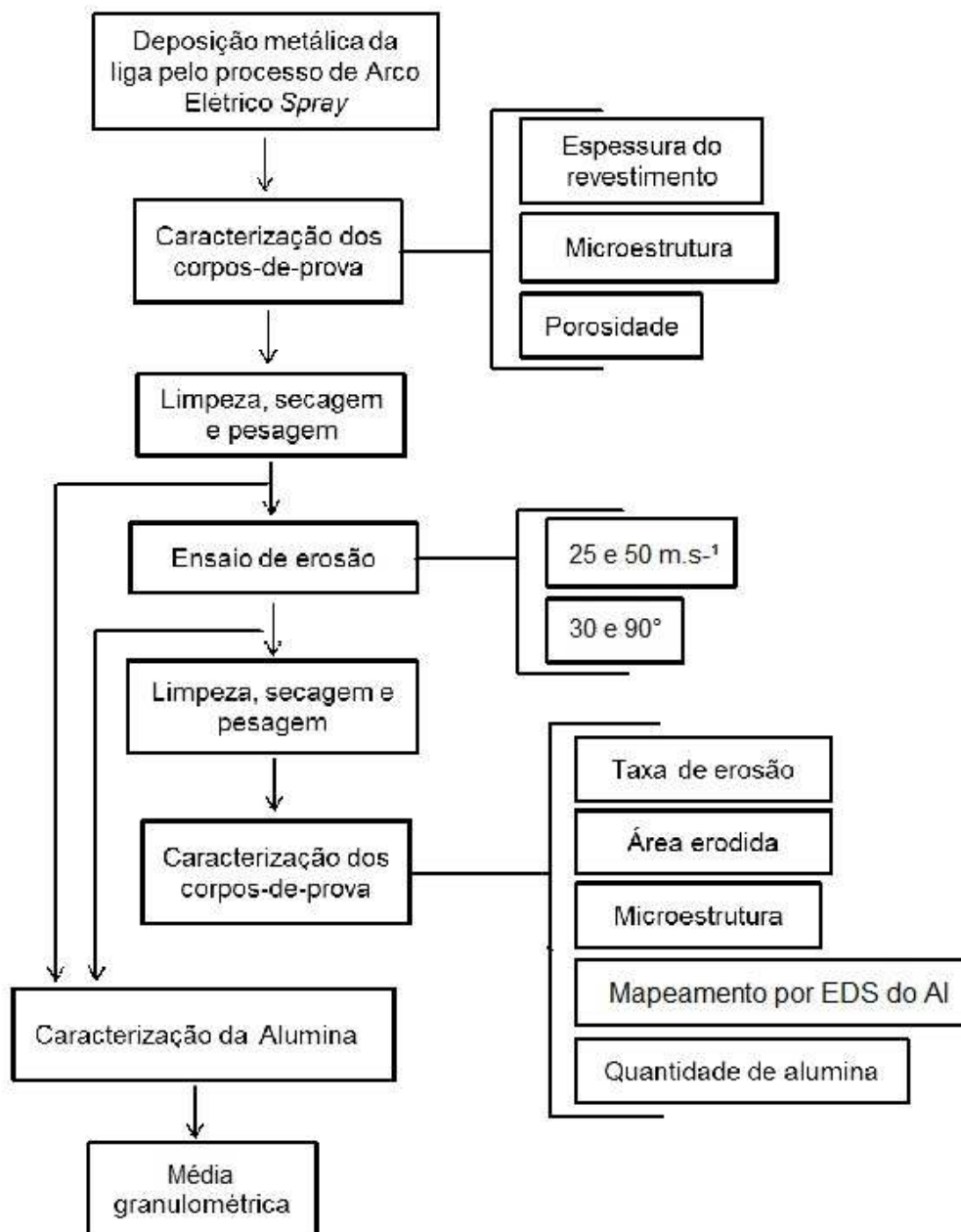


Figura 4.1: Fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

4.1 Materiais

4.1.1 Arame para obtenção do revestimento

O arame utilizado neste trabalho é um arame comercial fabricado pela empresa Eutectic Castolin Ltda., vendido pelo nome de EuTronic Arc 593 T[®], utilizado com o

objetivo de produzir um material com características superiores ao que tangue a dureza, desgaste por erosão, abrasão e o choque térmico em temperaturas de até 650°C.

Segundo o fabricante o arame é uma liga constituída por Ferro-Cromo que não requer camada de base em sua aplicação. Sua composição química pode ser observada através da Tabela 4.1. É utilizada em placas de resfriamento em fornos de cimento, ciclones de alta temperatura, e outras aplicações que necessitem aumentar a vida útil de um componente que esteja sujeito ao desgaste erosivo. Comercialmente vendido na forma de arame tubular com diâmetro de 1,6 mm e, segundo o fabricante, após a deposição a liga atinge uma dureza média de 63 HRc com uma aderência ao substrato de 35 Mpa^[5].

Tabela 4.1: Composição química do revestimento estudado, o arame EuTronic Arc 593 T[®] antes da aspensão.^[5]

Elementos	Cr	B	C	Mn	S	Fe	Al
%	21.29	1.45	0.04	0.74	0.02	Bal.	-

4.1.2 Erodente

No processo de desgaste erosivo utilizou-se como erodente uma alumina eletrofundida marrom. Intrinsecamente frágil, a alumina eletrofundida apresenta elevada densificação, dureza e propriedades mecânicas, características apropriadas para uso como erodente em ensaios de desgaste^[41].

Esta alumina é fabricada pelo processo Bayer e a eletrofusão do óxido em forno elétrico tipo *Higgins*, no qual é produzido um bloco que é então cominuído, definindo a distribuição de tamanho e a morfologia dos grãos. Apresenta uma dureza típica entre 1720 / 2140 HV e a composição química, segundo o fabricante, é mostrado na Tabela 4.2^[49].

Tabela 4.2: Composição química da alumina eletrofundida marrom^[49].

Elemento	O	Al	C	Outros
%	41.7	21.8	11.8	24.7

4.1.2.1 Distribuição Granulométrica

O erodente estudado foi caracterizado segundo a distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios erosivos, e a distribuição média inicial foi verificada via difração à laser (Cilas-1180) e pode ser observada através da Tabela 4.3 e pela Figura 4.2, que mostra uma distribuição unimodal das partículas com tamanho médio de 302,77 µm.

Tabela 4.3: Análise granulométrica por difração a laser da alumina erodente.

Matéria-prima	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Dmédio(µm)
Alumina eletrofundida	163,54	300,54	447,62	302,77

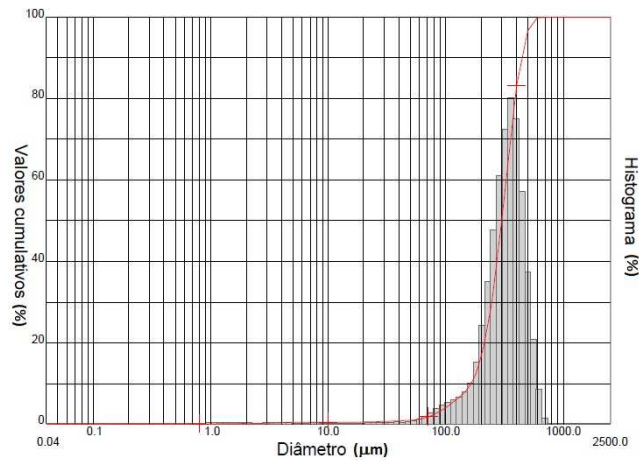


Figura 4.2: Distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida de tamanho médio de partícula de 302,77 µm.

4.1.2.2 Análise morfológica

A Figura 4.3 apresenta a alumina eletrofundida utilizada como erodente neste trabalho quanto a sua morfologia através de microscopia eletrônica de varredura de bancada (Hitachi – TM3000). A partir da análise desta micrografia, Figura 4.3, observa-se que o erodente é constituído de partículas irregulares, angulares com uma variação no tamanho do particulado.

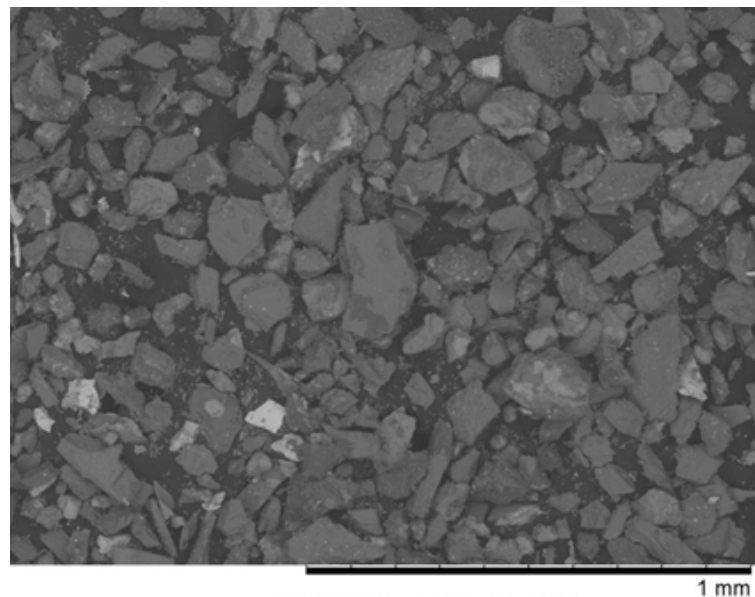


Figura 4.3: Morfologia da alumina eletrofundida marrom utilizada como erodente. Aumento de 200x.

4.2 Métodos

4.2.1 Fabricação dos corpos-de-prova

A fabricação dos corpos-de-prova revestidos pela técnica de aspersão térmica, a partir do esquema de um equipamento mostrado na Figura 4.4, envolveu a sequência de etapas de preparação do substrato, aspersão e preparação dos mesmos para o ensaio de erosão.

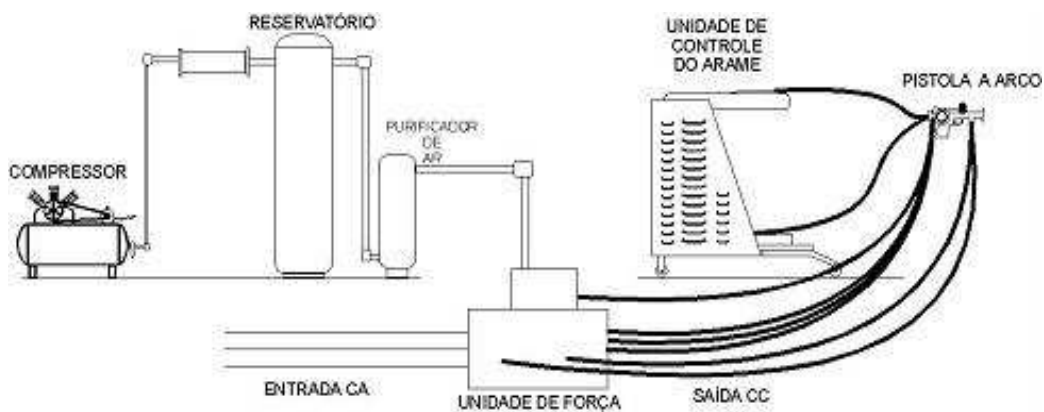


Figura 4.4: Esquema da instalação do equipamento para aspersão térmica via arco elétrico^[4].

O equipamento utilizado foi o *EuTronicArc Spray 4*, fabricado pela CastolinEutectic. Este equipamento pode atingir até 350 A 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 4.4. Os corpos-de-prova foram aspergidos na empresa fabricante do equipamento

Tabela 4.4: Parâmetros usados no equipamento para deposição do revestimento.

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

Os corpos-de-prova constituíram-se de um revestimento metálico FeCr aplicado sobre um substrato de aço inoxidável AISI 310, como observado na Figura 4.5. Foi feito um jateamento com microesferas abrasivas de aço para aumentar e padronizar a rugosidade superficial antes da aspersão térmica. Após, a superfície do corpo-de-prova foi limpa com ar comprimido, com o objetivo de afastar resíduos decorrentes do jateamento e então aplicado o revestimento.

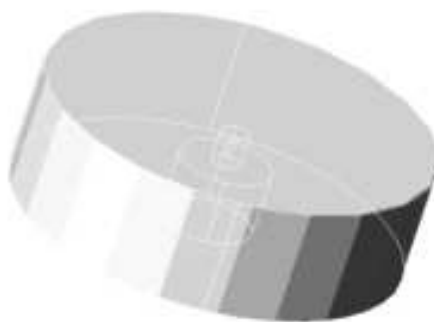


Figura 4.5: Desenho do substrato usado para obtenção dos corpos-de-prova.

4.2.2 Caracterização do revestimento

4.2.2.1 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*^[50] (*software* gratuito para *download*) para determinar a espessura de cada revestimento. 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.

4.2.2.2 Porosidade

O revestimento metálico FeCr, então aspergido via arco elétrico, foi caracterizado quanto à porosidade total através de análise por imagem. A eficácia do método para revestimentos aplicados por aspersão térmica foi estudada por Deshpande *et al.*^[51], comparando com métodos convencionais como a absorção de água, porosimetria de mercúrio, picnometria de hélio, entre outros. A partir, então, da comparação dos resultados pelas diferentes técnicas, os autores validaram a técnica de análise por imagem, pois esta apresenta resultados satisfatórios.

Para a determinação da porosidade total dos revestimentos, os corpos-de-prova foram previamente preparados para a análise metalográfica, ou seja, cortados, embutidos, lixados e polidos. Imediatamente após, foram feitas micrografias ópticas (*Olympus* - modelo *BXS1M*) no aumento de 200 vezes, que foi considerado o mais representativo.

Com as micrografias realizadas, utilizou-se o programa *ImageJ*^[50] para determinar a proporção de áreas escuras (poros e óxidos) e áreas claras (revestimento). Por este método não foi possível quantificar a contribuição dos óxidos na porosidade medida. Foram feitas três análises do revestimento em corpos-de-prova diferentes e, a partir destas, determinou-se a média da porosidade total do revestimento.

4.2.2.3 Massa específica aparente

Para a determinação da massa específica aparente do revestimento estudado, destacou-se parte do substrato e quantificou-se a área e espessura através de microscópio e *software* de análise de imagem^[50]. Com a massa da amostra aferida, descontou-se as medidas da porosidade aparente chegando-se a um valor em g.cm^{-3} .

4.2.2.4 Análise microestrutural

Para a avaliação da microestrutura foi utilizado microscopia eletrônica de varredura de bancada acoplado a um EDS (*Hitachi* – *TM3000*). A análise microestrutural da liga metálica aspergida foi executada antes e após o ensaio de desgaste erosivo, com objetivo de identificar os fenômenos que ocorrem e concorrem para um aumento ou diminuição da resistência ao desgaste erosivo dos sistemas utilizados.

4.2.3 Equipamento para desgaste erosivo

A Figura 4.6 mostra esquematicamente o equipamento utilizado para fazer os ensaios de erosão, baseado na norma ASTM G-76[52]. O aparelho desenvolvido para simular

desgaste erosivo é composto, segundo Marques e Vicenzi[53,54], por quatro sistemas principais: Forno aquecedor (sistema de pré-aquecimento do ar); Dosador de erodente (sistema de alimentação de partículas erodentes); Venturi e tubo acelerador de partículas (sistema acelerador de partículas); porta amostra e forno para ensaio à quente.

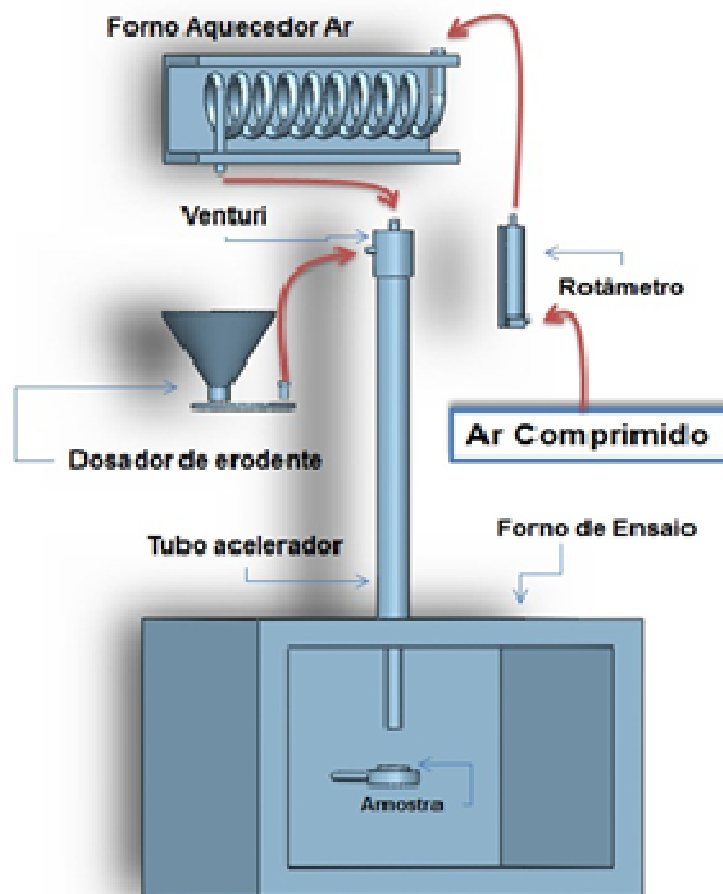


Figura 4.6: Diagrama esquemático do equipamento utilizado para desgaste erosivo por partículas sólidas.

O sistema de pré-aquecimento do forno de ar foi usado neste estudo para minimizar os efeitos da umidade no fluxo de partículas que atinge a superfície do revestimento. O forno de ensaio é capaz de atingir um máximo de fluxo de ar de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, que é limitado por um rotâmetro ligado na entrada da serpentina, na parte de fora do forno. Na saída da serpentina, o ar seco passa para o sistema de aceleração de partículas através de um tubo de *Venturi*. O sistema de alimentação de partículas é utilizado para alimentar constantemente o sistema acelerador de partículas, que é concebido para misturar o ar com as partículas erodentes e acelerá-las para o material do alvo, causando o fenômeno da erosão por partículas sólidas acontecer.

A aceleração começa em um venturi de aço inoxidável que contém duas entradas: uma para o ar seco e outra para as partículas, como observa-se na Figura 4.7. O carregamento da partícula só é possível por causa da constrição dentro do *Venturi*. Dessa forma o ar flui através deste e cria uma diferença de pressão que aspira as partículas e as mistura ao ar gerando um fluxo homogêneo de ar e partículas.

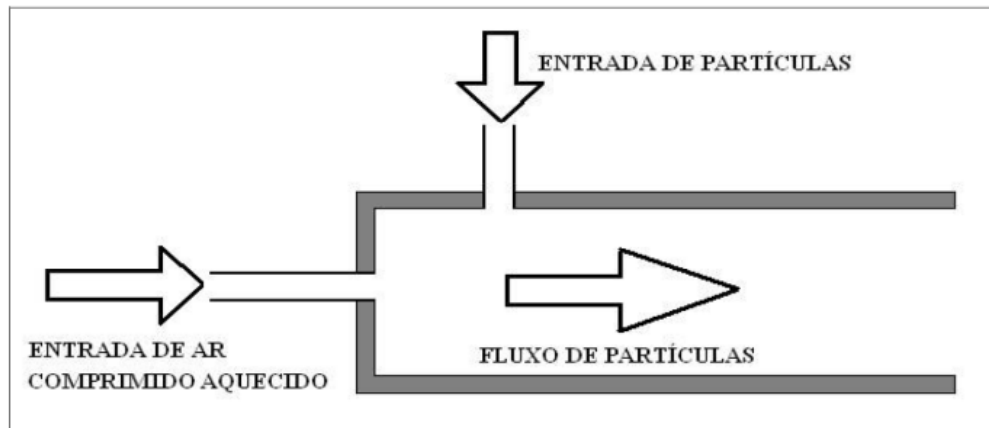


Figura 4.7: Diagrama esquemático do *Venturi*, dispositivo responsável por sugar e misturar as partículas com o ar, mandando-as para o sistema acelerador de partículas.

O fluxo de partículas erodente é então acelerado para dentro de um longo tubo metálico que incide sobre o porta-amostra. Este, fixado no interior do forno da amostra, é preso em uma haste acoplada a sistema de rolamentos. Este sistema é capaz de girar o porta-amostra e a superfície do corpo-de-prova entre 10° e 90° em relação ao ângulo de ataque das partículas erodentes, o que torna possível o estudo do fenômeno de erosão por partículas sólidas em função de diferentes ângulos de incidência das partículas erosivas.

4.2.4 Calibração do equipamento para desgaste erosivo e definição de parâmetros do ensaio

São inúmeras as variáveis no processo de desgaste erosivo por partículas sólidas, e várias delas já foram estudadas por diversos autores^[12-15,20-25]. No presente trabalho, o revestimento metálico estudado foi averiguado quanto a seu desgaste a baixo e alto ângulo e em diferentes velocidades para que o fenômeno da incrustação de partículas erodentes fosse analisado frente a diferentes condições de ataque.

4.2.4.1 Velocidade das partículas erodentes

Para analisar a liga estudada frente a diferentes comportamentos, o presente trabalho verificou as diferenças de respostas da liga à alta (50 m.s^{-1}) e baixa velocidade (25 m.s^{-1}) de ataque do revestimento pelo erodente.

A velocidade do erodente foi medida pelo método conhecido como disco duplo, já utilizado em diversos trabalhos^[55-58]. Este método faz uso de dois discos que giram sobre um eixo e são colocados logo abaixo da extremidade do tubo acelerador, em que ambas as partículas de ar e erodente são ejetadas. Existe uma abertura no disco colocada mais perto da extremidade do tubo acelerador, que permite a passagem do fluxo de erodente.

Uma vez que ambos os discos giram à mesma velocidade, partículas colidem no disco inferior em uma posição diferente, S , em relação ao outro disco. E então como a velocidade angular dos discos, a distância entre eles e o deslocamento S são conhecidos, é possível determinar a velocidade das partículas erodente por meio da Equação 4.1. A Figura 4.8 mostra o princípio de funcionamento do sistema de disco duplo esquematicamente. O deslocamento S é medido no centro da zona de impacto e representa a velocidade média das partículas. A velocidade de rotação dos discos é

determinada com o auxílio de um tacômetro digital (*Minipa*, MDT 2238A). O ângulo é medido com o auxílio de um programa de análise de imagem (*ImageJ*), a fim de se obter uma maior precisão.

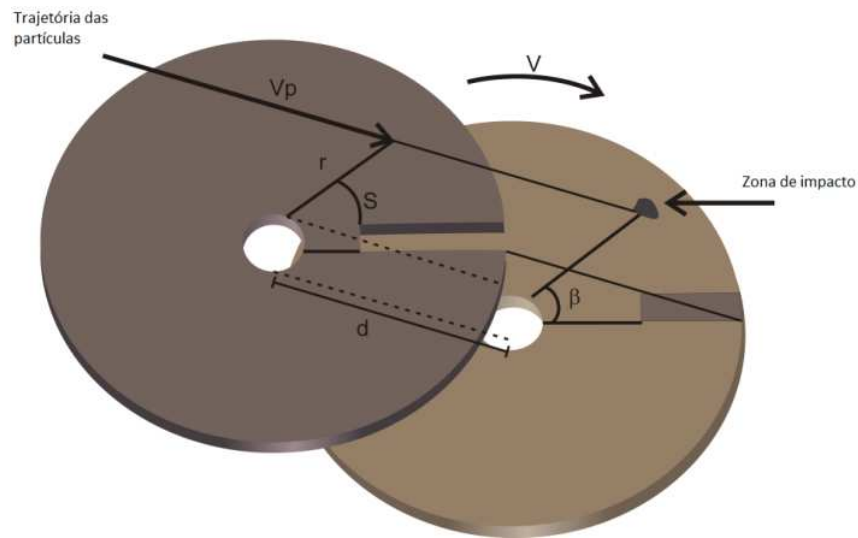


Figura 4.8: Esquema representativo do método *Double-Disk*, onde V_p : Velocidade das partículas; d : Distância entre os discos; β : Distância angular da fenda à zona de impacto; S : Deslocamento da incidência em relação aos discos; e V : Velocidade angular.

$$V_p = \frac{d_d \cdot \omega}{\beta} \quad (4.1)$$

Onde:

V_p = Velocidade de incidência das partículas ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

d_d = distância entre os discos (m);

ω = velocidade angular medida com o auxílio de um tacômetro ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$);

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

4.2.4.2 Ângulo de ensaio

Para a realização deste trabalho, os ângulos de incidência avaliados foram de 30° e 90° , onde se tem, para materiais metálicos, maiores e menores taxas de desgaste, respectivamente, e diferentes mecanismos de remoção de material agindo, como estudado por Finnie^[46]. O porta-amostras do equipamento de desgaste é acoplado a um dispositivo que permite girar a superfície revestida entre 10° e 90° .

4.2.4.3 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 tanto, o pré-teste foi realizado na situação onde era esperado a maior taxa de erosão.

No pré-teste o corpo-de-prova foi ensaiado com uma velocidade de incidência de erodente sobre a face do revestimento de 50 m.s^{-1} . Averiguou-se a massa da amostra em intervalos de tempo igual a 10 minutos. Com temperatura ambiente e com ângulo de ataque de 30° , situação de desgaste mais severa para este estudo, definiu-se o tempo de ensaio comparativo de 60 minutos, onde a taxa de erosão, de volume de material por grama de erodente, manteve-se em regime estacionário.

4.2.5 Ensaio de desgaste erosivo

Os parâmetros utilizados para os ensaios a temperatura ambiente são apresentados na Figura 4.5, onde, apesar de apresentar taxa de alimentação de erodente maior que a norma recomenda ASTM G76 (2 g.min^{-1}), torna-se mais real já que aplicações de cunho industrial exigem maior fluxo de erodente^[26].

Tabela 4.5: Parâmetros do ensaio de erosão à temperatura ambiente.

Tempo de ensaio	1 h
Velocidade do erodente	50 e 25 m.s^{-1}
Ângulo de ataque	30° e 90°
Fluxo de erodente	$8,667 \text{ g.min}^{-1}$
Vazão do ar	$20 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

4.2.5.1 Determinação da Taxa de Erosão

A taxa de erosão foi determinada pela perda de volume, no qual a massa das amostras foi aferida antes e depois do ensaio, via balança analítica *Mettler Toledo 210G*, com resolução de $0,0005 \text{ g}$ e levando-se em conta os valores de massa específica aparente do revestimento, são relacionados então pela Equação 4.2, onde os resultados são relativos ao volume de material erodido por grama de erodente.

$$T_{vol}^* = \frac{(m_i - m_f)}{\rho_{ap} \times m_e} \quad (4.2)$$

Onde:

T_{vol}^* = Taxa de erosão volumétrica ($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ erodente);

ρ_{ap} = massa específica 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 utilizado no ensaio (g).

4.2.6 Incrustação de partículas erodentes

Depois dos ensaios erosivos as partículas erodentes incrustadas no revestimento estudado foram quantificadas via EDS acoplado ao MEV, e a partir desses dados foi analisada a incrustação em massa de erodente por área de revestimento, visto que a

marca de erosão para ensaios próximos a normais é circular e menor que a marca causada por desgaste oblíquos, que é elíptica^[26].

4.2.6.1 Determinação da área erodida

Com o auxílio de uma lupa Olympus modelo SZ61 e da câmera *Infinity1*, fez-se a aquisição de imagens para que posteriormente com o programa *ImageJ*^[50] fosse possível ser estimada uma média da área desgastada pelos erodentes. Realizou-se medidas em 3 peças para cada ângulo e velocidade. Tais medidas se fizeram necessárias uma vez que a área de colisão modifica muito em função do ângulo empregado.

4.2.6.2 Determinação da incrustação de partículas erodentes

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 (*Hitachi – TM3000*), após a erosão nas amostras atacadas em ângulos de 30° e 90° e velocidades de 25 e 50 m.s⁻¹.

Então foi desenvolvido um método de quantificar a alumina incrustada relativamente à área de erosão, já que esta é variável conforme o ângulo de incidência de abrasivo. A quantificação foi calculada considerando-se o montante de Al, principal constituinte elementar do erodente, obtido na análise por mapeamento via microsonda EDS de cada amostra, empregado em valores fracionários.

Levando-se em conta a profundidade de geração dos raios x característicos, ou o microvolume de amostra analisado, que é dependente da energia do feixe incidente ($E_0 = 15 \text{ keV}$ – obtido da análise EDS), energia crítica de excitação do Al ($E_c = 1,562 \text{ keV}$ ^[65]), e da massa específica do material em análise. A relação entre as variáveis é apresentada na Equação 4.3^[48].

$$\rho \times R = 0,064 \times (E_0^{1,68} - E_c^{1,68}) \quad (4.3)$$

Onde:

ρ = massa específica do material em análise (g.cm⁻³);

R = profundidade dos raios x (μm);

E_0 = Energia do feixe incidente (keV);

E_c = Energia crítica de excitação (KeV).

E, assim, juntamente com a massa específica do erodente (3,85 g.cm⁻³) a relação enfim pode ser completada, e a quantidade relativa de alumina incrustada é apresentada na Equação 4.4.

$$Q_a = eds \times R \times \rho_{Alu} \quad (4.4)$$

Onde:

Q_a = Quantidade relativa de alumina incrustada (g.cm⁻²);

eds = valor obtido pela varredura de elementos por EDS (%/100);

ρ_{Alu} = massa específica da Alumina (g.cm^{-3});

R = profundidade dos raios \times (cm).

4.2.6.3 Correção da taxa de erosão

Determinado o valor de Q_a , através da Equação 4.4, e multiplicando pela respectiva área de erosão, chega-se ao valor da massa de alumina incrustada na região desgastada. A partir daí, para corrigir a taxa de erosão descontou-se da massa final do corpo-de-prova erodido, conforme mostra a Equação 4.5, a massa ganha devido a incrustação de erodente, que mascara os resultados reais da taxa de erosão volumétrica, nas diferentes variáveis do ensaio erosivo proposto por este estudo.

$$T_v = \frac{m_i - [m_f - (Q_a \times a)]}{\rho_{ap} \times m_e} \quad (4.5)$$

Onde:

T_v = Taxa de erosão volumétrica corrigida ($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ erodente);

ρ_{ap} = massa específica aparente do revestimento (g.cm^{-3});

m_i = massa inicial da amostra (g);

m_f = massa final da amostra (g);

Q_a = Quantidade relativa de alumina incrustada (g.cm^{-2});

A = Área da marca de erosão (cm^2);

m_e = massa de erodente utilizado no ensaio (g).

5 Resultados e Discussões

5.1 Revestimento

Pela Figura 5.1 pode-se notar que o revestimento aspergido contém lamelas de diferentes tamanhos, com aspecto fundido, com ausência de cantos vivos e de aparência arredondada, mostrando o estado de plasticidade das partículas no momento do impacto com o substrato durante o processo de aspersão por arco elétrico. O revestimento apresentou tamanhos médios de espessura de $339 \pm 37\mu\text{m}$.

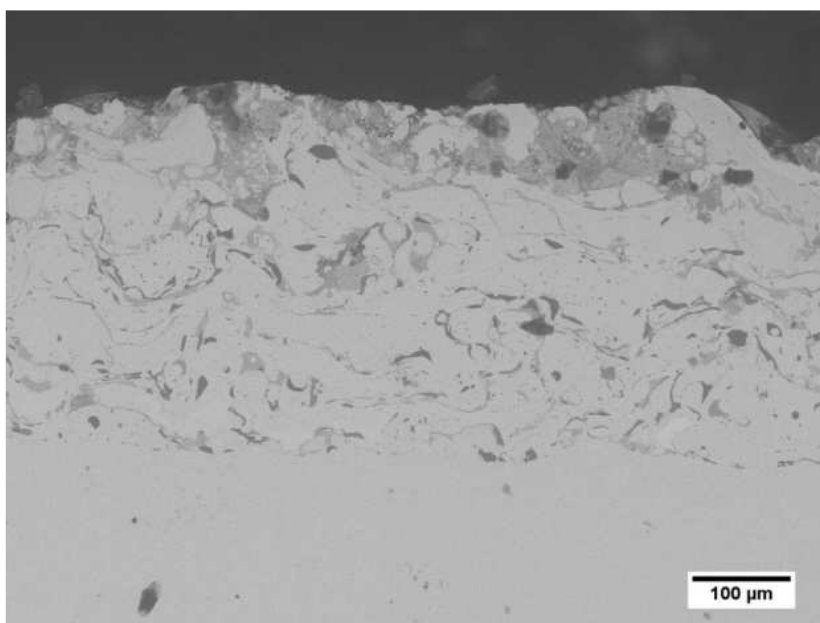


Figura 5.1: Imagem por microscópio óptico do perfil do revestimento, em 200x.

Através dessa técnica de metalização obtém-se um alto grau de porosidade, conforme Pawlowski^[59], que menciona que os processos de arco elétrico obtém-se porosidade entre 10% a 20%. A quantificação da porosidade foi feita por imagem e a Figura 5.2 evidencia o contraste de cores claras e escuras usada pelo software ImageJ^[50] para quantificar a área escura que representam os poros. Após análise óptica chegou-se a porosidade média de 6,2%.



Figura 5.2: Imagem por microscópio óptico, com tratamento de imagem para contrastar claros e escuros para realização da quantificação dos poros. Ampliação de 200x.

Estudos anteriores mostram que, para revestimentos aspergidos por essa técnica que apresentam porosidades inferiores a 15%, pouco se altera nas propriedades elásticas do material, não afetando consideravelmente a resposta da liga frente a colisão frequente de partículas erodentes.^[60]

Depois de quantificada a porosidade, descontou-se da medida inicial da massa específica e obteve-se o valor de $7,84 \text{ g.cm}^{-3}$ para a liga FeCr estudada. A Figura 5.3 mostra uma imagem por MEV da vista superior do revestimento como aspergido.

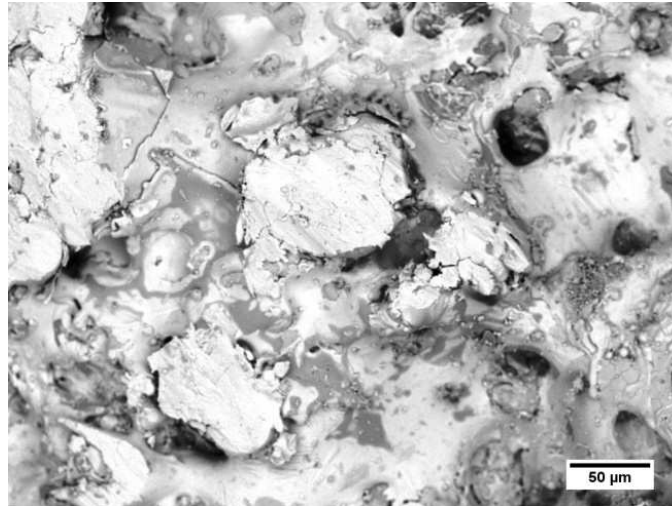


Figura 5.3: Imagem por MEV da vista superior do revestimento, aumento de 400x.

5.2 Taxa de Erosão

Após os ensaios de erosão por partícula sólida a área desgastada foi medida com o auxílio de uma lupa eletrônica e, depois de análise por *software* de imagem (*ImageJ*^[50]), foi considerada invariante para os ângulos de 30° e 90° , no valor de $1,49 \text{ cm}^2$ e $0,68 \text{ cm}^2$, respectivamente.

Utilizou-se a Equação 4.5 para se obter a taxa de desgaste volumétrica para o revestimento FeCr, corrigida pelo desconto de massa ganho devido à incrustação. Os resultados obtidos estão na Figura 5.4.

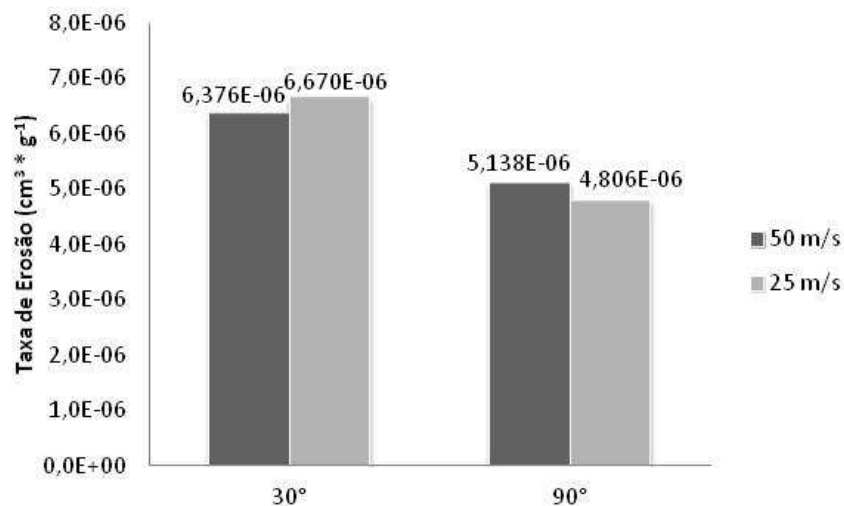


Figura 5.4: Taxa de erosão em função do ângulo de ataque e velocidade.

Nela, observa-se que a taxa de erosão decresce com o aumento do ângulo de incidência das partículas erodentes em relação a normal, indicando comportamento típico de materiais metálicos e suas ligas frente a ataques de partículas erodentes angulares^[20, 40]. Isso pode ser explicado por alguns fatores:

- A área da superfície atingida é elíptica e maior em 30° quando comparada à área circular em incidência de erodentes à 90°;

- Em alto ângulo a partícula que atinge o revestimento ricochetearia próximo à normal atrapalhando o movimento das partículas erosivas subsequentes que se aproximam, ao contrário das partículas a baixo ângulo^[26];

- O erodente incrustado juntamente com seus fragmentos (e pedaços de metal erodidos da liga), a 90° atuaria blindando o revestimento, visto o efeito de reforço ao impacto que essas trariam^[26,31,58], de menor efeito à baixo ângulo pois se tem uma maior área livre de incrustação, e esta normalmente seria responsáveis pelo aumento do encruamento da liga e formação de *microcracks*^[32];

- E devido aos mecanismos mais agressivos de remoção de material a baixo ângulo (*ploughing, platelets, cutting e microcracks*) quando comparado aos mecanismos erosivos em alto ângulo (*microcracks, platelets e remoção secundária de metal, pelo ricocheteio das partículas incidentes sobre ponto de incrustação*)^[26, 32, 41-46].

A superfície das amostras erodidas em alto ângulo podem ser observadas na Figura 5.5. No interior do círculo amarelo estão destacadas as ilhas de erodente presentes na amostra e as setas pretas apresentam vestígios dos mecanismos teoricamente previstos para esse caso, como a alta deformação plástica e presença de *microcracks*.

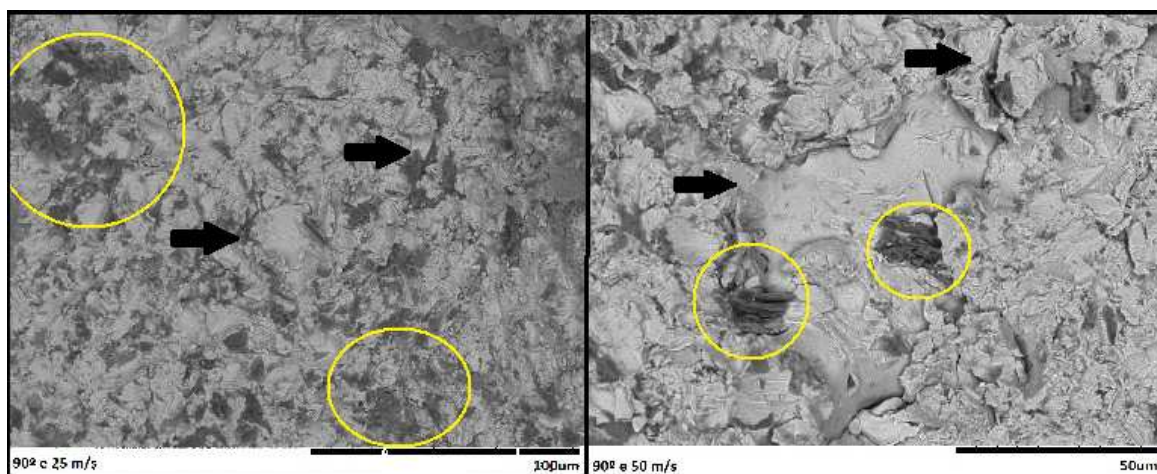


Figura 5.5: Superfície das amostras erodidas nas diferentes velocidades e em 90°. Nos círculos amarelos as “ilhas” de erodente e as setas indicando os vestígios dos mecanismos presentes. Aumento de 800x e 1200x.

Para as amostras atacadas a 30°, é mostrado na Figura 5.6 a superfície destas após o ensaio erosivo. Nota-se no interior da área circulada as “ilhas” de erodente menos presentes e apontadas pelas setas pretas os vestígios dos mecanismos que estariam presentes nessas condições, como os *microcracks, ploughing* e *microcorte*.

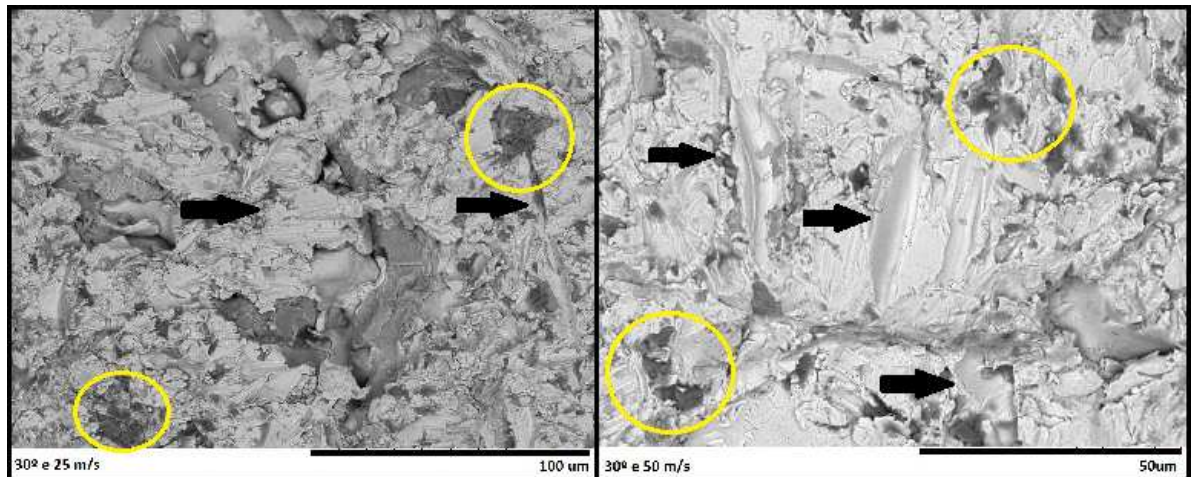


Figura 5.6: Superfície das amostras erodidas nas diferentes velocidades e 30°. Nos círculos amarelos as “ilhas” de erodente e as setas indicando os vestígios dos mecanismos presentes. Aumento de 800x e 1200x.

Nota-se, também, que a velocidade pouco influenciou no desgaste a 30° e quase nada no desgaste a 90°. Nas velocidades utilizadas neste estudo, menores que 100 m.s^{-1} , pela limitação do equipamento, o coeficiente n da velocidade da Equação 3.1 é mais influenciado pelos mecanismos atuantes nas respectivas condições de ensaio do que pela própria velocidade^[26]. Estes mecanismos podem estar relacionados com a incrustação da alumina^[26, 32, 58], devidamente explanada no capítulo posterior.

5.3 Quantidade relativa de alumina incrustada

A distribuição do elemento presente no erodente, Al, na área erodida do revestimento foi obtida por mapeamento via EDS e pode ser observado na Figura 5.7.

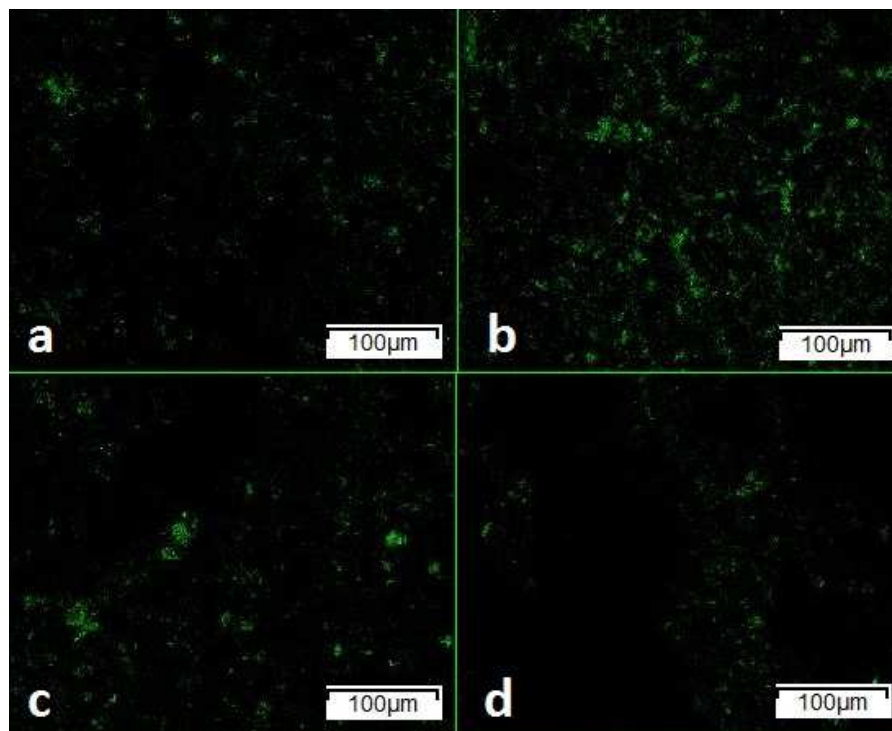


Figura 5.7: Mapeamento da distribuição do alumínio nas marcas de erosão à (a) 25 m/s e 30°, (b) 25 m/s e 90°, (c) 50 m/s e 30° e (d) 50 m/s e 90°. Aumento de 400x.

Com análise de imagem (ImageJ^[50]) quantificou-se a fração da área composta pelo elemento analisado (Al), somente presente na partícula erosiva. A partir disso, utilizou-se a Equação 4.3 para se calcular a profundidade de interação entre elétrons e amostra, e com a massa específica do erodente, foi possível ser calculado a quantidade de alumina incrustada em relação a área erodida, Q_a , através da Equação 4.4.

Assim, pode-se analisar o teor de incrustação relativa, Q_a em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, para melhor visualização dos possíveis efeitos que a incrustação causaria nos ensaios de erosão por partículas sólidas, já que em termos mássicos seria de maior dificuldade, visto que as áreas desgastadas nos ângulos de ataque estudados são de tamanhos. Pela Figura 5.8 são apresentados os resultados obtidos através deste método.

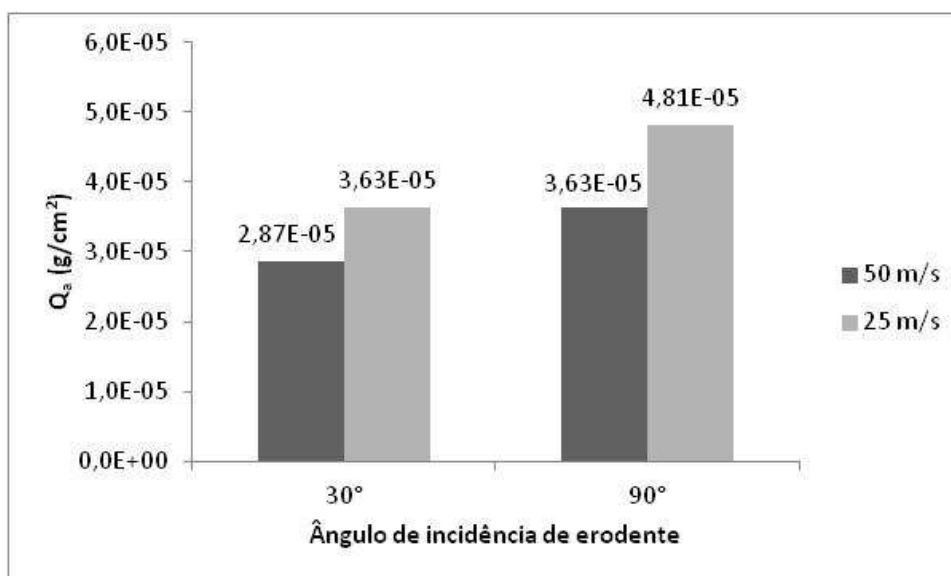


Figura 5.8: Quantidade relativa de alumina incrustada (Q_a) em 30° e 90° a 25 e 50 m/s.

Através da Figura 5.8 observa-se que para alto ângulo a média da incrustação relativa é maior do que para baixo ângulo de ataque. Isto porque ao atingir a face, o fluxo de erodentes incide numa menor área da superfície do revestimento e a energia cinética, toda na componente vertical do vetor, juntamente com a morfologia angular do erodente propiciaria uma maior incrustação^[26].

5.3.1 Efeitos gerados pela incrustação

Para alto ângulo (90°) e com alta velocidade (50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) as partículas incrustariam-se pelos subsequentes ataques perpendiculares à face numa menor área, ocasionando incrustação profunda das partículas erodentes (de formato irregular) causando ondulações pela deformação plástica resultante do ataque, que encruaria mais rapidamente a liga comparativamente à ataques com baixa velocidade. Com energia cinética suficiente, ocorreria simultaneamente achatamento dos picos das ondulações, posterior dobramento e remoção das bordas extrudadas paralelas à superfície, conforme Islam^[26], Hutchings^[43-45] e Finnie^[46], e remoção de material vulnerável, da rugosidade inicial e formados pela repetida incidência de erodente. Ao passo que a reincidência de ataque a um mesmo ponto de incrustação (que seria mais evidente em maior Q_a por se ter uma menor área livre de incrustação) faria com que as partículas erodentes fossem ricocheteadas removendo metal das regiões adjacentes, promovendo um mecanismo secundário de erosão, este favorecido com mais energia cinética disponível^[26].

Em baixa velocidade o erodente, sem energia cinética suficiente para um maior encruamento da superfície num primeiro momento, acabaria por se incrustar mais^[31]. Então devido às subseqüentes colisões de partículas erodentes, estas por fim encruariam a liga ao deformá-la plasticamente, como para formar elevações adjacentes ao ponto de incrustação. Isto resultaria num maior desgaste já que se teria uma maior área relativa de incrustação, mais pretuberâncias vulneráveis ao ataque e aparecimento de microtrincas que causariam a propagação de *microcracks*^[26, 32].

Mas, ao longo do processo erosivo, as partículas incrustadas juntamente com as “ilhas” de fragmentos de abrasivo e pedaços de metal desgastado, acabariam atuando no sentido de blindar a liga devido a característica de reforço que a superfície passaria a ter, pelas diferentes respostas mecânicas localizadas ao longo da marca de erosão, que aumenta a resistência ao impacto nas áreas em que o erodente fica aderido ao revestimento^[31, 58]. Esse fator é aumentado para maiores ângulos pois, ao decorrer do processo de desgaste erosivo, o material do revestimento passaria a se comportar como um compósito^[26], porém com baixa adesão partícula/matriz (neste caso alumina/liga FeCr) o que favoreceria assim o reforço ao impacto a alto ângulo, pois os esforços cisalhantes seriam baixos. Este processo atuaria diminuindo a taxa de desgaste, fator mais acentuado nos ensaios a 25 m.s^{-1} , o de maior Qa .

Assim a liga estudada, desgastada junto à normal da face (90°), apresenta maior média de incrustação relativa (Q_a), alta deformação plástica da superfície e, somada a blindagem, mecanismos menos agressivos de arrancamento de material quando comparado a ângulos menores (30°). Ao passo que a maior incrustação relativa e a maior blindagem, a 25 m.s^{-1} , e a remoção secundária de material juntamente com o maior encruamento, para 50 m.s^{-1} , atuariam de maneira a quase igualar a perda de massa nos ensaios erosivos. Pela Figura 5.9 são apresentadas micrografias das superfícies erodidas a 90° . Nela, observa-se a deformação plástica em ambas as condições, apontados pelas setas, e presença de aglomerado de fragmentos e incrustação de erodente (acompanhada de microtrincas), circulosados nesta.

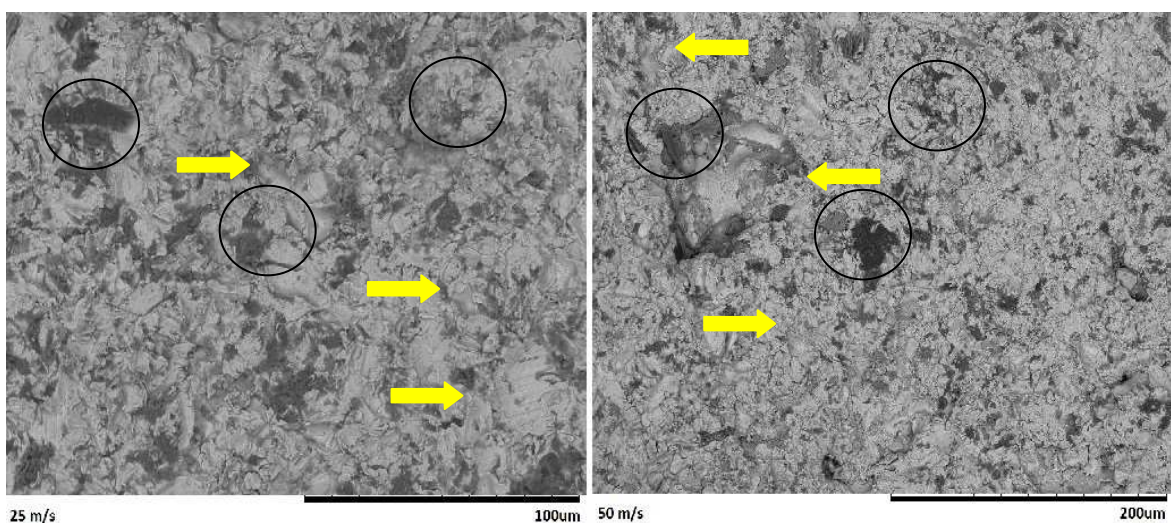


Figura 5.9: Micrografias das amostras erodidas a 90° . À esquerda, aumento de 800x, em 25 m.s^{-1} , à direita, em 400x, com 50 m.s^{-1} . Apontados pelas setas exemplos de deformação plástica e, circulosados, presença de ilhas de fragmentos e incrustação (acompanhadas de microtrincas).

Para baixo ângulo de ataque (30°), a velocidade é decomposta e a energia cinética disponível para a incrustação é menor, fazendo com que o desgaste ao final do ensaio erosivo tenha menor profundidade, como visto por Islam^[26], mas acaba por atingir uma maior área da superfície.

A $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a componente vertical da velocidade de ataque do erodente é responsável por penetrar na matriz e sem energia suficiente para cortar, pela componente horizontal, terminaria por incrustar mais do que em alta velocidade. Ao mesmo tempo, as partículas desbastariam saliências (*ploughing*) da rugosidade da superfície e protuberâncias vulneráveis do posterior encruamento da liga (formação de *platelets*), pelas frequentes colisões de alumina, especialmente ao redor de pontos de incrustação. Este encruamento atuaria interconectando microtrincas adjacentes a incrustação (*microcracks*), frente à incidência sucessiva do ataque erosivo, e assim desprenderia material de maneira frágil. Este é um mecanismo mais agressivo de erosão que o de microcorte^[26, 32, 42-46] especialmente em ensaios a baixo ângulo^[32], por facilitar a propagação das microtrincas, e em baixa velocidade, por se ter uma maior Q_0 .

Já a $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o fluxo incidente de erodente, com maior energia cinética disponível, tenderia a remover material protuberante via corte de metal a baixo ângulo (microcorte), mas também aí atuariam mecanismos de *ploughing* e *microcracks*^[26, 42, 46], este último devido especialmente a incrustação. A remoção de protuberâncias vulneráveis da rugosidade inicial e elevações adjacentes a depressões, somadas aos menos frequentes *cracks*, devido à menor incrustação relativa, constituem o quadro dos mecanismos que atuariam em alta velocidade e 30° de ângulo de ataque de erosivo. Logo, por apresentar menor incrustação relativa, o mecanismo responsável por uma maior taxa de erosão atuaria menos e promoveria menor perda de massa do revestimento estudado em relação a baixa velocidade, mas ainda assim superior comparados à desgastes sob alto ângulo.

A Figura 5.10 traz micrografias das amostras atacadas a baixo ângulo. Observa-se a menor presença relativa do incrustante (exemplos circulados) e vestígios dos mecanismos que estariam presentes nessas condições: os arranhões do sulcamento (*ploughing*), o microcorte mais acentuado em altas velocidades (apontados por setas), e a incrustação acompanhada de trincas adjacentes (circuladas), causadoras de *microcracks*.^[26, 32, 42, 46]

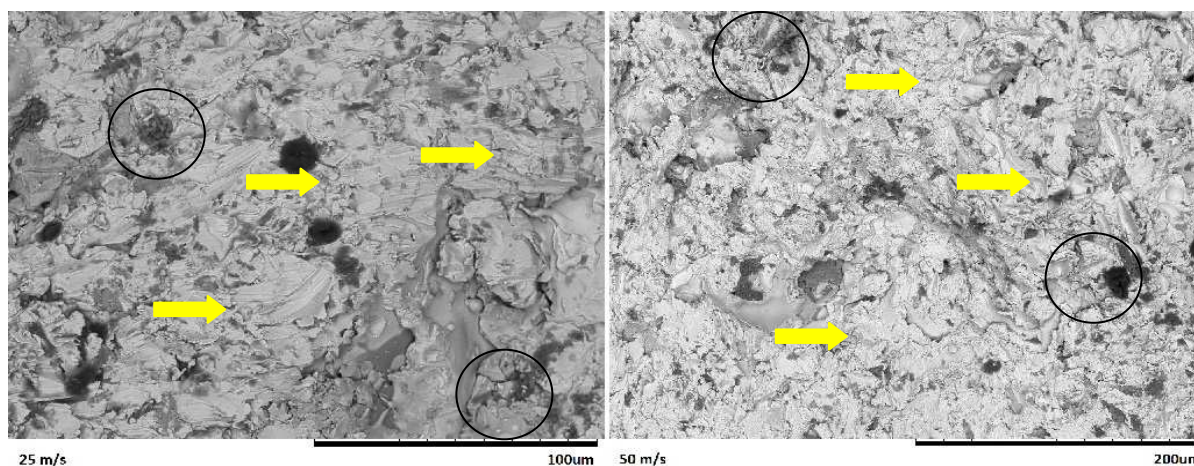


Figura 5.10: Micrografias das amostras erodidas a 30° . À esquerda, em 800x, em baixa velocidade, incrustação e trincas (círculos) e sulcamento (*ploughing* – setas). À direita, em 400x, incrustação e trincas adjacentes (círculos), *ploughing* e microcorte (setas).

Assim para baixo ângulo, a liga estudada apresenta maior taxa de desgaste erosivo, porque removeria metal via microcorte, sulcamento (*ploughing*) da superfície e, principalmente, pela propagação de microtrinças nas regiões adjacentes a incrustação, que apresentam alto encruamento, e acabam por arrancar pedaços relativamente grandes de material^[26, 58]. Esses mecanismos explicariam a maior taxa de desgaste aliado ao maior Qa em baixa velocidade e conferem um sistema mais agressivo de perda de material da superfície quando comparados a alto ângulo de ataque de erodente^[26].

5.4 Tamanho médio de partícula

A Figura 5.11 apresenta os resultados do tamanho médio da alumina erodente após o ensaio de erosão, o erodente apresentou uma redução no seu tamanho para todos os ensaios, como já estudado por Levy e Chick^[38].

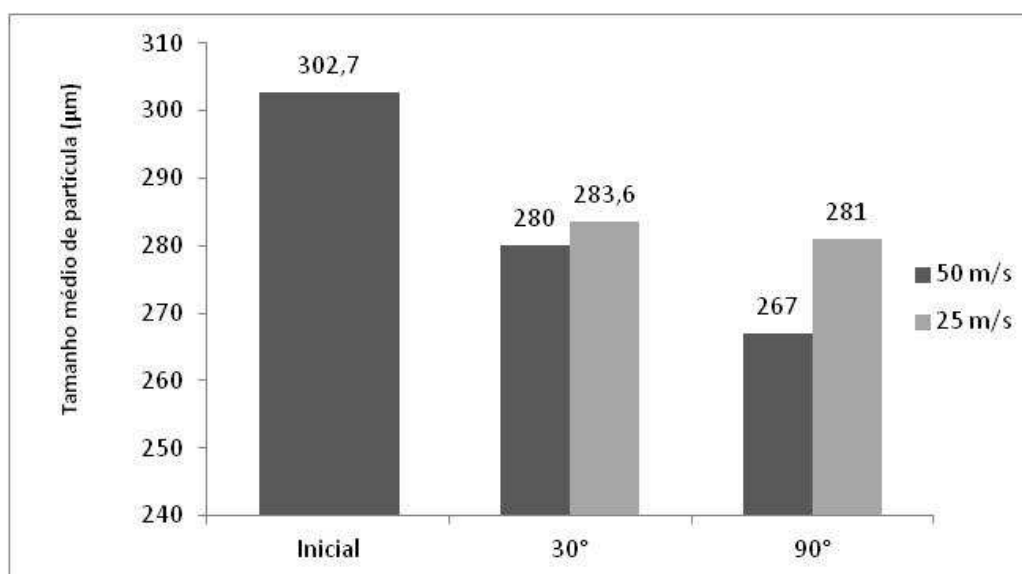


Figura 5.11: Tamanho médio do erodente (μm) antes e após o ensaio de erosão conforme velocidade e ângulo de ataque.

Para o ensaio onde se utilizou velocidade de 50 m.s^{-1} e ângulo de 90° observa-se um maior decréscimo do tamanho médio da alumina, quando comparada aos demais ensaios. Para tanto, acredita-se que nessa condição, ao desgaste gerar uma marca menor, o fluxo contínuo de abrasivo que colidiria diretamente nos pontos de incrustação, com energia cinética suficiente, acabaria por fragmentar mais o erodente, visto que se teria menos áreas livres de incrustação e maior efeito de blindagem^[26].

Também, sabe-se que nessas condições a superfície do revestimento frente às repetidas incidências de partículas erodentes, deformam o revestimento severamente acabando por encruá-lo^[26, 46, 61]. Este processo acarretaria numa maior redução da tamanho médio da alumina depois do ensaio, pois o encruamento do revestimento seria o mais evidente em ângulo reto e com maior velocidade de ataque de partícula^[62].

Os demais resultados a obtiveram respostas semelhantes, com uma menor variação no tamanho médio de partícula. Quando a incidência de erodentes é normal à superfície, sem a componente horizontal responsável pelo corte de metal e com pouca energia cinética, a alumina ao colidir não se fragmentaria por inteiro, mas deixaria pra trás apenas pequenos estilhaços seus^[26].

Já a partícula erodente a baixo ângulo e com a componente da velocidade dividida, acaba por se incrustar, como observado também por Islam *et al.*^[63,64], ou deixar pela superfície apenas pequenos estilhaços^[26]. Também deve-se ressaltar que em ataque oblíquo a reincidência do ataque a pontos de incrustação seria menos provável (mais área livre de incrustação – menor Q_a), o que também corrobora para que o erodente não sofra uma maior alteração no tamanho médio.

6 Considerações Finais

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

-Quanto às características do revestimento investigado:

O revestimento à base de FeCr depositado sobre um substrato de aço inoxidável 310 apresentou espessura média de $339 \pm 37 \mu\text{m}$, com porosidade média de 6,2% e massa específica de $7,84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Sua microestrutura apresentou lamelas de diferentes tamanhos, com aspecto fundido, ausência de cantos vivos e demonstrando o estado de plasticidade das partículas no momento do impacto com o substrato durante o processo de aspersão por arco elétrico.

-Quanto aos ensaios de resistência à erosão dos revestimentos:

A área da marca do desgaste erosivo foi aferida e considerada invariante para os ângulos de 30° e 90° , no valor de $1,49 \text{ cm}^2$ e $0,68 \text{ cm}^2$. O resultado da taxa de desgaste, mostrou que em baixo ângulo, a taxa de erosão foi mais acentuada, justificado pelos mecanismos mais agressivos neste, seguindo o comportamento da liga dúctil frente à erosão por partículas sólidas. Notou-se que a velocidade pouco influenciou no desgaste a 30° e quase nada no desgaste a 90° . O expoente n da Equação 3.1 pouco seria afetado pela velocidade nas condições do estudo (menor que $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e mais pelos mecanismos atuantes.

-Quanto à quantificação da incrustação do erodente:

Foi possível quantificar a incrustação relativa de erodente (alumina) por Q_a , que considerou que a área de erosão é variável conforme o ângulo de incidência, a porcentagem do elemento constituinte do erodente e a profundidade de interação elétrons e matéria na análise por EDS. Para alto ângulo (90°), houve uma maior média de incrustação relativa, pois dessa forma, ao atingir a superfície, o fluxo de erodentes incidiu sobre uma menor área do revestimento. A energia cinética não foi decomposta, ficando toda na componente vertical do vetor, e juntamente com a morfologia angular do erodente, propiciaria uma maior incrustação quando comparado a baixo ângulo de incidência (30°).

-Quanto à fragmentação do erodente:

Pode-se constatar uma pequena diminuição do tamanho de partícula para os ensaios de desgaste erosivos realizados nas diferentes velocidades e ângulos de ataque. No desgaste a $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e ângulo de 90° , observou-se um maior decréscimo no tamanho, quando comparada aos demais. Creditou-se o fato que nessa condição o desgaste geraria uma marca menor de erosão e juntamente com o fluxo contínuo de abrasivo que colidiria diretamente nos pontos de incrustação, com energia suficiente, acabaria por fragmentar mais o erodente, pois assim se teria menos áreas livres de incrustação e maior efeito de blindagem. Também se constatou que, nessas condições, a superfície do revestimento frente às repetidas incidências de partículas erodentes deformariam o revestimento

acabando por encruá-lo, contribuindo para se ter a maior variação no tamanho médio da partícula após o ensaio.

-Quanto à influência da incrustação do erodente na resistência à erosão:

Em alto ângulo (90°), verificou-se que a incrustação agiria blindando o revestimento e também atuaria na promovendo um mecanismo secundário de remoção de material adjacente às áreas incrustadas. Este último mais efetivo em alta velocidade (50 m.s^{-1}). E, principalmente, formaria deformações plásticas ondulares na superfície do revestimento que, ao decorrer do processo de erosão, as elevações destas seriam removidas, além de atuar interconectando microtrincas que originariam *microcracks*.

Em baixo ângulo (30°), ao apresentar maior incrustação relativa no ensaio erosivo quando comparada ao anterior, esta acabaria por conferir mecanismos mais agressivos de perda de material da superfície pela propagação de microtrincas nas regiões adjacentes a esta incrustação (*microcracks*), especialmente em baixa velocidade (25 m.s^{-1}), o ensaio com o maior Q_a , pois em alta velocidade (50 m.s^{-1}), a energia cinética decomposta, seria suficiente para cortar diretamente o metal (microcorte).

7 Conclusão

A partir da elaboração de um novo método, que leva em conta a área desgastada (já que esta varia conforme o ângulo de ataque) pode-se avaliar a quantidade relativa da incrustação de partículas erodentes nos ensaios de desgaste erosivo em diferentes velocidades e ângulos de incidência.

Ao decorrer do ensaio de desgaste erosivo essas partículas atuam modificando os mecanismos de erosão presentes e, ao fim, mascaram os resultados da taxa de erosão. Quando se chega ao fim do ensaio, a massa final do corpo-de-prova, depois de passar por um processo de limpeza no ultrassom para se remover os fragmentos de partícula e metal, ainda contém as partículas de alumina que se incrustaram no revestimento estudado. Essa quantidade de material abrasivo aderido pode-se ser quantificada e devidamente descontada da massa final do corpo-de-prova, fornecendo assim o resultado corrigido da taxa de desgaste da liga FeCr. Por conta da maior marca de desgaste, os ensaios a baixo ângulo tiveram as maiores alterações na taxa de erosão devido a incrustação.

Pode-se concluir que os erodentes frágeis que aderem à superfície do revestimento, ao longo do processo de erosão por partículas sólidas, alteram o comportamento local deste, no sentido de aumentar a resistência ao impacto, haja vista o aumento da dureza comparado ao da matriz dúctil FeCr, bem como atuam favorecendo mecanismos mais agressivos de desgaste. Nota-se assim que, em meio ao ensaio erosivo, o que de fato se caracteriza é a taxa de desgaste de diferentes materiais combinados, análogo a um compósito de baixa aderência entre reforço e matriz. Neste estudo a alumina atuaria como o reforço de uma matriz FeCr.

Corroborando para tal fato, as partículas erosivas ao colidir se fragmentaram e, com mais energia cinética disponível, tiveram uma maior redução do seu tamanho médio após os ensaios, evidenciando assim a atenuação da taxa em que um material é erodido frente à incrustação relativa de erodente.

De modo geral conclui-se que com o aumento da quantidade relativa de alumina incrustada, Q_a , em um ensaio de desgaste erosivo por partículas sólidas, diminui-se a massa final do corpo-de-prova testado e há um aumento na taxa de erosão da liga estudada, tanto pelo acréscimo de massa como pela interferência nos mecanismos de desgaste erosivo.

8 Sugestões para 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 temperaturas;
- iii. Avaliar a influência de diferentes tamanhos de partículas para a incrustação do erodente no revestimento;
- iv. Avaliar a incrustação de erodentes com diferentes morfologias e 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.

9 Referências Bibliográficas

- 1 - **Chief, B.F.A.M.; Jose G.**; Thermal Spraying Materials Survey, in California Environmental Protection Agency. 2003. Tipton, A., *The Effect of HVOF Thermal Spray on the Elevated Temperature High Cycle Fatigue Behavior of a Martensitic Stainless Steel*. TP101, 2002.
- 2 - **Herman, H.Y.S.**; *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application: Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 10-12 May, 2004, Osaka, Japan. 2004: ASM International.
- 3 - **Davis, J. R.; A. S. M. I. T. S. S. T. Committee**; *Handbook of Thermal Spray Technology*. 2004: ASM International.
- 4 - **Lima, C.C.T., R.**; *Aspersão térmica – fundamentos e aplicações*. 1ed ed. 2001, São Paulo: Artliber Editora.
- 5 - **Castolin, E.**; *Catálogo Geral de Aspersão Térmica - Metalização*, E. Castolin, Editor. 2013: São Paulo.
- 6 - **TWI-Global**; [http:// www.twi-global.com/ technical-knowledge/ faqs/ process-faqs/ faq-what-types-of-arc-spraying-equipment-are-available/](http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-types-of-arc-spraying-equipment-are-available/). 2014 [visitado em 2014, abril].
- 7 - **C. Kajdas, S.S.K.H.**; *Encyclopedia of Tribology*. Tribology and Interface Engineering. 1990: Elsevier.
- 8 - **Bayer, R.G.**; *Mechanical wear prediction and prevention*. 1994: M. Dekker.
- 9 - **ASM, N.I.**; *ASM Handbook - Friction, Lubrification and Wear Technology*, in 18. 1992.
- 10 - **DIN, N.**; *Análise Sistemática dos Processos de Desgaste. Classificação dos Fenômenos de Desgaste. Metalurgia & Materiais*. 1997.
- 11 - **Budinski, K.G.**; *Surface engineering for wear resistance*. 1988: Prentice Hall.
- 12 - **Rateick, K. R.; Karasek, A. J.; Cunningham, K. C.; Goretta, J. L.; Routbort, R. G.**; *Solid particle erosion of tungsten carbide/cobalt cermet and hardened 440C stainless steel - a comparison*, *Wear* 261. 2006.
- 13 - **Wood, R. J. K** *Erosion–corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials*, *Wear* 261. 2006.
- 14 - **Vite-Torres, M.; Laguna-Camacho, J. R. ;Baldenebro-Castillo, R. E.; Gallardo-Hernández, E. A.; Vera-Cárdena, E. E.; Vite-Torres, J.**; *Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round particles*, *Wear* 301. 2013.

-
- 15 - **O'Flynn, D. J.; Bingley, M. S. A.; Bradley, A. J; Burnett, A.J;** *A model to predict the solid particle erosion rate of metal sandblasts assessment using heat-treated steels*, Wear 248. 2001.
 - 16 - **Liebhard, M.; Levy, A.;** *The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals*, Wear 151. 1991.
 - 17 - **Divakar, M.; Agarwal, V. K.; Singh, S. N.;** *Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI 316*, Wear 259. 2005.
 - 18 - **Clark, H.; Hartwich, R.B.;** *Are-examination of the 'particle size effect' in slurry erosion*, Wear 248. 2001.
 - 19 - **M.S. El Tobgy, M. A. Elbestawi;** *Finite element modeling of erosive wear*, Int. J. Mach. Tools 45. 2005.
 - 20 - **Finnie, I.; Stevick, G. R.; Ridgely, J. R.;** *The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles*, Wear 152. 1992.
 - 21 - **Zum-Gahr, K.-H.;** *Microstructure and Wear of Materials*, Tribology Series. Elsevier, 1987.
 - 22 - **Lopez, J. P.; Congote, J. R.; Cano, A. P.; Toro, A. P.; Tschiptschin, D.;** *Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion-erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels*, Wear 259. 2005.
 - 23 - **Tilly, G.P.;** *A two stage mechanism of ductile erosion*, Wear 23. 1973.
 - 24 - **Stevenson, A. N. J.; Hutchings, I.M.** *Scaling laws for particle velocity in the gas-blast erosion test*, Wear 181-183. 1995.
 - 25 - **Desale, G. R.; Gandhi, B.K.; Jain, S. C.** *Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition*, Wear 264. 2008.
 - 26 - **Md. Aminul Islam, Zoheir N. Farhat,** *Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate*, Wear 311. 2014.
 - 27 - **Edington, J.W.; Wright, I.G.** *Study of particle erosion damage in Haynes stelite 6B, I: scanning electron microscopy of eroded surfaces*. Wear 48, 1978.
 - 28 - **Edington, J.W., ;Wright I.G.** *Study of particle erosion damage in Haynes stelite 6B, II: scanning electron microscopy of eroded surfaces*. Wear 48, 1978.
 - 29 - **Ives, L.K; Ruff, A.W.** *Electron microscopy study of erosion damage in copper, in erosion: prevention and useful applications*, STP 664. ASTM, 1979.
 - 30 - **Ruff, A.W; Wiederhorn, S.M;** *Erosion by solid particle impact*. Treat Mater Sci Technol,16. 1979.
 - 31 - **Kosel, T.H; Scattergood, R.O; Turner, A.P.L;** *An electron microscope study of erosive wear. In: Proceedings of international conference on wear of material*, ASME, 1979.

-
- 32 - **Rajahram, S. S.; Harvey, T. J.; Walker, J. C.; Wang, S. C.; Wood, R. J. K.** *Investigation of erosion–corrosion mechanisms of UNS S31603 using FIB and TEM*, Tribology International, 46. 2012.
- 33 - **Goodwin, J.E.S., W.; Tilly, G.P.**, *Process Instrumental of Mechanical Engeneering*. 1970.
- 34 - **Zhou, J. R.; S. Bahadur**, *Effect of blending of silicon carbide particles in varying sizes on the erosion of Ti-6Al-4V*. Wear, 1989.
- 35 - **Yerramareddy, S.; S. Bahadur**, *Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V*. Wear, 1991.
- 36 - **Bahadur, S.; R. Badruddin**, *Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion*. Wear, 1990.
- 37 - **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.
- 38 - **Levy, A.V. ; P. Chik**, *The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel*. Wear, 1983.
- 39 - **Kleis, I.**, *Probleme der Bestimmung des Strahlverschleisses bei metallen*. Wear, 1969.
- 40 - **Reddy, A.V. ; G. Sundararajan**, *The influence of grain size on the erosion rate of metals*. Metallurgical Transactions A, 1987.
- 41 - **Levy, A.V.**, *Solid Particle Erosion and Erosion-corrosion of Materials*. ASM International, 1995.
- 42 - **Hutchings, I.M.**, *Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals*. Proc. Conf. on Corrosion-Erosion of Coal Conversion System Materials, 1979.
- 43 - **Hutchings, I.M.; T.J. O'Brien**, *Normal impact of metal projectiles against a rigid target at low velocities*. International Journal of Mechanical Sciences, 1981.
- 44 - **Hutchings, I.M.**, *A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence*. Wear, 1981.
- 45 - **Hutchings, I.M.; A.V. Levy**, *Thermal effects in the erosion of ductile metals*. Wear, 1989.
- 46 - **Finnie, I.**, *Some reflections on the past and future of erosion*. Wear, 1995.
- 47 - **Cousens, I.M.H.A.K.**, *Proc. 6th. Int. Conf. on Erosion By Liquid and Solid Impacts*. 1983.
- 48 - **Goldstein, J.I.**, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis - A Textbook for Biologist, Materials Scientists and Geologists*. 1992.
- 49 - **Treibacher**, <http://www.treibacher.com.br/tribacher-schleifmittel-brasil-portuques-processos-micronizacao.php>. 2014 [visitado 2014, abril].

-
- 50 – **ImageJ**; <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>. 2014.
- 51 - **Deshpande, S. et al.**; *Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering*. Surface & Coatings Technology, v. 187, 2004.
- 52 - **ASTM, G.-N.**; *Annual Book of ASTM Standards*. 1992. p. 160.
- 53 - **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.
- 54 - **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.
- 55 - **Hovis, S.K., et al.**; *A new method of velocity calibration for erosion testing*. Wear, 1985.
- 56 - **Humphrey, J.A.C.**; *Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1990.
- 57 - **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.
- 58 - **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.
- 59 - **Pawlowski, L.**; *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. Wiley, 2008.
- 60 – **Sevostianov, I et al.** *Quantitative characterization of microestutures of plasma-sprayed coatings and their conductive and elastic properties*. Mater. Sci. Eng. A, 2004.
- 61 - **Callister, W.D.; Rethwisch, D.G.**; *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 2012.
- 62 - **Celotta, D.W.; Qureshi, U.A.; Stepanov, E.V; Goulet, D.P.; Hunter, J. ;Buckberry, C.H.; Hill, R.; Sherikar, S.V.; Moshrefi-Torbati, M.; Wood, R.J.K.**; Wear 263. 2007.
- 63 - **Islam, M. A.; Farhat, Z.N.; Ahmed, A. M.**; *Erosion enhanced corrosion and corrosion enhanced erosion of APIX-70 pipe line steel*, Wear 302. 2013.
- 64 - **Islam , M.A.; Farhat, Z.N.**; *The synergistic effect between erosion and corrosion of API papie line in CO2 and saline medium*, Tribol. Int. 68. 2012.

65 – **Krause, J.**; *Physical and Chemical Reference Data*, 8, 307–27. 1979.