



## Estudo das características de um revestimento de aço inoxidável SAE 420, aplicado por diferentes processos de aspersão térmica

*Study of the characteristics of a SAE 420 stainless steel coating, applied by different thermal spraying processes*

FARAH, Alessandro Fraga; Doutor; Fatec Sertãozinho  
alessandro.farah@fatec.sp.gov.br

MARSON, Heitor; Mestrando; Universidade Presbiteriana Mackenzie  
heitormarson@gmail.com

SANTOS FARAH, Solange Pereira; Mestre; Fatec Sertãozinho  
solange.farah@fatec.sp.gov.br

### Resumo

O processo de aspersão térmica tem como objetivo criar uma camada com propriedades diferenciadas do metal base, promovendo melhorias nas características mecânicas, químicas e físicas da peça revestida. Nesse estudo foram aplicados revestimentos de aço inoxidável SAE 420 por diferentes processos de aspersão térmica. Os métodos de aspersão térmica utilizados foram Chama Spray (Arame e Pó), HVOF e Arco Arame. Os resultados foram avaliados por meio de ensaios de dureza, resistência ao desgaste e análise metalográfica. Cada técnica mostrou capacidade de induzir microestruturas e propriedades mecânicas distintas, sugerindo que o tipo de processo tem influência decisiva na formação de camadas com características específicas de porosidade, presença de óxidos e variações na homogeneidade da estrutura. Foi aplicada uma análise quantitativa em software (IMAGEJ), para mensurar a presença de poros e óxidos, possibilitando uma correlação detalhada entre as variáveis do processo de aspersão e as propriedades microestruturais e mecânicas dos revestimentos obtidos.

**Palavras-chave:** *Aspersão Térmica; Arco Arame; Chama Spray; HVOF; Inox SAE 420.*

### Abstract

*The thermal spray process aims to create a layer with properties that differ from those of the base metal, promoting improvements in the mechanical, chemical, and physical characteristics of the coated part. In this study, SAE 420 stainless steel coatings were applied using different thermal spray processes. The thermal spray methods used were Flame Spray (Wire and Powder), HVOF, and Arc Spray. The results were evaluated through hardness and wear resistance tests, and metallographic analysis. Each technique demonstrated the ability to induce distinct microstructures and mechanical properties, suggesting that the type of process has a decisive influence on the formation of layers with specific characteristics of porosity, the presence of oxides, and variations in structural homogeneity. Quantitative analysis software (IMAGEJ) was applied to measure the presence of pores and oxides, enabling a detailed correlation between the spray process variables and the microstructural and mechanical properties of the coatings obtained.*

**Keywords:** *Thermal Spray; Arc Spray; Flame Spray; HVOF; Stainless steel SAE 420.*



## 1 Introdução

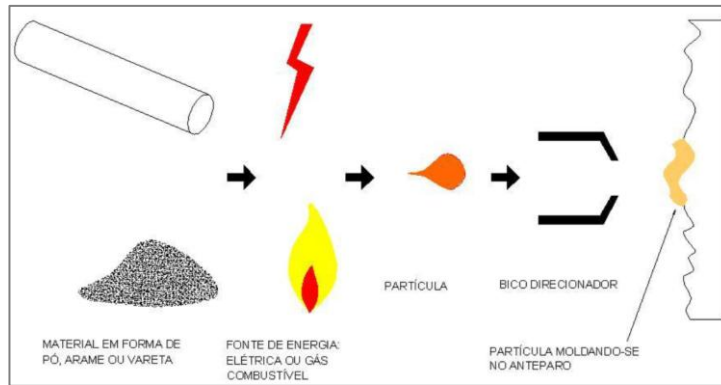
A realização de aplicações de revestimentos protetores, no contexto de projetos de engenharia, iniciou-se com o objetivo de atender à demanda de proteção de peças, conjuntos e sistemas mecânicos contra o efeito da corrosão. Com o advento da evolução das pesquisas e tecnologias relacionadas à Ciência dos Materiais, os revestimentos foram otimizados para serem utilizados também em contextos de melhoria da resistência ao desgaste, à corrosão, isolamento térmico e isolamento elétrico. Também podemos citar a aplicação de revestimentos para proteção contra atmosferas nocivas no aspecto químico e ou biológico. Quando se abordam as técnicas de aspersão térmica, o desenvolvimento destas foi resultado de uma busca por aumento da vida útil de peças e sistemas mecânicos. Permitindo cenários nos quais, evita-se a substituição das peças, usufruindo-se dos métodos da aspersão térmica para recuperar e otimizar suas propriedades, de maneira que a peça retome suas atividades em serviço, resistindo às solicitações térmicas e mecânicas exigidas na respectiva aplicação industrial. A temática de processos de aspersão térmica engloba um grupo de processos que permitem a deposição de camadas metálicas e não-metálicas sobre um determinado substrato, onde objetiva-se a alteração de suas características superficiais. Assim, podemos aproveitar os benefícios das propriedades do material depositado para maximizar a performance de peças e equipamentos em estágio de fabricação ou procedimentos de manutenção. Portanto, podemos compreender a importância e o papel estratégico das técnicas de aspersão térmica nos âmbitos industriais e metalúrgicos. Com tais técnicas, conseguimos elevar o desempenho das propriedades superficiais de aparatos e conjuntos mecânicos, viabilizando processos de fabricação de produtos otimizados e trazendo maior flexibilidade para o contexto de manutenção industrial (ao expandirmos a vida útil dos agrupamentos que irão receber a aplicação das aspersões e retornarão ao serviço a que são designados). Importante destacar que, em uma análise holística da estrutura de custeio industrial, tais técnicas de aspersão térmicas atuam como redutoras de custos pois irão postergar a necessidade de trocas e compra de novos equipamentos; ficando tal necessidade alocada para um momento mais a diante na linha do tempo de investimentos em capital fixo. Diante do exposto, foi estudado as características de revestimentos de aço SAE 420, aplicado sobre um aço SAE 1020. Diferentes processos de aspersão e variação deles foram utilizados na realização deste estudo. As amostras foram revestidas com o SAE 420 na forma de pó e arame sólido, pelos processos de aspersão por Chama Pó, Chama Arame, Arco Arame e HVOF. Os resultados foram analisados através dos ensaios de dureza, metalografia e resistência à abrasão. Para um melhor entendimento dos resultados, a quantidade de poros e óxidos formados durante o processo, foram quantificadas por meio de análise fotográfica e com o auxílio do software de análise de imagem, o ImageJ.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Processos de Aspersão Térmica

Os processos de aspersão térmica, de maneira geral, podem utilizar como material a ser aspergido: materiais em forma de pó, arame ou vareta. As fontes de energia podem ser: elétrica ou gás combustível. Tal processo irá gerar partículas que serão direcionadas para o substrato. Existindo também a possibilidade de utilizar um bico direcionador de fluxo nesta etapa final do processo, para otimizar o direcionamento do fluxo de partículas (PAREDES, 2012). A Figura 1 ilustra um esquema genérico de processo de aspersão térmica.

**Figura 1** - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.

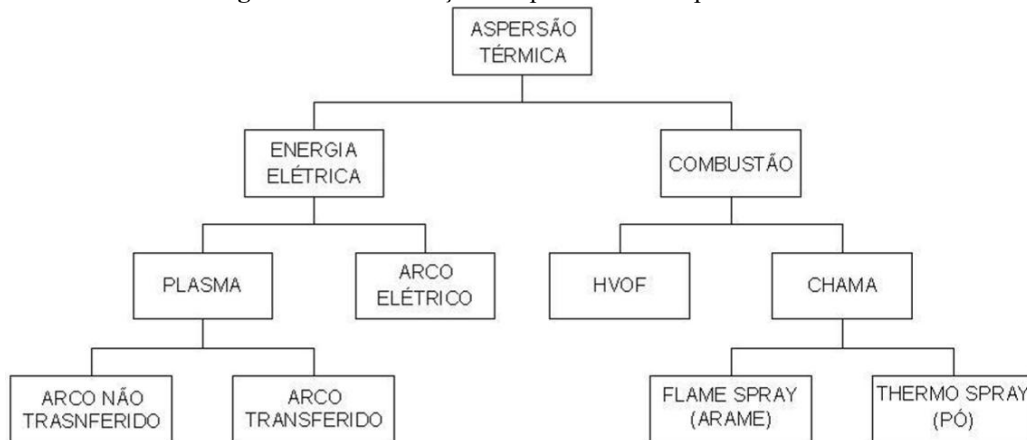


Fonte: PAREDES (2012).

Nos procedimentos de aspersão térmica, os materiais a serem aspergidos são levados a um estado físico fundido ou semifundido através de uma fonte de calor gerado no bico de uma pistola ou dispositivo adequado. Após a fusão, o material, em formato de partículas, é acelerado por gases sob pressão em direção à superfície que será revestida. Durante o impacto contra a superfície, as partículas deformam-se e aderem-se ao substrato, formando camadas. A camada final será o resultado de diversas camadas depositadas sequencialmente (AWS, 1985).

Quando analisamos a fonte de energia utilizada nos processos de aspersão térmica, podemos classificar os processos da seguinte maneira, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação dos processos de aspersão térmica.



Fonte: PAREDES (2012).

## 2.2 Aspersão Térmica por Chama Convencional

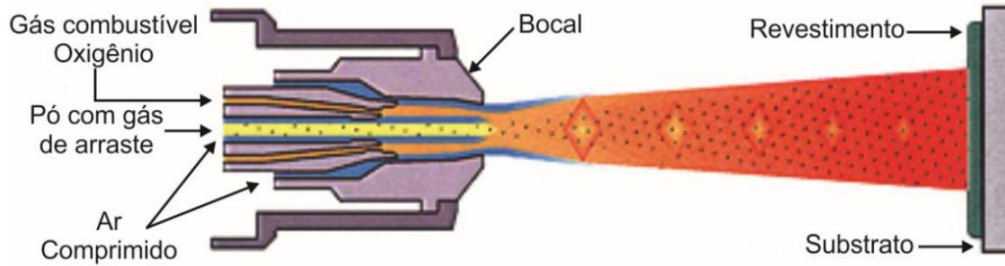
O processo de Aspersão por Chama Convencional (no Inglês, *Flame Spray*), também chamado de processo a chama oxiacetilênica, tem como base a energética a energia oriunda da combustão de um gás combustível misturado com oxigênio. Tal energia será utilizada para fundir o material que será depositado no substrato. O material a ser fundido pode estar na forma de pó ou arame. Pode-se utilizar materiais metálicos, ligas metálicas, materiais cerâmicos e até polímeros (BERNDT, 2004).

## 2.3 Aspersão Térmica HVOF (High Velocity Oxy Fuel)

Com o tempo, identificou-se que uma das limitações nos processos à chama tradicional é o poder calorífico dos gases. Fazendo com que o material fundido chegasse ao substrato com uma temperatura já reduzida. Tal perda de calor deve-se ao trajeto até o substrato. Desta forma, os avanços tecnológicos buscaram aumentar a velocidade com que as

partículas chegassem ao substrato mantendo a alta energia térmica e cinética do gás. Com isto, desenvolveu-se o processo de aspersão térmica HVOF. Neste processo, na pistola de aspersão térmica, o particulado (pó metálico) é inserido axialmente ao fluxo de gases e logo à frente da câmara de combustão; o pó é comprimido aumentando sua temperatura e velocidade. Os revestimentos obtidos pelo processo de HVOF, normalmente são formados por tungstênio, carbonetos e cobalto, mas também permite a obtenção de quaisquer revestimentos metálicos e cerâmicos (LUDWIG, 2020).

**Figura 3** - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de Osaka Fuji Corporation (2015).

#### 2.4 Aspersão Térmica ao Arco Elétrico

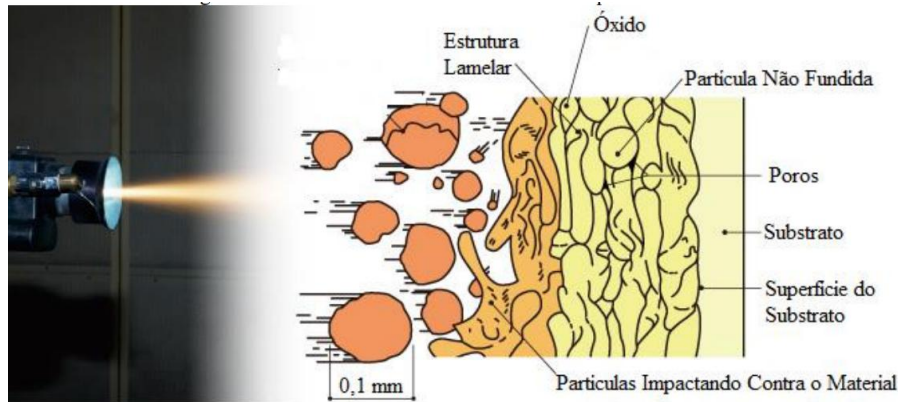
A aspersão térmica a arco elétrico (do inglês, *Arc Spray Process*) é também conhecida como arco arame. Utilizam-se dois eletrodos consumíveis de arame, que estão separados um do outro, ambos avançam até o bico da pistola para se encontrarem em um ponto onde é formada uma nuvem de gás atomizante. Uma diferença de potencial é aplicada através dos arames, o qual é o fato gerador de um arco elétrico que será a fonte de calor capaz de fundir as pontas dos arames. Um jato de gás comprimido é dirigido para destacar o material fundido e projetar as partículas em direção ao substrato (PARKER e KUTNER, 1991).

#### 2.5 Revestimentos obtidos por aspersão térmica – Porosidade e Óxidos

Os revestimentos obtidos por aspersão térmica, em geral, possuem um nível de porosidade entre 0-10%. A presença de poros vai de depender do processo adotado, da velocidade das partículas, distribuição do tamanho das partículas ejetadas e distância entre a pistola e o substrato. Já o teor de óxidos na camada revestida irá variar de acordo com o processo adotado. A velocidade com que as partículas são direcionadas influenciam diretamente na presença e na dissolução dos óxidos. Estes podem aumentar a dureza e a resistência ao desgaste do revestimento, no entanto, excesso de óxidos no revestimento pode ocasionar falhas coesivas e desgaste acelerado (LUDWIG,2020).

Na imagem abaixo, é possível visualizar as diferentes estruturas que se formam durante a composição de um revestimento por aspersão térmica.

**Figura 4** – Características do Revestimento de Aspersão Térmica.



Fonte: LUDWIG (2020).

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Materiais utilizados

##### 3.1.1 Metal de Base - Substrato

Para a execução deste trabalho, utilizou-se chapas de aço SAE 1020. A Tabela 1 indica a composição química do substrato.

Tabela 1 - Composição química em peso (%) do aço SAE 1020.

C	Mn	P	S	Fe
0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,03máx.	0,05máx.	Bal.

Fonte: Aços Especiais para Construção Mecânica Gerdau (2024).

A Tabela 2 descreve as principais características mecânicas do aço SAE 1020.

Tabela 2 - Propriedades do aço SAE 1020.

Aço SAE 1020	Temperatura de Austenitização (°C)	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Dureza (HB)
Laminado	-	450	330	143
Normalizado	870	440	345	131
Recozido	870	395	295	111

Fonte: Aços Especiais para Construção Mecânica Gerdau (2024).

Para a definição do aço a ser utilizado, levou-se em consideração sua facilidade de aquisição e sua grande aplicação e adoção na realização de trabalhos acadêmicos.

##### 3.1.2 Revestimento e Almofadamento

Na execução de alguns processos de Aspersão Térmica se faz necessário o processo de almofadamento. Este processo consiste na deposição de um metal para adequação do material de revestimento.

O material escolhido para tal almofadamento foi o Solocoat, para o processo Chama Pó e para o processo em Arame utilizou-se o GSNi20Al. Já o material de revestimento a chama arame utilizou-se o CMS-420 e no processo Spray Pó GPS 420-21 e para o HVOF, foi utilizado o material GPS 420-4. A granulometria varia de acordo com cada processo. A Tabela 3 mostra a composição química dos materiais utilizados neste estudo

Tabela 3 – Composição química nominal (%) dos materiais.

Material	C	Si	Mn	Cr	Al	Mo	S	P	Ni	Fe
GPS420-21/4	0,23	0,70	0,92	12,83	-	-	0,0069	-	0,56	Bal.

CMS420	0,37	0,55	0,37	12,59	-	-	0,03	0,03	-	Bal.
GSNi20Al	-	-	-	-	20,30	-	-	-	-	Bal.
Solocoat(NiAlMo)	-	-	-	-	6,06	5,26	-	-	-	Bal.

Fonte: Comersul – Aspersão Térmica e Soldas Especiais (2023)

A composição do metal SAE 420 proporciona características mecânicas interessantes para o processo Chama Spray. Abaixo a tabela ilustra as principais características do metal.

**Tabela 4 - Propriedades Mecânicas Típicas do Metal de Adição SAE 420.**

Resistência a Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Dureza HB (Solda)
1.000	830	400

Fonte: Techno Alloys (2017).

### 3.2 Preparação das Amostras

As amostras foram usinadas e, em seguida, três corpos de prova foram cortados para cada processo. Cada amostra foi dimensionada conforme a norma ASTM G65, estabelecida para ensaios de desgaste, com dimensões finais de 25 x 75 x 12,5 mm. Após a preparação, os corpos de prova passaram pelo processo de jateamento para torná-los adequados à aplicação do revestimento por aspersão. Posteriormente, as amostras foram lixadas para melhorar a qualidade do acabamento, utilizando uma lixadeira comercial comum e lixa d'água de granulometria 100, que proporciona as características de superfície necessárias para os estudos. No contexto dos processos de aspersão térmica, aplicou-se o método de almofadamento, que consiste na adição de uma camada preliminar de material para melhorar a aderência do revestimento metálico principal, funcionando como uma "almofada." Para esse processo, foram usados dois materiais de almofadamento: a liga Solocoat, aplicada aos materiais PFS-420-21 e GPS420-21 nos processos de Chama Pó e HVOF, e a liga GSNi20Al, utilizada nos corpos de prova em Arame CMS420.

**Figura 5 – Amostras utilizadas neste trabalho.**



Fonte: Autores, 2024.

### 3.3 Processos de Aspersão

A realização dos processos de aspersão foi caracterizada e definida por parâmetros diferentes para cada processo, sendo. A tabela abaixo detalha os respectivos processos.

**Tabela 5 – Materiais, Processos e Parâmetros utilizados.**

Material	GPS 420 – 21	GPS 420 – 4	Arame CMS 420	Arame CMS 420	Arame CMS 420	Arame CMS 420	Arame CMS 420
Amostra	PFS-420-21	HVOF-420-4	WFS-420-St	WFS-420-Rd	WAS-420-StT	WAS-420-St	WAS-420-Rd
Processo	Chama Pó	HVOF	Chama Arame	Chama Arame	Arco Arame	Arco Arame	Arco Arame



Equipamento	MK74	JP5000	MK61 (Padrão)	MK61 (Reg. Dif.)	Arc145/S3 45	Arc340/S3 50	Arc340/S3 50
Pré aquecimento (°C)	40	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Almofadamento	Solocoat (NiAlMo)	Não	GSNi20 Al	GSNi20 Al	GSNi5Al	GSNi5Al	GSNi5Al
Pressão Ar Comprimido (Psi)	20	-	60	80	75	75	100
Pressão Oxigênio (Psi) / Regulagem Flowmeter	30 / 6,5	130	22 / 5,5	22 / 6	-	-	-
Pressão Acetileno (Psi) / Regulagem Flowmeter	12 / 5	-	15 / 2,5	15 / 3	-	-	-
Pressão Querosene (Psi)	-	113	-	-	-	-	-
Tensão (V)	-	-	-	-	40	35	35
Corrente (A)	-	-	-	-	300	180	220
Distância Bico/Peça (mm)	180	355	160	180	200	200	200
Granulometria (mm)	- 106+45	-45+15	-	-	-	-	-
Diâmetro (mm)	-	-	3,2	3,2	1,6	1,6	1,6
Jateamento	Granalha de aço	Óxido de alumínio	Granalha de aço	Granalha de aço	Óxido de alumínio	Granalha de aço	Granalha de aço

Fonte: Comersul– Aspersão Térmica e Soldas Especiais (2023).

### 3.4 Ensaio de Dureza Rockwell

Na realização dos Ensaios de Rockwell, utilizou-se um Durômetro Analógico, instalado no laboratório da Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho. O modelo da máquina é o PAN 300JW, cujo fabricante é a empresa PANTEC. Executaram-se cinco medições em cada amostra, com o objetivo de estabelecer criteriosamente a dureza do material aspergido. As penetrações do durômetro ocorreram ao longo da secção aspergida. As medições utilizaram o padrão de medição Rockwell C.

### 3.5 Ensaio de Desgaste

O ensaio de desgaste por roda de borracha, conforme a norma ASTM G65, mede a resistência ao desgaste abrasivo de materiais submetidos a contato com uma roda de borracha rotativa e uma carga abrasiva fixa. O corpo de prova é pressionado contra a roda coberta de borracha, enquanto um fluxo constante de material abrasivo é aplicado na interface. A roda gira a uma velocidade e pressão controladas, simulando condições abrasivas padronizadas. Após o ensaio, a perda de massa do corpo de prova é medida, o que permite comparar a resistência ao desgaste dos materiais testados. O ensaio foi feito

na máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo por Roda de Borracha, encontrada também nas instalações da FATEC Sertãozinho.

**Figura 6** - Máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo Roda de Borracha.



Fonte: Autores (2024).

### 3.6 Microscopia Ótica

As amostras foram cortadas na seção transversal dos corpos de prova e, em seguida, embutidas para fixação em uma plataforma que permitisse a realização dos ensaios subsequentes. Após o embutimento, as amostras foram polidas para garantir uma superfície livre de riscos, de modo a facilitar a caracterização precisa da microestrutura no microscópio. Por fim, realizou-se o ataque químico com reagentes de Behara e Marble, permitindo a observação das microestruturas resultantes.

### 3.7 Análise Quantitativa via Software ImageJ - Determinação da Presença de Poros e Óxidos

Após a realização das análises de microscopia e metalografia, utilizamos as imagens obtidas para identificar e quantificar a presença de óxidos e poros nas amostras estudadas, indicadores importantes para avaliar a qualidade dos revestimentos aplicados. Essa etapa foi executada com o auxílio do software de análise de imagem ImageJ, que é de acesso gratuito e oferece ferramentas avançadas para a quantificação de características microestruturais. Com o ImageJ, ajustamos as imagens para destacar áreas de interesse, aplicamos filtros e utilizamos funções de segmentação para isolar e calcular a proporção de óxidos e poros presentes em cada amostra. Esse procedimento facilita a comparação entre diferentes processos e materiais, permitindo uma análise detalhada das variáveis de qualidade na superfície dos revestimentos.

## 4 Resultados

### 4.1 Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza superficial estão indicados na Tabela 6. Estes foram obtidos através da média das medições realizadas para cada amostra.

**Tabela 6** – Dureza superficial das ligas depositadas.

Material	Dureza Encontrada (HRC)
PFS-420-21	21,8±1,8
HVOF-420-4	44,1±1,9

WFS-420-St	28,6±1,1
WFS-420-Rd	35,1±0,8
WAS-420-StT	28,7±0,6
WAS-420-St	36,5±1,4
WAS-420-Rd	34,2±0,6

Fonte: FARAH (2023).

#### 4.2 Perda de Massa (Ensaio de Desgaste)

Os resultados dos ensaios de desgaste estão indicados na Tabela 7. Os resultados foram obtidos através da média das medições realizadas para cada amostra.

**Tabela 7** – Perda de Massa das ligas depositadas.

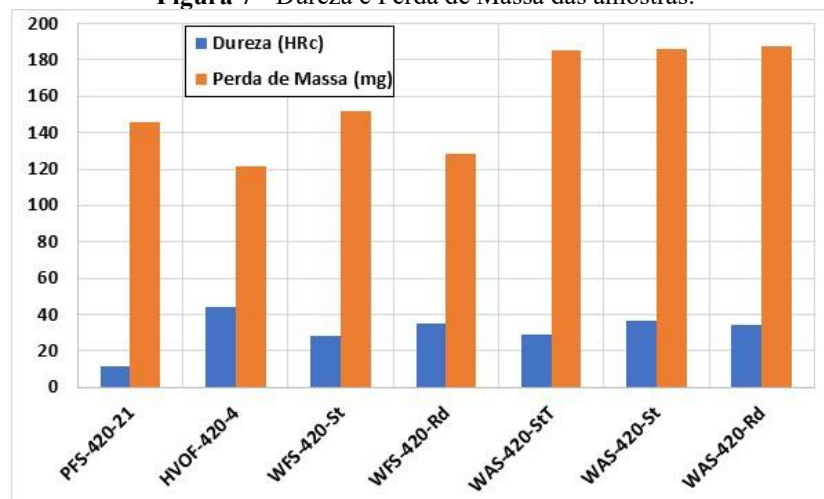
Material	Perda de Massa (mg)
PFS-420-21	146,2±11,3
HVOF-420-4	121,8±2,3
WFS-420-St	151,7±23,9
WFS-420-Rd	128,1±3,6
WAS-420-StT	185,0±8,5
WAS-420-St	185,8±11,4
WAS-420-Rd	187,2±10,7

Fonte: FARAH (2023).

#### 4.3 Relação entre Dureza e Perda de Massa das ligas

Com os dados obtidos dos ensaios de dureza e desgaste, obtem-se o gráfico abaixo para destacar a relação entre dureza e desgaste de cada uma das amostras.

**Figura 7** - Dureza e Perda de Massa das amostras.



Fonte: FARAH (2023).

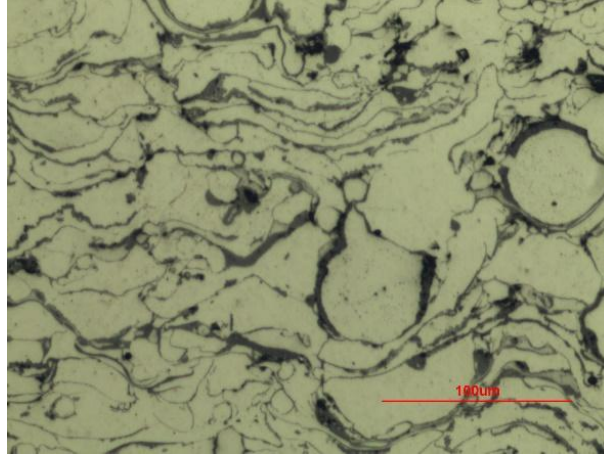
#### 4.4 Presença de Porosidade e Óxidos

Utilizando o software ImageJ, foi feito o tratamento digital da imagem obtida por microscopia. No procedimento experimental de utilização do software, indicamos a área que desejamos quantificar, e o software calcula a proporção da área indicada versus a área total da imagem. Segue exemplo com uma das amostras realizadas:

Na Figura 8, consta a visualização por microscopia da amostra PFS-420-21. A Figura 9, mostra a visualização da identificação dos poros e óxidos da amostra PFS-420-21. Na

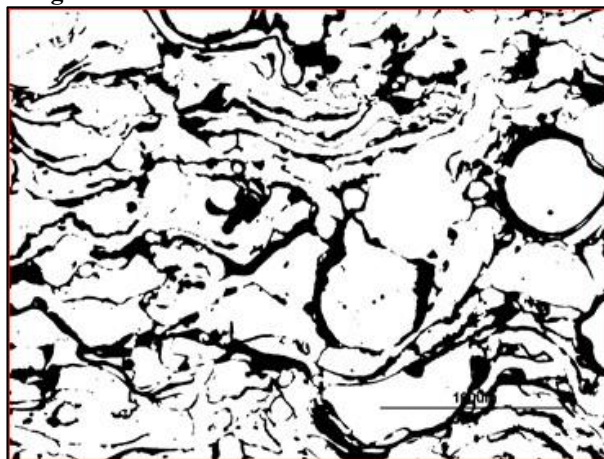
Figura 10, consta a visualização da identificação apenas dos poros da amostra PFS-420-21. Com as análises obtidas acima, realizando uma subtração nos valores obtidos na quantificação da região da Figura 9 menos o valor da quantificação da Figura 10, obtemos o valor da presença de óxidos.

**Figura 8** - Microscopia 200x - Amostra PFS-420-21.



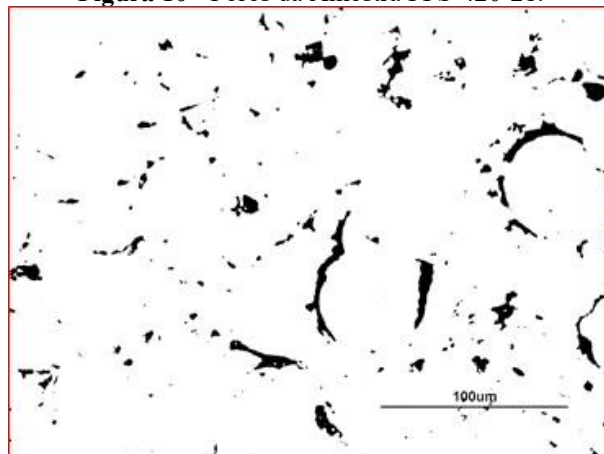
Fonte: Autores (2024).

**Figura 9** - Poros e Óxidos da Amostra PFS - 420-21.



Fonte: Autores (2024).

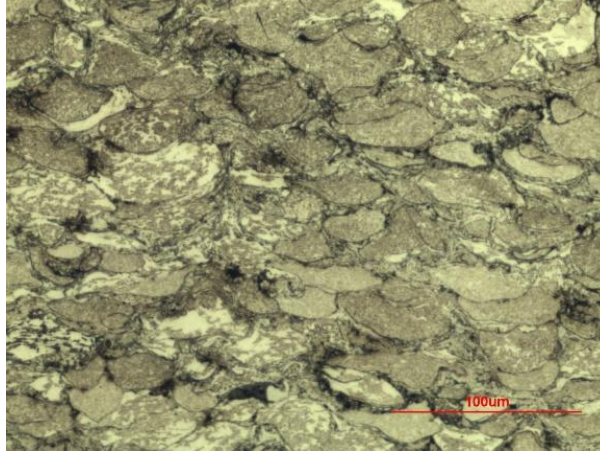
**Figura 10** - Poros da Amostra PFS-420-21.



Fonte: Autores (2024).

Utilizando o raciocínio descrito acima, as análises e cálculos foram realizados para todas as amostras. A Figura 11 mostra a micrografia da amostra HVOF-420-4. As Figuras 12 e 13 mostram o procedimento de contagem das fases presentes.

**Figura 11** - Microscopia 200x - Amostra HVOF-420-4.



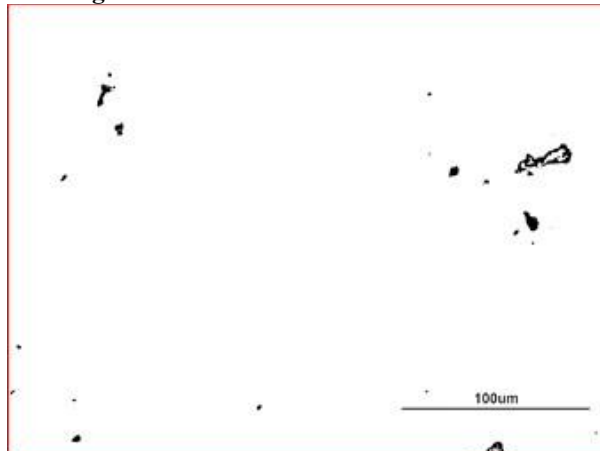
Fonte: Autores (2024).

**Figura 12** - Poros e Óxidos da Amostra HVOF-420-4.



Fonte: Autores (2024).

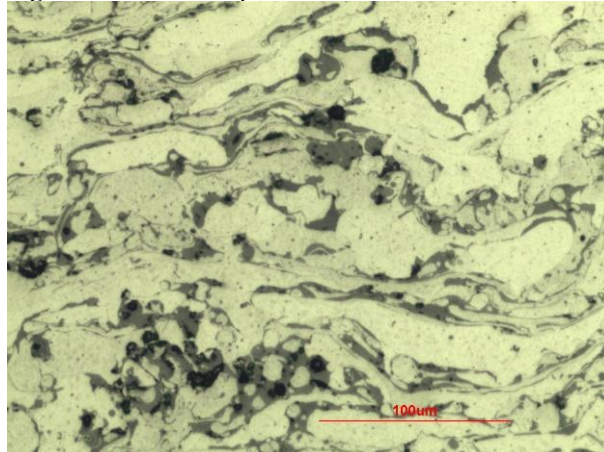
**Figura 13** - Poros da Amostra HVOF-420-4.



Fonte: Autores (2024).

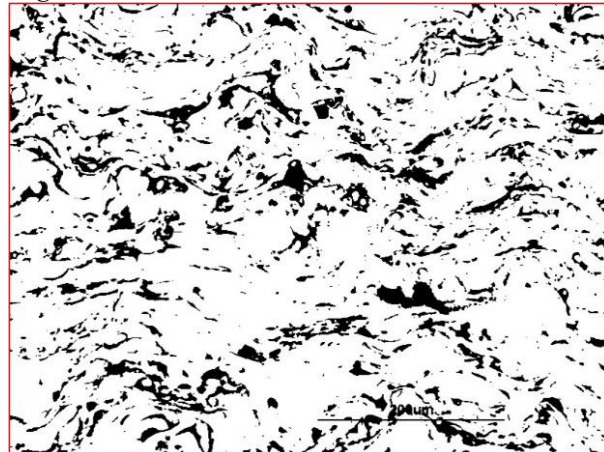
A Figura 14 mostra a fotomicrografia da amostra WAS-420-StT. As Figuras 15 e 16 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

**Figura 14** - Microscopia 200x - Amostra WAS-420-StT.



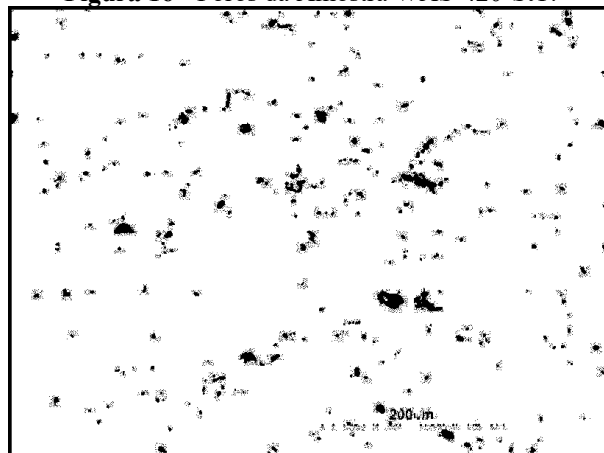
Fonte: Autores (2024).

**Figura 15** - Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-StT.



Fonte: Autores (2024).

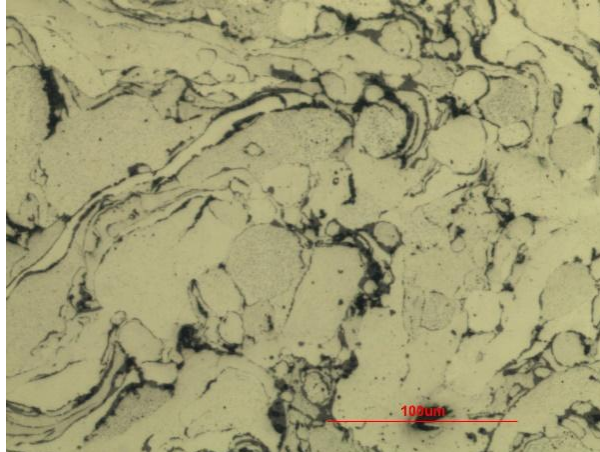
**Figura 16** - Poros da Amostra WAS-420-StT.



Fonte: Autores (2024).

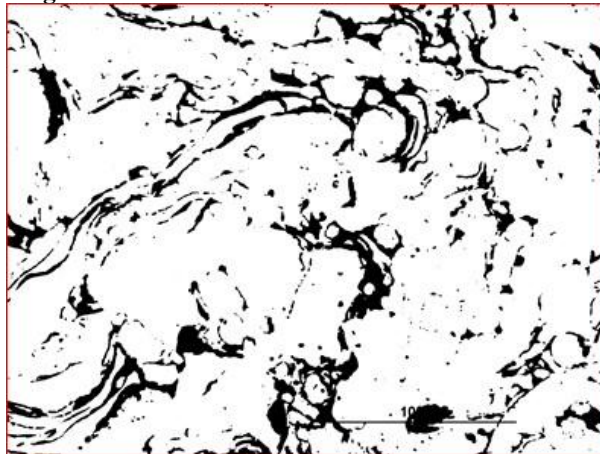
A Figura 17 mostra a fotomicrografia da amostra WAS-420-St. As Figuras 18 e 19 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

**Figura 17-** Microscopia 200x - Amostra WAS-420-St.



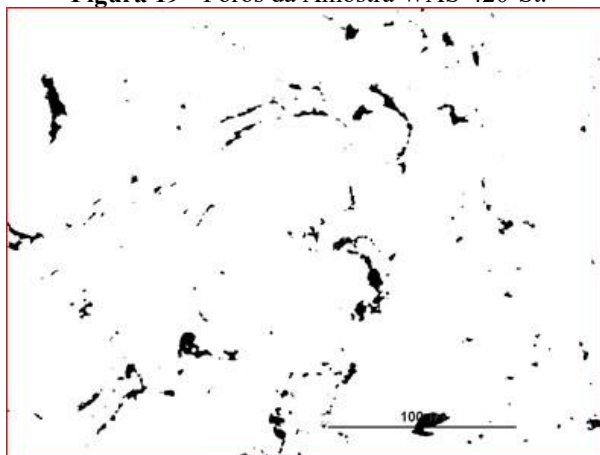
Fonte: Autores (2024).

**Figura 18 -** Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-St.



Fonte: Autores (2024).

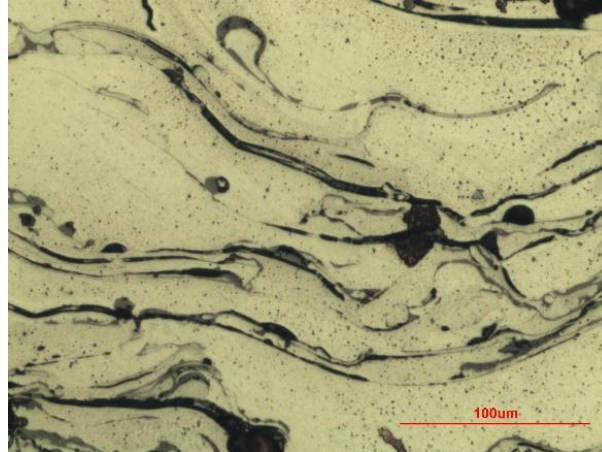
**Figura 19 -** Poros da Amostra WAS-420-St.



Fonte: Autores (2024).

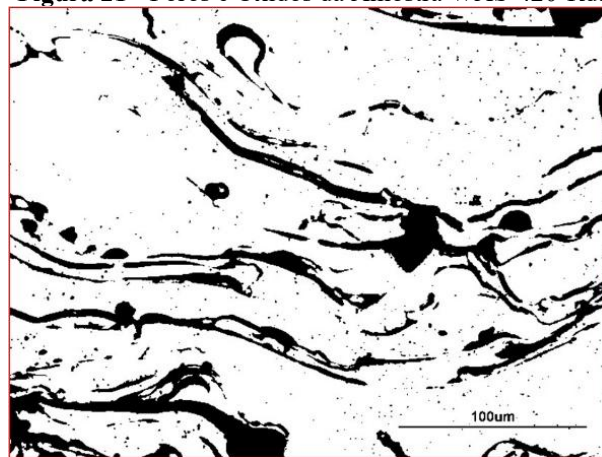
A Figura 20 mostra a fotomicrografia da amostra WAS-420-Rd. As Figuras 21 e 22 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

**Figura 20** - Microscopia 200x - Amostra WAS-420-Rd.



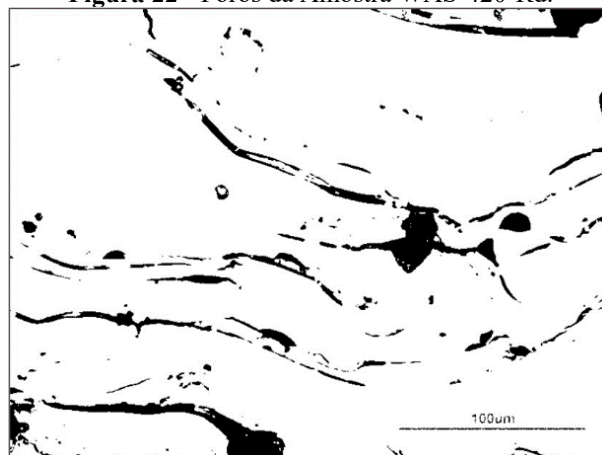
Fonte: Autores (2024).

**Figura 21** - Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-Rd.



Fonte: Autores (2024).

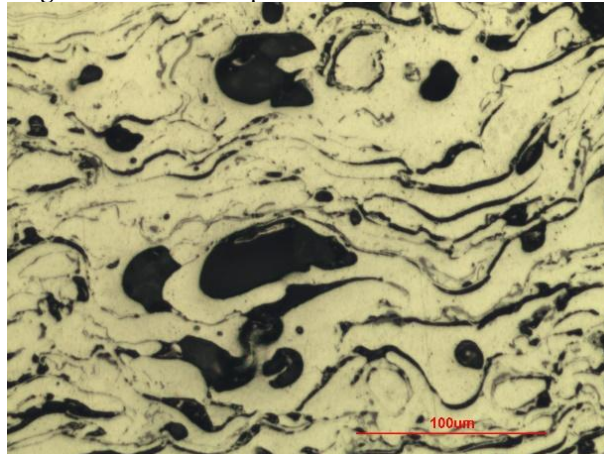
**Figura 22** - Poros da Amostra WAS-420-Rd.



Fonte: Autores (2024).

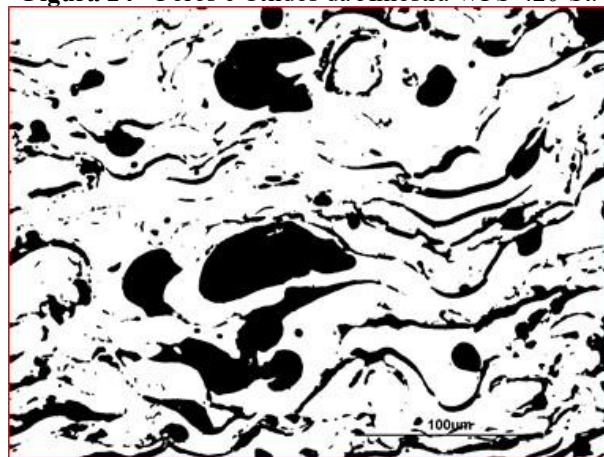
A Figura 23 mostra a fotomicrografia da amostra WFS-420-St. As Figuras 24 e 25 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

**Figura 23** - Microscopia 200x - Amostra WFS-420-St.



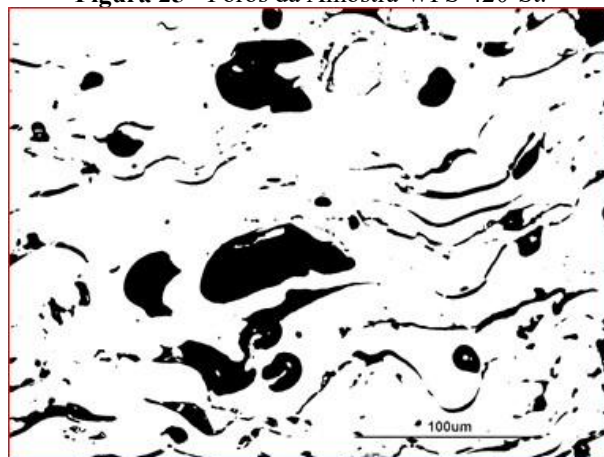
Fonte: Autores (2024).

**Figura 24** - Poros e Óxidos da Amostra WFS-420-St.



Fonte: Autores (2024).

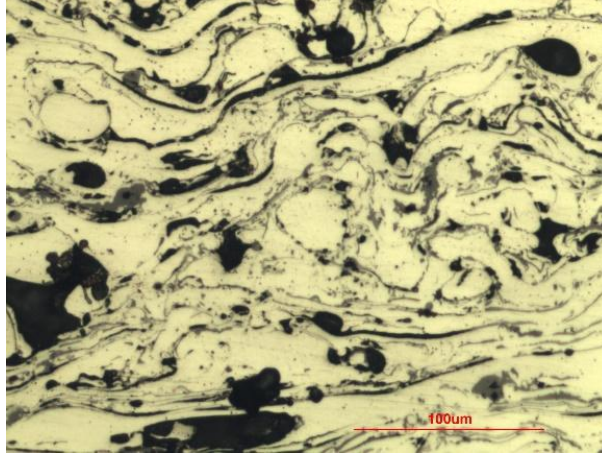
**Figura 25** - Poros da Amostra WFS-420-St.



Fonte: Autores (2024).

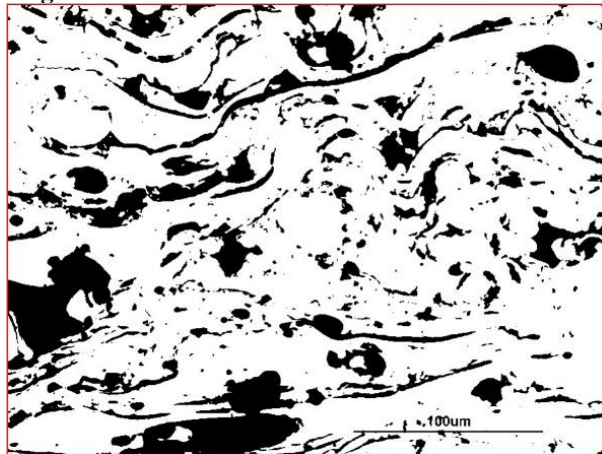
A Figura 26 mostra a fotomicrografia da amostra WFS-420-Rd. As Figuras 27 e 28 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

**Figura 26 - Microscopia 200x - Amostra WFS-420-Rd.**



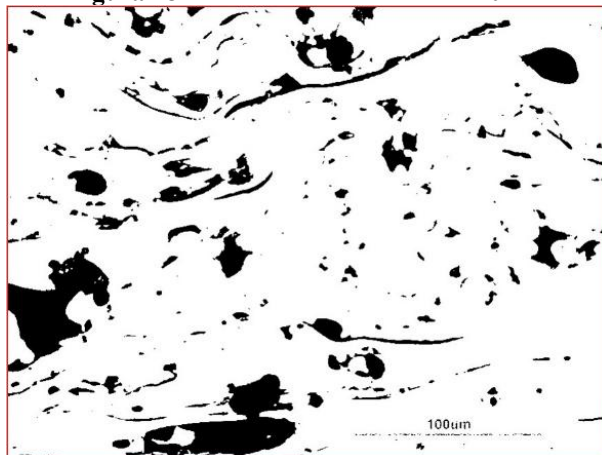
Fonte: Autores (2024).

**Figura 27 - Poros e Óxidos da Amostra WFS-420-Rd.**



Fonte: Autores (2024).

**Figura 28 - Poros da Amostra WFS-420-Rd.**



Fonte: Autores (2024).

A Tabela 8 mostra os valores médios da quantificação da presença de óxidos e poros das amostras estudadas neste trabalho.

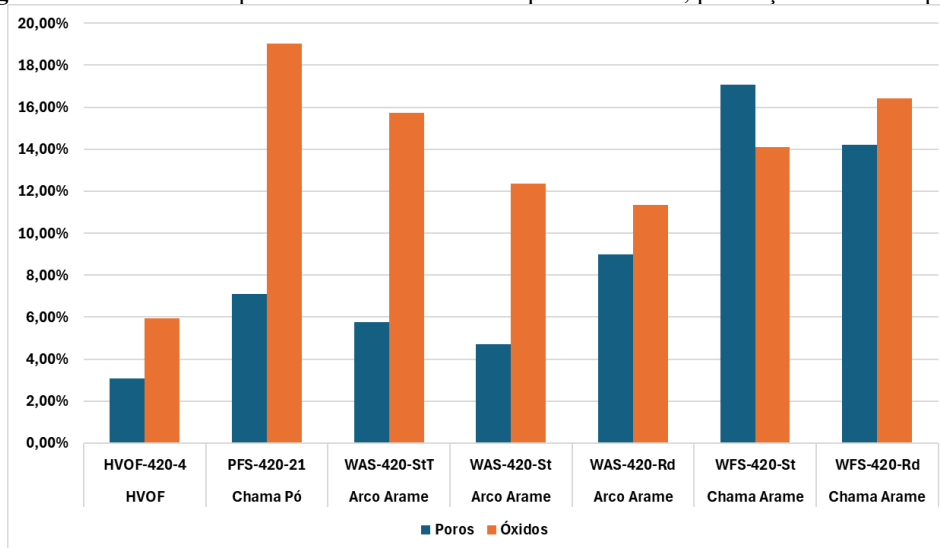
Tabela 8 – Porosidade e Óxidos - ligas depositadas.

Processo	Código	Poros	Óxidos
HVOF	HVOF-420-4	3,082%	5,942%
Chama Pó	PFS-420-21	7,086%	19,023%
Arco Arame	WAS-420-StT	5,751%	15,735%
Arco Arame	WAS-420-St	4,707%	12,367%
Arco Arame	WAS-420-Rd	8,997%	11,329%
Chama Arame	WFS-420-St	17,068%	14,110%
Chama Arame	WFS-420-Rd	14,201%	16,419%

Fonte: Autores (2024).

Como alternativa complementar de análise de resultados, segue gráfico (Figura 29) que ilustra os resultados da Tabela 8, comparando os métodos de aspersão térmica, as amostras e os resultados da ocorrência de óxidos e poros.

Figura 29 - Gráfico comparativos dos método de aspersão térmica, presença de óxidos e poros.



Fonte: Autores (2024).

## 5 CONCLUSÕES

Após a realização das análises e procedimentos experimentais descritos no tópico acima, podemos concluir que:

A amostra HVOF-420-4, correspondente ao método de aspersão térmica HVOF, apresentou a menor incidência de poros (3,082%). Confirmando as expectativas técnicas, pois o jato de maior velocidade para ejeção das partículas em direção ao substrato, de fato, oferece melhor adesão e maior adensamento das partículas na composição do revestimento final.

As amostras WFS-420-St e WFS-420-Rd, correspondentes ao método de Chama Arame, apresentaram a maior incidência de poros (17,068% e 14,201% respectivamente). Uma explicação para este resultado é que durante a aplicação, o arame que é fundido pela chama oriunda da queima de combustível, apresenta rápida solidificação dessas partículas após o impacto no substrato, o que pode aprisionar ar ou gases no interior do revestimento. Além disso, o processo pode gerar uma taxa de resfriamento desigual, contribuindo para a formação de microfissuras e vazios. Outro fator que contribui para a porosidade é a presença de impurezas no combustível ou na mistura de gases, que pode gerar oxidação durante o processo de aspersão.



Na análise de óxidos realizada, o processo de aspersão térmica utilizando o método por Chama Pó apresentou o maior índice de óxidos entre os métodos avaliados. O processo de aspersão térmica por Chama Pó forma mais óxidos devido a características específicas que favorecem a oxidação das partículas metálicas. A baixa temperatura operacional do método resulta em um aquecimento incompleto, deixando superfícies mais reativas à atmosfera. Além disso, a menor velocidade de ejeção das partículas prolonga o tempo de exposição ao oxigênio no ar, enquanto a ausência de um ambiente controlado amplifica esse efeito. Esses fatores combinados contribuem para a maior formação e retenção de óxidos em comparação com processos mais avançados, como o HVOF. Esse resultado está em conformidade com o comportamento esperado para esse procedimento, uma vez que a temperatura operacional do processo por Chama Pó é substancialmente inferior à de outros métodos de aspersão térmica.

Por outro lado, o processo HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) destacou-se pelo desempenho superior no que tange à densidade e compactação do revestimento. Esse método apresentou os menores índices de porosidade e a menor ocorrência de inclusões de óxidos. O desempenho técnico do HVOF é atribuído às suas condições operacionais únicas, que envolvem a ejeção das partículas em velocidades mais altas em direção à superfície-alvo. A elevada energia cinética associada ao método não apenas garante uma deformação plástica eficiente das partículas ao impacto, como também promove uma adesão robusta ao substrato. Como resultado, obtém-se um revestimento altamente denso, homogêneo e com mínima presença de defeitos estruturais, como poros e inclusões.

Este estudo contribui para as discussões sobre porosidade e a formação de óxidos em processos de aspersão térmica. A análise quantitativa da presença de óxidos e poros em revestimentos obtidos por esse método, embora reconhecida como relevante, ainda é pouco explorada de maneira sistemática em trabalhos científicos. Nesse sentido, este trabalho reforça a importância de aprofundar a investigação sobre esses parâmetros, não apenas como base para a compreensão dos mecanismos envolvidos, mas também como uma diretriz essencial para a padronização e o aprimoramento de futuros estudos na área.

### Referências

**AWS** - American Welding Society, Inc. Thermal Spraying. Practice, Theory, and Applications. 1985.

**BERNDT, C. C.** et al. Handbook of Thermal Spray Technology. [s.l.] ASM International, 2004.

**COMERSUL.** Aspersão Térmica e Soldas Especiais. Brasil. 2023.

**FARAH, A.F.,** Relatório de Projeto " **Investigação das propriedades dos revestimentos de aço inoxidável SAE 420, produzidos por diferentes processos de aspersão térmica**". São Paulo. FATEC. 2023.

**GERDAU.** Aços Especiais para Construção Mecânica. São Paulo. Gerdau, 2024.

**LUDWIG, G.A.** **Revestimentos de WC-10CO-4CR obtidos por aspersão térmica (HVOF) sobre aço inoxidável martensítico visando melhorar a resistência à corrosão e a erosão.** 2020. Tese de Doutorado (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia da UFRGS. 2020.

**PARKER, D. W.; KUTNER, E. L.** HVOF spray technology poised for growth. [S.l.]: Advanced Materials and Processes , v. 139, 1991.

**PAREDES, R.S.C.** Apostila de Aspersão Térmica. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2012.

**TECHNO ALLOYS.** Propriedades Mecânicas SAE 420. Brasil. 2017.

**OSAKA FUJI CORPORATION.** Creating the ideal surface - Portfolio. Japan. 2015.