

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA (PPGEM)**

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE E ADESIVIDADE DOS  
REVESTIMENTOS DE WC-CO E LIGA FUSÍVEL APLICADOS POR  
ASPERSÃO TÉRMICA EM UM SUBSTRATO AISI 1020**

**WILTON BATISTA DA SILVA**

**RECIFE – 2017**

**WILTON BATISTA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE E ADESIVIDADE DOS  
REVESTIMENTOS DE WC-CO E LIGA FUSÍVEL APLICADOS POR  
ASPERSÃO TÉRMICA EM UM SUBSTRATO AISI 1020**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio José Da  
Silva**

**RECIFE – 2017**

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586a Silva, Wilton Batista da.

Avaliação do desgaste e adesividade dos revestimentos de WC-CO e liga fusível aplicados por aspersão térmica em um substrato AISI 1020 / Wilton Batista da Silva. - 2017.

101 folhas, il.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Aspersão térmica. 3. Revestimento.  
4. Desgaste. I. Silva, Flávio José da (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-110

17 de Fevereiro de 2017

**“AVALIAÇÃO DO DESGASTE E ADESIVIDADE DOS  
REVESTIMENTOS DE WC-CO E LIGA FUSÍVEL APLICADOS POR  
ASPERSÃO TÉRMICA EM UM SUBSTRATO AISI 1020”**

WILTON BATISTA DASILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E  
FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECANICA/CTG/EEP/UFPE

---

**Prof. Dr. FLÁVO JOSÉ DA SILVA  
ORIENTADOR / PRESIDENTE**

---

**Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ  
COORDENADOR DO PROGRAMA**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva (Orientador) - UFPE

---

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos – UFPE

---

Prof. Dra. Thaiana Francisca da Conceição Hermenegildo - UFPE

À minha esposa, Swamy e ao meu filho,  
Lucas pela paciência, apoio e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pois sem ele nada teria acontecido.

Ao Prof. Dr. Flavio José Da Silva, pela sua orientação, paciência, colaboração e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

Aos professores da banca do seminário II: Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho e o Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos ambos do PPGEM/DEMEC/CTG/UFPE

À empresa TST – Thermal Spray Technology, na pessoa do seu Diretor Engenheiro Caio Máximo e seus funcionários, pelo apoio na aplicação dos revestimentos;

À empresa Rijeza Metalurgia na pessoa do seu Diretor Darlan Geremia, pelo apoio na realização dos ensaios de desgaste.

Aos técnicos pertencentes aos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, pela contínua ajuda.

Aos meus familiares, pelo carinho, estímulo e incentivo.

À secretaria do PPGEM, em especial ao servidor Jorge Rodrigo da Silva Oliveira, pelas orientações e paciência nos nossos questionamentos diários.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de deposição das partículas .....	17
Figura 2 - Processo da aspersão térmica.....	18
Figura 3 - Secção transversal da estrutura de um revestimento .....	19
Figura 4 - Historia e crescimento da aspersão térmica .....	21
Figura 5 - Classificação dos processos de aspersão térmica.....	22
Figura 6 - Velocidade média das partículas .....	23
Figura 7 - Esquema da aplicação da aspersão térmica chama a pó.....	26
Figura 8 - Pistola utilizada pelo processo chama a pó .....	26
Figura 9 - Esquema da aplicação aspersão térmica por chama a arame .....	27
Figura 10 - Pistola utilizada pelo processo chama a arame .....	27
Figura 11 - Esquema de aplicação aspersão térmica por HVOF .....	29
Figura 12 - Pistola utilizada pelo processo HVOF .....	29
Figura 13 - esquema da aplicação aspersão térmica a arco elétrico .....	31
Figura 14 - Diferença entre os processos de limpeza .....	36
Figura 15 - Picos e vales de três superfícies diferentes .....	38
Figura 16 - Influência do ângulo de jateamento .....	38
Figura 17 - Variação da rugosidade em função do tempo de jateamento .....	39
Figura 18 - Resíduo na superfície em função do tamanho do abrasivo (%).....	39
Figura 19 - Luvas e voluta de bombas recuperadas por aspersão térmica.....	41
Figura 20 - Dispositivo de compensação do ensaio ASTM C633.....	45
Figura 21 - Tipos de fraturas resultantes do teste de adesividade .....	46
Figura 22 - Exemplo de determinação da porosidade ASTM E-2109 .....	47
Figura 23 - Principais processos de desgaste.....	49
Figura 24 - Diferentes tipos de desgaste e ocorrência (%) .....	50
Figura 25 - Desgaste abrasivo dois corpos (a) e Desgaste abrasivo três corpos (b) ..	51
Figura 26 - Desgaste abrasivo riscamento (a) e Desgaste abrasivo rolamento (b)...	51
Figura 27 - Desenho esquemático do abrasômetro conforme ASTM G65.....	52
Figura 28 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho .....	54
Figura 29 - Dimensões da amostra conforme ASTM G65.....	55
Figura 30 - Dimensões da amostra conforme ASTM C633.....	56
Figura 31 - Dispositivo para aplicação dos revestimentos .....	56
Figura 32 - Pistola utilizada aplicação do revestimento da liga AISI 420 .....	58

Figura 33 - Amostra texturizada, jateada e posteriormente usinada para aplicação do WC-Co. ....	59
Figura 34 - Aplicação do metal duro (WC-Co) processo HVOF .....	60
Figura 35 - Pistola aplicação do processo HVOF .....	61
Figura 36 - Aplicação da liga fusível (Cr, Ni, B e Si).....	61
Figura 37 - Pistola utilizada processo chama a pó .....	62
Figura 38 - Policorte (a), Máquina embutimento (b) e Máquina lixamento (c).....	63
Figura 39 - Amostras embutidas para micrografias e ensaio microdureza Vickers ...	64
Figura 40 - Microscópio ótico (a) e Microscópio eletrônico de Varredura (b) .....	65
Figura 41 - Durômetro para medição microdureza Vickers .....	66
Figura 42 - Abrasometro conforme ASTM G65 .....	67
Figura 43 - Barras revestidas antes dos cortes .....	68
Figura 44 - Amostras cortadas após revestimentos para teste desgaste abrasivo ...	68
Figura 45 - Máquina ensaio tração montada com as amostras (a) e Dispositivo compensador conforme ASTM C633(b).....	69
Figura 46 - Adesivo utilizado na colagem das amostras ensaio de adesividade.....	70
Figura 47 - Dispositivo apoio das amostras na etapa de colagem .....	70
Figura 48 - Microscopia Ótica da liga fusível.....	71
Figura 49 - Microscopia Ótica do revestimento de ligação AISI 420 .....	72
Figura 50 - Microscopia Ótica do revestimento metal duro (WC-Co) .....	73
Figura 51 - Morfologia dos pós da liga fusível .....	73
Figura 52 - EDS realizado nos pós da liga fusível.....	74
Figura 53 - Medições realizadas numa amostra do pó liga fusível.....	74
Figura 54 - Morfologia dos pós do metal duro (WC-Co).....	75
Figura 55 - EDS realizado nos pós do metal duro (WC-Co).....	75
Figura 56 - Medições realizadas numa amostra dos pós de metal duro (WC-Co) ....	76
Figura 57 - MEV realizado no revestimento da liga fusível .....	77
Figura 58 - MEV realizado no revestimento do metal duro (WC-Co) .....	77
Figura 59 – Espessuras de camadas obtidas no revestimento metal duro (WC-Co)	78
Figura 60 - Espessuras de camadas obtidas no revestimento da liga fusível .....	79
Figura 61- Espessura de camadas obtidas revestimento AISI 420 .....	79
Figura 62 - Comparativo das microdurezas Vickers obtidas nos revestimentos .....	80
Figura 63 - Perda média de massa (g) - Ensaio de desgaste ASTM G65.....	81
Figura 64 - Amostras após ensaio desgaste abrasivo por roda de borracha .....	82

Figura 65 - Valores médios da tensão e carga de ruptura (ensaio de adesividade)..	84
Figura 66- Montagem da amostra para ensaio de adesividade por tração .....	86
Figura 67 - Falhas dominantes ocorridas nas amostras no ensaio de adesividade por tração .....	87
Figura 68 - Determinação da porosidade dos revestimentos: AISI 420(a), Liga fusível (b) e Metal duro- WC-Co (c) .....	87
Figura 69-Comparativos das porosidades obtidas nos diferentes tipos de revestimentos .....	88
Figura 70-Desenho de uma luva indicando a região do revestimento.....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicação da aspersão térmica por tipo de desgaste e material aplicado	23
Tabela 2 - Diferentes temperaturas obtidas por misturas de gases .....	25
Tabela 3 - Características entre os processos de aspersão térmica .....	31
Tabela 4 - Comparação entre os processos de aspersão térmica .....	32
Tabela 5 - Diferentes graus de corrosão .....	34
Tabela 6 - Grau de limpeza de superfícies metálicas.....	34
Tabela 7 - Procedimentos do ensaio ASTM G65 .....	53
Tabela 8 - Composição química dos materiais utilizados (%) .....	55
Tabela 9 - Parâmetros de controle utilizados pelo processo arco elétrico .....	58
Tabela 10 - Parâmetros de controle utilizado pelo processo HVOF .....	60
Tabela 11 - parâmetros de controle utilizado pelo processo chama a pó .....	62
Tabela 12 – Valores das perdas de volume dos revestimentos após ensaio de desgaste abrasivo .....	82
Tabela 13 - Dados obtidos ensaio de adesividade por tração (ASTM C633) .....	83
Tabela 14 - Tipos de falhas dominantes após ensaio de adesividade por tração .....	85
Tabela 15 - Valores médios de porosidade dos revestimentos (%) .....	88

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>AISI</b>	– American Iron and Steel Institute
<b>ABNT</b>	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABS</b>	– Associação Brasileira de Soldagem
<b>ASM</b>	– American Society Metals
<b>APS</b>	– Air Plasma Spraying
<b>ASP</b>	– Arc Spray Process
<b>ASTM</b>	– American Society for Testing and Materials
<b>AWS</b>	– American Welding Society
<b>BS</b>	– British Standard
<b>EAS</b>	– Electric Arc Spraying
<b>EDS</b>	- Energy Dispersive Spectroscopy
<b>FS</b>	– Flame Spraying
<b>HVOF</b>	– High Velocity Oxygen Fuel
<b>ISO</b>	– International Organization for Standardization
<b>KN</b>	– Quilo newton
<b>MPa</b>	– Mega Pascal
<b>NACE</b>	–National Association of Corrosion Engineers
<b>NBR</b>	- Norma Brasileira
<b>PSI</b>	- Pound Force per Square Inch
<b>PTA</b>	– Plasma Transferred Arc
<b>RPM</b>	– Rotações por minuto
<b>SAE</b>	– Society Automotive Engineers
<b>SCFH</b>	– Standard Cubic Feet per Hour
<b>SSPC</b>	- Steel Structure Paint Council
<b>µm</b>	– Micrometro
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	– Metros cúbicos por hora
<b>m/s</b>	– Metros por segundo
<b>°C</b>	– Grau Celsius
<b>WC</b>	– Carboneto de Tungstênio (metal duro)
<b>TSS</b>	- Thermal Spray Society

## RESUMO

O desgaste é um dos principais problemas comumente encontrados e que levam a substituição de componentes. Em engenharia, surgiram técnicas para possibilitar recuperar esses componentes ou prepará-los para suportar as condições de trabalho. Entre as técnicas utilizadas na recomposição dimensional e melhorias localizadas em partes de componentes de máquinas, tem-se a deposição de materiais na superfície de componentes, conhecida como revestimentos, uma alternativa, por se tratar de um método eficaz na recuperação de elementos desgastados. Os processos de soldagem e de aspersão térmica são os mais utilizados para esse fim. Este trabalho propõe avaliar o comportamento de três revestimentos: metal duro (WC-Co), uma liga fusível à base de Cr, Ni, B e Si e a liga AISI 420 como elemento de ligação entre o substrato e o metal duro, todos aplicados por aspersão térmica utilizando três processos distintos. O substrato utilizado foi AISI 1020. A avaliação foi realizada através de micrografias (Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura), ensaio de desgaste abrasivo de acordo com a norma ASTM G65, ensaio de dureza e adesividade conforme norma ASTM C633 e de porosidade, norma ASTM E-2109. De acordo com os resultados obtidos, ficou evidente a opção de se utilizar o revestimento liga fusível como uma alternativa aos revestimentos de metal duro (WC-Co), pois os valores obtidos por esse revestimento nos ensaios de desgaste abrasivo e microdureza, ficaram próximos. Porém, durante a aplicação dos revestimentos foram observadas algumas limitações para aplicação dessa liga fusível: principalmente quando se depara com componentes com cantos vivos e de formas geométricas complexas, houve a formação de bolhas de ar comprometendo a aplicação. A liga AISI 420 como elemento de ligação com o metal duro, nos ensaios de adesividade não apresentou ruptura na ligação entre ambos, caracterizando uma aceitação dessa combinação, aliando assim, uma sobrevida ao substrato após o desgaste e perda da camada do metal duro, pois o AISI 420 possui boa resistência ao desgaste abrasivo. Em termos de porosidade, os revestimentos apresentaram os seguintes resultados em média: metal duro (WC-Co) 0,76%, a liga AISI 420 7,87% e a liga fusível 9,43%, todos abaixo dos valores informados na literatura. Vale registrar a contribuição dessa nova tecnologia como aliada na recomposição de componentes desgastados e melhorias localizadas, aumentando dessa forma a vida útil dos mesmos que, possivelmente seriam descartados como sucatas.

Palavras-Chave: Aspersão Térmica. Revestimento. Desgaste.

## ABSTRACT

Wear is the main problems frequently found that causes the replacement of the components. In the field of engineering, techniques were developed to make it possible to recover those components or to prepare them to endure work conditions. Among the techniques used in dimensional recomposition and the improvements in component parts of machines, there is the deposition of materials on the components surface, known as coatings, which is an alternative because it is an effective method to recover worn elements. Welding and thermal spraying processes are the most used for this purpose. This work proposes to evaluate the behavior of three coatings: hard metal (WC-Co), a Cr, Ni, B and Si based fused alloy and AISI 420 alloy as a bond between the substrate and the hard metal, all of them applied by thermal spraying using three different processes. For that, we used the AISI 1020 substrate. We did the evaluation through micrographs (Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy), abrasive wear test according to ASTM G65, hardness and adhesion test according to ASTM C633 and porosity based on ASTM E-2109. According to the results, it was evident that the option to use the fused alloy coating is an alternative to the hard metal ones (WC-Co), since the values it obtained in the tests of abrasive wear and microhardness, were close. However, during the coatings application, some limitations were observed when applying this fused alloy: especially when it comes to components with sharp edges and complex geometric shapes, air bubbles were formed which compromised the application. During the adhesion tests the AISI 420 alloy, as a bonding agent with the hard metal, did not show any ruptures in the bond between them, characterizing an acceptance of this combination, thus allaying a survival to the substrate after wear and hard metal layer loss, since AISI 420 has good abrasive wear resistance. In terms of porosity, the coatings presented the following results, in average: hard metal (WC-Co) 0.76%, the AISI 420 alloy 7.87% and the fused alloy 9.43%, all below the values reported in the literature. It is worth recording the contribution of this new technology as an ally to the worn components recomposition and localized improvements, thus increasing their lifespan, instead of possibly being discarded as scrap.

Key-words: Thermal Spray. Coating. Wear.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1	ASPERSÃO TÉRMICA.....	17
3.1.1	Processos de Aspersão Térmica .....	20
3.1.2	Aspersão por Combustão pelo processo Chama Convencional .....	25
3.1.3	Aspersão pelo método HVOF .....	28
3.1.4	Aspersão por Arco Elétrico (ASP - Arc Spray Process).....	30
3.2	PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA REVESTIMENTOS .....	33
3.2.1	Limpeza .....	33
3.2.2	Texturização de superfícies.....	37
3.2.3	Camada de ligação .....	40
3.2.4	Preaquecimento do substrato .....	40
3.3	ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO DIMENSIONAL.....	41
3.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS..	42
3.4.1	Avaliação da adesividade dos revestimentos.....	43
3.4.2	Avaliação da porosidade nos revestimentos .....	46
3.4.3	Avaliação da dureza dos revestimentos.....	48
3.4.4	Avaliação do desgaste nos revestimentos .....	49
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>54</b>
4.1	MATERIAIS.....	54
4.1.1	PRODUÇÃO DOS REVESTIMENTOS .....	57
4.1.2	Arco elétrico - Revestimento da liga AISI 420 .....	57
4.1.3	Oxi-combustão por alta velocidade - Revestimentos de WC-Co.....	59
4.1.4	Aplicação revestimentos liga fusível:.....	61
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS.....	63
4.2.1	Metalografia dos revestimentos .....	63
4.2.2	Ensaio de dureza .....	65
4.2.3	Medição da porosidade dos revestimentos .....	66
4.2.4	Teste de desgaste abrasivo conforme norma ASTM G-65.....	66
4.2.5	Teste de adesividade.....	68
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>71</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA DOS REVESTIMENTOS .....	71
5.2	TESTES DE DUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	79
5.3	DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS.....	81
5.4	ADERÊNCIAS DOS REVESTIMENTOS .....	83
5.5	POROSIDADE NOS REVESTIMENTOS.....	87

<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO 1.....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO 2.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO 3.....</b>	<b>100</b>
	<b>ANEXO 4.....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desgaste, corrosão ou avaria (trincas ou quebras) de peças/componentes de máquinas podem levar a custos significativos em diferentes setores industriais. Na Indústria do petróleo, por exemplo, os ambientes agressivos (água do mar, gases, areia, petróleo, alta temperatura e pressão...) acarretam em problemas de desgaste e corrosão em dutos de transporte de petróleo, ponteiros de "risers", bombas, válvulas, eixos, luvas e outros. Neste tipo de situação, além dos custos de troca de peças e paradas de produção os riscos de acidentes podem acarretar em sérios problemas ambientais. Grandes desafios são requeridos nestes casos, principalmente no projeto, fabricação e desenvolvimento dos materiais de componentes submetidos a diferentes condições operacionais. Uma forma de proteger componentes metálicos contra as severas condições de operação é a aplicação de técnicas da Engenharia de Superfícies.

Engenharia de Superfície é um termo relativamente novo (cerca de quatro décadas) que abrange uma variedade de processos/tecnologias com finalidade de modificar propriedades superficiais de componentes metálicos ou não metálicos (BUDINSKI,1988). Os diferentes processos existentes vêm sendo utilizados como uma alternativa a atender requisitos que possam aumentar o desempenho e a vida útil dos componentes/equipamentos. O principal objetivo é tornar superfícies técnicas mais resistentes ao desgaste ou corrosão, todavia podem também ter outros propósitos, como decorativos ou funcionais (atrito, refletividade, condutividade, hidrofobicidade, dentre outros).

Segundo BELL (1992) em um de seus estudos, argumenta que através da engenharia de superfície é possível compatibilizar materiais de baixo custo ou com propriedades especiais (exemplo: elevada resistência à fadiga) com meios nos quais sua aplicação direta é inviável.

As modificações podem decorrer de tratamentos superficiais tais como os tratamentos térmicos, termoquímicos e mecânicos por deformação, que adicionam poucas ou quase nenhuma massa à superfície, ou da aplicação de revestimentos que alteram as dimensões dos componentes numa escala micrométrica ou milimétrica. Os tratamentos térmicos superficiais mais difundidos são os aplicados por laser, por chama e por indução e os tratamentos termoquímicos os de cementação, nitretação, carbonitretação e boretação. Com relação aos revestimentos destacam-se os

recobrimentos eletro depositados (cromo duro, galvanização e níquel químico), os filmes finos PVD e CVD (Deposição Física de Vapor e Deposição Química de Vapor) e os revestimentos Duros ou “hardfacings” (revestimentos por solda, por aspensão térmica e Laser cladding) (BUDINSKI, 1988). Cada técnica de modificação superficial possui característica e aplicações específicas, podendo ter sua utilização de forma isolada ou combinada, neste quando vantagens das técnicas se somam e desvantagens são minimizadas. Segundo THORPE (1992), a aspensão térmica é uma ótima escolha para uma grande variedade de aplicações de manutenção e reparos.

A fabricação de uma nova peça ou componente em substituição as que sofreram algum tipo de degradação é na maioria das vezes mais cara. Uma alternativa atrativa nestes casos é a recuperação de peças através de aplicação de revestimentos com propriedades superiores ao do substrato. Esta opção é conhecida como recomposição dimensional de peças e pode minimizar os custos relativos à substituição das mesmas (BUDINSKI, 1988). A princípio todos os revestimentos podem ser utilizados como recomposição dimensional, sendo os recobrimentos os mais indicados para aplicações em condições de corrosão e os revestimentos duros para situações envolvendo desgaste/corrosão (ALBERTIN, 2003).

Dentre os revestimentos duros, os obtidos pelo processo de aspensão térmica são os mais utilizados na atualidade. Este processo possibilita a aplicação de grandes quantidades de materiais e tipos de revestimentos, tais como os materiais cerâmicos ou compósitos. Outra característica da aspensão térmica é a de aplicar revestimentos nos mais variados tipos substratos (material base), pois não ocorre alteração de forma ou microestrutura devido a baixas temperaturas a que são submetidos. Comparada com os processos de soldagem como revestimento, onde ocorrem modificações metalúrgicas na região da solda/substrato, a aspensão térmica pode ser considerada como uma técnica de revestimento basicamente a frio. Como consequência, é possível revestir peças de materiais de baixo ponto de fusão, como os termoplásticos e de alto ponto de fusão como os metais. Possibilidade de revestir peças/componentes no próprio local de trabalho, com pouca ou nenhuma desmontagem, principalmente quando estas são grandes e com geometria complexa. São inúmeras as aplicações dos revestimentos termicamente aspergidas, onde podem ser destacados: a fabricação de componentes das indústrias automotivas, petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia e aeroespacial. Por serem os processos mais utilizados nas indústrias, a primeira consideração na seleção de um

tipo de revestimento, é determinar se um processo de soldagem ou metalização é preferido ou requerido. Como regra, os processos de soldagem são preferidos para revestimento quando se requer espessura relativamente grossa com alta tensão de aderência entre revestimento e peça. Os processos de aspersão térmica, por outro lado, são preferidos para revestimentos de espessura fina e aplicação de camadas duras com deformação mínima da peça (INFOSOLDA, 1997).

Diante de muitas opções de processos de revestimentos e materiais que podem ser aplicados, o desafio é escolher qual melhor combinação revestimento/material é a mais adequada para cada situação de trabalho. Fatores tais como, custo/benefício, parâmetros de processamento e propriedades finais requeridas (dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, adesividade, acabamento) devem ser levados em consideração nesta escolha. Diferentes técnicas de caracterização dos revestimentos são essenciais para uma correta/adequada seleção do processo e do material a ser utilizado na fabricação de novas peças ou na recomposição dimensional. Neste trabalho foram selecionados três diferentes tipos de revestimentos aspergidos termicamente. Os revestimentos foram avaliados em diferentes técnicas de caracterização para verificar o potencial de uso destes como recomposição dimensional (LIMA; TREVISAN, 2007).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

-Avaliar revestimentos aspergidos termicamente para aplicação como recomposição dimensional e melhoria da resistência ao desgaste abrasivo de peças de componentes novos ou reconicionados.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a resistência ao desgaste abrasivo do revestimento metal duro (WC-Co) e de uma liga fusível a base de Cr, Ni, B e Si em substrato de aço carbono AISI 1020;
- Avaliar a aderência dos revestimentos do metal duro (WC-Co) sem e com a camada de ligação AISI 420 sobre substrato de aço AISI 1020;
- Avaliar a aderência de uma liga fusível a base de Cr, Ni, B e Si em um substrato de aço carbono AISI 1020;
- Avaliar a dureza dos diferentes revestimentos;
- Caracterizar micro estruturalmente a região dos revestimentos;
- Avaliar o custo-benefício dos revestimentos em uma situação teórica de recomposição dimensional.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

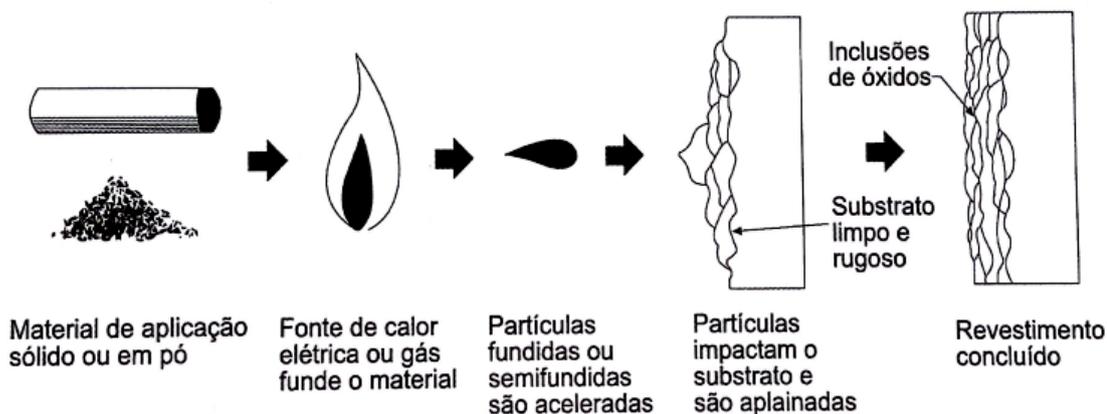
Neste capítulo serão apresentadas as definições, tipos e características dos principais processos de Aspersão térmica. Além disso, serão abordados os principais cuidados com a preparação das superfícies antes de revestir e os principais métodos de caracterização dos revestimentos.

#### 3.1 ASPERSÃO TÉRMICA

A *American Welding Society (AWS)* define Aspersão Térmica, ou “Thermal Spray”, como sendo um grupo de processos nos quais se divide finamente materiais metálicos e não metálicos que são depositados em uma condição fundida ou semifundida, sobre um substrato preparado.

O revestimento é formado pela deposição sucessiva de camadas de partículas que se achatam e solidificam, resultando em estrutura lamelar ou lenticular. Quando ocorre o impacto das partículas aquecidas e aceleradas sobre o substrato (devido a um gás de arraste), estas se achatam formando pequenas lamelas. Ao incidirem sobre o substrato elas resfriam-se e solidificam-se formando desta maneira o revestimento por aspersão térmica (figura 1).

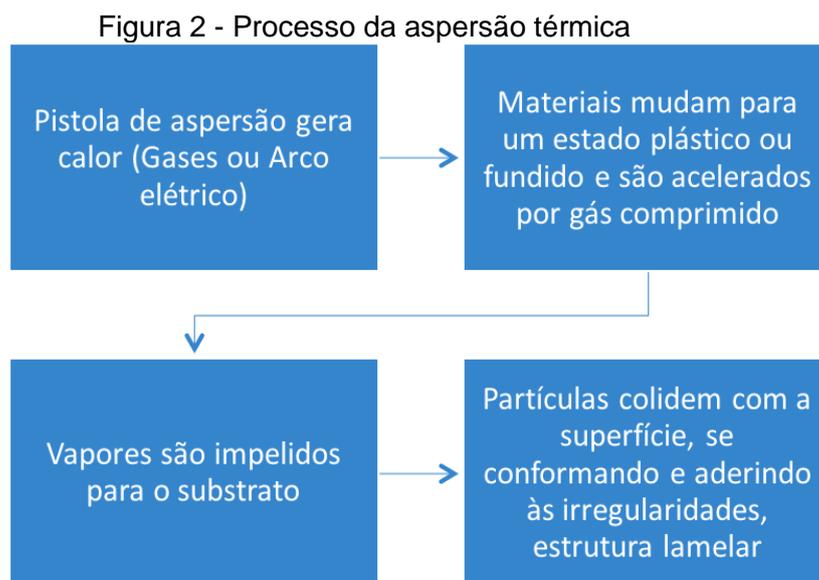
Figura 1 - Esquema de deposição das partículas



Fonte: Lima e Trevisan (2007)

A matéria prima utilizada para obtenção do revestimento através da aspersão térmica consiste de um material em geral, metálico, na forma de pó, vareta ou arame, onde o mesmo é fundido através de uma fonte de calor que pode ser de origem química (combustão) ou elétrica (arco elétrico), impulsionado por um ar comprimido

ou outros gases. A aderência ao substrato se dá por mecanismo de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e da velocidade imposta às partículas. Um resumo do processo do processo de aspersão pode ser verificado na figura 2.



Fonte: Autor

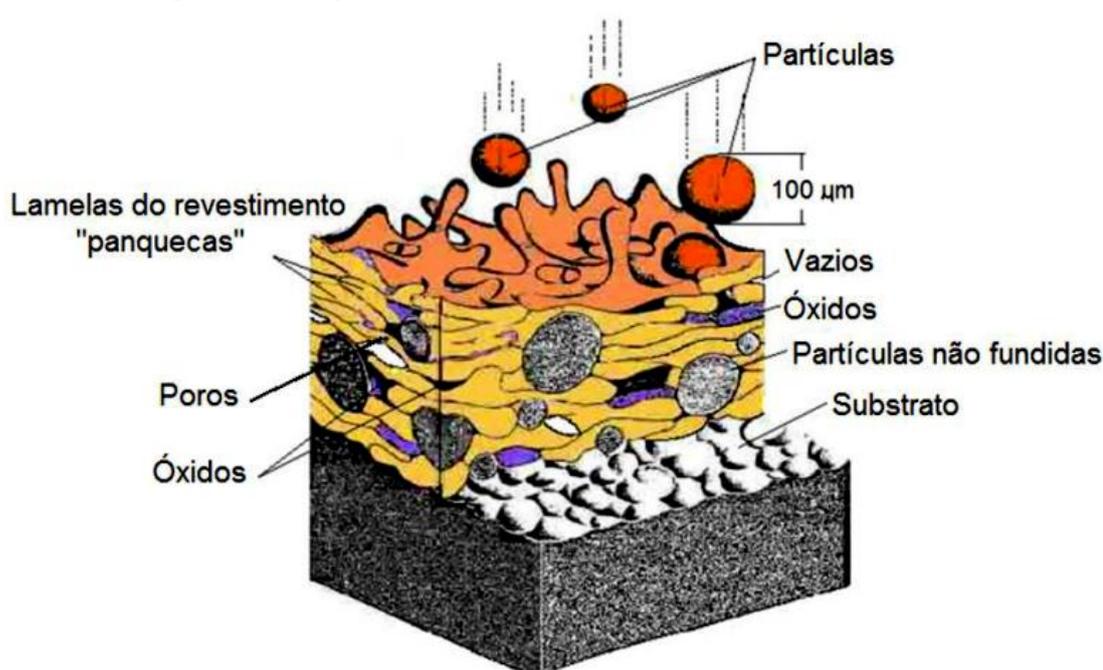
Os revestimentos aplicados pela aspersão térmica têm como principal objetivo a proteção de substratos contra desgaste abrasivo, desgaste erosivo, contra corrosão e fadiga superficial (MARANHO, 2006). Outra aplicação deste tipo de processo é servir como alternativa de recomposição dimensional de componentes que sofreram algum processo de desgaste ou degradação, garantindo assim, a integridade dimensional do componente e adicionando a este uma melhoria na região aspergida, evitando a necessidade cada vez mais frequente do consumo de recursos naturais ou de energia na fabricação de novos componentes.

A deposição por aspersão térmica pode ser realizada na maioria dos metais e suas ligas em materiais cerâmicos, óxidos, vidros, madeira, entre outros, onde o material aspergido pode ser fornecido na forma de vareta, arame ou pó. A estrutura e a química do depósito aspergido são diferentes do material no seu estado original. Essas diferenças são devidas à natureza do revestimento, à reação com gases durante o processo e à atmosfera em contato com o material enquanto líquido,

obtendo desta maneira metais aspergidos termicamente, que em geral, são mais duros que os metais que os originaram.

Os revestimentos aspergidos apresentam como principal característica uma morfologia lamelar com presença de partículas fundidas ou semifundidas, poros, inclusões que podem alterar as propriedades dos revestimentos (figura 3). Os poros formam-se durante a sobreposição das lamelas, enquanto que os óxidos são provenientes da interação química entre as partículas e os gases utilizados na pulverização (SANTOS, 2008).

Figura 3 - Secção transversal da estrutura de um revestimento



Fonte: Krepski (1993)

Alguns desses elementos presentes na estrutura do revestimento podem comprometer o desempenho, reduzindo a resistência ao desgaste, resistência à corrosão, aderência, entre outros. As principais características dos revestimentos aspergidos termicamente são:

- Adesividade (baixa/média);
- Porosidade (alta/média), em torno de 10 a 20% (No processo HVOF é  $\leq 1\%$ );
- Adesão interpartícula (baixa/média);
- Rugosidade superficial (média/alta);
- Porcentagem de óxidos (média/alta).

Nos processos de aspersão térmica as variáveis mais importantes para obter um revestimento de qualidade e que devem ter um maior controle são:

- Fonte de calor (combustão ou elétrica);
- Material a ser aspergido (morfologia do pó, arame ou vareta);
- O estado da superfície do substrato;
- Distância entre a pistola de aspersão e o substrato;
- Deslocamento da pistola em relação ao substrato.

A evolução dos processos de aspersão térmica com o desenvolvimento de novos tipos de pistola e controle dos parâmetros de processo faz com que este seja cada vez mais utilizado, apresentando algumas vantagens em relação a outros processos de revestimentos. Em geral as principais vantagens da aspersão térmica são:

- Baixos valores de diluição;
- Revestimentos obtidos são homogêneos e densos;
- Excelente união metalúrgica com o substrato;
- Não produz resíduos sólidos, evitando desta forma a poluição atmosférica bem como a poluição da água;
- Grande flexibilidade pelo fato de utilizar metal de adição em forma de pó ou fio;
- Grande eficiência na utilização do material de adição na forma de pó ou fio;
- Baixa distorção dos componentes revestidos.

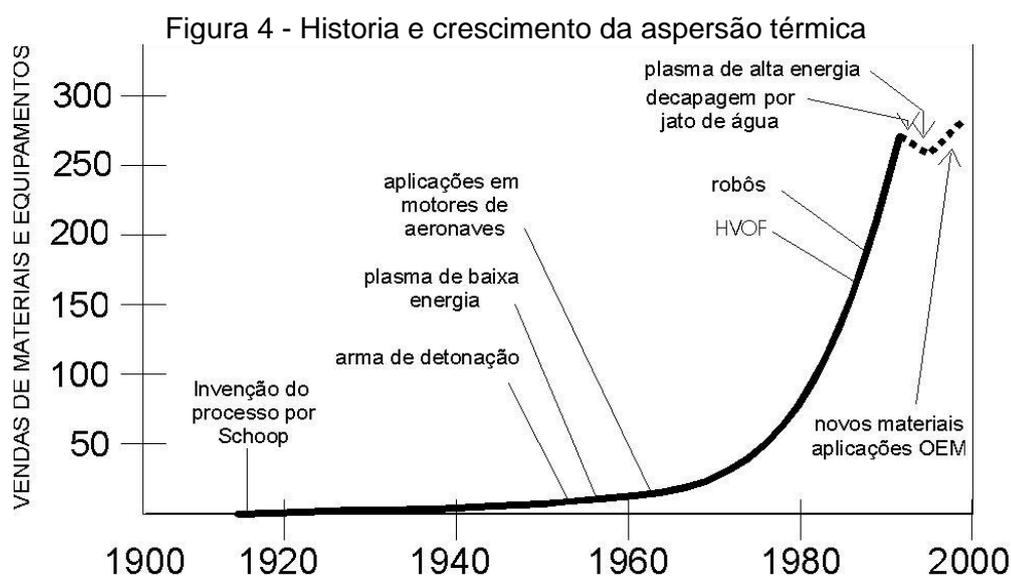
### 3.1.1 Processos de Aspersão Térmica

Historicamente os revestimentos metálicos já eram utilizados em caráter decorativos, onde o ouro era o principal metal utilizado devido ao seu brilho, cor e resistência mecânica. A primeira aplicação industrial da aspersão térmica foi desenvolvida a partir de um processo de combustão (oxigênio-combustível) por uma equipe de pesquisadores liderados pelo Dr. Max Ulrich **Schoop** de Zurique na Suíça, baseando-se inicialmente em um processo utilizado na idade média, no qual

projetavam partículas de metal fundido com jato de vapor ou ar comprimido. Utilizaram o calor gerado por combustão de uma chama a gás (LIMA; TREVISAN, 2007) para fundir um arame metálico (a base de zinco e estanho). Em 1912 veio então a segunda patente, utilizando a energia elétrica como fonte para produzir calor (COUTO, 2006).

Dados informam que em meados de 1920 a aspersão térmica foi utilizada como proteção contra corrosão, tendo o zinco como metal aspergido. Assim sucessivamente ao longo dos anos foram sendo desenvolvidas novas técnicas para aplicação da aspersão térmica. Em 1940 utilizou-se numa pistola o arco voltaico como gerador de calor. Em 1960 foi desenvolvido um novo processo através do arco plasma e mais tarde a deposição de pó pela detonação. Já o processo de aspersão térmica a chama utilizando uma pistola hipersônica, foi desenvolvida em 1980, onde foi possível transferir partículas aspergidas com elevada velocidade. Foi a partir da década de 90 que houve uma evolução dos equipamentos e materiais aplicados à aspersão térmica, proporcionando um aumento significativo na velocidade de deposição das partículas, denominado de Aspersão Térmica Oxi-Combustível de Alta Velocidade ou “HVOF”. Com a evolução dos métodos obteve-se um ganho considerável na redução da contaminação do material aspergido, redução do risco de oxidação e do aparecimento de poros (LIMA; TREVISAN, 2007).

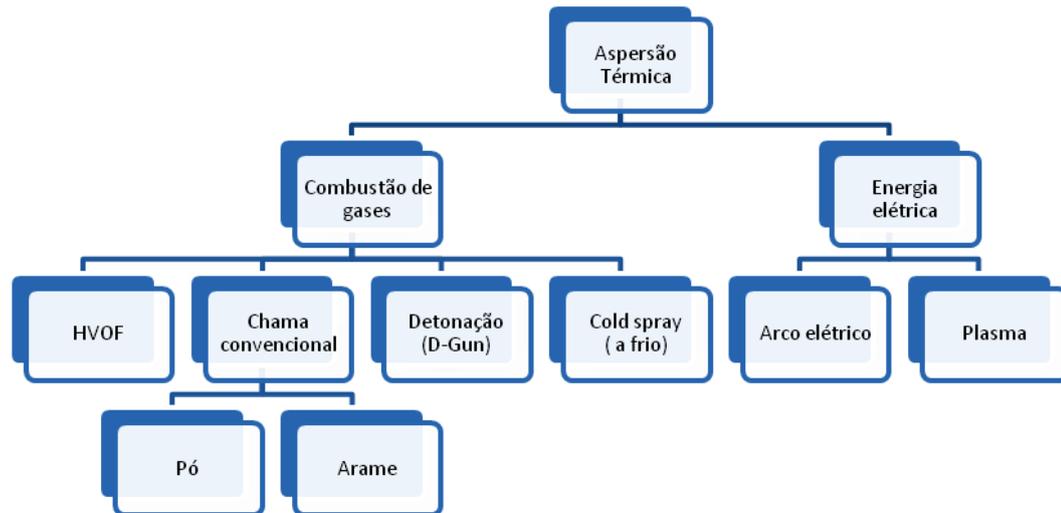
O crescente desenvolvimento da utilização da aspersão térmica data desde a primeira aplicação industrial realizada pelo Dr. Schoop, como mostra a figura 4.



Fonte: Thorpe (1998)

Atualmente os processos de aspersão térmica são classificados em função dos métodos de geração de energia (calor). As fontes mais utilizadas são: Energia de combustão de gases e energia elétrica. Esses dois grupos de aspersão térmica estão subdivididos em outros processos como mostra a figura 5:

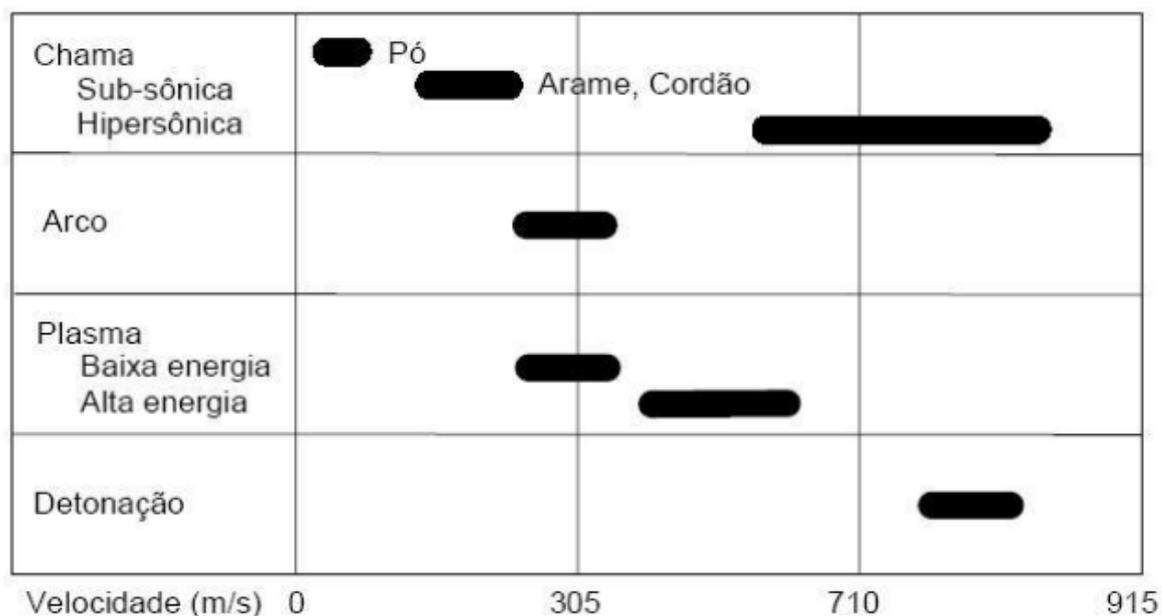
Figura 5 - Classificação dos processos de aspersão térmica



Fonte: adaptado de Rijeza (2011)

A velocidade com que as partículas fundidas ou semifundidas atingem o substrato é uma das variáveis que influenciará nas propriedades dos revestimentos, tais como a porosidade e a adesividade ao substrato. A figura 6 mostra as velocidades médias com que as partículas atingem o substrato nos diferentes processos de aspersão térmica utilizados. Os processos de chama, subsônica e hipersônica, e os processos por detonação são os que resultam em maior velocidade média, consequentemente maior adesividade dos revestimentos.

Figura 6 - Velocidade média das partículas



Fonte: Marques (2003)

Muitos materiais podem ser utilizados como matéria prima nos diferentes processos de aspersão térmica. A escolha depende da função do componente revestido e do tipo de processo a ser utilizado para aplicar o revestimento. A tabela 1 mostra de forma resumida, uma orientação da aplicação dos processos de aspersão térmica de acordo com a finalidade a qual se busca utilizar os revestimentos. Claro que o desempenho obtido para cada revestimento vai depender de um conjunto de parâmetros de processos e das condições específicas de cada aplicação, assim, são necessários estudos específicos (caracterizações) em cada caso prático.

Tabela 1 - Aplicação da aspersão térmica por tipo de desgaste e material aplicado

Tipo de Desgaste	Material Aplicado	Processo de Aplicação
Adesivo	Bronze-Alumínio	FS; ASP; APS; HVOF.
	Babbitt	FS; ASP
	Ti	FS; ASP
	Blenda de Mó/Ni-Cr-B-Si	APS
	Molibdenio	FS; ASP; APS.
	Aço Alto Carbono	FS; ASP
	Óxidos de Alumínio/Titânio	FS; APS

<b>Tipo de Desgaste</b>	<b>Material Aplicado</b>	<b>Processo de Aplicação</b>
Abrasivo	Carboneto de Tungstênio	FS; APS; HVOF.
	Co-Mo-Cr-Si	APS; HVOF
	Fe-Mo-C	APS
	Oxido de Alumínio	APS
	Oxido de Cromo	APS
	Carboneto de Tungstênio	APS; HVOF
	Carboneto de Cromo	APS; HVOF
	Ni-Cr-B-SiC/WC-(fundido)	FS; HVOF
	Ni-Cr-B-SiC-(fundido)	FS; HVOF
	Ni-Cr-B-SiC	HVOF
<b>Fadiga Superficial</b>		
Fretting	Molibdênio	FS;APS
	Blenda de Mo/Ni-Cr-B-Si	APS
	Co-Mo-Cr-Si	APS; HVOF
	Bronze-Alumínio	FS; ASP; APS; HVOF.
	Cu-Ni	APS; HVOF
	Co-Cr-Ni-W	APS; HVOF
	Carboneto de Cromo	APS; HVOF
Erosão	Carboneto de Cromo	APS; HVOF
	Carboneto de Tungstênio	APS; HVOF
	WC/Ni-Cr-B-SiC-(fundido)	FS; HVOF
	WC/Ni-Cr-B-SiC	FS; HVOF
	Óxido de Cromo	APS
Cavitação	Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo	APS
	Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC	APS
	Aço Austenítico -316	APS
	Ni-Cr-B-SiC-(fundido)	FS; HVOF
	Ni-Cr-B-SiC	HVOF

<b>Tipo de Desgaste</b>	<b>Material Aplicado</b>	<b>Processo de Aplicação</b>
	Bronze-Alumínio	APS; HVOF
	Cu-Ni	APS; HVOF

Fonte: Adaptado Lima e Trevisan (2007)

Nos itens a seguir (3.1.2 a 3.1.4) serão apresentadas as principais características dos processos de aspersão térmica utilizadas neste trabalho, são eles: Chama Convencional, HVOF e Arco Elétrico.

### **3.1.2 Aspersão por Combustão pelo processo Chama Convencional**

Neste processo a fonte de calor é obtida através da energia química de um gás combustível (geralmente o acetileno) junto com o oxigênio. A tabela 2 mostra as diferentes temperaturas obtidas por essas misturas. Observa-se que elas podem oscilar de 2640 a 3100 ° C (ASM, 1994).

Tabela 2 - Diferentes temperaturas obtidas por misturas de gases

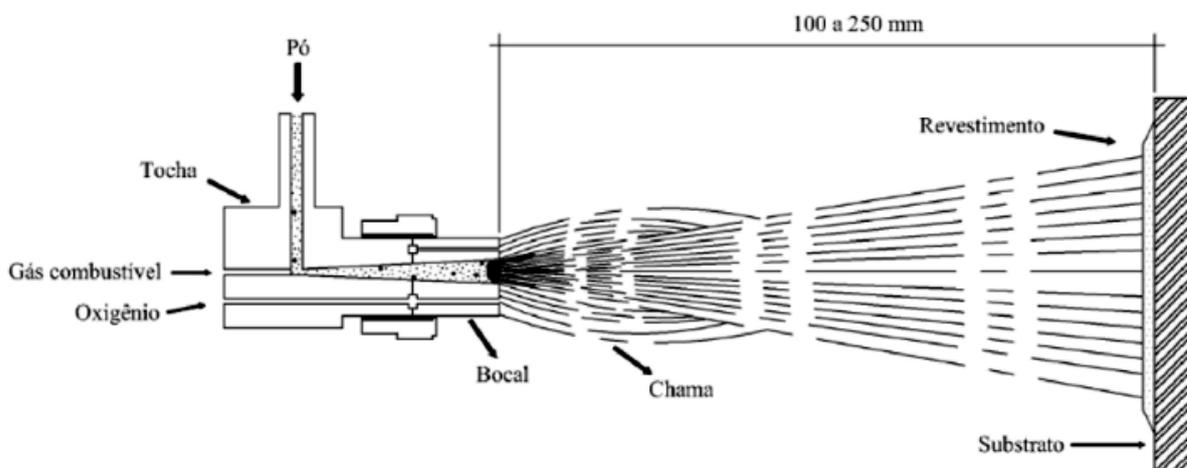
<b>Misturas de gases</b>	<b>Temperaturas (°C)</b>
Propano + Oxigênio	2640→
Gás Natural + Oxigênio	2735→
Hidrogênio + Oxigênio	2690→
Acetileno + Oxigênio	3100→

Fonte: Adaptado Lima e Trevisan (2007)

O material de revestimento pode ser usado na forma de arame. Nesse caso, é denominado de aspersão por chama de arame (Wire Flame Spraying), ou pó, chamado de aspersão por pó (Flame Powder Spray). No método de aspersão por chama de pó, o material de revestimento é alimentado de forma radial na tocha de aspersão, sendo a taxa de alimentação do pó variando de 50 a 100g/min. O calor da chama é utilizado tanto para fundir quanto para direcioná-lo ao substrato. A relação da mistura oxigênio-combustível pode variar na faixa de 1:1 a 1,1: um. Resultando em uma atmosfera carburante ou oxidante, respectivamente (LIMA; TREVISAN, 2007). A taxa do fluxo de gás de transporte vai de 3 a 5 litros/min.

Na aspersão por chama de arame, a combustão dos gases é utilizada apenas para fundir o material. A atomização do metal fundido e sua aceleração até o substrato são realizadas por um jato de ar comprimido. Dessa forma, são obtidas maiores velocidades de transferência além de uma melhor qualidade final do revestimento. As figuras 7, 8, 9 e 10, mostram as configurações das pistolas utilizadas para os processos de aspersão térmica por chama utilizando pó e arame, respectivamente.

Figura 7 - Esquema da aplicação da aspersão térmica chama a pó



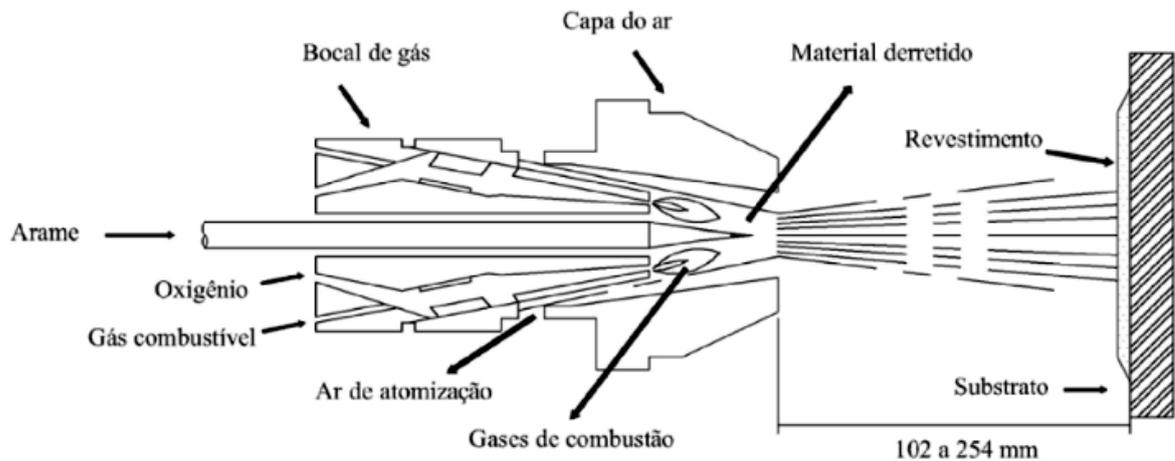
Fonte: adaptado Rijeza

Figura 8 - Pistola utilizada pelo processo chama a pó



Fonte: autor

Figura 9 - Esquema da aplicação aspersão térmica por chama a arame



Fonte: adaptado Rijeza

Figura 10 - Pistola utilizada pelo processo chama a arame



Fonte: autor

#### Características do método aspersão por chama convencional

- Distância de aspersão varia normalmente na faixa de 120 a 250 mm;
- Ângulo de trabalho usualmente 90°;
- Resistência adesiva pode chegar a 60 MPa;
- Porosidade é de 10 a 20%, podendo chegar à zero para revestimento autofluxantes;
- Espessura do material depositado 0,1 a 2,5 mm;
- Dureza pode chegar a 65 HRC.

### 3.1.3 Aspersão pelo método HVOF

É uma técnica de deposição por pulverização de pós que permite, a um custo razoável, melhorar as características da superfície de um material e prolongar a sua vida, mesmo em ambientes de trabalho particularmente corrosivos, difíceis e perigosos. Geralmente, este resultado é obtido, sem interferir com as características mecânicas e estruturais do substrato e, assim, sem a necessidade de tratamento adicional. O revestimento final é caracterizado principalmente por uma elevada densidade, força de ligação elevada, o que garante um aumento do grau de ancoragem do revestimento, por uma elevada dureza e pouca porosidade (< 1%) baixo nível de rugosidade ( $R_a < 2 \mu\text{m}$ ) além de elevada resistência ao desgaste. Estas características variam em função do tipo de material e parâmetros de deposição. A elevada velocidade também permite manter baixas temperaturas de pré-aquecimento do substrato a ser revestido.

O processo faz uso de uma mistura, onde o gás combustível é queimado com o oxigênio a alta pressão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade. Os combustíveis mais utilizados são: o propano, o propileno, o metil-acetileno-propadieno ou o hidrogênio. Os combustíveis são misturados nas seguintes proporções: oxigênio - acetileno (1,5: 1 em volume) alcança  $3170^\circ\text{C}$  e oxigênio-propileno (4:1 em volume) alcança  $2900^\circ\text{C}$ .

Os combustíveis são misturados com oxigênio, queimados em uma câmara de bocal, geralmente no sentido axial, e é aquecido e acelerado para fora do mesmo. A câmara de combustão e o bocal devido o calor gerado, são resfriados a água (MANFRINATO, 2010). Na atualidade, pistolas modernas permitem gerar velocidades de gases de transferência de partículas entre 3200 a 5000 m/s.

O pó é geralmente injetado axialmente, em algumas pistolas/tochas radialmente, utilizando nitrogênio como gás de arraste. A distância de aplicação da aspersão é de 120 a 300 mm. O método HVOF foi desenvolvido como uma alternativa ao método de aspersão por detonação. O HVOF também pode ser utilizado como uma opção a aspersão por plasma em algumas aplicações (CARAVALO; ROSSINO, 2010). Este processo apresenta bons resultados para revestimentos metal-cerâmicos (LIMA; TREVISAN, 2007). O pó normalmente repleto de partículas parcialmente fundidas, segundo (CORTES, 1998) podem atingir velocidades de até 1200 m/s, ou seja, três vezes mais que a velocidade do som. O tamanho das partículas do pó

utilizado no processo HVOF usualmente é de 5 a 45  $\mu\text{m}$ . A taxa de alimentação de pós pode variar de 20 a 80 g/min. Este método apresenta boa qualidade do revestimento e tensões residuais menores e baixa formação de poros. Um inconveniente desse processo é o nível de ruído, que pode exceder a 140 dB. A figura 11 mostra de forma esquemática, a aplicação da aspensão por este processo. Já a figura 12 mostra uma pistola bastante utilizada, neste caso do fabricante Sulzer-Metco.

Figura 11 - Esquema de aplicação aspensão térmica por HVOF



Fonte: adaptado Rijeza

Figura 12 - Pistola utilizada pelo processo HVOF



Fonte: autor

Principais características do método HVOF (PAWLOWSKI, 2008), são elas:

- Velocidade de gás > 2000 m/s;
- Alta dureza (1400 HV 300);
- Aderência da camada superior a 150 MPa;
- Baixa porosidade (< 1 %);

- Velocidade dos pós ( $> 1000$  m/s);
- Espessura do material depositado de 100 a  $300\mu\text{m}$ ;
- Superfícies lisas ( $R_a < 2\mu\text{m}$ );
- Baixa temperatura de pré-aquecimento;

#### **3.1.4 Aspersão por Arco Elétrico (ASP - Arc Spray Process)**

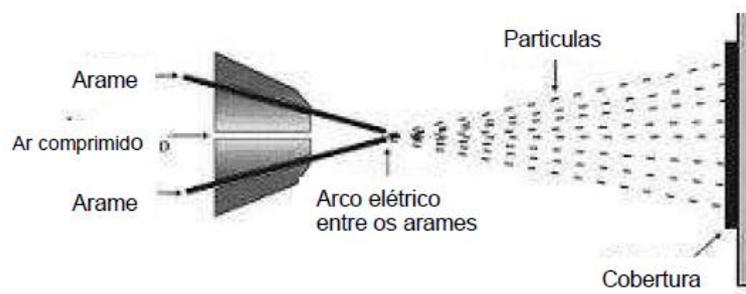
Processo que o arco elétrico como fonte de calor para fundir o material (na forma de arame) a ser depositado no substrato.

O arco elétrico é obtido por diferencial de potencial no bico de uma pistola aonde chegam dois arames do material de deposição. Forte jato de ar comprimido é dirigido ao arco elétrico, na região onde se funde o material, atomizando-o e projetando-o contra o substrato (PAREDES, 1998).

Na atualidade as pistolas de ASP utilizadas são de bico fechado e tem a proteção do jato de ar comprimido secundário, cuja aerodinâmica impede que as partículas se aglomerem em seu trajeto até o substrato (PAREDES, 1998).

O acionamento do mecanismo de alimentação contínua do arame pode ser feito por meio de pequena turbina movida a ar comprimido ou por motor elétrico. A velocidade de projeção de partículas atinge até 250 m/s. Na unidade de controle é ajustada a alimentação dos arames, o retificador de corrente continua trabalha entre 18 e 40 V e permite operação com vários materiais, sejam puros ou ligados (sólidos e tubulares). A abertura do arco e o tamanho das partículas aumentam com a elevação da intensidade de tensão elétrica. Esta deve ser mantida nos níveis mais baixos para manter a estabilidade do arco o que deveria resultar em camadas mais densas e uniformes. As temperaturas geradas no arco elétrico são da ordem de 4000 a 6000 °C, onde quaisquer dos materiais empregados neste processo são fundidos (PAREDES, 1998). A figura 13 mostra de uma forma esquemática o processo de aspersão por arco elétrico:

Figura 13 - esquema da aplicação aspersion térmica a arco elétrico



Fonte: Adaptado Rijeza

Características do processo de aspersion a arco elétrico:

- Apresenta normalmente maior taxa de deposição que os demais processos (até 55 kg/h);
- O aquecimento do substrato é menor que na aspersion por chama,
- Os controles da taxa de aplicação são: A corrente da fonte de energia, e a taxa de alimentação de arame;
- Não há fonte externa de calor, tais como nos processos de chama a gás e plasma induzida eletricamente;
- Resistência adesiva acima de 69 MPa pode ser conseguidas para alguns materiais;

A tabela 3 mostra um resumo das características dos diferentes processos de aspersion térmica:

Tabela 3 - Características entre os processos de aspersion térmica

Processos	Vazão de gases (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão Inter lamelar
Chama (pó)	11	2200	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O,	30	3	Baixa
Chama (arame)	71	2800	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	180	4	Media
Arco (arame)	71	5500	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	240	6	Alta
Plasma	4,2	5500	N <sub>2</sub> , Ar, H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	240	6	Alta

Processos	Vazão de gases (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão Inter lamelar
Detonação	11	3900	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	910	8	Muito Alta
HVOF	28-57	3100	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	610-1060	8	Muito Alta
Plasma de alta energia	17-28	8300	N <sub>2</sub> , Ar, H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	240-1220	8	Muito Alta
Plasma a vácuo	8,4	8300	Ar e He	240-610	9	Muito Alta

Fonte: Adaptado Paredes (1998)

A tabela 4 mostra de forma comparativa as propriedades/características dos revestimentos aspergidos termicamente em função dos processos utilizados

Tabela 4 - Comparação entre os processos de aspersão térmica

Propriedade/Característica	Tipo de revestimento	Chama de arame	Chama de pó	Arco elétrico	HVOF	Plasma arco não transferido	Plasma a vácuo
Resistência adesiva (MPa)	Metais ferrosos	14-26	14-21	24-41	48-62	31-34	100-400
	Metais não ferrosos	7 – 34	7 – 34	14 – 48	48 – 62	14 – 48	400-750
	Cerâmicas e Carbonetos		14 – 48		>83	55 – 69	60-100
Densidade (% do material bruto equivalente)	Metais ferrosos	85-90	85-90	85-95	85-98	90-95	97-99
	Metais não ferrosos	85-90	85-90	85-95	85-98	90-95	97-99
	Cerâmicas e Carbonetos		90-95		95-98	90-95	95-98
Dureza	Metais ferrosos	84R <sub>B</sub> -35R <sub>C</sub>	80R <sub>B</sub> -35R <sub>C</sub>	85R <sub>B</sub> -40R <sub>C</sub>	90R <sub>B</sub> -45R <sub>C</sub>	80R <sub>B</sub> -40R <sub>C</sub>	30-50 R <sub>C</sub>
	Metais não ferrosos	40 R <sub>C</sub>	40-65 R <sub>C</sub>	35 R <sub>C</sub>	55R <sub>C</sub>	45 – 65 R <sub>C</sub>	50-70 R <sub>C</sub>
	Cerâmicas e Carbonetos		45-55 R <sub>C</sub>		55-72 R <sub>C</sub>	50-65 R <sub>C</sub>	50-70 R <sub>C</sub>
Limitação de espessura do revestimento (mm)	Metais ferrosos	0,5 - 2	0,5- 2	0,5 – 2,5	0,6-2,5	0,4 -2,5	0,05- 10
	Metais não ferrosos	0,5- 5	0,5 - 5	0,5 - 5	0,5– 2,5	0,4 -5	0,5 -5

## 3.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA REVESTIMENTOS

A etapa mais importante a ser observada quando se define utilizar a aspensão térmica seja como recomposição dimensional ou como revestimento de proteção, é a preparação da superfície. Considerando que o principal mecanismo de aderência ao substrato é o de ancoramento mecânico, a superfície tem de ser preparada adequadamente antes de receber o revestimento.

Preparar a superfície significa executar operações que permitam obter limpeza e rugosidade. A limpeza elimina os contaminantes, oxidação e tintas mal aderidas, que poderiam prejudicar a aderência do revestimento. A rugosidade aumenta a superfície de contato e também ajuda a melhorar a aderência (GNECCO, 2003).

Os principais fatores que influenciam na preparação e conseqüentemente, na adesão do revestimento são: Limpeza, Texturização, Camada de ligação e Preaquecimento. A seguir será abordado cada um destes itens de forma resumida.

### 3.2.1 Limpeza

Os processos utilizados para a limpeza são divididos em duas categorias, a limpeza química e a limpeza mecânica, podendo ser empregadas em conjunto ou isoladamente. Por limpeza química pode-se citar a detergência, o desengraxamento e a decalagem ácida. O processo de limpeza mecânica é o mais utilizado na aspensão térmica, que consiste na ação mecânica de materiais abrasivos a fim de remover óxidos ou sujidades (óleos e graxas, em geral) da superfície metálica, dando como resultado uma superfície limpa. A limpeza mecânica pode ser realizada por processos manuais ou mecanizada (GENTIL, 2007).

Como os contaminantes estão presentes nos materiais oriundos dos processos de fabricação, por exemplo, na laminação a quente, onde as normas SIS 05 5900 e ISO 8501 estabelecem quatro graus de enferrujamento que uma chapa

laminada a quente pode chegar, durante a eliminação da carepa de laminação, por exposição ao ambiente, isto é, intemperismo (GENTIL, 2007). A tabela mostra o grau de corrosão em que as superfícies metálicas podem estar expostas:

Tabela 5 - Diferentes graus de corrosão

<b>Grau de Corrosão</b>	
Grau A	Superfície de aço com a carepa de laminação intacta e praticamente sem corrosão
Grau B	Superfície de aço com principio de corrosão, onde a carepa de laminação começa a desagregar.
Grau C	Superfície de aço onde, a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão ou que possa ser removida por meio de raspagem, podendo apresentar formação leve de alvéolos;
Grau D	Superfície de aço onde a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão com formação severa de corrosão alveolar.

Fonte: Gentil (2007)

Existem normas que padronizam alguns processos para preparo de superfícies metálicas que podem ser aplicadas em superfícies que serão submetidas à aspersão térmica, são elas: a norma americana SSPC (“Steel Structure Paint Council”), a sueca SIS 05 5900-67 (“Pictorial Surface Preparation”), e a mais recente a ISO 8501 (“Blast Cleaning & Power Tool Cleaning”) e ISO 8504. Outras normas como as da Petrobras, NACE (“National Association of Corrosion Engineers”) e BS-4232-67 (“British Standard”) também tem suas correspondências com a SSPC, como mostra a Tabela 6:

Tabela 6 - Grau de limpeza de superfícies metálicas

<b>Tipo de Limpeza</b>	<b>SSPC</b>	<b>SIS</b>	<b>Petrobras</b>	<b>NACE</b>	<b>BS</b>	<b>ISO 8501</b>
Limpeza com solvente	SP-1		N-5			
Tratamento mecânico	SP-2	St 2	St 2			St 2
Tratamento mecânico	SP-3	St 3	St 3			St 3

<b>Tipo de Limpeza</b>	<b>SSPC</b>	<b>SIS</b>	<b>Petrobras</b>	<b>NACE</b>	<b>BS</b>	<b>ISO 8501</b>
Jateamento ligeiro	SP-7	Sa 1	Sa 1	NACE-4		Sa 1
Jateamento comercial	SP-6	Sa 2	Sa 2	NACE-3	3rd Quality	Sa 2
Jateamento ao metal quase branco	SP-10	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	NACE-2	2nd Quality	Sa 2 1/2
Jateamento ao metal branco	SP-5	Sa 3	Sa 3	NACE-1	1st Quality	Sa 3
Limpeza a fogo	SP-4					
decapagem química	SP-8					

Os processos de limpeza química são subdivididos em três categorias: Detergência, Desengraxamento e Decapagem ácida.

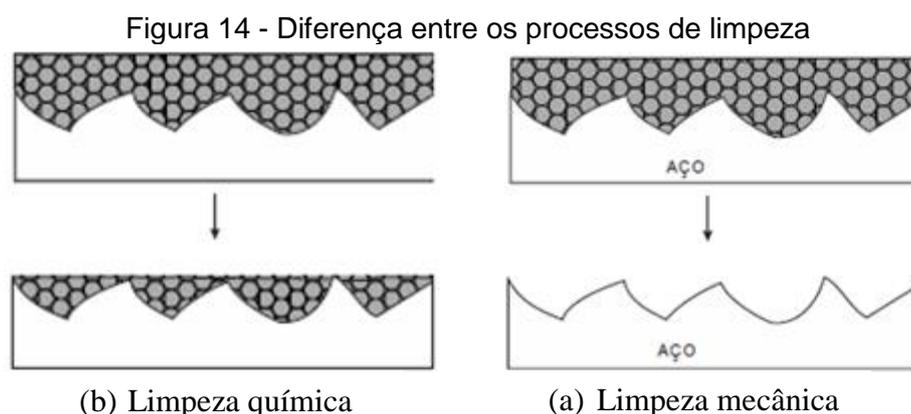
A limpeza por detergência, também conhecida como limpeza alcalina, varia de acordo com o tipo de trabalho, os chamados alcalinos pesados (a base de carbonatos de sódio, por exemplo) são utilizados para limpeza de aço, quando a sujidade é grande e de natureza severa (GENTIL, 2007).

A aplicação da limpeza por desengraxamento pode ser realizada por: vapor, jato de solvente em câmara de vapor e imersão em solvente a quente e vapor.

Finalizando os processos de limpeza química, destacamos uma poderosa ferramenta na remoção das sujidades/impurezas que é a decapagem ácida muito eficiente na remoção da camada de óxidos, hidróxidos e sulfetos, sendo responsável pela espessura dessas camadas. O ideal é que o reagente químico remova a camada de oxido sem agredir a superfície do substrato a ser aspergido. A decapagem deve ser preferencialmente realizada logo após o desengraxe. A limpeza mecânica pode ser realizada pelos seguintes processos: Ferramentas manuais ou mecânicas e por meio de jateamento abrasivo.

As ferramentas manuais ou mecânicas são indicadas onde o jateamento abrasivo não for possível, como por exemplo: Devido à proximidade de motores elétricos, painéis elétricos ou outros equipamentos que possam ser prejudicados pelo pó abrasivo ou pela sua deposição durante a operação de limpeza.

As principais ferramentas manuais utilizadas são: lixas, escovas de aço, raspadeiras e martelos de impacto. Com relação às ferramentas mecânicas, as pistolas de agulhas, as escovas de aço e as lixadeiras rotativas estão entre as mais utilizadas no processo de tratamento de superfície de aço. Em se tratando da preparação de superfície para aspersão térmica, a limpeza por meio de jateamento abrasivo tem sido a mais adequada. Utiliza como princípio a abrasão, onde partículas de material duro, tais como: limalhas ou granalhas de ferro e aço, além de óxidos de alumínio, carbonatos de silício, colidem em alta velocidade com a superfície a ser limpa. A forma, a densidade e a granulometria do abrasivo, são características que devem ser considerados (AWS, 1985). Abrasivos que possuem forma angular podem aderir em substratos macios, como alumínio, porém são os mais recomendados por seu poder de limpeza e asperização (MARANHO, 1996). Abrasivos de formas esféricas, não são recomendados para obter rugosidades, pois resultaria numa superfície martelada (aplainada) característica de um tratamento por “peening”, prejudicando a aderência do revestimento (HOWES, 1994). Independente do processo usado recomenda-se após a limpeza mecânica que a superfície deva ser limpa com aspirador, ar comprimido ou escova, para eliminação de resíduos (AWS, 1985). A figura 14, mostra de forma clara a vantagem que o processo de limpeza mecânica tem em relação à limpeza química, pois praticamente remove todos os resíduos que por ventura ficariam depositados nas protuberâncias do material.



Fonte: Gentil (2007)

A ligação entre o revestimento e o substrato é mecânica, mas alguns metais e compostos formam ligações metalúrgicas e químicas com o substrato. Uma camada de ligação é utilizada quando a camada aspergida é muito fina, dura ou onde a preparação por jateamento abrasivo é impraticável. As ligas mais comuns utilizadas

como camada de ligação são as ligas de Ni-Al, Ni-Cr-Al e certos compostos de níquel, por terem uma boa aderência ao substrato sob qualquer condição, onde uma fina camada serve como ancora para a primeira de revestimento. Todavia, a oxidação deve ser evitada (HOWES, 1994).

### 3.2.2 Texturização de superfícies

A texturização é a modificação do aspecto morfológico de uma superfície, podendo ser utilizada em escala macro ou micrométrica, dependendo das finalidades.

A micro texturização utiliza-se de métodos de modificação da topografia das superfícies criando padrões de micro cavidades regularmente espaçadas.

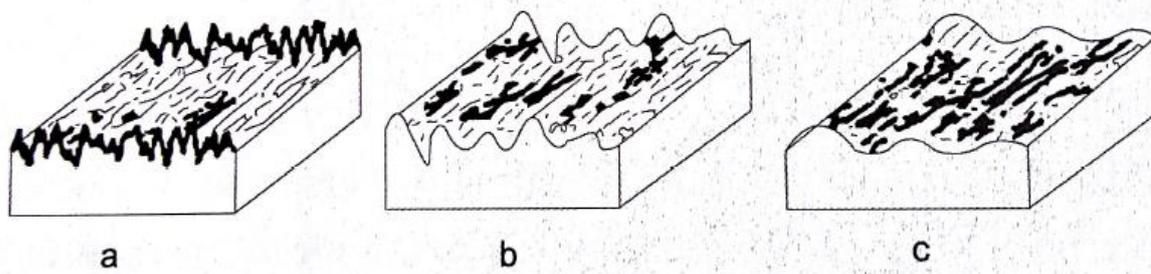
Após a limpeza, a superfície deve apresentar uma rugosidade para que ocorra a adesão satisfatória do material aspergido ao substrato. Tornando ainda mais importante quando se trabalha com o substrato na temperatura ambiente. Pode ser colocada como a última etapa antes da aplicação do revestimento. Deve-se ressaltar que a texturização é de extrema importância, sendo um dos principais requisitos para uma boa aderência.

Várias técnicas já estão disponíveis para criar texturas em uma superfície, criando padrões de micrométricos e eventualmente nanométricos (MICHEL et al., 2001).

Considerando-se o valor da rugosidade do substrato nas propriedades finais do revestimento, achou-se por bem definir as características micro geométricas que influenciam na adesão (LIMA; TREVISAN, 2007). Desta forma, as características que interferem na força de adesão entre o revestimento e o substrato são basicamente:

- Números de picos e vales (figura 15) dentro de um determinado comprimento de perfil de rugosidade, onde quanto mais alto o numero de picos dentro de um mesmo comprimento, maior será o efeito de ancoragem, conseqüentemente melhor será a adesão.
- Verdadeira área da superfície: Quanto maior a área real da superfície, melhor é a adesão do revestimento, pois terá uma área de ancoragem superior.

Figura 15 - Picos e vales de três superfícies diferentes



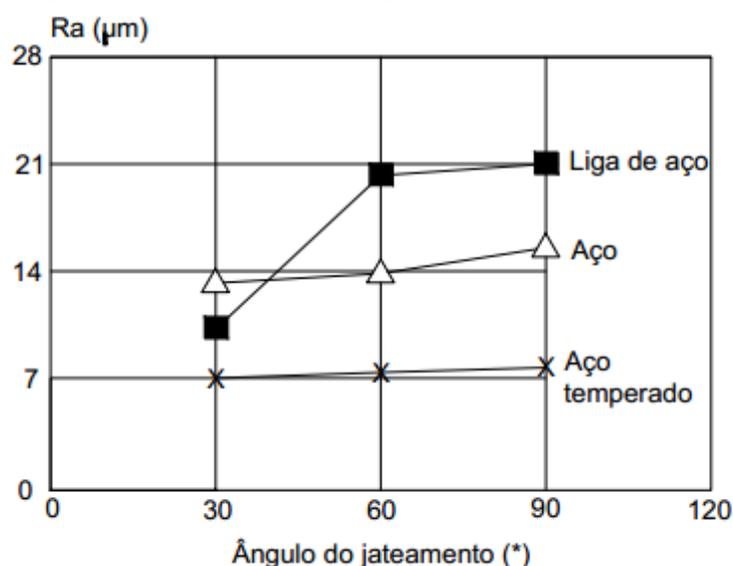
Fonte: Lima e Trevisan (2007)

De acordo com a figura 20, a superfície (a) proporciona melhor efeito de ancoragem em relação à (b) e (c), pois apresentam maior número de picos e vales.

Na prática como na literatura especializada, os parâmetros, rugosidade média  $R_a$  e a profundidade de rugosidade  $R_y$ , são os mais usados para avaliar a rugosidade superficial do substrato. De um modo geral, a rugosidade mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta  $R_a$  entre 2,5 a 13  $\mu\text{m}$ . A norma Petrobras para revestimentos metálicos por aspersão térmica, N-2568 de 2011, estabelece para valores de rugosidade  $R_y$  variando de 75 a 120  $\mu\text{m}$ .

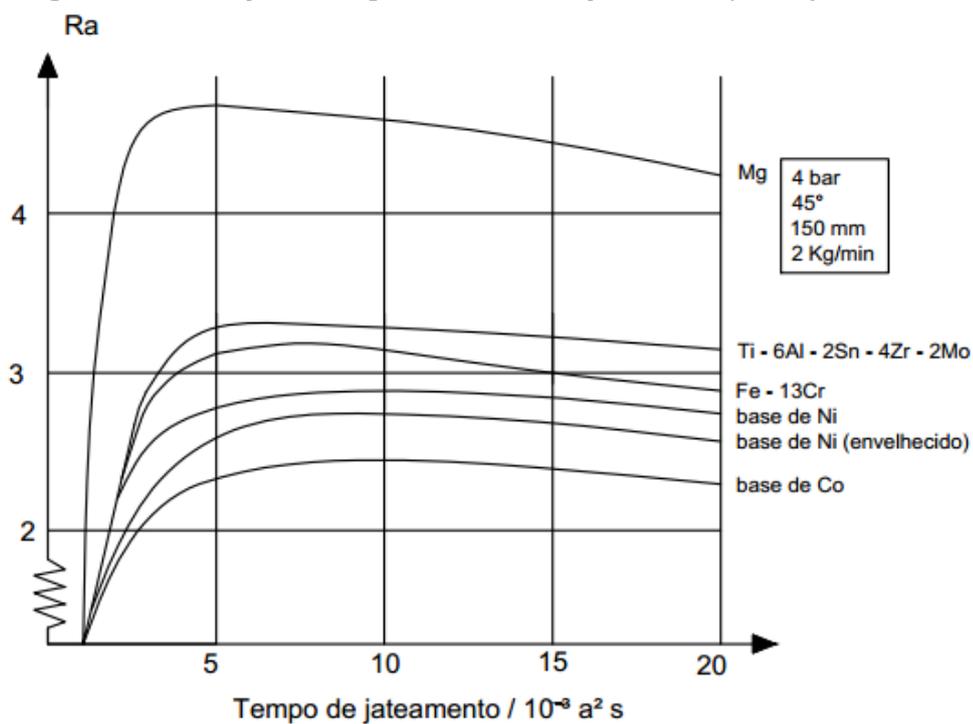
Os principais parâmetros que influenciam na texturização de um substrato, são: O modelo do equipamento, tipo e condições do abrasivo, ângulo, distância pressão e tempo de jateamento (MELLALI, 1997). As figuras 16 e 17 relatam essas influências conforme (WIGREN, 1998) citado por (LIMA; TREVISAN, 2007).

Figura 16 - Influência do ângulo de jateamento



Fonte: Mellali (1997)

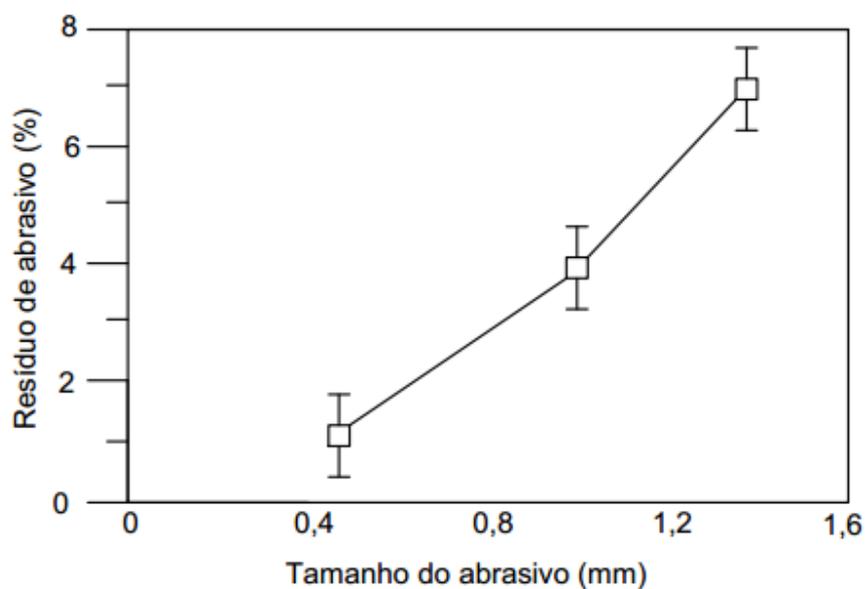
Figura 17 - Variação da rugosidade em função do tempo de jateamento



Fonte: Wigren (1998)

A figura 18 mostra uma correlação entre a rugosidade e o resíduo de abrasivo, que é influenciada pelo tamanho de grão do abrasivo (WIGREN, 1998).

Figura 18 - Resíduo na superfície em função do tamanho do abrasivo (%)



Fonte: Mellali (1997)

O aumento de resíduos é linear com os dos grãos do abrasivo (MELLALI, 1997).

Dessa forma conclui-se que, utilizando o jateamento abrasivo convencional para produzir a texturização na superfície do substrato, o mesmo produz certa incrustação de pequenas partículas de abrasivo no substrato, como consequência do impacto e fratura do abrasivo, que são conhecidas como resíduos e que podem interferir, de maneira indesejável, na adesividade do revestimento. Uma alternativa que eliminaria esse inconveniente de formação de resíduos é a texturização da superfície utilizando jato de água com alta pressão. Para tanto, pressões de 350 MPa devem ser usadas para obter resultados significativos (KNAPP, 1996).

No processo de preparação de peças que serão recuperadas as condições originais de projeto, há a necessidade de após a limpeza química e o jateamento abrasivo, a mesma deve ser submetida a um processo de confecção de ranhuras, cujas dimensões vão depender da espessura da camada de material a ser aspergido, que são dimensionadas proporcionalmente, ou seja, quanto maior for a camada a ser aspergida, maior será a profundidade das ranhuras, para que haja uma maior ancoragem do material aspergido ao substrato.

### **3.2.3 Camada de ligação**

Materiais de dureza elevada ou relativamente moles necessitam de uma camada de ligação para formar uma forte ligação Inter atômica física ou difusão com o substrato. Essas camadas de ligação são normalmente finas e produzem uma superfície rugosa para facilitar a aderência do revestimento. São aplicadas onde a usinagem e o jateamento não podem ser utilizados, devido a dificuldades de acesso ou onde podem ocorrer distorções excessivas, devido à dureza do substrato.

Camadas de ligação são recomendadas quando os substratos forem de aços temperados, superligas e ou ligas de alta dureza. Ocasionalmente são utilizados em materiais cerâmicos (MELALLI, 1997).

### **3.2.4 Preaquecimento do substrato**

Experimentos mostraram que a prática de pré-aquecer o substrato, melhora na adesão do revestimento (MELLALI, 1997), pois retardam o resfriamento das

partículas para melhorar o contato substrato/partículas e promover a ligação térmica. Cuidados devem ser tomados para não favorecer o aparecimento de camadas espessas de óxidos. Na prática, sugere-se que as superfícies sejam aquecidas a temperaturas entre 80 e 140°. C (CAMARGO, 1999).

### 3.3 ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO DIMENSIONAL

Se comparada a outros processos de recomposição dimensional, como a soldagem, a aspersão térmica apresenta diversas vantagens, tais como: Ausência de distorção e de zonas termicamente afetadas, oxidação e tensões residuais menores, haja vista que basicamente, a aspersão térmica pode ser considerada como um processo de revestimento a frio.

Atualmente aspersão térmica tem sido um dos recursos mais utilizados pelas indústrias no tocante a recuperação de componentes desgastados, pois os custos de aquisição de um novo componente devem ser considerados. Vale salientar que os materiais aplicados devem igualar ou exceder os requisitos do projeto original do componente. A figura 19 mostra luvas e volutas de bombas centrífugas que seriam descartadas, porém foram recuperadas pelo processo de aspersão térmica, recompondo as suas dimensões do projeto original, neste caso o material do revestimento foi uma liga de aço inoxidável AISI 420, o qual proporcionou um aumento na sua resistência ao desgaste adesivo e abrasivo.

Figura 19 - Luvas e voluta de bombas recuperadas por aspersão térmica



Fonte: Autor

Castro *et al* (2014) realizou um estudo substituindo a recomposição dimensional de haste de cilindros hidráulicos, que tradicionalmente eram recuperadas

por eletrodeposição do cromo duro, por um revestimento de metal duro (WC-Co) aplicado por aspersão térmica pelo processo HVOF. Os resultados obtidos superaram aos do cromo duro, quando analisadas a resistência ao desgaste, porosidade, dureza e coeficiente de atrito. Também enfatizou que a aspersão térmica é um processo limpo, que praticamente não deixa resíduos, o que não ocorre no processo de eletrodeposição do cromo duro.

Comeli (2006) também utilizou a aspersão térmica para revestir haste de uma válvula parcializadora de uma turbina termoelétrica. O revestimento foi de carboneto de cromo ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) numa matriz de níquel- cromo (NiCr) aplicado pelo processo HVOF, em substituição do tratamento termoquímico denominado nitretação. Obteve resultados considerados bons, tais como: porosidade menor que 3%, rugosidade entre 2,0 a 4,7  $\mu\text{m}$  e microdureza Vickers 950HV<sub>0,5</sub>. Vale salientar que ambos os casos relatados, esses componentes poderiam ser descartados como sucatas e substituídos por outros novos.

Freire (2002) avaliou diferentes revestimentos aplicados HVOF para aplicação em ponteiros de raisers\* que são fabricadas em aço AISI 4130 e revestidas originalmente com níquel, sujeitas a corrosão marinha. Inicialmente tentou-se revestimento de níquel aplicado por chama a pó, porém não obteve sucesso devido à baixa aderência e porosidade, provocando deslocamento do revestimento. Ele verificou a influência das variáveis de aspersão na dureza, microestrutura, desgaste abrasivo e riscamento dos revestimentos e optou por um revestimento duro, alta aderência e baixa porosidade. Seus resultados mostraram que os revestimentos “cermets” WC-17Co e WC-10Co-4Cr, apresentaram melhor desempenho, permitindo camadas de qualidade com baixa porosidade, boas características mecânicas (dureza e resistência ao desgaste).

\*tubos que ligam uma estrutura de produção offshore flutuante, ou plataforma de perfuração a um sistema submarino.

### 3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS.

A obtenção de revestimentos de qualidade e que possam desenvolver um desempenho desejado, resistência ao desgaste, por exemplo, é necessário realizar um controle rigoroso em todas as etapas do processo.

Uma deficiência que podemos destacar no emprego da aspersão térmica, é que as avaliações das propriedades dos revestimentos ainda não são padronizadas na sua totalidade, pois no interior de um mesmo revestimento as propriedades podem ser diferentes, pois eles possuem características anisotrópicas, isso se deve ao fato da microestrutura ser lamelar e alinhada com o plano do substrato.

Vale destacar que as propriedades de um revestimento realizado por aspersão térmica têm como principal característica a adesão entre a camada aspergida e o substrato, bem como a coesão entre as partículas depositadas.

Os principais defeitos que podemos encontrar num revestimento são: poros, trincas, presença de óxidos, pois tudo isso fazem parte de todo revestimentos.

As principais propriedades avaliadas na caracterização dos revestimentos aspergidos são: Adesividade (adesão e coesão), Porosidade, Dureza e Resistência ao desgaste abrasivo. A seguir nos itens de 3.4.1 a 3.4.4 serão abordadas cada uma destas técnicas de caracterização.

### **3.4.1 Avaliação da adesividade dos revestimentos**

Quando se fala em revestimentos, um dos maiores questionamentos é quanto a sua aderência ao substrato. A resistência adesiva (adesão) e coesiva (coesão) pode ser considerada a mais importante propriedade que um revestimento deve apresentar, sendo esses os requisitos primordiais para um bom desempenho. Não adianta ter um revestimento livre de poros, óxidos e uma camada ideal se a mesma não tiver a aderência necessária para o desempenho do componente que recebeu o revestimento. Portanto pode-se dizer que medir a adesão é extremamente importante por diversas razões, onde podemos citar (BERNDT, 1994):

- a). Avaliar a influência das variáveis dos processos e a preparação do substrato, deste modo, pode-se otimizar para se obter a resistência de adesão requerida;
- b). Identificar no revestimento partes que tenham uma menor resistência e avaliar se podem ser aceitáveis.

Atualmente os ensaios para análise (medir) da aderência dos revestimentos são destrutivos e apresenta deficiências que, de certa forma, interferem nos resultados obtidos.

O método mais utilizado é o de tração (tensile adhesion test – TAT) (BERNDT, 1994). Trata-se de um teste de tração relativamente simples e tem sua aplicabilidade tanto industrial quanto laboratorial. Deve-se atentar que diversos fatores podem interferir nos resultados, portanto é necessário conhecer as deficiências, tanto na preparação dos corpos de prova e na execução do ensaio.

Os ensaios de tração podem ser considerados como métodos diretos de medição, o qual se baseia no tracionamento vertical do revestimento. Podemos dizer que esse método é o dos melhores, pois apresentam uma maior padronização e são normatizados por quatro organismos internacionais, sendo eles: ASTM C633/79 (EUA), AFNOR-NF A91-202-79 (França), DIN-50-160-A-81 (Alemanha) e JIS-H8666-80 (Japão) (BERNDT, 1994).

A tensão de resistência de adesão à tração é calculada pela fórmula (1):

$$\sigma_{\max} = F/A \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Onde:

F é a carga máxima antes da ruptura,

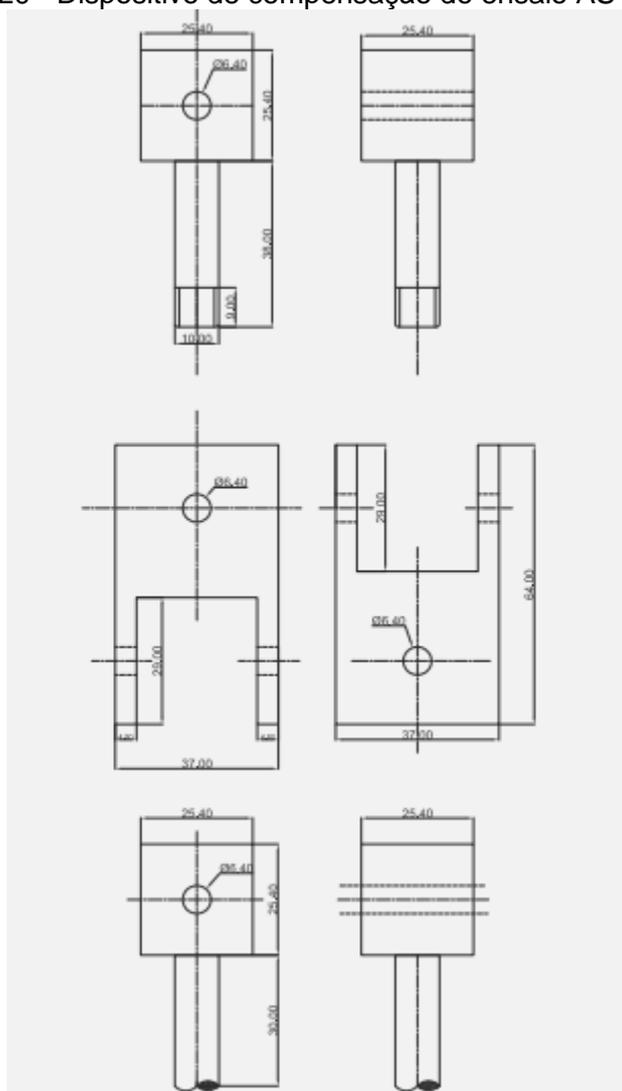
A é a área da secção transversal da amostra, neste caso, a área da círculo.

As normas orientam as dimensões dos corpos de prova, mas como as espessuras dos revestimentos a serem testados são diferentes e as dimensões dos substratos que podem variar de 25,4 a 40 mm de diâmetro, dificulta a comparação dos resultados. Desta forma valores de adesão e suas variações podem ser diferentes no revestimento em análise.

Um dos testes de resistência adesiva mais utilizado é o ASTM C633-79, com revisão em 2001 (ASTM, 2001) "Método de Teste Padrão para Adesão ou Resistência Coesiva de Revestimentos Pulverizados por Chama", é amplamente utilizado na indústria e na pesquisa para avaliar as resistências de união de revestimentos de aspersão térmica. Trata-se de um teste de baixo custo e praticidade o qual justifica sua grande aplicação e aceitação.

Esta norma orienta que os corpos de prova utilizados como substrato devem ser cilindros de 25,4 mm de diâmetro e um comprimento de 25,4 mm. Este ensaio prevê a junção dos corpos de prova revestidos com uma contraparte de mesma dimensão, em aço baixo carbono SAE 1020. O dispositivo de fixação para esse ensaio é padronizado como mostra a figura 20.

Figura 20 - Dispositivo de compensação do ensaio ASTM C633



Fonte: Autor

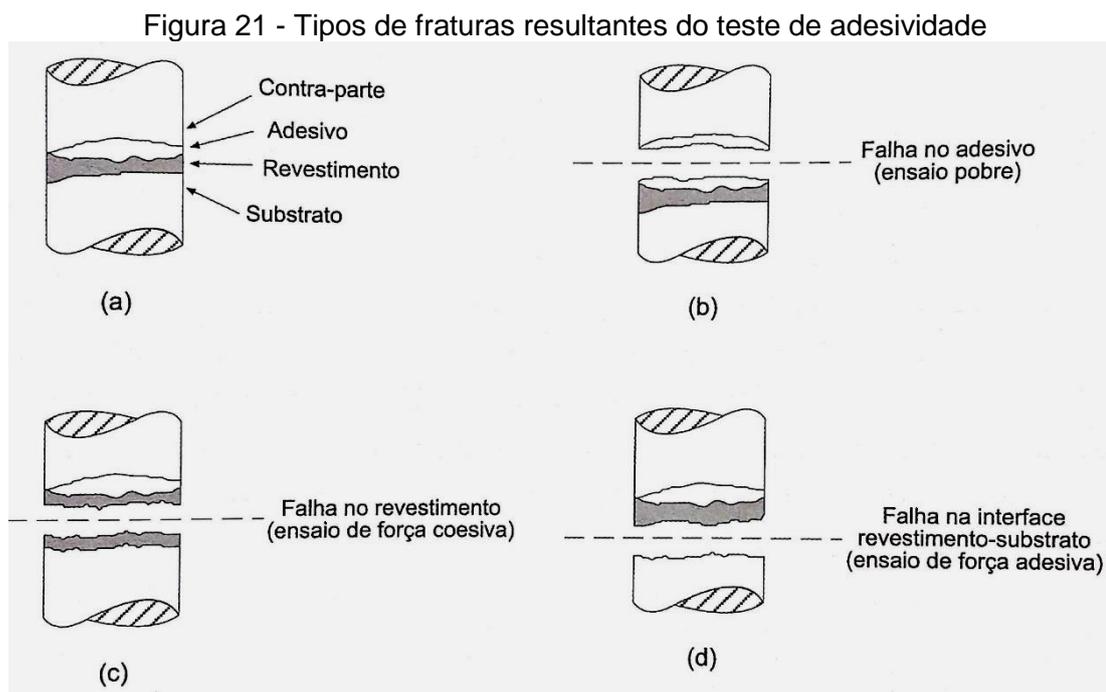
Através do ensaio de tração, é possível uma avaliação da resistência adesivo-coesiva dos revestimentos. Nesse ensaio com uso de adesivo podem ocorrer três tipos de fraturas em função do local onde ocorreu a mesma:

- fratura adesiva, se a fratura ocorre na interface revestimento/ substrato;
- fratura coesiva no interior do revestimento;
- e no adesivo, qualquer posição no interior do adesivo ou nas suas interfaces.

Para junção, utiliza-se um adesivo à base de epóxi, onde após a cura do adesivo, o conjunto é montado e tracionado com um controle da velocidade, que varia de 0,02 a 0,05 pol/min. A espessura mínima da camada a ser ensaiada é de 380  $\mu\text{m}$ .

O alinhamento da amostra com seu contra corpo também é muito importante na realização do ensaio, pois qualquer desvio irá interferir nos resultados (TSS, adaptado da ASTM C633).

A figura 21 mostra os tipos de fraturas oriunda do ensaio de tração para determinação da resistência adesiva.



Fonte: ASTM C633

Há também um teste denominado por arrancamento por fita, “Tape Test”, utilizado para avaliar a aderência de revestimentos de baixa e média aderência. Pode ser considerado como um teste não destrutivo, pois a superfície testada pode ser reparada. Ele é padronizado pela norma ASTM –D3359-95. É designado para revestimentos com uma faixa de adesão até 6 MPa. Sendo mais apropriado para avaliar adesão de tintas, vernizes e plásticos aplicados em metais.

### 3.4.2 Avaliação da porosidade nos revestimentos

Os revestimentos obtidos por aspersão térmica são formados por superposição de partículas achatadas, por isso apresentam um alto grau de porosidade. (McPHERSON, 1981) em seus estudos mostrou que os poros possuem

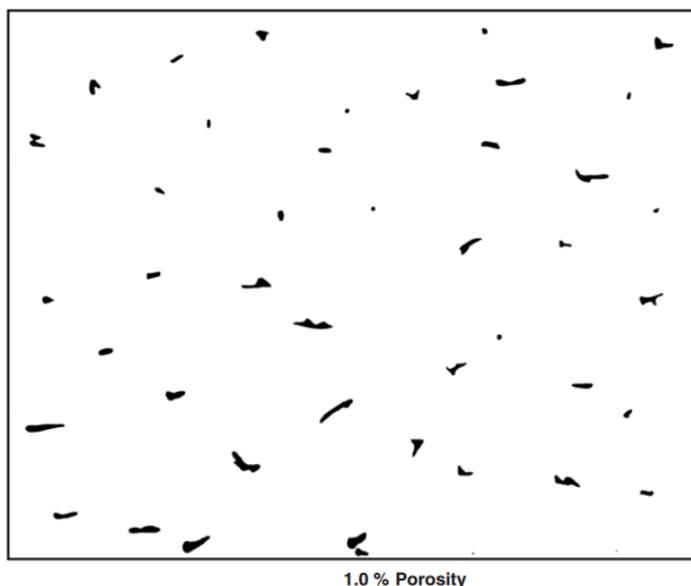
tamanhos de 10 a 100  $\mu\text{m}$ . A porosidade é inerente a todos os processos de aspersão térmica. As principais fontes responsáveis pelo surgimento de poros são:

- a) Ângulo de aspersão;
- b) Partículas sólidas não fundidas.

Mesmo não tendo um consenso sobre os mecanismos de formação de poros, há uma unanimidade de que a porosidade deva ser controlada. Vreijling (1998) em seus estudos analisou os mecanismos de formação e os classificou em sete tipos distintos, segundo a sua forma morfológica. A *American Society for Testing and Materials*, ASTM E-2109, sugere um método de teste padrão para determinar a percentagem da porosidade em revestimentos por aspersão térmica. Onde se avalia por diferença de coloração, o percentual de área ocupada pelos poros dentro do campo de medição. Esse método de ensaio trata apenas de métodos de medição recomendados e nada nele deve ser interpretado para definir ou estabelecer limites de aceitabilidade para qualquer valor medido de porosidade.

A figura 22 mostra um exemplo da determinação da porosidade de um revestimento aspergido termicamente por diferença de coloração, onde os pontos escuros contidos na imagem podem ser definidos como poros e seu cálculo pode ser definido pelo percentual da área ocupada pelos pontos pretos em relação à área analisada.

Figura 22 - Exemplo de determinação da porosidade ASTM E-2109



Fonte: ASTM E-2109

A Metco (1973) desenvolveu um método por reação química que torna possível identificar se os poros existentes em revestimento em substrato ferroso são passantes. Paredes (1998), em seu estudo do revestimento de alumínio para proteção do aço contra corrosão marinha, utilizou para obter a informação se a porosidade seria passante, aplicou o teste do ferrocianato de potássio ( $K_4 [Fe (CN)_6]$ ). Esse teste, parte da aplicação de uma solução contendo 1 a 2% de NaCl e de 0,1 a 0,5% de ferrocianato de potássio. Esta solução é colocada em gotas sobre a superfície revestida e por observação visual se detecta instantaneamente, de acordo com a coloração resultante. Se aparecer uma coloração azul, indica que a porosidade é passante, pois há nesse caso, traços de ferro, constituinte do substrato, caso seja um metal ferroso.

### **3.4.3 Avaliação da dureza dos revestimentos**

Pode ser definida a dureza como sendo uma resistência à penetração que um material apresenta. Muitas vezes se procura através dos revestimentos aspergidos melhorarem essa propriedade, aumentando assim a vida útil de componentes.

Para avaliar essa propriedade nos revestimentos, são realizados teste de dureza, que podem ser por riscamento e por indentação.

A indentação baseia-se no princípio da penetração de um penetrador padronizado em uma superfície, sob uma carga previamente conhecida. Onde a marca deixada na superfície é medida com auxílio de tabelas, sendo possível obter o valor da dureza.

Como os revestimentos são obtidos por formação de lamelas sobrepostas, onde há a presença de poros e óxidos, os valores de dureza no interior de um mesmo revestimento irão variar, pois como foi dito anteriormente, os revestimentos são anisotrópicos. Atentar que os valores tanto de macro e microdureza não deve ser comparada com o material bruto de outra forma que não seja por aspensão térmica.

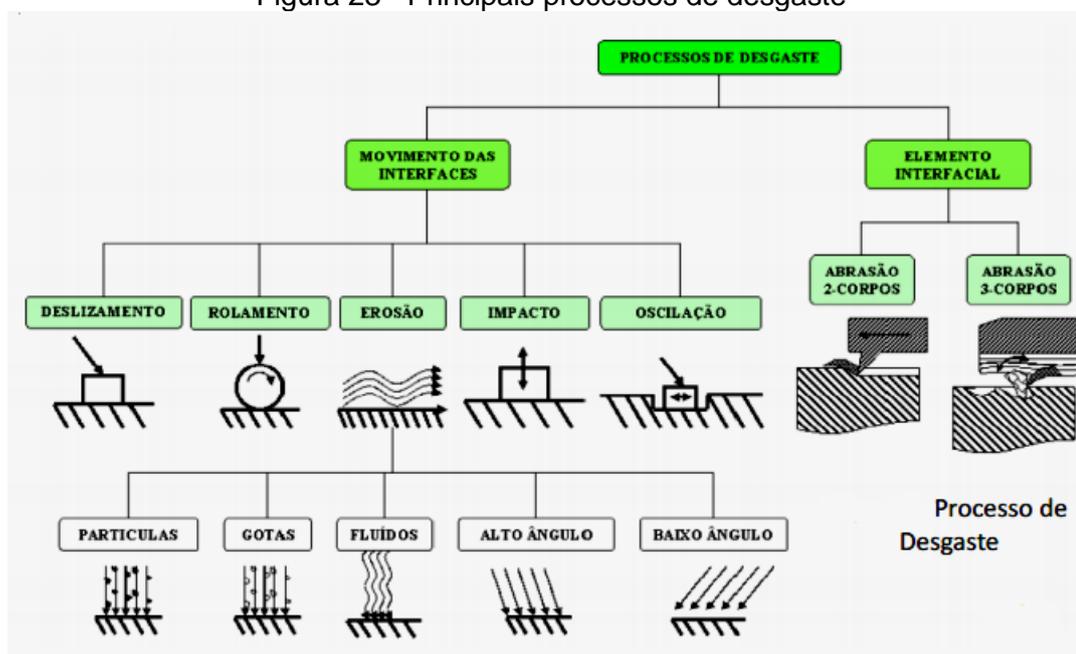
O ensaio de microdureza usualmente utilizado é o Vickers, que deve seguir o procedimento padrão conforme a norma ASTM E-384-89.

Já para o ensaio de macrodureza o mais indicado para revestimentos é o Rockwell conforme a norma ASTM E-18-94, sendo o Rockwell B para menores durezas e o Rockwell C, para materiais mais duros.

### 3.4.4 Avaliação do desgaste nos revestimentos

Antes de abordar a avaliação de revestimentos quanto ao desgaste abrasivo é importante definir o que é desgaste, o que é tribossistema e quais tipos e mecanismos de desgaste existentes. A ASTM G77-91 define desgaste como sendo “o dano em uma superfície sólida, envolvendo perda progressiva de massa, devido ao movimento relativo entre a superfície e o contato com outro material ou materiais”. A perda de massa da superfície sólida pode ocorrer pelo contato e movimento relativo de um sólido, ou um líquido ou gás. O desgaste está presente em diferentes situações as quais são abordados dentro de uma maior complexidade, definida pelo sistema tribológico, ou seja, o sistema que engloba a superfície que sofre o desgaste, o agente de desgaste e o meio em que as partes envolvidas estão em contato. A figura 23 mostra os principais processos de desgaste em que um componente ou equipamento pode estar submetido, incluindo o processo de desgaste por Abrasão.

Figura 23 - Principais processos de desgaste



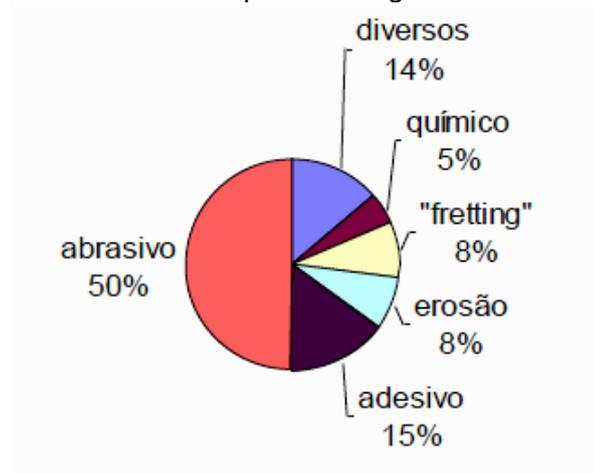
Fonte: Rijeza (2011)

A abrasão ocorre quando o material é retirado da superfície por ação de partículas duras. A taxa de desgaste depende do grau de penetração do abrasivo na superfície do material que está sofrendo a abrasão. Pode ser entendido por expressar a ideia de ranhura por partículas duras ou ásperas sobre a superfície do material (BALL, 1986). Segundo a ASTM G40-96, abrasão é o “desgaste devido a partículas

duras ou protuberâncias duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida”, pode ser interpretado também como a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície ao longo da qual se movem.

A figura 24 mostra a importância/predominância do desgaste abrasivo em relação aos demais tipos de desgaste. O desgaste abrasivo é responsável por cerca de 50% dos problemas de desgaste. Por está presente nos diversos setores industriais, pode ser a ele atribuído a causa da parada ou diminuição da produção, que envolve elevados custos para a manutenção dos ativos das empresas, portanto se faz necessário que tenha um melhor conhecimento desse mecanismo que em alguns casos podem ser benéficos e em outros maléficos, mas de um modo geral, o desgaste é conhecido como o vilão da história. O desenvolvimento de materiais ou revestimentos resistentes à abrasão é de fundamental importância.

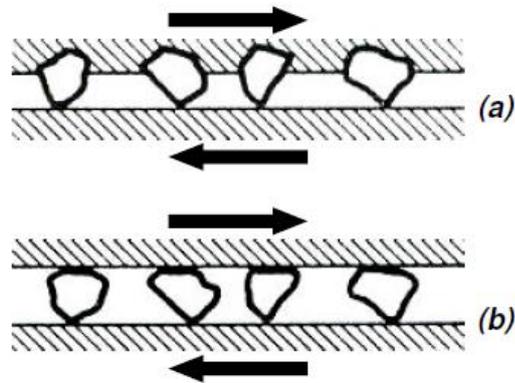
Figura 24 - Diferentes tipos de desgaste e ocorrência (%)



Fonte: Albertina (2003)

Tradicionalmente, o desgaste abrasivo tem sido classificado na literatura de língua inglesa de dois modos: “Two-body abrasive wear” ou desgaste abrasivo a dois corpos e “Three-body abrasive wear” ou desgaste abrasivo a três corpos (HUTCHINGS, 1992). Contudo outras classificações com base nos mecanismos de desgaste ou pela relação de movimento relativo das partículas também atualmente utilizados: “Grooving abrasion” ou desgaste abrasivo por riscamento de partículas e “Rolling abrasion” ou desgaste abrasivo por rolamento de partículas (TREZONA et al., 1999). A figura 25 (a) e (b) mostra esquematicamente estes diferentes tipos de mecanismos de desgaste abrasivo.

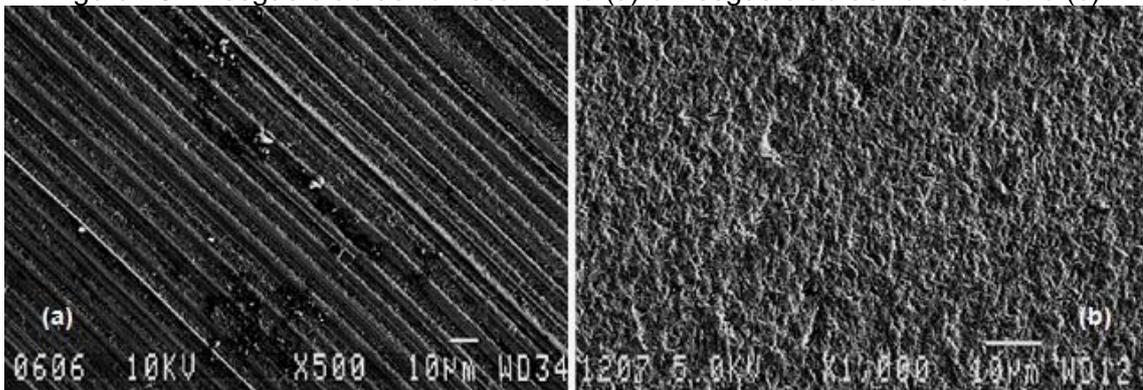
Figura 25 - Desgaste abrasivo dois corpos (a) e Desgaste abrasivo três corpos (b)



Fonte: Trezona et al. (1999)

A figura 26 mostra as diferenças das marcas de desgaste obtidas em amostras de aço ferramenta submetidas à abrasão por riscamento e abrasão por rolamento de partículas (TREZONA *et al.*, 1999). Em geral, o primeiro tipo de desgaste abrasivo por riscamento é uma ordem de grandeza maior quando comparado com o segundo (rolamento).

Figura 26 - Desgaste abrasivo riscamento (a) e Desgaste abrasivo rolamento (b)

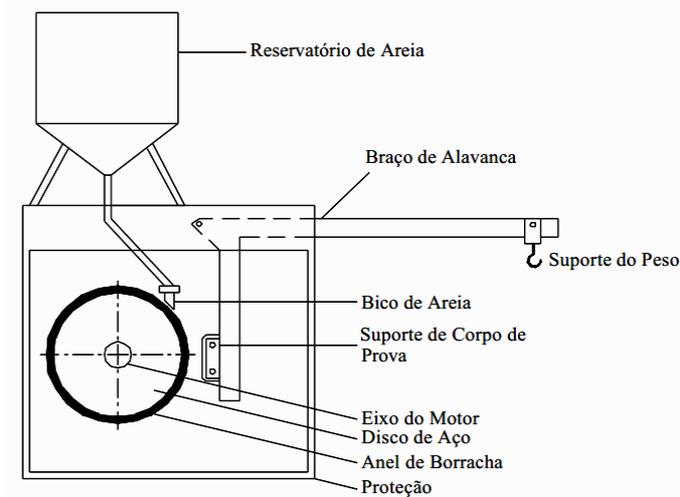


Fonte: Trezona *et al.* (1999)

Em geral os revestimentos duros por soldagem ou por aspensão térmica são avaliados em teste de abrasão por rolamento de partículas abrasivas. Testes como Pino sobre disco e Roda de Borracha são os mais utilizados.

O teste de Roda de Borracha é um dos mais recomendados para avaliação de materiais resistentes ao desgaste abrasivo (por exemplo, revestimentos duros). Este teste é normatizado pela ASTM G65. A figura 27 mostra de forma esquemática como é realizado o ensaio.

Figura 27 - Desenho esquemático do abrasômetro conforme ASTM G65



Fonte: ASTM G65, 91

O ensaio mede o desgaste devido a partículas duras forçadas contra e se movimentando sobre uma superfície sólida, simulando uma situação real. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova, cujas dimensões padrão são: 25,4 x 76,2 mm e espessura que varia de 3,04 a 12,7 mm e uma roda de borracha girando com uma carga aplicada sobre as amostras.

Os corpos de prova são pesados antes e depois do ensaio e a perda de massa é registrada. Para comparação, é necessário converter a perda de massa em perda de volume, em milímetros cúbicos conforme a formula (2) abaixo:

$$\text{Perda de volume} = (\text{perda de massa} / \text{densidade}) \times 1000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

Perda de massa = (g)

Densidade do material do revestimento = (g/cm<sup>3</sup>)

Existem cinco (05) procedimentos distintos especificados pela norma dependendo do tipo da dureza e tipo material que está sendo avaliado (tabela7).

Tabela 7 - Procedimentos do ensaio ASTM G65

Procedimento	Carga amostra (N)	contato	Ciclos	Abrasão linear (m)
A	130		6000	4309
B	130		2000	1436
C	130		100	71,8
D	45		6000	4309
E	130		1000	718

\*Tolerância da força  $\pm 3$  N

Fonte: ASTM G-65

A escolha de cada procedimento depende das seguintes considerações:

Procedimento “A” – É um ensaio relativamente severo, que lista materiais de baixa a extrema resistência abrasiva. Este ensaio é particularmente útil para materiais que variam de média a extrema resistência abrasiva.

Procedimento “B” – É uma pequena variação do procedimento “A”. Deve ser usado, quando a perda de volume desenvolvida pelo procedimento A, exceder a 100 mm<sup>3</sup>, é indicado para materiais de média e baixa resistência abrasiva.

Procedimento “C” – É uma pequena variação do procedimento “A”, e deve ser usado em camadas finas.

Procedimento “D” – É utilizado em materiais de baixa resistência abrasiva, pois a força atuante sobre o corpo de prova é bem menor (45 N).

Procedimento “E” – Uma pequena variação do procedimento “B”, recomendado para materiais com média ou baixa resistência abrasiva.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram avaliadas: a dureza, a microestrutura, percentual de porosidade, a adesividade e a resistência ao desgaste de três revestimentos aplicados por aspersão térmica. A seguir serão apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizados. A figura 28 apresenta um fluxograma da metodologia no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor

### 4.1 MATERIAIS

As matérias primas utilizadas para produção dos revestimentos avaliados neste trabalho foram: Metal duro (WC-Co), na forma de pó, o aço AISI 420 na forma de arame e a Liga fusível a base de Cromo, Níquel, Boro e Silício em pó. A escolha destas três ligas metálicas foi baseada na alta dureza dos revestimentos obtidos com estes materiais, propriedade que irá repercutir suas aplicações envolvendo resistência ao desgaste abrasivo, seja de peças novas ou recondiçionadas. Os revestimentos foram aplicados em um substrato de aço carbono AISI 1020 em formato de barras chatas e barras redondas. Este material foi escolhido por ser barato e normalmente utilizado em confecção de peças em geral.

A tabela 8 mostra a composição química dos pós e arame aplicados nos revestimentos bem como a do substrato, obtidas através dos certificados fornecidos no ato da compra.

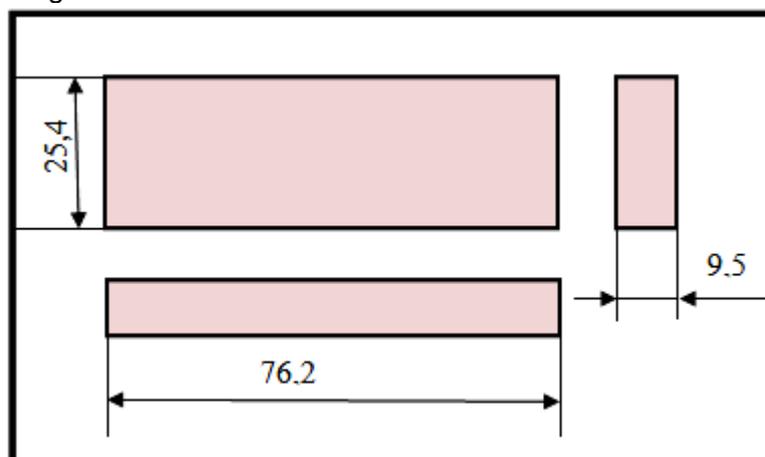
Tabela 8 - Composição química dos materiais utilizados (%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	B	Fe	Mo	W	Co
Pó de WC-Co	5										83	12	
Arame 420	0,34	0,37	0,39	12,16	0,39	0,029	0,024	0,03		86,26			
Pó de Cr, Ni, B, Si.	0,21	4,2		16,2	64,3			5,4	3,9	0,1	5,6		
Substrato	0,23	0,3	1,3			0,04	0,05			98,01			

Fonte: Autor

Foram produzidas amostras nas dimensões 10 x 10 x 25 mm para a caracterização microestrutural, retiradas das barras revestidas. Também foram produzidos diferentes tipos de corpos de prova para os testes de desgaste abrasivo e testes de adesividade. Para o teste de desgaste abrasivo (Roda de borracha-ASTM G65) foram confeccionados 10 corpos de prova no formato retangular nas dimensões 25,4 X 76,2 X 9,5 mm em aço carbono AISI 1020, conforme padrão estabelecido pela norma ASTM G65/91 (dimensões padrão para o ensaio desgaste abrasivo). A figura 29 mostra o desenho com as dimensões dos corpos de prova.

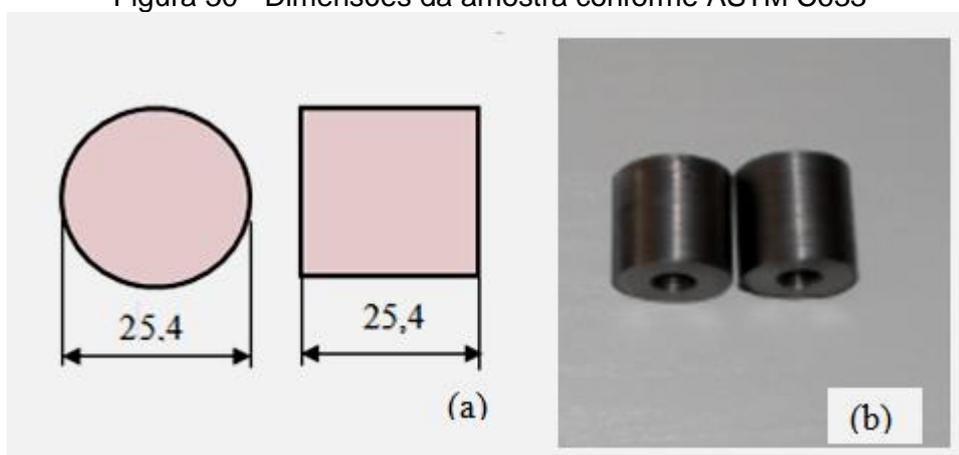
Figura 29 - Dimensões da amostra conforme ASTM G65



Fonte: Autor

Para os testes de adesividade (adesividade) foram confeccionadas 09 amostras no formato cilíndrico seguindo o padrão estabelecido pela ASTM C633, em aço carbono ABNT 1020, nas dimensões: diâmetro 25,4 mm e comprimento de 25,4 mm, como mostra a figura 30.

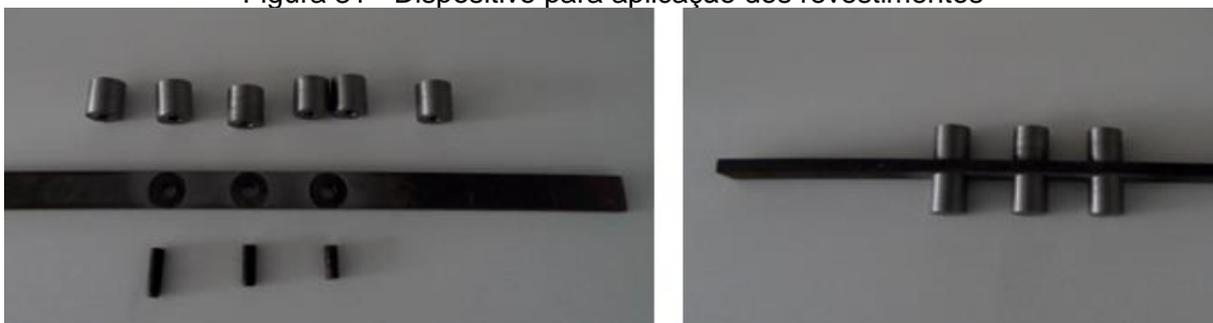
Figura 30 - Dimensões da amostra conforme ASTM C633



Fonte: Autor

Para as amostras que foram analisadas a aderência dos revestimentos, se fez necessário à confecção de um dispositivo para fixá-las no ato da aspensão, devido à pressão que o material aspergido atinge o substrato (amostras). A figura 31 mostra esse dispositivo utilizado.

Figura 31 - Dispositivo para aplicação dos revestimentos



Fonte: Autor

#### **4.1.1 PRODUÇÃO DOS REVESTIMENTOS**

Neste trabalho foram utilizados três diferentes processos de aspersão térmica conforme procedimentos e parâmetros recomendados por uma empresa aplicadora. Os processos foram:

- Arco Elétrico
- Oxi-combustão por alta velocidade - HVOF
- Combustão a chama a pó

Antes da aplicação dos revestimentos os corpos de prova foram submetidos a um processo de jateamento abrasivo com Oxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) grau SA. 2.1/2 conforme ISO 8501-1 e em seguida uma limpeza química a base de solventes orgânicos. Esta etapa é primordial para o sucesso no resultado dos revestimentos. O objetivo desta limpeza mecânica e química é a remoção de incrustações provenientes do processo de fabricação das barras (processo de laminação).

A seguir são apresentados os principais parâmetros utilizados em cada um dos processos / tipo de material para revestimento, tomando como base, literatura e experiência da empresa aplicadora.

#### **4.1.2 Arco elétrico - Revestimento da liga AISI 420**

Na aspersão da liga AISI 420 foi utilizado o processo Arco elétrico, com uma pistola modelo 8830 da Metco, com arame de diâmetro 1,6 mm. A figura 32 mostra a imagem da pistola utilizada nesse processo (arco elétrico).

Figura 32 - Pistola utilizada aplicação do revestimento da liga AISI 420



Fonte: Autor

Os parâmetros de controle utilizados no processo arco elétrico estão indicados na tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de controle utilizados pelo processo arco elétrico

Descrição	Valores
Diâmetro do arame de AISI 420	1,6 mm
Número de passes	4 passes
Pressão gás arraste (ar comprimido)	4 Bar
Intensidade de corrente elétrica	150 a 200 A
Tensão elétrica	25 a 30 V
Distancia aplicação	200 a 300 mm
Temperatura resfriamento	70 °C
Velocidade de aplicação	0,5m/7s por camada

Fonte: Autor

Nesse processo se faz necessário controlar a temperatura do substrato no ato da aplicação, onde a mesma não deve ultrapassar 120° C, isso deve ser observado em cada passe. Caso o substrato atinja essa temperatura, deve-se aguardar a temperatura baixar para 70°. C e recomeçar. Essa recomendação é importante para evitar a formação de trincas provenientes das dilatações e compressões entre o material aspergido e o substrato. Magnani (2008), através de experimentos,

demonstrou que a velocidade e a distância de aplicação têm uma grande importância na aderência dos revestimentos aspergidos, pois essas variáveis influenciam na formação de poros, que diminuem a resistência dos materiais aspergidos termicamente.

No caso das amostras que foram revestidas com a liga AISI 420, fez-se necessário realizar ranhuras com profundidade de aproximadamente 0,5 mm nos corpos de prova, para melhorar a ancoragem dos materiais a serem aspergidos como mostra a figura 33, pois a intenção é obter uma camada com uma espessura superior a 1,5 mm, posteriormente essas amostras passaram pelo processo de usinagem em preparação para serem revestidas por WC-Co pelo processo HVOF.

Figura 33 - Amostra texturizada, jateada e posteriormente usinada para aplicação do WC-Co.

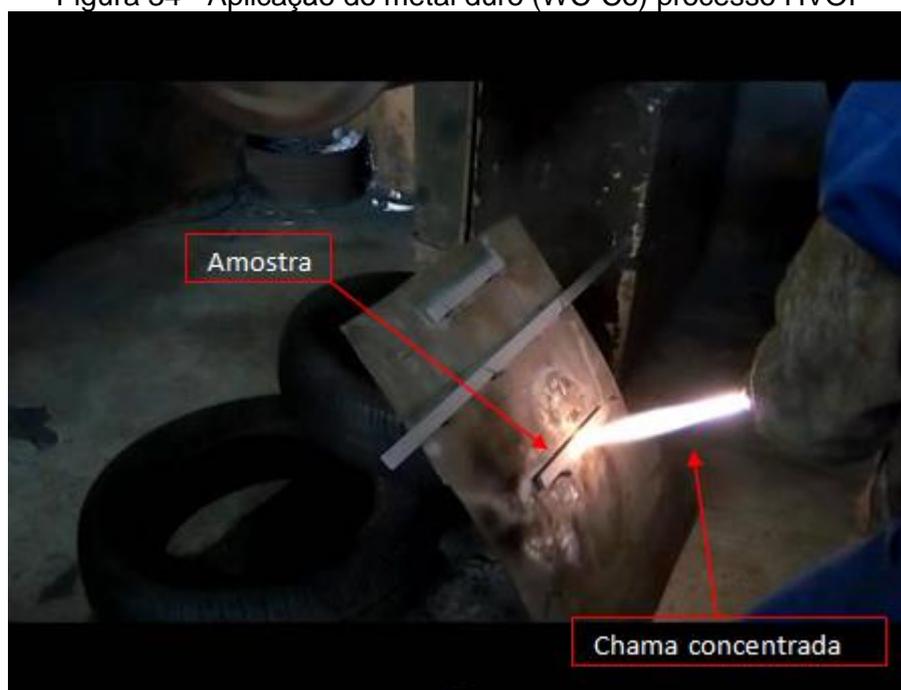


Fonte: Autor

#### 4.1.3 Oxi-combustão por alta velocidade - Revestimentos de WC-Co

A figura 34 mostra a aplicação pelo processo (HVOF) do revestimento de carboneto de tungstênio (WC-Co) com pós-metálicos em uma barra chata nas dimensões 25,4 mm de largura e 9,5 mm de espessura com um comprimento de 1000 mm. As amostras foram posteriormente cortadas nas dimensões padronizadas conforme a ASTM G65 (ensaio de desgaste abrasivo com roda de borracha). Detalhe da chama, o fluxo é mais concentrado em relação aos processos, arco elétrico e chama a pó.

Figura 34 - Aplicação do metal duro (WC-Co) processo HVOF



Fonte: Autor

Os parâmetros de controle utilizados na aplicação do Carboneto de Tungstênio estão descritos na tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de controle utilizado pelo processo HVOF

Descrição	Valores	Descrição	Valores
Tamanho do canhão	250 mm	Pressão Oxigênio	150 PSI
Distancia aspensão	300 a 400 mm	Vazão Oxigênio	40 SCFH
Taxa alimentação	50 g/ minuto	Pressão Termolene (propano)	100 PSI
Pressão gás arraste (N <sub>2</sub> )	150 PSI	Vazão Termolene (propano)	40 SCFH
Vazão gás arraste (N <sub>2</sub> )	30 SCFH	Pressão ar comprimido	100 PSI
Pistola (Tocha)	TAFA JP- 5000	Vazão ar comprimido	60 SCFH

Fonte: Autor

A figura 35 mostra detalhes da pistola utilizada na aplicação dos revestimentos pelo processo HVOF.

Figura 35 - Pistola aplicação do processo HVOF



Fonte: Autor

#### 4.1.4 Aplicação revestimentos liga fusível:

Para a aplicação da liga fusível a base de Cr, Ni, B e Si, foi utilizado o processo Flame Powder Spray ou combustão por chama convencional, conforme pode ser observado na figura 36.

Figura 36 - Aplicação da liga fusível (Cr, Ni, B e Si)



Fonte: Autor

Os parâmetros de controle na aplicação da liga fusível pelo processo chama a Pó estão descritos na tabela 11.

Tabela 11 - parâmetros de controle utilizado pelo processo chama a pó

Descrição	Valores
Taxa de alimentação do pó	50 a 100 g/ min
Taxa Fluxo gás de transporte	3 a 5 litros/min
Vazão do Acetileno	34 SCFH (normal pé cúbico/hora)
Pressão do gás combustível (acetileno)	12 Bar
Vazão do Oxigênio	34 SCFH (normal pé cúbico/hora)
Pressão Oxigênio	10 Bar
Distancia aplicação	Aproximadamente 50 milímetros
Temperatura de pré-aquecimento	140° C
Temperatura de aplicação	910° C

Fonte: Autor

A pistola utilizada no processo combustão à chama a pó foi do modelo 5P-II da Metco, como mostra a figura 37. Neste processo foi utilizado uma das variantes que é a aspersão e fusão, onde é realizada a fusão por chama por meio de um maçarico após a deposição do material no substrato, obtendo camadas fundidas mais densas, com baixa porosidade, onde se podem observar ligações metalúrgicas.

Figura 37 - Pistola utilizada processo chama a pó



Fonte: Autor

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Os revestimentos produzidos foram caracterizados metalograficamente e avaliados quanto à dureza, porosidade, resistência ao desgaste abrasivo e a adesividade no substrato. A seguir será detalhada cada uma destas técnicas utilizadas neste trabalho.

### 4.2.1 Metalografia dos revestimentos

A caracterização metalográfica dos revestimentos foi realizada através microscopias ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Na preparação das amostras para estas análises, corpos de prova foram embutidos, cortados, lixados e polidos. Esta etapa do trabalho foi realizada no laboratório de preparação metalográfica e análise de microscopia do DEMEC/UFPE

A etapa de corte foi realizada região transversal das barras revestidas, retirando-se amostras nas dimensões 10 x 10 x 25 mm. O equipamento utilizado foi o Policorte Modelo Aracor 80 da Arotec, utilizando-se como ferramenta de corte um disco diamantado e como fluido de refrigeração a água. Após esta etapa, os corpos de prova foram embutidos em baquelite, através do equipamento modelo PRE 40Mi da Arotec, resultando em amostras cilíndricas com 40mm diâmetro. Em seguida foram desbastadas numa lixadeira/Politriz circular modelo Arapol 2V da Arotec, finalizando as etapas de lixamento e polimento. As figuras 38 (a), (b), (c) e 39 mostram os referidos equipamentos utilizados na preparação metalográfica e as amostras após o embutimento.

Figura 38 - Policorte (a), Máquina embutimento (b) e Máquina lixamento (c).



Fonte: Autor

O processo de lixamento foi realizado com lixas na sequencia granulométrica de 120, 220, 320, 400, 600, 800, 900, 1200 e 1500, cujo objetivo é remover irregularidades e preparar para um acabamento mais polido nas faces dos corpos de prova, permitindo assim uma melhor visualização das interfaces entre o material aspergido e substrato. Vale salientar que as faces a serem analisadas na microscopia referem-se a uma amostra da secção transversal medindo 10 X 10 X 25 mm, retirada de cada barra revestida.

Figura 39 - Amostras embutidas para micrografias e ensaio microdureza Vickers



Fonte: autor

As análises de microestruturas dos revestimentos foram realizadas através de uma técnica de microscopia óptica (MO), equipamento modelo Olympus BX-51M com auxílio de software de imagens AnaliSys. A caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em um equipamento modelo Hitachi TM 3000 Tabletop Microscope. A figura 40 mostra respectivamente as imagens desses equipamentos.

Figura 40 - Microscópio óptico (a) e Microscópio eletrônico de Varredura (b)



Fonte: Autor

#### 4.2.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados no Compolab, laboratório da UFPE, utilizando um micro durômetro modelo EmcoTEST DuraScan (figura 41). As três condições de revestimentos foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers, carga de 500 gf. Foram realizadas quatro medições em regiões aleatórias dos revestimentos.

Neste experimento essas medições foram realizadas na secção transversal, na direção perpendicular a superfície, o que se justifica um valor de dureza maior. Nos ensaios de microdureza a preparação da superfície é fundamental. A natureza dos abrasivos utilizados no lixamento pode influenciar nos valores obtidos.

Não foi realizada a medição de dureza no substrato, pois não era objetivo deste estudo.

Figura 41 - Durômetro para medição microdureza Vickers



Fonte: Autor

#### **4.2.3 Medição da porosidade dos revestimentos**

A medição da porosidade foi realizada através da diferença de fase com o auxílio do microscópio ótico modelo Olympus BX-51M e um programa de imagem denominado AnaliSys. Para essa finalidade, foram dimensionadas aleatoriamente três áreas distintas em cada amostra e por coloração foi contado o percentual de pixels de uma determinada cor por unidade de área. A norma ASTM E-2109 orienta esse tipo de avaliação (diferença de coloração) para determinação de poros, porém a mesma comenta que esse procedimento não pode ser utilizado para caracterizar limite de aceitabilidade para qualquer valor obtido.

#### **4.2.4 Teste de desgaste abrasivo conforme norma ASTM G-65**

Os testes de desgaste abrasivo foram realizados no laboratório de desenvolvimento da empresa Rijeza Metalurgia, localizada na cidade de São Leopoldo/RS. O equipamento utilizado nestes testes é denominado Abrasômetro Roda de Borracha, de acordo com a norma ASTM G65. A figura 42 mostra um exemplo típico deste equipamento conforme especificado pela norma.

Figura 42 - Abrasometro conforme ASTM G65



Fonte: CISP

O abrasômetro é constituído de uma roda metálica revestida em uma borracha de material polimérico e dureza padronizada de 64 Shore A. A amostra é pressionada contra a roda através de um braço articulado e o abrasivo introduzido na região entre amostra/roda de borracha. A diferença de pesagem das amostras antes e após ensaio é utilizada como medida do desgaste. Os testes de abrasão são reportados por perda de volume por milímetros cúbicos. Materiais com maior resistência abrasiva apresentarão menor perda de volume.

As condições de teste escolhidas foram de acordo com a norma ASTM G65, como segue: Procedimento E (é uma variação do procedimento B, cujos resultados são equivalentes, guardada as devidas proporções). Esses parâmetros constam na tabela 7. O Abrasivo utilizado foi areia ( $\text{SiO}_2$ ) de granulometria variando de 0,212 a 0,300mm, com uma vazão de 320 g/min.

As amostras revestidas utilizadas nestes testes de abrasão, foram obtidas de barras previamente revestidas que foram cortadas, em quatro peças, para cada revestimento, nas dimensões finais padronizadas para realização dos ensaios de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65. As figuras 43 e 44 mostram respectivamente as barras revestidas e as amostras cortadas dos revestimentos de metal duro WC-Co e da liga fusível a base de Cr, Ni, B e Si.

Figura 43 - Barras revestidas antes dos cortes



Fonte: Autor

Figura 44 - Amostras cortadas após revestimentos para teste desgaste abrasivo

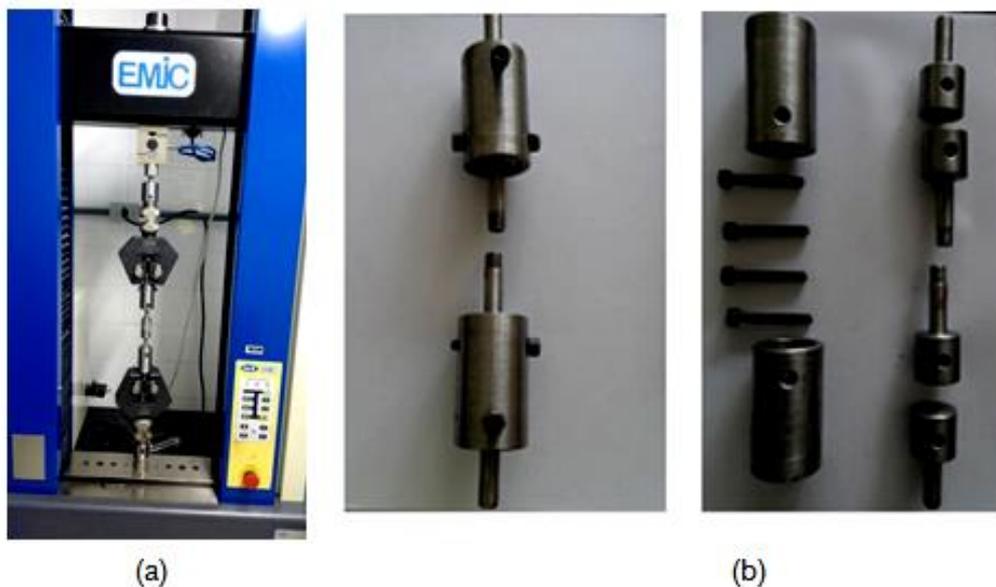


Fonte: Autor

#### 4.2.5 Teste de adesividade

O teste de adesividade foi realizado no laboratório de ensaio de tração do DEMEC/UFPE, utilizando-se um equipamento de ensaio de tração modelo DL 10000 fabricante EMIC com capacidade de carga máxima de 100 KN. A figura 45 (a) mostra o referido equipamento com a montagem das amostras para o teste de aderência por tração. Inicialmente houve a necessidade de confeccionar um dispositivo conforme recomendação da norma ASTM C6333 como mostra a figura 45 (b).

Figura 45 - Máquina ensaio tração montada com as amostras (a) e Dispositivo compensador conforme ASTM C633(b)



Fonte: Autor

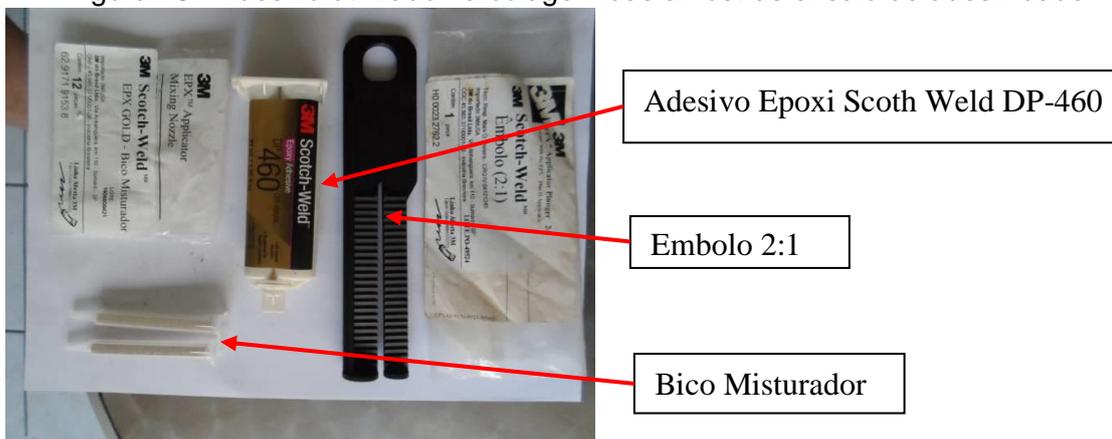
Além da máquina e dispositivos de fixação, a preparação das amostras é de fundamental importância para uma correta caracterização da adesividade dos revestimentos. A *Thermal Spray Society*, TSS, orienta um procedimento de colagem para atingir o desempenho esperado.

Antes da colagem as amostras revestidas utilizadas no teste de adesividade foram usinadas por retificação, nas suas faces, para garantir uma face plana, seguido de um lixamento para obter uma rugosidade (lixa com mesh 120). Essas duas etapas não foram possíveis cumprir na sua totalidade devido a elevada dureza dos revestimentos. Para tal fazia-se necessário a usinagem em uma máquina operatriz denominada retificadora plana, com a utilização de um rebolo diamantado ou de CBN (Nitreto Cúbico de Boro).

A colagem das amostras para os testes foi realizada com uso de um adesivo epóxi denominado **Scotch Weld DP-460** do fabricante 3M. O tempo de cura especificado pelo fabricante é de 72 horas. Foi necessário confeccionar um dispositivo para apoiar as amostras e garantir a concentricidade durante a colagem e o tempo de cura. A figura 46 mostra os materiais utilizados na colagem, já a figura 47 mostra o dispositivo confeccionado para apoio das amostras após a colagem. Obedecido ao

tempo de cura (96 horas), as amostras foram submetidas ao ensaio de aderência por tração.

Figura 46 - Adesivo utilizado na colagem das amostras ensaio de adesividade



Fonte: Autor

Figura 47 - Dispositivo apoio das amostras na etapa de colagem

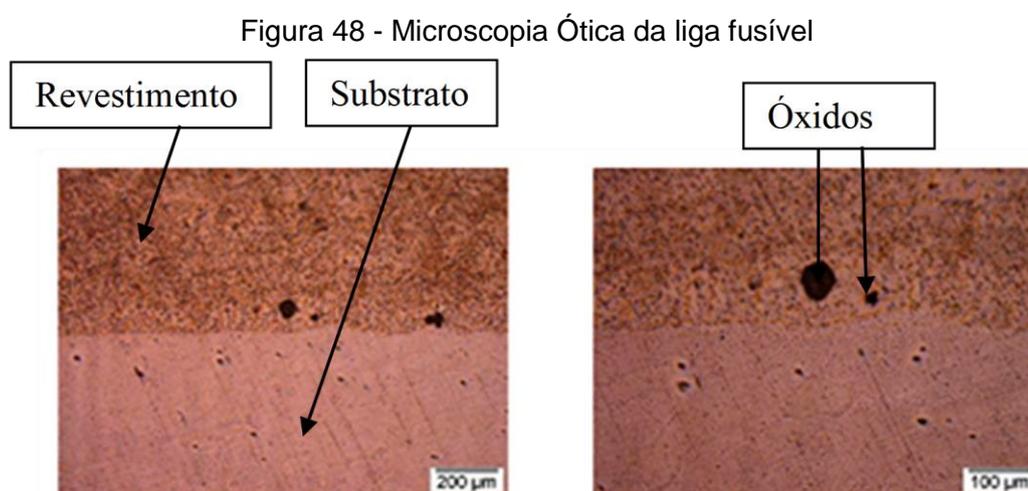


Fonte: Autor adaptado TSS

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DOS REVESTIMENTOS

A sequência das imagens obtidas na análise da microscopia ótica, realizadas nos três tipos de revestimentos, mostra que, no primeiro revestimento da liga fusível (Cr, Ni, B e Si) realizada pelo processo de chama a pó, pode-se observar na figura 48, uma característica peculiar, que irá diferenciá-lo dos demais. Trata-se da não observação das lamelas, pois nesse processo, o substrato é previamente aquecido e logo após a aspersão do material no substrato, ou seja, completada a deposição, é realizada a fusão com o uso de uma chama (900 a 1175°C) para melhorar a densidade e a aderência. Em geral as ligas a base níquel, com adições de boro, fósforo ou silício, servem como agentes fluxantes, abaixando assim o ponto de fusão. Portanto, a presença de óxidos se dá pela reação desses elementos com o oxigênio. A presença de poros não foi muito evidenciada, sendo necessária a utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV), para uma melhor visualização e evidenciar sua presença.

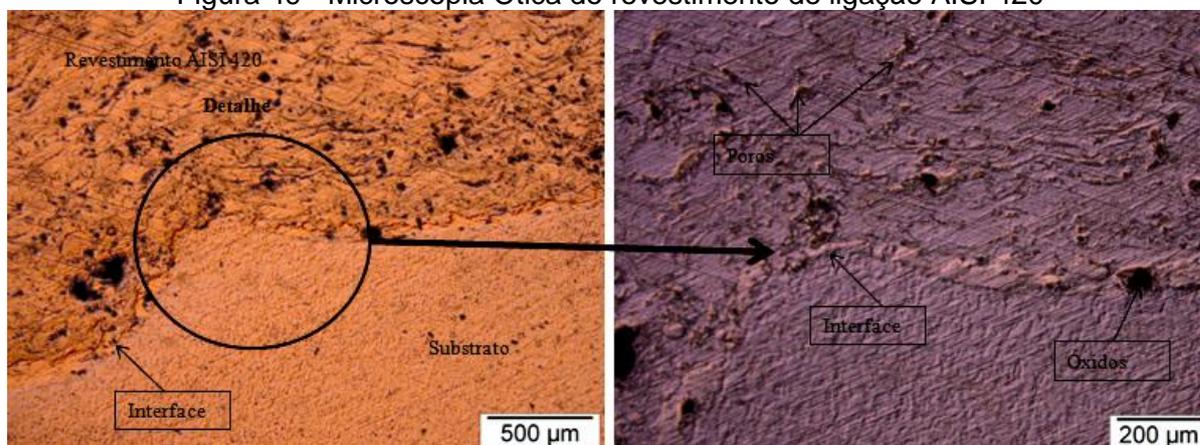


Fonte: Autor

O segundo revestimento analisado foi a liga AISI 420 aspergida pelo processo do arco elétrico. Esse processo possui uma alta taxa de deposição que pode chegar a 55 kg/h. Neste processo o aquecimento do substrato é menor, porque não há chama tocando no substrato. Pode-se identificar com mais clareza as lamelas e presenças de óxidos. Segundo a metodologia proposta por Vreijling, é possível observar

porosidade nas amostras, numa maior quantidade as do tipo lamelar e micro trincas (figura 49).

Figura 49 - Microscopia Ótica do revestimento de ligação AISI 420



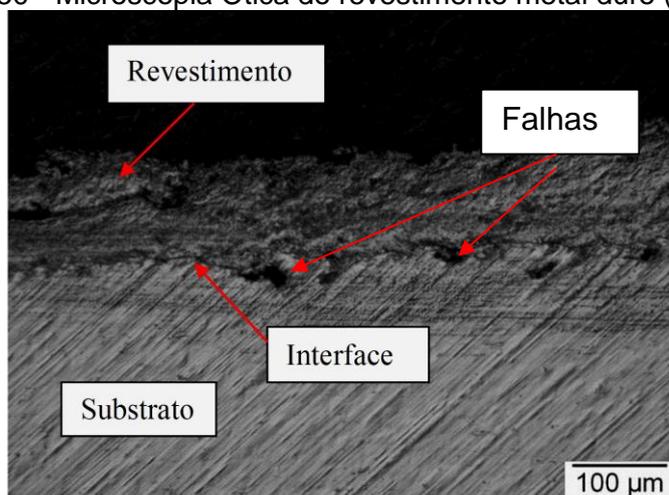
Fonte: Autor

Outra característica observada, é que na interface desse revestimento tivesse havido uma interação metalúrgica, porém após a realização do MEV com o auxílio do EDS, nesta região, foi constatado em se tratar de uma dissolução de níquel (86,52% wt).

O terceiro revestimento realizado foi de metal duro (WC- Co) na forma de pó, aspergido pelo processo HVOF. A figura 50 mostra esse revestimento, onde se observa a baixa aderência na interface com o substrato, que pode ter sido provocada em função da distância entre a pistola e o substrato e a velocidade de aplicação do revestimento, pois a aplicação foi realizada de forma manual.

Katranidis *et al* (2016) em seus estudos de revestimentos de um metal duro WC-17Co aplicados pelo processo HVOF em peças de formas geométricas complexas, constatou a forte influência do ângulo formado entre a pistola e a peça e também a distância de aplicação, ou seja, quanto mais oblíquo for esse ângulo e menor for a distância da pistola a peça, as propriedades dos revestimentos serão sensivelmente comprometidas, sendo a porosidade e as tensões residuais as mais afetadas.

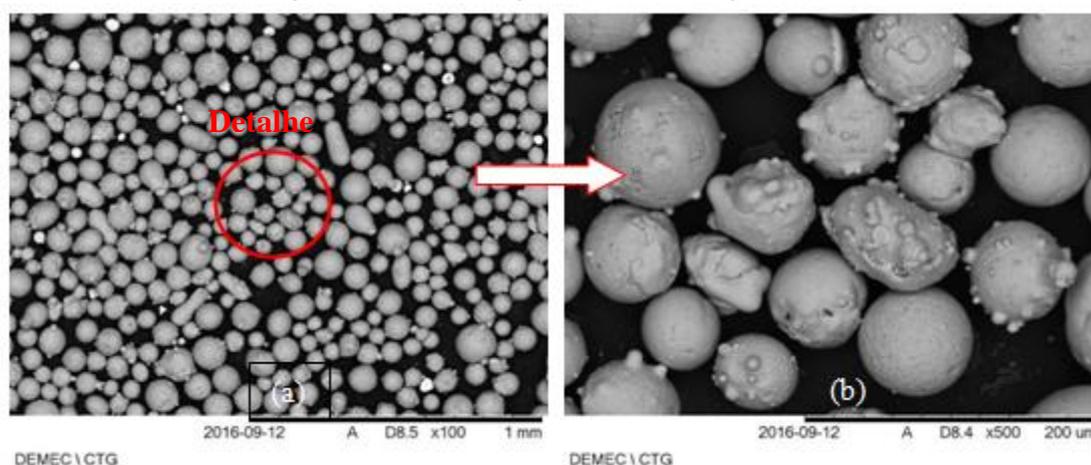
Figura 50 - Microscopia Ótica do revestimento metal duro (WC-Co)



Fonte: Autor

Neste estudo foram analisadas as formas morfológicas, as dimensões e a composição química dos elementos contidos nos pós metálicos, utilizados nos processos convencional de chama a gás e Oxi-combustão de alta velocidade (HVOF). A figura 51 (a) e (b), mostram as imagens obtidas no MEV dos pós aplicados no revestimento da liga fusível. Podemos observar que a morfologia do pó tende mais para forma esferoidal com diâmetros variados.

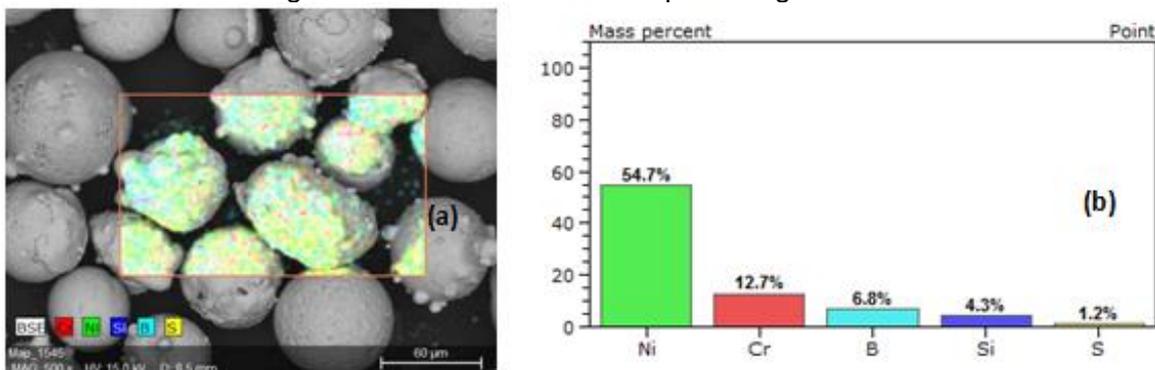
Figura 51 - Morfologia dos pós da liga fusível



Fonte: Autor

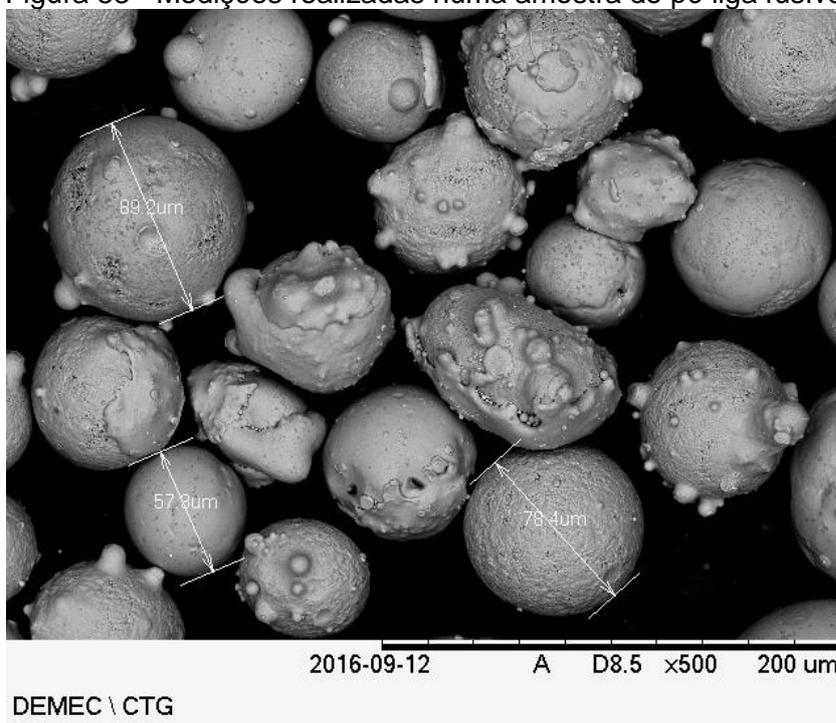
A figuras 52 mostra o EDS realizado no pós da liga fusível e seus elementos constituintes. Já a figura 53 mostra algumas dimensoes realizadas nos pós da liga fusível.

Figura 52 - EDS realizado nos pós da liga fusível



Fonte:

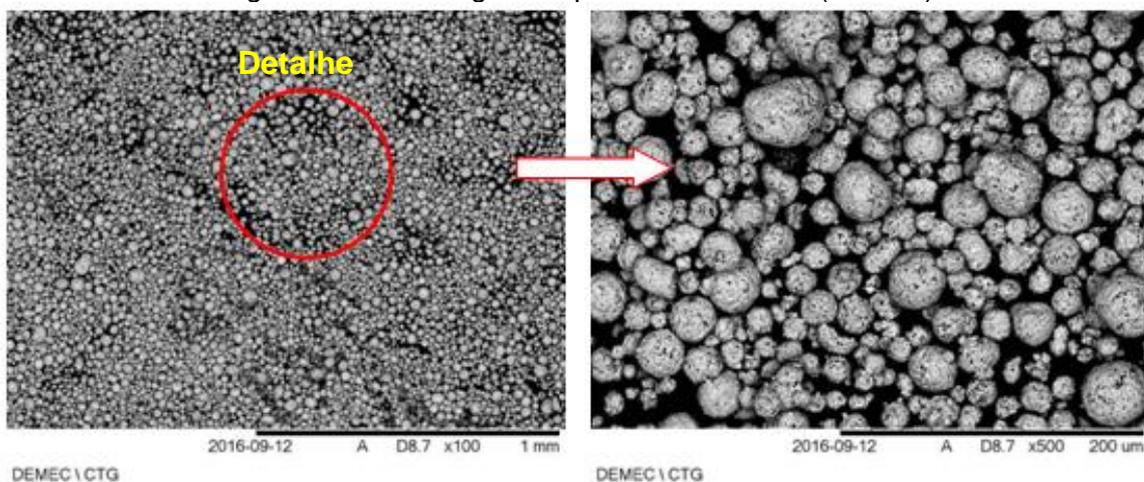
Figura 53 - Medições realizadas numa amostra do pó liga fusível



Fonte: Autor

A figura 54 mostra o MEV realizado nos pós da liga WC-Co, onde pode-se observar que eles são bastantes irregulares nas suas formas, porem seus tamanhos se comparados com os da liga fusível são bem menores.

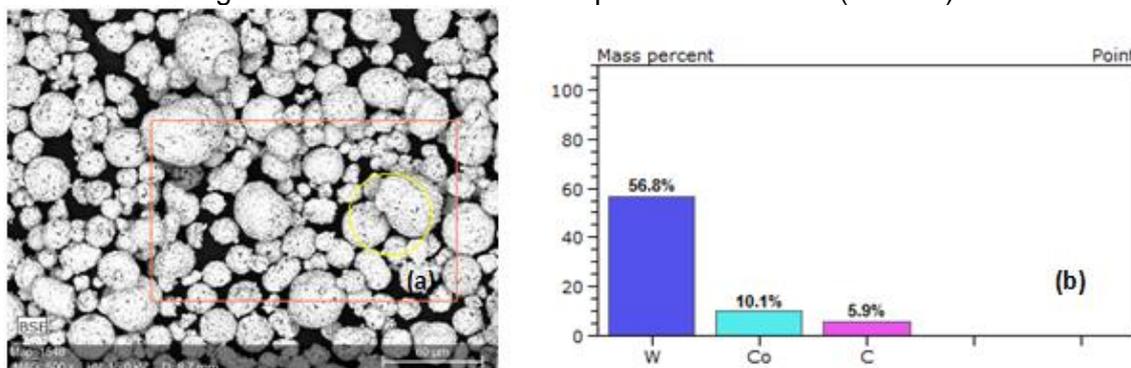
Figura 54 - Morfologia dos pós do metal duro (WC-Co)



Fonte: Autor

A figura 55 mostra o EDS realizado nos pós da liga WC-Co e seus elementos constituintes.

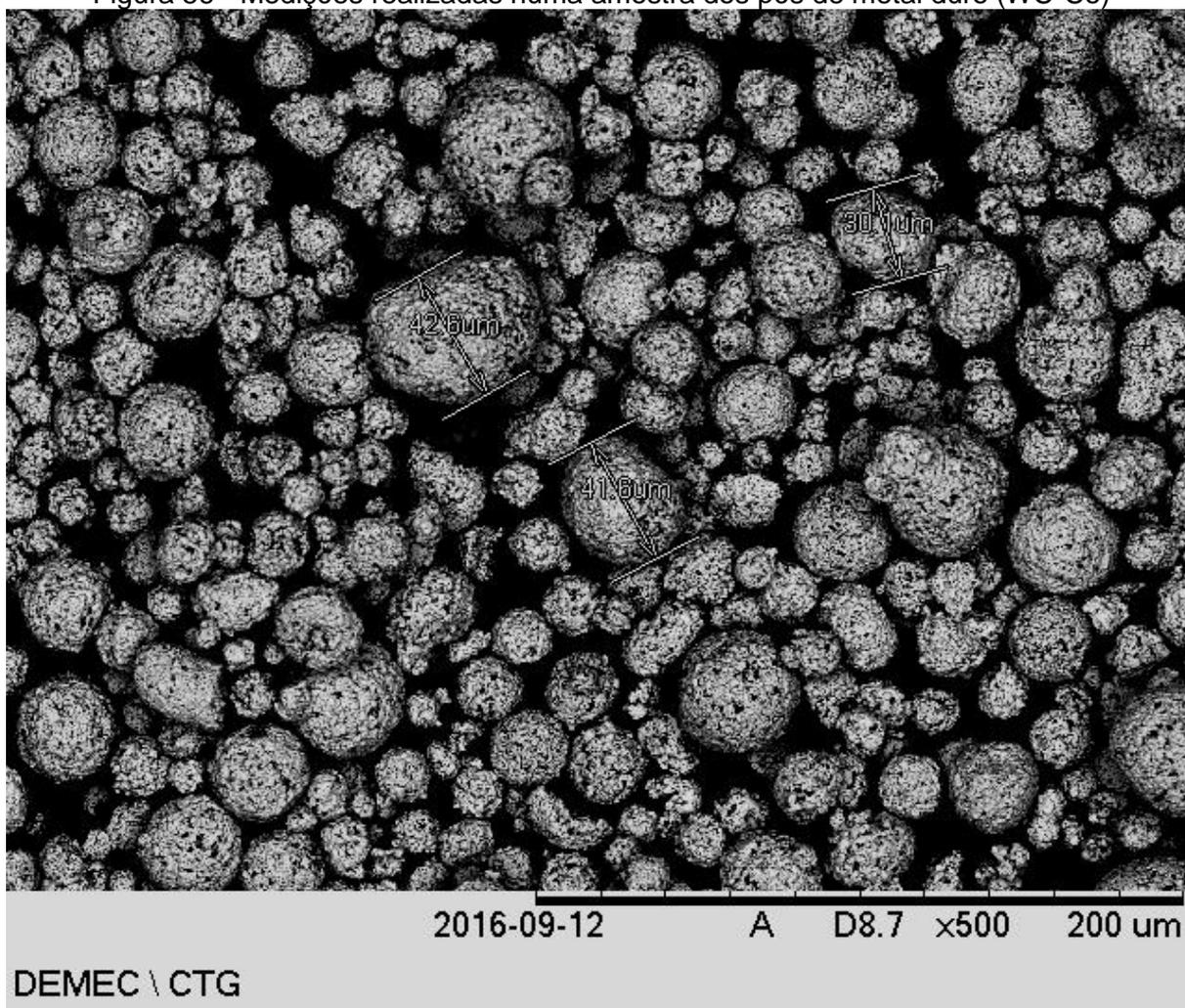
Figura 55 - EDS realizado nos pós do metal duro (WC-Co)



Fonte: Autor

Na figura 56 pode-se observar as dimensões realizadas nos pós da liga de WC-Co. Como esperados eles são menores se comprados com os pós da liga fusivel, porem são bastantes irregulares.

Figura 56 - Medições realizadas numa amostra dos pós de metal duro (WC-Co)

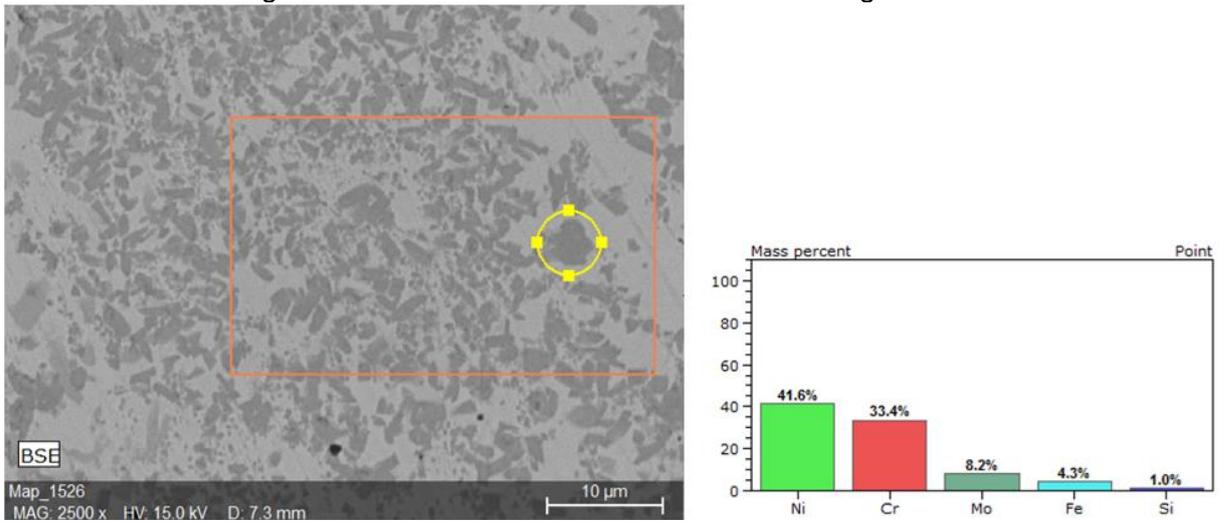


Fonte: Autor

O objetivo da realização da medição dos elementos contidos nos pós, foi comparar os resultados obtidos com os certificados do material fornecido pelo vendedor dos pós, conforme apresentado na seção anexos. Houve uma pequena alteração nos valores absolutos, algo que não comprometeu a informação contida nos mesmos, considerando que os resultados obtidos no MEV/EDS são semi quantitativos.

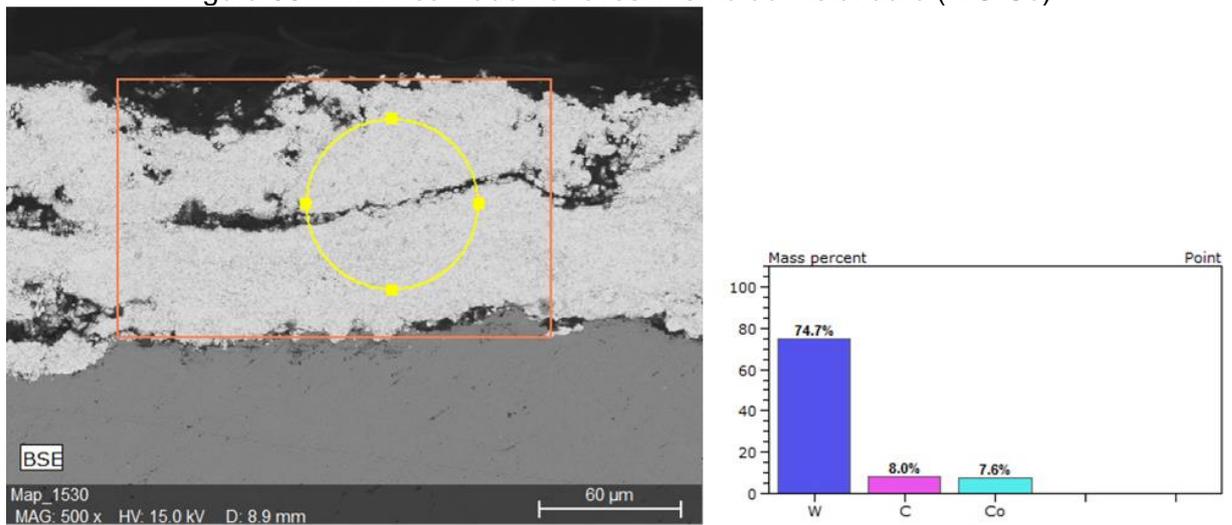
Nos três tipos de revestimentos foi realizado através da microscopia eletrônica de varredura com auxílio do EDS, a análise dos elementos constituintes nos revestimentos. As figuras 57 e 58 mostram em detalhe, os resultados obtidos apenas nos revestimentos da liga fusível e do metal duro.

Figura 57 - MEV realizado no revestimento da liga fusível



Fonte: Autor

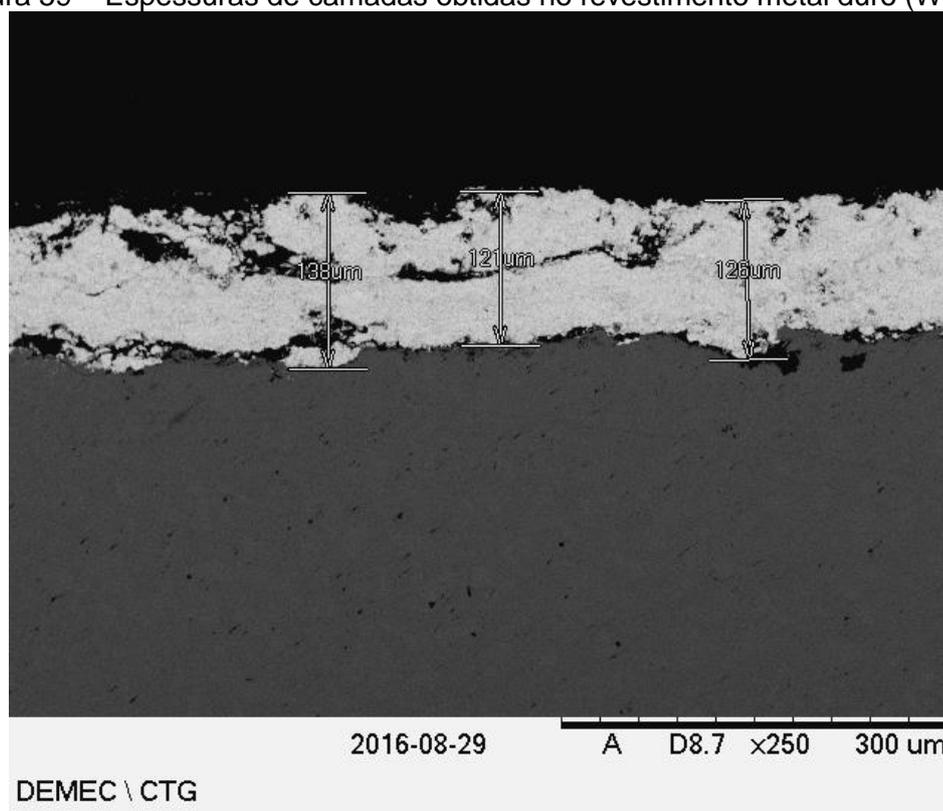
Figura 58 - MEV realizado no revestimento do metal duro (WC-Co)



Fonte: Autor

Utilizando o MEV foi possível realizar as medições das espessuras das camadas aspergidas. A figura 59 mostra as medições realizadas no revestimento de WC-Co. Podem-se alcançar espessuras de até 700 µm, conforme literatura.

Figura 59 – Espessuras de camadas obtidas no revestimento metal duro (WC-Co)

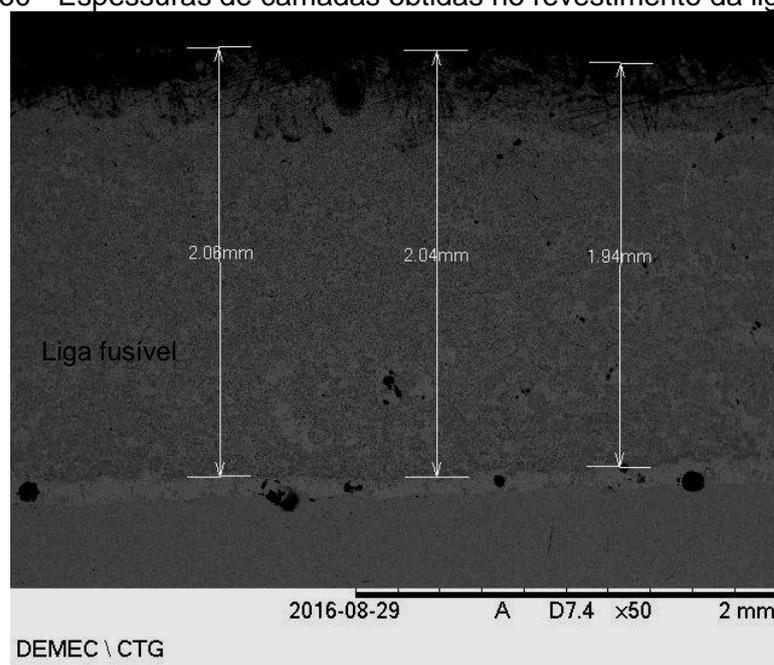


Fonte: Autor

A utilização de metal duro (WC-Co) como revestimento, visa exclusivamente obter uma superfície de elevada dureza e maior resistência ao desgaste abrasivo, porém não recomendada sua aplicação em ambientes corrosivos e altas temperaturas, pois ele possui de média / baixa resistência a ácidos.

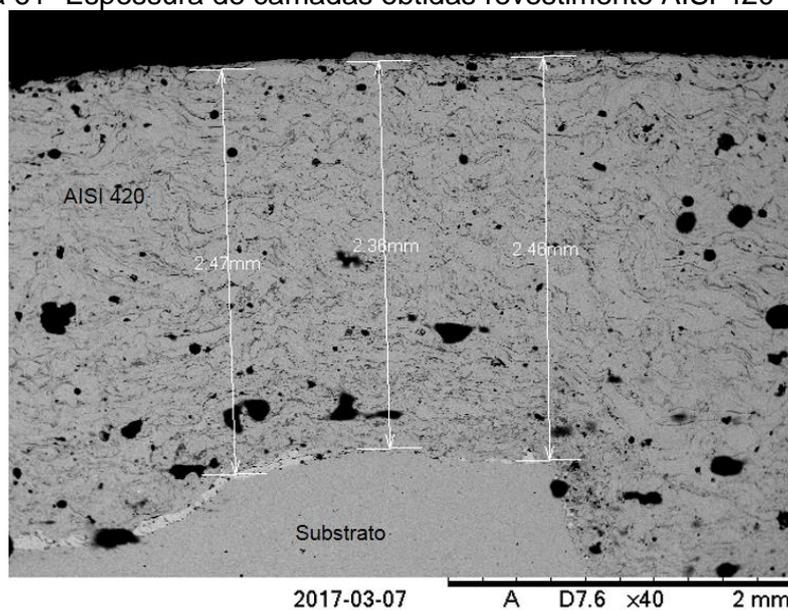
As figuras 60 e 61 mostram nos revestimentos da liga fusível e AISI 420 as espessuras das camadas obtidas. Valores esses, compatíveis com a especificação da literatura técnica, no que se refere a espessura de camada quando se utiliza os processos chama a pó e arco elétrico.

Figura 60 - Espessuras de camadas obtidas no revestimento da liga fusível



Fonte: Autor

Figura 61- Espessura de camadas obtidas revestimento AISI 420



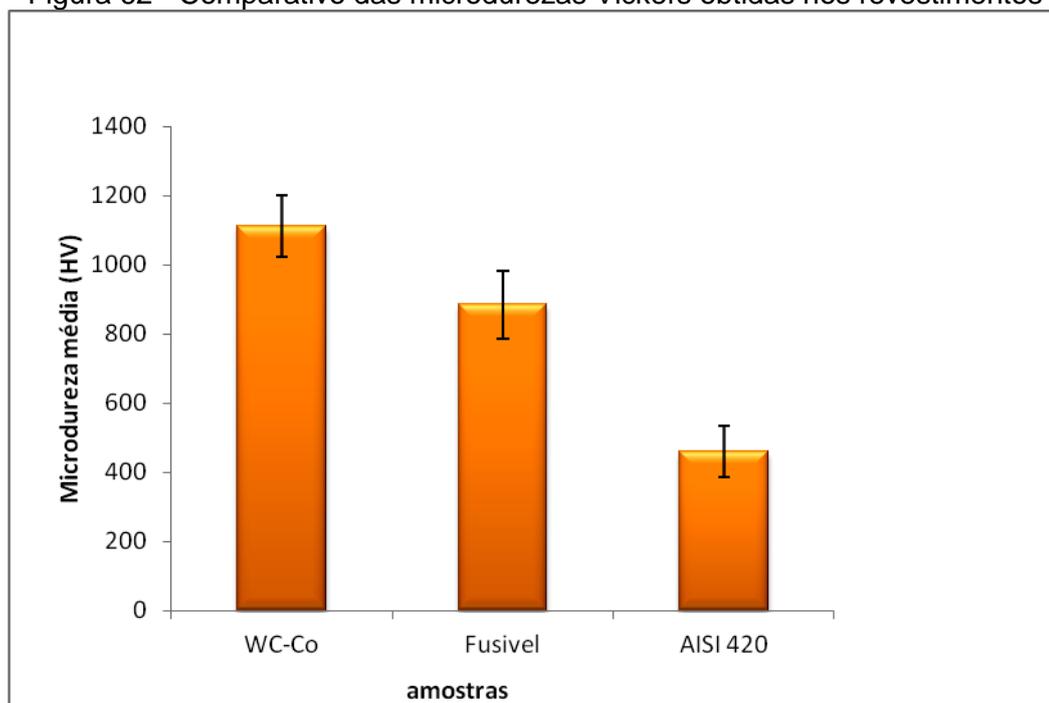
Fonte: Autor

## 5.2 TESTES DE DUREZA DOS REVESTIMENTOS

O ensaio de microdureza foi realizado na área da secção transversal dos revestimentos. Como os revestimentos aspergidos termicamente são anisotrópicos foi realizado três medições de dureza em regiões distintas de cada amostra. Com os

valores obtidos, foram levantados gráficos para verificar o comportamento da microdureza nos três tipos de revestimentos. Adotou-se como critério, a média das medições realizadas em cada amostra e seus respectivos desvios padrões, pois os revestimentos não são homogêneos e apresentam microestruturas lamelares que são alinhadas paralelamente ao substrato. Desta forma obtiveram-se valores diferentes como já era esperado. Os valores da microdureza estão apresentados na figura 62. Os resultados obtidos estão compatíveis com a literatura consultada (Rijeza, 2011). Carvalho (2007) realizou ensaios de microdureza em uma liga de AISI 420 aplicados por aspersão térmica pelo método arco elétrico obtendo um valor médio de  $401\text{HV}_{0,5}$ , sendo compatíveis com os obtidos neste trabalho. A figura 66 mostra um comparativo entre as durezas obtidas em cada revestimento (valores médios)

Figura 62 - Comparativo das microdurezas Vickers obtidas nos revestimentos



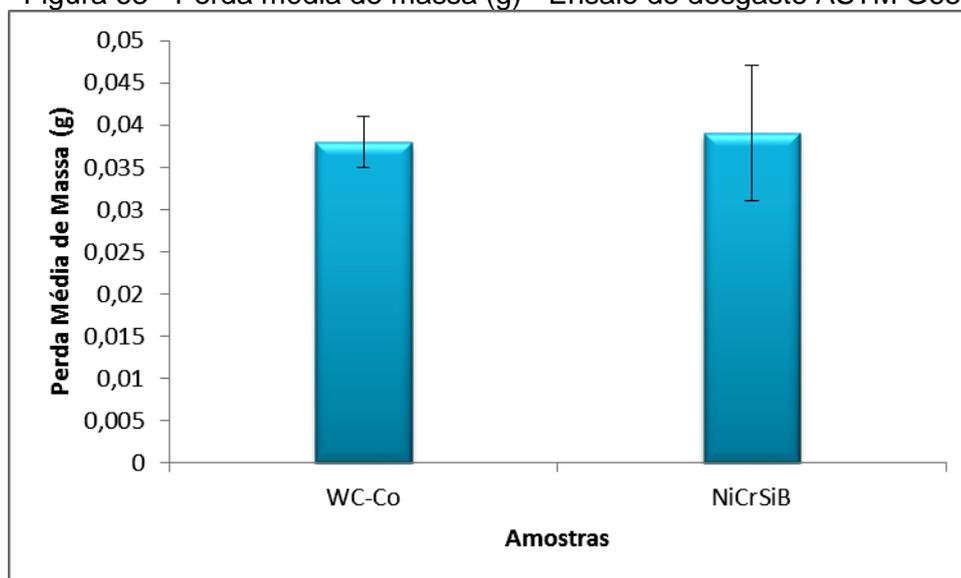
Fonte: Autor

Lutz (2014) realizou experimentos com metais duros WC-12Co e  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -25NiCr aplicados pelo processo HVOF como uma alternativa aos revestimentos a base de TiC (carboneto de titânio), obtendo resultados de micro dureza na faixa de  $1250\text{HV}_{0,3}$ , bem próximo dos resultados nesse estudo.

### 5.3 DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS

Os ensaios realizados para avaliação da taxa de desgaste entre os revestimentos de WC-Co e da liga fusível (NiCrSiB), mostraram-se que ambos materiais possuem uma boa resistência ao desgaste abrasivo e que praticamente se equivalem. Os parâmetros utilizados neste ensaio foi o estabelecido pela norma ASTM G65 (desgaste abrasivo por roda de borracha), procedimento E. Os gráficos representados na figura 63 mostram a perda média de massa (g), após a realização dos ensaios.

Figura 63 - Perda média de massa (g) - Ensaio de desgaste ASTM G65



Fonte: Autor

Pode-se observar a tabela 12 que o revestimento com metal duro (WC-Co), possui uma menor variação em média da perda de massa se comparado com o revestimento da liga fusível. A opção de utilizar um entre os dois revestimentos para recomposição dimensional, deve ser observado também outros fatores, tais como: Custo do material aplicado, a forma geométrica do componente, usinabilidade dos revestimentos, necessidade de uma camada de ligação, tempo de vida útil estimado para o componente/equipamento que estará submetido a aplicação do revestimento.

Outro ponto importante é que os materiais aplicados nos revestimentos devem igualar ou exceder os requisitos do projeto dos componentes originais. Na prática,

opta-se pelo revestimento de metal duro WC-Co para pequenas camadas (até 700  $\mu\text{m}$ ).

Tabela 12 – Valores das perdas de volume dos revestimentos após ensaio de desgaste abrasivo

Amostras	Perda média massa (g)	Perda média volume ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )
WC-Co	0,038	0,590
Fusível (NiCrSiB)	0,039	0,981
Desvio Padrão WC-Co	0,003	0,046
Desvio Padrão Fusível (NiCrSiB)	0,009	0,217

A figura 64, pode-se observar as marcas dos desgastes após os ensaios realizados. Praticamente não foram observadas grandes diferenças entre os dois materiais aplicados nas amostras.

Figura 64 - Amostras após ensaio desgaste abrasivo por roda de borracha



Fonte: Autor

Castro (2012) apresentou nos seus estudos, resultados de perda de volume realizado no abrasômetro por roda de borracha, valores compatíveis com os obtidos neste trabalho, houve uma variação que pode ser justificada pela rugosidade deixada nas amostras nos dois trabalhos.

Kong, Sheng (2017) mostrou através dos seus experimentos realizados em revestimentos utilizando metal duro WC-Co aplicados pelo processo HVOF seguido de um remodelamento a laser, que a superfície revestida apresenta uma melhor performance ao desgaste abrasivo quando lubrificada.

## 5.4 ADERÊNCIAS DOS REVESTIMENTOS

A análise da aderência dos revestimentos nas amostras, foi realizada por ensaio de tração, conforme a norma ASTM C633. Inicialmente foi realizado o teste de aderência da cola a ser utilizada. A escolha de uma cola ou adesivo para realização dos ensaios é uma etapa difícil, pois não se encontra no mercado dados que possam orientar um determinado adesivo para realização dos ensaios. Nos seus ensaios de aderência Maranhão (2006), utilizou um adesivo ultrabond 100. Já Paredes(1998), nos seus ensaios de revestimentos de alumínio por aspersão térmica, utilizou inicialmente um adesivo CA-9 do fabricante 3M porém não obteve sucesso, pois o mesmo se rompia com uma carga muito baixa. Posteriormente, utilizou um outro tipo de adesivo, Araldit AW 106 com um endurecedor HV 953U, obtendo sucesso. Nesse estudo, utilizou-se um adesivo epóxi Scotch Weld DP-460 do fabricante 3M, devido à difícil aquisição do adesivo utilizado por Paredes(1998). Foi realizado o teste de aderência do adesivo para obtenção da tensão de ruptura (MPa) e da carga de ruptura (KN) das amostras e do adesivo epóxi para análise das performances de cada revestimento.

A tabela 13 mostra os valores obtidos nos ensaios de aderência à tração, onde pode-se observar que os revestimentos que utilizaram a liga fusível foram os de melhor performance, esse fato se deu devido aos revestimentos de WC-Co não terem ficado com uma superfície perfeitamente plana, obtendo-se assim uma área de contato menor, dessa forma a camada do adesivo não ficou totalmente homogênea impactando no desempenho do teste de aderência por tração.

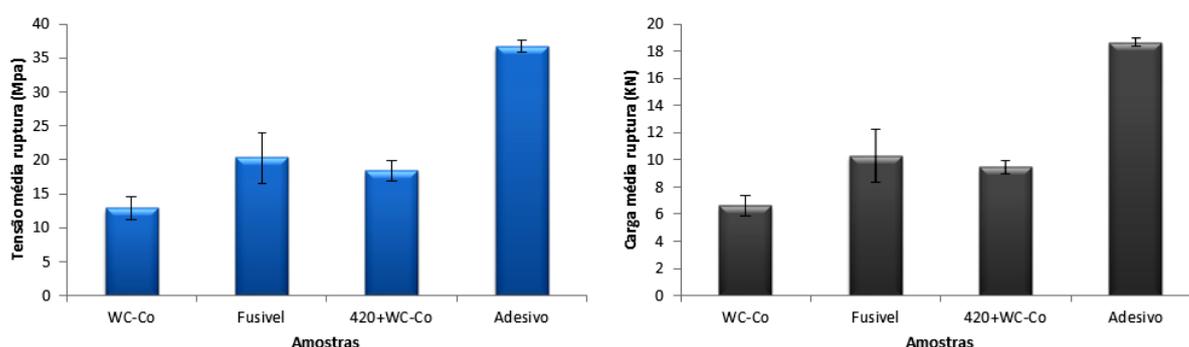
Tabela 13 - Dados obtidos ensaio de adesividade por tração (ASTM C633)

<b>Amostras</b>	<b>Corpo prova</b>	<b>Tensão Ruptura (Mpa)</b>	<b>Carga Ruptura (KN)</b>
WC-Co	CP-1	13,50	6,71
WC-Co	CP-2	14,83	7,51
WC-Co	CP-3	11,05	5,96
WC-Co	CP-4	12,09	6,12
	Media	12,87	6,58
	Desv. Pad.	1,65	0,70
Fusível	CP-5	15,37	7,78

Amostras	Corpo prova	Tensão Ruptura (Mpa)	Carga Ruptura (KN)
Fusível	CP-6	20,34	10,30
Fusível	CP-7	24,37	12,35
Fusível	CP-8	21,08	10,68
	Media	20,29	10,28
	Desv. Pad.	3,72	1,89
420+WC-Co	CP-9	17,56	9,3
420+WC-Co	CP-10	18,54	9,45
420+WC-Co	CP-11	17,07	8,98
420+WC-Co	CP-12	20,19	10,15
	Media	18,34	9,47
	Desv. Pad.	1,38	0,49

A figura 65, mostra os valores médios obtidos nos ensaios de aderência por tração nas amostras dos revestimentos em WC-Co, Fusível e 420+WC-Co e também do adesivo epoxi utilizado.

Figura 65 - Valores médios da tensão e carga de ruptura (ensaio de adesividade)



Fonte: Autor

Os resultados obtidos indicam que o revestimento de pior desempenho em termos de aderência, foi o que utilizou o metal duro (WC-Co), porém o desempenho desse revestimento foi afetado pelas falhas na aderência com o substrato observada na imagem mostrada na microscopia ótica (figura 50). Também deve-se ao fato da

dificuldade da usinagem das faces em deixá-las perfeitamente planas, pois suas faces ficaram poucas abauladas (necessitaria de usinar numa retífica plana com rebolo diamantado), desta forma, comprometeu a uniformidade da camada de adesivo colocada entre a face revestida e o seu contra corpo.

Uma solução para o aumento da adesividade em revestimentos de metais duros aplicados pelo processo HVOF foi apresentada por Kong, Sheng (2017) que submeteu as amostras revestidas com um metal duro WC-12Co a um remodelamento a laser, onde foi observada uma forte ligação mecânica, acompanhada de uma ligação metalúrgica, aumentando dessa forma, a adesividade.

A ASTM C633 não informa quais os valores mínimos de aderência que os revestimentos aspergidos termicamente devam ter para serem considerados aprovados, simplesmente ela retrata que a aderência do revestimento deve ser o suficiente para que o desempenho do mesmo atenda ao tempo de vida útil esperado para aquele componente que o recebeu.

A tabela 14, mostra os tipos de falhas dominantes ocorridas em cada revestimento com os respectivos valores de tensão de ruptura.

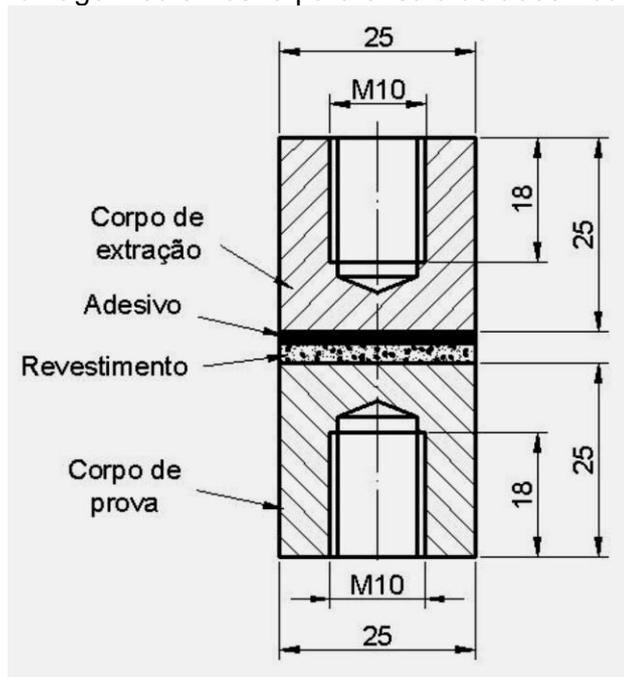
Tabela 14 - Tipos de falhas dominantes após ensaio de adesividade por tração

<b>Amostra</b>	<b>Tensão Ruptura (Mpa)</b>	<b>Tipo Falha dominante</b>
Cp-01(WC-Co)	13,5	Adesiva
Cp-02(WC-Co)	14,83	Adesiva
Cp-03(WC-Co)	11,05	Coesiva
Cp-04(WC-Co)	12,09	Coesiva
Fusível	15,37	Adesiva
Fusível	20,34	Adesiva
Fusível	24,37	Adesiva
Fusível	21,08	Adesiva
420+WC-Co	17,56	Adesiva
420+WC-Co	18,54	Adesiva
420+WC-Co	17,07	Adesiva
420+WC-Co	20,19	Adesiva

Tomando como base a norma Petrobras N-2568 ,onde ela informa que os revestimentos para serem considerados satisfatórios, devam apresentar um valor médio de tensão de ruptura de 13,8 MPa e que nenhum valor obtidos sejam inferior a 10,3 MPa ,pode-se concluir como aceitáveis os resultados obtidos neste trabalho. Vale salientar que essa norma refere-se a revestimentos a base de alumínio, zinco, suas ligas, aços inoxidáveis e em componentes metálicos que venham a ser exposto a ambientes corrosivos aplicados pelos processos a chama e arco elétrico.

A figura 66 mostra como se processa a montagem da amostra revestida com seu contra corpo para realização do ensaio de aderência por tração. Onde pode-se observar as posições da amostra e da sua contra parte após a colagem.

Figura 66- Montagem da amostra para ensaio de adesividade por tração



Fonte: Adaptado ASTM C633

A figura 67, mostra as falhas ocorridas nas amostras após a realização do ensaio de aderência por tração, que teve como objetivo obter a resistência adesiva dos revestimentos, sendo elas: as tensões e cargas de ruptura.

Figura 67 - Falhas dominantes ocorridas nas amostras no ensaio de adesividade por tração

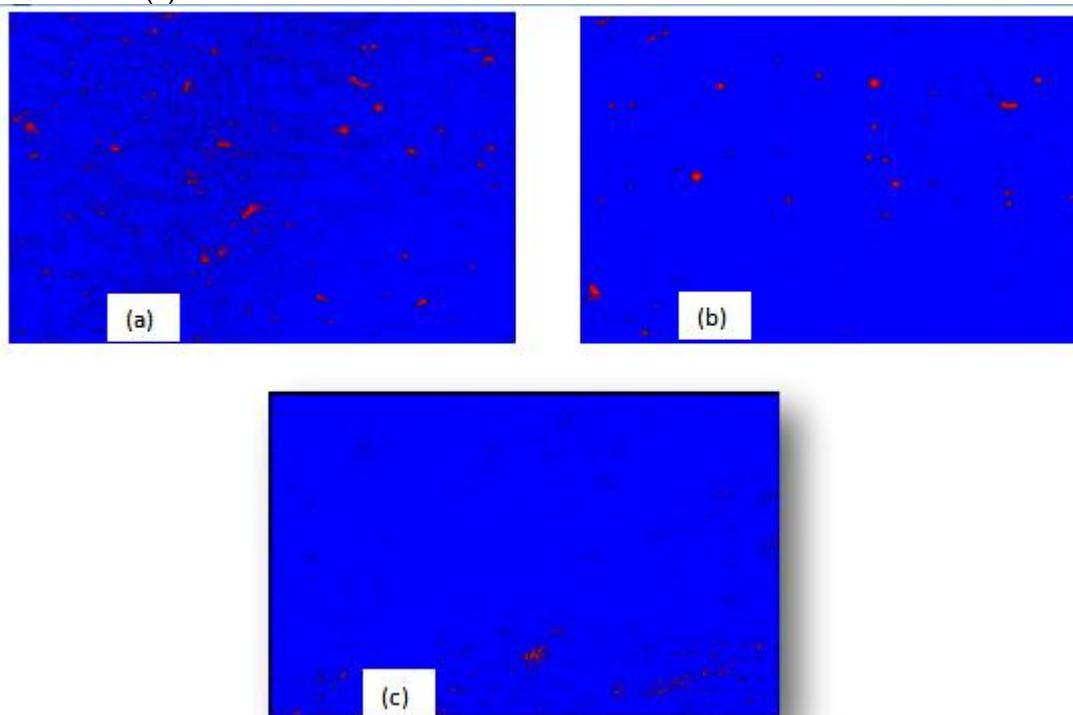


Fonte: Autor

## 5.5 POROSIDADE NOS REVESTIMENTOS

A determinação das porosidades nos revestimentos realizados foi obtida por coloração tomando como base as diferenças de fase, seguindo as orientações da norma ASTM E-2109, para tal foi selecionada aleatoriamente em cada revestimento três regiões distintas e seguida obteve-se o valor médio de porosidade para cada revestimento. A figura 68 mostra uma área analisada de cada revestimento.

Figura 68 - Determinação da porosidade dos revestimentos: AISI 420(a), Liga fusível (b) e Metal duro- WC-Co (c)



Fonte: Autor

Analisando o percentual de área ocupada pelos poros dentro do campo de medição no revestimento realizado pelo processo HVOF seus valores médios ficaram dentro da faixa esperada, ou seja, menor que 1%. Os demais revestimentos, liga

fusível e AISI 420 tiveram seus valores médios abaixo de 10%, conforme pode ser observado na tabela 15.

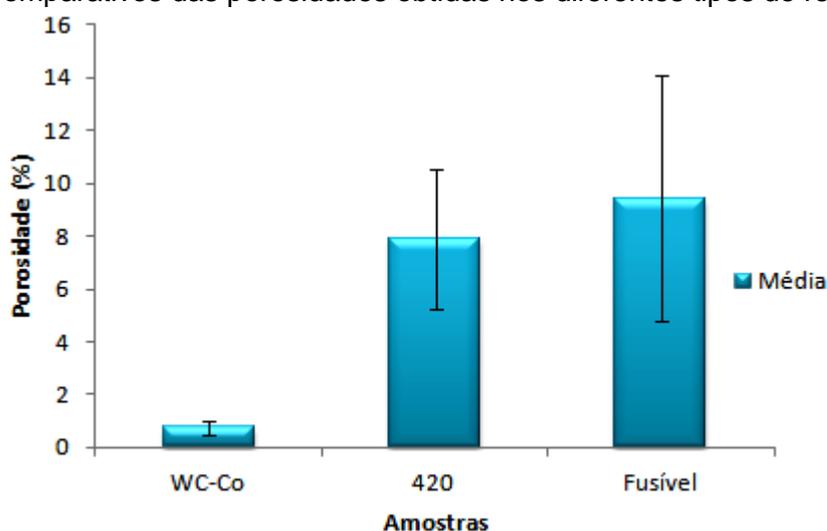
Tabela 15 - Valores médios de porosidade dos revestimentos (%)

	<b>WC-Co</b>	<b>AISI 420</b>	<b>Fusível</b>
Média	0,76	7,87	9,43
Desv.Pad	0,26	2,65	4,66

Fonte: Autor

A figura 69 mostra na forma de gráficos os resultados obtidos nas análises de porosidade dos revestimentos realizados. As literaturas especializadas informam que a porosidade obtida nos processos por aspersão térmica fica na faixa de 10 a 20%, portanto os revestimentos em termos de porosidade estão no patamar de aceitáveis.

Figura 69-Comparativos das porosidades obtidas nos diferentes tipos de revestimentos



Fonte: Autor

É comum nos revestimentos aplicados pelo processo de aspersão térmica, a presença de poros, ficando na faixa de 10 a 20 %, porem esse valor fica a menos de 1%, no caso do processo HVOF. A porosidade ocorre devido à concentração entre as partículas que se achatam e aderem-se as protuberâncias (irregularidades) da superfície. Ela tem forte correlação com o processo utilizado e com a velocidade em que as partículas são depositadas no substrato, causando uma influencia sobre os

materiais aspergidos e degradando assim as propriedades mecânicas (LIMA; TREVISAN, 2007). Um método eficaz para minimizar essa inconveniência é a aplicação de selantes, que tem como objetivo bloquear os poros e impedir a penetração do eletrólito até o substrato, evitando assim a falha prematura do componente ou peça.

Abdulla *et al* (2017) nos seus estudos comparando as propriedades tribológicas de cinco tipos diferentes de revestimentos: NiCrBSi/WC (50/50), NiCr (80/20), WC-C0 (88/12), WC/CoCr (75/25) e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr (75/25), observou que o revestimento mais adequado para prolongar a vida de um componente foi o WC/CoCr que apresentou menor coeficiente de atrito, rugosidade superficial e menor resistência ao desgaste. Em termos de porosidade, o revestimento NiCrBSi/WC foi o que apresentou o menor valor (0,32%).

Landova, Janette (2016) também nos seus estudos, utilizaram três revestimentos com metal duro: WC-Co, WC-CoCr e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr realizaram ensaios de adesividade, dureza e porosidade. Os melhores resultados foram obtidos pelo revestimento Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr (destaque para a microdureza de 1447HV<sub>0,1</sub>). Em termos de porosidade os ensaios mostraram que os tres revestimentos tiveram bons resultados, sendo o revestimento de WC-CoCr o mais poroso dos três (0,88%) porem abaixo de 1% conforme indica a literatura técnica.

## 5.6 ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO X CUSTO

O custo é um fator determinante na seleção do processo para revestimento. As empresas que utilizam essa tecnologia aplicam uma formula de cálculo para estimar o custo total de uma aspersion térmica como revestimento ou recomposiçao dimensional baseado em vários fatores como mostra a fórmula (3):

$$\text{Custo Total} = \text{CL} + \text{CPS} + \text{CAT}, \quad (3).$$

Onde:

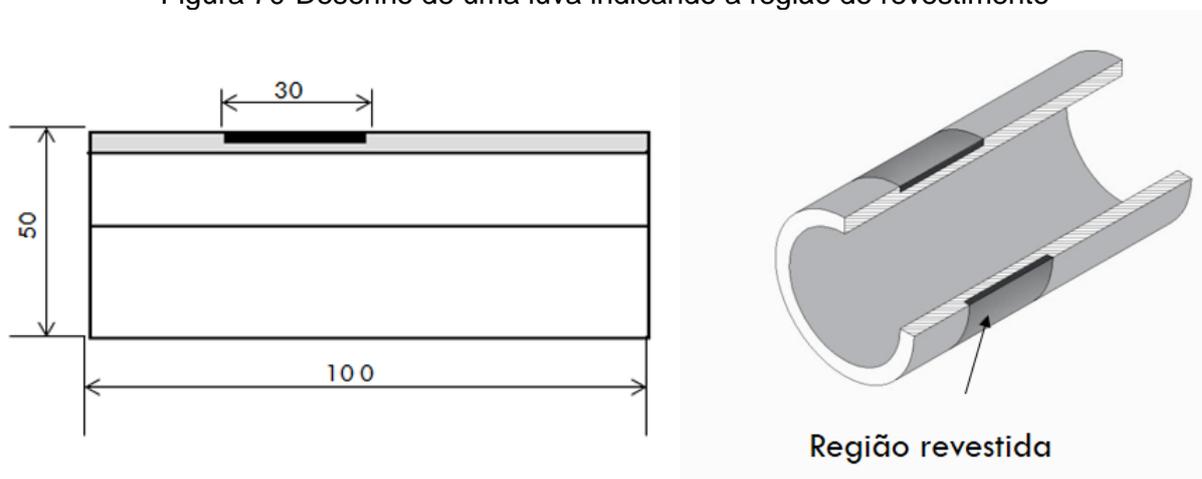
CL = Custo da limpeza do componente (limpeza química e mecânica)

CPS= Custo de preparação da superfície (obtenção da rugosidade e texturização requerida)

CAT= Custos ligados diretamente aos materiais aplicados e características físicas dos componentes (forma, peso, etc.).

A base de todos os custos está no material a ser aplicado, que no comércio é vendido por quilograma. Nas aplicações é levado em consideração o volume aplicado, tomando como base o diâmetro da peça, comprimento da região a ser revestida e o custo do material aspergido. Como um exemplo típico pode citar uma luva de aço AISI 304, figura 69, com diâmetro de 50 mm e opta-se em revestir numa determinada região, cujo comprimento é de 30 mm, se o desgaste nessa região foi de 0,5 mm, o valor total da recomposição dessa região utilizando para tal, uma liga a base de Cr, Ni, B e Si (liga fusível) que irá proporcionar um aumento da dureza e resistência ao desgaste nessa região. O custo seria de US\$ 156 equivalente a aproximadamente 40% do preço de uma nova. Comparando essa mesma peça, sendo recuperada pelo revestimento em metal duro (WC-Co) com uma camada 0,2 mm, o custo seria 30% maior que o da liga fusível. Já o revestimento em AISI 420, é mais aplicado quando há um desgaste excessivo necessitando de camadas superiores a 2,0 mm. Desta forma o custo desse revestimento não pode ser comparado no exemplo exposto anteriormente, mesmo sendo um material relativamente mais barato que os citados anteriormente.

Figura 70-Desenho de uma luva indicando a região do revestimento



Fonte: Autor

## 6 CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

No decorrer desse trabalho surgiram bastantes dificuldades, entre elas a disponibilidade de empresas da região que desenvolvem atividades de revestimentos por aspersão térmica e de empresas ou infraestrutura para avaliar a resistência ao desgaste. Em geral, o custo de produção de amostras e de insumos para caracterização são relativamente altos que dificulta a pesquisa. Com relação à produção dos revestimentos, as aplicações foram todas realizadas manualmente, parâmetro esse que afeta diretamente na qualidade dos revestimentos e uma análise mais conclusiva sobre as diferenças dos revestimentos e processos. Esta limitação é decorrente da pouca difusão da técnica na região. Superadas as dificuldades, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- Os ensaios de desgaste abrasivo mostraram que os revestimentos de WC-Co e Liga Fusível são praticamente equivalentes, porém a limitação entre ambos se dá em função da espessura de camada e o custo de cada material.

- Quanto à dureza dos revestimentos praticamente se equivalem, sendo o revestimento a base de WC-Co pouco superior ao da liga fusível, as literaturas também mostram esse resultado, onde o revestimento de WC-Co pode atingir a dureza de  $1400HV_{0,5}$

- As espessuras obtidas pelos processos utilizados foram compatíveis, quando se deseja aumentar as propriedades mecânicas localizadas tais como: resistência ao desgaste, dureza localizada, rugosidade e recomposição dimensional.

- A principal falha observada nos ensaios de adesividade foi por adesão (entre o adesivo e o revestimento)

- A porosidade máxima encontrada foi na liga fusível com valor médio de 9,4%, porém abaixo da faixa informada pela literatura (10 a 20%)

- O revestimento mais indicado custo/benefício para recomposição dimensional foi o que utilizou a liga fusível.

- Em suma, a utilização de um ou outro desses revestimentos como recomposição dimensional está relacionado aos custos da aplicação e também a estimativa de vida útil dos componentes que os receberem.

## 7 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

- Como todos os revestimentos aplicados no substrato foram realizados pelo processo manual e com parâmetros indicados pelo aplicador, fica a sugestão para desenvolvimento de um processo automático, haja vista que a velocidade e a distância de aplicação dos revestimentos têm forte influência na aderência, reduzindo a formação de poros e vazios;
- Variar parâmetros de processo tais como: Velocidade de aplicação, distância entre a pistola e o substrato, com e sem pré-aquecimento do substrato;
- Avaliar outros tipos de revestimentos resistentes ao desgaste abrasivo;
- Avaliar a resistência à corrosão.

## REFERÊNCIAS

ABS, Associação Brasileira de Soldagem. **Curso de Metalização**, 1994.

ALBERTIN, Eduardo. Desgaste abrasivo: Congresso Nacional - ABM. 58. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003. 56 p. Disponível em: <[https://www.google.com.br/search?q=desgaste+abrasivo+eduardo+albertin&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gws\\_rd=cr&ei=18h8WLeYM8OwwAS5vILoDA](https://www.google.com.br/search?q=desgaste+abrasivo+eduardo+albertin&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gws_rd=cr&ei=18h8WLeYM8OwwAS5vILoDA)>. Acesso em: 10 nov. 2016.

AMADA, S. Tribology of Thermal Sprayed Coatings. **Japanese Journal of Tribology**, v. 40, n. 8, 1995, p. 701-707.

APOSTILA INFOSOLDA, 1997, consulta Site:<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/231-aspersao-termica.html>

ASTM C633, 2001, Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coating, Drawing is copyright ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D-3359-09. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test.

ASTM E-18-16. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

ASTM E-2109, 2007, Standard Test Method for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coat. West Conshohocken, 2007. International Handbook

ASTM E-384-16. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

ASTM G 65-91. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel, Apparatus, Maio 2001.

ASTM G40-96. Standard terminology relating to wear and erosion.

ASTM G77-91; Standard test method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test

AWS, American Welding Society, Thermal Spraying. Practice, theory and applications, 1985.

BALL, A. The mechanisms of wear and the performance of engineering materials. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall**, v.86, n.1, jan. 1986, p.1-13.

BELL, T., Surface engineering: its current and future impact on tribology. **Journal of applied Physics**, 1992. 25(1A): p. A 297-A306

BERNDT, C. C.; LEIGH, S. H. A test for coating adhesion on flat substrates: a technical note. **Journal of Thermal Spray Technology**, vol. 3, n. 2, p. 184-190, june 1994.

BERNECKI, T. *et al.* **Handbook of Thermal Technology**, ASM, 1994.

BUDINSKI, K. G.; Surface engineering for wear resistance, Prentice Hall, New Jersey, 1988

CAMARGO, Fabio. Ogramac Metalização ([ogamac@ogamac.com.br](mailto:ogamac@ogamac.com.br)). (06/1999). Preaquecimento do substrato

CARVALHO, Paulo Rogerio de. Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420 depositados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico, Dissertação Mestrado. UFPE - CTG, Recife (2007).

CASTRO, Richard de Medeiros et al. **Revestimento de WC depositado por aspersão térmica como alternativa ao cromo duro eletrodepositado aplicados em equipamentos hidráulicos**: Artigo Submetido a revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica . 2014. ed. Madri- ES: UNED-Universidade de Educação a Distância, 2015. 22-42 p. v. 19.

CENTER for Innovative Sintered Products (CISP). Disponível em: <http://www.cisp.psu.edu/facility.html>. Acesso em: 24 nov. 2016.

COMELI, Franco Wronski. Estudo de revestimento aspergido por HVOF contra o desgaste em haste de válvulas de turbinas termoelétricas, Dissertação Mestrado. UFSC, Florianópolis (2006)

COUTO, L. C. O. **Aspersão Térmica na construção metálica- Ciência e Arte**: Trabalho Técnico apresentado no Congresso Latino Americano da Construção Metálica. 2006. ed. São Paulo: [s.n.], 2006. 11 p

DEJUN, K.; TIANYUAN, S.; **Wear behaviors of HVOF sprayed WC-12Co coatings by laser remelting under lubricated condition**, Optics & Laser Technology (2017), pp.86-91

FREIRE, F., “Avaliação de Revestimentos Aplicados por Aspersão Térmica para Proteção contra o Desgaste de Ponteiros de Risers”, Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2002)

GATES, J. **Two body and three body abrasion**: a critical discussion. Wear, v. 214, n. 1, p. 139-146, 1998.

GENTIL, Vicente. **Revestimentos: limpeza e preparo de superfícies.** In:\_\_\_\_\_. Corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Cap. 21. p. 228-234.

GNECCO, Celso; MARIANO, Roberto; FERNANDES, Fernando. **Tratamento de superfície e pintura.** Rio de Janeiro: IBS/SBCA, 2003.

HOWES, C. P. **Thermal spraying:** processes, preparation, coatings and applications. Welding Journal, vol.73, abr. 1994

HUTCHINGS, I. M. **Tribology-friction and wear of engineering materials.** 7 ed. London: Edward Arnold, 1992

KATRANIDIS,V.; GU,S.; ALLCOCK,B.;KAMNIS,S. Experimental study of high velocity oxi-fuel sprayed WC-17Co coatings on complex geometries.Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness.Surface & Coatings Technology(2016)

KARAOGLANLI,A.C.; OGE,M.;DOLEKER,K.M.; HOTAMIS,M. **Comparasion of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition.** Surface & Coatings Technology(2017).

KNAPP, J.K.; Taylor,T.A. **Waterjet roughened surface analysis and bond strength.** Surface & Coatings Technology: Indianapolis, 1996

KREPSKI, R. P. **Thermal spray coating applications in the chemical process industries.** Houston, EUA: Nace International, 1993. p. 252

LIMA, C. C.; TREVISAN,R. **Aspersão Térmica:** fundamentos e aplicações. 2ª edição revisada e ampliada, ArtLiber Editora, 2007

LUTZ,M.B.; **Application of hardmetal as thermal spray coatings,** Journal of Refractory Metal And Hard materials (2015), pp.350-364.

MAGNANI, M. **Estudo da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos metálico-cerâmicos aplicados na liga AA7050 mediante aspersão térmica oxicomustível de alta velocidade (HVOF).** 2008. 241 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2008.

MANFRINATO, M. D. *et al.* Metallic Coating Adhesion Obtained Through Spraying Testing. In: **18º International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering,** 2010, Rio de Janeiro/RJ, 2010.

MARANHO, O.; SINATORA, Amilton. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente.** 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARIANA,L.;BREZINOVA,J.M.; **Evaluation of HVOF coatings,** Marteriallove Inzinierstvo,2016, vol23(2), P.68

MARQUES, P. V. **Aspersão Térmica**. Infosolda, 2003. Disponível em: [http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos\\_solda/asperso-termica.pdf](http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/asperso-termica.pdf).

MCPHERSON, R. The relationships between the mechanism of formation, microstructure and properties of plasma-sprayed coatings. **Thin solids films**, vol. 83, n. 3, p. 297-310, 1981.

MELLALI, M.; GRIMAUD, A.; Leger, A. C., FAUCHAIS, P. *Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation*. Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 6, n. 2, p. 217-226, June 1997

MICHEL, B. *et al.* Printing meets lithography: soft approaches to high-resolution patterning. **IBM J. RES & DEV**, 2001

NAHVI, S.M.; JAFARI, M; **Microstructural and mechanical properties of advanced HVOF-sprayed WC-based cermet coatings**, Surface & Coatings, 2016, vol.286, pp.95-102

PAREDES, R. S. C. **Estudos de revestimentos de alumínio depositado por três processos de aspersão térmica para proteção do aço contra corrosão marinha**. 1998. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 1998.

PAWLOWSKI, L. **The Science and engineering of thermal spray coating**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

PETROBRAS. **Norma N-2568**: seleção e aplicação (aspersão térmica) do alumínio, zinco e suas ligas como revestimento anticorrosivo, Rio de Janeiro/ RJ, 1996

REPORT Sulzer METCO #106. EVALUATION METHODS AND EQUIPMENT FOR FLAMESPRAYED COATINGS. Research laboratory, item 12, 15p. 1973.

RIJEZA METALÚRGICA LTDA. Parâmetros de Aspersão Térmica – HVOF para WC-CoCr. Porto Alegre – Brasil (2011).

SANTOS, A. O. **Estudo da resistência à corrosão em aço e revestimentos visando aplicação em hastes de bombeio de petróleo**. Aracaju, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, 2008.

THORPE, M. L.; **Thermal spraying makes the grade as a repair process**. Welding Journal, Nov.1992, p. 45-48

TREZONA, R.I.; Hutchings, I.M. **Three-body abrasive wear testing of soft materials**. Wear 233-235, 1999

TST- Thermal Spray Technology, ([www.tstne.net](http://www.tstne.net)). empresa localizada no município de Jaboatão dos Guararapes/PE

VREIJLING, M. P. W. **Electrochemical Characterization of Metallic Thermally Sprayed Coatings**. PhD-Thesis, TNO Institute of Industrial Technology. Netherlands, 1998

WIGREN, J. Grit-blasting as surface preparation before plasma spraying. *In: Proceedings of the National Thermal Spray Conference*, set. 1988.

## ANEXOS

Certificado do material AISI 420 (arame)

**S soldainox**

Avenida São Judas Tadeu  
Jd. S. Judas Tadeu  
CEP: 13180-570  
Cidade: Sumaré - SP  
Telefone: (19) 3854-2414

---

**CERTIFICADO DE QUALIDADE**

Certificado N°.: 13743      Ordem de Produção N°.: 35336  
Corrida: 0807572      NF: 3743      Data: 25/05/2016

---

Cliente: TST THERMAL SPRAY TECHNOLOGY LTDA - ME

Pedido do cliente:      Cód. Produto: 262      Normas Gerais: AISI 420  
Linha: INOX      Forma: REDONDO/BOBINA      Acabamento: POLIDO  
Peso Líquido (KG): 75,0      Dimensões: 1,50MM      Comprimento:

---

**ANÁLISE QUÍMICA**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Nb	Ti	P	S	Cu	V
.34	.37	.39	12.16	.39					.029	.024	.03	

---

**ENSAIO DE TRAÇÃO**

Diâmetro	Forma	Tolerância	Estado	Limite de Elasticidade	Limite de Escoamento	Tensão	Alongamento	Diâmetro	Ensaio	Temperatura	Estado
Ø	Redondo	±	sem				%	Ø	Barra	°C	Ensaio Energia Absorvida

**ENSAIO DE IMPACTO**

---

**TRATAMENTO TÉRMICO**

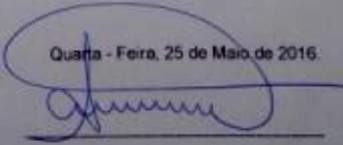
DUREZA

Observações:

TOTAL: 5 VOLUMES.

---

Entidade Insetora  
25/05/2016

Quarta - Feira, 25 de Maio de 2016  


25/05/2016

## ANEXO 2

Certificado do material metal duro WC-Co (pó)



## Certificado de Qualidade ( Certificate of Analysis )

Cliente (Customer): **TST-THERMAL SPRAY TECHNOLOGY LTDA-ME**  
 Nota Fiscal (Invoice): 85499  
 Data de Emissão (Date): 22/05/2015  
 Data de Fabricação (Manufacture): 27/04/2015  
 Certificado n ° ( Certificate Number): 132644  
 Corrida (Lot): 019340E  
 Tamanho do Lote (Lot Size): 90,8000

Produto Product	Pedido do Cliente Customer Order	Produto do Cliente Customer Product	Qtd	Uni	Norma Standard
WOKA 3103 - MATERIAL P/METALIZAÇÃO - 4,540	EMAIL JOSEMIR 21 05		4,5400	KG	METCO

## Resultado da Análise Química ( Chemistry )

Material	Elemento ( Element )	Especificado ( Specifications )	Encontrado ( Values )
WOKA 3103	C	4.000 / 7.000	5.430
	Co	11.000 / 13.000	11.890
	W	RESTANTE / RESTANTE	BALANÇO

responsável Química: Susanne Célia Heitmann - CRQ 04267042 - Responsável Técnico: Eng. Mario Cintra - CREA 506086359/  
 Certificado Digital Assinado Eletronicamente

## ANEXO 3

Certificado do material liga fusível Cr, Ni, B e Si (pó)

**oerlikon**  
metco



## Material Certification

Oerlikon Metco (US) Inc.  
1101 Prospect Avenue  
Westbury, NY 11590  
Phone: 516 334 1300  
Fax: 516 338 2478

Harris Soldas Especiais S.A.  
Av. Industrial , 1255 - CEP  
SANTO ANDRE - SAO PAULO - SP  
09080-510  
BRAZIL

Delivery item/date  
830646815 900004 / 28.08.2015

Page  
1 / 1

Material: Our / Your reference  
1029071 METCO 16CNS / 10# / NCM 7504.00.90  
Customer PO: 26118

Batch 451344 / Quantity 500,000 LB  
Inspection Lot: 040000075770

Old Material		12PB05897	12PB26620	
SAP Material		1031142	1031255	
Batch/Lot		451319	451325	
Percentage		40.00	60.00	
B	WT%	3.9	3.42	ICP-OE
C	WT%	0.21	0.90	COMBUSTION
Cr	WT%	16.2	17.1	ICP-OE
Cu	WT%	5.4		ICP
Fe	WT%	0.1	4.0	ICP-OE
Mo	WT%	5.6		ICP
Ni	WT%	64.3	70	BALANCE
Si	WT%	4.2	4.1	ICP-OE
<b>Sieve Size</b>				
+100 (150)	WT%	0.0	0.0	ASTM B214
+120 (125)	WT%	1.8	0.9	ASTM B214
-120/+140	WT%	12.0		ASTM B214
-120 /+270	WT%	95.5	94.9	ASTM B214
-270 (53)	WT%	2.7	4.4	ASTM B214
-325 (45)	WT%	0.1	0.7	ASTM B214

## Approved Specifications:

Internal Specification  
MSRR9507/7 Issue 2

Material produced / packaged, inspected and released by Oerlikon Metco (US) Inc., Troy, MI unless otherwise stated.

ANEXO 4

Certificado do material Substrato AISI 1020 (barra chata e tarugo)

**GIAPAL**  
 GIAPAL COM. IND. DE ART. DE FERRO E AÇO S/A.  
 RUA WILSON SANTOS, 653 - CENTRO INDUSTRIAL - DIVINÓPOLIS  
 CEP: 35.502-299 - TEL/FAX: (37) 2101-1400  
 CNPJ: 20149979/0003-67 - IE: 22930291370096

**CERTIFICADO DE CONFORMIDADE**

CERTIFICADO N°: G0806020221 / 2015  
 DATA: 10.09.2015  
 NOTA FISCAL N°: 000192559

CLIENTE: SCALVA COM. IND. AÇOS TUBOS E LAM LT  
 REFERÊNCIA CLIENTE:

IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL  
 PESO (TON) 2,295  
 OCORRIDO 31. Julho

MATERIAL B. CH. 1 X 3/8 - 8,00M - 10091022M - S

CORRIDA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA										
	C%	Mn%	SP%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Al%	N2%	
150910AC	0,06	0,25	0	0	0,040	0,050	0	0	0,000	0,000	
	min				max						
	0,230	1,400	0,200	0,040	0,050	0,000	0,000	0,000			

OBSERVAÇÕES

ASSINATURA: *[Handwritten Signature]*  
 Paulo H. Ribeiro do OIA - 2015  
 Analista Técnico de Qualidade

DATA: 10.09.2015

APROVADO: *[Handwritten Signature]*  
 APROVADO: 10091022M  
 APROVADO: 10091022M

**CERTIFICADO REF.**  
 ESCALA N°: 21483

*[Handwritten Signature]*  
 5/16/2015