



Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho - Deputado Waldyr Alceu Trigo

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”

FACULDADE DE TECNOLOGIA (FATEC) DE SERTÃOZINHO – SP

**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECÂNICA: PROCESSOS DE
SOLDAGEM.**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE UM REVESTIMENTO DE AÇO
INOXIDÁVEL SAE 420, APLICADO POR DIFERENTES PROCESSOS DE
ASPERSÃO TÉRMICA**

HEITOR LEON MARSON

PROF. ORIENTADOR: PROF. DR. ALESSANDRO FRAGA FARAH

**SERTÃOZINHO, SP
2024**

HEITOR LEON MARSON

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE UM REVESTIMENTO DE AÇO
INOXIDÁVEL SAE 420, APLICADO POR DIFERENTES PROCESSOS DE
ASPERSÃO TÉRMICA**

Monografia Técnico-Científico apresentada como Trabalho de
Conclusão de Curso (TCC) à Faculdade de Tecnologia de
Sertãozinho, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah

SERTÃOZINHO, SP

2024

HEITOR LEON MARSON

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE UM REVESTIMENTO DE AÇO
INOXIDÁVEL SAE 420, APLICADO POR DIFERENTES PROCESSOS DE
ASPERSÃO TÉRMICA**

Monografia Técnico-Científico apresentada como Trabalho de
Conclusão de Curso (TCC) à Faculdade de Tecnologia de
Sertãozinho, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah

Data da aprovação: ____ / ____ / ____.

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah
FATEC de Sertãozinho – SP – Brasil

Prof.
FATEC de Sertãozinho – SP – Brasil

Prof.
FATEC de Sertãozinho – SP – Brasil

Local: Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho
Sertãozinho – SP – Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão a todos que me apoiaram ao longo desta jornada acadêmica. Em primeiro lugar, agradeço aos meus familiares, que foram o alicerce durante todos esses anos de estudo. Seu apoio e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse concluir essa etapa com êxito. Agradeço também aos professores e orientadores que me acompanharam durante todo o percurso. Sua dedicação, paciência e conhecimento foram essenciais para a elaboração deste trabalho, enriquecendo minha formação com ensinamentos e experiências valiosas.

RESUMO

Este estudo realiza uma análise detalhada dos resultados obtidos no processo de aspersão térmica de revestimentos de aço inoxidável SAE 420, aplicados sobre substratos de aço SAE 1020, amplamente utilizados na fabricação de componentes mecânicos e com ampla adoção no contexto industrial. 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 do material, com impacto direto na resistência ao desgaste, na dureza e na integridade superficial da peça revestida. Foram testados diferentes métodos de aspersão térmica — Chama Spray com arame tubular e com pó metálico, HVOF e arco com arame — e avaliados seus efeitos por meio de ensaios de dureza, resistência ao desgaste e análise metalográfica detalhada das camadas depositadas. Cada técnica mostrou capacidade de induzir microestruturas e propriedades mecânicas distintas, apesar de a matéria-prima ser comum entre os métodos, 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. Para uma caracterização aprofundada, foi aplicada uma análise quantitativa em software (IMAGEJ), com o intuito de mensurar a presença de poros e óxidos, elementos críticos para a resistência e durabilidade dos revestimentos, possibilitando uma correlação detalhada entre as variáveis do processo de aspersão e as propriedades microestruturais e mecânicas dos revestimentos obtidos. Após a realização das análises, verificou-se a melhor qualidade do revestimento obtido através do processo de HVOF. Constatando-se menor incidência de óxidos e poros. Resultado que converge com o esperado de acordo com o referencial técnico.

Palavras-chave: Aspersão Térmica, Arco Arame, Chama-Spray, HVOF, Aço Inoxidável SAE 420, Porosidade, Análise de Óxidos.

ABSTRAC

This study performs a detailed analysis of the results obtained in the thermal spray process of SAE 420 stainless steel coatings, applied to SAE 1020 steel substrates, which are widely used in the production of critical components with broad adoption in industrial contexts. The objective of the thermal spray process is to create a layer with properties distinct from those of the base metal, enhancing the mechanical, chemical, and physical characteristics of the material, directly impacting wear resistance, hardness, and surface integrity of the treated part. Different thermal spray methods were tested — Flame Spray with tubular wire and metallic powder, HVOF, and wire arc — and their effects were evaluated through hardness, wear resistance tests, and detailed metallographic analysis of the deposited layers. Each technique demonstrated the ability to induce distinct microstructures and mechanical properties, despite the same raw material being used across methods, suggesting that the type of process has a decisive influence on the formation of layers with specific characteristics of porosity, oxide presence, and structural homogeneity variations. For a more in-depth characterization, quantitative analysis was performed using software (IMAGEJ) to measure the presence of pores and oxides, critical elements for the coatings' resistance and durability, enabling a detailed correlation between the thermal spray process variables and the resulting microstructural and mechanical properties of the coatings.

Keywords: Thermal Spray, Wire Arc, Flame Spray, HVOF, SAE 420 Stainless Steel, Porosity, Oxide Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica (Fonte: PAREDES, 2012)	13
Figura 2 Classificação dos processos de aspersão térmica. (Fonte: PAREDES, 2012)	14
Figura 3 - Esquema de pistola de aspersão térmica HVOF (Fonte: adaptado de Osaka Fuji Corporation, 2015)	15
Figura 4 - Características do Revestimento de Aspersão Térmica (Fonte: LUDWIG, 2020)	16
Figura 5 - Amostras utilizadas neste trabalho (Fonte: Autor, 2024).....	20
Figura 6 - Máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo Roda de Borracha - FATEC Sertãozinho (Fonte: Autor, 2024).....	22
Figura 7 - Dureza e Perda de Massa das amostras (Fonte: FARAH, 2023).	25
Figura 8 - Microscopia 200x - Amostra PFS-420-21 (Fonte: Autor, 2024).....	26
Figura 9 - Poros e Óxidos da Amostra PFS - 420-21 (Fonte: Autor, 2024)	26
Figura 10 - Poros da Amostra PFS-420-21 (Fonte: Autor, 2024).....	26
Figura 11 - Microscopia 200x - Amostra HVOF-420-4 (Fonte: Autor, 2024)	27
Figura 12 - Poros e Óxidos da Amostra HVOF-420-4(Fonte: Autor, 2024).....	27
Figura 13 - Poros da Amostra HVOF-420-4(Fonte: Autor, 2024)	27
Figura 14 - Microscopia 200x - Amostra WAS-420-StT (Fonte: Autor, 2024).....	28
Figura 15 - Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-StT (Fonte: Autor, 2024)	28
Figura 16 - Poros da Amostra WAS-420-StT (Fonte: Autor, 2024).....	28
Figura 17 - Microscopia 200x - Amostra WAS-420-St (Fonte: Autor, 2024).....	29
Figura 18 - Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-St (Fonte: Autor, 2024)	29
Figura 19 - Poros da Amostra WAS-420-St (Fonte: Autor, 2024).....	29
Figura 20 - Microscopia 200x - Amostra WAS-420-Rd (Fonte: Autor, 2024)	30

Figura 21 - Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-Rd (Fonte: Autor, 2024)	30
Figura 22 - Poros da Amostra WAS-420-Rd (Fonte: Autor, 2024)	30
Figura 23 - Microscopia 200x - Amostra WFS-420-St (Fonte: Autor, 2024)	31
Figura 24 - Poros e Óxidos da Amostra WFS-420-St (Fonte: Autor, 2024)	31
Figura 25 - Poros da Amostra WFS-420-St (Fonte: Autor, 2024)	31
Figura 26 - Microscopia 200x - Amostra WFS-420-Rd (Fonte: Autor, 2024)	32
Figura 27 - Poros e Óxidos da Amostra WFS-420-Rd (Fonte: Autor, 2024)	32
Figura 28 - Poros da Amostra WFS-420-Rd (Fonte: Autor, 2024)	32
Figura 29 - Gráfico comparativos das amostras, método de aspersão térmica, presença de óxidos e poros (Fonte: Autor, 2024)	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química do aço SAE 1095	18
Tabela 2	Propriedades do aço SAE 1020	18
Tabela 3	Composição química nominal dos materiais	19
Tabela 4	Propriedades Mecânicas Típicas do Metal de Adição E-420	19
Tabela 5	Materiais, Processos e Parâmetros utilizados	21
Tabela 6	Dureza Superficial (HRC) das ligas depositadas	26
Tabela 7	Perda de Massa das ligas depositadas	26
Tabela 8	Porosidade e Óxidos	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Processos de Aspersão Térmica.....	13
2.2	Aspersão Térmica por Chama Convencional.....	14
2.3	Aspersão Térmica HVOF.....	14
2.4	Aspersão Térmica a Arco Elétrico.....	15
2.5	Revestimentos obtidos por Aspersão Térmica.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1	Materiais utilizados.....	18
3.1.1	Metal de Base.....	18
3.1.2	Revestimento - Almofadamento.....	18
3.2	Preparação das Amostras.....	19
3.3	Processos de Aspersão.....	20
3.4	Ensaio de Dureza Rockwell.....	22
3.5	Ensaio de Desgaste.....	22
3.6	Microscopia.....	23
3.7	Análise Quantitativa via Software ImageJ.....	23
4	RESULTADOS	26
4.1	Dureza.....	26

4.2	Perda de Massa (Ensaio de Desgaste)	26
4.3	Relação entre Dureza e Perda de Massa das Ligas.....	27
4.4	Presença de Porosidade e Óxidos.....	27
5	CONCLUSÃO.....	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

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 abordam-se 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

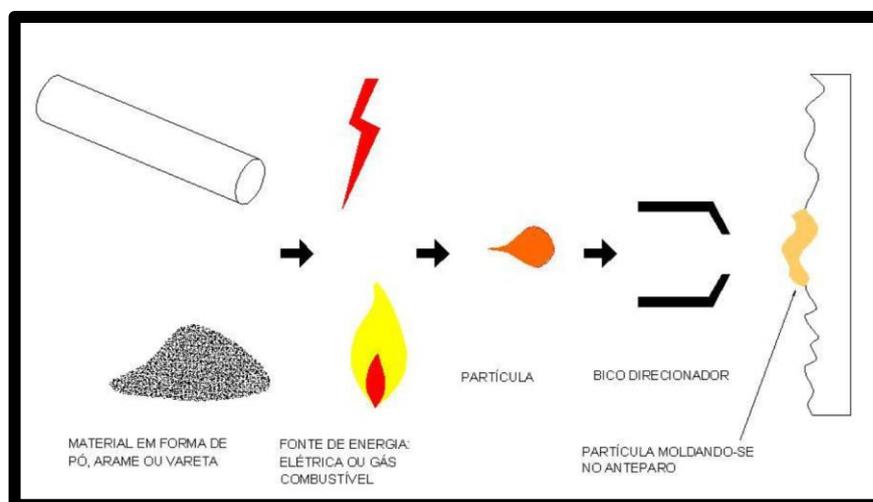
de investimentos em capital fixo. Diante do exposto, foi estudado as características de revestimentos de aço SAE 420, aplicado sobre um aço SAE 1020. Diferentes processos de aspersão e variação deles foram utilizados na realização deste estudo. As amostras foram revestidas com o SAE 420 na forma de pó 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

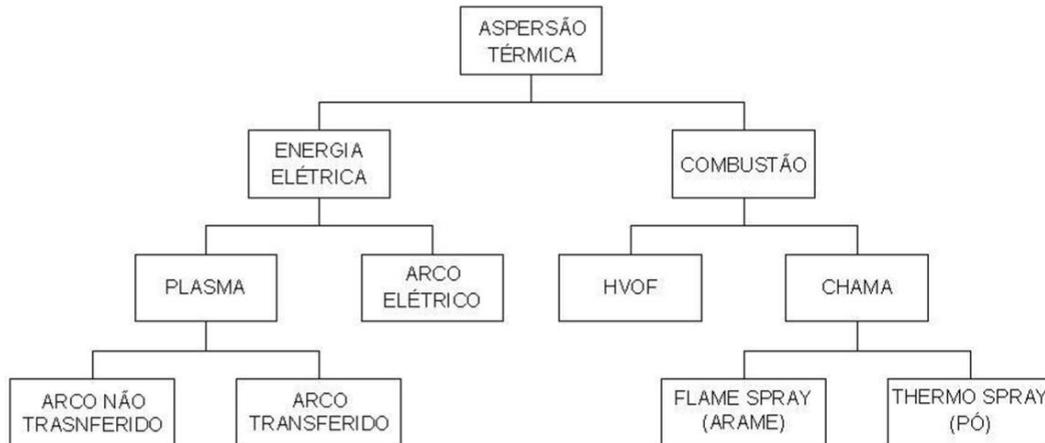


Fonte: PAREDES (2012)

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

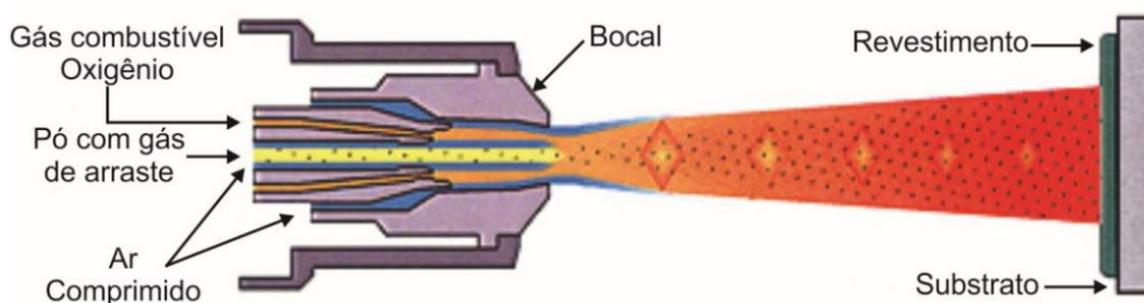
O processo de Aspersão por Chama Convencional (no Inglês, *Flame Spray*), também chamado de processo a chama oxiacetilênica, tem como base a energética a energia oriunda da combustão de um gás combustível misturado com oxigênio. Tal energia será utilizada para fundir o material que será depositado no 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

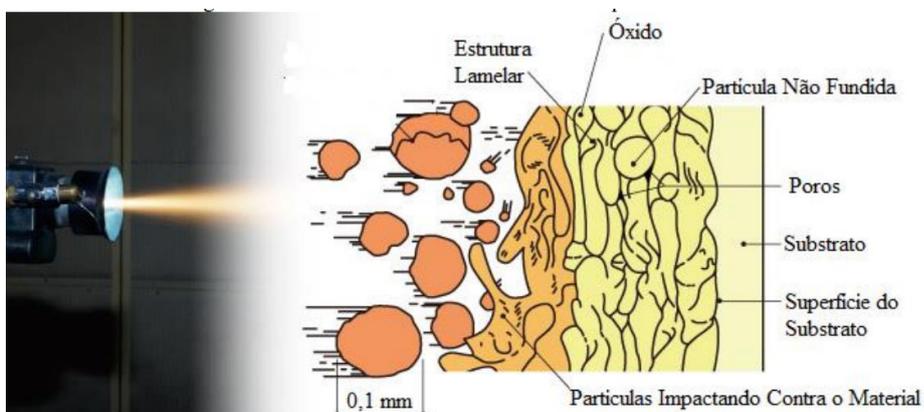
A aspersão térmica a arco elétrico (do inglês, *Arc Spray Process*) é também conhecida como arco arame. Utilizam-se dois eletrodos consumíveis de arame, que estão separados um do outro, ambos avançam até o bico da pistola para se encontrarem em um ponto onde é formada uma nuvem de gás atomizante. Uma 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
0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,03	0,050

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 - 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.

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: Autor, 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/S345	Arc340/S 350	Arc340/S350
Pré aquecimento (°C)	40	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Almofadamento	Solocoat (NiAlMo)	Não	GSNi20Al	GSNi20Al	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 (µm)	-106+45	-45+15	-	-	-	-	-
Diâmetro (mm)	-	-	3,2	3,2	1,6	1,6	1,6
Jateamento	Granalh a 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: Autor (2024)

3.6 Microscopia

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	11,8 ±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

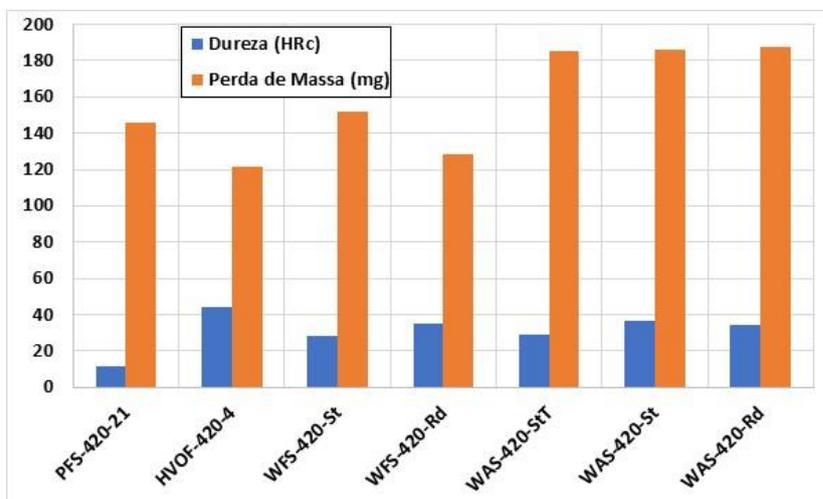
Material	Perda de Massa (mg)
PFS-420-21	146,2±11,3
HVOF-420-4	121,8±2,3
WFS-420-St	151,7±23,9
WFS-420-Rd	128,1±3,6
WAS-420-StT	185,0±8,5
WAS-420-St	185,8±11,4
WAS-420-Rd	187,2±10,7

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 4 - Dureza e Perda de Massa das amostras



Fonte: FARAH (2023)

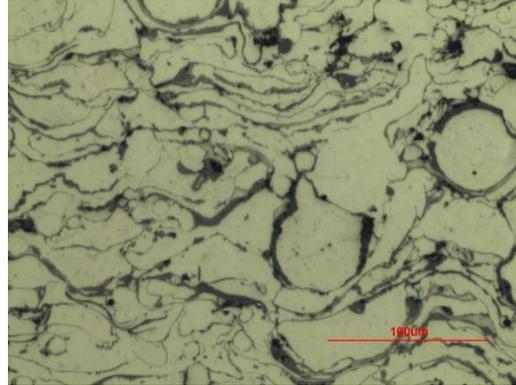
4.4 Presença de Porosidade e Óxidos

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.
- Na Figura 9, consta 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.

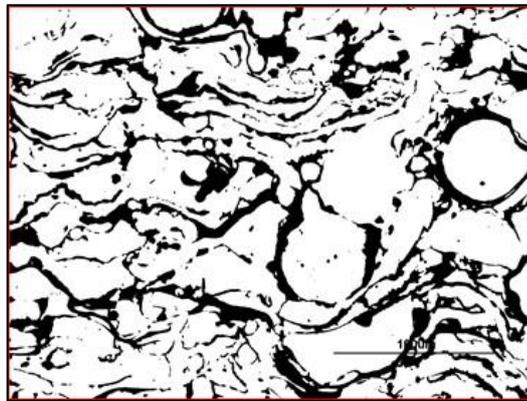
A Figura 8 mostra a fotomicrografia da amostra PFS-420-21. As Figuras 9 e 10 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

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



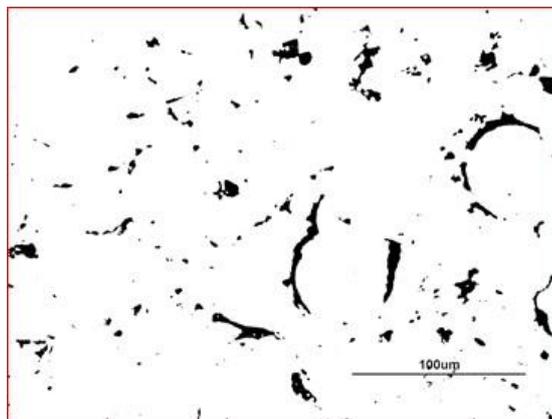
Fonte: Autor (2024)

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



Fonte: Autor (2024)

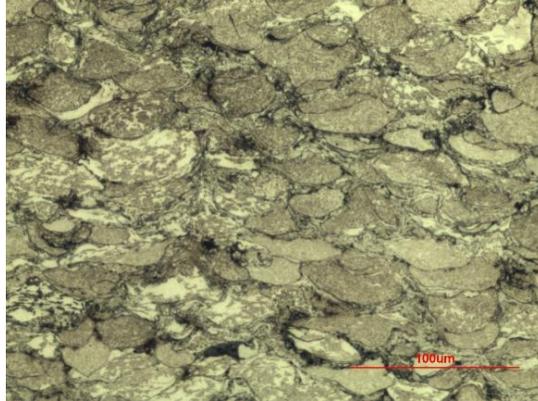
Figura 10 - Poros da Amostra PFS-420-21



Fonte: Autor (2024)

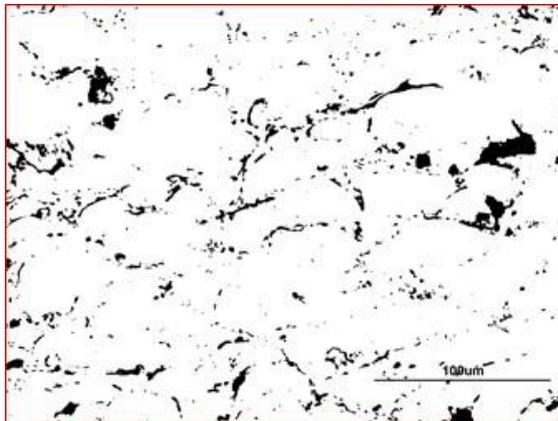
Utilizando o raciocínio descrito acima, as análises e cálculos foram realizados para todas as amostras. A Figura 11 mostra a micrografia da amostra HVOF-420-4. As Figuras 12 e 13 mostram o procedimento de contagem das fases presentes.

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



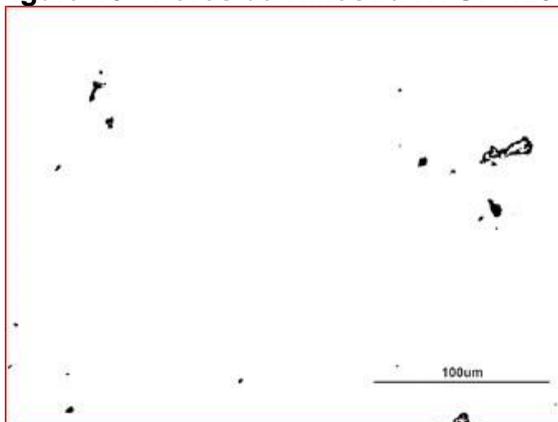
Fonte: Autor (2024)

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



Fonte: Autor (2024)

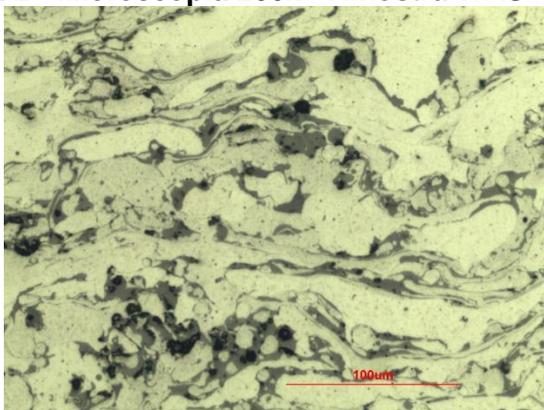
Figura 13 - Poros da Amostra HVOF-420-4



Fonte: Autor (2024)

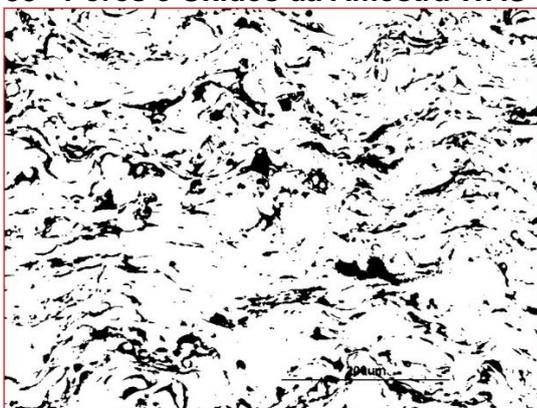
A Figura 14 mostra a fotomicrografia da amostra WAS-420-StT. As Figuras 15 e 16 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

Figura 2 - Microscopia 200x - Amostra WAS-420-StT



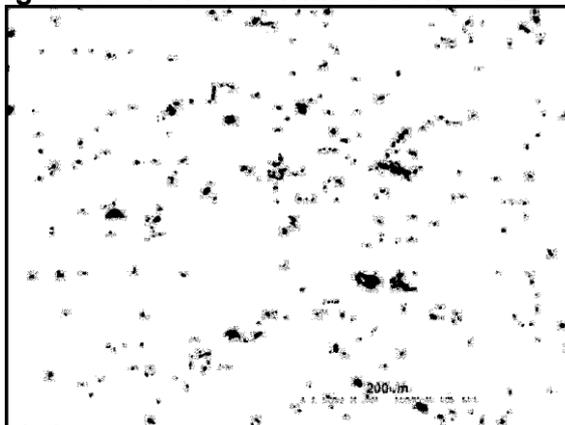
Fonte: Autor (2024)

Figura 35 - Poros e Óxidos da Amostra WAS-420-StT



Fonte: Autor (2024)

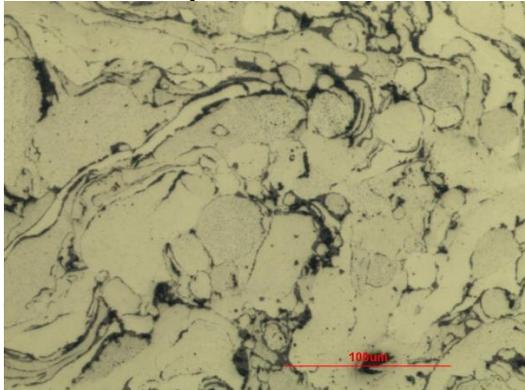
Figura 16 - Poros da Amostra WAS-420-StT



Fonte: Autor (2024)

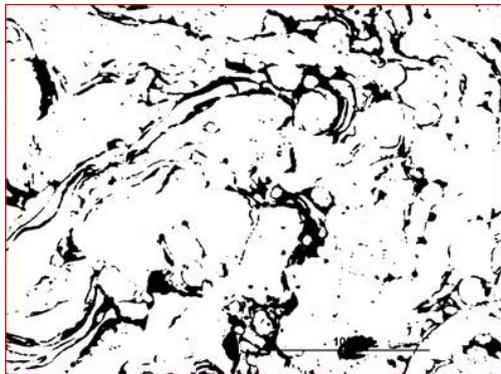
A Figura 17 mostra a fotomicrografia da amostra WAS-420-St. As Figuras 18 e 19 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

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



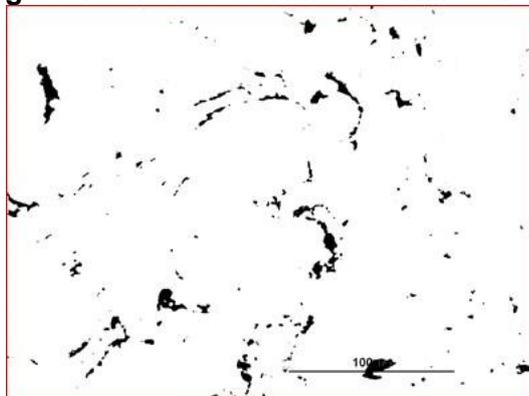
Fonte: Autor (2024)

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



Fonte: Autor (2024)

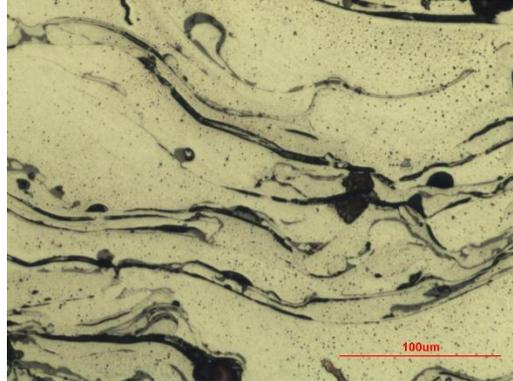
Figura 19 - Poros da Amostra WAS-420-St



Fonte: Autor (2024)

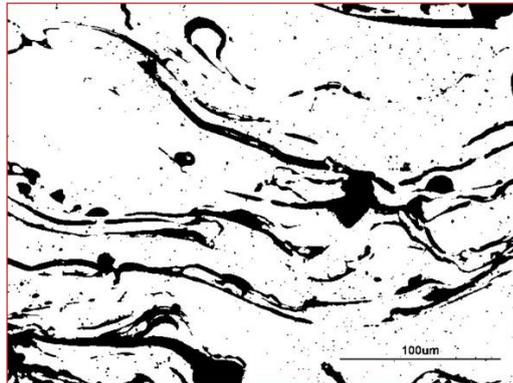
A Figura 20 mostra a fotomicrografia da amostra WAS-420-Rd. As Figuras 21 e 22 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

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



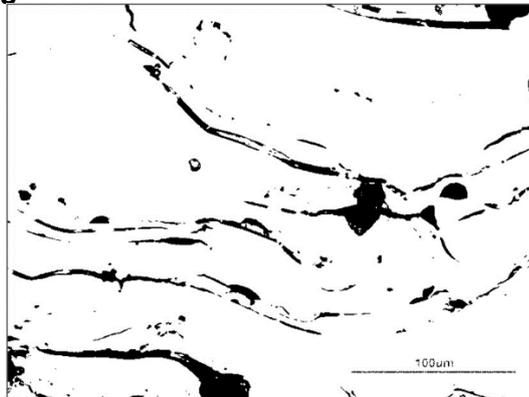
Fonte: Autor (2024)

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



Fonte: Autor (2024)

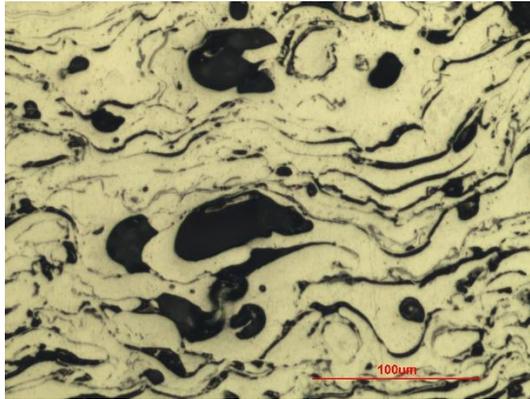
Figura 22 - Poros da Amostra WAS-420-Rd



Fonte: Autor (2024)

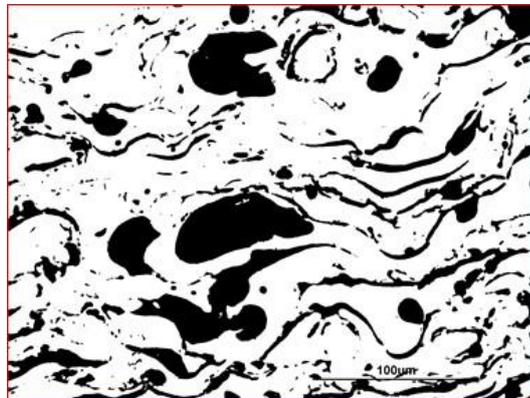
A Figura 23 mostra a fotomicrografia da amostra WFS-420-St. As Figuras 24 e 25 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

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



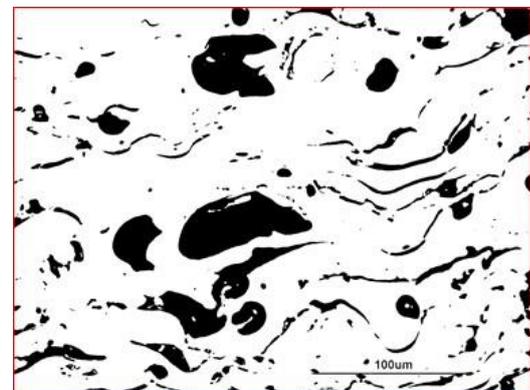
Fonte: Autor (2024)

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



Fonte: Autor (2024)

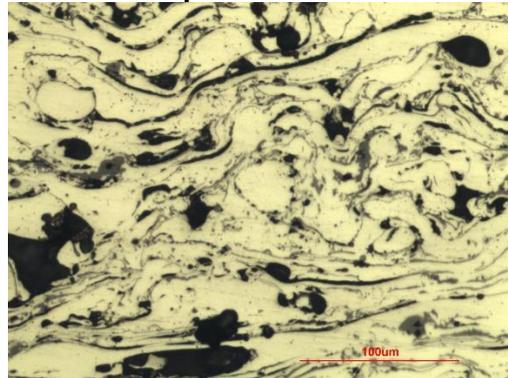
Figura 25 - Poros da Amostra WFS-420-St



Fonte: Autor (2024)

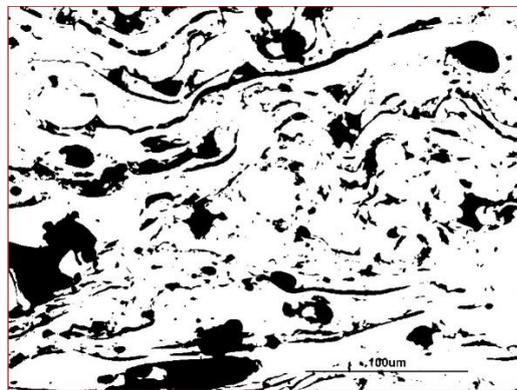
A Figura 26 mostra a fotomicrografia da amostra WFS-420-Rd. As Figuras 27 e 28 mostram a aplicação do procedimento de contagem das fases presentes.

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



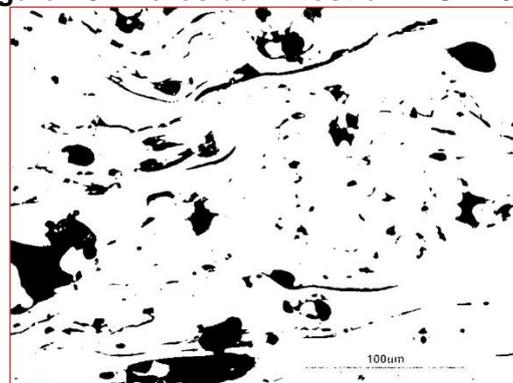
Fonte: Autor (2024)

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



Fonte: Autor (2024)

Figura 28 - Poros da Amostra WFS-420-Rd



Fonte: Autor (2024)

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

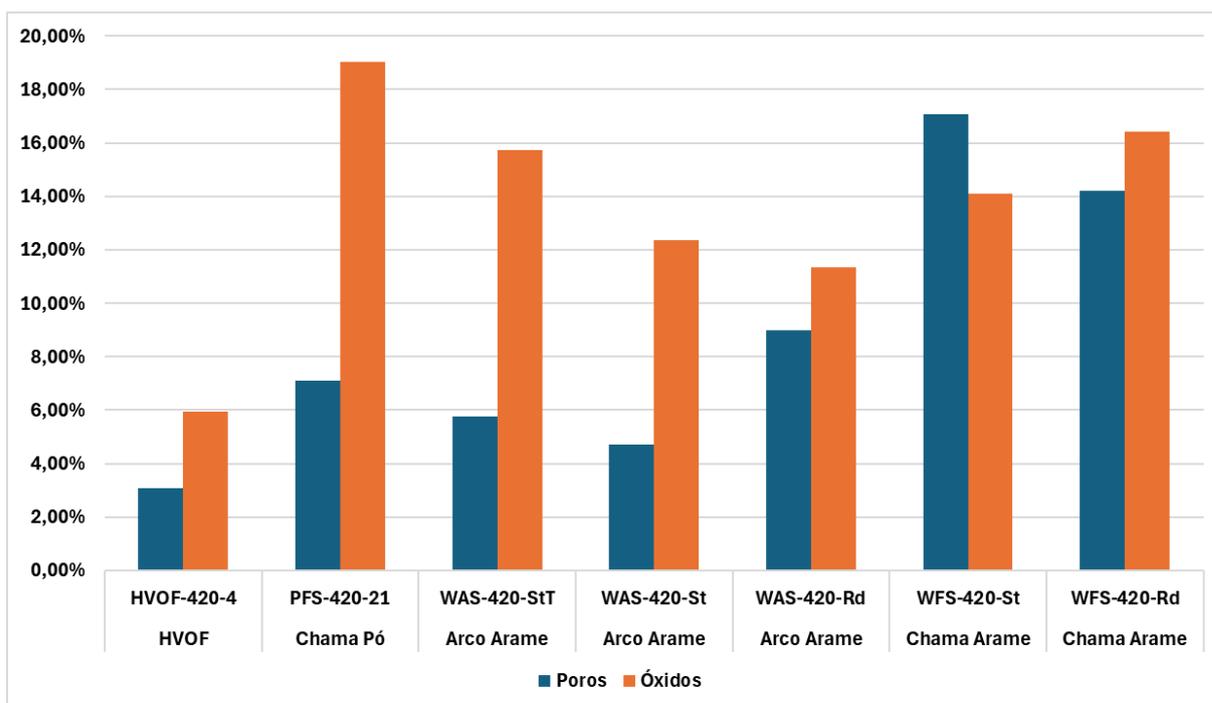
Tabela 8 – Porosidade e Óxidos - ligas depositadas

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: Autor (2024)

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

Figura 5 - Gráfico comparativos das amostras, método de aspersione térmica, presença de óxidos e poros



Fonte: Autor (2024)

5 CONCLUSÃO

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 tem como objetivo contribuir para o avanço das discussões sobre porosidade e a formação de óxidos em processos de aspersão térmica, apresentando uma abordagem que se destaca pela sua originalidade em relação às práticas descritas na literatura disponível. 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.