

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

RENATO CAMPONOGARA PANZIERA

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DOS REVESTIMENTOS DE Fe-29Cr-4B-1,75Si E WC-
10Co-4Cr POR ASPERSÃO TÉRMICA PARA REDUÇÃO DO DESGASTE
ABRASIVO E EROSIVO RESULTANTE DA AÇÃO DO GRÃO DE ARROZ**

**Alegrete
2019**

RENATO CAMPONOGARA PANZIERA

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DOS REVESTIMENTOS DE Fe-29Cr-4B-1,75Si E WC-
10Co-4Cr POR ASPERSÃO TÉRMICA PARA REDUÇÃO DO DESGASTE
ABRASIVO E EROSIVO RESULTANTE DA AÇÃO DO GRÃO DE ARROZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharias.

Área de concentração: Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier

Coorientadora: Ana Claudia Costa de Oliveira

**Alegrete
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

P199e Panziera, Renato Camponogara
Estudo tribológico dos revestimentos de Fe-29Cr-4B-1,75Si e
WC-10Co-4Cr por aspensão térmica para redução do desgaste
abrasivo e erosivo resultante da ação do grão de arroz /
Renato Camponogara Panziera.
73 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2019.
"Orientação: Marco Antônio Durlo Tier".

1. Arroz. 2. Casca. 3. Desgaste. 4. Tribológico. 5.
Revestimentos. I. Título.

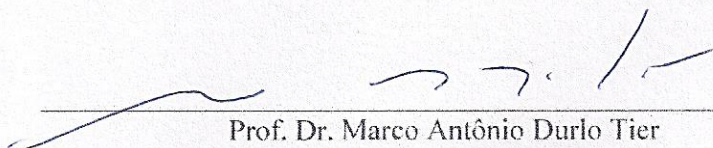
RENATO CAMPONOGARA PANZIERA

ESTUDO TRIBOLÓGICO DOS REVESTIMENTOS DE Fe-29Cr-4B-1,75Si E WC-10Co-4Cr POR ASPERSÃO TÉRMICA PARA REDUÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO E EROSIVO RESULTANTE DA AÇÃO DO GRÃO DE ARROZ

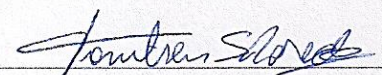
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharias.
Área de concentração: Tecnologia de Materiais.

Dissertação defendida e aprovada em: 04 de abril de 2019.

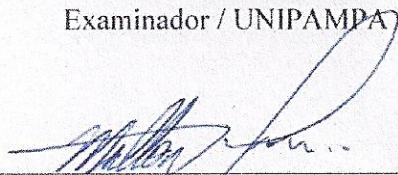
Banca examinadora:



Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier
Orientador / UNIPAMPA



Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo
Examinador / UNIPAMPA



Prof. Dr. Milton Pereira
Examinador / UFSC

Dedico este trabalho ao meus pais e ao meu irmão que sempre estiveram ao meu lado dando todo suporte e apoio necessário.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido saúde, foco e persistência, sempre colocando pessoas boas no meu caminho.

Ao Professor Dr. Marco Antônio Durlo Tier por ter me acolhido gentilmente como orientando transmitindo seus conhecimentos com muita paciência e empenho.

A Professor Dr. Ana Claudia Costa de Oliveira por ter me coorientado ao longo de todos os testes e ensaios, sempre buscando o aprimoramento.

Ao professor Dr. Milton Pereira da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e ao professor Dr. Tonilson de Souza Rosendo pela colaboração e avaliação deste trabalho.

A empresa Rijeza Metalurgia pela confecção e doação dos corpos de provas utilizados durante os ensaios.

Aos meus pais Delcio e Nilva e ao meu irmão Dionizio por sempre estarem ao meu lado, apoiando-me em minhas decisões.

Aos professores, aos amigos, coordenação, técnicos e aos funcionários do PPEng pelos ensinamentos, parcerias e gentilezas durante este período.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

A produção do arroz é a terceira maior do mundo dentre seis mil espécies de cereais estando atrás apenas do milho e do trigo. Componentes de máquinas que trabalham sob o contato direto com o grão de arroz sofrem desgaste severo devido à natureza abrasiva de sua casca. Dessa forma, o objetivo principal deste estudo é investigar o comportamento tribológico do revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si aspergido pelo método de arco elétrico com arame e do revestimento de WC-10Co-4Cr aspergido pelo método *high velocity oxygen fuel* - HVOF, ambos em substrato de aço carbono SAE 1016. Foram realizados o ensaio de desgaste abrasivo utilizando a norma ASTM G65 que utiliza areia como abrasivo e uma variação empregando a casca de arroz como material abrasivo. Além disso, foi investigado o comportamento tribológico *in situ* dos revestimentos em uma estrutura de secagem de arroz com capacidade de processamento de 70 t/h. Os revestimentos foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X e microdureza. Como resultado principal percebeu-se que o revestimento com maior microdureza (WC-10Co-4Cr) apresentou as menores taxas de desgaste durante os ensaios. Analisando os mecanismos de desgaste sob os revestimentos e substrato, ao utilizar a areia como material abrasivo (ensaio ASTM G65), o material foi removido por riscamento enquanto ao utilizar a casca de arroz o mecanismo de desgaste ocorreu por microcortes. Outro ponto importante foi o fato de as amostras terem sofrido elevada perda de volume por desgaste erosivo ao serem submetidas ao desgaste dentro da estrutura de secagem de arroz, *in situ*.

Palavras-chave: Arroz; casca; desgaste; tribológico; revestimentos.

ABSTRACT

Rice production is the third largest in the world out of six thousand species of cereals being behind only corn and wheat. Components of machines that work under direct contact with rice grain suffer severe wear due to the abrasive nature of their husk. Thus, the main objective of this study is to investigate the tribological behavior of the Fe-29Cr-4B-1.75Si coating sprayed by the electric arc with wire method and the WC-10Co-4Cr coating sprayed by the high velocity oxygen fuel - HVOF, both on SAE 1016 carbon steel substrate. The abrasive wear test was performed using ASTM G65 standard which uses sand as an abrasive and a variation employing the rice husk as an abrasive material. Furthermore, the in situ tribological behavior of the coatings in a rice drying structure with processing capacity of 70 t/h was investigated. The coatings were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction and microhardness. As a main result it was noticed that the coating with higher microhardness (WC-10Co-4Cr) showed the lowest wear rates during the tests. Analyzing the wear mechanisms under the coatings and substrate when using the sand as an abrasive material (ASTM G65 test), the material was removed by scratches while using the rice husk the mechanism of wear occurred by micro cuts. Another important point was the fact that the samples suffered a high loss of volume due to erosive wear when subjected to wear inside the rice drying structure, in situ.

Keywords: Rice, husk; wear; tribological; coatings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de aspersão térmica.....	20
Figura 2 - Divisão dos processos de aspersão térmica.	21
Figura 3 - Detalhamento da formação do revestimento.	23
Figura 4 - Esquema ilustrativo de uma tocha de aspersão por arco elétrico com arame.....	25
Figura 5 - Esquema ilustrativo de uma tocha de aspersão HVOF.....	27
Figura 6 - Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões.	31
Figura 7 - Ângulo de impacto do erodente.	32
Figura 8 - Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto na taxa de desgaste de materiais dúcteis e frágeis.....	32
Figura 9 - Variação da taxa de erosão conforme o ângulo de impacto com erodentes de morfologia angular, representados pelo triângulo, e erodentes esféricos, representados pelo círculo.	34
Figura 10 - Variação da taxa de erosão com o tamanho de partícula para um aço, utilizando ângulo de impacto normal e diferentes velocidades de impacto.	34
Figura 11 - Processo de desgaste abrasivo: (a) e (b) abrasão por 2 corpos e (c) abrasão por 3 corpos.	36
Figura 12 - Micromecanismos de desgaste abrasivo: (a) microsulcamento, (b) microcorte, (c) microfadiga e (d) microtrinca.	38
Figura 13 - Fluxograma do procedimento experimental.	41
Figura 14 - Equipamento utilizado para o ensaio de desgaste (a) ASTM G65 e (b) representação esquemática do equipamento.....	43
Figura 15 - Ilustração do funcionamento de um secador de grãos.	44
Figura 16 - Visão geral do local de aplicação dos corpos de prova.	45
Figura 17 - (a) CPs antes da montagem no secador e (b) fixados no duto de ar de secagem...46	
Figura 18 - Pó de WC-10Co-4Cr observado por MEV: (a) 500X e (b) 1,50 KX.	48
Figura 19 - Superfície dos revestimentos aspergidos com (a) Fe-29Cr-4B-1.75Si, (b) WC-10Co-4Cr e (c) substrato de aço preparado.	49
Figura 20 - Seção transversal do revestimento de WC-10Co-4Cr observado por MEV com ampliações de (a) 300X e (b) 800X.....	50
Figura 21 - Seção transversal do revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si observado por MEV com ampliações de (a) 200X e (b) 800X.....	50

Figura 22 - Difractogramas do arame de Fe-29Cr-4B-1.75Si e de seu revestimento (a), e do pó de WC-10Co-4Cr e de seu revestimento (b).	51
Figura 23 - Microdureza da seção transversal dos revestimentos de WC-10Co-4Cr, Fe-29Cr-4B-1.75Si e substrato de aço.	52
Figura 24 - Perda de volume das amostras no decorrer do tempo com ensaio ASTM G65.....	52
Figura 25 - Perda de volume do ensaio ASTM G65 com duração de 20 minutos.	53
Figura 26 - Perda de volume em função do tempo para ensaio com casca de arroz.	54
Figura 27 - Perda de volume do ensaio de desgaste com casca de arroz com duração de 20 minutos.	55
Figura 28 - Corpos de prova que sofreram desgaste com areia e casca de arroz.	56
Figura 29 - Chapa de aço com os corpos de prova depois do contato com arroz: (a) fixada do duto de ar e (b) após finalização do ensaio.....	57
Figura 30 - Perda de volume das amostras revestidas (ensaio em campo).....	58
Figura 31 - Comparação da perda de volume média dos CPs com e sem revestimento para o ensaio em campo.	59
Figura 32 - Taxa de desgaste erosivo em função do ângulo de impacto de partículas.....	59
Figura 33 - Imagens pelo MEV da morfologia da superfície das trilhas de desgaste no revestimento de: Fe-29Cr-4B-1.75Si (a e b), WC-10Co-4Cr (c e d) e substrato (e f), com areia e casca como material abrasivo respectivamente. Todas as amostras sofreram desgaste na direção ilustrada pela figura (f).	61
Figura 34 - Imagens pelo MEV da morfologia da superfície das trilhas de desgaste no revestimento de: Fe-29Cr-4B-1.75Si (a), WC-10Co-4Cr (b) e substrato (c) para o ensaio em campo. Todas as amostras sofreram desgaste na direção ilustrada pela figura (c).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do pó de WC-10Co-4Cr.....	42
Tabela 2 - Composição química do arame tubular de ferro com alto teor de cromo.	42
Tabela 3 - Taxa de desgaste e índice de resistência ao desgaste (WRI) para o ensaio em campo.	60
Tabela 4 - Tabela do tempo estimado de vida útil para ensaio ASTM G65.....	64
Tabela 5 - Tabela de tempo estimado de vida útil para ensaio de abrasão com casca de arroz como abrasivo.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASP	Air Plasma Spray
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CPs	Corpos de Prova
D-Gun	<i>Detonation Gun</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EAS	<i>Electric Arc Spraying</i>
HV	Microdureza Vickers
HVOF	<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i>
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
WAS	<i>Wire Arc Spray</i>
WRI	Índice de resistência ao desgaste
XRD	<i>X-ray diffraction</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Densidade
K	Condutividade térmica
k	constante
m_l	Perda de massa
p	Expoente adimensional que depende do tipo de material
Ra	Rugosidade média
v_l	Volume perdido
V	<i>Velocidade de impacto</i>
ΔE	Taxa de erosão

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Objetivos	19
2	Fundamentação teórica.....	20
2.1	Aspersão térmica	20
2.1.1	Microestrutura de revestimentos.....	23
2.1.2	Preparação do substrato	24
2.1.3	Aspersão a Arco elétrico (EAS)	25
2.1.4	Aspersão HVOF com pó de WC-Co	27
2.2	Desgaste.....	30
2.2.1	Desgaste erosivo	31
2.2.2	Desgaste abrasivo	35
2.2.3	Ensaio abrasivo	38
2.3	Estado da arte	39
3	Procedimento experimental.....	41
3.1	Material	41
3.2	Amostras.....	42
3.3	Ensaio.....	43
3.3.1	Ensaio abrasivo	43
3.3.2	Ensaio de desgaste em campo.....	44
3.4	Análise microestrutural	46
4	Resultados e Discussão	48
4.1	Caracterização dos revestimentos aspergidos por HVOF e Arco Elétrico.....	48
4.2	Ensaio de microdureza	51
4.3	Ensaio de desgaste laboratorial	52
4.4	Ensaio de desgaste em campo	56

4.4.1	Avaliação visual dos corpos de prova	56
4.4.2	Perda de volume e taxa de desgaste.....	57
4.5	Mecanismos de desgaste	60
4.5.1	Mecanismos de desgaste para o ensaio de desgaste laboratorial	60
4.5.2	Mecanismos de desgaste para o ensaio de desgaste em campo.....	62
4.6	Viabilidade econômica	63
5	Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.....	66
5.1	Conclusões.....	67
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O arroz é uma das culturas agrícolas mais populares do mundo. Segundo a *United States Department of Agriculture* [USDA - 2018], a China é o maior produtor de arroz do mundo, enquanto o Brasil ocupa o nono lugar. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE - 2018], o prognóstico do Brasil para 2018 da produção de arroz em casca é de 11,5 milhões de toneladas, sendo o estado do Rio Grande do Sul o maior produtor do país, com participação de aproximadamente 70%, seguido do estado de Santa Catarina, com 9,5%.

Máquinas e equipamentos de debulha e triagem de grãos são suscetíveis aos principais tipos de desgaste, em especial os desgastes abrasivo e erosivo. O uso de máquinas para processamento de arroz com casca resulta em um desgaste relativamente maior devido ao grão ser altamente abrasivo, conforme reportado por CAMACHO, LEWIS E DWYER [2007] em seu estudo sobre a natureza e as causas do desgaste em uma máquina de triagem de arroz. Neste sentido, é essencial minimizar o desgaste que pode levar à destruição irreversível de componentes mecânicos sob condições de trabalho severo.

Os processos de aspersão térmica estão sendo amplamente difundidos, a fim de melhorar a proteção de superfícies contra a corrosão e desgaste [UYULGAN et al., 2007]. A maioria das aplicações envolve a combinação de impacto, erosão e desgaste de contato, exigindo assim, revestimentos com elevada dureza e tenacidade [SMITH et al., 2016].

Revestimentos de metal duro depositados por aspersão térmica são a solução padrão para proteção contra desgaste de componentes na indústria petroquímica, aeroespacial e alimentos, entre outras. O metal duro é conhecido por sua resistência ao desgaste e as composições mais comuns usadas na aspersão térmica são WC-Co/Ni [MATIKAINEN et al., 2017]. Os grãos de carboneto de tungstênio (WC) proporcionam alta dureza e resistência ao desgaste, enquanto o Co contribui para a tenacidade [JIANG et al., 2016].

Após a comparação entre quatro tipos de revestimentos: WC-12Co, WC-7Co-2Cr, WC-10Co-4Cr e WC-12Co(60NiCr), MASUKU et al. [2015] concluíram que o revestimento de WC-10Co-4Cr apresenta a maior resistência ao desgaste em um ambiente úmido de deslizamento de minas.

MA et al. [2017] reportam que, entre as várias técnicas de aspersão térmica, o processo oxi-combustível de alta velocidade - HVOF (*high velocity oxygen fuel*) é conhecido

pelo alto valor de energia cinética e pela temperatura relativamente baixa da chama, o que favorece a formação de uma estrutura amorfa com diminuição da porosidade e do teor de óxido, resultando em uma melhor resistência ao desgaste dos revestimentos.

Segundo FEDERICI, M. et al. [2016], a aspersão térmica por HVOF é considerada um dos melhores métodos para depositar pós de WC-Co, tendo em vista a combinação de maior taxa e menor temperatura de deposição em relação a outros processos de aspersão baseados em plasma, resultando em revestimentos mais densos e bem aderidos [RODRÍGUEZ et al., 2014]. Além disso, ABU-AESH [2008] reporta que os revestimentos de HVOF exibem uma melhor resistência à corrosão e à erosão do que os revestimentos fabricados por processos tradicionais, como plasma ou a fogo.

Os revestimentos de WC-10Co-4Cr processados com HVOF são caracterizados pela elevada resistência ao desgaste e corrosão devido à baixa porosidade, alta dureza, alta tensão de compressão e adesão [LIU et al., 2017].

Outro processo de aspersão térmica muito utilizado é o processo por arco de arame (WAS - *Wire Arc Spray*), que utiliza como matéria-prima arame tubular. Esta técnica vem encontrando inúmeras aplicações industriais em revestimentos duros, especialmente onde resistência ao desgaste e à erosão são importantes. Os arames tubulares com um envelope dúctil de metal ou liga contendo partículas duras estenderam o uso de WAS a campos mais amplos anteriormente dominados por outros processos, como a aspersão com plasma e HVOF [FIZI et al., 2015].

Nos últimos anos, as ligas de FeCr têm recebido atenção especial como materiais resistentes à oxidação em elevadas temperaturas e elevada resistência ao desgaste, atendendo exigências das concessionárias de energia com a finalidade de aumentar a eficiência térmica das usinas de geração de energia a partir de combustíveis fósseis. A adição de Cr à liga ferrosa causa endurecimento secundário quando seu conteúdo excede 10% e diminui a energia de falha de empilhamento da austenita, ambos fatores contribuindo para aumentar a resistência ao desgaste [UYULGAN et al., 2007].

Conforme UYULGAN et al. [2007], revestimentos de FeCr estão sendo empregados para diminuir o coeficiente de atrito entre componentes deslizantes. REDJDAL et al. [2013] afirmam que a utilização de ligas de FeCr é vantajosa, pois o cromo tem um coeficiente de atrito muito baixo, contribuindo para melhorar a resistência ao desgaste, além de ter grande capacidade de proteção contra corrosão. Além disso, entre os métodos de aspersão térmica, a

aspersão por arco elétrico é muito interessante do ponto de vista econômico [WIELAGE et al., 2013].

Apesar de importantes avanços na área, existe uma carência de trabalhos que utilizam o processo de aspersão térmica como alternativa ao combate do desgaste, seja abrasivo ou erosivo, resultante da ação do grão de arroz em casca, sendo esta a proposta do presente trabalho.

Foram utilizados os métodos de aspersão térmica HVOF e Arco Elétrico para depositar os revestimentos de WC-10Co-4Cr e Fe-29Cr-4B-1.75Si, respectivamente. O motivo pelo qual será utilizado dois métodos de aspersão e revestimentos diferentes se deve ao fato de empregar uma técnica de baixo custo (arco elétrico) e outra de custo elevado (HVOF) juntamente com seus respectivos tipos de revestimentos usuais que garantem resistência ao desgaste. Os ensaios de desgaste serão realizados conforme a norma ASTM G65 utilizando areia normatizada e / ou a casca de arroz como material abrasivo.

Desta forma, pretende-se desenvolver e simular uma nova técnica que quantifique o desgaste ocorrido pela presença da casca de arroz e assim, através da aspersão térmica, minimizar o desgaste resultante do contato do grão de arroz em peças de máquinas agrícolas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é investigar o desempenho tribológico dos revestimentos de WC-10Co-4Cr e Fe-29Cr-4B-1.75Si aspergidos por aspersão térmica pelo método HVOF e arco elétrico respectivamente, de modo a minimizar o desgaste gerado pela ação do contato do grão de arroz em casca com peças e máquinas agrícolas.

Para realização do trabalho será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar os corpos de prova quanto a sua microestrutura e espessura através das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (XRD);
2. Estabelecer a correlação entre parâmetros de processamento, microestrutura e propriedades mecânicas / tribológicas dos revestimentos testados;
3. Aplicar corpos de prova aspergidos em uma estrutura de secagem de arroz para mensurar e avaliar o comportamento dos revestimentos quando solicitado em contato direto com o grão durante a colheita;
4. Identificar os mecanismos de desgaste atuantes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica como fundamentação da pesquisa desenvolvida.

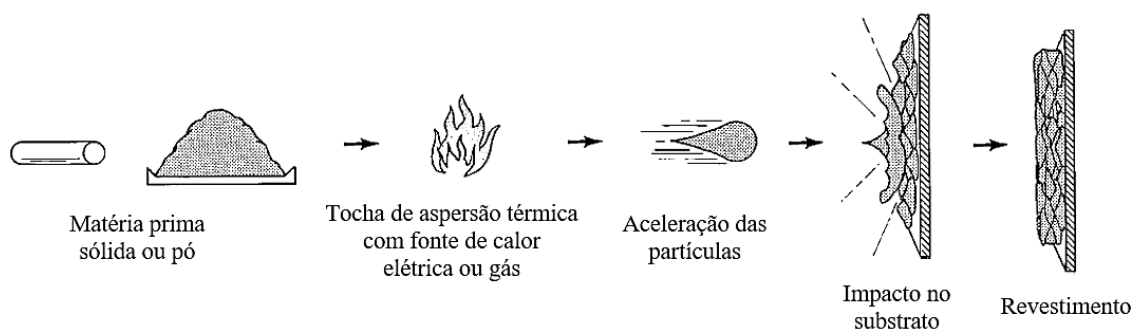
2.1 Aspersão térmica

Aspersão térmica, também conhecida como metalização, pode ser definida como um grupo de processos nos quais materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, finamente divididos, são depositados em um estado fundido ou semifundido sobre um substrato preparado, formando um depósito aspergido [LIMA, C. C; TREVISAN, R., 2007].

O processo de aspersão térmica é utilizado para depositar revestimentos em peças que geralmente sofrem desgastes por abrasão, corrosão e erosão, cujo objetivo é aumentar a vida útil das peças nos seus ambientes de trabalho.

O material a ser aspergido pode se encontrar na forma de pó, arame, cordão ou vareta. A pistola de aspersão gera o calor necessário, utilizando gases combustíveis ou um arco elétrico, para que os materiais sólidos que serão aspergidos, quando aquecidos, mudem para um estado plástico ou fundido. Estes são acelerados por um gás comprimido, onde as partículas confinadas são impelidas para a superfície do substrato devidamente preparado, onde rapidamente se solidificarão e a construção da camada de revestimento ocorrerá. Uma representação geral pode ser vista na Figura 1.

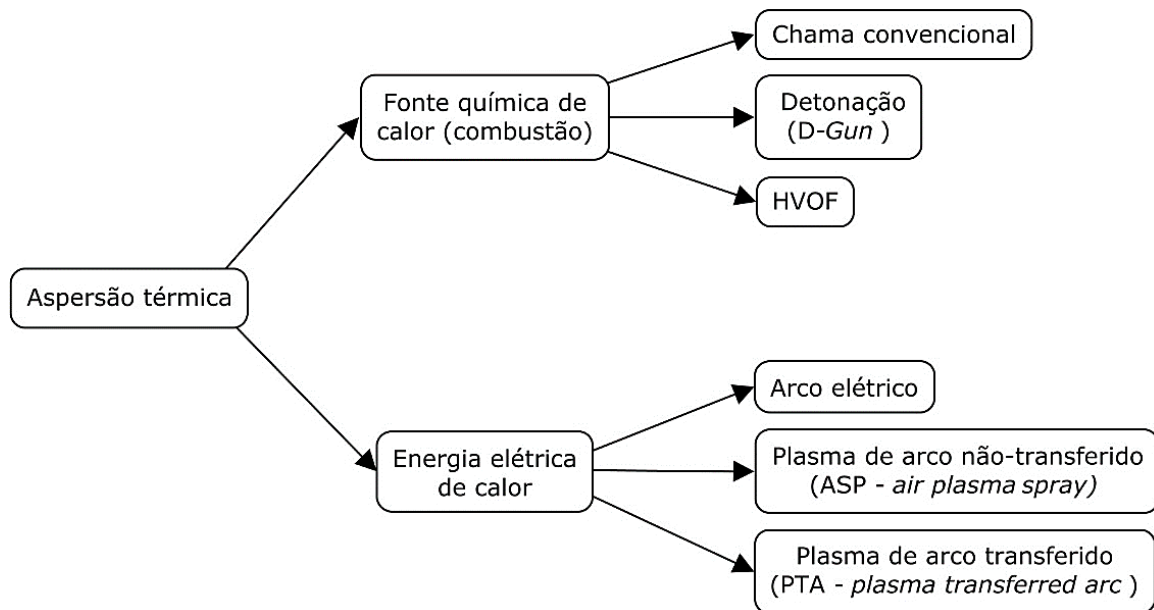
Figura 1 - Representação do processo de aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de [ROBERT E TUCKER, 2013].

Os processos de aspersão térmica são divididos em dois grupos em função do método de geração de calor, que pode ser através de gases combustíveis ou energia elétrica. A Figura 2 mostra a divisão dos processos.

Figura 2 - Divisão dos processos de aspersão térmica.



Fonte: Autoria própria.

Os processos se diferem devido ao material consumível a ser aplicado, pode ser na forma de pó, vareta, cordão ou arame, ao método de geração de calor como já foi dito anteriormente e ao método de aceleração das partículas em direção ao substrato.

Os processos de aspersão térmica permitem o recobrimento de peças com tamanhos e geometrias variadas devido a sua versatilidade de aplicação. A peça também pode ser usinada ou retificada, dependendo do tipo e dureza da liga depositada.

Os processos de aspersão são bem-sucedidos, dentre várias técnicas de engenharia de superfície, pois apresentam ampla faixa de materiais de recobrimento e substratos que podem ser processados. Podem ser processados a maioria de metais, metais duros, metais nobres e diversas ligas, tais como: carbonetos de tungstênio, carbonetos de cromo, aços inoxidáveis, zinco, alumínio, stellite, inconel, cobre-níquel, entre outras e polímeros [AMERICAN W. S., 1985].

A escolha do material a ser aspergido pelo processo de aspersão térmica, para uma devida aplicação, é mais complexa do que a seleção de um material forjado, laminado ou fundido para as mesmas aplicações, pois as propriedades do revestimento não são tão previsíveis quanto as dos materiais convencionais. Entretanto, atualmente, muitas aplicações estão bem estabelecidas e novas estão sendo continuamente desenvolvidas.

Através da combinação ótima entre o material base (substrato) e as propriedades do revestimento, é possível agora, obter-se uma combinação de características que não seriam possíveis com materiais homogêneos. Aeronaves e indústrias aeroespaciais forneceram um campo de testes ideal para testar e integrar alguns conceitos de revestimento.

A tecnologia avançou a um ponto em que aumentou a credibilidade e a confiabilidade dos revestimentos, levando a aplicações em outros mercados, como máquinas de papel, impressão, processamento de aço e metal, nas indústrias têxtil, química, de petróleo, gás, mineração, automotiva, revestimentos de plástico, peças de bombas, sistemas pneumáticos e hidráulicos e peças nas indústrias de turbinas, nuclear, eletrônica e elétrica.

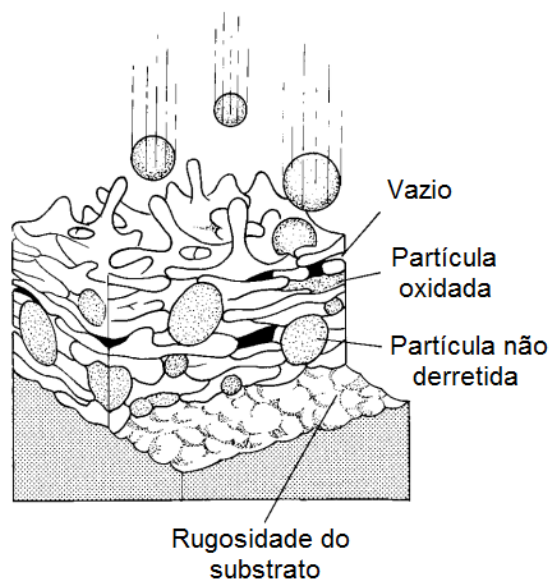
No entanto, deve-se ter em mente que existem diferentes técnicas de metalização que são complementares e não competitivas, na maioria dos casos, ou seja, na maioria das vezes, existe uma técnica de aspersão ótima para uma aplicação específica. As funções mais comuns dos revestimentos por aspersão térmica são [DAVIS, 2004; PAWLOWSKI, 2008]:

- Revestimentos resistentes ao desgaste contra abrasão, erosão, desgaste por cavitação, escoriações, fricção e muitas vezes, mais de um aspecto de desgaste podem ser abordados;
- Revestimentos resistentes à corrosão: muitos materiais são usados, como zinco, alumínio (que representa a mais ampla proteção atmosférica), ligas à base de níquel, ligas de cobre-níquel, cerâmicas quimicamente inertes, plásticos e metais nobres;
- Revestimentos de isolamento térmico: são feitos de zircônia estabilizada ou parcialmente estabilizada (um material cerâmico de baixa condutividade térmica: $K < 1,5$ W/m.K quando aspergido);
- Revestimentos eletricamente condutivos: os contatos elétricos são feitos de prata, cobre, alumínio, ligas de estanho e ligas de bronze;
- Revestimentos médicos, que podem ser bioativos, biocompatíveis ou bioinertes;
- Revestimentos de restauração dimensional, que são usados para a recuperação de peças desgastadas ou sobre-usinadas.

2.1.1 Microestrutura de revestimentos

As partículas aspergidas, ao se colidirem contra o substrato ainda no estado plástico ou fundido, são achatadas e rapidamente se aderem à rugosidade superficial, formando uma estrutura lamelar (em camadas), com partículas não fundidas, vazios (poros) e inclusões de óxidos. A Figura 3 mostra a microestrutura típica de revestimentos resultantes da deposição por aspersão térmica.

Figura 3 - Detalhamento da formação do revestimento.



Fonte: Adaptado de [ROBERT E TUCKER, 2013].

Muitas das características apresentadas na Figura 3 podem ser controladas através de equipamento apropriado e pela seleção adequada de matéria-prima. Todavia, a maior influência na microestrutura do revestimento vem da etapa de processamento e da técnica empregada, pois a densidade do depósito aspergido varia de acordo com a velocidade das partículas, desde 30 m/s até perto de 1200 m/s em função do processo utilizado e da temperatura da fonte de calor do processo.

A porosidade, às vezes, pode ser um benefício, como nos casos de retenção de óleo em superfícies de rolamento, para estruturas quimicamente ativas como nas baterias, para fixação de ossos em implantes ortopédicos, entre outros. Também pode trazer desvantagens, afetando

diretamente as propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica e diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato.

As taxas de resfriamento rápido de partículas e as formas de lamelas são duas características que distinguem os revestimentos de aspersão térmica de outros revestimentos. Fragilidade, dureza, propriedades anisotrópicas e tensões residuais são o resultado de partículas excessivamente resfriadas e achatadas [LIMA, C. C; TREVISAN, R., 2007].

2.1.2 Preparação do substrato

A preparação da superfície para componentes que receberão revestimentos pelo processo de aspersão térmica é muito importante para garantir a adesão adequada. As superfícies devem estar limpas e, geralmente, os substratos devem estar ásperos após a limpeza.

A rugosidade da superfície geralmente é preparada pelo processo padrão por jateamento de areia, porém, para superfícies cilíndricas ou que exigem revestimento espessos outros dois métodos também são utilizados: rosqueamento e a combinação de jateamento com o rosqueamento.

O processo de preparação superficial deve ser padronizado e repetitivo com um certo grau de automação para que toda a superfície contenha o mesmo padrão de acabamento.

A preparação da superfície tem dois objetivos: O primeiro tem a tarefa de limpar e ativar a superfície, a fim de evitar defeitos de ligação na interface do material de revestimento e o substrato. É importante que a superfície permaneça não contaminada por lubrificantes de equipamentos de manuseio ou óleos corporais das mãos e braços depois de preparada. Recomenda-se que a superfície preparada seja revestida o mais rapidamente possível após a preparação para evitar a possibilidade de contaminação ou oxidação da mesma.

O segundo objetivo é fornecer a rugosidade superficial correta para uma ótima aderência, ancoramento mecânico, entre o revestimento e o substrato, pois o grau de adesão do material depositado depende do entrelaçamento mecânico entre as partículas solidificadas e das mesmas com o substrato [ROBERT E TUCKER, 2013].

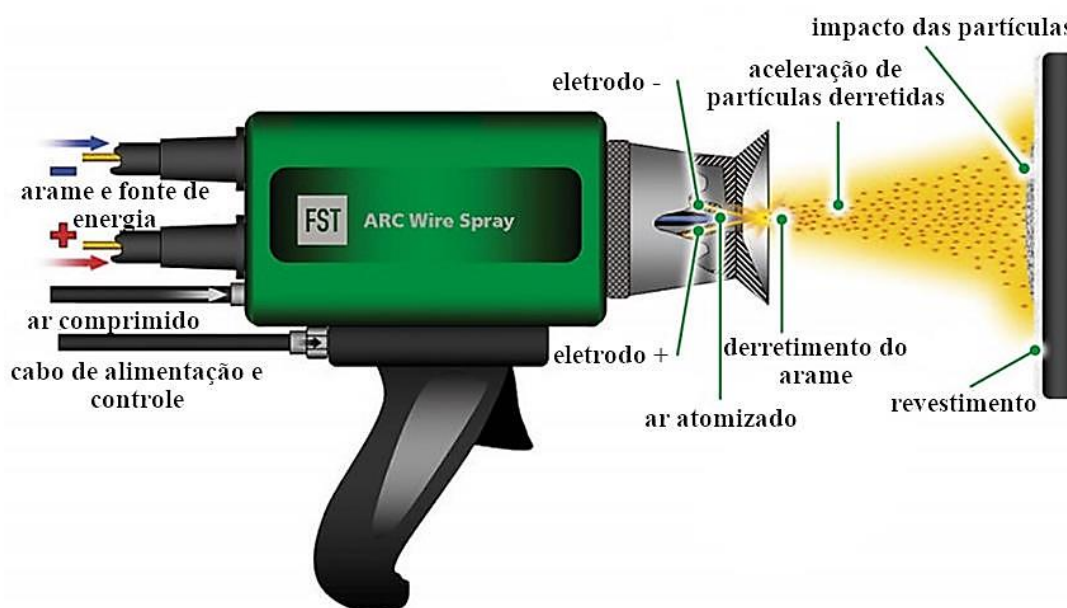
2.1.3 Aspersão a Arco elétrico (EAS)

A aspersão térmica a arco elétrico, EAS (*electric arc spraying*), também conhecida como aspersão de arco de arame, WAS (*wire arc spraying*), usa dois eletrodos consumíveis de arame para dar origem ao revestimento aspergido.

Os dois arames, retirados de bobinas, são isolados um do outro e avançam automaticamente, dentro da tocha, para se encontrar em um ponto em uma névoa de gás atomizador. Para isso, uma diferença de tensão elétrica é aplicada através dos arames (um ligado ao polo positivo e outro ao polo negativo de uma fonte), iniciando um arco elétrico que funde as pontas dos arames.

Um gás, usualmente ar comprimido, é dirigido através da zona do arco, atomizando o metal fundido e impulsionando (acelerando) as partículas sobre o substrato. O revestimento se forma acumulando as gotículas subsequentes no topo das partículas solidificadas [ZHOU et al., 2017]. Um esquema do processo a arco elétrico é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema ilustrativo de uma tocha de aspersão por arco elétrico com arame.



Fonte: Adaptado de FST *Company* AWS [FST COMPANY AWS, 2018].

Para aplicações especiais, gases inertes como argônio e hélio podem ser usados ao invés do ar comprimido, com a finalidade de reduzir a oxidação do revestimento. A alimentação dos arames geralmente é feita por meio de um motor elétrico e a velocidade de

avanço do mesmo é regulada em função da corrente induzida pela fonte. Se os arames forem feitos de metais diferentes, um revestimento de "pseudo liga" pode ser produzido.

Alguns parâmetros do processo são listados a seguir [PAWLOWSKI, 2008; SCHNEIDER et al., 2006]:

- A potência geralmente está na faixa de 5 a 10 kW;
- Temperatura do arco pode atingir 6100K com uma corrente de arco de 280A;
- Tensão do arco tipicamente na faixa de 20 a 40V - uma tensão crescente corresponde a aumentos nos tamanhos das gotas pulverizadas;
- A taxa de deposição está no intervalo de 50 a 1000 g/min. Alguns fabricantes "anunciam" taxas de deposição tão elevadas quanto 3300 g/min;
- Distância de pulverização: 50-200 mm;
- A atmosfera de pulverização é ar, mas uma tocha de pulverização de arco pode ser instalada em um vácuo, ou atmosferas reativas ou inertes;
- O gás atomizador geralmente é ar;
- A pressão do gás de atomização está na faixa de 0,2 a 0,7 MPa;
- A vazão do gás de atomização está na faixa "ampla" de 20 a 1300 slpm (*Standard Litres per Minute*);
- Os arames devem ser eletricamente condutivos;
- O diâmetro tipicamente é de 1,6 a 5,0 mm;
- A velocidade das partículas derretidas, formadas pelos arames, podem atingir até 250 m/s.

Segundo TILLMANN, HAGEN E KOKALJ [2017], o processo WAS é uma técnica economicamente barata com economia de tempo e energia, usada principalmente em reformas de superfície e aplicações de manutenção. A aspersão a arco elétrico tem a capacidade de depositar revestimentos resistentes ao desgaste e à corrosão de maneira simples e econômica, devido ao uso de ar comprimido como gás de atomização e arames tubulares reforçados com partículas duras como matéria-prima.

GEDZEVICIUS E VALIULIS [2006] afirmam que a temperatura no arco pode chegar a 5000°C e a velocidade da partícula está na faixa de 100 a 300 m/s. Uma combinação entre elevada temperatura do arco e altas velocidades de partículas conferem aos revestimentos por aspersão a arco forças de adesão superiores e menores níveis de porosidade quando

comparados com os revestimentos por chama. No entanto, o uso de ar comprimido para atomização e propulsão de gotículas dá origem a um elevado teor de óxido no revestimento.

Nos últimos anos, a aspersão de dois arames é um processo industrial para preparar uma camada protetora em aço macio ou liga com baixo teor carbono de aço para fácil operação, baixo custo e diferentes materiais de revestimento para aplicação a longo prazo [HE et al., 2017; KIM E LEE, 2010].

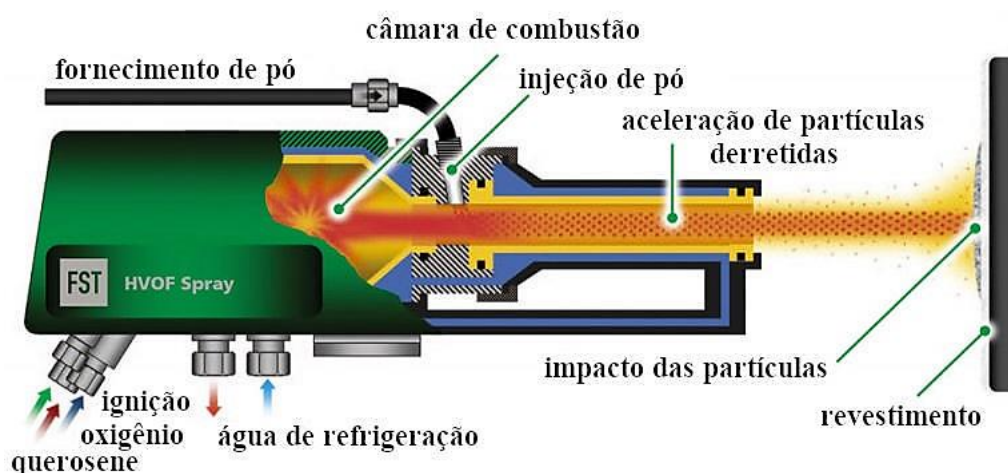
2.1.4 Aspersão HVOF com pó de WC-Co

Segundo PAWLOWSKI [2008], o processo de aspersão oxi-combustível de alta velocidade, mais conhecida como HVOF foi desenvolvida no final da década de 1970 e início de 1980. Neste processo, o gás combustível é queimado com oxigênio a alta pressão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade.

O combustível é, usualmente, propano, propileno, metil-acetileno-propadieno ou hidrogênio, que são misturados com oxigênio e queimado em uma câmara de combustão. Os produtos de combustão são liberados e se expandem através de um bocal, onde as velocidades do gás se tornam supersônicas.

O pó é introduzido no bocal, em geral axialmente, e é aquecido e acelerado para fora do mesmo. A câmara de combustão e o bocal são intensamente resfriados a água. A Figura 5 mostra, esquematicamente, uma tocha HVOF.

Figura 5 - Esquema ilustrativo de uma tocha de aspersão HVOF.



Fonte: Adaptado de FST *Company* HVOF [FST COMPANY HVOF, 2018].

O pó impelido é normalmente repleto de partículas parcialmente fundidas. Velocidades do gás têm sido medidas na faixa de 1500 a 2000 m/s. A literatura indica velocidades de partículas de 550 a 800 m/s. A temperatura da chama é relativamente baixa, da ordem de 2900°C, tornando difícil a aspersão de cerâmicas e alguns metais refratários.

Em alguns equipamentos, querosene líquido é usado como combustível e ar como oxidante. A literatura menciona que estes sistemas que utilizam querosene fornecem as mais altas pressões de combustão e velocidades de partículas entre todos os sistemas HVOF.

As altas velocidades de impacto das partículas sobre o substrato implicam que as partículas não necessitam estar completamente fundidas para obter um revestimento de alta qualidade. Além disso, o fato de não haver superaquecimento pode minimizar problemas de tensões residuais, o que é especialmente importante com relação aos diâmetros internos e revestimentos espessos. O processo via HVOF tem sido principalmente utilizado em aplicações para resistência ao desgaste, mas o emprego vem se expandindo muito nos últimos anos.

Alguns parâmetros do processo são listados a seguir [LIMA, C. C; TREVISAN, R., 2007]:

- O tamanho das partículas de pó usado no processo é usualmente de 5 a 45 μm ;
- A taxa de alimentação de pós varia de 20 a 80 g/min;
- O pó é geralmente injetado na direção axial e, em algumas tochas, radialmente, utilizando nitrogênio como gás de arraste;
- A distância de aspersão é de 120 a 300 mm;
- Requer preparação do substrato;
- As taxas de fluxo de gás combustível estão entre 40 a 60 l/min e o fluxo de oxigênio é correspondentemente bem maior, chegando a até 430 l/min;
- O nível de ruído é bastante alto, excedendo a 140 dB.

O processo de aspersão térmica pelo método HVOF é bem conhecido para o emprego de depósito de revestimentos resistentes ao desgaste e tem sido utilizado com sucesso na aspersão de revestimentos cerâmicos a base de WC-Co-Cr. Parâmetros de aspersão controláveis, como alta velocidade de chama, temperatura de chama mais baixa e tempo de permanência relativamente menor, produzem revestimentos com alta dureza, baixa porosidade e boa aderência em comparação com outras técnicas de aspersão térmica [MASUKU et al.,

2015; LA BARBERA-SOSA et al., 2014; HONG et al., 2014; HOU et al., 2012; MATEEN et al., 2011].

Nas últimas décadas, os revestimentos compostos da WC-Co têm sido utilizados em várias indústrias devido à excelente resistência ao desgaste [MI et al., 2018].

Segundo LA BARBERA-SOSA et al. [2014], os revestimentos de aspensão térmica com combustível de alta velocidade são amplamente utilizados em muitas aplicações diferentes para aumentar a resistência ao desgaste, ao atrito e à corrosão. As características marcantes desses revestimentos permitem seu uso em muitos campos importantes da engenharia, como na aeroespacial, onde são amplamente utilizados para a proteção de peças do trem de pouso, e para a fabricação de componentes sensíveis de motores. Além de serem utilizados em máquinas usadas na indústria de mineração e processamento mineral.

Os revestimentos de WC-Co são bem conhecidos por seu uso em aplicações de resistência a abrasão / desgaste devido à sua combinação favorável de tenacidade e dureza. As partículas de WC rígido formam o principal componente resistente ao desgaste, enquanto o elemento Co fornece tenacidade. O HVOF mostrou-se um dos melhores métodos para depositar os pós de WC-Co devido às velocidades mais altas e temperaturas mais baixas experimentadas pelas partículas do pó em comparação com as técnicas baseadas no plasma [DONG, ZENG E LIAO, 2017].

Os compósitos WC-Co contendo mais de 70 %vol de partículas de WC dentro da matriz de Co têm sido amplamente aplicados como ferramentas de corte, perfuração, usinagem, moldes de extrusão e etc. Além disso, os revestimentos WC-Co termicamente pulverizados foram gratificados pela demanda de proteger diferentes substratos contra componentes de desgaste, sede de válvulas na indústria de petróleo, rolos de extrusão e rolos de pressão na laminação a quente de aços, trem de pouso de aeronaves, etc.

Em comparação com os revestimentos depositados pelas técnicas de aspensão por plasma (APS) e spray de detonação (D-Gun), a aspensão HVOF proporciona maior velocidade e menor temperatura para partículas de influxo e produz revestimentos WC-Co mais compactos contendo uma fração maior de fase retida de WC. Do ponto de vista tecnológico, a microestrutura desejada dos revestimentos WC-Co contém partículas de WC uniformemente dispersas na matriz metálica de Co, para proporcionar uma combinação atraente de dureza, tenacidade à fratura e resistência ao desgaste [HAN et al., 2017].

2.2 Desgaste

A palavra tribologia vem do grego onde “tribo” significa esfregar, atritar, friccionar e “logos” significa estudo. O termo foi estabelecido em 1966 por H. Peter Jost em um relatório para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” [JOST, 2006].

A tribologia une os campos da mecânica, física, química, materiais e os conhecimentos em lubrificação, atrito e desgaste para prever o comportamento de sistemas físicos com o objetivo de resolver os problemas relacionados com o atrito entre superfícies.

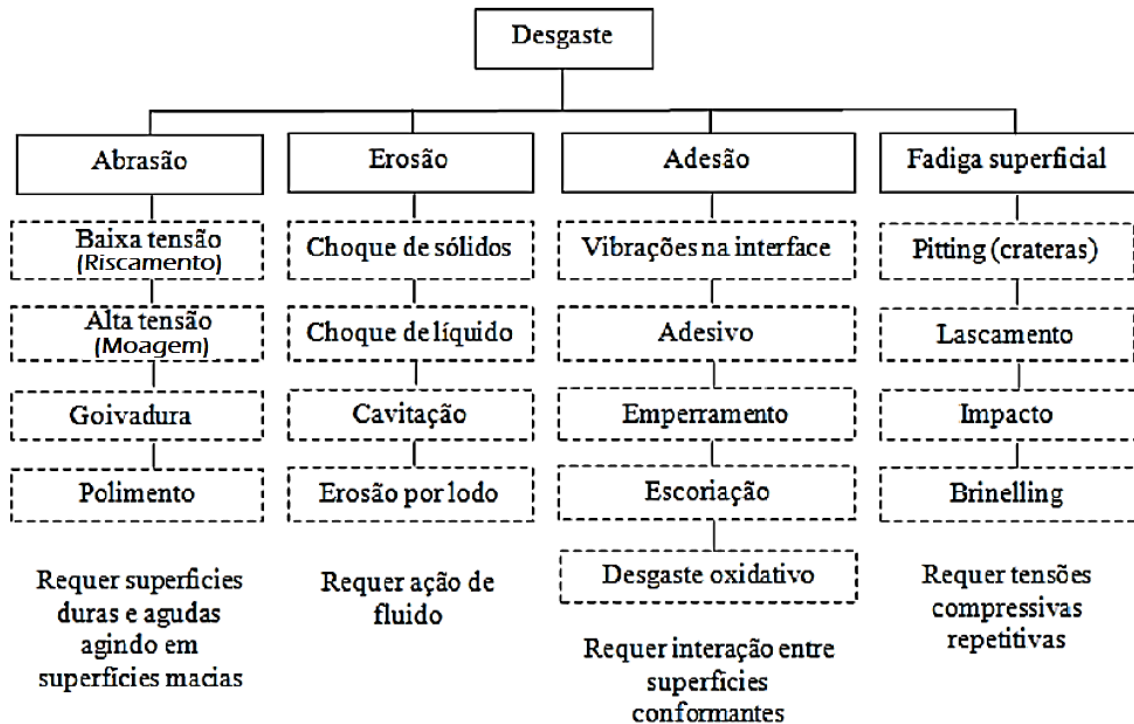
O desgaste pode ser definido como o dano progressivo a uma superfície sólida causada pela remoção ou alteração do material decorrente da ação mecânica de um sólido, líquido ou gás em contato. Nesta interação, atuam os chamados mecanismos de desgaste que envolvem uma série de fenômenos físicos e químicos e se torna preocupante na medida em que o dano causado afeta a microestrutura de um material em serviço [BAYER, 1994].

Cada processo de desgaste envolve fenômenos que o caracterizam, em muitas situações, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros.

Geralmente, faz-se necessário um entendimento detalhado do histórico de utilização e operação da peça em serviço para compreender os mecanismos atuantes no desgaste do material e, em muitos casos, não é possível conduzir uma boa investigação a respeito da falha, simplesmente examinando a peça desgastada [CUNHA, M. A, 2014].

De acordo com a norma DIN 50320 [NORMA, D. I. N. 50320, 1997], há quatro mecanismos diferentes de desgaste: abrasão, erosão, adesão, fadiga superficial e ainda reação triboquímica (corrosão-desgaste). A Figura 6 mostra a classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões.

Figura 6 - Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões.



Fonte: Adaptado de [BUDINSKI, K. G., 1988].

2.2.1 Desgaste erosivo

O desgaste erosivo se caracteriza pela perda de material da superfície causadas pelo impacto repetido de pequenas partículas sólidas. Sua ocorrência é esperada quando partículas duras contidas em um gás, líquido ou fluido incidem em um sólido a uma velocidade significativa (maior que 1 m/s) [BLAU, P. J, 1992].

As formas pelas quais esse desgaste se manifesta são pela redução ou afinamento dos componentes, marcas macroscópicas que seguem a linha de fluxo do fluido atuante, aumento na rugosidade da superfície, ausência de ranhuras direcionadas como na abrasão, e em alguns casos, surgimento de um padrão ondulatório na superfície.

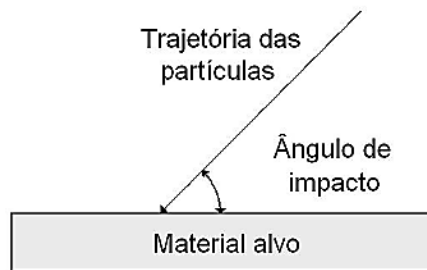
Existem três classes principais de variáveis que afetam a erosão: variáveis que descrevem o impacto e o fluxo de partículas, variáveis das características das partículas e variáveis do material. Na primeira classe, são relevantes a velocidade das partículas, o ângulo de incidência (ângulo entre a direção de impacto e a superfície atingida) e o fluxo (concentração de partículas). Quanto a características das partículas, segunda classe, incluem o formato, tamanho, dureza e a friabilidade (facilidade em fraturar). E quanto ao material,

terceira classe, são relevantes propriedades como dureza, comportamento frente à deformação e microestrutura [ZUM GAHR, 1987].

➤ Ângulo de impacto

O ângulo de impacto é definido como o ângulo entre a superfície do material alvo e a trajetória da partícula impactada, conforme mostra a Figura 7.

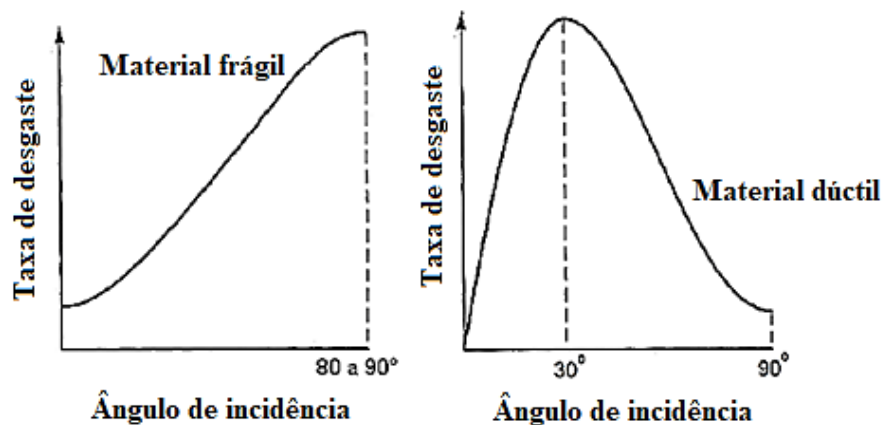
Figura 7 - Ângulo de impacto do erodente.



Fonte: Adaptado de [ZUM GAHR, 1987].

A influência do ângulo de impacto nas taxas de erosão se dá em função da natureza do material alvo. Em materiais dúcteis, como os metálicos, a taxa de erosão apresenta um crescimento até um valor máximo em torno de 30° e um posterior decréscimo contínuo até o ângulo de 90° . Em contraste, para materiais frágeis, a taxa máxima de erosão se dá em ângulos próximos a normal – 90° como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto na taxa de desgaste de materiais dúcteis e frágeis.



Fonte: Adaptado de [ZUM GAHR, 1987].

➤ Velocidade de impacto

A energia cinética é fundamental para a remoção de material quando a superfície é impactada. A Equação 1, mostra que a taxa de erosão, denotada por ΔE , é proporcional a uma constante k multiplicada pela velocidade de impacto, denotada por V , onde esta variável é em função do expoente de velocidade p que depende do tipo de material [SUNDARARAJAN, G, 1995].

$$\Delta E = k.V^p \quad (Eq 1)$$

HUTCHINGS [1979] encontrou um valor de expoente em torno de 2,4 para condições de impacto em baixos ângulos para metais e ligas, enquanto [SUNDARARAJAN E SHEWMON, 1983] indicaram um valor médio de 2,55 para p . Estes valores diferem dos encontrados para cerâmicos e polímeros que são de 3 e 5 respectivamente [FINNIE, 1995].

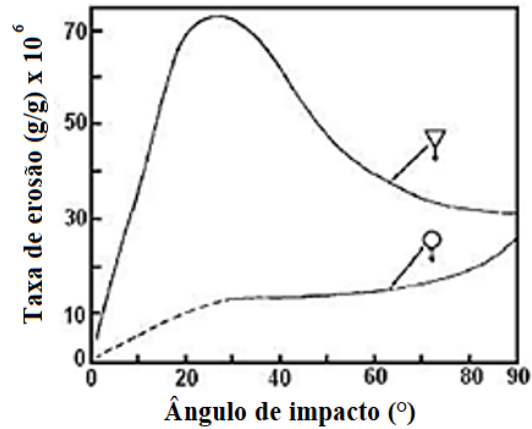
O expoente da velocidade depende de outros fatores como ângulo de impacto, tamanho de partículas erodentes e temperatura nos testes. Segundo STACK et al. [1993], ocorre uma transição em p com o aumento da temperatura. A transição encontrada pode ser associada a diferentes regimes de danos, isto é, erosão dominante, erosão-corrosão dominante e corrosão dominante.

➤ Características das partículas

Com relação ao formato das partículas, materiais metálicos apresentam taxa de erosão significativamente mais elevada para partículas angulares do que partículas esféricas de mesmo tamanho, conforme mostra a Figura 9.

Segundo FINNIE [1995], a forma da partícula erosiva influencia principalmente nas deformações sofridas pela superfície erodida. Partículas mais arredondadas levam a menos deformações localizadas, sendo necessário uma maior quantidade de impactos para que ocorra a remoção de material [BHUSHAN, 1999]. A formação e propagação das trincas em materiais frágeis também é favorecida pela incidência de partículas angulares.

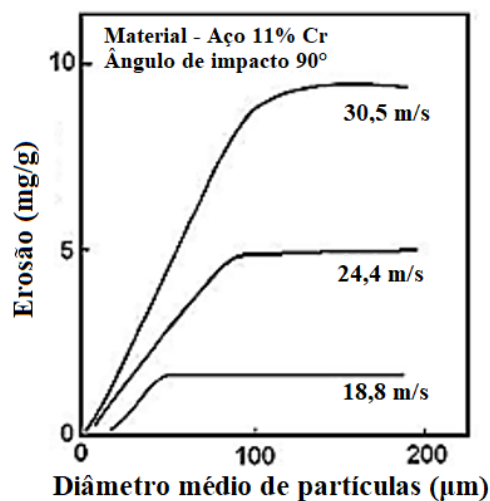
Figura 9 - Variação da taxa de erosão conforme o ângulo de impacto com erodentes de morfologia angular, representados pelo triângulo, e erodentes esféricos, representados pelo círculo.



Fonte: Adaptado de [REDDY E SUNDARARAJAN, 1987].

O tamanho das partículas é um fator de considerável relevância nos problemas de erosão. Na maioria dos casos, os tamanhos podem variar de 5 a 500 μm . Conforme a Figura 10, a erosão aumenta com o tamanho da partícula até 100 μm , sendo que a partir deste ponto o tamanho das partículas não mais afeta a taxa de erosão no caso de abrasivo de SiC e Al_2O_3 [GOODWIN, SAGE E TILLY, 1969].

Figura 10 - Variação da taxa de erosão com o tamanho de partícula para um aço, utilizando ângulo de impacto normal e diferentes velocidades de impacto.



Fonte: Adaptado de [GOODWIN, SAGE E TILLY, 1969].

Outra variável que se refere às partículas, que pode ser um fator controlador da taxa de desgaste, é a dureza ou a relação de dureza entre a partícula erosiva e a superfície erodida. Conforme LEVY [1995], a taxa de erosão cai drasticamente quando a dureza da partícula impactante é menor que a do material impactado. Se a dureza da partícula é muito baixa e o material alvo dúctil, a curva de erosão em função do ângulo de impacto pode assemelhar-se à de um material frágil.

A maioria dos aços possui dureza menor que muitas partículas comumente encontradas na natureza, tais como a sílica, que possui dureza da ordem de 800 HV. Este valor de dureza é atingido apenas por aços martensíticos, não revenidos, com alto teor de carbono.

Conforme HUTCHING [1992] e FINNIE [1995], o uso de materiais com dureza maior, tais como ferros fundidos brancos de alto cromo e revestimentos duros, pode resultar em uma maior resistência ao desgaste por partículas duras em componentes mecânicos. Neste caso a dureza do material erodido deve ser 1,2 vezes maior que a dureza da partícula erosiva. Esta relação tem sido estabelecida experimentalmente e, na prática, representa um valor limite para se considerar o efeito da partícula erosiva como um fator determinante no desgaste.

2.2.2 Desgaste abrasivo

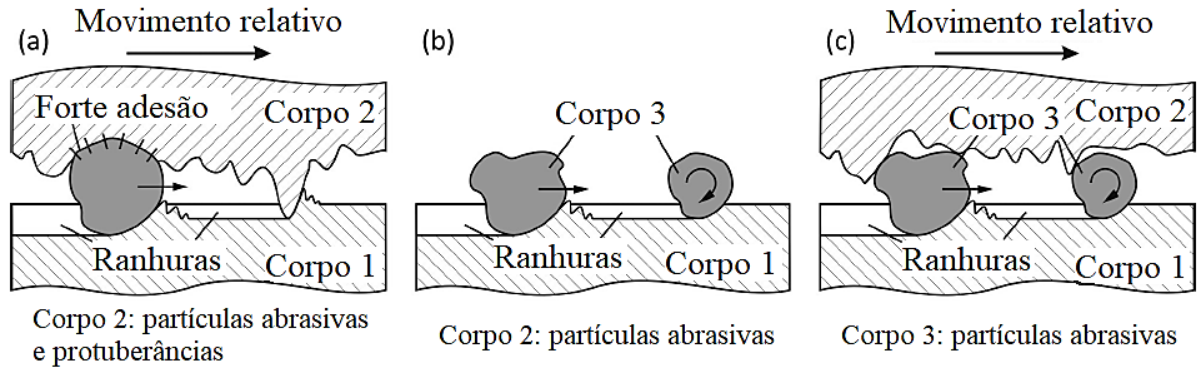
O desgaste abrasivo é o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras ou embebidas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo, ou pela presença de protuberâncias duras entre uma ou ambas as superfícies que estão em movimento relativo [ZUM GAHR, 1987].

De acordo com a maneira com que as partículas duras e / ou protuberâncias duras se apresentam, o desgaste pode ser classificado em:

- Abrasão a dois corpos: quando é causado por protuberâncias duras ou partículas duras embebidas na superfície de dois corpos;
- Abrasão a três corpos: quando as partículas podem se mover livremente (rolar ou deslizar) entre as superfícies de contato.

A classificação do desgaste de abrasão a dois ou três corpos pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 - Processo de desgaste abrasivo: (a) e (b) abrasão por 2 corpos e (c) abrasão por 3 corpos.



Fonte: Adaptado de KANDEVA-IVANOVA, M; VENCL, A; KARASTOYANOV, D [2016].

De acordo com a classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões (Figura 6), o desgaste abrasivo pode ser dividido em: abrasão por goivagem, abrasão por moagem ou a alta tensão e abrasão por riscamento ou baixa tensão.

➤ Abrasão por goivagem

Ocorre quando partículas abrasivas grosseiras e de maiores dimensões, com regiões pontiagudas cortantes, desgasta um material de dureza menor, podendo haver tensões mais ou menos violentas e repetitivas e com baixa ou alta velocidades. A baixa ocorre quando se manuseia partículas com tamanhos acima de 20 μm , e a alta com tamanhos de até 10 μm [NEALE, M. J, 1995].

➤ Abrasão por Moagem ou Alta Tensão

Ocorre entre partículas abrasivas e metal, causando esmagamento do abrasivo ou não. Este esmagamento pode acontecer por tensões fortes ou médias, provocando superfícies de pequenos fragmentos. Normalmente as partículas abrasivas são de dimensões médias (abaixo de 5 μm) ou pequenas (abaixo de 1 μm). A primeira causa uma ação superficial, arrancando fragmentos do metal, enquanto a segunda, provoca o desgaste superficial pelo deslocamento de pequenos fragmentos do metal [NEALE, M. J, 1995].

Caso o metal seja dúctil, a abrasão irá retirar cavacos, e por sua vez, se for frágil, haverá um deslocamento superficial de pequenos fragmentos. Ambas podem ocorrer simultaneamente. As tensões envolvidas no contato abrasivo com a superfície desgastada são superiores à tensão de fragmentação do abrasivo, permitindo uma maior penetração do abrasivo na superfície, além de maior deformação plástica das fases dúcteis e fratura das fases frágeis presentes no material. Ferros fundidos ou aços-liga (com maior tenacidade) são, em geral, ligas utilizadas contra este tipo de desgaste [NEALE, M. J, 1995].

➤ **Abrasão por Riscamento ou Baixa Tensão**

Ocorre quando o material abrasivo promove um riscamento na superfície e ao penetrá-la, retira o material. As tensões sobre as partículas abrasivas são inferiores à tensão necessária para a fragmentação do abrasivo. Ferros fundidos com alto teor de cromo (martensíticos ou austeníticos), às vezes contendo outros elementos de liga, além de as vezes conter outros elementos de liga a base de cobalto-tungstênio-cobalto são, em geral, ligas utilizadas contra este tipo de desgaste [NEALE, M. J, 1995].

Ainda, para o desgaste abrasivo, quatro micromecanismos básicos são possíveis: o microsulcamento, o microcorte, o microsulcamento repetido e o microtrincamento.

No microsulcamento idealizado, um simples passe de uma partícula abrasiva não resultaria de desprendimento de material da região desgastada. Com o deslocamento da partícula dura sobre a superfície do material, este é deslocado plasticamente, formando “rugas” adjacentes aos sulcos produzidos.

Porém, no caso de situações onde o material sofre sulcamento repetidamente, os sulcos podem ser quebrados devido ao microsulcamento repetido.

Para o caso de microcorte, a perda de material corresponde ao mesmo volume dos riscos de desgaste produzidos pelas partículas.

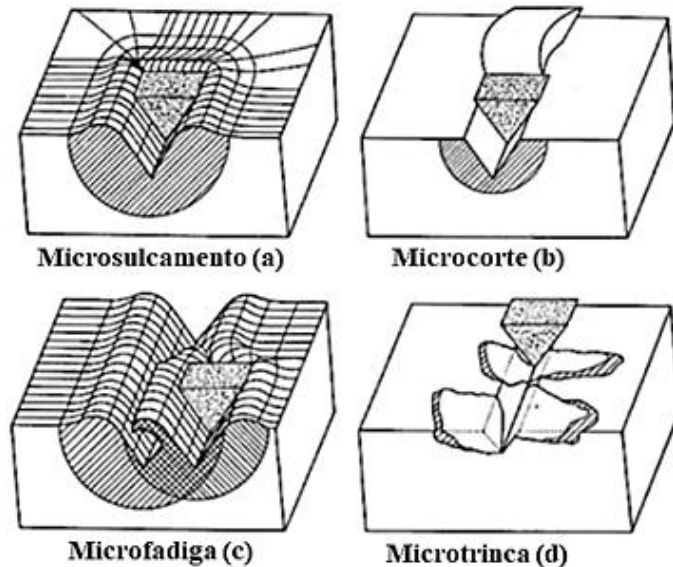
O microsulcamento e o microcorte são micromecanismos dúcteis e estão associados com a deformação plástica da superfície desgastada.

Em relação ao microtrincamento, tensões concentradas são impostas pelas partículas abrasivas. Neste caso, grandes fragmentos de desgaste são desprendidos da superfície do material devido à formação e propagação de trincas. As perdas volumétricas por desgaste,

neste caso, são maiores do que o próprio volume dos sulcos de desgaste feitos pelas partículas abrasivas.

A Figura 12 ilustra um modelo proposto por ZUM GAHR [1987].

Figura 12 - Micromecanismos de desgaste abrasivo: (a) microsulcamento, (b) microcorte, (c) microfadiga e (d) microtrinca.



Fonte: Adaptado de ZUM GAHR [1987]

Para DONG, JAHANMIR E HSU [1991], os fatores que afetam a taxa e desgaste abrasivo são as propriedades da superfície e do abrasivo, assim como a natureza e a severidade das interações entre si. A taxa e desgaste depende do grau de penetração do abrasivo na superfície do material que está sofrendo abrasão.

O desgaste será maior quando mais duro for o abrasivo em relação à superfície que está sofrendo desgaste. A superfície desgastada está sujeita a uma carga elevadíssima (em uma pequena área) que causa não somente a penetração do abrasivo, mas pode causar também a fratura de fases duras presentes na superfície e a própria deformação plástica da matriz.

2.2.3 Ensaio abrasivo

O ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65 abrange os procedimentos laboratoriais para determinar a resistência dos materiais metálicos à abrasão, através do ensaio de areia seca / roda de borracha. A intenção deste método de ensaio é produzir dados que classifiquem

de forma reproduzível os materiais em sua resistência à abrasão por raspagem sob um conjunto específico de condições.

Os resultados do ensaio de abrasão são relatados como perda de volume em milímetros cúbicos para o procedimento de ensaio específico. Materiais de maior resistência à abrasão terão menor perda de volume.

Segundo a norma ASTM G65 [ASTM G65, 2015], o disco de contato consiste em um aro de borracha de largura e espessura de 12,7 mm (1/2”) posicionado sobre um disco de aço com diâmetro de 228,6 mm. O disco (ou a roda) gira com uma rotação constante de 200 RPM com variação permitida de ± 10 RPM, e o fluxo de abrasivo (areia de sílica) é direcionado entre a face da roda e da amostra, com vazão compreendida numa faixa entre 300 e 400 g/min. Os corpos de prova devem apresentar o formato retangular com dimensões de 25 x 75 x 12,7 mm.

2.3 Estado da arte

Os derivados do grão de arroz estão em constante estudo principalmente nos países de maior produção do grão no mundo como a China e a Índia.

KANG et al. [2012] utilizaram uma pistola de detonação para aspergir três diferentes revestimentos (WC-Co-Cr, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{NiCr}$ e Stellite-21) sob o local de corte de lâminas rotativas onde apresentam desgaste abrasivo. O objetivo foi de melhorar a vida útil das lâminas de um equipamento conhecido como enxada rotativa, diminuir o tempo ocioso necessário para substituir a lâmina desgastada periodicamente durante o cultivo e diminuir os esforços humanos na preparação do solo.

Como resultado, obtiveram que as taxas de desgaste das lâminas revestidas com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{NiCr}$ e Stellite-21 mostraram superioridade significativa sobre a lâmina de aço de alta resistência não revestida, mas não tanto quanto mostrado pela lâmina revestida com WC-Co-Cr.

O processamento do arroz envolve muitos processos tribológicos à medida em que a casca é removida e o arroz é polido para remover a camada externa de farelo para se ter uma aparência branca. Posteriormente, é finalmente classificado para remover grãos quebrados ou descoloridos. Como resultado, muitos problemas de desgaste podem surgir no equipamento utilizado durante as diferentes etapas do procedimento.

CAMACHO, J., LEWIS, R., e DWYER-JOYCE, R. S. [2009] concentraram seu estudo em uma calha de alumínio anodizado utilizada numa máquina de triagem de arroz. A função da calha é separar os grãos (defeituosos ou não) e fornecer uma distribuição controlada onde, os grãos de arroz caem na calha e deslizam para baixo.

O objetivo do trabalho destes autores foi estudar o desgaste erosivo causado pelos impactos do grão de arroz. A velocidade de impacto e ângulo foram variados para estudar a mudança resultante no desempenho de desgaste. Filmagem em vídeo de alta velocidade foi usada, para determinar com precisão as velocidades de impacto e analisar o comportamento dos grãos de arroz nos diferentes ângulos de impacto.

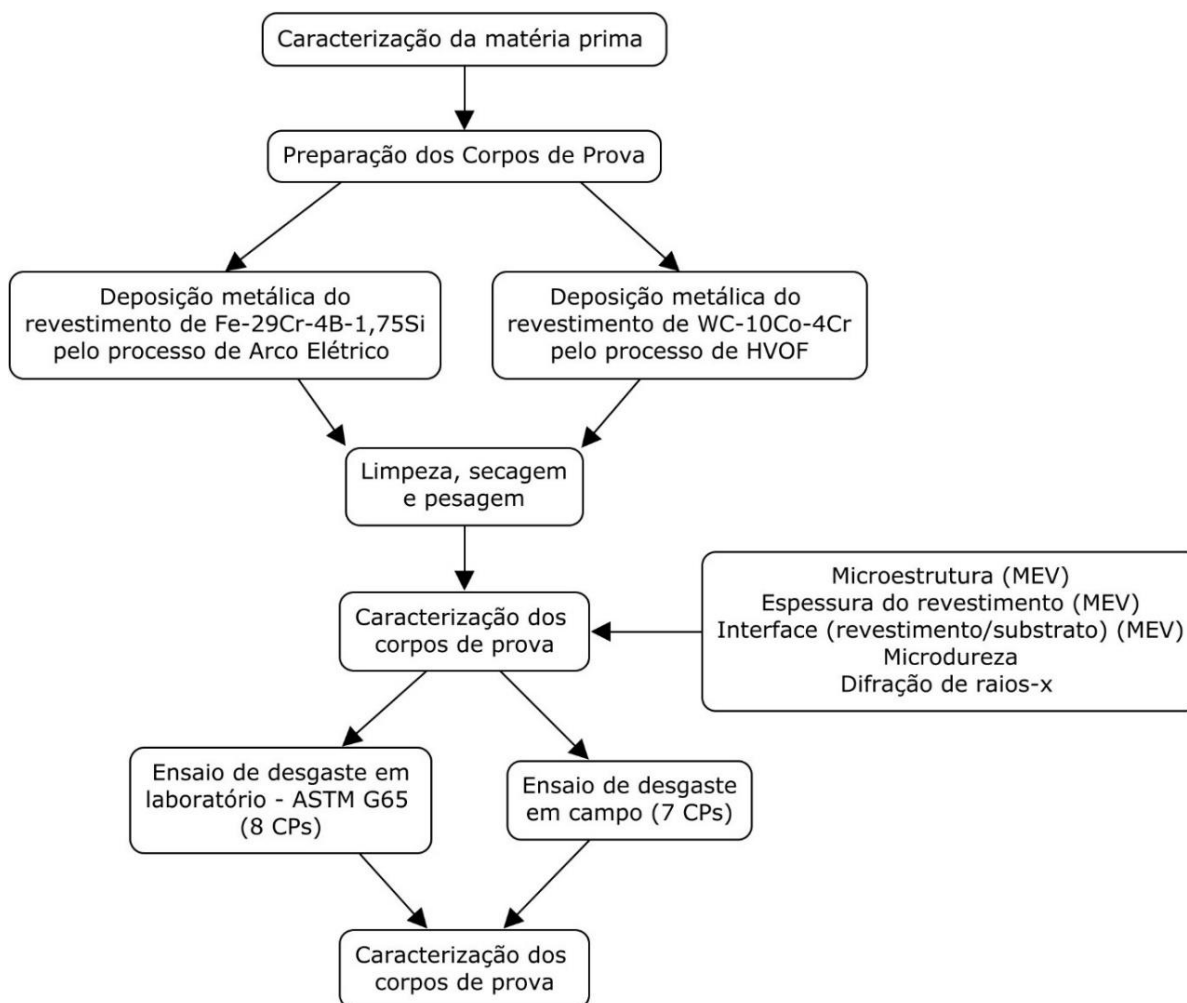
Em um estudo anterior CAMACHO, LEWIS e DWYER, [2007] realizaram uma análise de falhas em uma calha de triagem de arroz que indicava que os principais mecanismos de desgaste ocorridos na calha eram erosão e abrasão. Testes foram realizados para estudar o atrito e o comportamento de deslizamento do uso de grãos de arroz contra alumínio e alumínio não tratado, onde uma variedade de tratamentos de superfície e os desempenhos foram classificados.

Apesar de algumas pesquisas na área, há uma lacuna literária muito grande quando se trata de pesquisas sobre o estudo tribológico e meios para combater o desgaste gerado pelo grão de arroz em equipamentos mecânicos, o qual é o objetivo do presente trabalho.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 13 apresenta um fluxograma do procedimento experimental que foi realizado neste trabalho.

Figura 13 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Material

O material que foi utilizado como substrato para todos os corpos de prova deste trabalho foi o aço carbono SAE 1016. Os corpos de prova (CPs) foram submetidos a jateamento com granalha de Al_2O_3 para remover contaminantes e resíduos de óleo e promover uma rugosidade média da superfície (R_a) com cerca de $6\ \mu m$.

3.2 Amostras

Dois revestimentos: carбето de tungstênio e ferro com alto cromo foram depositados nos CPs pelos processos HVOF e Arco elétrico, respectivamente, pela empresa Rijeza Metalurgia.

Para a aplicação do revestimento de carboneto de tungstênio por aspersão térmica HVOF, foi utilizado um equipamento Praxair-TAFA JP-5000 HP/HVOF com um braço robótico e combustão com propano (C_3H_8).

O pó utilizado no processo de aspersão térmica HVOF foi o WOKA 3653 (WC-10Co-4Cr), comercializado pela empresa Harris Brastak Soldas especiais S.A cuja composição química do pó e averiguação (entregue pela empresa) está apresentada na Tabela 1, conforme a norma do fabricante *Oerlikon Metco* [OERLIKONMETCO WOKA 3653, 2019].

Tabela 1 - Composição química do pó de WC-10Co-4Cr.

Elemento	Especificado [% em peso]	Encontrado [% em peso]	Densidade [g/cm ³]
C	4,500 / 7,500	5,320	5,0
Co	9,000 / 11,000	10,380	
Cr	3,000 / 4,500	4,230	
W	RESTANTE / RESTANTE	80,07	

Fonte: *Harris Brastak*.

Para o processo a arco elétrico, foi utilizado uma tocha Tafa (Praxair) *Arc Spray Systems*. Para a alimentação foi utilizado o arame tubular a base de ferro com alto teor de cromo (Cr > 20%) METCO 8295 (Fe-29Cr-4B-1.75Si) de diâmetro de 1,6 mm comercializado pela *Oerlikon Metco*, cuja composição química é apresentada na Tabela 2 [OERLIKONMETCO WIRE 8295, 2019].

Tabela 2 - Composição química do arame tubular de ferro com alto teor de cromo.

Composição nominal	Porcentagem em peso (nominal)											Outros (máx.)
	Fe	Al	B	Cu	Cr	C	Mn	Mo	Ni	Si		
Metco 8295 Fe-29Cr-4B-1.75Si	63,75	-	4,0	-	29	-	-	-	-	-	1,75	1,5

Fonte: *Oerlikon Metco*.

3.3 Ensaios

3.3.1 Ensaio abrasivo

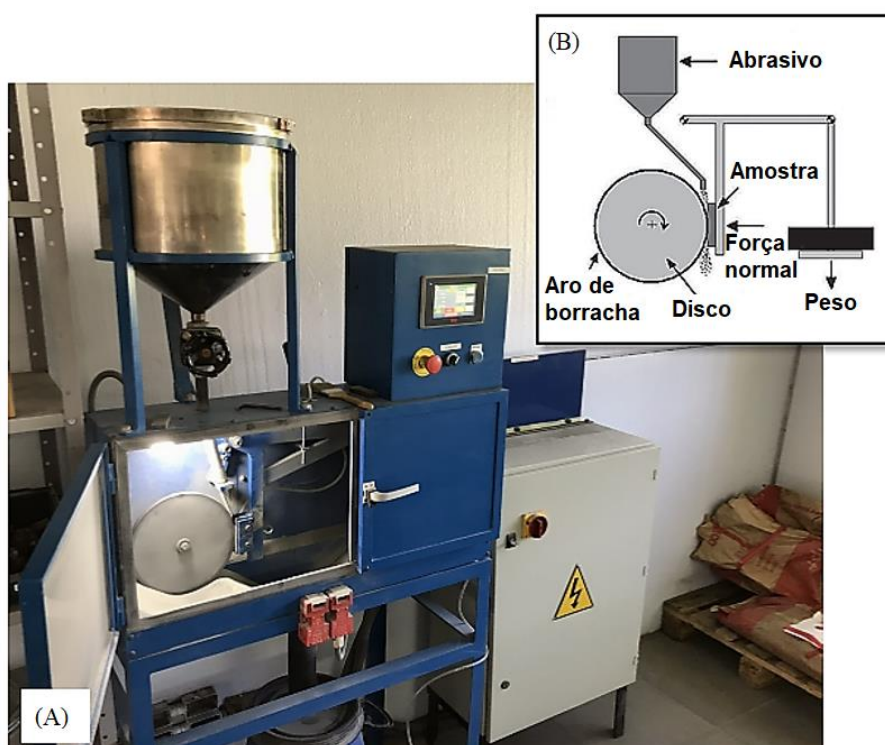
Foram realizados dois tipos de ensaios abrasivos:

- 1- Conforme a norma ASTM G65;
- 2- Adaptação da norma anterior, substituindo a areia por casca de arroz como material abrasivo.

Segundo a norma, o disco de contato consiste de um aro de borracha de largura e espessura de 12,7 mm (1/2") posicionado sobre um disco de aço com diâmetro de 228,6 mm, conforme Figura 14. O disco (ou a roda) gira com uma rotação constante de 200 RPM com variação permitida de ± 10 RPM, e o fluxo de abrasivo (areia de sílica) é direcionado entre a face da roda e da amostra, com vazão compreendida numa faixa entre 300 e 400 g/min.

Os CPs apresentam o formato retangular com dimensões de 25 x 75 x 10 mm. Foram realizados ensaios com duração de 2,5 - 5 - 7,5 - 10 - 15 e 20 min.

Figura 14 - Equipamento utilizado para o ensaio de desgaste (a) ASTM G65 e (b) representação esquemática do equipamento.



Fonte: Adaptado de ASTM G65 [2015].

Para medir a perda de massa das amostras, foi utilizada uma balança de precisão com resolução de 0.001g da marca Shimadzu modelo AY220. A perda de volume dos CPs foi obtida através da Equação 2.

$$V_l = \frac{m_l}{d} \times 1000 \quad (\text{Eq 2})$$

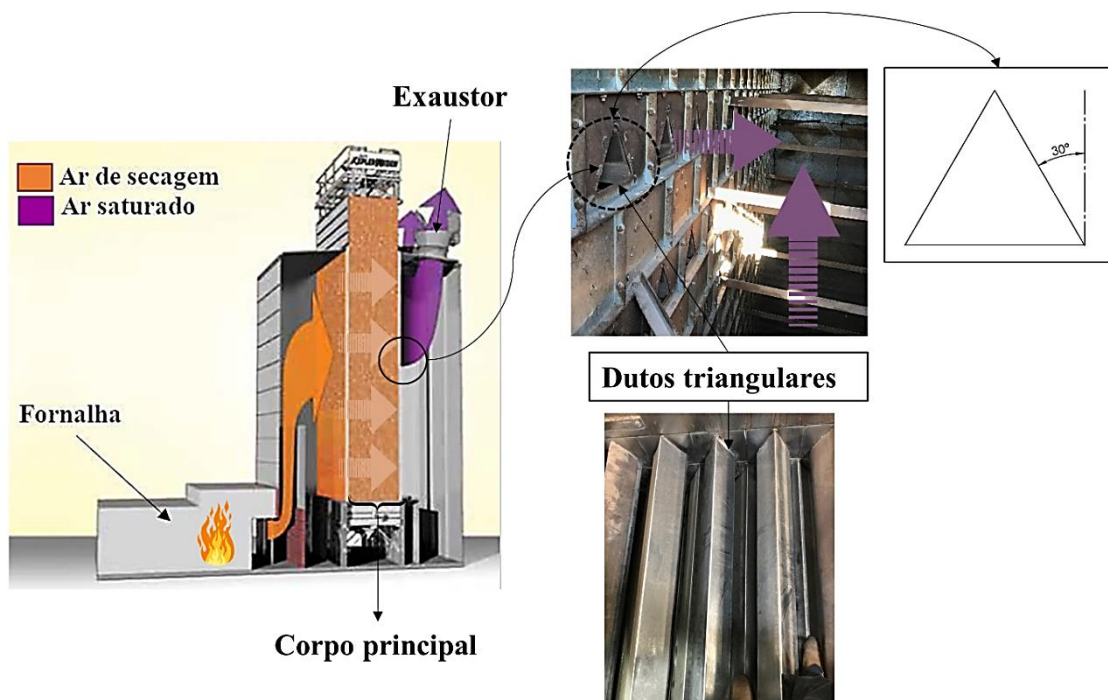
Onde: V_l = Volume perdido (mm^3); m_l = perda de massa (g); d = densidade (g/cm^3).

3.3.2 Ensaio de desgaste em campo

Foi realizado um ensaio de desgaste em campo onde foram estudadas as características do desgaste abrasivo e erosivo causados pelo impacto do grão de arroz em casca sobre os corpos de prova revestidos com WC-10Co-4Cr e Fe-29Cr-4B-1.75Si instalados dentro de um secador de grãos.

O secador de grãos de arroz é constituído de um corpo principal que contém câmaras de secagem e de resfriamento, formada por dutos triangulares de inclinação de 30° com eixo vertical. Através dos dutos triangulares o ar quente entra de um lado (ar de secagem) e sai do outro (ar saturado), atravessando a massa dos grãos, promovendo a secagem e resfriamento, respectivamente, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Ilustração do funcionamento de um secador de grãos.



Fonte: Autoria própria.

A localização específica da fixação dos corpos de prova, dentro do secador de grãos de arroz, foi em um dos dutos triangulares na parte mais alta do corpo principal do secador, conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Visão geral do local de aplicação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

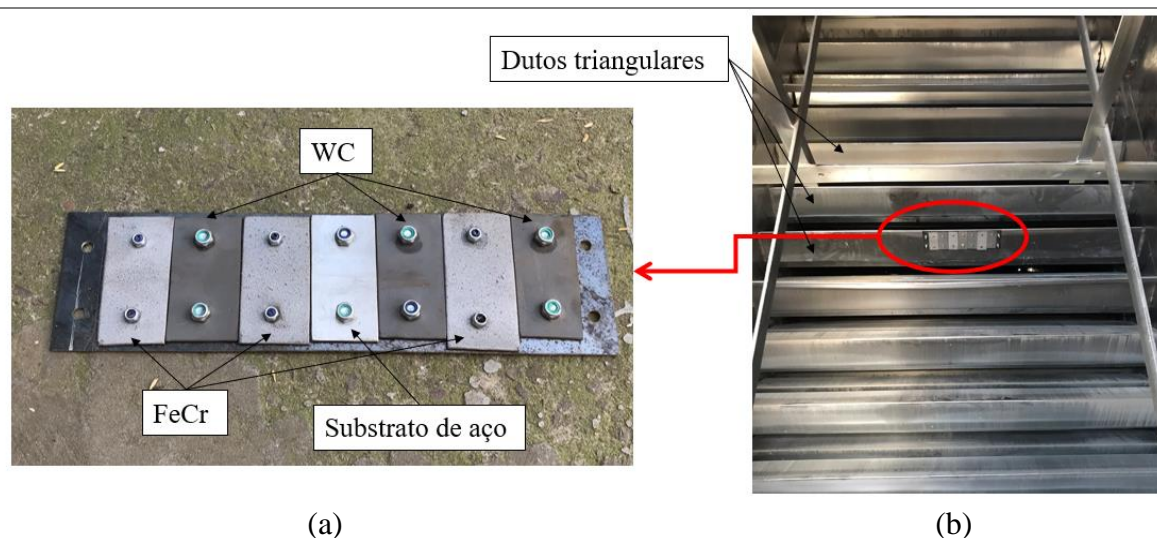
Os corpos de prova utilizadas neste ensaio, durante um intervalo de 1h e 30 min, tempo necessário para carregar (encher) o secador com grãos de arroz e então, iniciar o processo de secagem, receberam uma parcela do fluxo de arroz que escoava de uma altura de 4 metros até atingir os primeiros dutos de passagem de ar. Depois deste intervalo de tempo de carga, o secador inicia o processo de secagem e trabalha com a rotação dos grãos em seu interior por mais 4 a 8 horas dependendo da umidade em que o grão é colhido na lavoura.

A temperatura no interior do secador de grãos varia entre 40°C e 65°C durante o processo de secagem e foram secadas cerca de 80 cargas completas, totalizando cerca de 120 mil sacos de 50 kg, ao longo de 46 dias.

Os CPs apresentam o formato retangular com dimensões de 47 x 100 x 3 mm aproximadamente. Os CPs com os revestimentos foram fixados por dois parafusos (M6 ou M8 dependendo do diâmetro do furo) em uma chapa de aço com dimensões de 400 x 110 x 3 mm (LxAxEsp.) e foram distribuídos lado a lado onde o corpo de prova central é a amostra base a qual não contém revestimento, apenas aço, conforme mostra a Figura 17(a).

A chapa de aço, com os CPs, foi fixada por quatro parafusos sextavados, classe 8.8, M8x30mm com porca auto travante por chave 13 mm, em um dos dutos de ar de secagem na parte interna do corpo principal de um secador de grãos de arroz, conforme mostra a Figura 17(b). O secador utilizado durante o ensaio é da marca Pagé, de capacidade de secagem de 70 t/h.

Figura 17 - (a) CPs antes da montagem no secador e (b) fixados no duto de ar de secagem.



Fonte: Autoria própria.

O ensaio de desgaste em campo foi útil para interpretar como o comportamento do desgaste, seja abrasivo ou erosivo, age sobre os revestimentos dos corpos de prova em análise além de analisar a resistência ao desgaste pela perda de volume dos CPs. Foi importante também para comparar os resultados deste com os resultados do ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65 quando utilizado a casca de arroz como abrasivo.

3.4 Análise microestrutural

Para a análise microestrutural dos CPs foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss modelo EVO MA10. Foi analisado a microestrutura, espessura e interface entre revestimento / substrato dos revestimentos.

A composição das fases cristalinas do pó, arame e revestimentos foram analisadas por XRD utilizando-se um difratômetro com radiação da linha K_{α} do Cu (Rigaku - Ultima IV)

com geometria de Bragg-Brentano onde foi empregado os seguintes parâmetros: tensão e corrente nominal de 40/20 kV/mA, passo de 0,05 graus e 1s de tempo de integração.

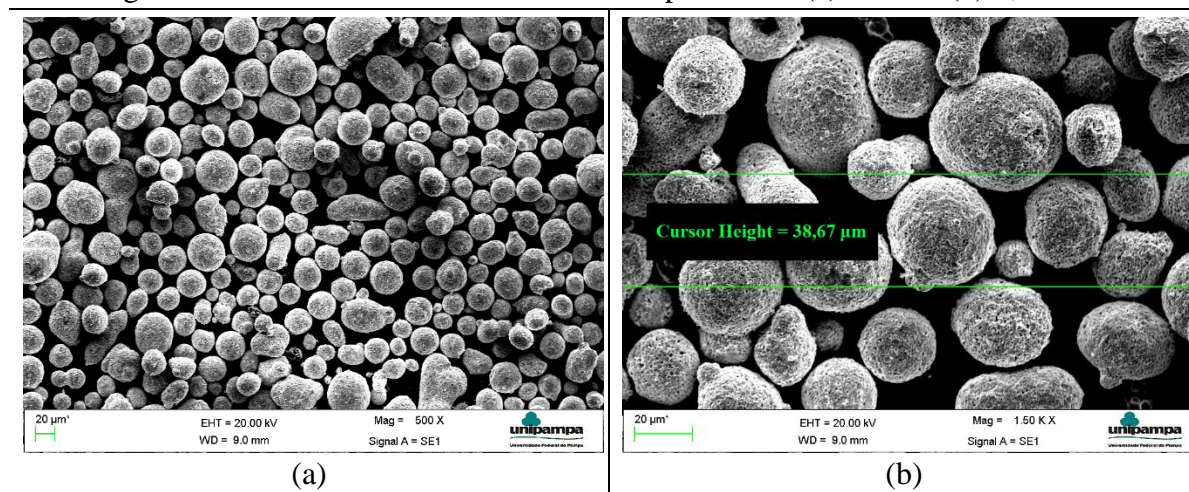
Para determinação do perfil de microdureza Vickers na seção transversal, foi utilizado um microdurômetro Buehler, modelo MicroMet 6010 com carga de 200 g com espaçamento de 70 μm , equivalente a três vezes o diâmetro da indentação entre as medidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos revestimentos aspergidos por HVOF e Arco Elétrico

A Figura 18 mostra as características geométricas e morfológicas do pó WC-10Co-4Cr utilizado no processo HVOF o qual se apresenta na forma esférica. O diâmetro de $38,67\ \mu\text{m}$ medido na Figura 18(b) está em consonância com a especificação do fabricante que é de $45\pm 11\ \mu\text{m}$.

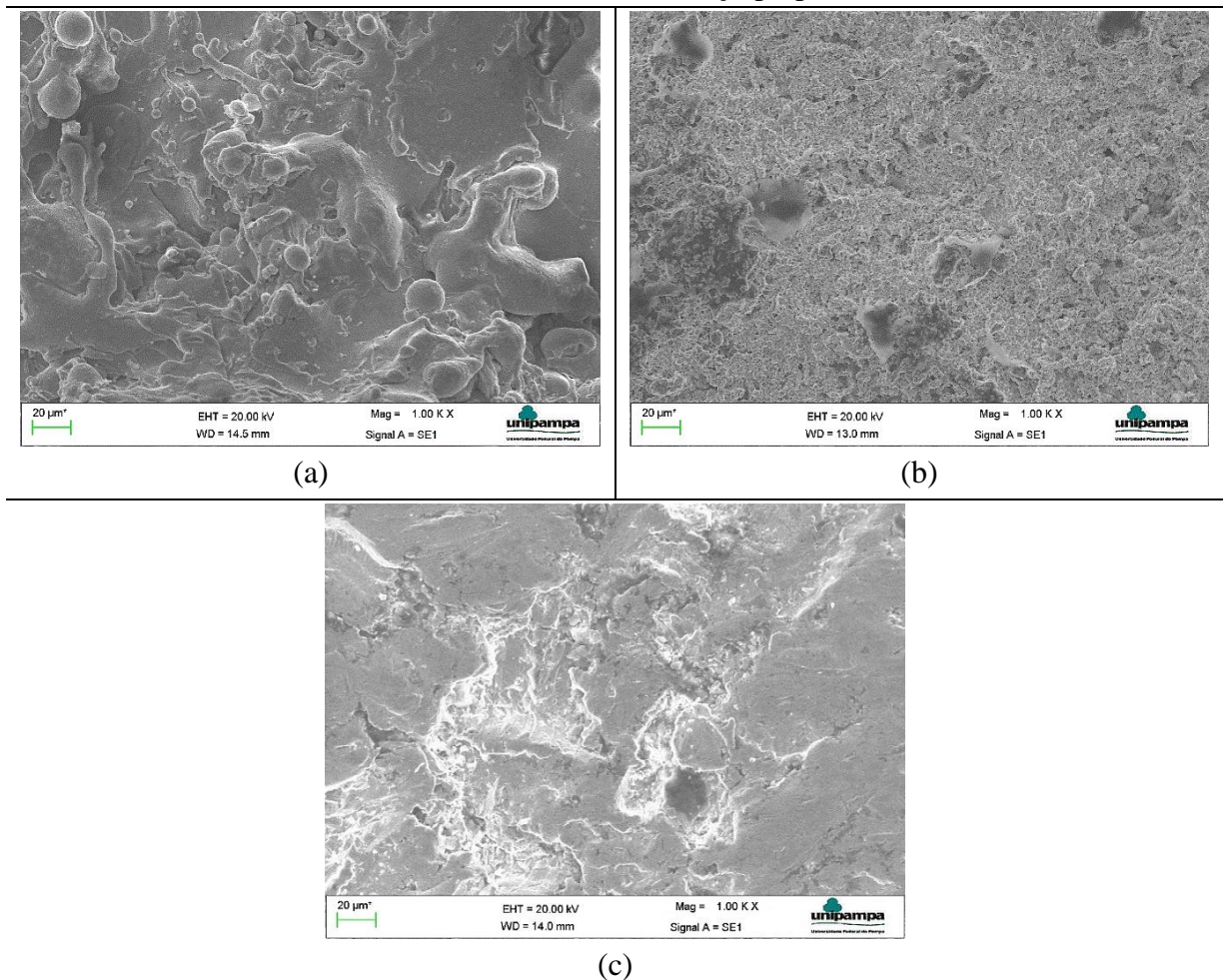
Figura 18 - Pó de WC-10Co-4Cr observado por MEV: (a) 500X e (b) 1,50 KX.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 mostra a imagem do MEV da superfície das amostras utilizadas, onde: a Figura 19 (a) mostra a superfície do revestimento aspergido com arame de Fe-29Cr-4B-1.75Si pelo método de arco elétrico, a Figura 19 (b) mostra a superfície do revestimento aspergido com pó de WC-10Co-4Cr pelo método HVOF e a Figura 19 (c) mostra a superfície do substrato de aço SAE 1016 preparado com a jateamento com granalha de Al_2O_3 .

Figura 19 - Superfície dos revestimentos aspergidos com (a) Fe-29Cr-4B-1.75Si, (b) WC-10Co-4Cr e (c) substrato de aço preparado.

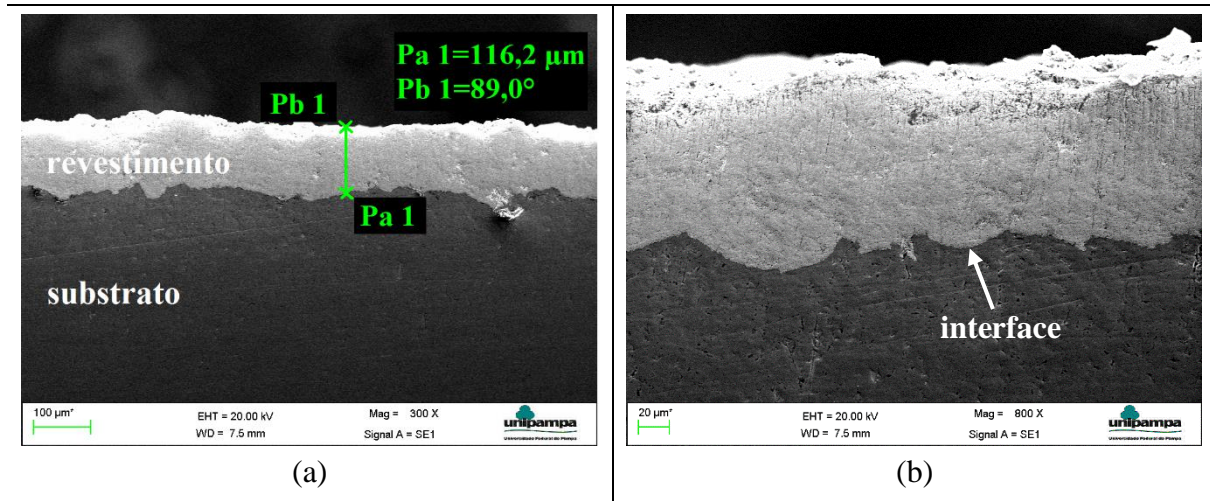


Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 mostra a seção transversal do revestimento de WC-10Co-4Cr aspergido por HVOF. O revestimento está homogêneo ao longo do substrato e apresenta uma espessura média (do ponto mais alto ao ponto mais baixo da rugosidade superficial do substrato) de 116,2 μm , conforme ilustrado na Figura 20 (a). A Figura 20 (b) mostra em detalhes um revestimento que sugere uma forte adesão na interface com o substrato.

Segundo GIBBONS E HANSELL [2008], o sistema que contém a tocha de aspersão JP5000 (HVOF), no seu conjunto, oferece os revestimentos mais lisos, duros e melhor aderentes, com a mais baixa porosidade e microestrutura mais homogênea, e tem o potencial de satisfazer as exigências de um revestimento duro econômico e de fácil aplicação.

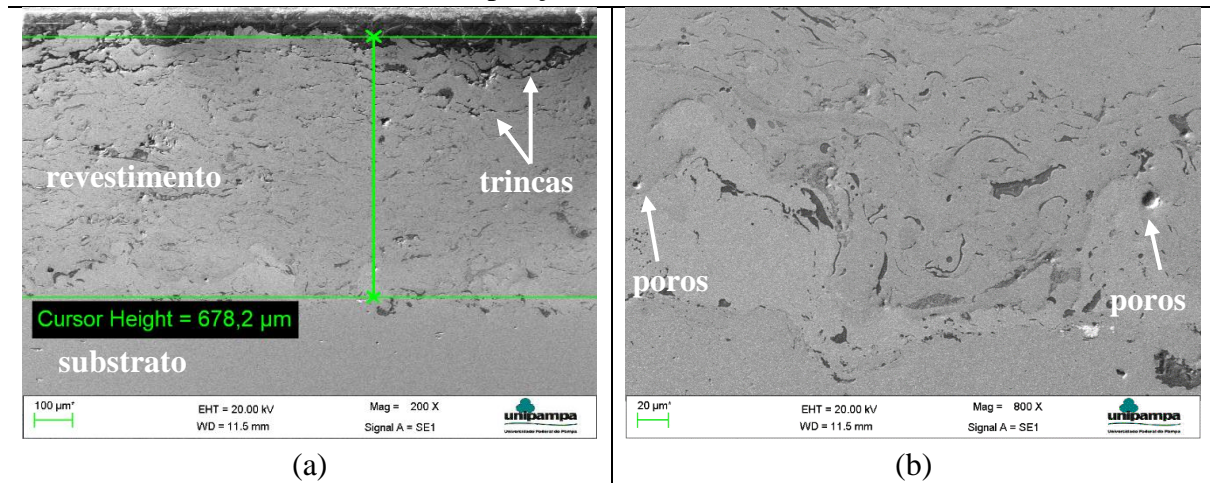
Figura 20 - Seção transversal do revestimento de WC-10Co-4Cr observado por MEV com ampliações de (a) 300X e (b) 800X.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 mostra a seção transversal do revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si aspergido por arco elétrico com arame. A Figura 21 (a) mostra a espessura do revestimento com 678,2 μm assim como trincas superficiais e poros.

Figura 21 - Seção transversal do revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si observado por MEV com ampliações de (a) 200X e (b) 800X.



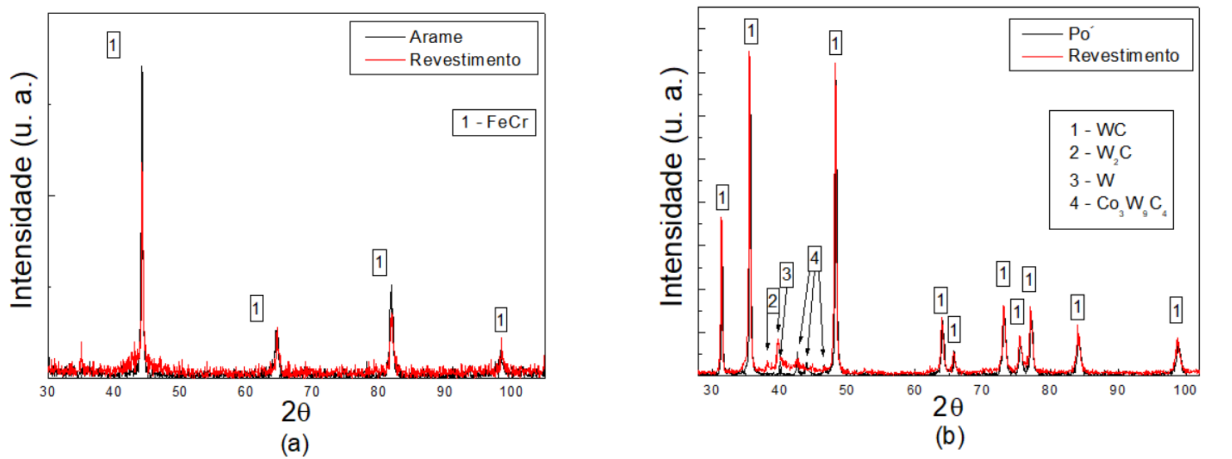
Fonte: Autoria própria.

Os padrões de XRD do arame de Fe-29Cr-4B-1.75Si e do pó de WC-10Co-4Cr utilizados como matéria prima para os revestimentos aspergidos são apresentados na Figura 22, juntamente com os respectivos revestimentos após a aspersão térmica.

Na Figura 22 (a) observa-se apenas a fase cúbica de corpo centrado correspondente a liga FeCr presente no arame, a qual é mantida no revestimento após o processo de aspersão. No caso do carbeto de tungstênio, verifica-se que o pó utilizado apresenta outras fases, além do WC, como pode ser observado na Figura 22 (b) através da indexação dos picos.

Após a aspersão térmica pela técnica HVOF, a única alteração observada é o desaparecimento da contribuição referente a fase do W metálico, predominando a fase policristalina do WC.

Figura 22 - Difratogramas do arame de Fe-29Cr-4B-1.75Si e de seu revestimento (a), e do pó de WC-10Co-4Cr e de seu revestimento (b).



Fonte: Autoria própria.

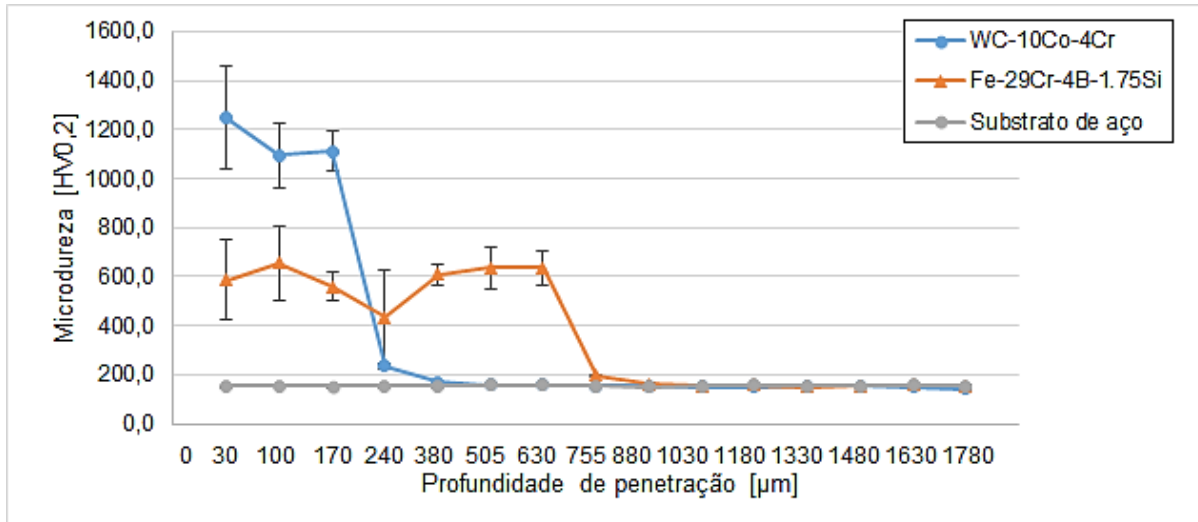
4.2 Ensaio de microdureza

Os valores da microdureza Vickers ($HV_{0,2}$) dos revestimentos de WC-10Co-4Cr e Fe-29Cr-4B-1.75Si aspergidos por HVOF e arco elétrico, respectivamente, são apresentados na Figura 23.

Para o revestimento de WC-10Co-4Cr foram realizadas três indentações ao longo da espessura de 171,4 μm de uma das amostras cuja média de microdureza ficou em 1151 HV. Pesquisas realizadas por MARPLE E LIMA [2005] e MASUKU et al. [2015] apresentam valores similares para a microdureza.

Para o revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si foi possível realizar sete medidas ao longo da espessura de 678,2 μm do revestimento onde a média de microdureza encontrada foi de 589 HV. Para os dois processos de aspersão, não houve influência destes sobre a dureza do substrato, que foi de aproximadamente 161 $HV_{0,2}$.

Figura 23 - Microdureza da seção transversal dos revestimentos de WC-10Co-4Cr, Fe-29Cr-4B-1.75Si e substrato de aço.

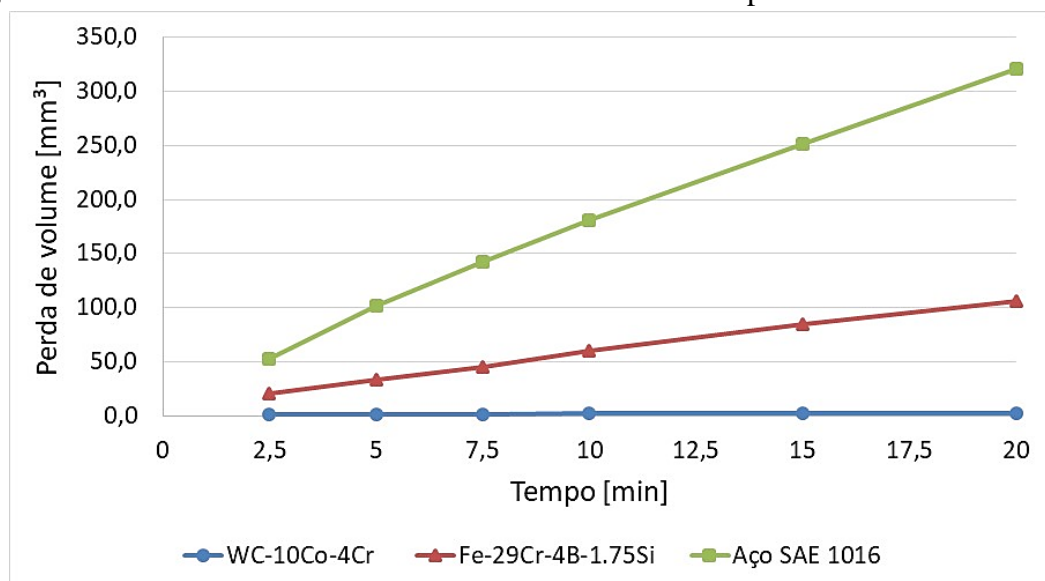


Fonte: Autoria própria.

4.3 Ensaio de desgaste laboratorial

A perda de volume das amostras após ensaio de abrasão ASTM G65 está plotada na Figura 24. Ao longo dos 20 minutos de duração do ensaio a perda de material apresentou um crescimento linear para as amostras com e sem revestimento.

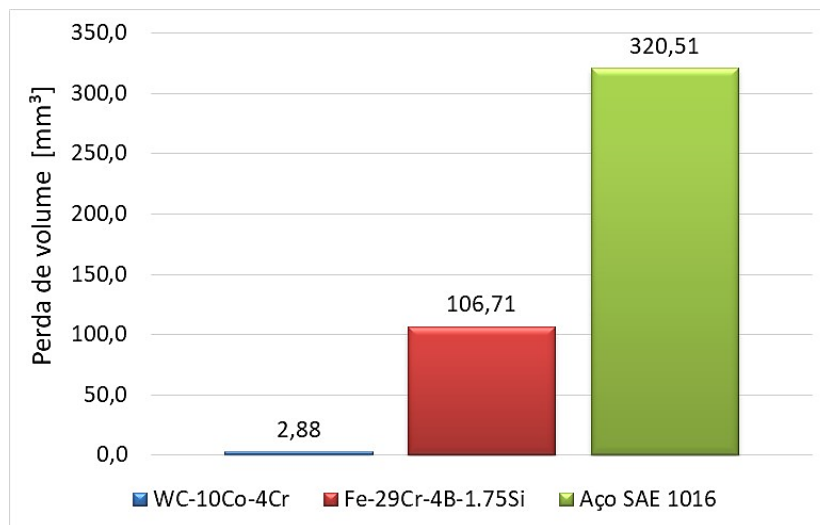
Figura 24 - Perda de volume das amostras no decorrer do tempo com ensaio ASTM G65.



Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 25, observou-se uma redução de perda de volume de aproximadamente 111 vezes para amostra com revestimento de WC-10Co-4Cr e de 3 vezes para a amostra com revestimento Fe-29Cr-4B-1.75Si quando comparado a amostra sem revestimento.

Figura 25 - Perda de volume do ensaio ASTM G65 com duração de 20 minutos.



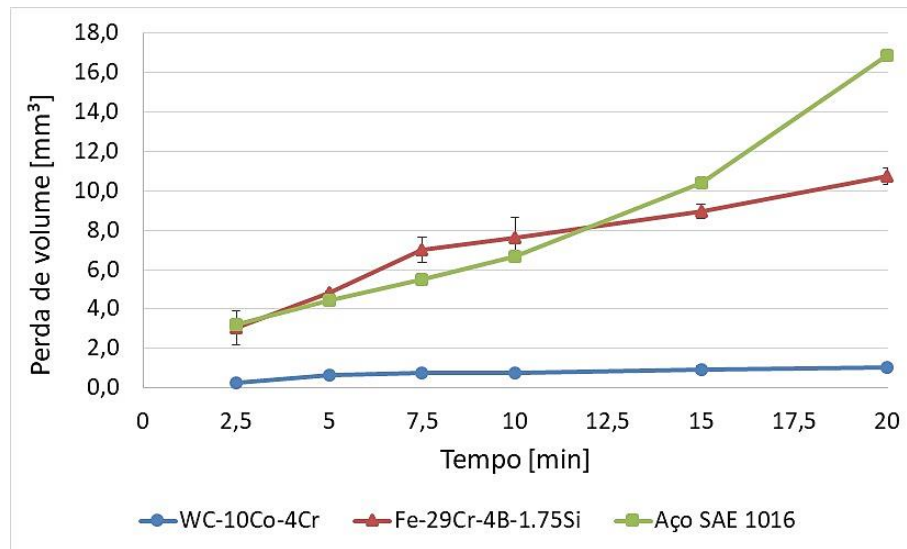
Fonte: Autoria própria.

Essas diferenças na perda de volume podem ser explicadas pelo fato de que o revestimento de WC-10Co-4Cr apresentar uma dureza muito superior quando comparado ao revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si, conforme apresentado na Figura 23 e também reportado por CASTELETTI et al. [2010] e ANTUNES et al. [2015].

Além disso, a diferença entre os processos resulta em diferença na velocidade das partículas que afeta a densidade dos revestimentos. KANG et al. [2012] obtiveram resultados similares para perda de volume ao se utilizar revestimentos aspergidos contra o desgaste abrasivo.

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados do ensaio abrasivo utilizando somente a casca de arroz como material abrasivo de modo a simular as condições reais de trabalho de máquinas e equipamentos utilizados na cultura agrícola do arroz.

Figura 26 - Perda de volume em função do tempo para ensaio com casca de arroz.



Fonte: Autoria própria.

Os CPs revestidos com Fe-29Cr-4B-1.75Si e os sem revestimento apresentaram uma perda de volume semelhante até o tempo de 10 minutos. O resultado pode ter ocorrido devido ao fato do revestimento aspergido pelo processo a arco elétrico apresentar uma superfície uniforme, porém com respingos de revestimentos, que quando submetido ao ensaio de desgaste tocam a roda de borracha junto com o abrasivo antes do corpo todo da amostra entrar em contato também.

Deste modo, com uma menor superfície em contato com a roda, esta passa apresentar um desgaste acentuado, devido a maior pressão, sobre a superfície que contém os respingos até removê-los. Passado esse momento a perda de massa da amostra revestida passa a ter uma perda de volume menor como esperado.

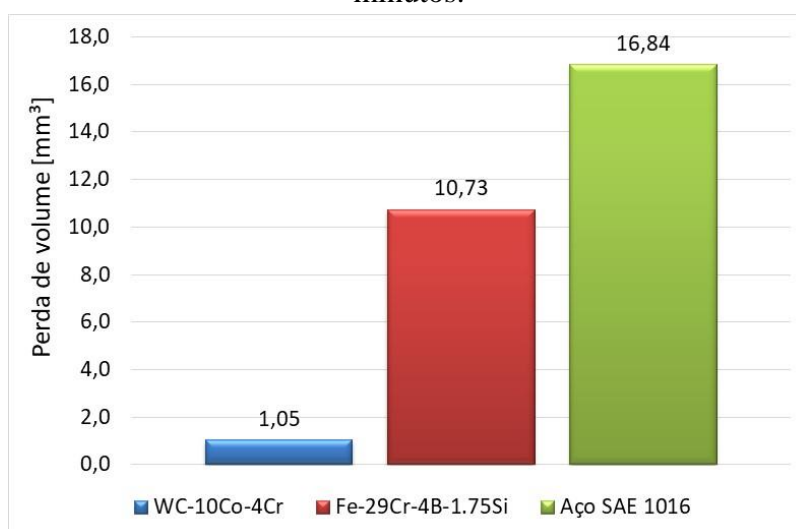
Diferente do ensaio com areia, não houve uma perda de volume linear nos CPs. Essa ocorrência se dá, possivelmente, pelo fato de a casca de arroz apresentar uma geometria elíptica que aumenta seu ângulo de corte comparado a partículas esféricas resultando em uma predominância de mecanismo de microcortes que acarreta um aumento do volume de material removido em relação a ângulos inferiores a um ângulo crítico [ZUM GAHR, 1987].

HAMBLIN E STACHOWIAK [1995] reportam o mesmo comportamento de desgaste quando investigados quatro tipos de minerais abrasivos com geometria angular de partículas pontiagudas ou arredondadas (quartzo, granada, areia de sílica e microesferas de vidro).

Comparando-se a amostra revestida com WC-10Co-4Cr e a amostra sem revestimento, houve uma redução de cerca de 16 vezes na perda de volume. Para a amostra revestida com

Fe-29Cr-4B-1.75Si houve uma redução de 10,2 vezes na perda de volume quando comparado a amostra sem revestimento. Comparando-se os dois revestimentos a amostra WC-10Co-4Cr apresentou uma perda de volume 1,5 vezes menor do que o Fe-29Cr-4B-1.75Si, como pode ser facilmente visualizado na Figura 27.

Figura 27 - Perda de volume do ensaio de desgaste com casca de arroz com duração de 20 minutos.



Fonte: Autoria própria.

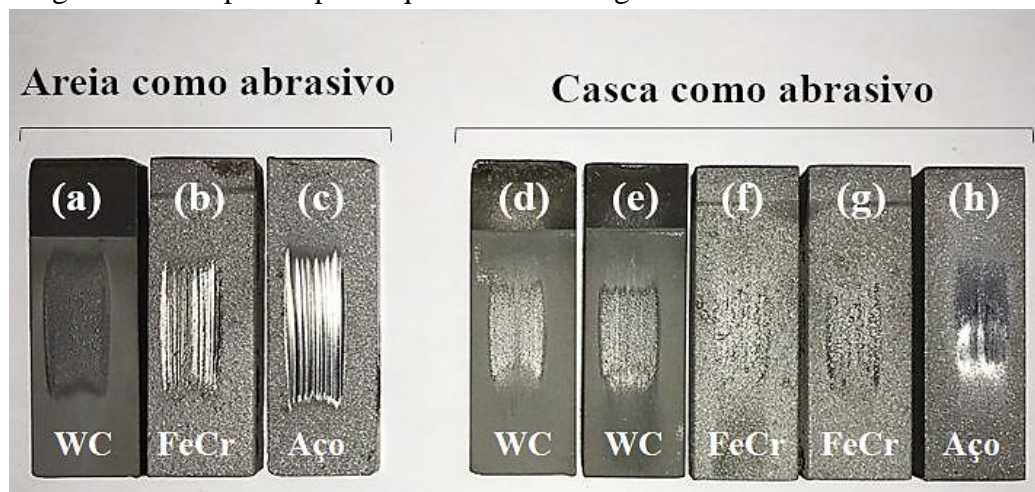
Comparando-se as taxas de desgaste dos ensaios com areia e com casca de arroz como materiais abrasivos, observou-se diferenças sensíveis em todas as amostras. Enquanto que a taxa de desgaste oriunda da areia se manteve aproximadamente constante durante todo o ensaio, para os ensaios com casca de arroz, houve um aumento da taxa de desgaste do material sem revestimento, após 10 minutos de ensaio.

Apesar do ensaio com casca de arroz ter apresentado menor volume de desgaste em relação a areia, os resultados sugerem que, para tempos maiores, o volume de material removido supere os resultantes do tempo com a areia, em função do aumento da taxa de desgaste.

Para DONG, JAHANMIR E HSU [1991], os fatores que afetam a taxa de desgaste abrasivo são as propriedades da superfície e do abrasivo, a natureza e a severidade das interações entre si, assim como, o grau de penetração do abrasivo na superfície do material que está sofrendo abrasão.

A Figura 28 mostra os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de desgaste utilizando a areia e a casca de arroz como abrasivo, conforme indica a figura.

Figura 28 - Corpos de prova que sofreram desgaste com areia e casca de arroz.



Fonte: Autoria própria.

Os CPs (a), (d) e (e) foram revestidos com WC-10Co-4Cr e os CPs (b), (f) e (g) com Fe-29Cr-4B-1.75Si enquanto os CPs (c) e (h) contém apenas o substrato de aço. Visualmente, percebe-se que as amostras, quando submetidas ao ensaio com areia, acabam por apresentar um desgaste mais grosseiro quando comparado com a casca.

Os resultados mostram a influência do tipo de abrasivo e do tipo de revestimento no volume de material removido. Os revestimentos de Fe-29Cr-4B-1.75Si e WC-10Co-4Cr, em especial este, se mostraram benéficos para o aumento da resistência ao desgaste abrasivo com casca de arroz, demonstrando potencial para aplicação em componentes de máquinas e componentes agrícolas.

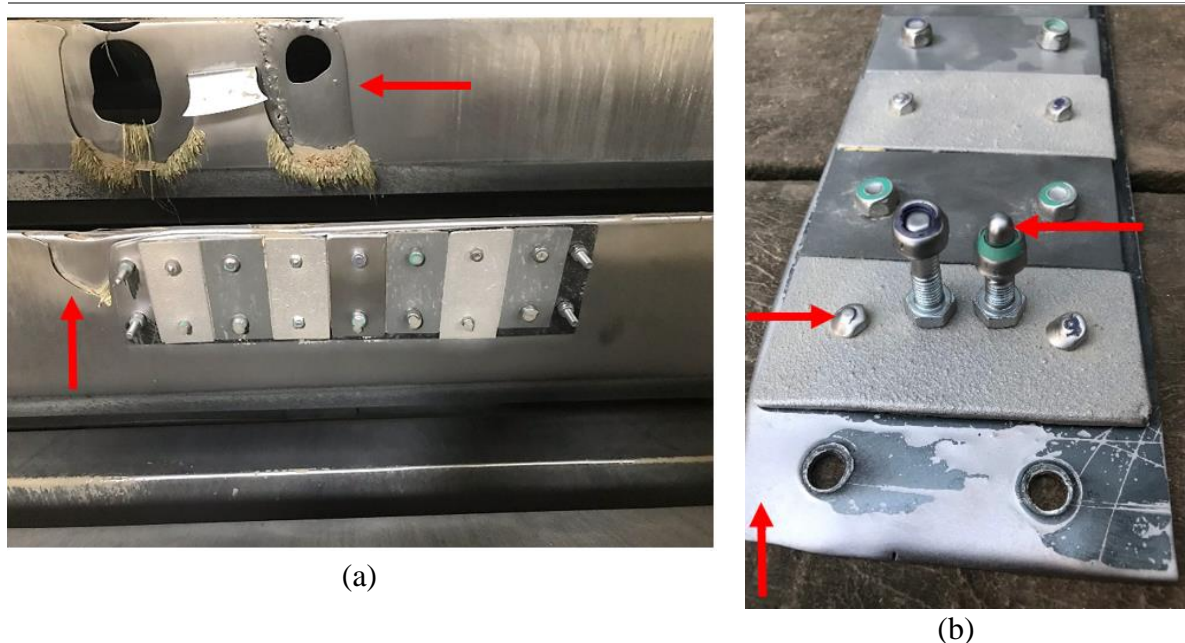
4.4 Ensaio de desgaste em campo

4.4.1 Avaliação visual dos corpos de prova

Os CPs revestidos foram fixados na estrutura de secagem de arroz, conforme foi mostrado na Figura 17. Através da Figura 29 (a) é possível observar o desgaste ocorrido nos dutos de passagem de ar e sobre a chapa de fixação dos CPs, conforme indicam as setas.

Fica claro a quantidade de material removida através da passagem de arroz sobre os dutos de ar e o quanto o grão de arroz é abrasivo / erosivo. A Figura 29 (b) mostra o dano ocorrido sobre os CPs, a chapa de fixação e sobre as porcas dos parafusos. O mesmo não é percebido nos CPs devido à baixa perda de volume que os revestimentos em análise desenvolveram.

Figura 29 - Chapa de aço com os corpos de prova depois do contato com arroz: (a) fixada do duto de ar e (b) após finalização do ensaio.



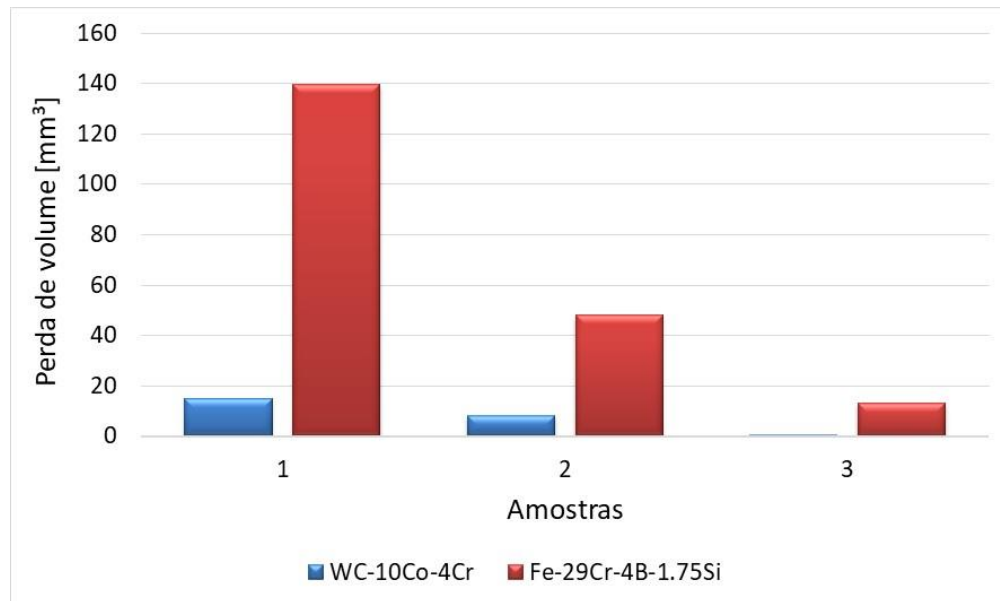
Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Perda de volume e taxa de desgaste

Para mensurar a quantidade de material removido e, conseqüentemente o desgaste ocorrido durante o contato do grão de arroz com os CPs, é mostrado na Figura 30 a perda de volume dos corpos de prova.

As amostras denominadas 1 são os CPs com revestimentos localizados a esquerda como mostra a Figura 17 (a), amostra 2 são os CPs localizados na parte central e 3 os CPs localizados a direita.

Figura 30 - Perda de volume das amostras revestidas (ensaio em campo).



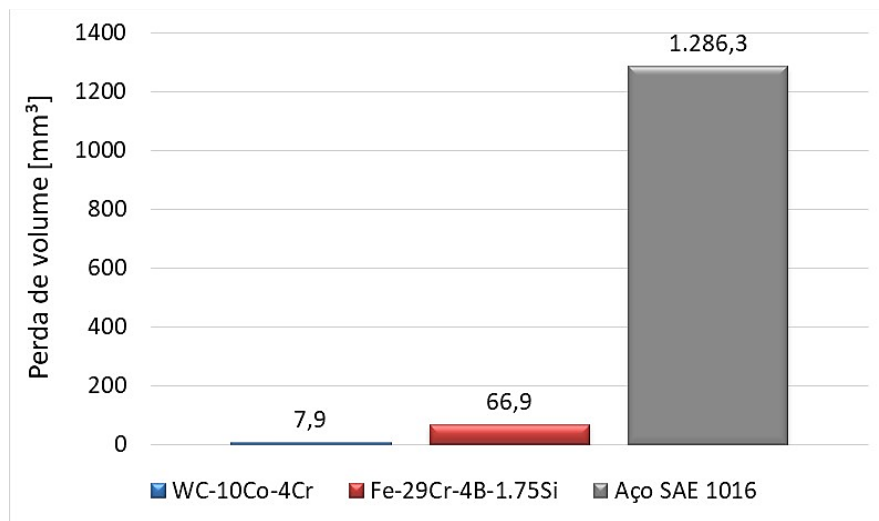
Fonte: Autoria própria.

É possível observar que houve uma perda de volume muito mais considerável nas amostras denominadas 1, posteriormente 2 e por fim 3, pois estas receberam maior fluxo de grãos de arroz durante o período de 1,5h no momento em que o secador de grãos era enchido. Este fato mostra que grande parte do desgaste ocorrido durante o período de ensaio ocorreu por desgaste do tipo erosivo.

A Figura 31 apresenta a comparação da média da perda de volume das amostras revestidas juntamente com a perda de volume da única amostra sem revestimento. Embora o corpo de prova sem o revestimento (substrato) esteja situado no meio dos demais CPs, em uma condição de trabalho menos severa, este apresentou uma perda de volume muito superior aos demais CPs.

O corpo de prova sem revestimento alcançou um valor 19 vezes maior perda de volume comparado ao corpo de prova revestido com Fe-29Cr-4B-1.75Si e 163 vezes comparado ao corpo de prova revestido com WC-10Co-4Cr. A perda de volume entre os revestimentos foi de 8,4 vezes.

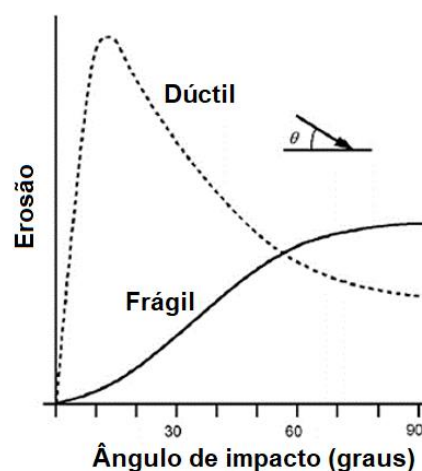
Figura 31 - Comparação da perda de volume média dos CPs com e sem revestimento para o ensaio em campo.



Fonte: Autoria própria.

A taxa de desgaste de um material está relacionada com a geometria da deformação plástica, da peça em serviço, causada devido ao impacto de uma partícula dura sobre o material, que depende diretamente da velocidade de impacto, da forma, orientação da partícula e do ângulo de impacto [HUTCHINGS, I. M, 1992]. A dependência típica da erosão com o ângulo de impacto (definido como o ângulo entre a direção do impacto e a superfície) é mostrada na Figura 32 [CAMACHO, J., LEWIS, R., & DWYER-JOYCE, R. S, 2009].

Figura 32 - Taxa de desgaste erosivo em função do ângulo de impacto de partículas.



Fonte: Adaptado de CAMACHO, J., LEWIS, R., & DWYER-JOYCE, R. S, [2009].

Os CPs foram fixados com 30° de inclinação em relação à direção de impacto das partículas, o que indica que para materiais frágeis não caracteriza uma taxa de erosão elevada, porém para materiais dúcteis indica uma taxa de erosão considerável. Pensar em alterar o ângulo de impacto de toda a estrutura de secagem para diminuir a taxa de desgaste envolveria modificações substanciais na estrutura como: alteraria o fluxo de escoamento do grão de arroz sobre os dutos de secagem para enchimento do secador e alteraria a transferência de calor entre o ar quente e o grão.

Com o propósito de obter uma taxa de desgaste para cada tipo de corpo de prova, utilizou-se a perda de volume dos CPs ao final do processo de secagem de arroz dividido pela quantidade de sacos de arroz secados.

Além disso, foi calculado um índice de resistência ao desgaste (WRI), através da perda de volume do corpo de prova sem revestimento dividido pela perda de volume dos corpos de prova revestidos, logo, quanto maior o índice, mais resistente ao desgaste é o revestimento. Os valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Taxa de desgaste e índice de resistência ao desgaste (WRI) para o ensaio em campo.

Copos de prova	Taxa de desgaste [mm³/saco]	WRI
Substrato de aço SAE 1016	0,0107188	1
Fe-29Cr-4B-1.75Si	0,0005573	19,2
WC-10Co-4Cr	0,0000656	163,5

Fonte: Autoria própria.

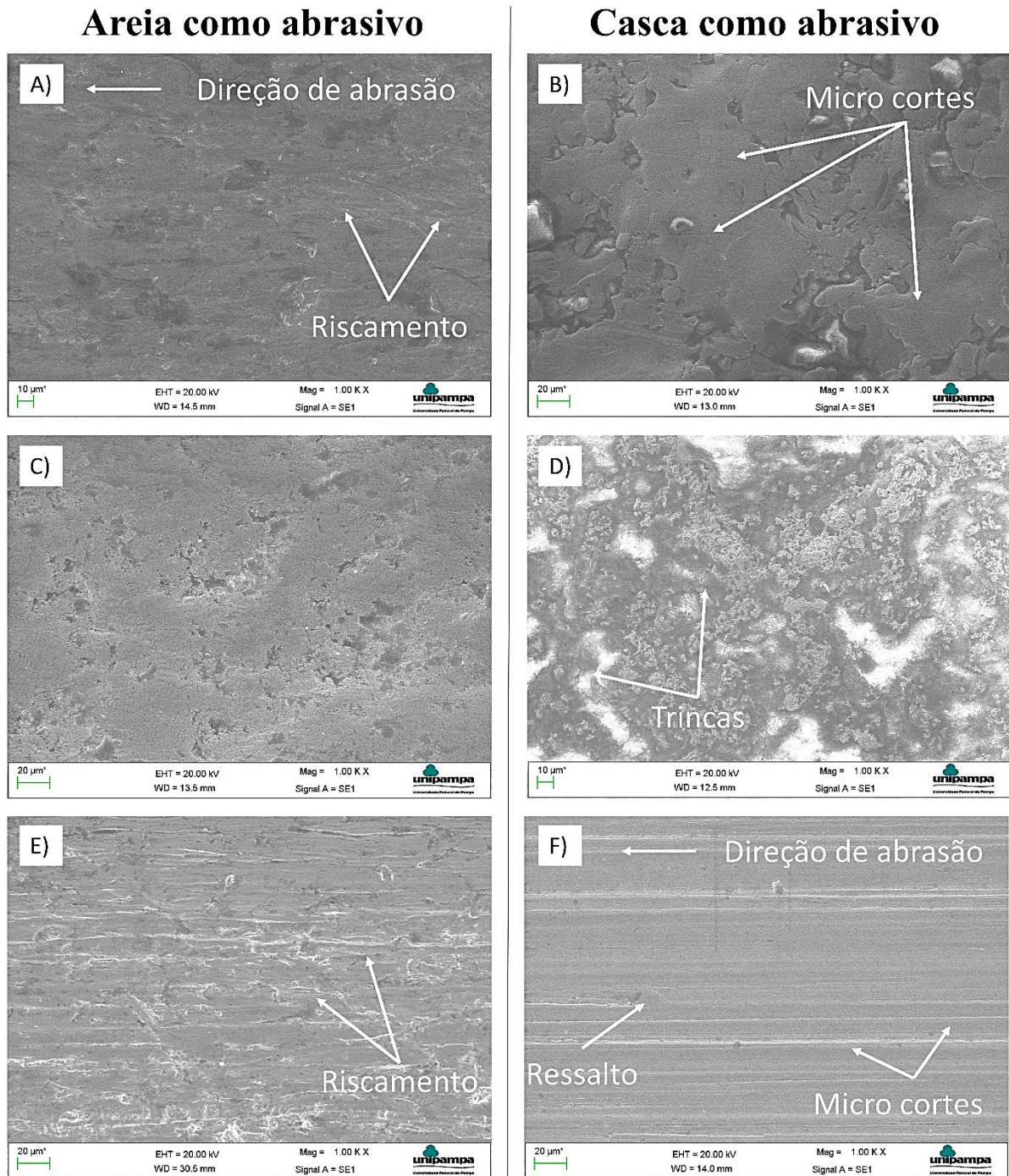
Desta forma, através da taxa de desgaste é possível estimar um tempo de vida útil de peças que receberam revestimentos pelo processo de HVOF e arco elétrico no contato com o grão de arroz cujos revestimentos são os analisados neste trabalho.

4.5 Mecanismos de desgaste

4.5.1 Mecanismos de desgaste para o ensaio de desgaste laboratorial

Para determinar os mecanismos do desgaste gerados pelos abrasivos durante o ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65, as superfícies dos revestimentos desgastados foram analisadas através do MEV. Os resultados são mostrados na Figura 33.

Figura 33 - Imagens pelo MEV da morfologia da superfície das trilhas de desgaste no revestimento de: Fe-29Cr-4B-1.75Si (a e b), WC-10Co-4Cr (c e d) e substrato (e f), com areia e casca como material abrasivo respectivamente. Todas as amostras sofreram desgaste na direção ilustrada pela figura (f).



Fonte: Autoria própria.

As imagens da superfície dos trilhos de desgaste por três corpos ASTM G65 mostram marcas de desgaste semelhantes na superfície de ambos os tipos de revestimentos. O que difere são os trilhos de desgaste quanto ao tipo de abrasivo utilizado.

Ao utilizar a areia, as amostras indicam que o revestimento e o substrato foram removidos por um mecanismo de abrasão, denominado riscamento (do inglês *scratches*), revelando evidências de extrusão e deformação plástica na superfície de desgaste ocasionando uma alta perda de massa das amostras (Fig. 30 (a), (c) e (e)) [BUDINSKI, K. G., BUDINSKI, S. T., 2018; JIAN, Y., 2019].

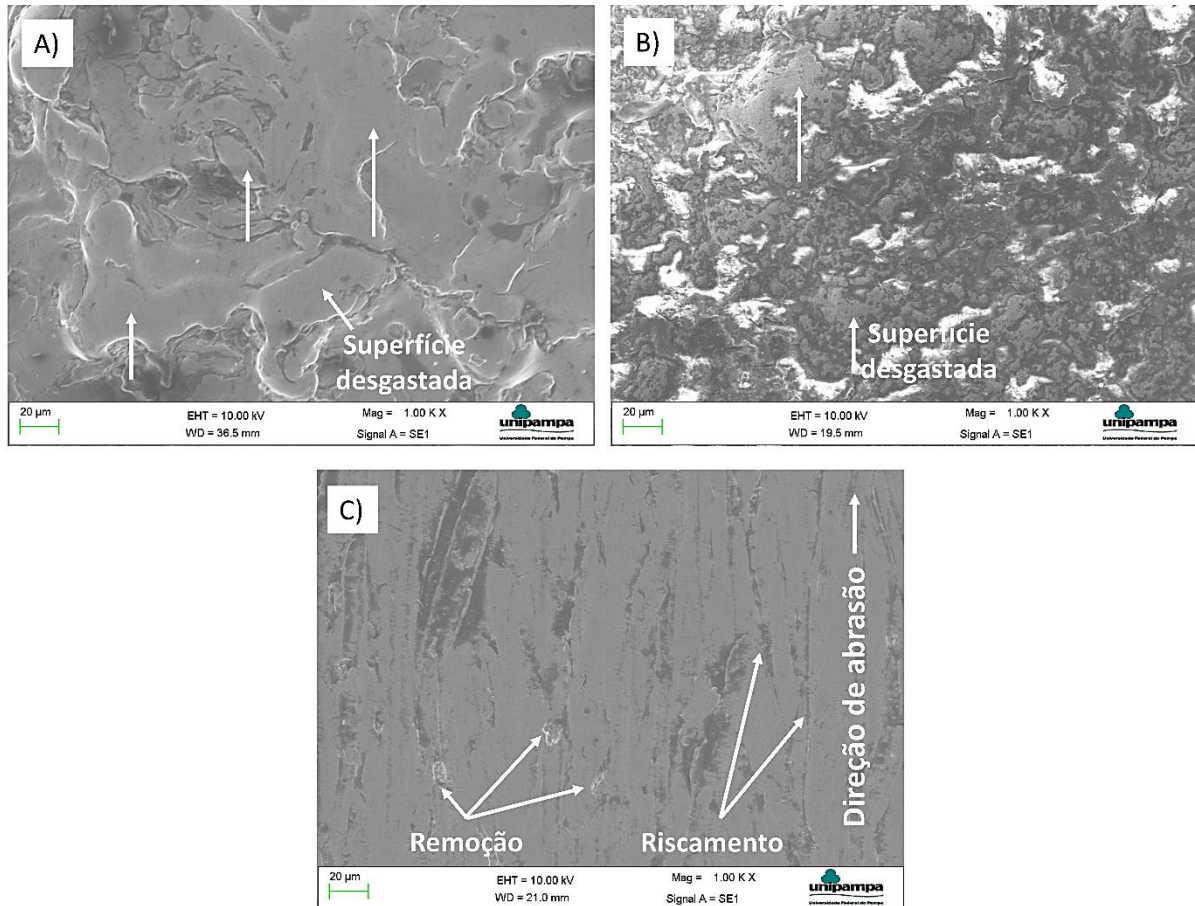
Ao utilizar a casca de arroz como material abrasivo, as amostras revelaram a atuação de micro cortes sob a superfície (Fig. 30 (b), (d) e (f)). Alguns sulcos curtos são encontrados na superfície de desgaste (Fig. 30 (b)), o que implica que micro cortes ocorrem durante o desgaste por três corpos quando utilizada a casca de arroz. Os mecanismos de remoção do material incluem trincas para o revestimento de WC-Co-Cr (Fig. 30 (d)) e ressaltos / saliências para o substrato (Fig. 30 (e)).

Observou-se também que para o revestimento de WC-Co-Cr com maior microdureza (1151 HV_{0,2}) os sulcos gerados pelos abrasivos não foram tão profundos como para o revestimento de Fe-Cr-B-Si (589 HV_{0,2}) e para o substrato de aço (161 HV_{0,2}). Esse comportamento já era esperado, pois o substrato de aço apresentava valores de microdureza inferiores aos dos revestimentos aplicados (ver Fig. 21) [FARROKHZAD, M. A., SAHA, G. C, KHAN, T. I., 2014].

4.5.2 Mecanismos de desgaste para o ensaio de desgaste em campo

Da mesma forma que o subitem anterior, a Figura 35 mostra as superfícies dos revestimentos desgastados, quando solicitados em contato direto com o grão de arroz com casca (dentro da estrutura de secagem de arroz), para determinação dos mecanismos de desgastes gerados.

Figura 34 - Imagens pelo MEV da morfologia da superfície das trilhas de desgaste no revestimento de: Fe-29Cr-4B-1.75Si (a), WC-10Co-4Cr (b) e substrato (c) para o ensaio em campo. Todas as amostras sofreram desgaste na direção ilustrada pela figura (c).



Fonte: Autoria própria.

Comparando a Figura 34 acima com a Figura 19, fica claro o notável desgaste ocorrido sob a superfície das amostras analisadas. Em todas as imagens, percebe-se que as superfícies ficam com um relevo de caráter plano, sem irregularidades salientes, devido a passagem e remoção de material gerado pelo contato com o grão de arroz.

Para este ensaio de desgaste em campo, fica evidente apenas no substrato de aço (Fig. 32 (c)) os trilhos gerados pela direção de abrasão do grão, demonstrando riscamento e remoção de material sob a amostra de menor microdureza.

4.6 Viabilidade econômica

A técnica de aspersão térmica a arco elétrico com arame (WAS) difere da técnica HVOF em vários aspectos, por exemplo: custo de aplicação, espessura do revestimento

depositado, fonte de geração de calor, entre outros. Ao se tratar de espessura de revestimento, a técnica a arco elétrico produz revestimentos, de aproximadamente, 3 vezes mais espessos que a técnica HVOF, conforme a indica a profundidade de penetração da Figura 23.

Diante disso, foi realizado um estudo sobre a viabilidade econômica dos revestimentos, onde, a partir das equações geradas pelas curvas da perda de volume, obtidas durante os ensaios abrasivos (Figuras 24 e 26), foi possível estimar com precisão o tempo de vida útil dos revestimentos e substrato.

A Tabela 4 apresenta uma estimativa de vida útil para os revestimentos e substrato de acordo com o ensaio abrasivo ASTM G65. Foi estimada uma perda de volume em mm^3 sobre uma área útil de 400 mm^2 , onde: o revestimento aplicado com HVOF apresenta uma espessura de $300 \mu\text{m}$, o revestimento aplicado com arco elétrico $900 \mu\text{m}$ e a chapa de aço uma espessura de 3 mm .

Tabela 4 - Tabela do tempo estimado de vida útil para ensaio ASTM G65.

	Perda de volume [mm^3]	Tempo de remoção do revestimento [h]	Tempo de remoção do revestimento + substrato [h]
WC-10Co-4Cr	120	19,16	20,47
Fe-29Cr-1,75Si	360	1,18	2,48
Aço SAE 1016	1200	-	1,30

Fonte: Autoria própria.

A mesma metodologia foi aplicada para a Tabela 5, a qual apresenta uma estimativa de vida útil para os revestimentos e substrato de acordo com o ensaio abrasivo utilizando a casca de arroz como material abrasivo.

Tabela 5 - Tabela de tempo estimado de vida útil para ensaio de abrasão com casca de arroz como abrasivo.

	Perda de volume [mm^3]	Tempo de remoção do revestimento [h]	Tempo de remoção do revestimento + substrato [h]
WC-10Co-4Cr	120	52,06	53,18
Fe-29Cr-1,75Si	360	14,42	15,54
Aço SAE 1016	1200	-	1,11

Fonte: Autoria própria.

Comparando-se a Tabela 4 com a Tabela 5, observa-se que a vida útil do revestimento de WC-10Co-4Cr foi de aproximadamente 8 vezes maior para o ensaio com areia e 3 vezes

maior para o ensaio com casca de arroz, quando comparado ao revestimento de Fe-29Cr-1,75Si.

Analisando a Tabela 5, observa-se que ao comparar os tempos de remoção do revestimento mais substrato, obtém-se valores de aproximadamente 14 vezes de maior vida útil do revestimento de Fe-29Cr-1,75Si em relação ao substrato de aço SAE 1016, e 48 vezes para o revestimento de WC-10Co-4Cr.

Assim, a escolha do revestimento WC-10Co-4Cr é justificada para aplicação no setor orizícola caso seu custo de produção seja até 3 vezes maior que o revestimento de Fe-29Cr-1,75Si, caso contrário, a aplicação do revestimento de Fe-29Cr-1,75Si se torna vantajosa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foram realizados ensaios experimentais em amostras de aço carbono SAE 1016 revestidas com Fe-29Cr-4B-1.75Si e WC-10Co-4Cr pelas técnicas de aspersão a arco elétrico e HVOF, respectivamente, para estudo tribológico. Foram realizados os ensaios de abrasão a três corpos ASTM G65, uma adaptação deste ensaio com a utilização do emprego da casca de arroz como material abrasivo e a aplicação dos corpos de prova dentro de uma estrutura de secagem de arroz.

Destaca-se que um dos principais resultados deste trabalho foi a descoberta dos mecanismos de desgaste envolvidos nos revestimentos analisados durante os ensaios, juntamente com o modo pelo qual as partículas utilizadas nos ensaios de abrasão, em especial os grãos de arroz e a casca, removem os revestimentos e justificam a maneira de remoção dos mesmos através de suas geometrias. Provou-se que os revestimentos em análise se mostraram como uma ótima opção para emprego de alta durabilidade em equipamentos agrícolas que trabalham sob o contato com o grão de arroz em casca.

Ao utilizar a areia normatizada como material abrasivo no ensaio de desgaste abrasivo (ASTM G65), percebeu-se que o desgaste na superfície das amostras aconteceu pelo mecanismo de riscamento (do inglês *scratches*) ao longo da direção de abrasão tanto para as amostras revestidas quanto para a amostra sem revestimento. Quando utilizado a casca de arroz como material abrasivo durante a adaptação do ensaio de desgaste abrasivo, ocorreu o mecanismo de microcortes na superfície desgastada das amostras justificado pela geometria elíptica e pontiaguda da casca do grão.

Através o ensaio em campo, *in-situ*, pode-se perceber que o tipo de desgaste que acarreta a maior perda de volume das amostras foi o desgaste erosivo, que acontece durante o período em que o secador de grãos é enchido. Este desgaste se caracteriza pela remoção de material através do impacto na superfície em estudo pelos grãos de arroz em casca. Mesmo com a baixa perda de volume das amostras revestidas, ao final dos 46 dias de ensaio, as micrografias revelaram uma superfície muito nivelada pelo desgaste ocorrido para todas as amostras em estudo ficando evidente a perda de material. As amostras de WC-10Co-4Cr e Fe-29Cr-4B-1.75Si alcançaram uma perda de volume de 163 e 19 vezes, respectivamente, menor que a amostra de aço (substrato).

5.1 Conclusões

O objetivo geral deste trabalho que propõe analisar a ciência e o comportamento envolvido no desgaste abrasivo e erosivo na superfície dos corpos de provas aspergidos, foi completamente alcançado. A seguir, são apresentadas as seguintes conclusões:

- O revestimento de Fe-29Cr-4B-1.75Si e WC-10Co-4Cr se mostraram com uma boa uniformidade da camada depositada, uma microestrutura densa, boa adesão ao substrato e com baixa porosidade devido a boa fusão da matéria prima durante o processo de aspersão térmica.

- Na análise de XRD foi possível observar que apenas a fase cúbica de corpo centrado correspondente a liga de FeCr, presente no arame utilizado como matéria prima no processo a arco elétrico, é mantida no revestimento após a aspersão térmica. No caso do carbeto de tungstênio, verifica-se que o pó utilizado como matéria-prima apresenta outras fases, além do WC. Após a aspersão por HVOF, a única alteração observada é o desaparecimento da contribuição referente a fase do W metálico, predominando a fase policristalina do WC.

- Os revestimentos de Fe-29Cr-4B-1.75Si e WC-10Co-4Cr apresentaram uma microdureza média em torno de 589 HV_{0,2} e 1151 HV_{0,2} respectivamente. O substrato de aço obteve uma microdureza de 160 HV_{0,2}.

- A elevada microdureza é reflexo do resultado da perda de volume no ensaio de desgaste ASTM G65 onde houve uma diferença em torno de 100 e 3 vezes quando comparado o revestimento de WC-10Co-4Cr e Fe-29Cr-4B-1.75Si, respectivamente com a perda de volume com o substrato de aço. Para o ensaio de desgaste utilizando a casca de arroz como abrasivo o mesmo caráter de perda de volume foi encontrado nos revestimentos.

- A casca de arroz como material abrasivo em relação ao ensaio com areia resultou em um desgaste mais suave no início dos ensaios, mas com um aumento sensível da taxa de desgaste com o tempo, projetando uma condição mais severa para tempos mais longos de ensaio.

- Os dois revestimentos se mostraram resistentes ao desgaste abrasivo e erosivo quando submetidos ao ensaio dentro da estrutura de secagem de arroz e apresentaram uma taxa de desgaste muito menor quando comparado com o valor da perda de volume de uma amostra de aço sem revestimento. Através da perda de volume dos corpos de prova foi possível perceber

que a maior parcela do desgaste para este caso se dá a partir do impacto que o grão tem com a estrutura em análise caracterizando o desgaste erosivo.

– Ao analisar os mecanismos de desgaste, percebeu-se que no ensaio laboratorial quando utilizado a areia como material abrasivo, o mecanismo de riscamento está presente na direção de abrasão para os dois revestimentos e substrato de aço. Quando utilizada a casca como material abrasivo, há a presença de microcortes como mecanismo de desgaste na direção de abrasão. Em ambos os casos, o revestimento de carbeto de tungstênio, por ter elevada dureza, não ilustra tão facilmente os mecanismos citados.

– No ensaio em campo, as superfícies das amostras estudadas apresentaram uma superfície nivelada (lisa) pela abrasão dos grãos de arroz em casca e apenas o substrato de aço apresentou riscos bem definidos ao longo da direção de abrasão do ensaio.

– Os materiais aspergidos se mostraram como uma boa opção de emprego como revestimento para minimizar o desgaste recorrente do contato do grão de arroz em peças de aço como foi observado. Logo, o estudo aponta para uma possível solução e aplicabilidade para o setor arroseiro que sofre com o desgaste em peças e equipamentos dispendendo tempo e dinheiro para reparos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, são indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros empregando os revestimentos de Fe-29Cr-4B-1.75Si e WC-10Co-4Cr depositados pelas técnicas EAS/WAS e HVOF respectivamente:

– Avaliar o comportamento tribológico dos revestimentos em ensaio de desgaste erosivo conforme a norma ASTM Internacional para diferentes ângulos de impacto.

– Estudar o efeito de pós tratamentos de superfície via LASER (refusão) sobre os revestimentos para avaliar o comportamento tribológico dos revestimentos assim como a nova microestrutura formada.

REFERÊNCIAS

ABU-AESH, M. Dependence of sliding wear resistance and microhardness of Al-spray coating layers on substrate conditions using High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF). **Materials and Manufacturing Processes**, v. 23, n. 7, p. 726-733, 2008.

American Welding Society, Inc. (1985). Thermal spraying, practice, theory and application. Miami, FL.

ANTUNES, F. J. et al. Correlation between chemical composition and adherence of Cr and Co coatings deposited by electric arc. **The Journal of Adhesion**, v. 91, n. 10-11, p. 754-767, 2015.

ASTM G65, 2015. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Annual Book of ASTM Standards Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, 247-259.

BAYER, Raymond George. Mechanical wear prediction and prevention. **Marcel! Dekker, Inc, P. O. Box 5005, Monticello, NY 12701-5185, USA, 1994. 657**, 1994.

BHUSHAN, Bharat. **Principles and applications of tribology**. John Wiley & Sons, 1999.

BLAU, Peter J. **ASM Handbook, Volume 18-Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM international, 1992.

BUDINSKI, Kenneth G. Surface Engineering for Wear Resistance.(Retroactive Coverage). **Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, United States, 1988. 420**, 1988.

BUDINSKI, Kenneth G.; BUDINSKI, Steven T. On replacing three-body abrasion testing with two-body abrasion testing. **Wear**, v. 376, p. 1859-1865, 2017.

CAMACHO, J.; LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. Solid particle erosion caused by rice grains. **Wear**, v. 267, n. 1-4, p. 223-232, 2009.

CAMACHO, J.; LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. Wear of a chute in a rice sorting machine. **Wear**, v. 263, n. 1-6, p. 65-73, 2007.

CASTELETTI, L. C. et al. Effect of binders and surface finish on wear resistance of HVOF coatings. **Surface Engineering**, v. 26, n. 6, p. 440-446, 2010.

CUNHA, M. A. Influência do tipo de erodente à base de alumina na incrustação em um revestimento FeCr, aspergido por arco elétrico, empregado em ensaios de desgaste erosivo, à temperatura ambiente e a 400°C. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2014. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

DAVIS, Joseph R. et al. (Ed.). **Handbook of thermal spray technology**. ASM international Materials Park, 2004.

DONG, Shujuan; ZENG, Jinyan; LIAO, Hanlin. Deposition and characterization of WC-Co hard-metal coatings by high velocity oxy-fuel process combined with dry-ice blasting. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 64, p. 151-159, 2017.

DONG, X.; JAHANMIR, Said; HSU, Stephen M. Tribological characteristics of α -Alumina at elevated temperatures. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 74, n. 5, p. 1036-1044, 1991.

FARROKHZAD, M. A.; SAHA, G. C.; KHAN, T. I. Three-body wear performance of co-electrodeposited cermet coatings. **Wear**, v. 313, n. 1-2, p. 34-42, 2014.

FEDERICI, M. et al. Effect of roughness on the wear behavior of HVOF coatings dry sliding against a friction material. **Wear**, v. 368, p. 326-334, 2016.

FINNIE, Iain. Some reflections on the past and future of erosion. **Wear**, v. 186, p. 1-10, 1995.

FIZI, Yazid et al. Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti) C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modeling. **Surface and Coatings Technology**, v. 268, p. 310-316, 2015.

FST Company AWS. (2018). Disponível em <<https://www.fst.nl/systems/arc-wire-spray/>>. Acessado em junho de 2018.

FST Company HVOF. (2018). Disponível em <<https://www.fst.nl/systems/hvof-high-velocity-oxygen-fuel-thermal-spray/>>. Acessado em junho de 2018.

GEDZEVICIUS, I.; VALIULIS, A. V. Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1-3, p. 206-211, 2006.

GIBBONS, Gregory John; HANSELL, Robert George. Thermal-sprayed coatings on aluminium for mould tool protection and upgrade. **journal of materials processing technology**, v. 204, n. 1-3, p. 184-191, 2008.

GOODWIN, J. E.; SAGE, W; TILLY, G. P. Study of erosion by solid particles. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 184, n. 1, p. 279-292, 1969.

HAMBLIN, M. G.; STACHOWIAK, G. W. A multi-scale measure of particle abrasivity. **Wear**, v. 185, n. 1-2, p. 225-233, 1995.

HAN, J.-C. et al. Microstructure-property relations in WC-Co coatings sprayed from combinatorial Ni-plated and nanostructured powders. **Materials Characterization**, v. 129, p. 207-216, 2017.

HE, Xiaoyan et al. Autoclaving-induced in-situ grown alumina on arc-sprayed aluminum coatings: Multiscaled topography facilitates antifouling performances. **Surface and Coatings Technology**, v. 309, p. 295-300, 2017.

HONG, S. et al. Microstructural characterisation and microhardness distribution of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating. **Surface Engineering**, v. 30, n. 1, p. 53-58, 2014.

HOU, G. L. et al. Effect of heat treatment on wear behaviour of WC–(W, Cr) 2C–Ni coating. **Surface Engineering**, v. 28, n. 10, p. 786-790, 2012.

HUTCHINGS, I. M. Friction Wear of Engineering Materials, CRC Press, 1992, pp. 175-176.

HUTCHINGS, I. M. Proc. Conf on Corrosion/Erosion of Coal Conversion System Materials (Ed. Levy A. V.) Nace, Houston, 393, 1979.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. Arnold, London, 1992.

IBGE, agência IBGE notícias. (2018). Disponível em <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/2013-agencia-de-noticias/releases/18665-ibge-preve-safra-de-graos-9-2-menor-em-2018.html>>. Acessado em abril de 2018.

JIAN, Yongxin et al. Investigations on the mechanical properties and three-body wear behavior of pure Fe₂B intermetallic with different chromium additions. **Wear**, v. 418, p. 273-280, 2019.

JIANG, Chao et al. Effect of brazing temperature and holding time on joint properties of induction brazed WC-Co/carbon steel using Ag-based alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 562-569, 2016.

JOST, H. Peter. Tribology: How a word was coined 40 years ago. **Tribology & lubrication technology**, v. 62, n. 3, p. 24, 2006.

KANDEVA-IVANOVA, M; VENCL, A; KARASTOYANOV, D. **Advanced tribological coatings for Heavy-duty applications: Case studies**. Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Information and Communication Technologies; Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2016.

KANG, Amardeep Singh et al. Wear behavior of thermal spray coatings on rotavator blades. **Journal of thermal Spray technology**, v. 21, n. 2, p. 355-359, 2012.

KIM, Jin-Hong; LEE, Myeong-Hoon. A study on cavitation erosion and corrosion behavior of Al-, Zn-, Cu-, and Fe-based coatings prepared by arc spraying. **Journal of thermal spray technology**, v. 19, n. 6, p. 1224-1230, 2010.

LA BARBERA-SOSA, J. G. et al. Mechanical properties of WC coatings evaluated using instrumented indentation technique. **Surface Engineering**, v. 30, n. 7, p. 498-510, 2014.

LEVY, Alan V. **Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials**. Asm International, Materials Park, USA, 1995.

LIMA, C. C; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: fundamentos e aplicações – 2ª Ed** revisada e ampliada. São Paulo: Artliber Editora, (2007).

LIU, Y. et al. A comparative study on wear and corrosion behaviour of HVOF-and HVAF-sprayed WC–10Co–4Cr coatings. **Surface Engineering**, v. 33, n. 1, p. 63-71, 2017.

MA, H. R. et al. Wear resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by AC-HVAF and HVOF. **Materials Science and Technology**, v. 33, n. 1, p. 65-71, 2017.

MARPLE, Basil R.; LIMA, Rogerio S. Process temperature/velocity-hardness-wear relationships for high-velocity oxyfuel sprayed nanostructured and conventional cermet coatings. **Journal of thermal spray technology**, v. 14, n. 1, p. 67-76, 2005.

MASUKU, Z. H. et al. Tribological and corrosion behavior of HVOF-sprayed WC-Co-based composite coatings in simulated mine water environments. **Tribology Transactions**, v. 58, n. 2, p. 337-348, 2015.

MATEEN, A. et al. Tribological behaviour of HVOF sprayed near-nanostructured and microstructured WC-17wt.% Co coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 6, p. 1077-1084, 2011.

MATIKAINEN, V. et al. Sliding wear behaviour of HVOF and HVAF sprayed Cr₃C₂-based coatings. **Wear**, v. 388, p. 57-71, 2017.

MI, Pengbo et al. Sliding wear behavior of HVOF sprayed WC-(nano-WC-Co) coating at elevated temperatures. **Materials Chemistry and Physics**, v. 206, p. 1-6, 2018.

NEALE, M. J. **The Tribology Handbook**. 2ª Edição. Ed. Butterworth Heinemann, 1995.

NORMA, D. I. N. 50320: análise sistemática dos processos de desgaste. **Classificação dos fenômenos de desgaste. Metalurgia e Materiais**, v. 53, p. 619-622, 1997.

OERLIKONMETCO WIRE 8295, Oerlikon Metco. Normatização disponível para arame tubular METCO 8295. (2019). Disponível em <<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/coating-materials-thermal-spray/wires/>>. Acessado em abril de 2019.

OERLIKONMETCO WOKA 3653, Oerlikon Metco. Normatização disponível para pó WOKA 3653. (2019). Disponível em <<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/coating-materials-thermal-spray/carbides/>>. Acessado em abril de 2019.

PAWLOWSKI, Lech. **The science and engineering of thermal spray coatings**. John Wiley & Sons, 2008.

REDDY, A. V.; SUNDARARAJAN, G. The influence of grain size on the erosion rate of metals. *Metallurgical Transactions A*, 18(6), 1043-1052, 1987.

REDJDAL, O. et al. Characterization of thermal flame sprayed coatings prepared from FeCr mechanically milled powder. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 5, p. 779-790, 2013.

ROBERT, C., TUCKER, JR. Thermal Spray Technology. ASM Handbook, ASM International, USA, 5ª, 2013.

RODRÍGUEZ, M. A. et al. Effects of the dispersion time on the microstructure and wear resistance of WC/Co-CNTs HVOF sprayed coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 258, p. 38-48, 2014.

SCHNEIDER, Klaus Erich et al. **Thermal spraying for power generation components**. John Wiley & Sons, 2006.

SMITH, Gregory M. et al. Nature inspired, multi-functional, damage tolerant thermal spray coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 297, p. 43-50, 2016.

STACK, M. M.; STOTT, F. H.; WOOD, G. C. Review of mechanisms of erosion-corrosion of alloys at elevated temperatures. **Wear**, v. 162, p. 706-712, 1993.

SUNDARARAJAN, G. The solid particle erosion of metallic materials: the rationalization of the influence of material variables. **Wear**, v. 186, p. 129-144, 1995.

SUNDARARAJAN, G.; SHEWMON, P. G. A new model for the erosion of metals at normal incidence. **Wear**, v. 84, n. 2, p. 237-258, 1983.

TILLMANN, Wolfgang; HAGEN, Leif; KOKALJ, David. Embedment of eutectic tungsten carbides in arc sprayed steel coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 331, p. 153-162, 2017.

USDA, United States Department of Agriculture Economic Research Service. (2018). Disponível em <<https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=82804>>. Acessado em abril 2018).

UYULGAN, B. et al. Wear behaviour of thermal flame sprayed FeCr coatings on plain carbon steel substrate. **Journal of materials processing technology**, v. 190, n. 1-3, p. 204-210, 2007.

WIELAGE, Bernhard et al. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. **Surface and Coatings Technology**, v. 220, p. 27-35, 2013.

ZHOU, Jianxin et al. Annealing behavior of aluminum coating prepared by arc spraying on P355NL1 steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 330, p. 53-60, 2017.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series 10, Elsevier, Science Publishers B. V, 1987.