



Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Lucas Henrique Gonçalves Ruocco

**Avaliação do Comportamento em Desgaste do Revestimento com WC Por Meio
do Processo de Aspersão Térmica Oxidocombustível de Alta Velocidade (HVOF)
em Substrato de Aço AISI D2 e H13**

Ouro Preto

2025

Lucas Henrique Gonçalves Ruocco

**Avaliação do Comportamento do Desgaste do Revestimento com WC Por
Meio do Processo de Aspersão Térmica Oxidocombustível de Alta Velocidade
(HVOF) em Substrato de Aço AISI D2 e H13**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Artur Camposo
Pereira

Coorientador: Me. Renato Chaves Pereira
Da Silva

Ouro Preto
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R944a Ruocco, Lucas Henrique Gonçalves.

Avaliação do comportamento em desgaste do revestimento com WC por meio do processo de aspersão térmica oxidocombustível de alta velocidade (HVOF) em substrato de aço AISI D2 e H13. [manuscrito] / Lucas Henrique Gonçalves Ruocco. - 2025.

39 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Artur Camposo Pereira.

Coorientadores: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto, Me. Renato Chaves Pereira da Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Aço para ferramentas. 2. Desgaste mecânico. 3. Abrasivos. 4. Aspersão térmica. I. Pereira, Artur Camposo. II. Pinto, Maria Aparecida. III. Silva, Renato Chaves Pereira da. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 669.056

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Henrique Gonçalves Ruocco

Avaliação do Comportamento em Desgaste do Revestimento com WC Por Meio do Processo de Aspersão Térmica Oxidocombustível de Alta Velocidade (HVOF) em Substrato de Aço AISI D2 e H13

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 02 de abril de 2025

Membros da banca

Dr. - Artur Camposo Pereira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr^a. - Maria Aparecida Pinto - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. - Renato Chaves Pereira da Silva - Instituto Tecnológico Vale

Artur Camposo Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/10/2025



Documento assinado eletronicamente por **Artur Camposo Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/10/2025, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1005685** e o código CRC **5523F76C**.

RESUMO

Neste trabalho, os aços ferramenta AISI H13 e AISI D2 foram revestidos com a aplicação de revestimento de WC por meio da técnica HVOF, aspergidos por dois fornecedores, sendo o aço D2, com matriz martensítica e presença de carbonetos de cromo, e o aço H13, aço martensítico temperado e revenido. A caracterização das camadas aspergidas foi realizada em ensaios de microdureza. Para o fornecedor 1 a microdureza ficou próxima a 1300HV0,1 e para o fornecedor 2 próxima a 730HV0,1. Na análise microestrutural por microscopia ótica, em que foi avaliada a espessura da camada para o fornecedor 1 em média foi de 270µm e do fornecedor 2 a média foi de 700µm. Na análise por microscopia eletrônica de varredura e EDS, para o fornecedor 1 o cobalto foi um dos principais constituintes e para o fornecedor 2 foi o vanádio. A presença de porosidade para o fornecedor 1 foi em média de 6,5%. Para o fornecedor 2 não foi possível medir a porosidade devido a trincas presentes ao longo da camada aspergida. A rugosidade medida com o parâmetro Ra nos revestimentos, para o fornecedor 1 foi em média 6,43µm e para o fornecedor 2 o resultado em média do D2-HVOF foi 2,16µm e para o H13-HVOF 5,94µm, uma variação significativa para o mesmo material aspergido. A resistência ao desgaste abrasivo dos materiais revestidos foi avaliada de acordo com a norma ASTM G65 Procedimento B, em que a perda mássica para o fornecedor 1 foi em média de 0,02g e para o fornecedor 2 para o H13-HVOF foi em média de 0,149g e para o D2-HVOF de 0,149g. Ao final do ensaio de desgaste a rugosidade foi avaliada, sendo em média de 4,6µm para o fornecedor 1 e de 3,3µm para o D2-HVOF e 1,6µm para o H13-HVOF do fornecedor 2. O resultados apresentados demonstraram que o produto do fornecedor 1 se mostrou mais eficiente em aplicações de desgaste abrasivo, com resistência ao desgaste abrasivo 5 vezes maior que o fornecedor 2. É importante destacar, também, que a camada aspergida do fornecedor 2 apresentou diferença significativa entre os resultados para o D2-HVOF e para o H13-HVOF.

Palavra-Chave: HVOF, AISI H13, AISI D2, ASTM 65, desgaste abrasivo.

ABSTRACT

In this work, AISI H13 and AISI D2 tool steels were coated with WC using the HVOF technique, applied by two different suppliers. The D2 steel, with a martensitic matrix and the presence of chromium carbides, and the H13 steel, a tempered and quenched martensitic steel, were used as substrates. The characterization of the sprayed layers was performed through microhardness testing. For Supplier 1, the microhardness was approximately 1300 HV0.1, and for Supplier 2, approximately 730 HV0.1. Optical microscopy microstructural analysis showed that the average coating thickness for Supplier 1 was 270 μm , and for Supplier 2, 700 μm . Scanning electron microscopy (SEM) and EDS analysis revealed that cobalt was one of the main constituents for Supplier 1, while vanadium was predominant for Supplier 2. The porosity for Supplier 1 averaged 6.5%. For Supplier 2, porosity could not be measured due to cracks present along the sprayed layer. The surface roughness, measured using the Ra parameter, for Supplier 1 averaged 6.43 μm , while for Supplier 2 the average result for D2-HVOF was 2.16 μm and for H13-HVOF 5.94 μm , representing a significant variation for the same sprayed material. The abrasive wear resistance of the coated materials was evaluated according to ASTM G65 Procedure B, where the average mass loss for Supplier 1 was 0.02 g, and for Supplier 2, both H13-HVOF and D2-HVOF showed an average mass loss of 0.149 g. At the end of the wear test, surface roughness was again evaluated, with average values of 4.6 μm for Supplier 1, 3.3 μm for D2-HVOF, and 1.6 μm for H13-HVOF from Supplier 2. The results demonstrated that the product from Supplier 1 proved to be more efficient in abrasive wear applications, showing an abrasive wear resistance five times greater than that of Supplier 2. It is also important to highlight that the sprayed coating from Supplier 2 showed a significant difference between the results for D2-HVOF and H13-HVOF.

Keywords: HVOF, AISI H13, AISI D2, ASTM 65, abrasive wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.2.1 – Estrutura do produto constituído pelo processo de aspersão térmica.	16
Figura 3.2.1.1 – Foto esquemática de tocha HVOF.	18
Figura 4.1.1 – Amostra Revestida por Meio da Técnica HVOF.	20
Figura 4.2.1 – Eletroerosão a Fio.	20
Figura 4.2.2 – Microscópio óptico.	21
Figura 4.2.3 – Espessura da Camada Aspergida por Calculada por Microscópica Óptica.	21
Figura 4.2.4 – MEV.	22
Figura 4.3.1 – Tribômetro Roda de Borracha a Seco.	23
Figura 5.1.1 – Microdureza Vickers dos revestimentos do fornecedor 1. H13- HVOF (a); D2-HVOF (b).	24
Figura 5.1.2 – Revestimento de HVOF sobre os aços ferramentas. Revestimento de espessura $340\mu\text{m}\pm 16\mu\text{m}$ sobre o H13(a); Revestimento de espessura $200\mu\text{m}\pm 13\mu\text{m}$ sobre o D2(b). Microscopia óptica 100x.	25
Figura 5.1.3 – Método de análise de imagens para cálculo da porosidade dos revestimentos HVOF. H13-HVOF (a); D2-HVOF (b) do fornecedor 1. Microscopia óptica 200x.	25
Figura 5.1.4 – Revestimento HVOF sobre aço ferramenta H13 do fornecedor 2 com trinca.	26
Figura 5.1.5 – Análise EDS da interface entre o revestimento e o aço D2 do fornecedor 1. Identificação dos principais elementos químicos presentes.	26
Figura 5.1.6 – Análise EDS da interface entre o revestimento e o aço D2 do fornecedor 2. Identificação dos principais elementos químicos presente.	27

Figura 5.2.1 – Amostras Após Ensaio de Desgaste Abrasivo do D2-HVOF(a) e H13-HVOF(b) fornecedor 1 e D2-HVOF(a) e H13-HVOF(b) fornecedor 2. 27

Figura 5.2.2 – Imagem transversal do revestimento HVOF sobre aço ferramenta D2 do fornecedor 1. Região sem desgaste abrasivo (a); após o desgaste abrasivo (b). Microscopia óptica 100x. 28

Figura 5.2.3 – Imagem Região Central da Amostra após ensaio de desgaste. D2-HVOF Fornecedor 1 (a); D2-HVOF Fornecedor 2 (b). Microscopia óptica 50x. 28

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.1.1 – % em peso dos elementos químicos do aço H13.	13
Tabela 3.1.1.2 – Propriedades mecânicas a temperatura ambiente de um aço H13.	14
Tabela 3.1.2.1 – % em peso dos elementos químicos do aço.	15
Tabela 3.1.2.2 – Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de um aço D2.	15
Tabela 3.2.1 – Parâmetros dos processos de aspersão térmica.	17
Tabela 4.3.1 – Parâmetros Procedimento B da norma.	23
Tabela 5.1.1 – Microdureza Vickers dos Revestimentos H13 e D2 com Coeficiente de Variação.	24
Tabela 5.1.2 – Espessura da Camada Aspergida dos Revestimentos em aço H13 e D2 com Desvio Padrão.	24
Tabela 5.1.3 – Porosidade dos Revestimentos do Fornecedor 1 em aço D2 e h13 com Desvio Padrão.	25
Tabela 5.1.4 – Rugosidade Antes do Ensaio de Desgaste Abrasivo dos Revestimentos dos Fornecedores 1 e 2 com Desvio Padrão.	26
Tabela 5.2.1 – Desgaste Abrasivo dos Revestimentos dos Fornecedores 1 e 2 representados em Perda Mássica e com Desvio Padrão.	27
Tabela 5.2.2 – Rugosidade Após o Desgaste Abrasivo do Revestimento dos Aços D2 e H13 do Fornecedor 2 com Desvio padrão.	29

LISTA DE SÍMBOLOS

λ – Comprimento de Ondulação

Ra – Rugosidade Superficial

k – Coeficiente De Desgaste

LISTA DE SIGLAS

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

WC – Carbetto De Tungstênio HVOF – High Velocity Oxygen Fuel

ASTM – American Society for Testing and Materials

AISI – American Iron and Steel Institute

EDS – Espectroscopia Por Dispersão De Energia

XPS – Espectroscopia De Fotoelétrons Excitados Por Raios X

FS: Flame Spraying (aspersão a chama oxi-gás com material de adição na forma de pó ou arame);

ASP: Arc Spraying (aspersão a arco elétrico);

HVOF: High Velocity Oxy-Fuel flame spraying (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de pó);

HVCW: High Velocity Combustion Wire flame spraying (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de arame);

OS: Plasma Spraying (aspersão a plasma);

D-gun: Detonation-Gun spraying (aspersão por detonação); LS: Laser Spraying (aspersão a laser);

CS: Cold Spraying (aspersão a frio).

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GERAL	12
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	12
3. REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1. AÇOS FERRAMENTA	13
3.1.1. AÇO FERRAMENTA – AISI H13	13
3.1.2. AÇO FERRAMENTA – AISI D2	14
3.2. ASPERSÃO TÉRMICA	15
3.2.1. OXICOMBUSTÍVEL DE ALTA VELOCIDADE – HIGH VELOCITY OXYFUEL (HVOF)	17
3.3. CARBETO DE TUNGSTÊNIO	18
3.4. TRIBOLOGIA	18
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
4.1. MATERIAIS	20
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	20
4.3. DESGASTE ABRASIVO ASTM G65	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO HVOF	24
5.2. DESGASTE ABRASIVO ASTM G65	27
6. CONCLUSÃO	30
7. LISTA DE REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

A ciência que estuda a interação de superfícies em contato e movimento relativo e suas práticas associadas é a tribologia, em outras palavras, estuda fenômenos relacionados ao atrito, lubrificação e desgaste (Bannister, 1996). O desgaste é uma consequência inevitável em aplicações de engenharia, impactando o desempenho e a longevidade dos componentes, muitas vezes exigindo manutenção frequente e substituição. O estudo de engenharia de superfícies busca aumentar a resistência ao desgaste dos materiais, como por exemplo o metal duro que apresenta durezas elevadas, o que pode, em certos tribossistemas, ser relevante para o aumento da resistência ao desgaste de certos componentes. (Kumar *et al.*, 2024).

Os revestimentos do tipo Carbetto de Tungstênio (WC) aplicados pelo processo HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) utilizando a combustão de oxigênio de alta velocidade, possibilita a formação de diversas camadas em um substrato por aspersão térmica (Nahvi e Jafari, 2016). De acordo com Hillery (1986), “Revestimentos aplicados por aspersão térmica se tornaram uma solução viável para aplicações de resistência ao desgaste, procurando aumentar a vida útil dos componentes”. Segundo Rhys-Jones (1990), “Revestimentos à base de carbetto de tungstênio e carbetto de cromo estão sendo frequentemente utilizados por usinas aeroespaciais aumentar a resistência ao desgaste por deslizamento”. Normalmente, camadas de revestimento com espessura entre 200µm e 400µm são utilizadas para aplicações industriais aumentando a resistência ao desgaste sem comprometer a estrutura do componente e sendo uma opção econômica e efetiva (Stewart, Shipway e Mccartey, 1999).

Os revestimentos aplicados por HVOF exibem menor decomposição do WC durante o processo resultando em maior resistência mecânica, melhor resistência ao desgaste e menor porosidade, quando comparado a outras técnicas de aspersão térmica, como a deposição por plasma (Stewart, Shipway e Mccartey, 1999). Segundo Faria *et al.* (2020), “No processo HVOF se produz revestimentos mais densos, duros e mais resistentes em relação ao processo a plasma, atendendo aos requisitos de qualidade em muitas áreas industriais”.

Considerando esse aspecto, os revestimentos de metais duros aplicados por

HVOF apresentam uma solução promissora para reduzir o desgaste abrasivo em equipamentos da indústria da mineração (Varis *et al.*, 2023). O metal duro aspergido pelo processo HVOF na superfície de aços ferramenta para trabalho a frio e a quente, pode contribuir para melhorias significativas em propriedades mecânicas, minimizando danos e acidentes e aumentando a vida útil dos equipamentos (Li *et al.*, 2019).

Neste estudo, revestimentos de WC de dois fornecedores foram aplicados em aços ferramenta American Iron and Steel Institute (AISI) H13 e AISI D2 em corpos de prova para roda de borracha por meio da técnica HVOF com diferentes parâmetros e composições. Os revestimentos foram caracterizados e avaliada a resistência ao desgaste abrasivo dos materiais. Possibilitando a análise comparativa da microdureza, composição química, porosidade, rugosidade, tamanho da camada e resistência ao desgaste abrasivo.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Análise da camada aspergida de WC pelo processo HVOF de dois fornecedores, por meio das análises de microdureza, rugosidade superficial, porosidade, espessura da camada aspergida, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, composição química semiquantitativa com o auxílio da técnica EDS e avaliação da resistência ao desgaste com o ensaio de roda de borracha a seco.

2.2.OBJETIVO ESPECÍFICO

- Realização do ensaio de microdureza da camada aspergida.
- Realização do ensaio de rugosidade superficial.
- Realização de microscopia óptica para determinação da dimensão da camada aspergida.
- Cálculo de porosidade da camada aspergida com auxílio das imagens de acordo com a norma American Society for Testing and Materials 2109 (ASTM 2109, 2021).
- Realização de imagens com microscopia eletrônica de varredura e elétrons retroespalhados com o auxílio da técnica EDS.
- Realização do ensaio de desgaste com roda de borracha a seco de acordo com a norma ASTM G65 (2010) procedimento B.
- Discussão dos resultados obtidos entre os corpos de prova dos dois fornecedores.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. AÇOS FERRAMENTA

Aços ferramenta se caracterizam pela sua elevada dureza e resistência ao desgaste, associada à boa tenacidade e propriedades mecânicas mantidas em trabalho a quente e/ou a frio. As principais características destes aços são a alta dureza em temperatura ambiente, alta resistência ao desgaste, alta temperabilidade, alta tenacidade, alta resistência mecânica, grande estabilidade dimensional e alta dureza a quente e a frio (Chiaverini, 2008). Segundo a American Iron and Steel Society (1970) “aços ferramenta pode ser definidos como: aços ao carbono, liga ou aços rápidos, capazes de serem temperados e revenidos. Podem ser utilizados em ferramentas manuais ou de fixação mecânica em corte e conformação de materiais a temperatura ambiente ou em elevadas temperaturas”.

Os aços-ferramenta são classificados de acordo com suas características metalúrgicas principais ou por sua área de aplicação. A classificação da American Iron and Steel Institute (AISI) é a mais popularmente usada pela indústria de ferramentas, aços como o AISI D2 e AISI H13 provaram ter propriedades e desempenho satisfatório ao longo do tempo, tornando-os popularmente conhecidos (Tzeng, 2002).

3.1.1. AÇO FERRAMENTA – AISI H13

O aço ferramenta AISI H13 é um aço endurecido ao ar, popularmente utilizado para trabalho a quente, além de estar presente em diversos tipos de ferramentas. Sobre sua nomenclatura é importante destacar que a letra “H” significa *hot application*, ou seja, aplicações a quente (WANG, *et al.*, 2020).

O número 13 refere-se a liga dentro das classes dos aços com teor de Vanádio elevado, a composição química é apresentada na Tabela 3.1.1.1 (ASTM A681, 2022).

Tabela 3.1.1.1 – % em peso dos elementos químicos do aço H13.

Tipo	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
H13	0,3-0,4	0,2-0,6	0,8-1,2	4,7-5,5	0,8-1,2	1,1-1,7

Fonte: ASTM A681, 2022.

Este aço é de alta resistência com 5% de cromo. Porém, com o maior teor de Vanádio possui uma maior dispersão de carbonetos, resultando em uma resistência ao desgaste maior. Além disso, é um aço que possui uma faixa de teor de carbono maior proporcionando maior liberdade para produção e tratamentos térmicos posteriores. É um aço de endurecimento secundário, isto é, de endurecimento profundo, permitindo que grandes seções sejam endurecidas por resfriamento ao ar (ASM Handbook, 1990).

Amostras foram submetidas a ensaios para determinação das propriedades mecânicas de uma barra de aço, de seção longitudinal, em temperatura ambiente, resultante de um processo de resfriamento em óleo a partir de 1010°C e com tratamento térmico duplo de 2 horas na temperatura indicada. Os dados dos ensaios são apresentados na Tabela 3.1.1.2 (ASM Handbook, 1990).

Tabela 3.1.1.2 – Propriedades mecânicas a temperatura ambiente de um aço H13.

Temperatura de revenimento	Resistência à tração	Tensão de Escoamento	Charpy entalhe em V	Dureza
°C	MPa	MPa	J	HRC
527	1960	1570	16	52
555	1835	1530	24	50
575	1730	1470	27	48
593	1580	1365	28,5	46

Fonte: ASM Handbook, 1990.

3.1.2. AÇO FERRAMENTA – AISI D2

O aço ferramenta AISI D2 é um aço recozido, temperado e revenido para este trabalho, popularmente utilizado para trabalho a frio, utilizado na fabricação de ferramentas de corte e moldes. A sua nomenclatura se destaca pela referência a série de aços ferramentas D, que apresentam alta resistência ao desgaste e alta dureza resultantes dos seus altos teores de cromo (WANG, *et al.*, 2020).

O aço D2 possui elevada concentração de cromo, favorecendo a formação de carbeto de cromo a matriz, a composição química do aço D2 é apresentada na Tabela 3.1.2.1 (ASTM A681, 2022).

Tabela 3.1.2.1 – % em peso dos elementos químicos do aço.

Tipo	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
D2	1,4-1,6	0,1-0,6	0,1-0,6	11-13	0,5-1,1	0,7-1,2

Fonte: ASTM A681, 2022.

Este aço é produzido a partir do processo de metalurgia do pó, ou por rotas convencionais, sendo projetado para aplicações de alta resistência ao desgaste e trabalho a frio. O alto teor de vanádio juntamente com o alto teor de cromo proporciona a precipitação de carbonetos primários de cromo (segunda fase dura) neste material, melhorando as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo. Uma microestrutura uniforme resulta em um melhor valor de tenacidade, além de proporcionar durezas mais altas com melhorias no limite de escoamento e na resistência ao desgaste (ASM Handbook, 1990).

Amostras de aço D2 foram submetidas a ensaios para a determinação das propriedades mecânicas à temperatura ambiente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.1.2.2. (ASM Handbook, 1990).

Tabela 3.1.2.2 – Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de um aço D2.

Aço	Dureza	Resistência ao desgaste em cilindro cruzado	Charpy entalhe em C
	HRC	107 MPa	J
D2	59	28	31,2

Fonte: ASM Handbook, 1990.

3.2.ASPERSÃO TÉRMICA

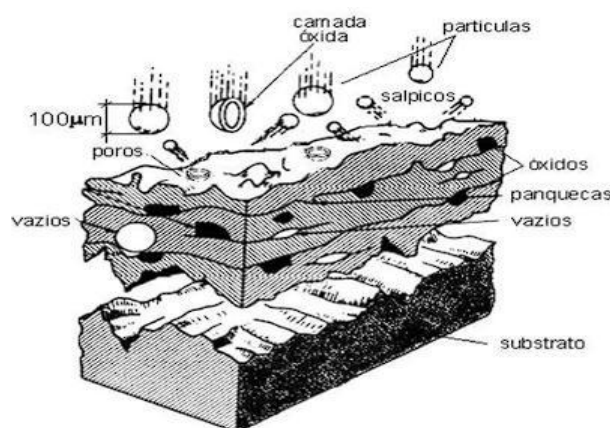
A aspersão térmica é um processo em que partículas sólidas, semifundidas ou fundidas são depositadas em um substrato (Pawlowski, 2008). Durante o processo de aspersão térmica, o material aspergido, em forma de partículas, atinge o substrato, achatando-se e formando plaquetas de espessura fina, denominadas lamelas. Estas se moldam à superfície existente, formada pelo substrato e também pelas partículas da liga, anteriormente aspergidas. O processo de aspersão térmica é muito utilizado por sua versatilidade, com processos disponíveis. É um método de revestimento de superfície, com finalidade de proteger o substrato e melhorar as propriedades superficiais, como por exemplo a resistência ao desgaste

(Barbezat, Nicol e Sickinger, 1993).

É possível realizar o processo sobre os mais diversos tipos de materiais, com diferentes dimensões e geometrias, tornando o método ainda mais versátil e aplicável (Chandra, 2009). Essa técnica pode ser utilizada para melhorar a resistência à corrosão, resistência ao calor, resistência ao desgaste, condutibilidade elétrica e térmica, melhorar o isolamento térmico e elétrico e realizar a recuperação dimensional de componentes (ASM Handbook, 2004).

Características comumente observadas nestes revestimentos são as presenças de poros, óxidos e partículas não fundidas (Brossard, 2010). A constituição metalúrgica formada pelo processo de aspersão térmica, apresenta algumas características desse processo como partículas estranhas, vazios e partes oxidadas (Figura 3.2.1) (Paredes, 1993).

Figura 3.2.1 – Estrutura do produto constituído pelo processo de aspersão térmica.



Fonte: Paredes, 1993.

A classificação dos processos de aspersão térmica é dividida em dois grupos, um que usa a chama e outro que utiliza energia elétrica. A nomenclatura é feita com siglas, para simplificar a denominação dos processos. A identificação de cada uma das siglas é a seguinte (Schiefler, 2004):

FS: Flame Spraying (aspersão a chama oxi-gás com material de adição na forma de pó ou arame);

ASP: Arc Spraying (aspersão a arco elétrico);

HVOF: High Velocity Oxy-Fuel flame spraying (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de pó);

HVCW: High Velocity Combustion Wire flame spraying (aspersão a chama de

alta velocidade com material de adição na forma de arame);

OS: Plasma Spraying (aspersão a plasma);

D-gun: Detonation-Gun spraying (aspersão por detonação); LS: Laser Spraying (aspersão a laser);

CS: Cold Spraying (aspersão a frio).

Dentre os processos, os que apresentam menores valores de teor de óxidos e maior adesão ao substrato são os do tipo HVOF e Plasma, sendo diretamente relacionados a temperatura e a velocidade na qual as partículas são aceleradas (Brandolt, 2014).

O método de aspersão térmica HVOF, surgiu como alternativa ao processo de aspersão térmica D-Gun (detonação), e posteriormente surgiram os processos de aspersão a plasma. As técnicas de aspersão HVOF resultam em revestimentos de maior qualidade do revestimento, níveis inferiores de tensões residuais e melhor deposição. Na Tabela 3.2.1 são apresentados parâmetros dos principais processos de aspersão térmica (Castro, 2012).

Tabela 3.2.1 – Parâmetros dos processos de aspersão térmica.

Processos	Temp. da chama (°C)	Velocidade da partícula (m/s)	Teor de óxidos (%)	Custo relativo	Taxa de aspersão (kg/h)	Energia (kw/kg)
HVOF	3100	610 – 1080	0,2	5	14	100 – 270
D-Gun	3900	910	0,1	10	1	100 – 270
Plasma	5600	240	0,5 – 1	5	5	30 – 80

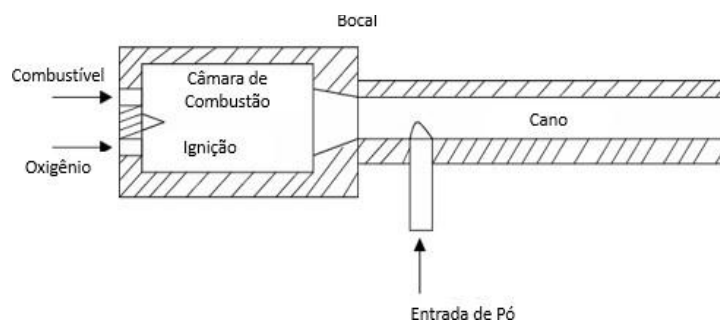
Fonte: Castro, 2012.

3.2.1. OXICOMBUSTÍVEL DE ALTA VELOCIDADE – HIGH VELOCITY OXYFUEL (HVOF)

Durante o processo HVOF, o gás combustível ou líquido é introduzido na câmara de combustão com oxigênio (Figura 3.2.1.1). A ignição se inicia com a combustão do gás, formando um bico, passando por uma câmara e emergindo na atmosfera aberta, com uma queima contínua. O pó é introduzido radial ou axialmente ao jato (Pawlowski, 2008). Os gases combustíveis podem ser

Hidrogênio, metano, propano, propileno, acetileno, gás natural ou querosene (Kuroda et al., 2008). Um jato com alta velocidade é gerado, sendo que as partículas são aceleradas a velocidades superiores a 400m/s. A temperatura da chama encontra-se em torno de 3000°C (Brossard, 2010).

Figura 3.2.1.1 – Foto esquemática de tocha HVOF.



Fonte: PAWLOWSKI, 2008.

O desenvolvimento rápido desta técnica e a disseminação de instalações com o processo HVOF resultou em muitas indústrias de revestimento de alta qualidade. Atualmente, esta técnica é comumente utilizada para aplicação de carbeto em muitas aplicações na indústria aeronáutica (Pawlowski, 2008).

3.3. CARBETO DE TUNGSTÊNIO

A aplicação de revestimento de carbeto de tungstênio por meio do processo de aspersão térmica aumenta a durabilidade e reduz o desgaste abrasivo, de modo que este procedimento pode ser aplicado a equipamentos e peças de máquinas (Castro et al., 2015).

A análise do desempenho do desgaste de amostras do revestimento de carbeto de tungstênio na presença de ar, água e meio aquoso abrasivo indicaram resultados melhores em termos de perda de volume e mudança na rugosidade superficial do que para o substrato de aço (Coulson, Leheup e Marsh, 1995) (WIGREN e RYBICKI, 1995).

3.4. TRIBOLOGIA

A Tribologia é definida como a área da ciência e tecnologia que busca estudar a interação entre superfícies em movimento relativo e assuntos associados, isto inclui o estudo do atrito, desgaste e lubrificação (Hutchings e Shipway, 2017). No

momento em que duas superfícies tocam a interação durante o movimento, são geradas forças e tensões (Menezes *et al.*, 2020).

Segundo Leal (2004), “Muitos ramos da engenharia enfrentam problemas de desgaste. As perdas econômicas consequentes de desgastes são generalizadas e perversas. Estas não envolvem tão somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, perdas de produção, de competitividade e de oportunidades de negócios”. O desgaste é relacionado à remoção de material e à deformação, proveniente do contato ou interação entre duas ou mais superfícies, resultante da ação mecânica (Rabinowicz, 1995).

O desgaste pode ser entendido como a perda progressiva de massa da superfície do corpo causada pela ação mecânica, isto é, pelo contato em movimento relativo de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso (Budinski, 1988). Vários fatores afetam o comportamento do sistema tribológico, um exemplo é o material dos corpos de contato, a rugosidade e tipo de acabamento da superfície, a lubrificação, ambiente do sistema tribológico, carga aplicada, velocidade de deslizamento entre os corpos (Menezes *et al.*, 2020).

A análise do comportamento do material pode ser realizada, por meio de ensaios tribológicos e parâmetros como distância percorrida associado com a taxa de desgaste ou perda de massa do material (Menezes *et al.*, 2020).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAIS

Amostras com dimensões de 75mm x 25mm x 10mm dos substratos em aço AISI D2 e H13 foram analisadas e ensaiadas e posteriormente revestidas com o processo de aspersão térmica HVOF de dois fornecedores (Figura 4.1.1).

Figura 4.1.1 – Amostra Revestida por Meio da Técnica HVOF.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A metalografia busca revelar os constituintes e a microestrutura dos metais e ligas por microscopia (ASTM E3, 2017). As amostras foram cortadas na seção transversal dos corpos de prova em uma máquina de eletroerosão a fio (Figura 4.2.1), em seguida a amostra foi lavada com detergente e colocada em uma lavadora ultrassônica. Após a limpeza a amostra foi embutida a frio com resina epóxi em uma embutidora à vácuo com aproximadamente 25g de resina. Posteriormente, a amostra foi lixada em uma politriz com lixas com granulometria de 220, 500 e 1200; no mesmo equipamento a amostra foi polida em pano com pasta de diamante de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m. Ao final, a amostra foi lavada em álcool etílico e seca com o auxílio de um secador.

Figura 4.2.1 – Eletroerosão a Fio.



Fonte: Bener, 2025.

A microscopia ótica foi utilizada para realizar a medição da espessura da camada aspergida sob o substrato, o microscópio óptico utilizado (Figura 4.2.2) permitiu medir a camada a partir de linhas traçadas no programa (Figura 4.2.3). Posteriormente, o método de avaliação de porosidade em amostras metalográficas de revestimento por aspersão térmica, por meio de comparação direta com imagens padrão e pelo o uso de microscopia óptica, conforme Norma ASTM E2109, 2021, foi utilizado. O programa do microscópio permite realizar o cálculo em porcentagem de porosidade a partir do espectro de luz em que as regiões mais escuras são reconhecidas como área de interesse e calcular sua porcentagem na imagem.

Figura 4.2.2 – Microscópio óptico.



Fonte: Labspeq, 2025.

Figura 4.2.3 – Espessura da Camada Aspergida por Calculada por Microscópica Óptica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A microscopia eletrônica de varredura (Figura 4.2.4) auxiliou na análise a partir da técnica espectroscopia por dispersão de energia (EDS) (ASTM E2108, 2016).

Figura 4.2.4 – MEV.



Fonte: UFOP, 2025.

A microdureza foi realizada em um microdurômetro Vickers. A indentação foi realizada com um indentador Vickers, com carga de 0,10kg sob 980,70Nm por 10s com 20 indentações.

A rugosidade da superfície é um fator importante para o desempenho de revestimentos aplicados em aço, o perfil da superfície deve ser medido antes da aplicação para garantir o atendimento aos parâmetros necessários (ASTM D4417, 2021). A rugosidade superficial (R_a) foi medida com um rugosímetro digital, antes do ensaio e após o ensaio nas regiões de início do desgaste em ensaio de roda de borracha (ASTM G65) e na região central do desgaste com os parâmetros de ensaio sendo: velocidade 0,5 m/s; λ 2,5mm e leitura 5x.

4.3. DESGASTE ABRASIVO ASTM G65

O ensaio de desgaste com o equipamento de roda de borracha a seco é um procedimento laboratorial para determinar a resistência de materiais metálicos à abrasão por riscamento (ASTM G65, 2010). A análise da resistência ao desgaste abrasivo dos aços ferramenta revestidos por meio do processo HVOF avaliada a partir de um tribômetro Roda de Borracha com areia a seco (Figura 4.3.1) simulando a abrasão a 3 corpos. O ensaio foi realizado seguindo os parâmetros estabelecidos pelo procedimento B da norma, conforme apresentado a Tabela 4.3.1. Os resultados de desgaste são apresentados como perda de massa e coeficiente de desgaste (k) (ASTM G65, 2010).

Tabela 4.3.1 – Parâmetros Procedimento B da norma.

Carga (N)	Tempo (s)	Agente Abrasivo	Dimensão (Mesh)	Dimesão Roda (m)	Dureza Roda (Shore A)	Fluxo médio de areia (g/min)
130	600	Areia	50	222	62	312

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.3.1 – Tribômetro Roda de Borracha a Seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO HVOF

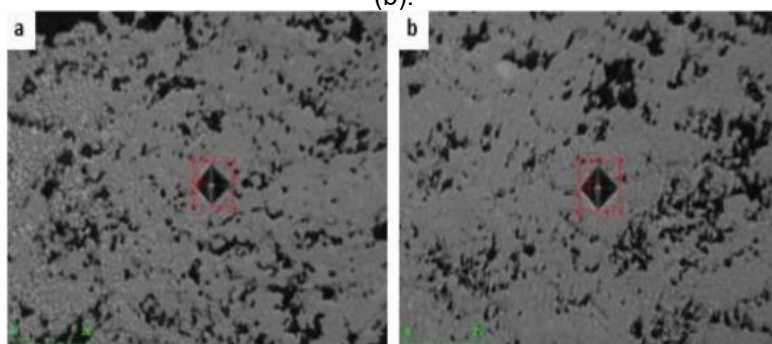
A microdureza do revestimento, apresentou homogeneidade da propriedade ao longo da amostra revestida, conforme apresentado na Tabela 5.1.1. As indentações foram realizadas em regiões do revestimento que não continham porosidades aparente (Figura 5.1.1). Os valores do fornecedor 1 condizem com os valores apresentados na literatura, segundo Nahvi e Jafari (2016) “Revestimentos WC-C apresentam valores próximos a 1305HV0,3”.

Tabela 5.1.1 – Microdureza Vickers dos Revestimentos H13 e D2 com Coeficiente de Variação.

Dureza				
ASTM	D2 HVOF-1	H13 HVOF-1	D2 HVOF-2	H13 HVOF-2
Dureza (HV0,1)	1320	1299	749	674
Desvio Padrão (HV0,1)	120	99	44	17
Coeficiente de Variação	9,2	7,6	5,7	2,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.1 – Microdureza Vickers dos revestimentos do fornecedor 1. H13- HVOF (a); D2-HVOF (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A medição da espessura do revestimento foi realizada a partir de um microscópio óptico (Figura 5.1.2) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

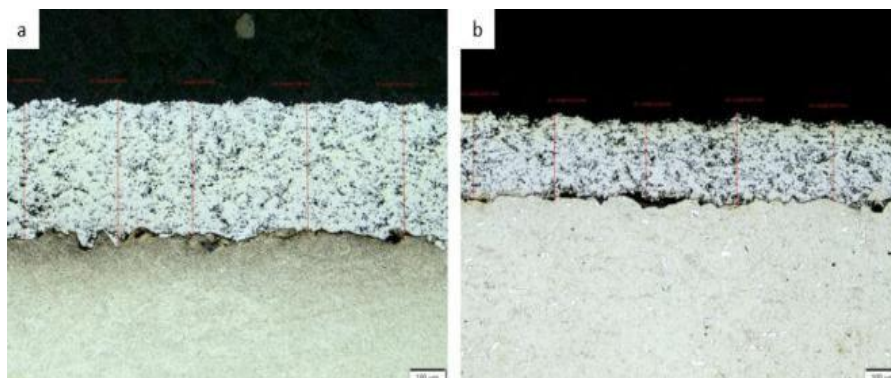
Tabela 5.1.2 – Espessura da Camada Aspergida dos Revestimentos em aço H13 e D2 com Desvio Padrão.

Espessura de Camada Aspergida				
ASTM	D2 HVOF-1	H13 HVOF-1	D2 HVOF-2	H13 HVOF-2
Espessura (μm)	200	340	609	833
Desvio Padrão (μm)	13	16	13	23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.2 – Revestimento de HVOF sobre os aços ferramentas. Revestimento de espessura $340\mu\text{m}\pm 16\mu\text{m}$ sobre o H13(a); Revestimento de espessura $200\mu\text{m}\pm 13\mu\text{m}$ sobre o D2(b).

Microscopia óptica 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

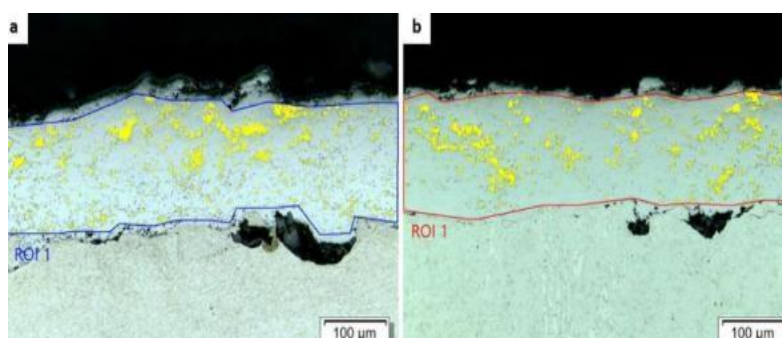
A avaliação da porosidade do revestimento aspergido foi possível de ser realizada apenas nas amostras do fornecedor 1 (Figura 5.1.3). As amostras do fornecedor 2 apresentaram muitas trincas e falhas que se propagaram ao longo do revestimento, dificultado a medição com os instrumentos disponíveis (Figura 5.1.4), os resultados da análise de porosidade são apresentados na Tabela 5.1.3.

Tabela 5.1.3 – Porosidade dos Revestimentos do Fornecedor 1 em aço D2 e h13 com Desvio Padrão.

Porosidade Média		
ASTM	D2 HVOF-1	H13 HVOF-1
Porosidade Média (%)	6,7	6
Desvio Padrão (%)	1,7	2,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.3 – Método de análise de imagens para cálculo da porosidade dos revestimentos HVOF. H13-HVOF (a); D2-HVOF (b) do fornecedor 1. Microscopia óptica 200x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.4 – Revestimento HVOF sobre aço ferramenta H13 do fornecedor 2 com trinca.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do ensaio de rugosidade superficial antes do ensaio de desgaste rodado de borracha a seco são apresentados na Tabela 5.1.4.

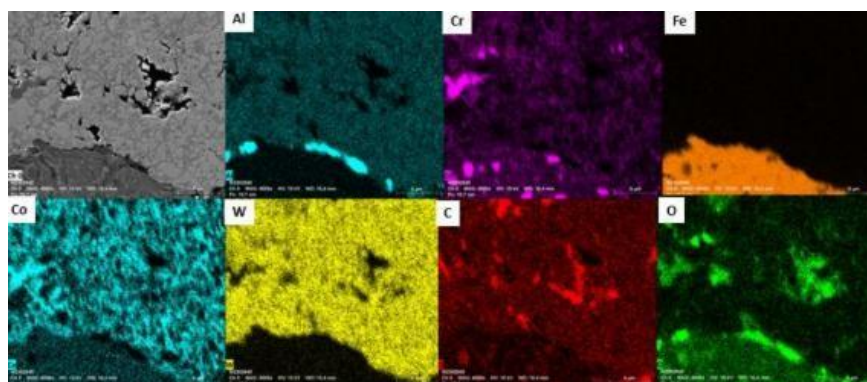
Tabela 5.1.4 – Rugosidade Antes do Ensaio de Desgaste Abrasivo dos Revestimentos dos Fornecedores 1 e 2 com Desvio Padrão.

Rugosidade Antes o Desgaste Abrasivo				
ASTM	D2 HVOF-1	H13 HVOF-1	D2 HVOF-2	H13 HVOF-2
Ra (µm)	6,38	6,48	2,16	5,94
Desvio Padrão (µm)	0,4	0,5	0,15	0,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Imagens realizadas em MEV com a técnica EDS apresentou a distribuição de partículas de WC em uma matriz de cobalto e cromo para o fornecedor 1 (Figura 5.1.5) e o fornecedor 2 apresentou a matriz com a presença vanádio e cromo (Figura 5.1.6), possíveis óxidos e contaminações presentes provenientes do processo de limpeza, embutimento e preparação da superfície para a aspersão. As imagens foram realizadas com o aumento de 1000x no MEV.

Figura 5.1.5 – Análise EDS da interface entre o revestimento e o aço D2 do fornecedor 1.
Identificação dos principais elementos químicos presentes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Identificação dos principais elementos químicos presentes.



Os ensaios de desgaste abrasivo por roda de borracha, de acordo com a norma ASTM G65 foram realizados em conformidade com o procedimento B da norma, as amostras ensaiadas apresentam marca de desgaste (Figura 5.2.1). Os resultados são apresentados a Tabela 5.2.1.

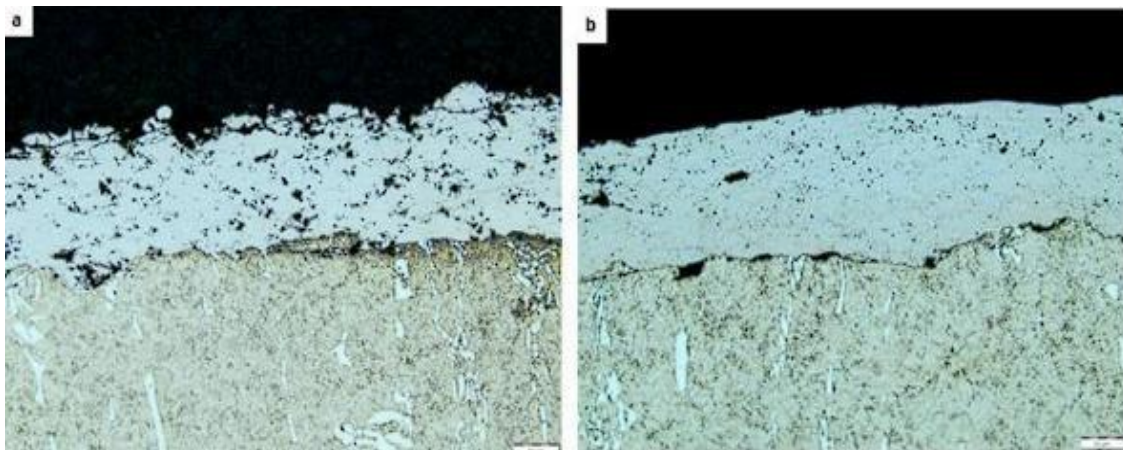
Desgaste Abrasivo				
ASTM G65	D2 HVOF-1	H13 HVOF-1	D2 HVOF-2	H13 HVOF-2
Perda Mássica (g)	0,02	0,019	0,149	0,076
Desvio Padrão (g)	0,004	0,004	0,02	0,01

Figura 5.2.1 – Amostras Após Ensaio de Desgaste Abrasivo do D2-HVOF(a) e H13-HVOF(b) fornecedor 1 e D2-HVOF(a) e H13-HVOF(b) fornecedor 2.



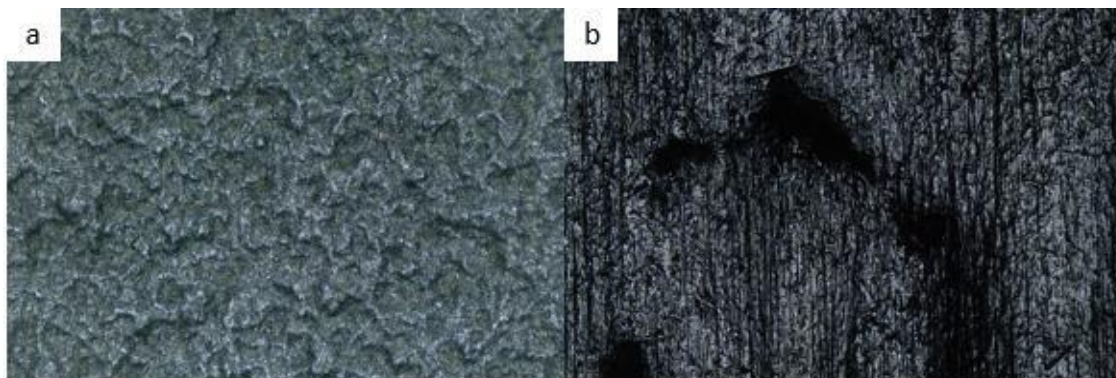
Após o ensaio foram realizados cortes transversais no centro do corpo de provas para análise por microscopia óptica, com o objetivo de analisar a espessura da camada do revestimento após o desgaste (Figura 5.2.2). As amostras do fornecedor 1, apenas uma camada mais externa rugosa foi removida e o restante da superfície apresentando um polimento. As amostras utilizadas D2-HVOF e H13-HVOF do fornecedor 1 apresentaram microdureza próxima a 1300HV, próxima ao valor de dureza da areia de sílica utilizada com 1200HV, não apresentando riscamento ou microssulcamento (Figura 5.2.3 (a)). As amostras do fornecedor 2 apresentaram microdureza próxima a 700HV. Esse valor mais baixo pode favorecer o desgaste por riscamento e microssulcamento (Figura 5.2.3 (b)).

Figura 5.2.2 – Imagem transversal do revestimento HVOF sobre aço ferramenta D2 do fornecedor 1. Região sem desgaste abrasivo (a); após o desgaste abrasivo (b). Microscopia óptica 100x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.2.3 – Imagem Região Central da Amostra após ensaio de desgaste. D2- HVOF Fornecedor 1 (a); D2-HVOF Fornecedor 2 (b). Microscopia óptica 50x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, foi realizado o ensaio de rugosidade superficial nas amostras após o ensaio de desgaste. Os resultados são apresentados na Tabela 5.2.2.

Tabela 5.2.2 – Rugosidade Após o Desgaste Abrasivo do Revestimento dos Aços D2 e H13 do Fornecedor 2 com Desvio Padrão.

Rugosidade Após o Desgaste Abrasivo		
ASTM	D2 HVOF-2	H13 HVOF-2
Ra (μm)	3,3	1,6
Desvio Padrão (μm)	0,6	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÃO

Os revestimentos de WC aplicados por meio da técnica HVOF nos aços ferramenta H13-HVOF e D2-HVOF apresentaram boa adesão ao substrato e boa coesão na camada aspergida, apesar de encontrados valores de porosidade elevados para o fornecedor 1, cerca de 6%, e a medição para o fornecedor 2 não ser possível.

As amostras apresentaram valor de dureza superiores em 1,7 vezes para o fornecedor 1 em relação ao fornecedor 2. A rugosidade superficial para a amostra de aço H13-HVOF do fornecedor 2 apresentou resultado próximo à metade do valor das outras amostras do fornecedor 1 e da amostra D2- HVOF do fornecedor 2.

A espessura da camada aspergida do fornecedor 2 apresentou uma espessura superior 2,8 vezes maior que o fornecedor 1. A microscopia eletrônica de varredura por meio da técnica EDS apresentou na composição do revestimento do fornecedor 1 Cobalto e na composição do revestimento do fornecedor 2 Vanádio, sendo que em ambos os casos era esperado que o Cobalto fosse apresentado.

O ensaio de desgaste do revestimento do fornecedor 1 apresentou valores próximos a 0,02g de perda mássica, enquanto que para o fornecedor 2 os valores ficaram próximos a 0,1g. Os valores de perda mássica do fornecedor 1 foram cerca de 5x menores que para o fornecedor 2, devido à baixa dureza do revestimento e a predisposição ao riscamento e microsulcamento em função da menor dureza.

Importante destacar a variação entre os ensaios realizados no material 2. Em alguns ensaios os resultados apresentaram grande variação para o D2-HVOF e do H13- HVOF, visto que a camada aspergida deveria ser a mesma. As variações ocorrem nos ensaios de rugosidade superficial antes e após o ensaio, perda mássica no ensaio de desgaste e na espessura de camada em microscopia óptica.

Diante do exposto, para aplicações de elevado desgaste, o revestimento do fornecedor 1 mostrou-se mais eficiente, com maior estabilidade geométrica e menor rugosidade superficial.

7. LISTA DE REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A681 – Standard Specification for Tool Steels Alloy. West Conshohocken: ASTM International, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G65-04(2010): Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook: Volume 1 – Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Materials Park, OH: ASM International, 1990.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook of Thermal Spray Technology. Washington: ASM International, 2004. p. 338.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4417–21: Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2108–16: Standard Practice for Fire Prevention for Photovoltaic Panels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2109: Standard Test Method for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. fig. 6.

BANISTER, K. E. Lubrication for Industry. 1. ed. New York: Industrial Press, 1996.

BARBEZAT, G.; NICOL, A. R.; SICKINGER, A. Abrasion, erosion and scuffing resistance of carbide and oxide ceramic thermal sprayed coatings for different applications. Wear, v. 162–164, part A, p. 529–537, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004316489390538W>.

BENER. Eletroerosão fio molibdênio AR80. [Imagem]. Disponível em: <https://bener.com.br/produto/eletroerosao-fio-molibdenio-ar80/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BRANDOLT, Carlos Sérgio. Revestimentos de níquel e cobalto aplicados por aspersão térmica: caracterização e avaliação de propriedades mecânicas e tribológicas. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/96503>.

BROSSARD, S. Microstructural analysis of thermal spray coatings by electron microscopy. 2010. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) – University of New South Wales, Sydney, 2010.

UDINSKI, Kenneth G. Surface engineering for wear resistance. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988.

CASTRO, Richard de Medeiros; CAVALER, Luciane Cristina Dias de Castro; KEJELIN, Neusa Zampieri; ALMEIDA, Fernando Alexandre de. Revestimento WC depositado por aspersão térmica (HVOF) como alternativa ao cromo duro eletrodepositado aplicados em equipamentos hidráulicos. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 19, n. 2, p. 27-42, 2015. Disponível em: <https://revistas.uned.es/index.php/RIBIM/article/view/42445/31047>.

CASTRO, Rafael Martins. Avaliação das propriedades de superfície e do comportamento ao desgaste abrasivo de hastes de cilindros hidráulicos revestidas pelos processos HVOF e cromo duro. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/70708>.

CHANDRA, S.; FAUCHAIS, P. Formation of solid splats during thermal spray deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 18, n. 2, p. 148–180, 2009. DOI: 10.1007/s11666-009-9294-5. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-009-9294-5>.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 2002. 599 p. ISBN 8586778486.

COULSON, W.; LEHEUP, E. R.; MARSH, M. G. Reciprocating wear of WC-17Co coatings in aqueous environments. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, v. 73, n. 1, p. 7–11, 1995. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00202967.1995.11871046>.

HILLERY, R. V. Coatings for performance retention. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, v. 4, n. 6, p. 2624–2628, 1986. Disponível em: <https://pubs.aip.org/avs/jva/article-abstract/4/6/2624/101439/Coatings-for-performance-retentionCoatings-for?redirectedFrom=fulltext>.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. *Steel Products Manual: Tool Steels*. 11. ed. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1970.

WANG, Q.; ZHANG, Y.; DING, X.; WANG, S.; RAMACHANDRAN, C. S. Effect of WC grain size and abrasive type on the wear performance of HVOF-sprayed WC-20Cr₃C₂-7Ni coatings. *Coatings*, v. 10, n. 7, art. 660, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/232389040_Sliding_wear_properties_of_HVOF_sprayed_WC-20Cr3C2-7Ni_cermet_coatings.

KUMAR, Vijay; SINGH, Vikrant; BANSAL, Anuj; VERMA, Rajeev. 3 Body abrasion test of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr and WC-10Co-4Cr + 2% graphene coating on IS-2062 steel. *Diamond and Related Materials*, v. 132, p. 107015, jun. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/381625467_3_Body_abrasion_test_of_HVOF_sprayed_WC-10Co-4Cr_and_WC-10Co-4Cr_2_graphene_coating_on_IS-2062_steel.

KURODA, Seiji; KAWAKITA, Jin; WATANABE, Makoto; KATANODA, Hiroshi. Warm spraying: a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 9, n. 3, art. 033002, 2008. DOI: 10.1088/1468-6996/9/3/033002.

LABSPEQ. Microscópio BX53. [Imagem]. Disponível em: <https://www.labspeq.com.br/microscopio-bx53/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

LEAL, L. D. Tribologia. Apostila (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. 172 p.

LI, Hongbo; LI, Ban; DENG, Chengxu; WANG, Yijing. Morphology and wear resistance of HVOF sprayed H13-WC/Ni gradient coating on H13 steel surface. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1213, n. 5, art. 052020, jun. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1213/5/052020.

MASOUMI, Hamed; SAFAVI, Seyed Mohsen; SALEHI, Mehdi; NAHVI, Mehran. Effect of grinding on the residual stress and adhesion strength of HVOF thermally sprayed WC–10Co–4Cr coating. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 29, n. 9, p. 1004–1010, 2014. DOI: 10.1080/10426914.2014.930893.

MENEZES, Pradeep L.; INGOLÉ, Sudeep P.; NOSONOVSKY, Michael; KAILAS, Satish V.; LOVELL, Michael R. *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*. New York: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-1945-7.

NAHVI, Mehran; JAFARI BAHRAMABADI, Majid. Microstructural and mechanical properties of advanced HVOF-sprayed WC-based cermet coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 286, p. 95–102, 2016. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.016.

PAWLOWSKI, Lech. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

PAREDES, Ramón Sigifredo Cortés. Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha. 1998. 153 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/78026>.

WIGREN, Jan; RYBICKI, E. Residual stresses as a factor in the selection of tungsten carbide coatings for a jet engine application. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 4, n. 3, p. 268–274, 1995. DOI: 10.1007/BF02646970.

RABINOWICZ, Ernest. *Friction and Wear of Materials*. 2. ed. New York: Wiley, 1995.

RHYS-JONES, T. N. Thermally sprayed coating systems for surface protection. *Surface and Coatings Technology*, v. 46, p. 1-13, 1990. DOI: 10.1016/0257-8972(90)90092-Q.

SCHIEFLER FILHO, Marcos Flávio de Oliveira. Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica. 2004. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87348>.

STEWART, D. A. Abrasive wear behaviour of conventional and nanostructured coatings deposited by high velocity oxy-fuel thermal spraying. *Wear*, v. 225-229, p. 1073-1081, 1999. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00032-0.

FARIA, Franciane Galvão; SCHWARC, Mariana Anastácia de Oliveira; TAVARES, Claudinei Milan; OLIVEIRA, Leandro Guimarães de; PEREIRA, José Cristiano. Análise comparativa da aspersão de carbeto de tungstênio em titânio pelos processos de HVOF e plasma spray. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 37–44, jan./mar. 2020. DOI: 10.4322/2176-1523.20201835. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/340069532_Analise_comparativa_da_aspersao_de_carbeto_de_tungstenio_em_titanio_pelos_processos_de_HVOF_e_plasma_spray

UFOP. Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6510. [Imagem]. Disponível em:

https://posdegeo.ufop.br/sites/default/files/styles/os_files_xxlarge/public/posdegeo/files/mev-jeol-jsm6510.png?m=1584692594&itok=TeUQx4d-. Acesso em: 20 mar. 2025.

Tzeng, Y. F. Effects of process parameters on the corrosion rate of pulsed Nd:YAG laser welded stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 124, n. 1, p. 1 – 8, 2002. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01015-9

VARIS, Tommi; LAGERBOM, Juha; SUHONEN, Tomi; RAAMI, Lassi; TERHO, Sakari; LAURILA, Jussi; PEURA, Pasi; VUORISTO, Petri. Effect of heat treatments on the wear resistance of HVAF and HVOF sprayed tool steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 462, p. 129508, 2023. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129508.