
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 PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL SAE 420 NOS
PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA ARAME, CHAMA PÓ E HVOF**

ELIÉZER NASCIMENTO DOS SANTOS

MARCELO SILVIO BASSI

PROF. ORIENTADOR: PROF. DR. ALESSANDRO FRAGA FARAH

**SERTÃOZINHO, SP
2024**

ELIÉZER NASCIMENTO DOS SANTOS

MARCELO SILVIO BASSI

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL SAE 420 NOS
PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA ARAME, CHAMA PÓ E HVOF**

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

ELIÉZER NASCIMENTO DOS SANTOS e MARCELO SILVIO BASSI

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL SAE 420 NOS
PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA ARAME, CHAMA PÓ E HVOF**

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

Inicialmente, gostaríamos de agradecer a todos nossos familiares que nos apoiaram ao longo de nossos estudos, sem esse apoio e auxílio esse trabalho não poderia ser realizado. Ademais, também gostaríamos de agradecer a todo o corpo docente que esteve conosco durante todos os anos de estudo, que com grande empenho e comprometimento em seu trabalho foi capaz de nos auxiliar na elaboração deste trabalho, Por fim agradecemos a Deus por nos ter dado disposição e convicção para cumprir nossos objetivos profissionais e pessoais.

RESUMO

A indústria metalúrgica vem evoluindo seus produtos constantemente, visando sempre atender as necessidades que o mercado apresenta, buscando melhorar o desempenho de seus produtos. Visando contribuir para esse avanço o trabalho em questão consistiu em analisar os dados obtidos após o processo de aspensão térmica, de um revestimento de aço inoxidável SAE 420, depositado sobre uma superfície previamente preparada, de aço SAE 1020, comumente utilizado em processos da indústria metalúrgica. O intuito do processo de aspensão térmica é criar uma camada de metal com características diferentes do metal base, visando melhorar o desempenho do equipamento ou peça em questão, mudando algumas propriedades mecânicas, químicas e físicas que estão presentes no seu funcionamento. A técnica de aplicação de aspensão térmica foi realizada por diferentes processos. Foi utilizado o processo de Chama Spray com arame tubular e com pó metálico, e o processo HVOF. Apesar da matéria prima ser a mesma, o processo de Aspensão térmica tem grande impacto nos resultados obtidos. Após a aplicação dos processos, as amostras foram devidamente cortadas e preparadas para as próximas etapas de estudos. Foram feitos os ensaios de dureza, microdureza, desgaste e metalografia. Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos foram analisados, com a finalidade de comparar as características microestruturais obtidas dos diferentes processos, com suas propriedades mecânicas. Foi observado que variações nos processos de Chama Spray davam diferentes resultados e o processo HVOF teve a melhor desempenho.

Palavras-chave: Aspensão Térmica, Chama-Spray, HVOF, Aço Inoxidável SAE 420

ABSTRAC

The metallurgical industry has been constantly evolving its products, always aiming to meet the needs that the market presents, seeking to improve the performance of its products. Aiming to contribute to this advancement, the work in question consisted of analyzing the data obtained after the thermal spraying process, of a SAE 420 stainless steel coating, deposited on a previously prepared surface, of SAE 1020 steel, commonly used in processes in the metallurgical industry. The purpose of the thermal spraying process is to create a layer of metal with different characteristics from the base metal, aiming to improve the performance of the equipment or part in question, changing some mechanical, chemical and physical properties that are present in its operation. The thermal spray application technique was carried out by different processes. The Flame Spray process with tubular wire and metallic powder and the HVOF process were used. Although the raw material is the same, the thermal spray process has a great impact on the results obtained. After applying the processes, the samples were properly cut and prepared for the next stages of studies. Hardness, microhardness, wear and metallography tests were carried out. After carrying out the tests, the results obtained were analyzed, with the purpose of comparing the microstructural characteristics obtained from the different processes, with their mechanical properties. It was observed that variations in the Flame Spray processes gave different results and the HVOF process had the best performance.

Keywords: Thermal Spray, Flame-Spray, HVOF, SAE 420 Stainless Steel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Aspersão Térmica em Estrutura Metálica Civil	17
Figura 2	Microestrutura típica de Aspersão Térmica	17
Figura 3	Aspersão Térmica em peça	18
Figura 4	Modelo de Pistola Chama Spray Arame	19
Figura 5	Composição Nominal do Aço AISI/SAE 420	19
Figura 6	Modelo de Pistola Chama Spray Pó	21
Figura 7	Pistola de Aspersão Térmica HVOF	22
Figura 8	Modelo de Pistola de Aspersão HVOF	23

LISTA DE FOTOS

Foto 1	Corpos de prova após preparo	25
Foto 2	Durômetro Analógico Dureza Rockwell	27
Foto 3	Balança de Precisão	28
Foto 4	Máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo por Borracha	29
Foto 5	Máquina de Ensaio de Micro Dureza Vickers	30
Foto 6	Microestrutura PFS-420-21	37
Foto 7	Microestrutura HVOF-420-4	37
Foto 8	Microestrutura WFS-420-St	38
Foto 9	Microestrutura WFS-420-Rd	38
Foto 10	“Almofada” na amostra PFS-420-21	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Durezas Vickers e seus Desvios Padrão	34
Gráfico 2	Durezas Rockwell C e seus Desvios Padrão	35
Gráfico 3	Dureza x Perda de Massa	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química em peso (%) aço SAE 1095	24
Tabela 2	Propriedades do aço SAE 1020	24
Tabela 3	Composição química nominal dos materiais	24
Tabela 4	Propriedades Mecânicas Típicas do Metal de Adição E-420	25
Tabela 5	Materiais, Processos e Parâmetros utilizados	26
Tabela 6	Durezas Vickers e Rockwell da Amostra WFS-420-ST	30
Tabela 7	Durezas Rockwell C da Amostra WFS-420-ST	30
Tabela 8	Durezas Vickers e Rockwell Amostra WFS-420-Rd	31
Tabela 9	Durezas Rockwell C Amostra WFS-420-Rd	31
Tabela 10	Durezas Vickers e Rockwell da Amostra PFS-420-21	32
Tabela 11	Durezas Rockwell C Amostra PFS-420-21	32
Tabela 12	Durezas Vickers e Rockwell amostra HVO-420-4	33
Tabela 13	Durezas Rockwell C Amostra HVOF-420-4	33
Tabela 14	Durezas Vickers	34
Tabela 15	Durezas Rockwell C	35
Tabela 14	Perdas de massa por ensaio de desgaste	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	Society of Automotive Engineers	01
HVOF	High Velocity Oxy Fuel	01
GSN	Gas Spray	24
GPS	Gas Powder Spray	24
ASTM	American Society for Testing and Materials	25
FPS	Powder Flame Spray	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	História da Aspersão Térmica.....	15
2.2	Aspersão Térmica na Atualidade.....	16
2.3	Processo de Aspersão.....	17
2.4	Processo de Aspersão Chama Arame.....	18
2.5	Processo de Aspersão Chama Pó.....	20
2.6	Processo de Aspersão HVOF.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais utilizados.....	23
3.1.1	Metal de Base.....	23
3.1.2	Metal de Adição.....	24
3.2	Preparo das Amostras.....	25
3.3	Processo de Aspersão.....	26
3.4	Ensaio de Dureza Rockwell.....	27
3.5	Ensaio de Desgaste.....	27
3.6	Microscopia.....	29
3.7	Ensaio de Micro dureza.....	29
4	RESULTADOS OBTIDOS	30
4.1	Tabelas de Durezas.....	30
4.1.1	Durezas Chama Arame Regulagem Padrão.....	30

4.1.2	Durezas Chama Arame Regulagem Padrão.....	31
4.1.3	Durezas Chama Pó – Processo comum.....	32
4.1.4	Durezas Chama Pó – Método HVOF.....	33
4.1.5	Tabela Durezas Vickers.....	34
4.1.6	Gráfico das médias e desvios padrões Vickers.....	34
4.1.7	Tabela Durezas Rockwell C.....	34
4.1.8	Gráfico de médias e desvios padrões Rockwell C	35
4.2	Resultados dos Ensaios de Desgastes.....	36
4.2.1	Resultados Gráfico Dureza Rockwell C e Perda de Massa.....	36
4.3	Ensaios Metalográficos.....	37
4.3.1	Metalografia amostra PFS-420-21.....	37
4.3.2	Metalografia amostra HVOF-420-4.....	37
4.3.3	Metalografia amostra WFS-420-St.....	38
4.3.4	Metalografia amostra WFS-420-Rd.....	38
4.3.5	“Almofada” na amostra PFS-420-21.....	39
5	CONCLUSÃO.....	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica vem buscando sempre aperfeiçoar seus produtos, a fim de oferecer a seus clientes produtos de qualidade e confiabilidade elevada. Sua busca tem o intuito de destacar-se perante os demais concorrentes, a fim de alavancar suas posições no Mercado. Conseqüentemente ao buscar mais qualidade cria-se e refina novos processos para seus equipamentos, em que um novo processo é examinado e estudado a fim de levá-lo ao seu máximo rendimento. Essa busca para novos processos e melhoria dos já existentes tem grande impacto nas empresas e também na vida acadêmica, pois se torna sempre necessário a realização de novas pesquisas a fim de examinar os já existentes ou até mesmo desenvolver novos. Com o avanço das pesquisas temos cada vez mais conhecimento de base que fornece descobertas para tecnologias inovadoras que proporcionam mudanças significativas na sociedade. Os processos de recuperação, mais notoriamente o de Aspersão Térmica, estão se tornando cada vez mais relevante no atual mercado, pois com o avanço de novas tecnologias, esses processos tem se tornado mais em conta para o fabricante, assim sendo, seu produto pode manter a qualidade sem que haja perda em seu desempenho, esse aspecto é fundamental para a evolução da sociedade, pois produzindo mais com menos recursos enquanto se mantém a qualidade torna as empresas mais competitivas no mercado de trabalho, gerando novas oportunidades de trabalho. A necessidade de realizar manutenção nos equipamentos de trabalhos, seja qual for o setor em questão, é sempre necessário, pois programa-se paradas para averiguar se as máquinas e outros equipamentos estão desempenhando conforme planejado, e quando se constata que a uma falha no maquinário, precisa encontrar formas de recuperá-lo, pois a aquisição de um novo sempre que há uma falha gera um aumento de custo para a empresa. Assim sendo, processos como a Aspersão Térmica na manutenção ou na fabricação, são de grande importância para o uso cotidiano das empresas. Esse trabalho focou em examinar os processos de aspersão térmica com três características distintas, sendo o processo via arame tubular, o processo chama em pó e por fim o processo HVOF. Foram analisadas as durezas e microdurezas dos revestimentos obtidos em todos os processos, além dos ensaios de desgaste abrasivo por roda de borracha, a fim de determinar a sua resistência à abrasão, e por fim foram feitas as análises metalográficas das amostras, com o intuito de destacar as principais microestruturas obtidas nos processos. Através desses processos foi possível determinar as características predominantes em cada processo de aspersão, e seu melhor desempenho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História da Aspersão Térmica

Há muito que se dizer sobre aspersão térmica, no entanto inicialmente é necessário categorizá-la, ou seja, definir o que seria aspersão térmica. Aspersão térmica consiste em depositar sobre um determinado material outro material para que se consiga propriedades mecânicas que inicialmente não existiam ou simplesmente não eram suficientes.

O processo de revestimento teve início em tempos primórdios, mais especificamente 988 a.C. onde nossos ancestrais utilizavam revestimentos de ouro como forma de decoração, em que coletavam esses revestimentos com técnicas rudimentares, utilizando-se de ferramentas artesanais para manipular o material e revesti-lo em outro, prática que tinha o intuito de melhorar a estética do material, finalidade distinta da que encontramos hoje nas indústrias mais utilizadoras do processo de Aspersão Térmica. Ademais outros processos de Aspersão Térmica também foram realizados durante esse período, mas especificamente o processo de emergir um material sobre um outro em estado líquido e logo após retirá-lo, trazendo assim um revestimento característico do processo de metalização (COUTO, 2007).

Embora as técnicas utilizadas inicialmente fossem pouco efetivas e rudimentares, ainda podemos categorizá-las como um processo de aspersão térmica, pois o resultado sempre foi um material depositado sobre um material base, também chamado de substrato, e suas características de superfícies alteradas, fornecendo assim novas propriedades. Também é possível identificar o processo de aspergir material durante esse período, pois também a dados e evidências que durante esse período tínhamos processos que através do vapor aspergiam metal fundido em outros materiais. Mais especificamente partículas de metal fundido eram projetadas por meio de jatos de vapor em materiais base, a fim de criar uma camada protetora no material em questão (COUTO, 2007).

O engenheiro suíço Max Ulrich Schoop, conhecido como um pioneiro da Aspersão Térmica, inspirado em métodos de aspersão antigos, que utilizavam vapor comprimido para projetar partículas de metal fundido, criou técnicas e equipamentos para replicar o método antigo e aprimorá-lo, sua busca foi motivada pela necessidade de aspergir um material sem imersão ou adesivos. Com o avanço de seu trabalho, foi consolidada a forma de aspersão em pó, que por meio do gás acetilênico era aquecido e então aspergido sobre o material base, caracterizando o Spray da aspersão térmica (COUTO, 2007).

Com o trabalho desenvolvido pelo Dr. Schoop, foi possível o avanço dos meios de reparos a peças usadas que haviam se desgastados, também foi criado um processo que modifica as características superficiais de outro sem alterar sua microestrutura de maneira significativa. A partir daí, novos métodos de Aspersão

Térmica como a técnica que utiliza matéria prima em pó ao invés de utilizar em forma de arame, foram desenvolvidos em grande parte pela equipe do Dr. Schoop que, foram aperfeiçoando os métodos já existentes, através da examinação das variáveis do processo (PAWLOWSKI, 2008).

As grandes guerras, mais especificamente a Segunda Guerra Mundial e a Guerra fria, contribuíram para o desenvolvimento do processo de Aspersão Térmica em que devido à alta necessidade por produtos industrializados e a recuperação dos mesmos, aprimorou-se as técnicas de Aspersão Térmica, a fim de prover as devidas reposições em um cenário cada vez mais demandante de peças de natureza metalurgia. O trabalho desenvolvido por Schoop foi fundamental para os avanços da metalurgia atual, sendo de grande significância para a manutenção de equipamentos que trabalham em desgaste constante (COUTO, 2007).

2.2 Aspersão Térmica na Atualidade.

Atualmente a Aspersão Térmica ou Metalização como é comumente conhecida é utilizada frequentemente na indústria metal mecânica. Empresas do ramo possuem equipamentos que trabalham com movimentos contínuos que geram grande desgaste ao longo do tempo, a fim de remediar a situação sem necessariamente ter que fabricar um novo componente, utiliza-se o processo de metalização, prolongando a sua vida útil.

Esse aspecto da metalização se demonstra muito efetivo, pois ao analisar a questão de custo de fabricação, temos que o processo de aspersão térmica é menor quando comparado com a fabricação de um novo equipamento, tal característica torna o processo de metalização viável em grande escala de produção, sendo cada vez mais presente nos processos industriais de cada dia (FREITAS, 2015).

Apesar de ser tipicamente utilizado como método de prevenir o desgaste, o processo de Aspersão Térmica também é utilizado para combater a corrosão, pois devido à versatilidade do processo, há a possibilidade de depositar vários materiais, essa grande gama de materiais possibilita optar por um que fornece características resistentes a corrosão, assim quando o metal é depositado no material base, acaba protegendo o mesmo, evitando que esse venha a sofrer os efeitos da corrosão e acabar perdendo sua funcionalidade (PAREDES, 2012).

Na indústria petroquímica é comum a utilização do processo de aspersão, pois as tubulações e peças dessas empresas são constantemente afetadas pela corrosão, assim sendo, são feitos revestimentos que atuam como uma barreira entre o agente corrosivo e o metal base, a técnica para aspersão desses materiais pode variar de acordo com a aplicação do mesmo, pois devido às circunstâncias que será empregado o material, pode-se escolher um processo que trará uma maior eficiência para o trabalho em questão, assim sendo é comum haver pesquisas, para determinar se a técnica de aplicação trará o resultado desejado, em que se utiliza do método científico

para averiguar qual o melhor parâmetro da máquina que trará maior qualidade (PAREDES, 2012).

Figura 1 – Aspersão Térmica em Estrutura Metálica Civil



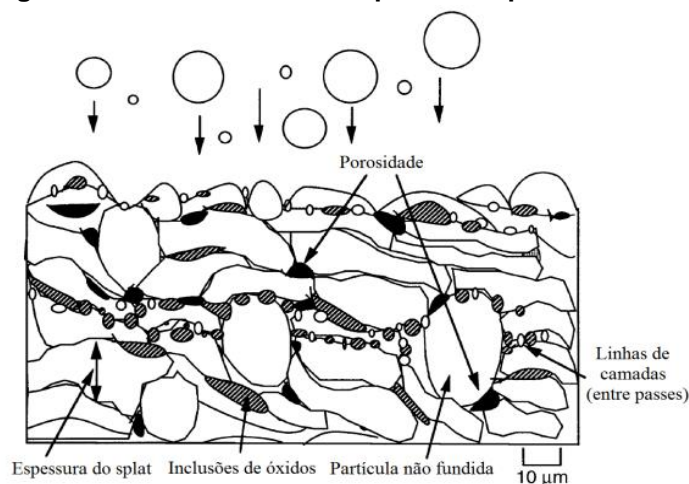
Fonte: Portal TS (2021)

Em suma o processo de metalização mostra-se viável em diversas áreas da indústria, pois seu custo é baixo caso comparado com outros processos, e sua versatilidade de aplicação o torna relevante entre os processos de combate ao desgaste, gerando assim um processo capaz de suprir as necessidades que a indústria metal mecânica apresenta (COUTO, 2007).

2.3 Processo de Aspersão

Há mais de um tipo de processo de Aspersão, entretanto é possível concordar que independentemente do tipo de processo, o conceito aplicado em cada um é o mesmo, ou seja, um metal aquecido que é levado ao estado de fusão ou semifusão, e depois aspergido em um outro material base, previamente preparado, e como consequência cria uma superfície com características diferentes das do material de base (CANARIM, 2013).

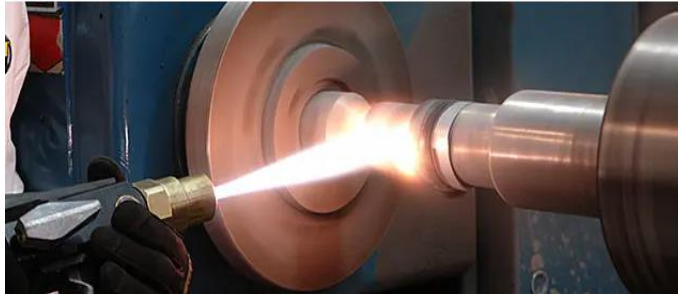
Figura 2 – Microestrutura de típica de Aspersão Térmica



Fonte: CANARIM (2013)

O processo de fusão do material de adição ocorre através de uma fonte de calor, geralmente utilizasse gás de combustão e logo após a fusão do metal de adição, ele é aspergido através de gases comprimidos no metal de base, esse processo é formado por um fluxo constante dessas características, assim é comum termos um spray com as partículas da aspersão (PAREDES, 2012).

Figura 3 – Aspersão Térmica em Peça



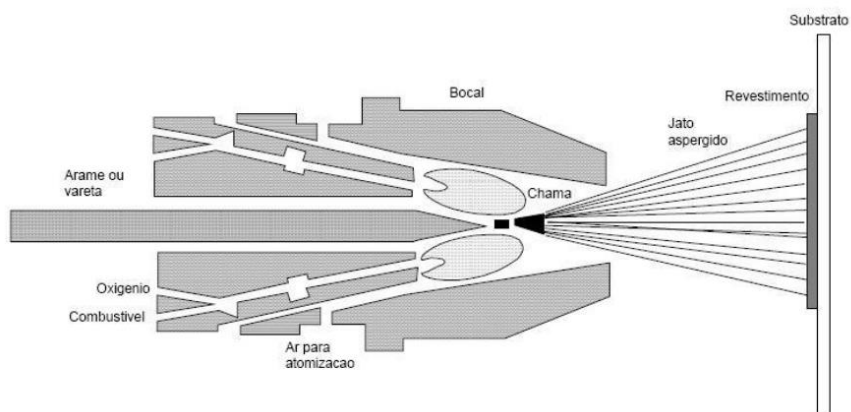
Fonte: Sulcromo – Cromo Duro e Metalização (2021)

Paredes (2012), constatou que a deposição no metal base ocorre com o material de adição em forma de gotículas, essas gotículas quando entram em contato com o material base em alta velocidade acabam se deformando e por seguinte se aderem ao metal de base. Também é importante ressaltar que o processo de aspersão pode ser realizado de mais de uma forma, em que os componentes do processo podem ser alterados de acordo com a necessidade encontrada. Tipicamente o processo de Aspersão é encontrado na Indústria em forma de Chama Spray, podendo ser utilizada com o material em pó ou em forma de arame, tendo os processos resultados finais distintos, pois devido à complexidade do processo, os parâmetros para realizá-lo acabam definindo qual será o resultado final da aspersão (PAREDES, 2012).

2.4 Processo de Aspersão Chama Spray Arame

O processo de Aspersão Chama Spray por arame é amplamente utilizado para fins de combate ao desgaste, sendo de fácil aplicação e de baixo custo está presente em todo o setor metal mecânico. O processo consiste em utilizar o material de adição em forma de arame, que é alimentado constantemente para o bico da pistola de aspersão, essa alimentação do arame é necessária, pois o arame está sendo fundido ininterruptamente através do gás de fusão. Ao ser fundido, ele é aspergido por um gás em alta pressão, tipicamente utilizasse o gás oxigênio e acetileno, que quando comprimidos pelo bico da pistola de aspersão, projetam o metal de deposição no metal de base.

Figura 4 – Modelo de Pistola Chama Spray Arame



Fonte: PAREDES (2012)

O processo de Chama Spray via arame é caracterizado pela alimentação do arame para o bocal, em que essa alimentação é realizada por roletes alimentadores, apesar de haver mecanismos diferentes na atual indústria, é comum encontrar essa configuração de alimentação. Os roletes em questão estão localizados em uma posição antecedente a chama, que possui a finalidade de fundir o arame, para que posteriormente ele seja projetado no material de base. Os mecanismos de tração para alimentação podem variar, no entanto é comum a utilização de um motor elétrico/pneumático ou simplesmente uma turbina de ar (PAREDES, 2012). Com a alimentação constante por parte dos roletes é possível criar uma fusão praticamente constante, isso torna o processo prático e versátil, pois os componentes que compõem a pistola são simples e de baixo custo (FREITAS, 2015).

Os arames utilizados no processo Chama Spray podem ter diferentes composições, pois cada revestimento tem sua finalidade, assim sendo, é comum a escolha de composições de arame que prolongue a vida útil do metal de base. Tipicamente, utiliza-se o arame AISI 420, sendo este capaz de fornecer revestimentos mais densos e sem grandes defeitos (CARVALHO, 2007).

A composição química nominal do arame AISI/SAE 420, está na Figura 2.

Figura 5 – Composição Nominal do Aço AISI/SAE 420

Fe	Cr	Mn	Mo	Si	V	P	S	Ni	Cu	Al	Ca	Mg
86,3	12,1	0,27	0,09	0,44	0,06	0,04	0,05	0,18	0,03	0,19	0,03	0,04

Fonte: Carvalho (2007)

Quando se analisa os gases envolvendo o processo de Chama Spray se faz necessária trazer uma distinção entre eles, pois o processo pode utilizar um gás específico para determinada finalidade, ou seja, podemos ter um gás cujo objetivo é proporcionar uma fonte de calor, e assim fundir o metal de adição, e outro gás de projeção, cuja finalidade é projetar o metal fundido ou semifundido no material de

base. Ademais, os parâmetros do processo impactam diretamente no resultado obtido, pois a fusão obtida no processo está atrelada a fatores como velocidade de alimentação do arame, composição do arame, gás utilizado para a combustão, e formato da pistola de aplicação, assim sendo é comum encontramos parâmetros diferentes para uma aspersão em metais e uma aspersão em cerâmicas. Em seguinte nota-se que questões como diâmetro do arame também devem ser consideradas durante a elaboração do projeto, pois tendo um diâmetro maior o arame necessitaria de roletes e gases de combustão/projeção capazes de lidar com sua dimensão maior (PAWLOWSKI, 2008).

Em relação aos principais parâmetros sobre o processo Chama Spray com arame, Paredes (2012, p.10,11) complementa:

As principais variáveis que devem ser regulados no processo FS são:

Pressão e fluxo de ar comprimido que serve para transferir as partículas da fonte de calor até o substrato e para fornecer à turbina a pressão suficiente para alimentar com arame o bico da pistola

Fluxo de gás combustível e oxigênio para formar e manter uma chama (neutra) que permite a fusão do material.

2.5 Processo de Aspersão Chama Spray Pó

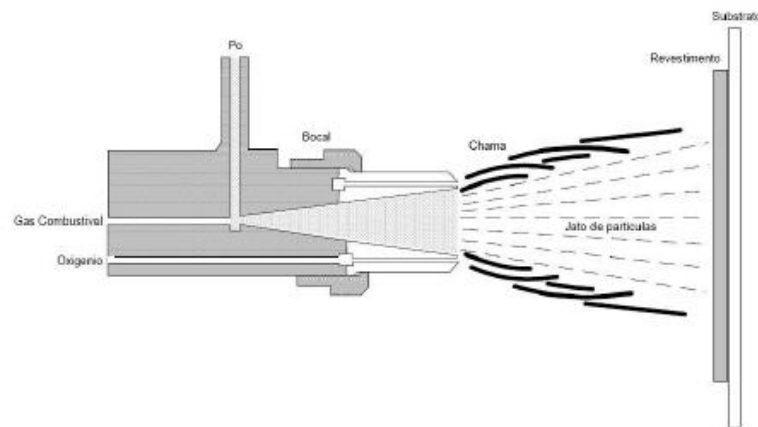
O processo de Aspersão Chama Spray com o material de revestimento em forma de pó é similar ao processo de Chama Spray utilizando arame, no entanto as diferenças que o processo a pó apresenta são significativas. Inicialmente é necessário definir que a qualidade do processo utilizando o pó é diferente, pois esses revestimentos tendem a conter uma quantidade de poros maior que os outros processos, essa característica ocorre, pois as velocidades das partículas fundidas são menores, essa característica é causada por dois componentes, sendo o primeiro a forma de alimentação, devido a o compartimento de o pó ficar geralmente em cima da pistola de aspersão, sua alimentação ocorre por gravidade, assim, é comum termos uma quantidade menor de partículas. Ademais, a segunda razão pela qual o processo de aspersão apresenta maiores porosidades é a forma do material de adição, como este está em forma de pó, a quantidade de partículas fundidas é menor, quando comparado com o mesmo processo por arame (PAREDES, 2012).

Em seguinte, nota-se que a forma de alimentação do gás de chama/projeção e do metal de adição são distintas, em que, os gases são projetados no sentido axial, já o metal de base é levado até a chama por gravidade estando esse em sentido radial, essas características acabam contribuindo para uma quantidade de partículas fundidas menores (PAWLOWSKI, 2008).

Apesar de haver configurações de pistolas diferentes no mercado, é comum encontramos essa configuração de adição de matéria prima por gravidade, pois seu custo/benefício é interessante para a maioria das empresas. Os outros aspectos da

pistola de aspersão são os mesmos que o do processo via arame, em que, um gás é utilizado para a fusão das partículas e logo após, tais partículas são projetadas em um material de base, através de um gás de projeção (PAREDES, 2012).

Figura 6 – Modelo de Pistola Chama Spray Pó



Fonte: PAREDES (2012)

É importante notar que o processo é de grande utilidade, no entanto é preciso ser levado em consideração qual a finalidade da peça que recebera o processo, assim sendo, é comum termos aplicações de menor demanda que recebem essa forma de aspersão, tipicamente é possível encontrar processo por pó que utilizam certos parâmetros e gases que tornam o processo viável. Exemplarmente os materiais autofluxantes são os mais utilizados, devido a sua reação com o oxigênio acabam formando óxidos de baixa densidade, por conta disso possuem características que tornam seu revestimento mais duro. Ademais também são utilizados, pois sua aderência é maior caso comparado com outros metais de deposição, assim, tornou-se comum a utilização dessa gama de material a fim de adquirir produtos com maiores durabilidades (FREITAS, 2015).

Em relação ao processo Chama Spray com materiais Autofluxantes Freitas (2015, p.20) complementa:

Os materiais autofluxantes são materiais que contêm elementos que reagem com o oxigênio ou óxidos para formar óxidos de baixa densidade que flutuam para a superfície. São assim nomeadas devido a formação de compostos duros formados pela presença de boro, fósforo e silício presentes nessas ligas, melhorando a aderência das camadas do revestimento. Em geral são ligas à base de níquel ou cobalto, as quais têm adições de boro, fósforo ou silício, individualmente ou combinados, servindo como agentes fluxantes e redutores do ponto de fusão.

2.6 Processo de Aspersão Chama Spray HVOF

O processo HVOF (High Velocity Oxy Fuel) também é de ampla utilização na indústria metal mecânica, tendo um funcionamento similar a outros processos de

aspersão térmica, o consenso acadêmico é de que o processo foi desenvolvido no começo dos anos oitenta, tendo como pioneiro James Browning, que desenvolveu o processo com a intenção de criar uma chama de alta velocidade, capaz de melhorar os processos já existentes (FREITAS, 2015). A principal característica do processo HVOF é sua chama de alta velocidade e também alta pressão, esse aspecto é alcançado devido a alguns fatores, sendo o primeiro a câmara de combustão, essa secção da pistola é designada para o gás da chama e também para o oxigênio, juntos eles sofrem uma reação de liberação de energia térmica, em que essa reação é alcançada através de um dispositivo de ignição, que gera uma faísca que causa essa reação em cadeia.

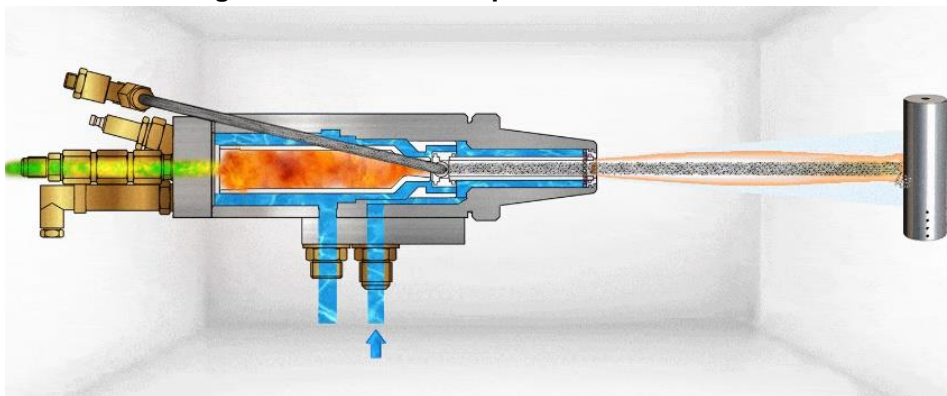
Em seguinte, também é necessário comentar sobre os gases que atuam no processo HVOF, sendo estes um gás de combustão e o outro o oxigênio, que quando entram em combustão possuem grande liberação de energia térmica, que acaba resultando futuramente em energia cinética, pois devido ao design da pistola toda essa energia térmica é projetada através de uma secção reta até a saída, assim, temos uma chama de alta velocidade e alta temperatura.

Em relação aos gases utilizados no processo HVOF Freitas (2015, p.20) complementa:

Normalmente, utiliza-se pó como consumível, e como combustível utiliza-se acetileno, metilacetileno-propadieno (MAP), hidrogênio, propileno, propano e querosene. A chama pode atingir temperaturas na faixa de 2.900 a 3.170 °C, dependendo das características da mistura. Para exemplificação, a mistura oxigênio-acetileno (1,5:1 em volume) alcança a temperatura de 3.170 °C, enquanto a combinação oxigênio-propileno (4:1 em volume) pode alcançar 2.900 °C.

Consequente, devido à alta temperatura em que a pistola opera, tornou-se necessário criar mecânicos para resfriar a mesma, em que utilizasse a circulação constante de água para realizar a troca de calor, assim, com essa troca de calor constante é possível a operação da pistola sem que ela chegue a superaquecer.

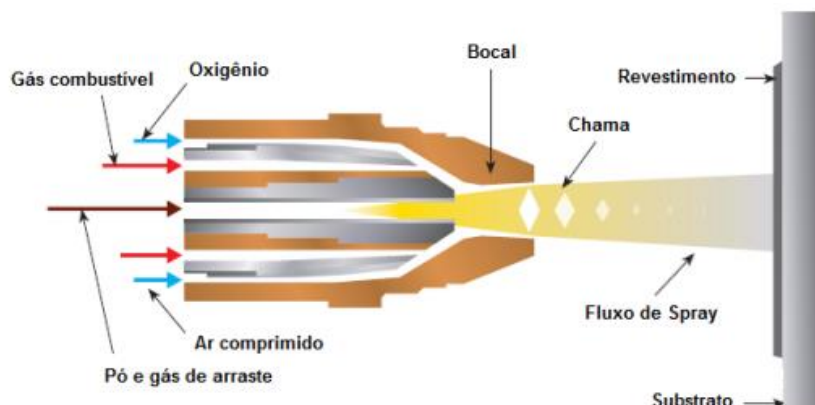
Figura 7 – Pistola de Aspersão Térmica HVOF



Fonte: Metallisation Thermal Spray Solutions (2023)

Ademais, também se nota que o método para alimentação do metal de adição pode variar de acordo com o design da pistola, em que é comum encontrarmos a configuração em que o pó é alimentado via gravidade, no sentido radial, onde o mesmo fica armazenado em um compartimento. No entanto também a casos em que o pó é alimentado no sentido axial, com o auxílio de outros componentes, como bombas de propulsão e motores.

Figura 8 – Modelo de Pistola de Aspersão HVOF



Fonte: Freitas (2015)

Uma característica que torna o processo HVOF interessante para indústria é sua quantidade baixa de poros, em que esse fator está relacionado aos jatos de gases em velocidades supersônicas, assim sendo, a quantidade de adesão das partículas é maior, pois as mesmas acabam se chocando em alta velocidade contra o material de base, assim quando se chocam nele, liberarão energia térmica fundindo-se no metal base. Essa característica de jatos em velocidade supersônicos quando realizados de maneira eficiente e controlados podem gerar revestimento de alta qualidade, que por sua vez acabam gerando peças de maior qualidade as empresas do ramo (FREITAS, 2015).

3 MATEIRAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Metal de Base

Para a realização dos estudos utilizou-se chapas de aço SAE 1020. Tipicamente utilizadas no setor metal mecânico, devido as suas características de temperabilidade e também sua razoável usinabilidade.

A Tabela 1 mostra a composição química do metal SAE 1020, nota-se que o aço possui baixas quantidades de carbono e elementos de liga.

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

C	Mn	P	S
0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,03	0,050

Fonte: Manual de Aços Gerdau (2017)

A Tabela 2 mostra as principais características mecânicas do aço SAE 1020. Considerando três cenários, sendo esses Laminados, Normalizado e por fim recozido, sendo possível observar que cada cenário gera características distintas.

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: Manual Aços Gerdau (2017)

Para a escolha do aço foi levado em consideração sua fácil aquisição e também sua grande utilidade na realização de estudos acadêmicos, pois possui características relevantes para estudos do gênero.

3.1.2 Revestimento

Para a realização de alguns processos de Aspersão Térmica é necessário o processo de almofadamento, que consiste em depositar um metal para adequação do material de revestimento, cujo 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. Abaixo temos a tabela indicando suas composições químicas.

Tabela 3 – Composição química nominal dos materiais

Material	Composição Química (%)									
	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)

A escolha do metal de adição foi feita diante da grande relevância que o mesmo possui no cenário atual da Aspersão Térmica, sendo um metal de fácil aquisição e que possui características de grande relevância nos processos de revestimento.

3.2 Preparo das Amostras

As amostras foram usinadas e cortadas três corpos de provas para cada processo, em que cada amostra foi dimensionada de acordo com a norma vigente ASTM G65 para o ensaio de desgaste. As dimensões finais resultarem em 25x75x12,5mm. Em seguida, foi realizado o processo de jateamento nos corpos de prova a fim de deixá-los adequados para o processo de aspersão.

Foto 1 – Corpos de prova após preparo



Fonte: Autores (2023)

Ademais, realizou-se o processo de lixamento das amostras, a fim de prover um acabamento de melhor qualidade para os estudos, o processo de lixamento ocorreu em uma lixadeira comercial comum, utilizando a lixa d'água 100, que fornece capaz de fornecer as características necessárias para os estudos.

Por conseguinte, em processos de aspersão térmica é comum a utilização do processo de almofadamento, que consiste em fornecer um material para a uma melhor aderência do metal de adição, servindo como uma espécie de “almofada”

No processo em questão utilizou-se dois materiais para a realização dos almofadamentos, sendo o primeiro a liga Solocoat, que foi utilizada para os materiais PFS-420-21e GPS420-21, sendo primeiro utilizado nos processos de Chama Pó e HVOF. Já o segundo material de almofadamento utilizado foi a Liga GSNi20Al, em que se aplicou nos materiais Arame CMS420.

3.3 Processos de Aspersão

A realização dos processos de aspersão foi caracterizada por parâmetros diferentes para cada processo, sendo cada um cuidadosamente escolhido a fim de fornecer o melhor resultado possível. A tabela abaixo informa os processos.

Tabela 5 – Materiais, Processos e Parâmetros utilizados

Material	GPS420–21	GPS420–4	Arame CMS420	Arame CMS420
Amostra	PFS-420-21	HVOF-420-4	WFS-420-St	WFS-420-Rd
Processo	ChamaPó	HVOF	ChamaArame	ChamaArame
Equipamento	MK74	JP5000	MK61 (Padrão)	MK61(Reg.Dif.)
Empresa	Comersul	OPT	LGR	LGR
Pré aquecimento(°C)	40	Não	Não	Não
Almofadamento	Solocoat (NiAlMo)	Não	GSNi20Al	GSNi20Al
Pressão ArComprimido(Psi)	20	-	60	80
Pressão Oxigênio (Psi)/RegulagemFlowmeter	30 /6,5	130	22 /5,5	22/6
PressãoAcetileno(Psi)/ Regulagem Flowmeter	12/5	-	15 /2,5	15/3
PressãoQuerosene(Psi)	-	113	-	-
Distância Bico/Peça(mm)	180	355	160	180
Granulometria(mm)	-106+45	-45+15	-	-
Diâmetro (mm)	-	-	3,2	3,2
Jateamento	Granalha de aço	Óxido de alumínio	Granalhade aço	Granalhadeaço

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

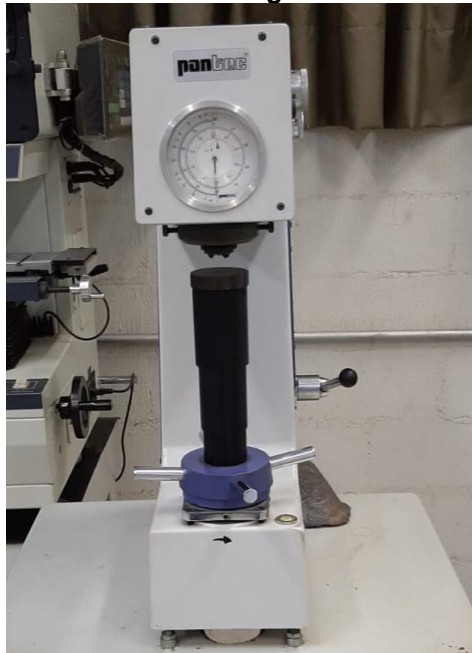
Para a realização dos processos de aspersão foram adotados critérios diferentes para cada amostra, assim denominou-se FPS-420-21 a amostra que recebeu o processo de Chama Pó, e HVOF-420-4 quando foi utilizado o processo de aspersão HVOF, nesse processo em particular se utilizou o material GPS 420-4. Após esses processos temos as amostras de Chama Arame, inicialmente a amostra WFS-420-St, foi aspergida utilizando os parâmetros padrões de Aspersão, já a amostra WFS-420-Rd, que apesar de ser o mesmo material foi aspergida com parâmetros distintos do processo padrão.

Após os processos de aspersão as amostras foram levadas a uma lixadeira, a fim de deixas uniformes para os processos de dureza Rockwell e posteriormente os processos de Desgaste e micro dureza, em seguida ocorreu o polimento dos corpos de prova com o intuito de fornecer acabamento para os corpos de prova.

3.4 Ensaio de Dureza Rockwell

Para a realização dos Ensaios de Rockwell, utilizou-se a máquina Durometro Analógico, instalada nas premissas da Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC). O modelo da máquina em questão é o PAN 300JW, sendo o fabricante a empresa PANTEC, abaixo temos uma imagem da máquina.

Foto 2 –Durômetro Analógico Dureza Rockwell



Fonte: Autores (2023)

Para a realização dos estudos foram feitas cinco medições em cada amostra, a fim de estabelecer criteriosamente a dureza do material aspergido. As penetrações do durômetro ocorreram ao longo da secção aspergida, com o intuito de averiguar se houve algum ponto de divergência. As medições utilizaram o padrão de medição Rockwell C, comumente utilizado em estudos acadêmicos.

3.5 Ensaio de Desgaste

Após a realização dos ensaios de Dureza Rockwell, iniciou-se a etapa de pesagem, para assim conseguir determinar a quantia de material que seria perdido nos desgastes de abrasão por roda de borracha. Essa medição ocorreu através da balança de precisão nas localidades da FATEC Sertãozinho.

Por ser um instrumento de precisão, foi necessária a ativação de 30 minutos antes dos ensaios, para que a balança apresentasse resultados com a menor margem de erro possível.

Após o tempo de espera foi realizado a medição precisa de todos os corpos de provas, incluindo os aspergidos com pó e arame, processo Chama Spray Comum e processo HVOF.

Foto 3 – Balança de Precisão



Fonte: Autores (2023)

Com as medições realizadas, iniciou-se o processo de desgaste abrasivo por roda de borracha, feito na máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo por Roda de Borracha, encontrada também nas instalações da FATEC Sertãozinho.

O método de ensaio consistiu em alocar o corpo de prova na fixação inerente do dispositivo, e depois inserir os contrapesos que mantêm o corpo de prova em constante contato com a roda de borracha, após a fixação iniciou-se a rotação da roda e o caimento da areia abrasiva, que cai paralelamente entre a roda e o corpo de prova.

Foto 4 – Máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo por Borracha



Fonte: Autores (2023)

3.6 Microscopia

Após a realização dos ensaios de desgaste, iniciou-se o processo de preparação dos corpos de prova para o ensaio de metalografia.

A amostra foi cortada na secção transversal dos corpos de prova. Logo após realizou o embutimento das amostras cortadas, com o intuito de deixá-las fixadas em uma plataforma que possibilitasse os futuros ensaios necessários. Em seguida, realizou-se o polimento das amostras embutidas para que a superfície que seria inspecionada no microscópio não apresentasse qualquer risco que atrapalhe se na caracterização da microestrutura. Por fim, foi feito o ataque químico utilizando Behara e Marble, permitindo uma caracterização das microestruturas encontradas. O processo descrito foi realizado em cada um dos processos de aspersão.

3.7 Ensaio de Micro Dureza

Após a realização dos embutimentos foi realizado o ensaio de micro dureza Vickers, pois ele possibilita uma precisão maior da determinar a dureza de cada região do material de revestimento. Com a utilização do equipamento foi possível determinar qual a dureza de regiões e diferentes fases e regiões que a microestrutura era de maior uniformidade.

Os ensaios de micro dureza foram realizados em todas as amostras embutidas, referentes aos processos de aspersão, totalizando nove penetrações em todas as amostras. Os Ensaio foram realizados através do equipamento localizado nas premissas da FATEC.

Foto 5 – Máquina de Ensaio de Micro Dureza Vickers



Fonte: Autores (2023)

4 RESULTADOS

4.1 Tabelas e Gráficos de Durezas

4.1.1 Durezas Chama Spray Arame Regulagem Padrão

Os resultados dos ensaios de durezas variam de acordo com cada penetração, no entanto foi capaz de estabelecer uma média aritmética para os resultados, em que tal média foi calculada para os resultados das durezas Rockwell na escala C e também para a micro dureza Vickers. Ademais também se calculou o desvio padrão que cada amostra variou de acordo com sua respectiva média, assim sendo conseguiu uma análise assertiva sobre as durezas do processo. As tabelas abaixo mostram os resultados da amostra Chama Spray arame WFS-420-St com a regulagem padrão.

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos com a Amostra WFS-420-ST, com a regulagem padrão para o processo de Aspersão Chama Spray. Com a Tabela é possível observar a micro dureza Vickers transportada para escala Rockwell C.

Tabela 6 – Durezas Vickers e Rockwell da Amostra WFS-420-ST

Arame WFS-420-St						
Ensaio	Vickers	Média (HV)	D.P.	Rockwell C	Média (HRc)	D.P.
1º Penetração	395,2			40,3		
2º Penetração	395,2			36,3		
3º Penetração	422,5	421,6	37,1	48,1	40,4	5,01
4º Penetração	484,8			41,9		
5º Penetração	410,5			35,7		

Fonte: Autores (2024)

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos com o durômetro na escala Rockwell C, assim como sua respectiva média e desvio padrão.

Tabela 7 – Durezas Rockwell C da Amostra WFS-420-ST

Arame WFS-420-St			
Ensaio	Dureza (HRc)	Média (HRc)	Desvio Padrão
1º Penetração	27,5		
2º Penetração	30,0		
3º Penetração	30,0	29,1	1,56
4º Penetração	29,5		
5º Penetração	27,8		

Fonte: Autores (2024)

Os resultados Rockwell C da Tabela 6 são uma conversão das microdurezas Vickers, ou seja, são as micro durezas Vickers convertidas para a escala Rockwell C, assim temos uma ligeira elevação caso comparemos as durezas das tabelas 6 e 7, isso se dá, pois, as durezas Vickers são extremamente precisas, sendo capaz de

escolher qual ponto das amostras realizar o ensaio, assim podemos escolher os pontos que possuem uma microestrutura mais densa e compacta que vá nos fornecer uma dureza maior. Apesar de as durezas estarem sutilmente diferentes, no contexto geral é possível dizer que seja a dureza feita na escala Vickers ou Durômetro Rockwell C a respectiva dureza do material se mantém.

4.1.2 Durezas Chama Spray Arame Regulagem Diferente

Os resultados do processo com regulagem diferente também seguiram os mesmos critérios de ensaio anterior. Após os ensaios foi realizado a média aritmética e o desvio padrão para ambos os processos, sendo estes a Dureza Rockwell escala C e micro dureza Vickers. A tabela abaixo mostra os resultados da amostra Chama Spray arame WFS-420-Rd com a regulagem diferente.

Tabela 8 – Durezas Vickers e Rockwell Amostra WFS-420-Rd

Arame Regulagem Diferente- WFS-420-Rd						
Ensaio	Vickers	Média (HV)	D.P.	Rockwell C	Média (HRc)	D.P.
1°Penetração	381,8			27,4		
2°Penetração	425,7			43,3		
3°Penetração	380,8	390	20,1	38,8	38,9	7,06
4°Penetração	385,3			39,3		
5°Penetração	376,5			45,8		

Fonte: Autores (2024)

A Tabela 9 mostra os resultados do Durômetro na escala Rockwell C, também podendo ser observado à média e o desvio padrão.

Tabela 9 - Durezas Rockwell C Amostra WFS-420-Rd

Arame Regulagem Diferente- WFS-420-Rd			
Ensaio	Dureza (HRc)	Média (HRc)	Desvio Padrão
1°Penetração	36,0		
2°Penetração	35,0		
3°Penetração	34,0	35,6	0,42
4°Penetração	36,5		
5°Penetração	36,5		

Fonte: Autores (2024)

Os resultados apontam uma diferença de dureza Rockwell C na tabela 8 se comparada com a tabela 9, em que essa diferença é devida os ensaios da tabela 8 terem sido realizados em pontos específicos das amostras, com essa especificidade

foi possível examinar regiões com poros e regiões de microestrutura consolidadas, assim a divergência entre os resultados é explicada pela precisão de cada ensaio. Ademais o ensaio no durometro Rockwell C possui uma área mais ampla de contato, assim sendo, ele consegue determinar a dureza de uma região maior, tendo variabilidade menor.

4.1.3 Durezas Chama Spray Pó – Processo padrão

A tabela abaixo mostra os resultados da amostra Chama Spray Pó PFS-420-21, com regulagem padrão.

Tabela 10 – Durezas Vickers e Rockwell da Amostra PFS-420-21

Pó – PFS-420-21						
Ensaio	Vickers	Média (HV)	D.P.	Rockwell C	Média (HRc)	D.P.
1°Penetração	161,5			17,7		
2°Penetração	229,9			18,0		
3°Penetração	247,9	242,8	53,3	22,0	25,1	8,7
4°Penetração	304,4			30,3		
5°Penetração	270,5			37,8		

Fonte: Autores (2024)

A Tabela 11 ilustra a dureza obtida através do durometro na escala Rockwell C, Ademias também é possível notar a média e desvio padrão que as cinco penetrações geraram.

Tabela 11 – Durezas Rockwell C Amostra PFS-420-21

Pó – PFS-420-21			
Ensaio	Dureza (HRc)	Média (HRc)	Desvio Padrão (HRc)
1°Penetração	14,0		
2°Penetração	10,0		
3°Penetração	14,0	12,3	2,10
4°Penetração	13,5		
5°Penetração	10,0		

Fonte: Autores (2024)

As durezas encontradas em ambas as tabelas possuem um valor baixo, isso, pois o processo chama pó possui uma quantidade de poros significativa, assim podemos observar que a alta variabilidade dos resultados da tabela 10 ocorre devido à capacidade de ensaio dureza Vickers, que é capaz de determinar a dureza das regiões com poro e as consolidadas, assim quando trazemos os resultados das durezas Vickers para a escala Rockwell C notamos uma variação maior.

4.1.4 Durezas Chama Spray Pó – Método HVOF

A tabela abaixo mostra os resultados da amostra Chama Spray Pó PFS-420-4, com método HVOF.

Ensaio	Vickers	Média (HV)	D.P.	Rockwell C	Média (HRc)	D.P.
1°Penetração	384,0			39,2		
2°Penetração	438,3			44,3		
3°Penetração	414,7	423,8	33,43	50,1	42,3	7,5
4°Penetração	408,9			30,9		
5°Penetração	472,5			47,2		

Fonte: Autores (2024)

A Tabela 13 mostra os resultados encontrados na escala Rockwell C com a utilização do Durômetro, assim como a média e o desvio padrão.

Ensaio	Dureza (HRc)	Média (HRc)	Desvio Padrão
1°Penetração	42,0		
2°Penetração	42,5		
3°Penetração	44,0	42,8	0,75
4°Penetração	43,0		
5°Penetração	42,5		

Fonte: Autores (2024)

Os resultados obtidos nas tabelas 12 e 13 evidenciam a qualidade do processo HVOF, pois devido à baixa quantidade de poros, não constata uma diferença de valores muito elevada entre ambas as durezas, assim podemos avaliar que seja feita a dureza Vickers ou Rockwell C, os resultados não serão significativamente divergentes, pois o material está muito bem distribuído e organizado. Assim mesmo quando trazemos as durezas Vickers para a escala Rockwell C não encontramos uma diferença significativa, esse aspecto é muito bem evidenciado pelas médias encontradas em ambos os ensaios, sendo as mesmas extremamente similares.

4.1.5 Tabela de Durezas Vickers

Abaixo temos a tabela contendo todas as médias e dureza Vickers nos quatro processos.

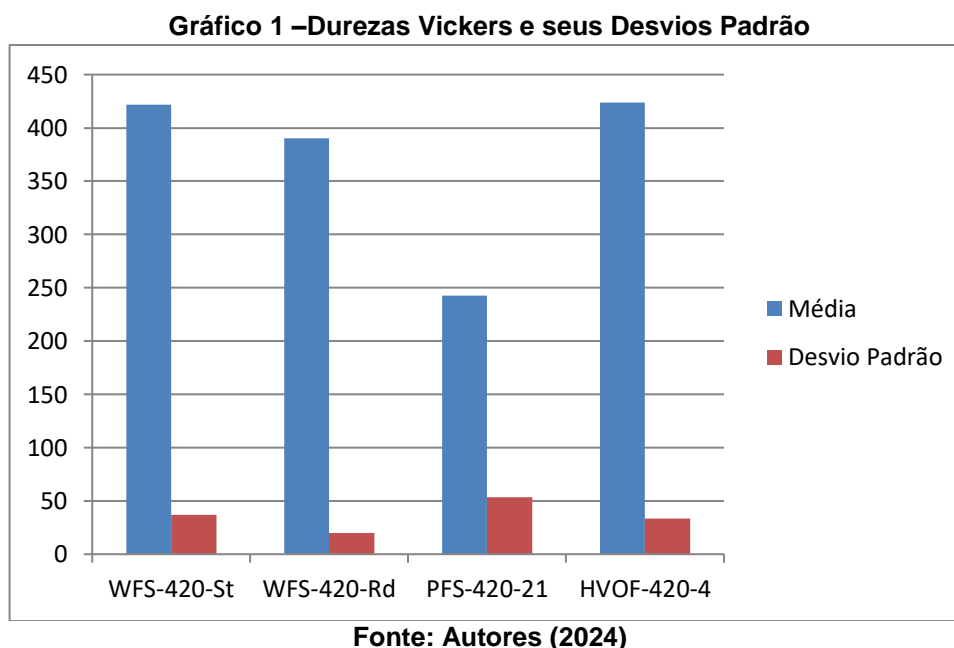
Tabela 14 – Durezas Vickers

	Média	Desvio Padrão
WFS-420-St	421,6	37,1
WFS-420-Rd	390	20,1
PFS-420-21	242,8	53,3
HVOF-420-4	423,8	33,43

Fonte: Autores (2024)

4.1.6 Gráfico das médias e desvios padrões Vickers

A seguir temos o gráfico ilustrando os valores das médias e desvios padrões Vickers.



Com o gráfico é podemos determinar que o processo HVOF possui constante resultados cago seja comparado com os demais. Já os processos via arame possuem relativa semelhança havendo pouca variabilidade. Por fim notamos que o processo chama pó possui de fato a menor dureza caso comparado com qualquer outro processo.

4.1.7 Tabela de Durezas Rockwell C

Abaixo temos a tabela contendo todas as médias e desvios padrões na escala Rockwell C.

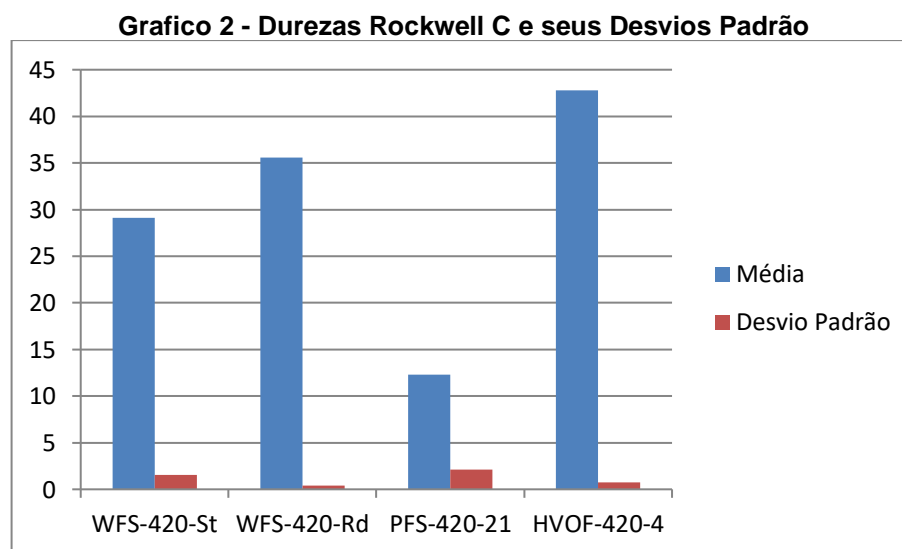
Tabela 15 – Durezas Rockwell C		
	Média	Desvio Padrão
WFS-420-St	29,1	1,56
WFS-420-Rd	35,6	0,42
PFS-420-21	12,3	2,10
HVOF-420-4	42,8	0,75

Fonte: Autores (2024)

Nota-se no processo chama arame que a regulagem distinta consegue resultados de dureza ligeiramente maiores, esse resultado evidencia o quão importante é a regulagem do processo. Ademais vemos que o processo chama pó possui os menores valores, pois devido à natureza do processo possui uma alta quantidade de poros. Por fim vemos que o processo de HVOF possui as maiores durezas devido a sua grande temperatura e pressão.

4.1.8 Gráfico de médias e desvios padrões Rockwell C

Abaixo temos o gráfico contendo as médias e desvios padrões de todos os processos.



Fonte: Autores (2024)

Com o gráfico é possível distinguir claramente que o processo HVOF é o de melhor dureza apresentando durezas significativas em todas as penetrações. Também é possível notar que a regulagem distinta do processo chama arame possui durezas maiores se comparada com a regulagem padrão. Por fim nota-se que o processo chama pó é o menos indicado.

4.2 Resultados dos Ensaios de Desgastes

A tabela a seguir ilustra as perdas resultantes dos ensaios de desgastes. Os ensaios foram realizados em todas as amostras de todos os processos. Os seguintes resultados são uma média de 03 ensaios para cada amostra.

Tabela 16 – Perdas de massa por ensaio de desgaste

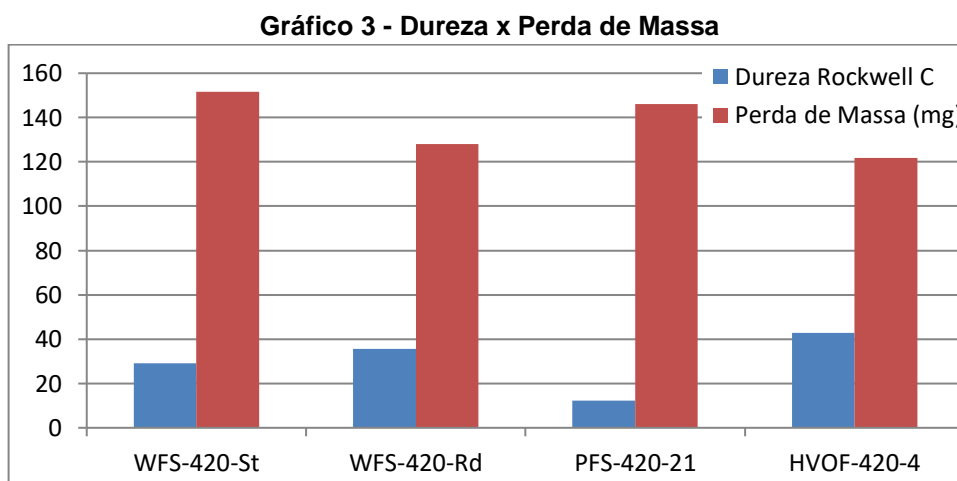
Material	Perda de Massa (mg)	Desvio Padrão (mg)
PFS-420-21	146,2	11,3
HVOF-420-4	121,8	2,3
WFS-420-St	151,7	23,9
WFS-420-Rd	128,1	3,6

Fonte: Autores 2024

Analisando os dados encontrados nos ensaios de desgaste é possível determinar que o processo chama pó possui a maior perda de massa, pois devido a natureza do processo temos uma quantidade alta de poros, o que gera uma grande perda de massa. Ademais podemos determinar que o processo chama arame com a regulagem específica possui maior dureza caso comparado com o processo de regulagem padrão, portanto alterando a regulagem do processo é possível conseguir resultados distinto. Por fim podemos notar que os resultados obtidos com o método HVOF é de maior qualidade, pois devido à alta taxa de velocidade e calor da aspersão cria-se uma cada mais compacta e com poucos poros, o que por sua vez gera um material mais resistente a abrasão.

4.2.1 Resultados Gráfico Dureza Rockwell C e Perda de Massa

A seguir temos o gráfico ilustrando a comparação entre a dureza Rockwell C e a perda de massa com o ensaio de desgaste por roda abrasiva.



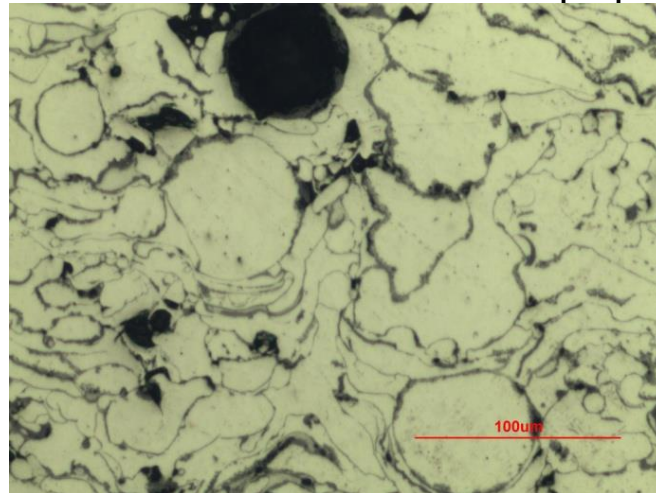
Fonte: Autores 2024

4.3 Ensaio Metalográfico

4.3.1 Metalografia da amostra PFS-420-21

A Foto 6 mostra a presença de poros (regiões mais escuras), regiões de óxidos (cor cinzenta localizada em torno de outras), regiões de partículas não fundidas (claras e redondas), e pôr fim as partículas fundidas (claras e achatadas).

Foto 6- Microestrutura PFS-420-21. Aumento:200x. Ataque químico: Behara

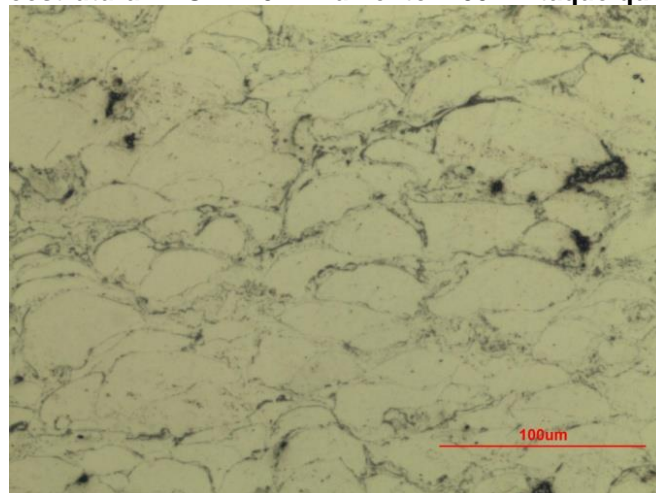


Fonte: Autores (2024)

4.3.2 Metalografia amostra HVOF-420-4.

Na Foto 7, é possível notar a pequena quantidade de poros, caracterizados pelos pontos escuros nos contornos e também a existência de alguns óxidos (regiões cinzas), no contorno das estruturas. Há regiões de partículas fundidas, caracterizadas pelo achatamento de regiões mais claras, além das regiões claras mais circulares, típicas de partículas não fundidas.

Foto 7 - Microestrutura HVOF-420-4. Aumento: 200x. Ataque químico: Behara

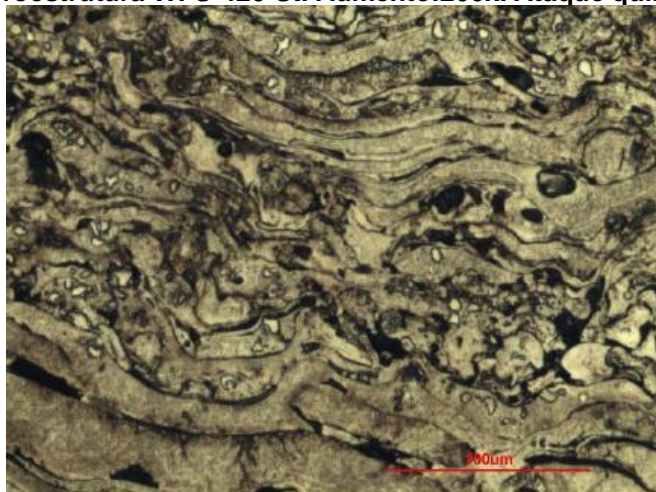


Fonte: Autores (2024)

4.3.3 Metalografia amostra WFS-420-St.

A foto seguinte mostra a microestrutura típica de um processo de Chama Spray, caracterizado pelas camadas de deposição e a presença de poros, (partes escuras) óxidos, (partes cinzentas) partículas fundidas (partes mais claras e achatadas) e partículas não fundidas (regiões claras e arredondadas).

Foto 8 - Microestrutura WFS-420-St. Aumento:200x. Ataque químico: Marble

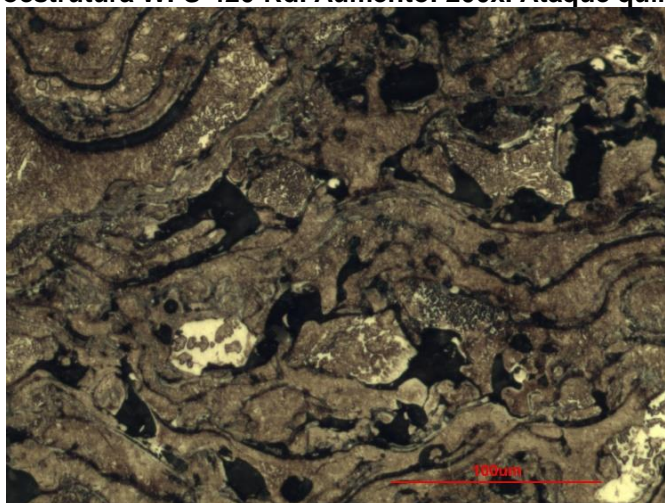


Fonte: Autores (2024)

4.3.4 Metalografia amostra WFS-420-Rd.

Na Foto 9, é possível constatar uma microestrutura mais grosseira quando comparada com a regulagem padrão. Nota-se as mesmas características do processo Chama Spray padrão, com poros, óxidos, partículas fundidas e as não fundidas.

Foto 9- Microestrutura WFS-420-Rd. Aumento: 200x. Ataque químico: Behara

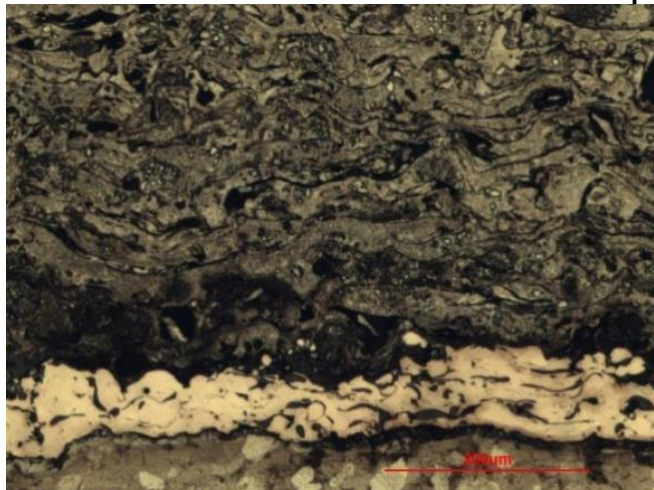


Fonte: Autores(2024)

4.3.5 – “Almofada” na amostra PFS-420-21

A foto a seguir ilustra a microestrutura da “Almofada”. Localizando-se entre o metal de base e o metal aspergido. Todas as outras amostras apresentaram a mesma característica e visual, assim sendo, uma amostra já é suficiente para mencionada.

Foto 10 - “Almofada” na amostra PFS-420-21. Aumento: 100x. Ataque químico: Marble



Fonte: Autores (2024)

5 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos é possível chegar as seguintes conclusões:

-O processo de Aspersão Térmico por HVOF (amostra HVOF-420-4) apresentou os melhores resultados quando comparado com os demais processos, pois sua perda de massa foi menor que os outros processos. O processo HVOF apresentou maior dureza no ensaio Vickers, demonstrando sua capacidade de resistência ao desgaste.

- O processo Chama Spray com regulagem distinta (amostra WFS-420-Rd) apresentou uma perda de massa menor que o mesmo processo com regulagem padrão, ademais a dureza Rockwell encontrada foi significativamente maior. Esses resultados são adquiridos devido a divergências de regulagem dos dois processos.

- Quando o processo Chama Spray pó (amostra PFS-420-21) é comparado com os processos Chama Spray arame (amostras WFS-420-St e WFS-420-Rd) nota-se uma dureza menor, tanto a dureza Rockwell quanto a dureza Vickers, assim sendo, é possível concluir que a presença de poros do processo em pó tem grande influência no resultado da dureza encontrada.

Em suma, constata-se que o processo HVOF tem maior efetividade, pois apresenta alta dureza e perda de massa relativamente baixa. Os processos utilizando Arame podem ser melhorados conforme a finalidade da peça aspergida, essa melhora ocorre através das modificações dos parâmetros de regulagem.

REFERÊNCIAS

CANARIM, R. C. **Influência da composição na mistura de pós de alumínio e ferro na formação de revestimentos de alumineto de ferro depositados por aspersão térmica a chama.** 2013. 164. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2013.

CARVALHO, P. R. **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420 depositados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico.** 2007. 107. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

COUTO, L. C. de O. **Aspersão térmica na construção metálica ciência e arte.** 2006. 11. Artigo – Faculdade Oswaldo Cruz, Oswaldo Cruz, 2006.

FREITAS, B. C. **Estudo das propriedades microestruturais de ligas de Níquel-Cromo e Cobalto-Cromo obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico.** 2015. 103. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2015.

Metallisation Thermal Spray Solutions. Disponível em: <<https://www.metallisation.com/product-category/hvof/>>. Acesso em 25/12/2023.

PAREDES. Universidade federal do Paraná – Departamento de Engenharia Mecânica. **Aspersão Térmica.** Curitiba, 2012, 102 p.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings.** 2. ed. Villeneuve d'Ascq, França: John Wiley& Sons, 2008.

Portal TS. Disponível em: <<https://www.portalts.com.br/a-metalizacao-por-aspersao-termica-solucoes-na-geracao-de-energia>>. Acesso em 25/12/2023.

Sulcromo – Cromo Duro e Metalização . Disponível em: <<https://www.sulcromo.com.br/noticias-corrosao/aspersao-termica-entenda-a-tecnica-contr-o-desgaste-por-abrasao/>>. Acesso em 25/12/2023.

Techno Alloys. Disponível em: <[https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/ligas-inoxidaveis/arames/14-\)%20ARAME%20ULTRA-STEEL%2042.01%20\(ER%20420\).pdf](https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/ligas-inoxidaveis/arames/14-)%20ARAME%20ULTRA-STEEL%2042.01%20(ER%20420).pdf)>. Acesso em 25/12/2023.