

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DE REVESTIMENTOS DE NÍQUEL
OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Júlia Coelho Trojan

Júlia Cristina Guimarães de Carvalho Bonaldo

Orientadores:

Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc. (orientador)

Sílvio Romero de Barros, D. Sc. (co-orientador)

**Rio de Janeiro,
Novembro de 2015**

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DE REVESTIMENTOS DE NÍQUEL
OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Júlia Coelho Trojan

Júlia Cristina Guimarães de Carvalho Bonaldo

Projeto de Graduação apresentado ao curso
de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Prof. Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa

**Rio de Janeiro,
Novembro de 2015**

“Todo homem que teve amores verdadeiros, revoltas verdadeiras, desejos verdadeiros, e vontades verdadeiras, sabe muito bem que não tem necessidade de nenhuma garantia extrema para ter certeza dos seus objetivos; a certeza provém das próprias forças propulsoras. ”
(Simone de Beauvoir)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Ao nosso professor orientador Hector Reynaldo Meneses Costa, pela orientação, incentivo e conhecimentos transmitidos durante a realização deste projeto;

Ao nosso co-orientador Sílvio de Barros, pela orientação, atenção e conhecimentos transmitidos;

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, pela oportunidade de realizar esta graduação, pela infraestrutura e pelo conhecimento fornecido;

À VGK Engenharia/RJ e ao Engenheiro Guilherme W. Bungner, pelo fornecimento das amostras estudadas e pelos conhecimentos técnicos transmitidos;

À professora Marília Garcia Diniz e ao aluno André Araújo, do Departamento de Engenharia Mecânica da UERJ, pelo curso de Processamento Digital de Imagem e pelas orientações e conhecimentos transmitidos posteriormente;

Ao mestrando Uirá da Silveira, pela orientação e sugestões na obtenção dos resultados;

Ao professor Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, pelo apoio e orientação durante o projeto;

Ao doutorando da UERJ Fernando José Antunes, pela oportunidade de realizar o curso de Processamento Digital de Imagem;

À família, por todo apoio e incentivo durante todos esses anos, essenciais para nossa caminhada. Um agradecimento especial aos nossos pais, Valeriana, Antonio Carlos, Márcia e André (*in memorian*), e aos nossos irmãos, Gustavo, Vitor e Joana.

Aos nossos namorados, Fábio e Gabriel, pelo incentivo e apoio durante a realização deste trabalho, além dos conselhos fornecidos.

Aos nossos amigos, que sempre estiveram torcendo por nós.

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade avaliar revestimentos metálicos de ligas de Fe-Cr e Fe-Co obtidos pelo processo de aspersão, a arco elétrico, de ligas em substrato de aço carbono. Inicialmente, foi realizada uma análise microestrutural através de Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Em seguida, foi realizado Processamento Digital de Imagem (PDI) através do software FIJI Image, com a finalidade de analisar a porcentagem de porosidades, óxidos e trincas presentes em uma dada região da amostra. Os resultados obtidos para MEV, MO e PDI mostraram bastante uniformidade na camada aspergida, com percentuais médios de defeitos de 3,59% para a liga de Fe-Cr e 3,81% para a liga de Fe-Co. Em relação ao ensaio de aderência, a média das tensões de arrancamento foi de 26,82 MPa, atendendo ao requisito da norma utilizada (10 MPa).

Palavras-Chave: Aspersão térmica, Revestimentos metálicos.

ABSTRACT

This research has the purpose of evaluating metal coatings, obtained by thermal spraying process electric arc in a carbon steel substrate. Initially, a microstructural assessment was carried out by Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy (S.E.M) and Optical Microscopy (OM). In addition, Digital Image Processing (DIP) was held using the FIJI Image software. The aim was to evaluate the porosity, oxide and microcrack percentages, mainly seeking voids in a determined sample area. The results obtained by SEM and OM showed uniformity in the deposited layer. The amount of defects (porosity, oxides and microcracks) obtained by DIP was 3,59% for condition 1 and 3,81% for condition 2. Regarding the adherence test, the average stress was 26,82 MPa, fulfilling the required minimum stress (10MPa).

Key-Words: *Thermal Sprayed, Metallic coatings.*

Sumário

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	4
1.2 OBJETIVO.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 ADESÃO E ADERÊNCIA	5
2.2 POROSIDADE.....	7
2.3. OXIDAÇÃO.....	9
2.4. ASPERSÃO TÉRMICA.....	11
2.4.1. ASPERSÃO TÉRMICA À CHAMA CONVENCIONAL (FLAME SPRAY).....	13
2.4.2. ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA DE ALTA VELOCIDADE – HVOF	17
2.4.3. ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO	19
2.4.4. ASPERSÃO TÉRMICA POR PLASMA	21
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	24
3.1. MATERIAIS E PROCEDIMENTO	24
3.2. PREPARO DAS AMOSTRAS.....	27
3.3. MICROSCOPIA ÓPTICA.....	27
3.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	28
3.5. ENSAIO DE ADERÊNCIA	29
3.6. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM (PDI)	30
3.6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO.....	30
3.6.2. SEGMENTAÇÃO.....	31
3.6.3. PÓS-PROCESSAMENTO.....	32
3.6.4. EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. MICROSCOPIA ÓPTICA.....	41
4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	43
4.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	46
4.4. ENSAIO DE ADERÊNCIA	50
5 CONCLUSÃO	55
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
7 BIBLIOGRAFIA.....	57

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Fluxograma de classificação dos processos de Aspersão Térmica (Paredes, 2012).....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2 - Desenho esquemático da composição de um revestimento aspergido termicamente (Terres, 2006), Adaptado.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 3 - Figura esquemática da aplicação de revestimento (Paredes, 2012).....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 4 - Variação da adesão de revestimento de níquel sobre um substrato de aço inoxidável com a variação da temperatura (Pershin, et al., 2002), Adaptado.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5 – Variação da porosidade do revestimento de níquel em função da variação da temperatura do substrato de aço inoxidável (Pershin, et al., 2002), Adaptado.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6 - Formação da lamela (Zimmer, 2009).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7 – Microscopia Eletrônica de uma lamela de níquel depositada sobre um substrato de aço inoxidável a 400°C (Pershin, et al., 2002).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 8 - Desenho esquemático de um processo à chama utilizando pó (Lima, et al., 2012).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9 - Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando arame (Mendes, 2010).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10 - Desenho esquemático de um equipamento e sistema de HVOF (Dias da Silva, 2009).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11 – Ilustração do processo de aspersão térmica por Arco Elétrico (Brito, 2010).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 12 - Pistola de aspersão térmica por plasma modelo SG-100 (Praxair) (Zimmer, 2009).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 13 – Ilustração da diferença entre os arcos transferido e não transferido (Antunes, 2013)....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 14 – Esquema de Aspersão Térmica por Arco Não-Transferido (Freitas, 2015).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15 – Esquema de Aspersão Térmica por Arco Transferido (Paredes, 2012).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16 – Amostras em chapa após jateamento.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 17 – Aplicação do revestimento nas amostras retangulares.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 18 – Amostra em chapa.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 19 - Microscópio Óptico Olympus BX 60 MF.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 20 – Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 21 - Medidor de Aderência Pneumático P.A.T.T.I, modelo Elcometer 110.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 22 - Ilustração do ensaio de Pull-off (Kopeliovich, 2014).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 23 – Interface do software Fiji Image.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 24 – Ajuste de brilho e contraste de imagem da condição 2 através do comando Image – Adjust - Brightness/Contrast.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 25 – Ajuste de brilho e contraste de imagem da condição 1 através do comando Image – Adjust – Brightness/Contrast, após o comando Edit - Invert.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 26 – Processo de Segmentação de imagem da condição 2.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 27 – Processo de Segmentação de imagem da condição 1.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 28 – Comando Erode em imagem da condição 2.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 29 – Comando Dilate em imagem da condição 2.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 30 – Comando Open em imagem da condição 1.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 31 – Comando Fill Holes em imagem da condição 1.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 32 – Comando Fill Holes em imagem da condição 2.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 33 – Uso do comando Remove Outliers em imagem da condição 1, com raio de 4 pixels.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 34 – Uso do comando Remove Outliers em imagem da condição 2, com raio de 6.4 pixels....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 35 – Comando Analyze Particles; à esquerda, imagem da condição 1 processada e pronta para a análise.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 36 – Comando Analyze Particles; à esquerda, imagem da condição 2 processada e pronta para ser analisada.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 37 – Imagem da condição 1 analisada.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 38 – Imagem da condição 2 analisada.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 39 – Matriz Summary de imagem da condição 1.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 40 – Matriz Summary de imagem da condição 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 41 – Matriz Results de imagem da condição 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 42 – Numeração dos elementos segmentados.....</i>	<i>40</i>

<i>Figura 43 – (a) Regiões da amostra de condição 1 utilizando-se uma lente de aumento de 100x. (b) Região do revestimento da amostra de condição 1 utilizando-se um aumento de 500x.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 44 - (a) Regiões da amostra de condição 2 utilizando-se uma lente de aumento de 100x. (b) Região do revestimento da amostra de condição 2 utilizando-se um aumento de 500x.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 45 - (a) Morfologia da amostra de condição 1. (b) Microanálise quantitativa, por linha, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 1.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 46 - (a) Morfologia da amostra de condição 1. (b) Microanálise quantitativa, por ponto, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 1.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 47 – (a) Morfologia da amostra de condição 2. (b) Microanálise quantitativa, por linha, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 2.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 48 - (a) Morfologia da amostra de condição 2. (b) Microanálise quantitativa, por ponto, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 2.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 49 - Gráfico de dispersão dos resultados da condição 2.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 50 – Resultado do Pull-Off para a Condição 1.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 51 - Resultado do Pull-Off para a Condição 2.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 52 – Ensaio aplicado à amostra de condição 1.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 53 – Primeiro ensaio aplicado à amostra de condição 2.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 54 – Segundo ensaio aplicado à amostra de condição 2.</i>	<i>52</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 -Temperatura das fontes de calor (Paredes, 2012).</i>	3
<i>Tabela 2 – Algumas características entre os principais tipos de Aspersão Térmica (Freitas, 2015).</i> .	13
<i>Tabela 3 – Composição química dos arames utilizados no processo de Aspersão Térmica.</i>	24
<i>Tabela 4 – Combinação dos arames para revestimento.</i>	24
<i>Tabela 5 – Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica.</i>	25
<i>Tabela 6 – Resultados do PDI para as condições 1 e 2.</i>	47
<i>Tabela 7 – Comparativo entres os resultados obtidos no presente trabalho e outros autores encontrados na literatura</i>	50
<i>Tabela 8 – Descrição dos tipos de falha resultantes do ensaio de Pull-off (Antunes, 2013)</i>	50
<i>Tabela 9 – Resultado do Ensaio de Aderência - Tensão</i>	53
<i>Tabela 10 – Resultado do Ensaio de Aderência - Força</i>	53
<i>Tabela 11 – Comparativo entre os resultados obtidos no presente trabalho e resultados de outros autores.</i>	54

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de aumentar a vida útil de máquinas e equipamentos, sempre se buscou alternativas de custo mais acessível e bom desempenho. Uma solução muito utilizada é o revestimento por Aspersão Térmica. Esta técnica consiste em, basicamente, deposição de material fundido sobre um substrato previamente preparado. Ou seja, com a utilização de tal procedimento, reduz-se a necessidade do uso de peças de ligas metálicas de alto custo. Além disso, reduz-se a frequência da reposição de peças, uma vez que a deposição de uma liga com propriedades superiores aumenta a resistência à corrosão e ao desgaste da peça como um todo.

Os revestimentos são responsáveis pela proteção contra a corrosão, o desgaste, além de isolamento térmico e elétrico. Estes isolam o substrato do meio externo e facilitam a recuperação de peças, uma vez que, identificado um problema na superfície, basta aplicar novamente uma camada de revestimento (Antunes, *et al.*, 2015).

A técnica de aspersão térmica foi inicialmente utilizada no início do século XX por Max Ulrich Schoop, na Suíça. Foi utilizado como revestimento o zinco em forma de arame, fundido por chama de gás e projetado sobre uma superfície de aço-carbono por meio de ar comprimido (Pawlowski, 2005).

Seu desenvolvimento atual se dá devido, principalmente, à exploração do petróleo e à indústria Off-Shore de uma maneira geral. Os equipamentos são de elevada responsabilidade, e estão os sempre expostos a ambientes corrosivos (corrosão salina e corrosão devido ao alto teor de enxofre, vindo da exploração do petróleo).

Ghafouri-Azar *et al.* citam também a utilização deste tipo de revestimento em componentes de turbina a gás. Componentes de incineração de turbinas a gás são geralmente protegidos das altas temperaturas advindas dos gases de combustão através de uma fina camada de cerâmica termicamente aspergida (Ghafouri-Azar, *et al.*, 2005).

A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se em dois grupos: um que usa a combustão e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia, conforme mostrado na Figura 1.

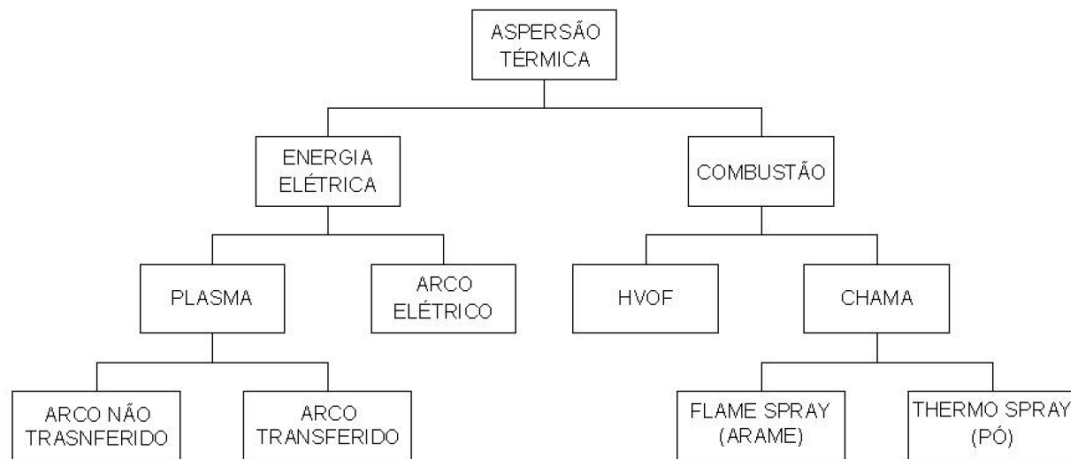


Figura 1 – Fluxograma de classificação dos processos de Aspersão Térmica (Paredes, 2012).

A qualidade do revestimento dependerá de diversas variáveis do processo, como o tipo de pistola (design e potência) e sua posição em relação ao substrato, o tipo de material que será depositado, o tipo e o preparo do substrato (Antunes, *et al.*, 2015), além das características do gás de arraste. Além disso, a densidade do depósito varia com a temperatura da fonte de calor usada (Tabela 1) e com a velocidade das partículas no impacto (Paredes, 2012). A Figura 2 ilustra a composição de um revestimento aspergido termicamente.

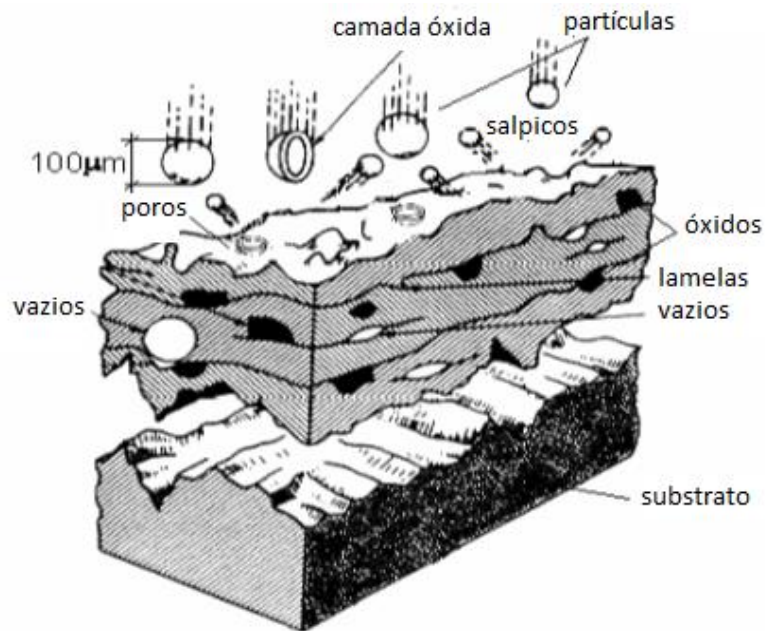


Figura 2 - Desenho esquemático da composição de um revestimento aspergido termicamente (Terres, 2006), Adaptado.

Tabela 1 - Temperatura das fontes de calor (Paredes, 2012).

Fonte	Temperatura °C
Propano + oxigênio	2526
Gás natural + oxigênio	2538
Hidrogênio + oxigênio	2660
Propileno + oxigênio	2843
Acetileno + oxigênio	3087
Arco e plasma	2200 - 28000

O substrato deve ser devidamente preparado através de jateamento, visando a garantir a limpeza e a rugosidade necessárias para o ancoramento das partículas e, conseqüentemente, a aderência necessária.

Para a realização do processo é necessário o material a ser revestido (em pó, arame ou vareta), uma fonte de calor para fundir e atomizar este material (fonte elétrica ou gás combustível) e um bico direcionador. A Figura 3 mostra esquematicamente o processo.

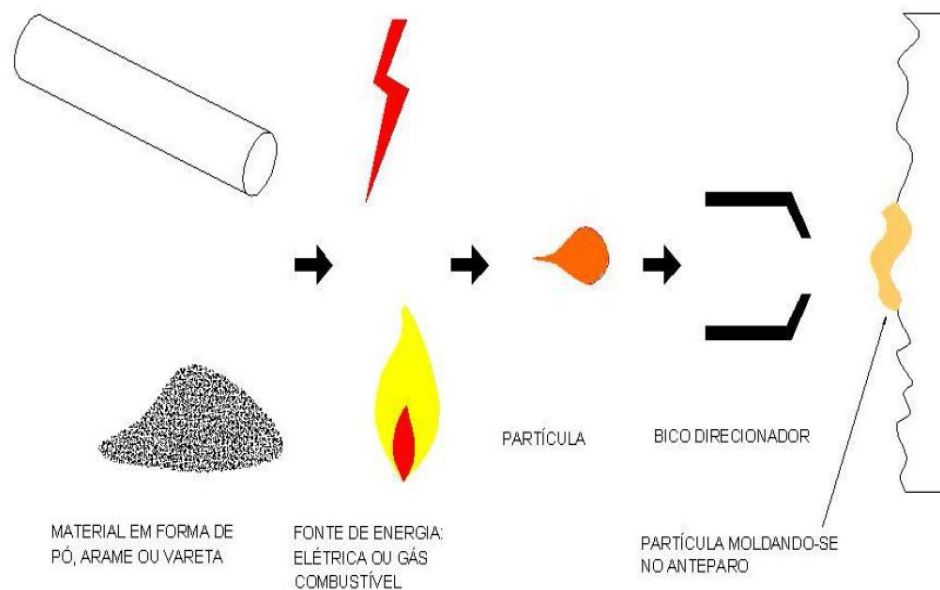


Figura 3 - Figura esquemática da aplicação de revestimento (Paredes, 2012).

1.1 Motivação

Uma das maiores preocupações com relação a este processo diz respeito à questão da adesão do revestimento. São considerados 3 diferentes tipos de interação: mecânica, física e metalúrgica. Por ser a crítica ligação entre o substrato e o revestimento, é crucial a avaliação de adesão. As principais falhas neste tipo de processo são por trincamento ou descolamento (Antunes, *et al.*, 2015).

Outro grande problema neste processo é a geração de tensão residual, principalmente quando o revestimento é de fina espessura. Isso ocorre, principalmente, devido diferença entre as propriedades do revestimento e do substrato, que fazem com o que os materiais possuam diferentes coeficientes de dilatação térmica. Assim, ao se resfriarem, apresentarão diferentes deformações (Antunes, *et al.*, 2015).

Sendo assim, tendo em vista o avanço desta tecnologia, faz-se necessário um estudo mais aprofundado a respeito da adesão e dos fatores que a influenciam, como a presença de óxidos e porosidades.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como proposta a avaliação do revestimento resultante de diferentes materiais de deposição. O principal objetivo é a qualificação de porosidades, trincas e óxidos, através da técnica de Processamento Digital de Imagens.

Visando a verificar a adesão dos revestimentos resultantes, será feito ensaio de Pull-Off, também chamado de ensaio de aderência ou ensaio de arrancamento, obtendo-se resultados em tensão para as diferentes condições, gerando uma comparação e mostrando qual a composição mais adequada para a aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Adesão e Aderência

A adesão e a aderência são o principal motivo de estudo dos processos de aspersão térmica, uma vez que são responsáveis por garantir a eficiência do revestimento. São considerados três diferentes mecanismos: interações mecânica, física e metalúrgica (Novicki, 2008).

O primeiro é definido pelo ancoramento das partículas ao substrato, que é influenciado pela contração ocorrida durante o resfriamento das partículas fundidas, bem como a rugosidade da superfície do substrato (Novicki, 2008).

A adesão física depende da interação atômica devido às forças de Van der Waals e da limpeza da superfície (Novicki, 2008).

Por último, a adesão metalúrgica varia em função da natureza dos materiais utilizados, bem como do calor transferido ao substrato pela partícula fundida e acelerada (Novicki, 2008). Estes fatores determinam as características da micro soldagem que ocorre quando a partícula fundida e aspergida atinge a superfície, podendo gerar uma fusão localizada e difusão atômica (Paredes, 2012).

Além da preparação da superfície do substrato, a adesão é também influenciada pela distância da tocha à peça e pelo tipo do processo de aspersão térmica utilizada (Zaat, 1983).

Para um melhor resultado de adesão do revestimento, é importante também o aquecimento do substrato. Estudos realizados por Pershin *et al.* (Pershin, *et al.*, 2002), mostram que a adesão aumenta (de 10MPa para 74MPa) quando um substrato de aço inoxidável é aquecido a 650°C, vide Figura 4.

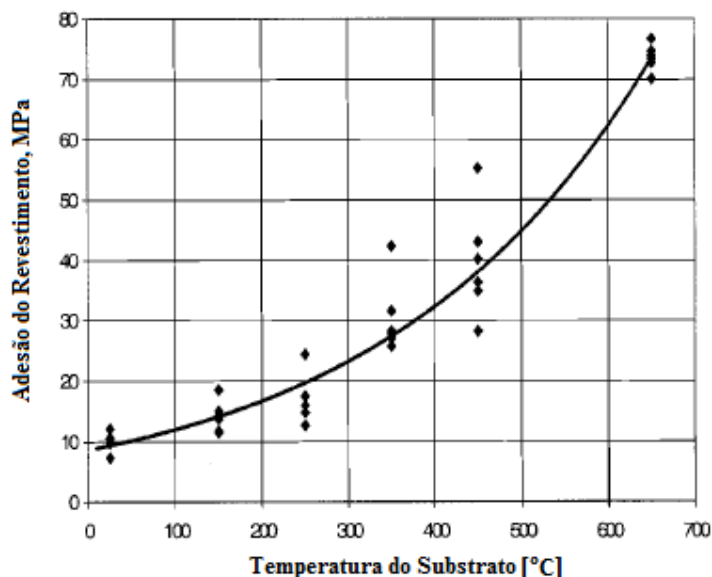


Figura 4 - Variação da adesão de revestimento de níquel sobre um substrato de aço inoxidável com a variação da temperatura (Pershin, *et al.*, 2002), Adaptado.

Isto acontece porque, quando o aço inoxidável é aquecido, forma-se uma película de óxido na superfície, que atua como uma barreira térmica e reduz a taxa de resfriamento das partículas fundidas, suprimindo a dispersão das mesmas (Pershin, *et al.*, 2002).

Segundo Paredes, o aquecimento do substrato também auxilia na limpeza final da superfície do mesmo, pois gera a queima e volatilização de graxas, óleos e da umidade que ficam retidos na superfície do metal. Além disso, o aquecimento favorece ainda a redução das tensões internas, influenciando na aderência do revestimento (Paredes, 2012).

Sobolev *et al.* mostraram ainda a influência da pressão de impacto das partículas fundidas na aderência, pois ela influencia diretamente no contato entre o substrato e o revestimento. Para um melhor contato, a pressão de impacto (P) deve ser maior que a pressão de capilaridade (P_{σ}), sendo determinado o raio $\zeta = P/P_{\sigma}$. Quanto maior for o raio ζ , maior será a microadesão do revestimento no substrato. O aumento do raio ζ se dá através do aumento na densidade, viscosidade e velocidade da gota aspergida que sofrerá impacto no substrato, bem através da rugosidade da superfície do substrato (Sobolev, *et al.*, 2000).

De acordo com Lima *et al.* e Tavares a fratura se divide em três tipos, dependendo de onde a mesma ocorreu (Lima, *et al.*, 1999) (Tavares, 2009):

- 1) Adesiva: Quando há ruptura na própria interface revestimento/substrato
- 2) Coesiva: Quando a ruptura ocorre entre as camadas do revestimento devido a uma falta de coesão.

- 3) No adesivo: Quando a ruptura ocorre em qualquer posição no interior do adesivo ou nas suas interfaces.

2.2 Porosidade

Devido ao fato de o processo de aspersão térmica se basear em empilhamento de lamelas, o resultado do revestimento aspergido inclui porosidades. Estas porosidades podem ser cavidades isoladas ou cavidades interconectadas. Estas são capazes de permitir que líquidos ou até que gases penetrem até o substrato, constituindo um grave problema, uma vez que a penetração de substâncias indesejáveis acelera o processo de degradação do material. Os revestimentos realizados por aspersão térmica podem apresentar porosidade de até 20% (Freitas, 2015).

Além disso, a porosidade afeta diretamente na redução das propriedades físicas do revestimento, como condutividade elétrica e térmica e módulo de elasticidade do material, diminuindo também a coesão das camadas e sua aderência ao substrato (Paredes, 2012)(McPHERSON, 1989).

Os principais fatores que influenciam a presença e a quantidade de porosidade são o gás de arraste utilizado, a distância da tocha ao substrato, o pré-aquecimento do substrato, o material utilizado como revestimento, as condições de aspersão e a preparação da superfície. No caso de utilização de ar, há um risco de acréscimo de porosidade no revestimento. Quanto à distância de aspersão, estudos indicam que a porosidade tende a ser menor quando são utilizadas menores distâncias (Terres, 2006).

O pré-aquecimento do substrato pode fornecer melhores resultados, pois reduz o surgimento de porosidades. No caso estudado, foi depositado um revestimento de níquel através de Aspersão Térmica por Plasma, em um substrato de aço inoxidável (Pershin, *et al.*, 2002). A Figura 5 mostra os resultados obtidos.

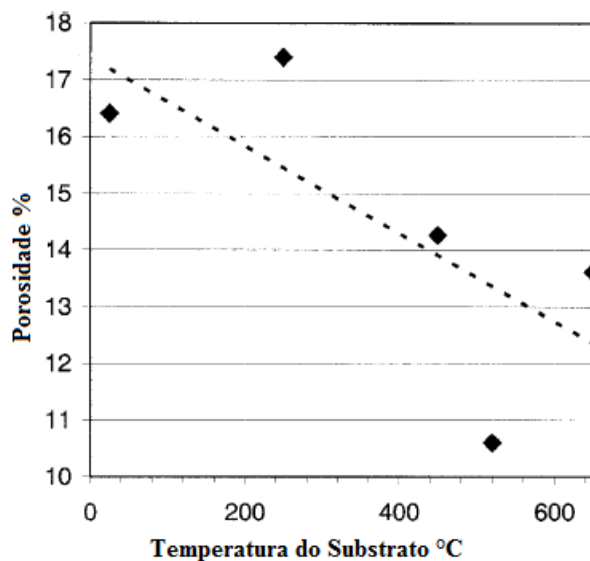


Figura 5 – Variação da porosidade do revestimento de níquel em função da variação da temperatura do substrato de aço inoxidável (Pershin, *et al.*, 2002), Adaptado.

São sugeridos dois tipos de poros: grosseiros e finos. Os grosseiros são mais frequentes quando, no impacto, as partículas aspergidas não estão completamente fundidas, e assim não preenchem adequadamente os interstícios entre as partículas previamente depositadas. No caso dos poros finos, é caracterizado como o incompleto contato entre as lamelas durante a superposição das mesma para formar o revestimento (Freitas, 2015).

A quantidade de poros nos revestimentos depende do material do mesmo e das condições de aspersão térmica (Freitas, 2015). Uma das soluções apresentadas para diminuir a porosidade é controlar o ângulo de aplicação. Segundo Paredes, a porosidade apresenta menor valor quando o ângulo se aproxima de 90°, e sendo como um limite inferior o ângulo de 45°. Abaixo deste também há um comprometimento de outras propriedades do revestimento (Paredes, 2012).

Ainda segundo Paredes, uma técnica também utilizada para a redução do percentual de porosidade é o *Shot Peening* (jateamento da superfície com granalhas esféricas). Esta técnica foi utilizada em tubulações com superfície termicamente aspergidas, gerando uma redução da faixa de porosidade de 4.33 -13.63 % após o processo de aspersão, à faixa de 0.16 - 0.83 %. Além disso, permitiu também um aumento na microdureza do material (Paredes, 2012).

Vreijling cita uma classificação de porosidades em sete diferentes tipos (Vreijling, 1998):

- Tipo 1: porosidade interlamelar. Este tipo de porosidade é causado pelo empilhamento das lamelas, podendo estar relacionado ao tamanho da partícula aspergida e à distribuição do material de alimentação.

- Tipo 2: porosidade formada por bolsas de gás preso, oriundas da turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão.
- Tipo 3: porosidade em forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido, que evaporam com a solidificação do metal depositado.
- Tipo 4: porosidade causada pela desintegração de partículas sólidas após o impacto.
- Tipo 5: porosidade ocasionada pela condensação de partículas parcialmente evaporadas; neste caso, geralmente há resíduos de pó nos poros.
- Tipo 6: porosidade resultante da formação de dendritas na solidificação, o que causa uma descontinuidade na estrutura do revestimento.
- Tipo 7: porosidades em forma de microtrincas, independentemente de sua origem de formação.

Além destes 7 tipos citados, Vreijling menciona também uma outra classificação, diferenciando as porosidades em 3 tipos: abertas, semiabertas e fechadas. A primeira apresenta a pior condição para o revestimento, uma vez que pode expor o substrato ao ambiente externo. A segunda caracteriza-se por poros exposto à superfície, mas que, apesar disto, não atingem o substrato. Já as porosidades fechadas são aquelas totalmente contidas no interior do revestimento, não apresentando quaisquer exposições à superfície (Vreijling, 1998).

Segundo Harding *et al.* (Harding, *et al.*, 1995), é apresentada uma modelagem para a formação de porosidades. Neste trabalho é destacada a importância do aprisionamento de gases entre a base da partícula e a rugosidade do substrato durante a formação do revestimento. Além disso, são definidas 3 porosidades: poro interlamelar, poro intergranular e micro-trincas.

Além disso, em Harding *et al.* (Harding, *et al.*, 1995) é exposta também a porosidade devido ao resfriamento das partículas e à consequente tensão residual gerada deste processo. É considerado que a parte superior da lamela recém impactada sofre maior encolhimento, por estar livre, do que a parte inferior, pois esta última encontra como obstáculo a aderência à camada inferior (ou o substrato). Um gradiente de tensão é gerado, uma vez que a parte superior se encontra livre de tensões, enquanto a inferior sofre tensão devido ao encolhimento da lamela. Como resultado, uma lacuna é gerada entre a lamela e a camada inferior.

2.3. Oxidação

Ao sofrer aquecimento e contato com os gases (gás de arraste ou até mesmo o oxigênio do ar atmosférico), as partículas fundidas sofrem oxidação. Outro fator que pode causar a formação

de óxidos é o resfriamento da camada recém-aspergida; esta sofre influência da temperatura do substrato ou da camada anteriormente aspergida (Novicki, 2008) (Sobolev, *et al.*, 1998).

Na maioria dos casos, estes óxidos são extremamente prejudiciais para o revestimento, uma vez que preenchem espaços que deveriam ser preenchidos pelo material fundido, interrompendo a uniformidade química e a homogeneidade das superfícies expostas aos ambientes corrosivos. Isto ocasiona também uma redução na coesão entre as lamelas, bem como a aderência ao substrato (Brito, 2010).

Além disso, os óxidos metálicos são frágeis e porosos, e seus coeficientes de expansão térmica e sua dureza são diferentes do que o metal ao redor. Camadas de óxidos frágeis podem reduzir potencialmente a força e ductilidade do depósito (Paredes, 2012) (Brito, 2010). Sendo assim, tornam a superfície revestida mais difícil de ser usinada (Sobolev, *et al.*, 1998). Entretanto, em alguns casos óxidos metálicos aprimoram certas propriedades como resistência ao desgaste ou força sob carga compressiva (Marchis, 2008), além de aumentar a condutividade térmica do conjunto (Brito, 2010).

Segundo Deshpande *et al.*, é importante controlar formação de óxidos durante o processo de aspersão para controlar a microestrutura do revestimento obtido. Além disso, a partícula oxidada pode ser classificada como ocorrida durante o trajeto da mesma ao substrato, na superfície lamelar ou durante os passes do processo. A ocorrência destes diferentes tipos está associada não somente aos parâmetros de aspersão, como também ao material de alimentação (Deshpande, *et al.*, 2006).

Além disso, é mostrado também que os revestimentos obtidos por HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) apresentaram menores percentuais de oxidação quando comparados aos obtidos por arco elétrico, que possuíam uma considerável quantidade de poros e óxidos interlamelares. Isto ocorre provavelmente devido ao fato deste processo envolver temperaturas inferiores e maior velocidade das partículas (Deshpande, *et al.*, 2006).

No processo de aspersão por arco elétrico, Paredes sugere que ocorra oxidação na fonte de calor pela dissociação do oxigênio, hidrogênio e nitrogênio no bico da pistola devido à alta temperatura (Paredes, 2012).

No caso de substâncias ferrosas, por exemplo, a oxidação ocorre facilmente na presença de O_2 . Uma possível solução é utilizar um gás inerte como gás de arraste (Argônio, por exemplo). Entretanto, esta é uma solução de elevado custo, e apenas ameniza a formação de óxidos no bico da pistola, sendo os resultados finais não tão superiores do que quando se utiliza ar comprimido (Marchis, 2008).

Os óxidos geralmente são caracterizados como fases escuras e alongadas, podendo ser vistos na seção transversal do revestimento (Brito, 2010).

Algumas possíveis soluções para a redução da formação de óxidos são (Brito, 2010):

- Uso de partículas em pó, preferencialmente com tamanho reduzido; quando maior o tamanho da partícula, menor a razão da área superficial pelo volume, minimizando a quantidade de óxidos;
- Redução da temperatura na superfície a ser aspergida;
- Utilização de câmaras de gases inertes, reduzindo a reação do ambiente;
- Controle da distância entre a pistola e o substrato.

Além disso, Terres cita também a utilização da mistura entre metano e ar como forma de reduzir a concentração de óxidos (Terres, 2006).

2.4. Aspersão Térmica

Este processo fornece grandes vantagens em relação aos demais processos de deposição. Dentre elas, a versatilidade do processo: são inúmeros os materiais que podem ser aspergidos, desde metais até cerâmicas, e é possível o controle da espessura do revestimento. Além disso, o processo fornece pouco aporte de calor, ou seja, a microestrutura do substrato não é alterada. Ao contrário dos processos de soldagem, a aspersão térmica não gera ZTA (Zona Termicamente Afetada) no substrato.

Uma terceira vantagem é a possibilidade de deposição de revestimento em peças com geometrias complexas. É um processo mais rápido do que a soldagem, pois abrange uma maior superfície a cada aplicação. Além disso, para a deposição de revestimento por soldagem, é desejável que o processo seja automatizado, uma vez que não podem haver imperfeições, além da área a ser revestida ser geralmente extensa para que o processo seja manual. Já na aspersão térmica, o processo pode ser manual, devido à abrangência do jato de metal fundido.

A deposição do revestimento baseia-se na estrutura básica lamelar. Uma partícula de metal fundido acelerada, ao colidir contra o substrato, achata-se, tomando forma de uma lamela; esta lamela solidifica-se, formando uma primeira camada. O processo encontra-se ilustrado nas Figuras 7 e 8. As demais partículas aquecidas achatam-se uma sobre as outras, formando camadas lamelares que configuram o revestimento aspergido (Freitas, 2015).

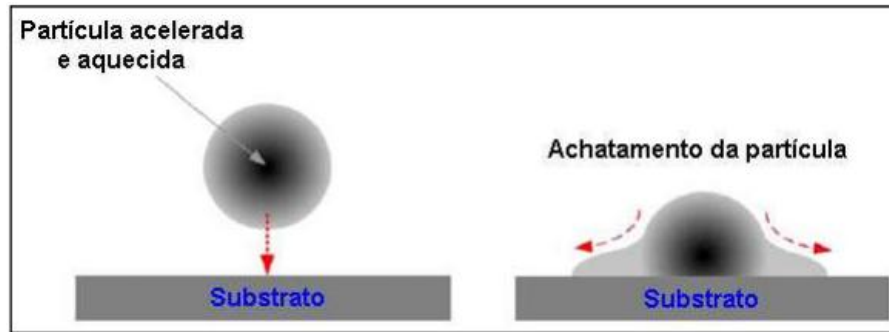


Figura 6 - Formação da lamela (Zimmer, 2009).

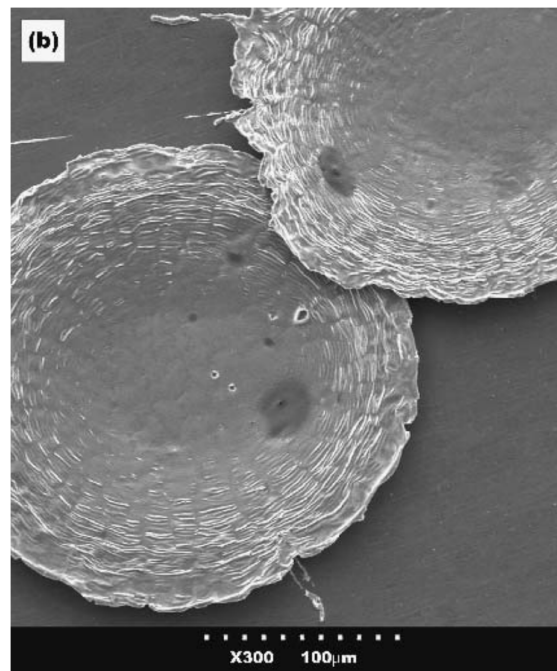


Figura 7 – Microscopia Eletrônica de uma lamela de níquel depositada sobre um substrato de aço inoxidável a 400°C (Pershin, *et al.*, 2002).

As lamelas individuais possuem entre 1 a 20 μm de espessura, e as partículas possuem alta taxa de resfriamento, resultando em grãos finos e policristalinos e depósitos uniformes de material (Zimmer, 2009).

A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se em dois grupos: um que usa a combustão e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia. Para fins comparativos, na Tabela 2 encontram-se os principais parâmetros entre todos os tipos de Aspersão Térmica descritos.

Tabela 2 – Algumas características entre os principais tipos de Aspersão Térmica (Freitas, 2015).

Processos	Vazão de gases (m³/h)	Temperatura de chama média (°C)	Velocidade de Impacto (m/s)	Aderência Relativa (0 a 10)	Coesão Interlamelar (Baixa a muito alta)	Teor de óxidos (%)	Custo Relativo (0 a 10)	Taxa de Aspersão (kg/m)	Energia (kW/kg)
Chama (pó)	11	2.200	30	3	Baixa	6	3	7	11 a 22
Chama (arame)	71	2.800	180	4	Média	4	3	9	11 a 22
Arco (arame)	71	5.500	240	6	Alta	0,5 a 3	1	16	0,2 a 0,4
Plasma	4,2	5.500	240	6	Alta	0,5 a 1	5	5	13 a 22
HVOF	28 a 57	3.100	610 a 1060	8	Muito Alta	0,2	5	14	22 a 200
Plasma de alta energia	17 a 28	8.300	240 a 1220	8	Muito Alta	0,1	4	23	9 a 13
Plasma a vácuo	8,4	8.300	240 a 610	9	Muito Alta	ppm	10	10	11 a 22

2.4.1. Aspersão Térmica à chama Convencional (*Flame Spray*)

A Aspersão Térmica à chama convencional foi o primeiro processo de aspersão térmica utilizado e foi descoberto em aproximadamente 1910. Tochas mais modernas utilizadas neste processo vêm sendo alteradas desde a década de 50 (Gan, *et al.*). Até hoje é um dos métodos mais tradicionais e simples de aspersão térmica e pertence ao grupo da combustão.

Ele utiliza a energia química da combustão de um gás combustível em oxigênio como fonte de aquecimento com a finalidade de fundir o material de deposição ou revestimento. A tocha oxiacetilênica é a que possui um uso mais comum, utilizando o acetileno como o principal combustível e este, misturado ao oxigênio, gera as mais altas temperaturas durante a combustão (Gan, *et al.*).

No geral, os materiais utilizados para o revestimento, isto é, os materiais de deposição são elementos que reagem com oxigênio a fim de formar óxidos de baixa densidade que flutuam na superfície, melhorando assim a densidade, colagem, etc. Além disso, eles geralmente possuem um ponto de fusão relativamente baixo e requerem um tratamento térmico após a aspersão (Tucker, 2013).

Em relação à aplicação, o processo à chama é frequentemente escolhido na recuperação de peças, geralmente com ligas de níquel, desgastadas ou fora da tolerância. Ligas de bronze

podem ser utilizadas em alguns rolamentos e em áreas de vedação. Misturas de carboneto de tungstênio e níquel-base ligas são utilizadas a fim de fornecer resistência ao desgaste. Já o zinco, é utilizado para conferir resistência à corrosão em pontes e outras estruturas similares (Gan, *et al.*).

Os materiais de deposição podem estar sob a forma de arames, varetas, cordões ou pós. Praticamente, somente é necessária a mudança do bico com a finalidade de adaptar a tocha a diferentes ligas, gases ou tamanhos de arames (Lima, *et al.*, 2012).

O material de deposição, que pode ser na forma de pó, denominado de aspersão por chama de pó (*flame powder spray*) ou arame, que neste caso é chamado de aspersão de chama por arame (*flame wire spray*), que pode ser sólido ou tubular, é fundido e as gotículas aceleradas em direção à superfície de um substrato pelos jatos de fluxo de gás. Os materiais utilizados podem ser metais ou ligas metálicas, cerâmicos e até determinados plásticos (Paredes, 2012).

2.4.1.1. Aspersão Térmica a Chama Utilizando Pó

No método de aspersão por chama de pó (*flame powder spray*), o material de revestimento é alimentado de forma axial na tocha de aspersão (Figura 8), o calor da chama é utilizado tanto para fundir quanto para direcionar o material de revestimento ou deposição ao substrato (Paredes, 2012).

Ademais, como em todos os outros processos de aspersão, neste método ocorre basicamente a pulverização de um material fundido sobre uma superfície de um substrato com a fim de se obter um revestimento. A diferença é que neste processo, os materiais utilizados para formar um revestimento são feitos de pós e são fundidos em uma chama de oxiacetileno ou de hidrogênio formando, assim, uma pulverização fina. Quando essas partículas entram em contato com a superfície do substrato, elas se solidificam rapidamente. Este processo também é denominado de “processo frio” pelo fato da temperatura do substrato ser mantida baixa durante o processamento evitando, assim, danos e distorção do material. A principal vantagem, se comparada ao processo utilizando arame é que utilizando pó, é possível utilizar uma gama muito maior de materiais para o revestimento (Gordon, 2015).

Porém, de acordo com Paredes, o processo utilizando pó como material de deposição gera um revestimento com menor resistência adesiva e coesiva além de maior porosidade. Em geral, isto é devido ao fato de as partículas alcançarem menores velocidades (Paredes, 2012).

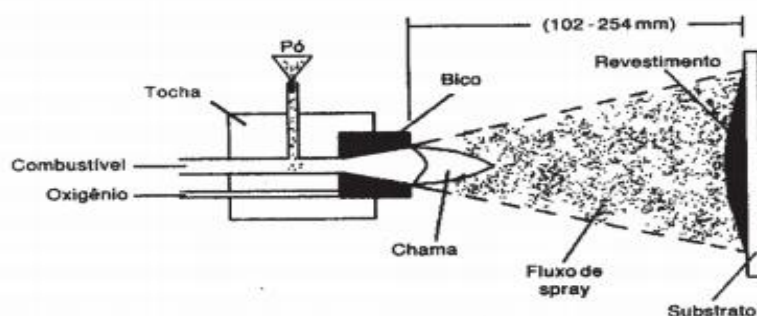


Figura 8 - Desenho esquemático de um processo à chama utilizando pó (Lima, *et al.*, 2012).

Algumas características importantes do processo são que o pó de alimentação pode ser composto por um metal puro, uma liga, um compósito, uma cerâmica, um carboneto ou até mesmo pela combinação destes elementos, além da taxa de alimentação poder variar de 50 a 100 g/min, a taxa de fluxo de gás de transporte entre 3 e 5 l/min (Paredes, 2012) e o tamanho do fluxo de spray entre 102 mm e 254 mm (Lima, *et al.*, 2012). Qualquer uma dessas alterações poderá interferir nas propriedades finais do revestimento.

2.4.1.2. Aspersão Térmica à Chama Utilizando Arame

Este processo possui um menor custo e maior eficiência, se comparado aos processos à chama utilizando pó, por plasma e HVOF; até porque produz revestimentos metálicos e cerâmicos devido ao menor custo dos materiais de adição, possui uma baixa utilização de consumo de gás, além de ter uma elevada taxa de pulverização e deposição. Além disso, a manipulação e operação envolvendo o arame ou vareta são mais simples e fáceis se comparado ao pó. Outra vantagem, é que o grau de fusão na aspersão utilizando arame é mais elevado que no processo com pó, o que garante a produção de revestimentos mais densos (Gartner, *et al.*).

Vale ressaltar que 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. Desta forma são obtidas maiores velocidades (até devido ao fato das partículas serem maiores) de transferência além de uma melhor qualidade final do revestimento (Mendes, 2010).

Além disso, este processo é largamente utilizado para a produção de revestimentos resistentes à corrosão, utilizando o zinco ou alumínio e suas respectivas ligas como material de deposição. Já em aplicações que requerem uma maior resistência ao desgaste, são utilizados elementos como níquel, cobalto e suas respectivas ligas (Gartner, *et al.*). Já para se evitar

tensões residuais ao material, é utilizada a aplicação de cerâmica como material de deposição (Paredes, 2012).

Para a aplicação de material na forma de arame ou vareta, o equipamento deve possuir um sistema de alimentação que pode ser através de roletes que são tracionados por motor elétrico, motor pneumático ou por uma turbina de ar. O material é alimentado até a tocha, vide Figura 9 (Paredes, 2012).

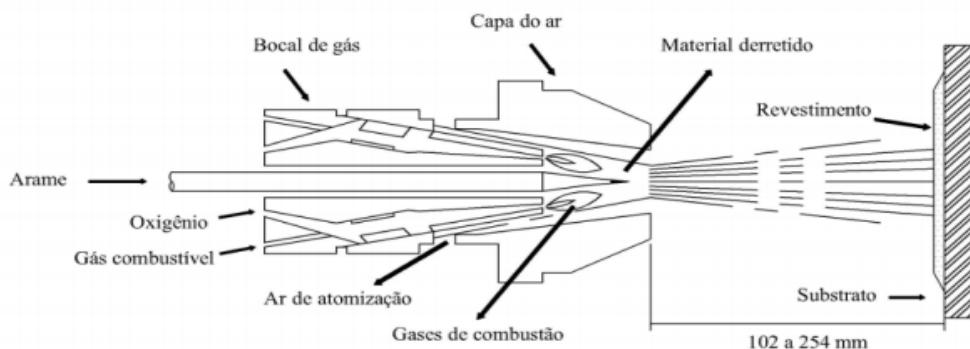


Figura 9 - Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando arame (Mendes, 2010).

Na aspersão por chama utilizando arame, este é fundido por uma chama de gás combustível quando passa pelo bocal da pistola (Mendes, 2010). Devido à própria geometria do bocal, o jato de ar comprimido lançado sobre as partículas fundidas faz com que elas sejam lançadas ao substrato com grande velocidade, devido à alta energia cinética alcançada. Para uma fusão uniforme e para assegurar o tempo suficiente de permanência do arame na chama a fim de se obter uma fusão eficiente, esta energia é aumentada pelo ar comprimido devido à distribuição de gases combustíveis ao redor do arame (Paredes, 2012). Dessa forma, obtemos maiores velocidades de transferência, além de uma melhor qualidade do revestimento (Mendes, 2010).

Além disso, o processo possui algumas outras características e propriedades muito importantes e imprescindíveis para o controle da qualidade do mesmo, as quais podem citar: (Paredes, 2012)

- Distância de aplicação entre a tocha e o substrato entre 120 mm e 250 mm, podendo haver alguma alteração nas características finais do revestimento caso a aplicação esteja fora desta faixa;
- A temperatura do substrato, que é mantida entre 100°C e 200°C;
- É recomendável que a aplicação da pistola forme um ângulo de aproximadamente 90° com a finalidade de se conferir melhor resultado durante o procedimento;

- Para revestimentos cerâmicos, os valores estão na faixa entre 15MPa e 30MPa;
- A porosidade dos revestimentos está em uma faixa porcentual entre 10% e 20%;
- As espessuras dos revestimentos estão na faixa entre 100 μ m e 2500 μ m;
- Diâmetro dos arames varia entre 3 mm e 6 mm;
- Taxa de alimentação varia entre 40g/min e 650 g/min;
- Os materiais denominados autofluxantes, quando aquecidos, podem atingir temperatura de até 727°;
- Materiais com revestimentos aspergidos que contém liga Ni-Al podem alcançar resistência adesiva numa faixa entre 60MPa e 70Mpa [4]. Essa classe pertence ao grupo dos materiais autofluxantes, que geralmente possuem ligas de Ni ou Co e algumas vezes adição de Boro, Fósforo ou Silício, melhorando assim, a aderência das camadas do revestimento (Freitas, 2015).

2.4.2. *Aspersão Térmica a chama de alta Velocidade – HVOF*

O processo de aspersão oxicomustível de alta velocidade, mais conhecido como HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) foi desenvolvido entre o final da década de 1970 e o início de 1980 (Mendes, 2010). O processo utiliza a mistura entre um combustível gasoso ou líquido, como o propileno, hidrogênio, propano ou querosene, e o oxigênio.

O processo HVOF tem uma vasta gama de aplicações, podendo ser utilizada nas indústrias de aviação, de turbinas a gás, automotivas, de impressão e papel, petroquímica, de fabricação de vidro, de processamento de metal, têxtil, entre outras (Sulzer, 2013).

Ele funciona a partir do combustível, que é cuidadosamente misturado com o oxigênio em uma câmara de combustão, esta produz uma chama de alta temperatura e pressão que injeta o gás através de um bocal, permitindo dessa forma o aumento da velocidade do gás. É então introduzido revestimento, na forma de pó, neste jato, onde é aquecido e acelerado em direção à superfície ou substrato a ser revestido, devido ao seu alto acúmulo de energia térmica e cinética (Figura 11) (Dias da Silva, 2009).

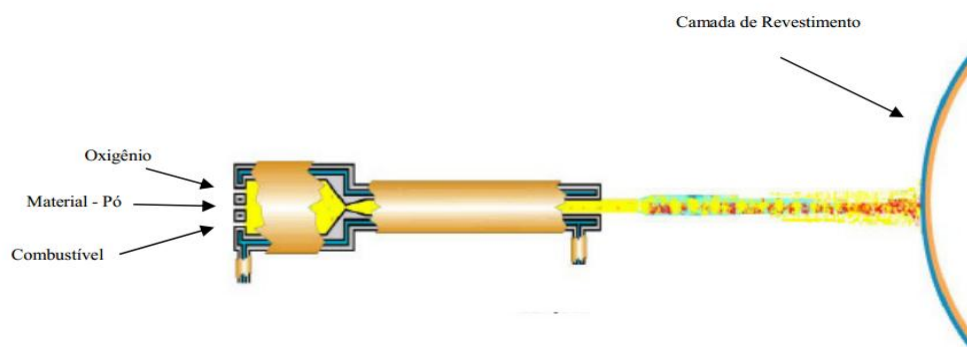


Figura 10 - Desenho esquemático de um equipamento e sistema de HVOF (Dias da Silva, 2009)

As velocidades das partículas do pó podem atingir valores entre 1500m/s e 2000m/s, sendo conhecido este processo como supersônico. Já a temperatura do jato atinge valores relativamente baixos, em torno de 2900°C, fazendo com que as partículas não sejam completamente fundidas. Os revestimentos formados são, geralmente, bastante homogêneos e possuem uma estrutura granular fina (Dias da Silva, 2009).

Vale ressaltar que não só a temperatura do gás é de suma importância para o aquecimento e aceleração das partículas, mas também o tempo de permanência das mesmas no interior da corrente do gás quente. Quanto maior for esse tempo, mais perto serão as velocidades e temperaturas das partículas perante o gás (Gartner, *et al.*).

Ademais, em alguns modelos, as partículas são já são injetadas na câmara de combustão para alcançar temperaturas elevadas. Já em outros casos, as partículas de pulverização são injetadas na corrente de gás de escape no interior da pistola de pulverização e passam por bocal, a fim de se obter as propriedades desejadas de uma superfície de revestimento no momento do impacto à alta velocidade. Neste último caso, a quantidade do gás deve ser suficiente para fluidificar as partículas desde o alimentador da pistola de pulverização até o momento da saída do gás. Utilizando bocais longos, pode-se garantir ainda mais aquecimento e aceleração, já que ele confina as partículas na corrente de gás quente por mais tempo e impede a infiltração do ar ambiente (Gartner, *et al.*).

Além disso, o local onde as partículas são injetadas no bocal não tem apenas um impacto na aceleração e no aquecimento das partículas, mas também no teor de óxido do revestimento. Se as partículas são injetadas em um local onde a combustão não foi completada, as partículas podem competir com o gás combustível por oxigênio e devido a isso, o revestimento terá uma grande quantidade de óxidos (Gartner, *et al.*). Entende-se que

não é adequado, pois um revestimento com muitos óxidos compromete sua resistência, ficando mais susceptível ao aparecimento de trincas.

O processo de HVOF produz revestimentos com excelentes características, as quais podem ser ressaltadas:

- Alta densidade: devido às altas velocidades de impacto, alguns revestimentos possuem um percentual entre 0,5% e 2% de porosidade (Gan, *et al.*) (Sulzer, 2013);
- Excelente adesão: podem ser atingidas pressões de até 83 MPa ou 12000 psi (Gan, *et al.*);
- Alta dureza e como consequência, boa resistência ao desgaste (Gan, *et al.*); (Sulzer, 2013);
- Boa resistência ao impacto (Sulzer, 2013);
- Resistência à corrosão (Gan, *et al.*);
- Baixa quantidade de óxidos (Gan, *et al.*);
- Tensão residual: tensões residuais de compressão e, em alguns casos, baixas tensões de tração melhoram a vida em fadiga de um componente revestido, reduzem o aparecimento de fratura e permitem maiores limites na espessura do revestimento (Sulzer, 2013).

2.4.3. *Aspersão Térmica por Arco elétrico*

A aspersão térmica por arco elétrico consiste na utilização de um arco elétrico, formado entre dois arames polarizados, para a obtenção do material fundido.

Conforme ilustra a Figura 11, um arame é ligado ao polo negativo, enquanto o outro é ligado ao polo positivo. Ambos funcionam, no caso, como eletrodos consumíveis. Ao se encontrarem, uma diferença de potencial entre 18 e 40 volts é gerada pela fonte, causando a fusão dos arames. Esse metal fundido é então atomizado e lançado, através de um jato de ar comprimido, contra o substrato (Brito, 2010).

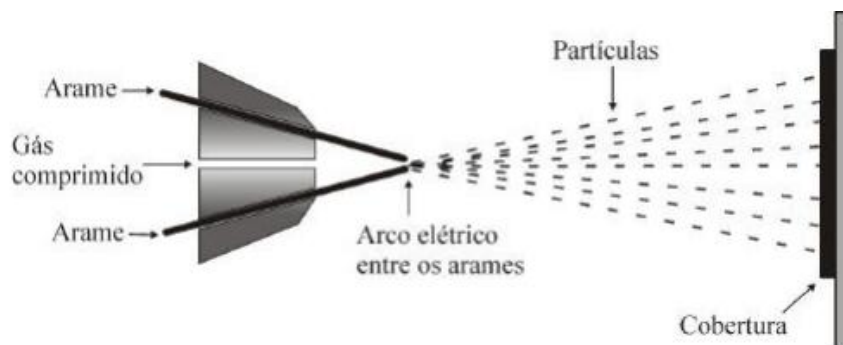


Figura 11 – Ilustração do processo de aspersão térmica por Arco Elétrico (Brito, 2010).

Este é um processo que oferece maiores taxas de deposição de material, comparado ao processo à chama, devido principalmente à utilização de dois arames, além da corrente e da velocidade de alimentação do arame (Freitas, 2015). Além disso, o processo a arco elétrico permite que a temperatura de fusão chegue a 4000°C , com velocidades de até 240m/s (Novicki, 2008). As altas temperaturas possibilitam uma maior aderência do revestimento; em contrapartida, quando combinadas com baixas velocidades, podem acarretar num aumento da oxidação e porosidade (Pawlowski, 2005).

Além disso, o processo gera uma redução do aquecimento do substrato, uma vez que gases de combustão não são envolvidos, apenas o gás de arraste. Os únicos parâmetros que influenciam na taxa de deposição de material são a corrente elétrica utilizada e a velocidade de alimentação do arame (Freitas, 2015).

Além das vantagens já citadas, este processo também exige um preparo de superfície não muito crítico, fornece depósitos mais densos e microestrutura de revestimento mais consistente, devido à maior simplicidade de regulação dos parâmetros (Brito, 2010).

Um fator bastante preocupante nos processos de aspersão térmica é a inclusão de óxidos, que na maioria dos casos é desfavorável para o desempenho do revestimento. Algumas formas de reduzir a inclusão dos mesmos na camada aspergida são (Marchis, 2008):

- Reduzir a pressão de atomização, pois causa aumento no diâmetro médio das gotas, diminuindo a relação entre a área superficial e o volume das partículas;
- Diminuir a distância da tocha ao substrato, reduzindo assim o tempo de exposição ao ar;
- Realizar algumas modificações no bico, de forma a promover um aumento na velocidade ou diminuição na distribuição de tamanho de partículas;
- Utilizar gases inertes, como o nitrogênio, argônio ou hélio, como gás de arraste, reduzindo a quantidade de oxigênio do ar que reage com as partículas (Freitas, 2015);

2.4.4. Aspersão Térmica por Plasma

O processo de aspersão térmica por plasma surgiu da necessidade de obtenção de elevadas temperaturas, para que fosse possível a fusão de materiais cerâmicos e carbetos, temperatura esta que não poderia ser atingida pelos demais processos (Paredes, 2012) (Khaliil, 2009).

Os gases comuns, quando aquecidos, comportam-se de forma a seguir as leis termodinâmicas e físicas. Já o Plasma consiste em gases que se comportam segundo suas leis próprias, e possuem um estado energético superior ao dos gases comuns (Paredes, 2012). Partindo disto, tem-se que os processos a plasma atingem altas temperaturas, permitindo, assim, a aspersão de demais materiais, além do metal.

O processo consiste basicamente em injeção do material a ser depositado na forma de pó dentro do bocal da pistola de aspersão utilizando um fluxo de gás. As partículas atravessam o plasma, são aquecidas e então aceleradas a velocidades extremamente altas (da ordem de centena de metros por segundo), impactando-se no substrato. As gotas de metal fundido espalham-se e solidificam-se rapidamente, formando uma estrutura lamelar (Zimmer, 2009). A Figura 12 ilustra o processo.

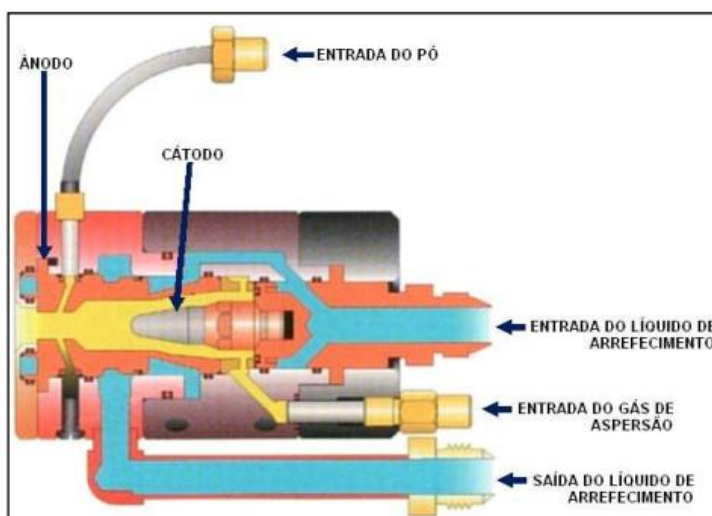


Figura 12 - Pistola de aspersão térmica por plasma modelo SG-100 (Praxair) (Zimmer, 2009).

Há dois tipos de aspersão térmica por Plasma: por Arco Não Transferido e por Arco Transferido. Como pode ser observado na Figura 13, a diferença básica entre ambos é que no primeiro o arco elétrico é gerado e mantido apenas entre o eletrodo e o orifício da pistola, enquanto no segundo envolve a peça para fechar o circuito elétrico (Paredes, 2012).

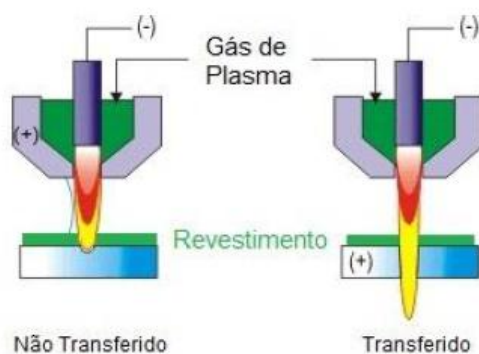


Figura 13 – Ilustração da diferença entre os arcos transferido e não transferido (Antunes, 2013).

Além da alta velocidade que as partículas atingem, este processo fornece também outras condições de deposição bem superiores a outros processos. As partículas raramente atingem tamanhos superiores a 100 μm , além de a temperatura ser superior à de fusão (Zimmer, 2009).

2.4.4.1. Plasma de Arco não-transferido (*Air Plasma Spraying*)

Este é um processo que não envolve a peça no arco elétrico, pois o arco é gerado apenas entre o eletrodo e o orifício constrito (Khalil, 2009).

O gás de plasma, argônio ou nitrogênio ionizado, e com possíveis adições de hidrogênio e hélio para aumentar a potência e velocidade do plasma, passam através de um arco elétrico estabelecido entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre dotado de um orifício e resfriado a água, alinhados coaxialmente. Em sua passagem o gás é aquecido, gerando o plasma. O sistema é envolvido por um ou mais gases inertes de proteção (argônio, hélio, hidrogênio, nitrogênio ou mistura) (Paredes, 2012). Este processo descrito encontra-se ilustrado na Figura 15.

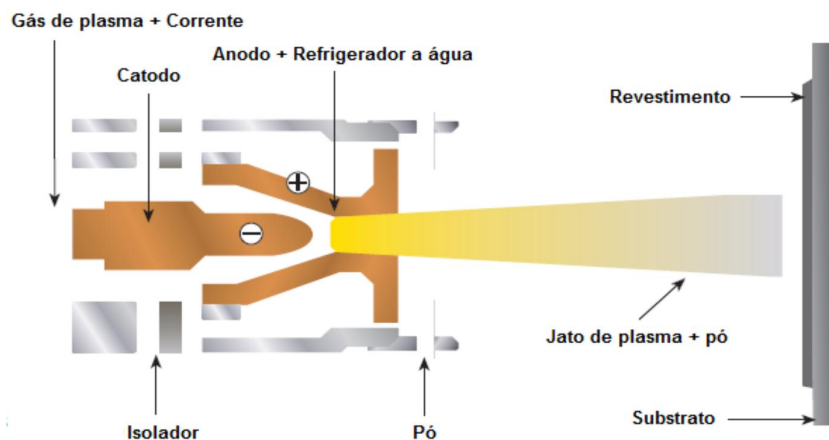


Figura 14 – Esquema de Aspersão Térmica por Arco Não-Transferido (Freitas, 2015).

As principais variáveis que afetam a fusão são: a taxa de alimentação do pó, a vazão do gás, o tipo de bocal constritor, o ângulo de injeção, a amperagem e a voltagem. A velocidade das partículas varia entre 80 e 300 m/s, enquanto a temperatura do gás de plasma atinge entre 5.000 a 25.000°C, dependendo da mistura dos gases. Para aumentar o calor e manter a tensão constante, um gás secundário pode ser injetado. A taxa de resfriamento normal após a colisão no substrato é rápida, em torno de 10 K/s (Freitas, 2015) (Antunes, 2013).

2.4.4.2. Plasma de Arco Transferido (*Plasma Transferred Arc*)

Este processo consiste numa combinação de Aspersão Térmica e Soldagem, pois a deposição envolve também a fusão do substrato na formação do arco, assim como nos processos de soldagem. Uma corrente secundária é formada entre o eletrodo da pistola e o substrato, que é condutor. A fusão superficial e a profundidade de penetração são controladas pela corrente do arco secundário. O material aspergido, geralmente na forma de pó, é fundido na poça de fusão formada no substrato, ocorrendo então uma diluição, semelhante ao processo de soldagem. (Paredes, 2012). O processo encontra-se esquematizado na Figura 15.

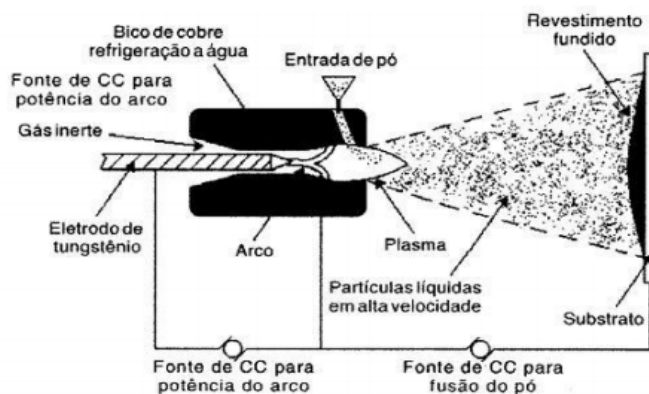


Figura 15 – Esquema de Aspersão Térmica por Arco Transferido (Paredes, 2012).

Por envolver o substrato no arco elétrico, o processo impossibilita a utilização de substratos de cerâmica, uma vez que o mesmo deve ser condutor (Antunes, 2013).

Segundo Paredes (Paredes, 2012), a espessura do revestimento obtido por este processo é da ordem de 0,5 a 6 mm, e a largura de revestimento obtida em um passe único é de 32 mm. Além disso, os revestimentos produzidos são lisos e densos (Antunes, 2013).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e Procedimento

O processo de aspersão térmica utilizado no presente trabalho é por Arco Elétrico. Neste caso, serão utilizados dois arames como eletrodos, que se fundirão no bico da pistola por diferença de potencial. A Tabela 3 mostra a composição dos arames utilizados. A Tabela 4 mostra a combinação utilizada dos arames para a obtenção do revestimento.

Tabela 3 – Composição química dos arames utilizados no processo de Aspersão Térmica.

Arame	% Fe	% Co	% Cr	% Ni	% B	% Mn	% W	% Mo	% C	% Si
A	66,1		27		3,5	1,8				1,6
B	65,7		25,7	2,9		1,9		0,8	1,6	1,4
C	3,6	58,4	28,8	1,9		0,9	4,9	0,02	1,1	0,3

Tabela 4 – Combinação dos arames para revestimento.

Combinação	Combinação dos arames
1	A + B
2	A + C

Estes arames foram depositados através de aspersão térmica por arco elétrico em um substrato de aço SAE 1020. Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram chapas.

Primeiramente, as amostras passaram pelo processo de limpeza mecânica por jateamento abrasivo grau Sa $2\frac{1}{2}$ utilizando abrasivo de óxido de alumínio G.20, de forma a garantir o ancoramento mecânico das partículas, conforme apresentado na Figura 16. Após o processo de limpeza mecânica, aplicou-se uma camada de liga intermediária em uma das faces de cada amostra, seguido da aplicação do revestimento com a espessura pré-definida de 1,9 mm.



Figura 16 – Amostras em chapa após jateamento.

A partir de experimentos anteriores e seguindo a literatura técnica, foram escolhidos os parâmetros considerados adequados para a obtenção dos revestimentos, e estes são mostrados na Tabela 5 (Brito, 2010) (Antunes, 2013). A Figura 17 mostra a aplicação do revestimento termicamente aspergido nas amostras.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica.

Parâmetro	Valor / Informação
Tensão	40 V
Corrente	100 A
Distância de projeção	Aproximadamente 100 mm
Número de passes	3 a 6
Taxa de deposição	3,24 kg/h
Diâmetro dos arames	1,6 mm
Gás atomizante	Argônio



Figura 17 – Aplicação do revestimento nas amostras retangulares.

Os corpos de prova obtidos possuem as seguintes configurações:

- Amostras retangulares:
 - Substrato de aço carbono SAE 1020;
 - Chapa de 100 mm x 150 mm x 4,5 mm;
 - Aplicação de selante (resina epóxi) em metade de todas as amostras (Figura 18).
 - Aplicação de resina nos contornos das chapas.

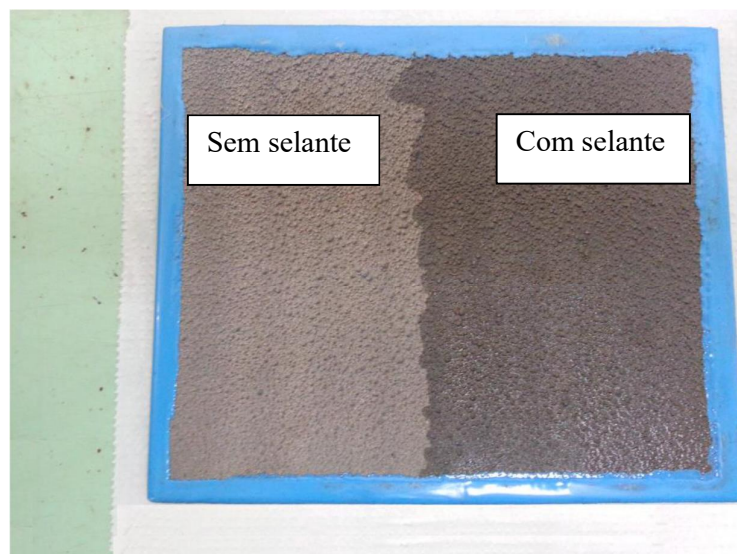


Figura 18 – Amostra em chapa.

3.2. Preparo das amostras

Devido à composição química relativa à combinação dos arames, resultou-se em quatro diferentes amostras; entretanto, apenas duas foram utilizadas. Entre elas estão:

- Revestimento à base de Ni e Cr; sem resina epóxi
- Revestimento à base de Co, Ni e Cr; sem resina epóxi

Vale ressaltar que as amostras serão devidamente numeradas, sendo a combinação 1 responsável pela formação do revestimento a base de Níquel e Cromo, enquanto que a combinação 2, pela formação do revestimento a base de Cobalto, Níquel e Cromo.

Primeiramente, as amostras foram cortadas, no sentido transversal, na máquina de corte AROTEC modelo COR-80 do LAMAT (Laboratório de Metalografia do CEFET/RJ). Foram utilizados discos com dureza na faixa de 35 a 50 HRc, utilizando um lubrificante a fim evitar o aquecimento excessivo dos corpos de prova.

Após o corte, as amostras foram embutidas em resina baquelite, através do equipamento AROTEC modelo PRE-30, também do LAMAT. Este processo é realizado para facilitar o manuseio das amostras no seu preparo, bem como garantir que esta esteja plana e perpendicular à lente do MO e ao feixe de elétrons do MEV. A máquina realiza a solidificação da resina em pó através de compressão, aquecimento e resfriamento do baquelite.

Em seguida, as amostras foram lixadas na politriz modelo Aropol2V, com a seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600. Após o lixamento, foi realizado polimento nas amostras com abrasivo de pasta de diamante de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m, também utilizando a politriz universal modelo Aropol2V.

3.3. Microscopia Óptica

Para uma avaliação microestrutural do revestimento e identificação das regiões presentes nas amostras, foi utilizado o microscópio óptico da OLYMPUS, modelo BX 60 MF, localizado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ como mostrado na Figura 19.



Figura 19 - Microscópio Óptico Olympus BX 60 MF.

3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

Após preparo de todas as amostras, suas microestruturas foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V.) CamScan 3200LS, localizado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, mostrado na Figura 20.



Figura 20 – Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V.).

3.5. Ensaio de Aderência

O ensaio de aderência, também conhecido como *Pull-Off*, se baseia em aplicar uma força trativa crescente no sentido perpendicular à interface revestimento/substrato, utilizando um bastão do tipo metálico, até que ocorra a ruptura, seja no adesivo (condição desejada), ou no revestimento. Este ensaio encontra-se esquematizado na Figura 22 (Tavares, 2009).

O ensaio de Pull-off foi realizado no Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), da PETROBRAS. Para realizar o ensaio, foi utilizado o Medidor de Aderência Pneumático da marca PATTI 110, fabricante SEMicro (número de série IM1010-1) e pistão F8, vide Figura 21. Os Dollys foram colados ao revestimento com adesivo epóxi da marca Araldite, fabricante Brascola, com tempo de secagem de 10 minutos e cura de 24 horas. Foram colados dois tarugos em cada chapa, de forma a obter um total de 4 resultados.



Figura 21 - Medidor de Aderência Pneumático P.A.T.T.I, modelo Elcometer 110

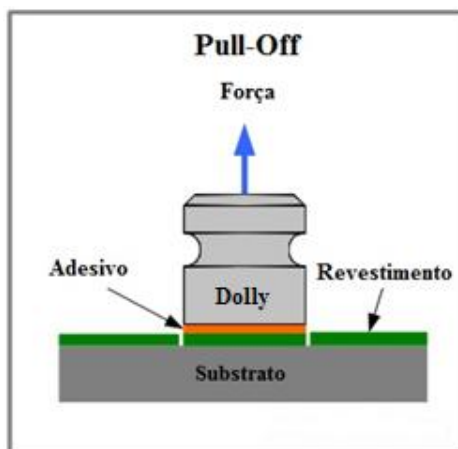


Figura 22 - Ilustração do ensaio de Pull-off (Kopeliovich, 2014).

Após o ensaio de Pull-off, as chapas foram cortadas, separando-se a região ensaiada, para então ser levada ao MEV. A fratura obtida pelo ensaio foi então avaliada, permitindo uma análise microscópica da fratura resultante.

3.6. Processamento Digital de Imagem (PDI)

O processamento digital de imagem foi realizada através do software FIJI Image, cuja interface está mostrada na Figura 23, com o objetivo de qualificar trincas, óxidos e poros em regiões aleatoriamente selecionadas da amostra (sem sobreposição de defeitos).

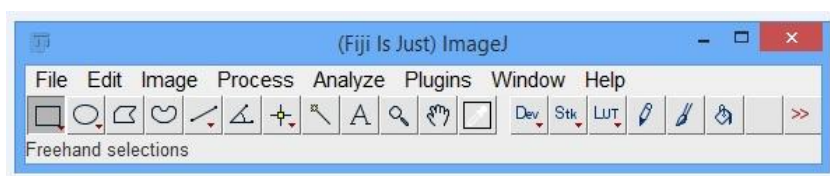


Figura 23 – Interface do software Fiji Image.

Foram obtidas 10 micrografias de cada condição, sem sobreposição de defeitos, de forma a abranger a maior área possível da amostra.

Para se obter a porcentagem de óxidos, poros e inclusões presentes nas amostras, o processo foi dividido em quatro etapas, as quais podem ser citadas:

- i) Pré-Processamento
- ii) Segmentação
- iii) Pós-Processamento
- iv) Extração de atributos

3.6.1. Pré-Processamento

No Pré-Processamento foram utilizadas primeiramente as ferramentas *Image - Crop* e *Image - Type - 8-bit* com o objetivo cortar a barra de escala da imagem e utilizá-la em 8-bits, respectivamente. Em seguida, foi realizado um contraste entre as partes mais claras e as mais escuras. Para tal, foi utilizada a ferramenta *Image - Adjust - Brightness/Contrast*, conforme mostrado na Figura 24. Esta primeira etapa é utilizada para corrigir os principais defeitos de imagem que normalmente são gerados durante a obtenção da mesma (Paciornik, et al., 2015).

Em alguns casos, o comando *Edit - Invert* foi utilizado antes do *Brightness/Contrast*, de forma a buscar o melhor tratamento pra cada tipo de imagem, conforme mostrado na Figura 25.

Do lado esquerdo encontra-se a imagem submetida ao comando e na direita, a imagem original, a fim de comparar os defeitos segmentados em relação aos originais.

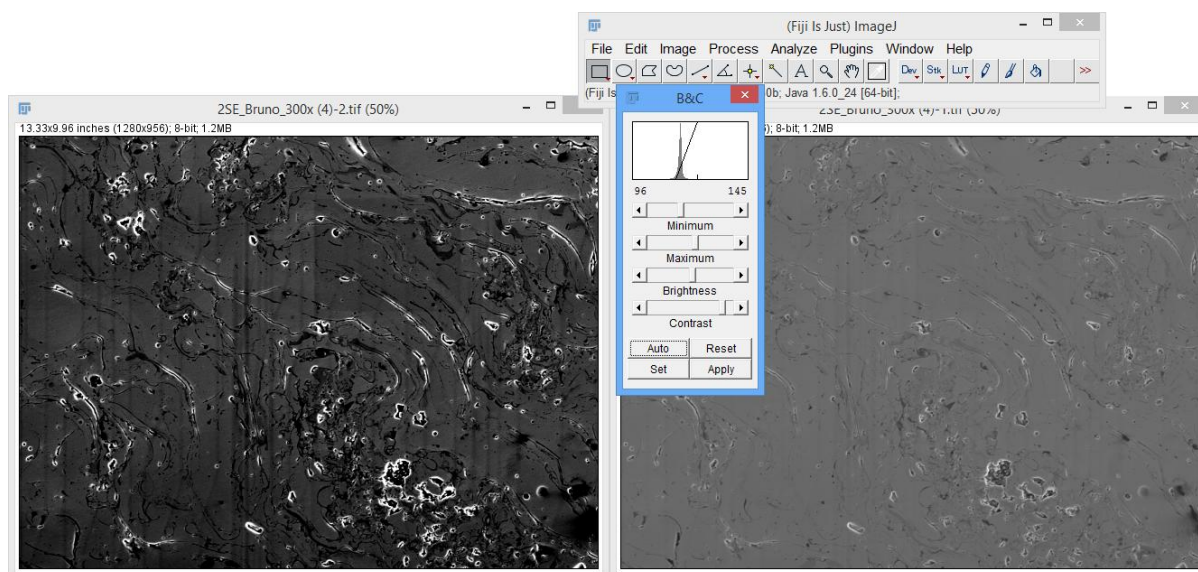


Figura 24 – Ajuste de brilho e contraste de imagem da condição 2 através do comando *Image – Adjust – Brightness/Contrast*

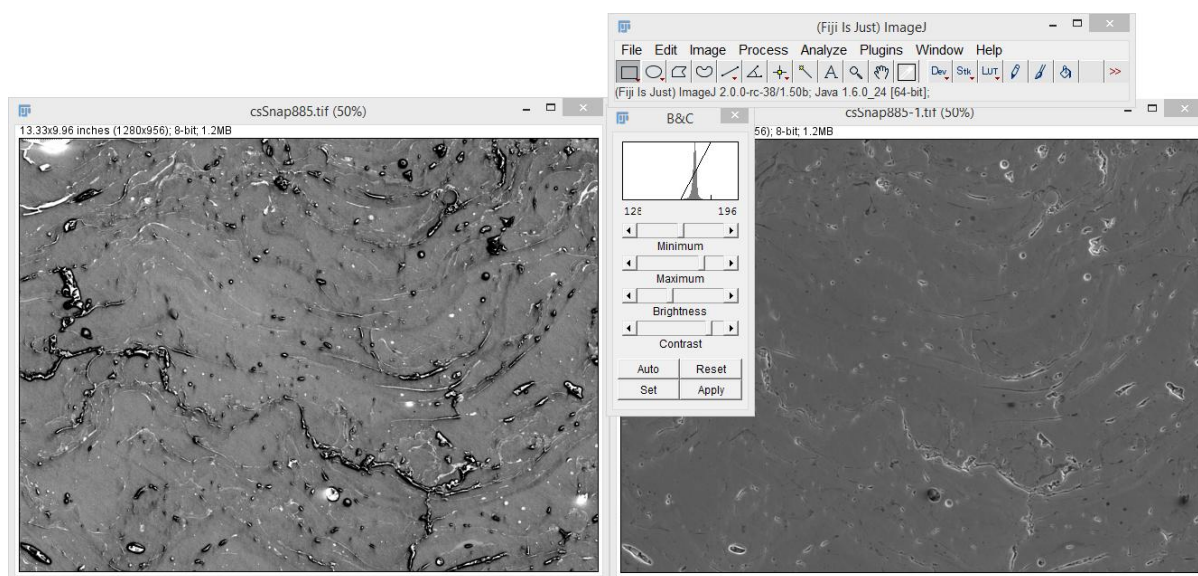


Figura 25 – Ajuste de brilho e contraste de imagem da condição 1 através do comando *Image – Adjust – Brightness/Contrast*, após o comando *Edit - Invert*

3.6.2. Segmentação

No processo de Segmentação foi estudado o método de Limiarização, utilizando-se a ferramenta *Threshold*. Através deste comando é realizada a segmentação das imagens com o

objetivo de se identificar os objetos de interesse e que serão quantificados no final. O processo é obtido através do comando *Image - Adjust - Threshold*, conforme mostrado nas Figuras 26 e 27, relativas às condições 2 e 1, respectivamente.

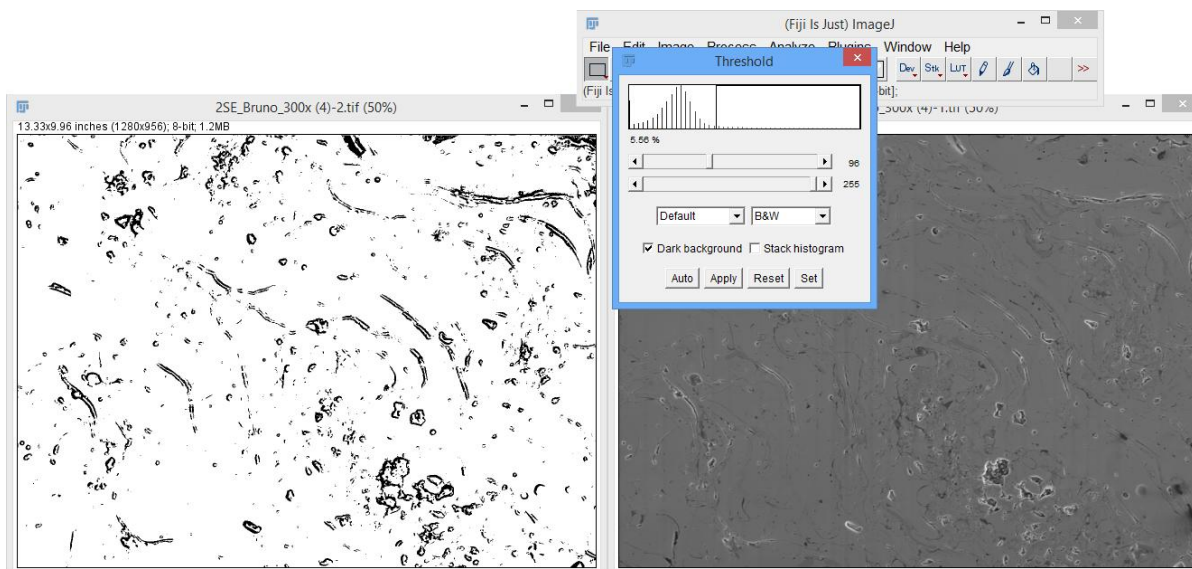


Figura 26 – Processo de Segmentação de imagem da condição 2

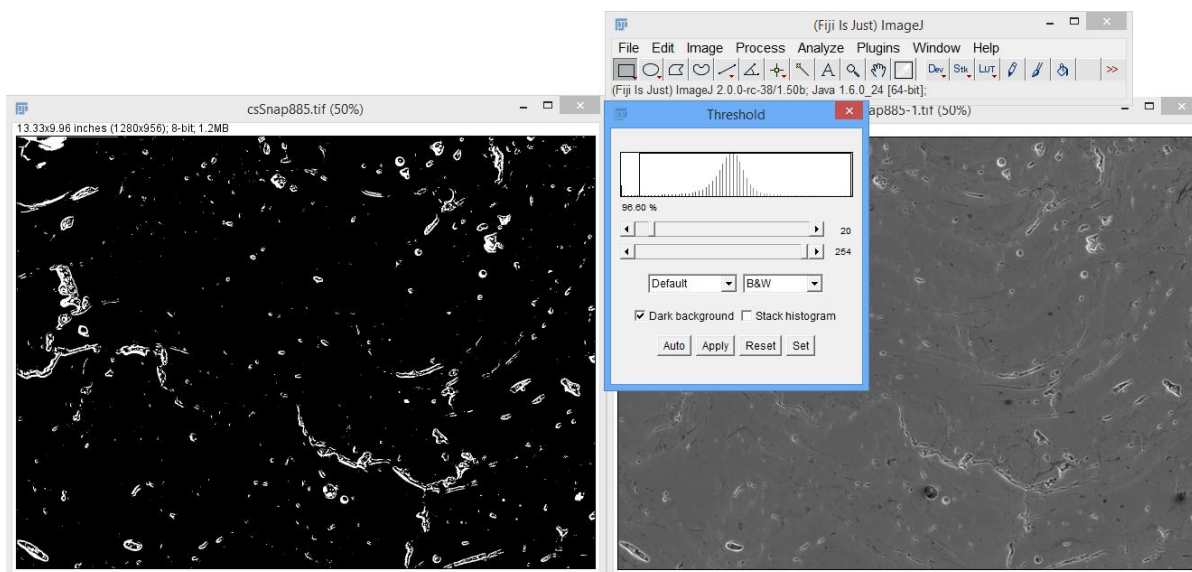


Figura 27 – Processo de Segmentação de imagem da condição 1

3.6.3. Pós-Processamento

No Pós-Processamento, foram corrigidos os defeitos gerados durante a segmentação. Para isto, foram utilizados diferentes comandos, em diferentes ordens e, em alguns casos, por mais de uma vez. Estes se encontram detalhados e ilustrados abaixo:

- *Process - Binary - Erode* (Figura 28) e *Process - Binary - Dilate* (Figura 29), onde os objetos na cor escura são dilatados, ou seja, terão sua área aumentada. Para esta mesma finalidade, foi utilizado também o comando *Process - Binary - Open*, que gera na segmentação um efeito bastante semelhante ao *Erode* e *Dilate*, conforme mostrado na Figura 30.
- *Process - Binary - Fill Holes* (Figuras 31 e 32), onde pequenos vazios contidos nos defeitos segmentados são preenchidos;
- *Process - Noise - Remove Outliers*, que remove as partículas muito pequenas (com uma área de até 1.5 pixels), também chamadas de ruído. Para determinar a quantidade de ruído removido, muda-se o raio (*Radius*), conforme visto na Figura 33, em que o raio selecionado foi de 4 pixels, e na Figura 34, em que o raio foi de 6.4 pixels;
- *Edit - Invert*, que faz a inversão de cores dos defeitos em relação ao fundo. Este comando foi utilizado diversas vezes, dependendo da necessidade e do comando seguinte (por exemplo, o *Fill Holes* exige fundo branco, enquanto que o *Remove Outliers* exige fundo preto);

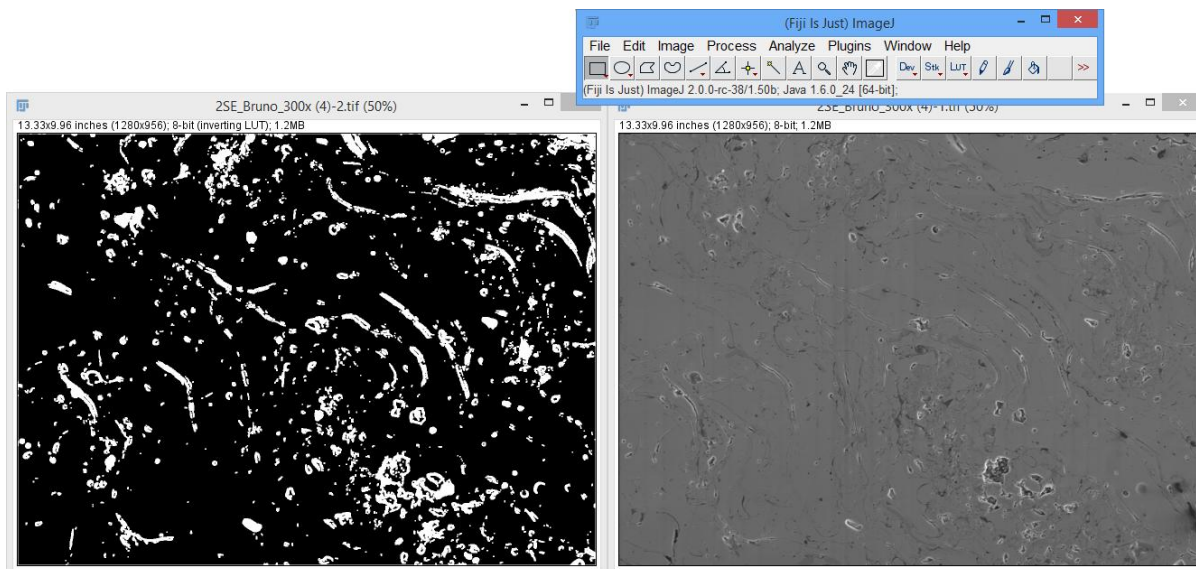


Figura 28 – Comando *Erode* em imagem da condição 2

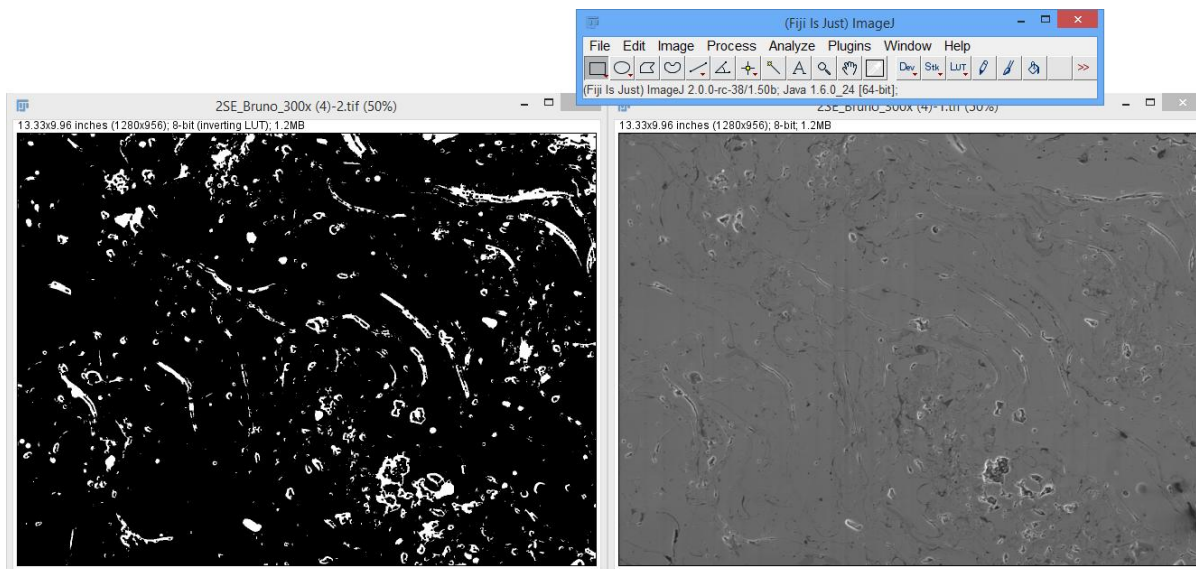


Figura 29 – Comando *Dilate* em imagem da condição 2

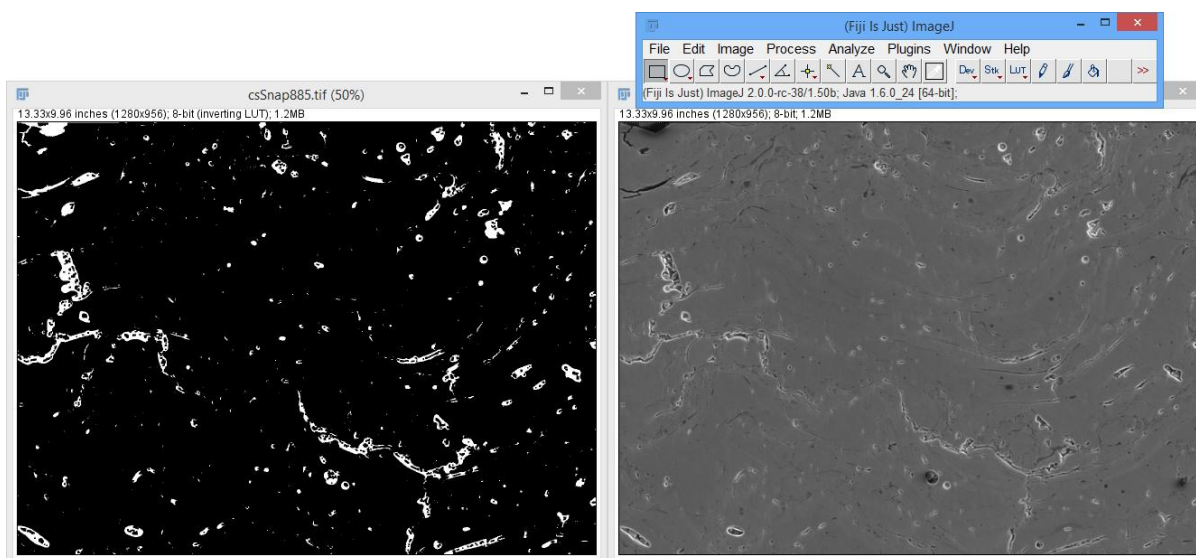


Figura 30 – Comando *Open* em imagem da condição 1

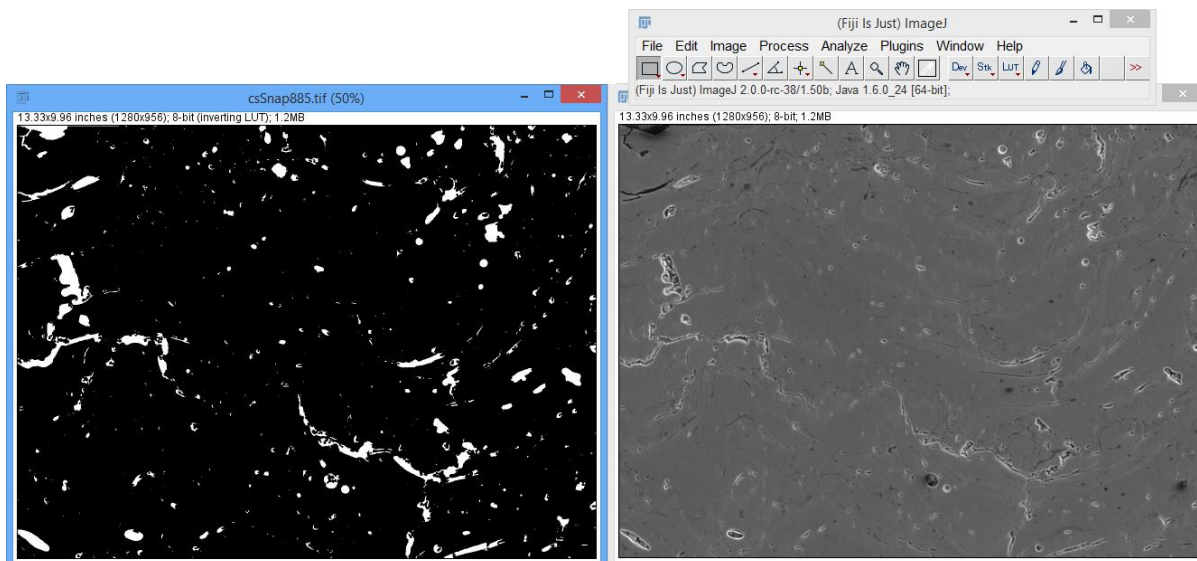


Figura 31 – Comando *Fill Holes* em imagem da condição 1

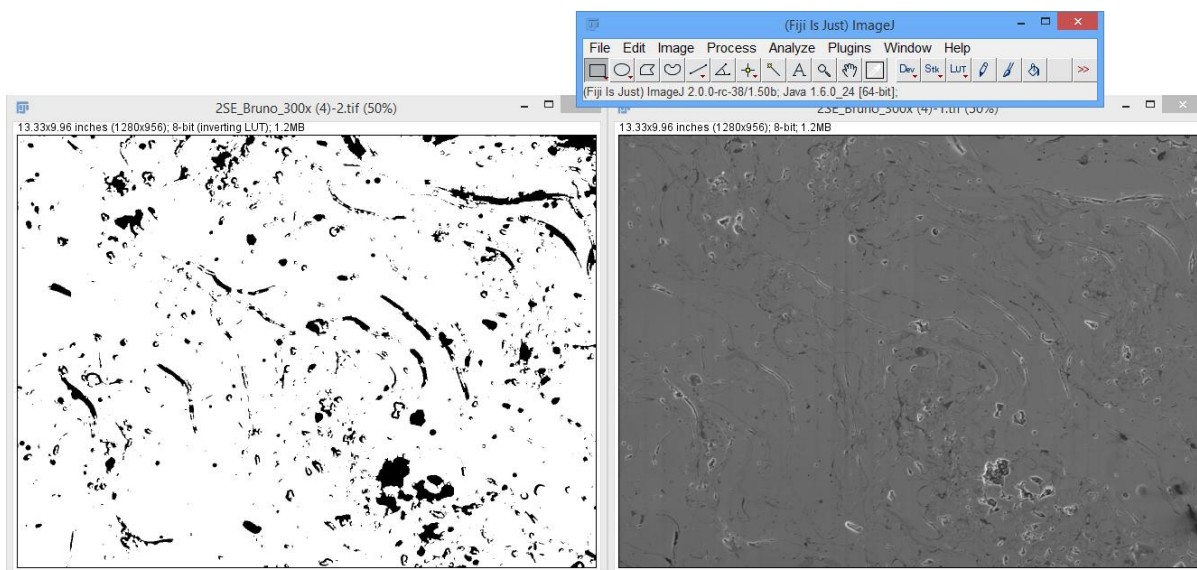


Figura 32 – Comando *Fill Holes* em imagem da condição 2

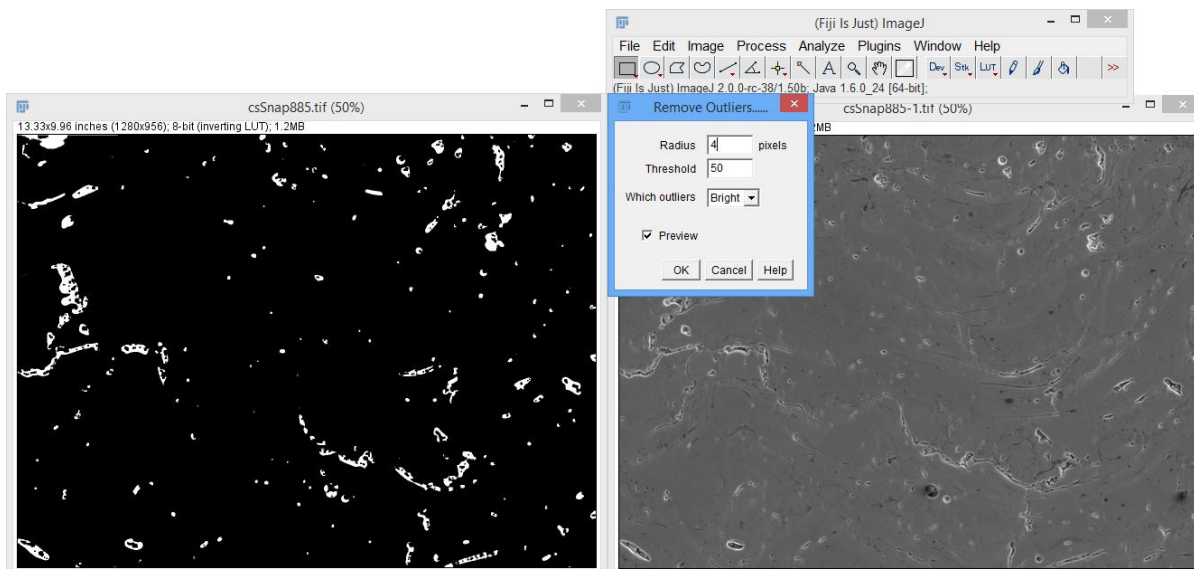


Figura 33 – Uso do comando *Remove Outliers* em imagem da condição 1, com raio de 4 pixels

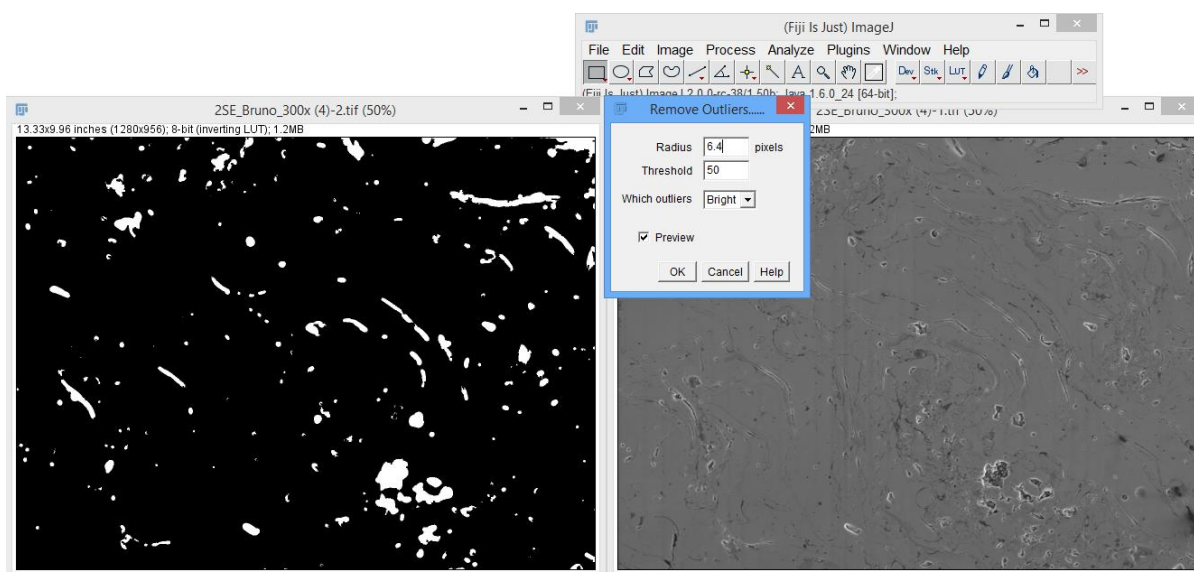


Figura 34 – Uso do comando *Remove Outliers* em imagem da condição 2, com raio de 6.4 pixels

3.6.4. Extração de Atributos

Por último, na etapa de Extração de Atributos, o software calcula a quantidade de elementos segmentados (ou seja, poros ou óxidos, de acordo com o tratamento desejado). Para tal, foi utilizada a ferramenta *Analyze - Analyze Particles*, vide Figuras 35 e 36, onde foram mostrados:

- i) A porcentagem de área correspondente aos elementos segmentados (Matriz *Summary*), conforme Figuras 39 e 40;

- ii) Dentro da imagem original, as regiões que foram contabilizadas (*ROI Manager*), permitindo uma comparação e avaliação do resultado obtido, vide Figuras 37 e 38;
- iii) Matriz *Results*, vide Figura 41, mostrando os resultados de cada elemento, obtendo-se a quantificação e qualificação dos mesmos de acordo, principalmente, com a sua área e perímetro;
- iv) Dentro de uma mesma imagem, a numeração de todos os elementos segmentados, conforme mostrado na Figura 42.

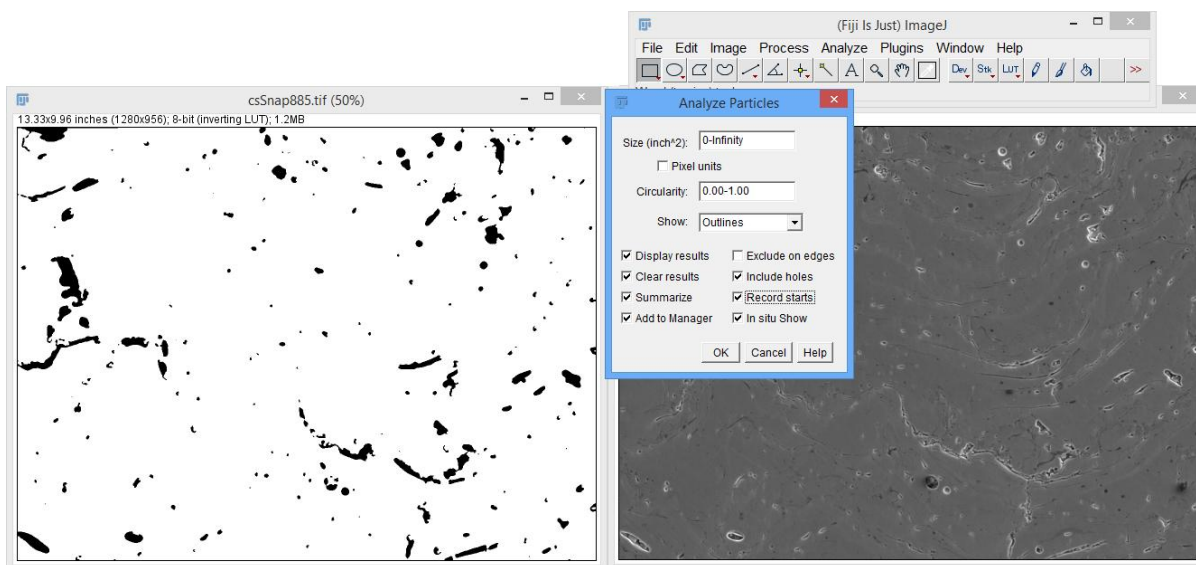


Figura 35 – Comando *Analyze Particles*; à esquerda, imagem da condição 1 processada e pronta para a análise.

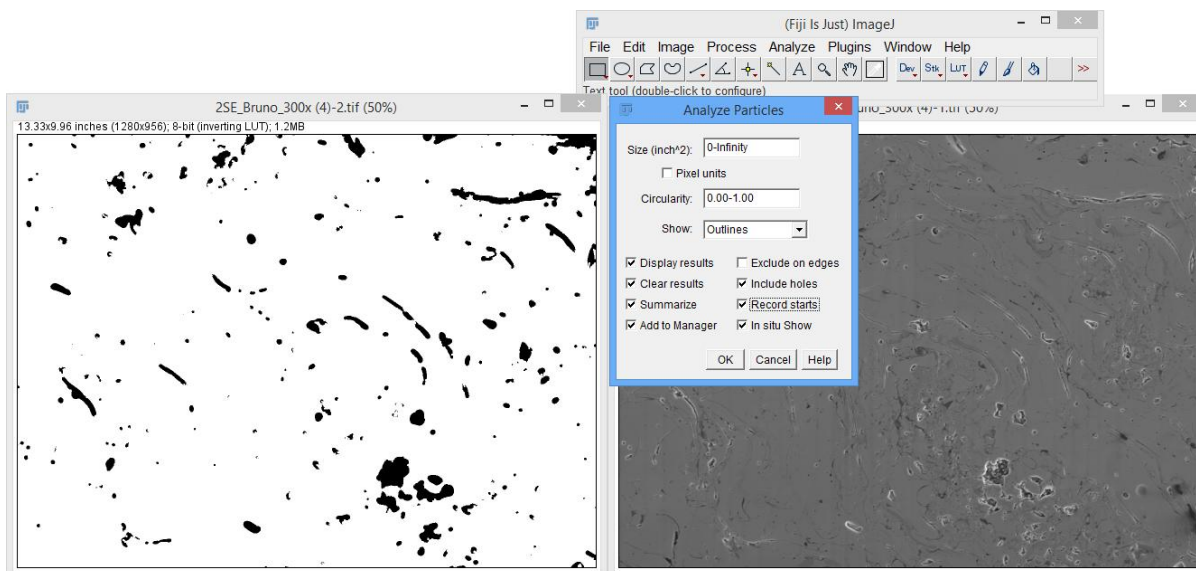


Figura 36 – Comando *Analyze Particles*; à esquerda, imagem da condição 2 processada e pronta para ser analisada.

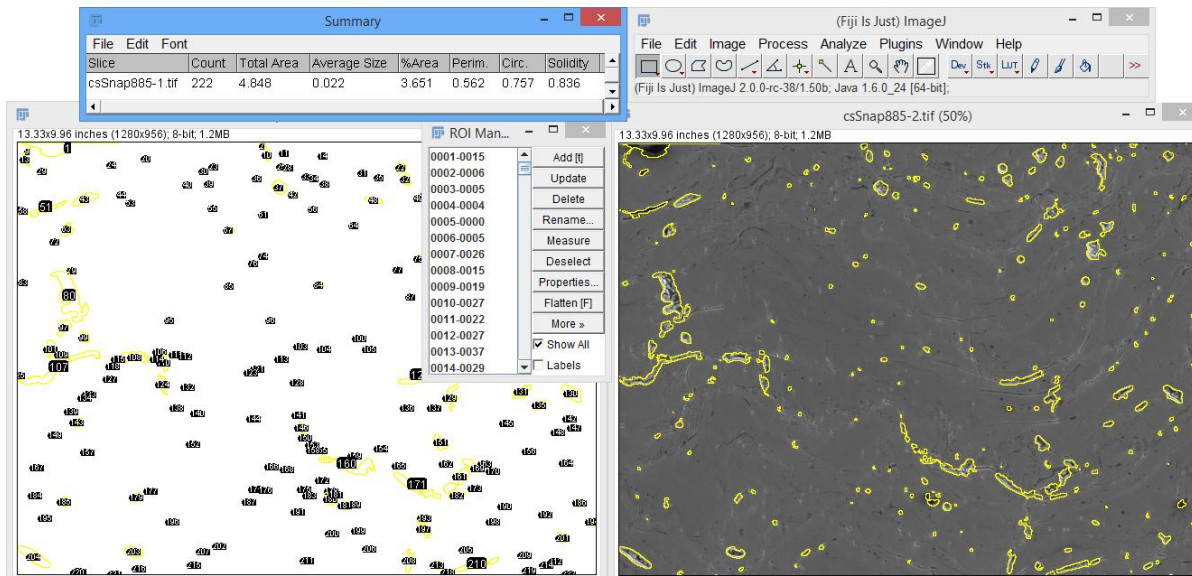


Figura 37 – Imagem da condição 1 analisada.

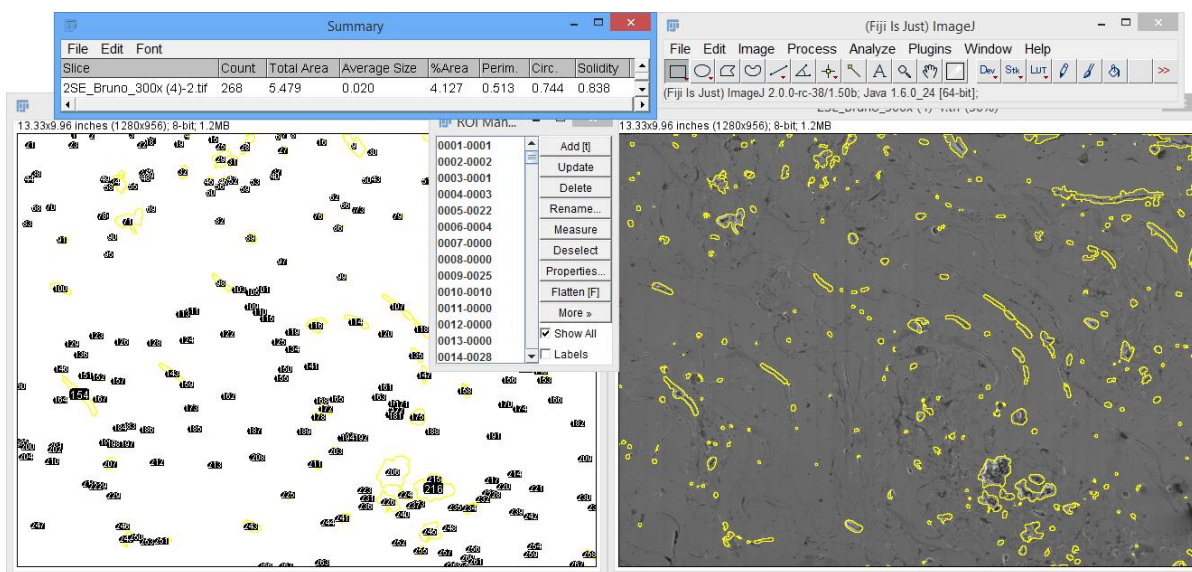


Figura 38 – Imagem da condição 2 analisada.

Summary							
File	Edit	Font					
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Perim.	Circ.	Solidity
csSnap885-1.tif	222	4.848	0.022	3.651	0.562	0.757	0.836

Figura 39 – Matriz Summary de imagem da condição 1.

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Perim.	Circ.	Solidity
2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	268	5.479	0.020	4.127	0.513	0.744	0.838

Figura 40 – Matriz *Summary* de imagem da condição 2.

	Label	Area	Perim.	Circ.	%Area	AR	Round	Solidity	XStart	YStart
1	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.002	0.207	0.698	100	2.761	0.362	0.917	121	0
2	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.004	0.258	0.781	100	1.718	0.582	0.905	161	0
3	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	3.255E-4	0.059	1.000	100	1.464	0.683	0.857	252	0
4	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.007	0.320	0.799	100	1.395	0.717	0.909	371	0
5	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.054	1.552	0.282	100	3.411	0.293	0.628	506	0
6	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.008	0.438	0.540	100	1.710	0.585	0.804	571	0
7	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	1.085E-4	0.029	1.000	100	1.000	1.000	1.000	590	0
8	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	4.340E-4	0.086	0.740	100	4.000	0.250	1.000	609	0
9	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.135	1.943	0.451	100	2.206	0.453	0.836	718	0
10	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.093	2.129	0.259	100	3.898	0.257	0.793	897	0
11	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	4.340E-4	0.086	0.740	100	4.000	0.250	1.000	1040	0
12	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	4.340E-4	0.086	0.740	100	4.000	0.250	1.000	1094	0
13	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	6.510E-4	0.128	0.503	100	6.000	0.167	1.000	1159	0
14	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.297	4.955	0.152	100	2.451	0.408	0.521	1169	0
15	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.002	0.168	1.000	100	1.176	0.850	0.880	433	9
16	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.020	0.551	0.827	100	1.882	0.531	0.927	667	11
17	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	1.085E-4	0.029	1.000	100	1.000	1.000	1.000	297	13
18	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	9.766E-4	0.130	0.726	100	1.874	0.534	0.750	293	14
19	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.006	0.399	0.506	100	2.407	0.416	0.720	362	14
20	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.011	0.379	0.940	100	1.395	0.717	0.943	1061	16
21	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.006	0.281	0.985	100	1.085	0.921	0.912	26	18
22	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.013	0.408	0.964	100	1.147	0.872	0.940	273	18
23	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.009	0.375	0.803	100	2.039	0.490	0.892	118	19
24	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	3.255E-4	0.071	0.809	100	3.000	0.333	1.000	1141	20
25	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.010	0.532	0.433	100	2.796	0.358	0.700	446	22
26	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	5.425E-4	0.080	1.000	100	1.553	0.644	0.909	1027	25
27	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.012	0.583	0.434	100	2.348	0.426	0.649	589	27
28	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	1.085E-4	0.029	1.000	100	1.000	1.000	1.000	505	29
29	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.097	1.574	0.490	100	1.650	0.606	0.779	460	34
30	2SE_Bruno_300x (4)-2.tif	0.001	0.130	0.967	100	1.218	0.821	0.889	786	37

Figura 41 – Matriz *Results* de imagem da condição 2.

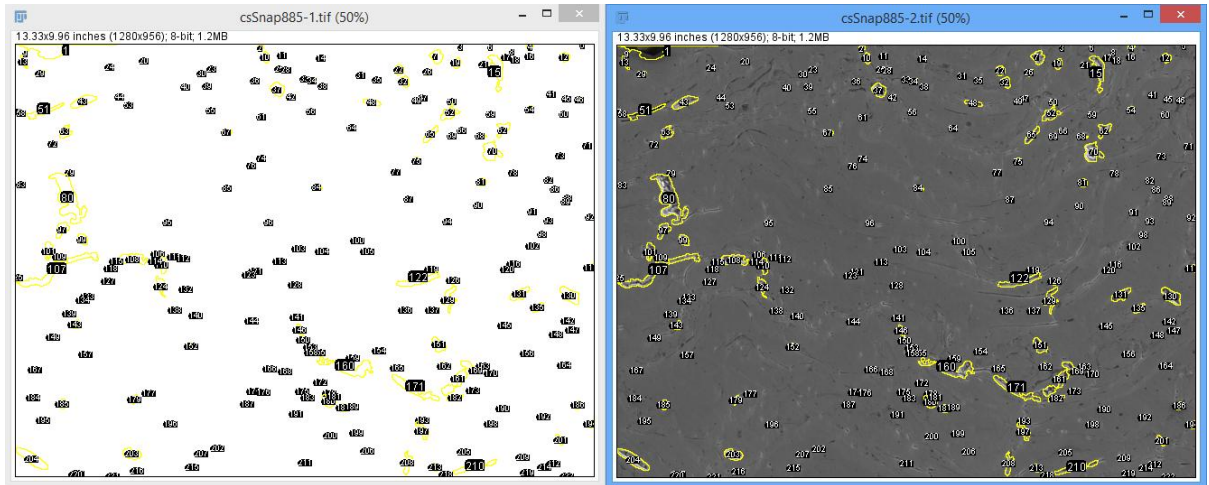


Figura 42 – Numeração dos elementos segmentados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Microscopia Óptica

A análise de microscopia óptica possibilitou o estudo das características microestruturais das duas chapas de condições 1 e 2. Primeiramente foi utilizada uma lente de aumento de 100x onde foram identificadas as regiões do substrato (aço SAE 1020), da liga intermediária, do revestimento e do baquelite. Em seguida, foi necessário utilizar uma lente de aumento maior – de 500x – com o objetivo de se identificar os vazios, óxidos e porosidades presentes na região do revestimento, como mostrado na Figura 43 para a condição 1 e na Figura 44 para a condição 2.

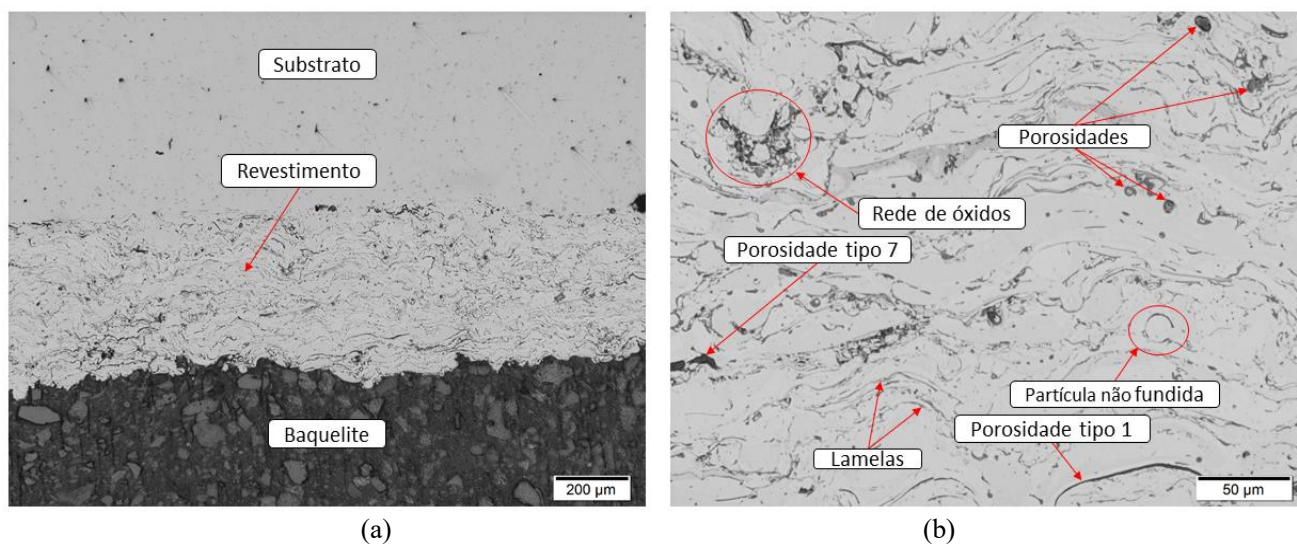


Figura 43 – (a) Regiões da amostra de condição 1 utilizando-se uma lente de aumento de 100x. (b) Região do revestimento da amostra de condição 1 utilizando-se um aumento de 500x.

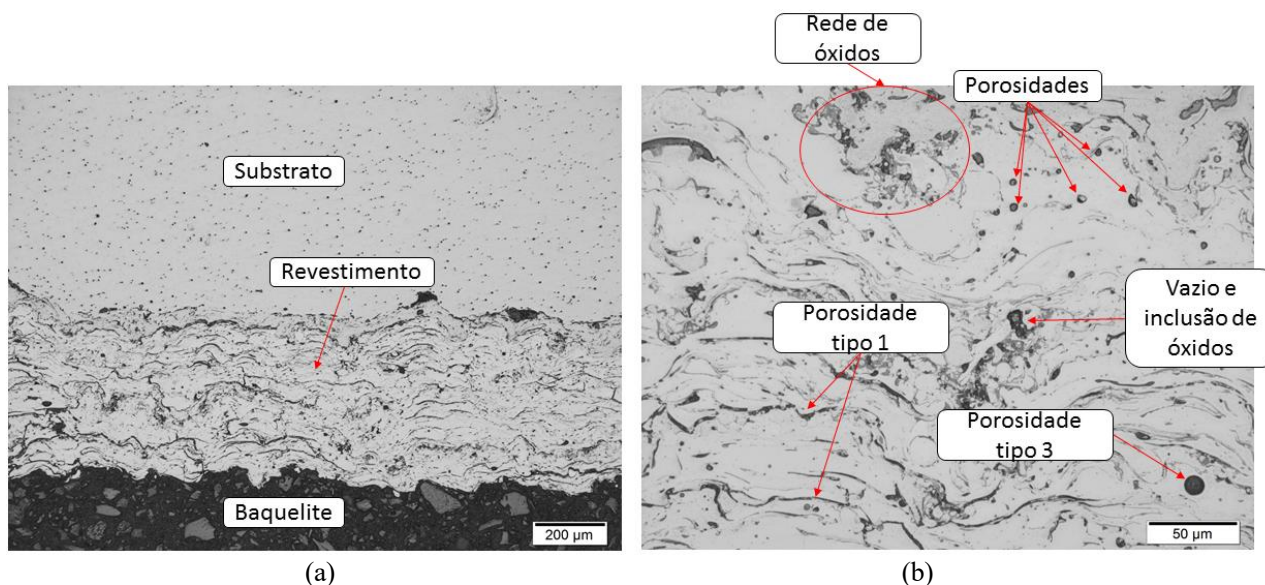


Figura 44 - (a) Regiões da amostra de condição 2 utilizando-se uma lente de aumento de 100x. (b) Região do revestimento da amostra de condição 2 utilizando-se um aumento de 500x.

Com a microscopia óptica foi possível observar que o revestimento da amostra de condição 1 apresentou uma estrutura tipicamente lamelar (em forma de panqueca), algumas partículas não fundidas, prováveis porosidades do tipo 1 (que são aquelas formadas entre as lamelas e causadas pelo empilhamento de partículas separadas, ou sejam, possuem geometria bastante alongada, pois acompanham o formato dessas lamelas) (Lira, 2012), porosidades do tipo 7 (que são aquelas que resultam em micro trincas, independentemente de sua origem de formação), outros formatos de porosidade (alguns mais arredondados e outros mais alongados), e óxidos em forma de rede que possuem a cor mais acinzentada (Freitas, 2015).

O revestimento da amostra de condição 2 apresentou porosidades do tipo 3 (que se manifestam na forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido que se desenvolveram com o resfriamento do metal, e possuem geometria bastante arredondada), óxidos, vazios e outros tipos de porosidade, e assim como na condição 1, alguns mais arredondados e outros mais alongados. (Freitas, 2015)

Podemos observar, ainda, que existe uma semelhança microestrutural grande entre os revestimentos de ambas condições, porém, a imagem de condição 2 apresentou uma estrutura com maior número de trincas e/ou porosidades interlamelares. Deve-se avaliar uma quantidade maior de regiões para que seja possível uma avaliação mais precisa, que será feita na quantificação de defeitos por procedimento por análise de imagem.

Essa diferença no número de óxidos, trincas, vazios e poros entre as condições vai depender de como foi realizada a aspersão térmica, pois um dos fatores responsáveis pela qualidade do revestimento depositado é a adesão entre as partículas depositadas.

4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

Para avaliar a variação da composição química na amostra, neste item serão comparadas as microanálises quantitativas dos elementos de ligas presentes nas duas condições, observadas a partir de micrografias obtidas através do MEV. Para cada condição foram observados espectros de EDS (espectroscopia de energia dispersiva) via análise por linha e por ponto, como mostrado nas Figuras 45 e 46 para a condição 1 e nas Figuras 47 e 48 para a condição 2.

As Figuras 45 (a) e (b) representam a morfologia da amostra de condição 1 e o espectro de EDS de linha compreendendo as três regiões da amostra: substrato, liga intermediária e revestimento. Já as Figuras 46 (a) e (b) representam o espectro de EDS por ponto em uma região aleatória do revestimento.

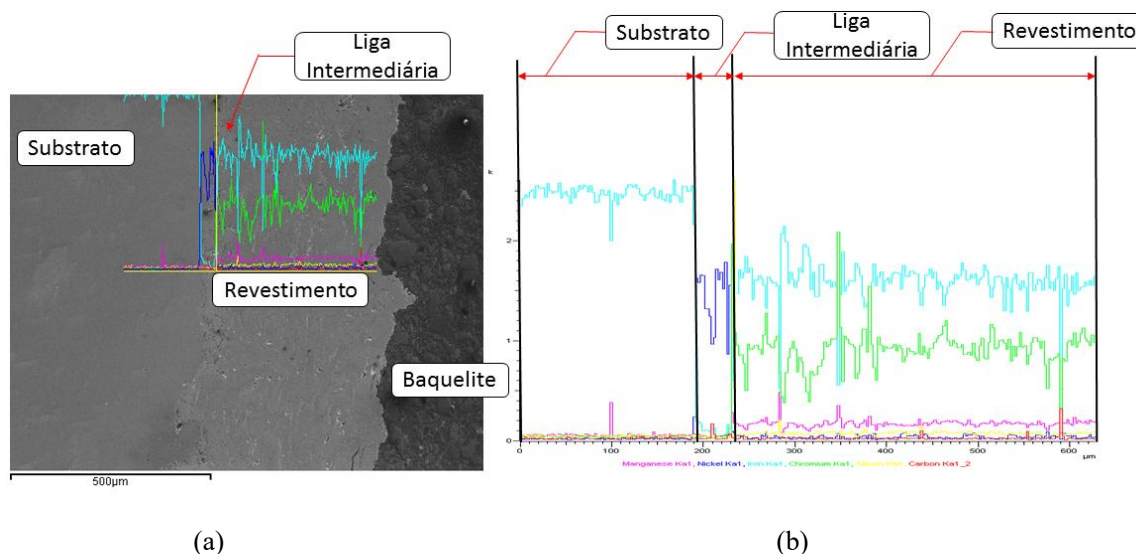


Figura 45 - (a) Morfologia da amostra de condição 1. (b) Microanálise quantitativa, por linha, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 1.

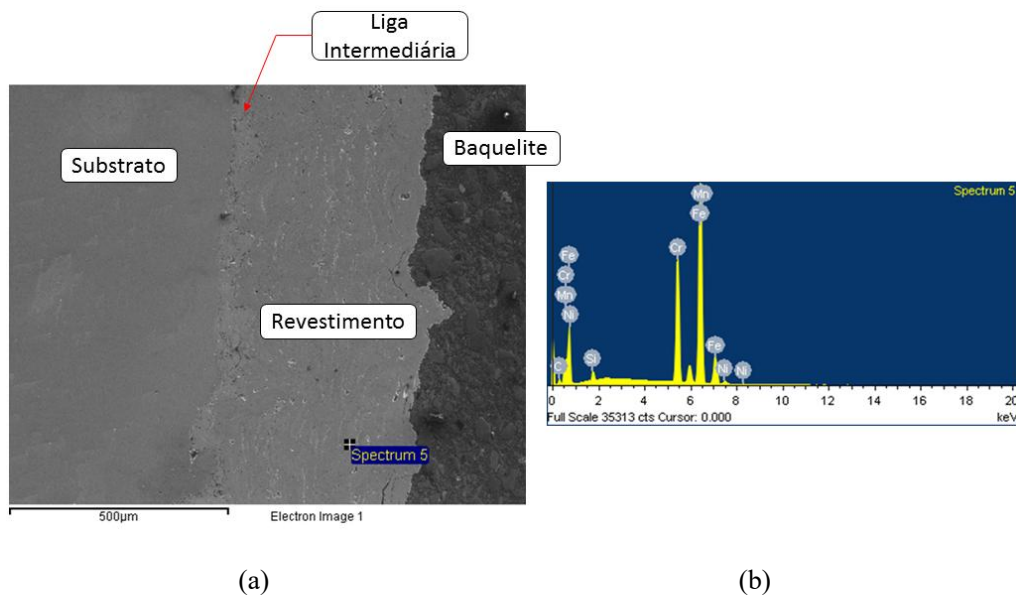


Figura 46 - (a) Morfologia da amostra de condição 1. (b) Microanálise quantitativa, por ponto, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 1.

O objetivo é realizar uma análise qualitativa de elementos de ligas presentes nessas regiões, principalmente no revestimento.

A Figura 45 mostra que o substrato possui praticamente somente Fe em sua composição, como esperado. A liga intermediária apresenta em sua grande maioria Ni, em segundo Al e poucas concentrações de W, Cr, C, Si, Mn, Fe e Co. O revestimento possui altas concentrações de Fe e Cr, além de baixas concentrações de Si, Mn e C.

A Figura 46, de acordo com o espectro de EDS em um ponto aleatório do revestimento mostra em sua grande maioria concentrações de Fe e Cr, sendo condizente com os resultados apresentados no espectro de EDS por linha.

As Figuras 47 (a) e (b) representam a morfologia da amostra de condição 2 e o espectro de EDS de linha compreendendo as três regiões da amostra: substrato, liga intermediária e revestimento. Já as Figuras 48 (a) e (b) representam o espectro de EDS por ponto em uma região aleatória do revestimento.

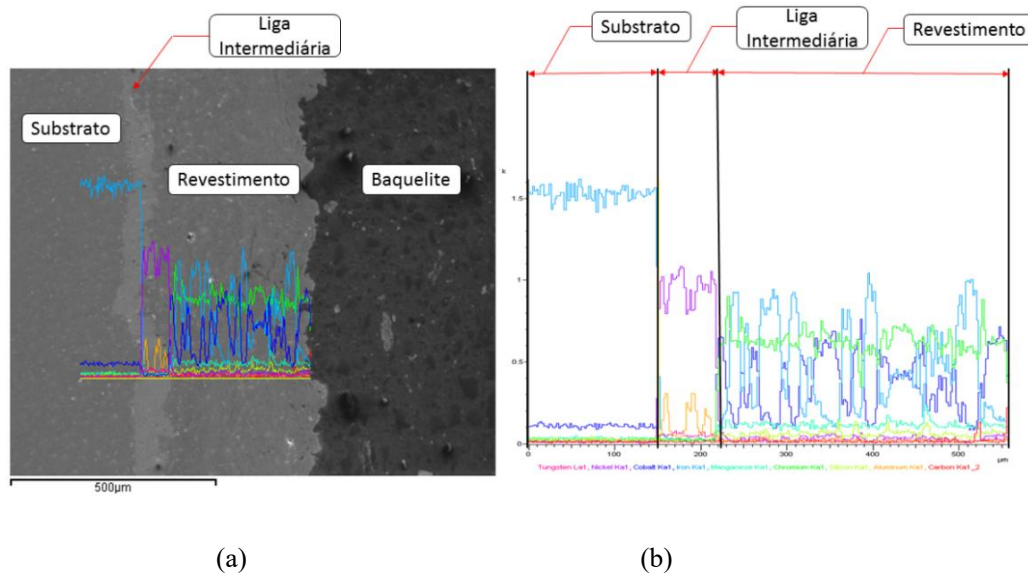


Figura 47 – (a) Morfologia da amostra de condição 2. (b) Microanálise quantitativa, por linha, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 2.

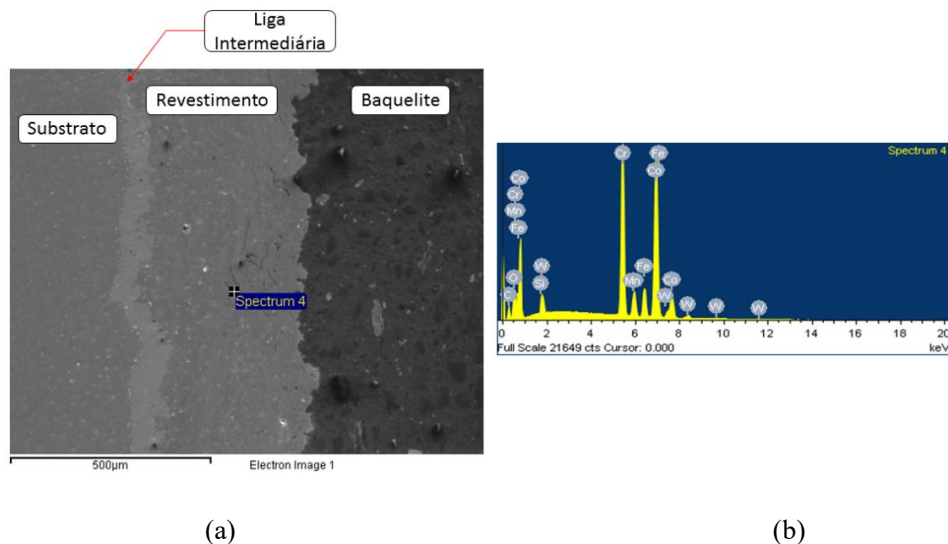


Figura 48 - (a) Morfologia da amostra de condição 2. (b) Microanálise quantitativa, por ponto, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 2.

A Figura 47 mostra que o substrato possui praticamente somente Fe em sua composição, como esperado. A liga intermediária apresenta em sua grande maioria Ni e poucas concentrações de Fe, Mn, Cr, Si e C. O revestimento possui altas concentrações de Fe, Cr e Co, além de baixas concentrações de Si, Mn, Al, W e C.

A Figura 48, de acordo com o espectro de EDS em um ponto aleatório do revestimento, mostra em sua grande maioria concentrações de Cr, Fe e Co, sendo condizente com os resultados apresentados no espectro de EDS por linha.

As ligas a base de Níquel, quando combinadas ao Cromo e ao Cobalto são comumente utilizadas no controle à corrosão, pois conferem alta resistência à corrosão eletroquímica e à corrosão química em atmosferas oxidantes. Quando combinadas ao Alumínio, possuem propriedades adesivas e costumam ser usadas como camada de ligação (Brito, 2010).

Devido a isto, muitos revestimentos contêm Cr e Co em sua composição, já que a muitos dos materiais revestidos por aspersão térmica são expostos em ambientes salinos, e o fato da liga intermediária conter Alumínio devido à alta capacidade de aderência com as ligas que compõem o revestimento.

Além disso, o Níquel, em quantidades suficientes, estabiliza as estruturas austeníticas, fornecendo melhorias nas propriedades mecânicas e nos processos de fabricação (Freitas, 2015).

O Ferro é utilizado geralmente em ligas a base de Níquel, pois confere aos materiais estabilidade química em altas temperaturas, boas propriedades mecânicas (principalmente dureza), baixo custo e excelente resistência à corrosão em atmosferas oxidantes e sulfetantes e boa soldabilidade (Canarim, 2013).

4.3. Processamento Digital de Imagem

Para o processamento digital, foram analisadas 10 imagens de cada condição, totalizando 20 imagens. Na obtenção da imagem foi utilizado elétron secundário (SEI), voltagem de 20 kV e aumento de 300 vezes. Para a discussão dos resultados, foram consideradas as porcentagens apresentadas pela matriz *Summary* do software FIJI Image. Nesta análise, foram considerados todos os tipos de defeitos, tanto circulares quanto alongados.

Estes resultados foram inseridos no Microsoft Excel, sendo então calculados a média de porosidade e o desvio padrão para cada condição, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do PDI para as condições 1 e 2.

Condição 1		Condição 2	
<i>Imagem</i>	<i>Resultado</i>	<i>Imagem</i>	<i>Resultado</i>
1	3,57 %	1	4,36 %
2	3,15 %	2	3,85 %
3	3,57 %	3	2,84 %
4	3,65 %	4	4,13 %
5	3,1 %	5	3,09 %
6	2,87 %	6	3,09 %
7	5,43 %	7	3,51 %
8	3,71 %	8	4,12 %
9	2,66 %	9	3,88 %
10	4,23 %	10	5,27 %
MÉDIA	3,59 %	MÉDIA	3,81 %
DESVIO PADRÃO	0,79	DESVIO PADRÃO	0,72

Através desta análise, obteve-se como resultado valores muito próximos de porosidades para ambas as condições. O valor médio encontrado para a condição 1 (liga Fe-Cr) é de 3,59%, com valor mínimo de 2,66% e máximo de 5,43%. Já na condição 2 (liga de Fe-Co), foi encontrada uma média percentual de 3,81%, sendo o valor mínimo encontrado igual a 2,84% e o máximo igual a 5,27%. A diferença percentual encontrada, aproximadamente 0,22, é insignificante, uma vez que diversos fatores externos determinam o resultado final. Estes fatores são diversos, como luminosidade da tela, interpretação do executor da análise, erros atribuídos ao processamento, dentre outros.

Assim como a média de porosidade, o desvio padrão de ambas as condições também apresentou valores muito próximos, com uma diferença de aproximadamente 0,068. A condição 1 apresentou desvio padrão igual a 0,79, enquanto que a condição 2 apresentou desvio padrão de 0,72. Portanto, o mesmo se aplica neste caso, em que a diferença encontrada é ínfima e, portanto, desconsiderada.

A partir da Tabela 6, foi obtido um gráfico (Figura 49) de dispersão para as duas condições, de forma a comparar a distribuição do percentual de defeitos.

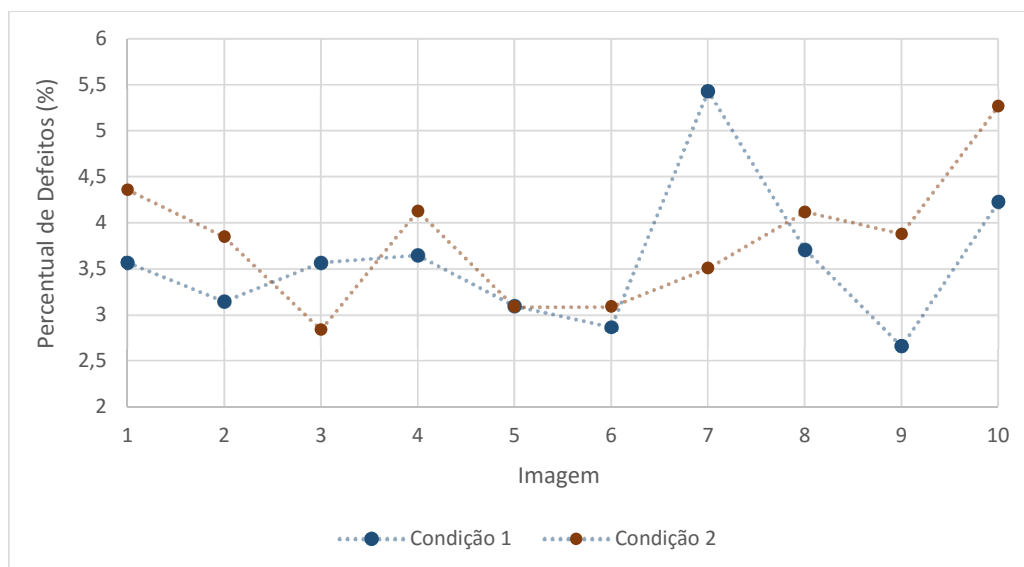


Figura 49 - Gráfico de dispersão dos resultados da condição 2

O gráfico obtido mostra a dispersão e a heterogeneidade da amostra quanto aos defeitos. Entretanto, comparando-se os valores reais obtidos, observa-se pouca discrepância entre os mesmos.

Deshpande *et al.* analisaram porosidades de ligas de Ni-Al por diferentes processos de aspersão térmica. O procedimento seguido foi similar ao realizado neste trabalho, ou seja, obtenção de imagens binárias para quantificação das áreas escuras (defeitos). Entretanto, foi utilizado também o MIP (Mercury Intrusion Porosimetry), recurso que analisa as porosidades abertas através da penetração de mercúrio na superfície. O percentual de porosidade e óxidos encontrado foi de 16,5%, e somente porosidade, 5,7%, no caso de ligas aspergidas através de arco elétrico (Deshpande, *et al.*, 2006). Comparando-se com os resultados obtidos no presente trabalho, houve uma variação no percentual de defeitos devido aos parâmetros de aspersão, à liga utilizada e à técnica de medição dos defeitos.

Freitas estudou ligas de Cobalto-Cromo e Níquel-Cromo em 6 diferentes condições. As imagens foram processadas através do software Material Extensions, sendo quantificados os defeitos de formato circular, encontrando como resultado 9,625% (Freitas, 2015). O fator que influencia na diferença entre este resultado e o do presente trabalho é a técnica de medição. Freitas utilizou a técnica por ponto, que apresenta precisão inferior se comparada à técnica de processamento digital de imagem. Diferentes ferramentas são utilizadas para quantificação de defeitos, podendo gerar resultados diferentes, dependendo da precisão do software.

Além disso, os parâmetros de aspersão utilizados também influenciam drasticamente o resultado dos revestimentos obtidos (Deshpande, *et al.*, 2006). Terres menciona como principais fatores que influenciam os teores de óxidos e porosidades (Terres, 2006):

- A corrente de aspersão, que quanto menor for menor será o calor gerado no processo, evitando a exposição do substrato a elevadas temperaturas. Tal parâmetro contribui para a redução do teor de óxidos;
- A tensão do processo, uma vez que quanto maior for a mesma, maior serão as gotas de metal fundido, gerando maiores lamelas. Desta forma, reduz-se a área passível de oxidação, reduzindo o teor de óxidos;
- A pressão, que apesar de não ter influenciado significativamente no resultado, mostrou melhores condições de oxidação à menores pressões;
- A distância de aspersão, que quanto menor, menor a oxidação, uma vez que as partículas fundidas estarão por menor tempo expostas ao oxigênio.

Já Brito encontrou uma média de porosidades e óxidos igual a 3,28%, referente a 5 condições distintas. Os valores mínimo e máximo encontrados foram 1,6% (liga Fe-Cr) e 4,7% (liga Fe-Cr-Co), respectivamente. Para a análise, foi utilizado o programa Image-Pro, ajustando parâmetros de diâmetros mínimo e máximo (Brito, 2010).

Terres analisou revestimentos de dois diferentes aços inoxidáveis obtidos por arco elétrico, obtendo percentuais de porosidades e óxidos separadamente. O primeiro, AISI 309L T1, apresentou uma média de 2,6% de porosidade, com valor mínimo de 0,8% e máximo de 7,6%, e uma média de 3,575% de óxidos, sendo o valor mínimo de 1,3% e o máximo de 4,8%. O segundo, AISI 410 NiMo, apresentou uma média de 1,425% de porosidade, sendo o valor mínimo de 0,7% e máximo de 2,3%, e uma média de 2,7875% de óxidos, sendo o valor mínimo de 0,8% e o máximo de 4,5%. Ambas as ligas possuem um alto teor de cromo (Terres, 2006).

Os principais fatores que influenciam na diferença entre os resultados obtidos por Brito, Terres e o presente trabalho são o tipo de liga utilizada como revestimento, os parâmetros de aspersão e a técnica de medição utilizada.

Abaixo, na Tabela 7, pode-se observar um comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho com outros encontrados na literatura.

Tabela 7 – Comparativo entres os resultados obtidos no presente trabalho e outros autores encontrados na literatura

Autor	Percentual de defeitos	Recurso/Software	Processo	Revestimento
Deshpande <i>et al.</i>	16,5% (porosidade: 5,7%)	MIP	Arco elétrico	Ni-Al
Paredes	entre 10% e 20%	-	Arco elétrico	-
Freitas	9,63%	Material Extensions	Arco elétrico	Co- Cr e Ni-Cr
Brito	3,28%	Image-Pro	Arco elétrico	Fe-Cr e Fe-Cr-Co
Terres	2,01% de porosidade e 3,2% de óxidos	Clemex	Arco elétrico	AISI 309L T1 e AISI 410 NiMo
Neste trabalho	3,70%	FIJI Image	Arco elétrico	Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni

Deve-se destacar com que o processamento de imagem permite uma avaliação mais precisa de defeitos em revestimentos obtidos por aspersão térmica quando comparado com as técnicas tradicionais, como a contagem feitas por ponto.

4.4. Ensaio de Aderência

O ensaio de aderência, também conhecido como Pull-off, foi realizado em duas chapas, uma de cada condição.

Para avaliar a aderência do revestimento, é necessário que a fratura ocorra no mesmo. Para isto, é necessário assegurar a colagem do Dolly, que, caso seja insuficiente, não mostrará resultados referentes ao revestimento. Além disso, uma outra desvantagem deste ensaio é a possível penetração do adesivo nos poros abertos, ou seja, porosidades expostas à superfície do revestimento, que, que pode afetar significativamente o comportamento do revestimento (Vreijling, 1998).

Antunes (Antunes, 2013) apresenta uma divisão das fraturas em 5 tipos diferentes, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Descrição dos tipos de falha resultantes do ensaio de Pull-off (Antunes, 2013)

Tipo de falha	Descrição
A	Falha de aderência entre o revestimento e o substrato.
B	Falha de coesão no interior do revestimento.
C	Falha de aderência entre demão.
Z	Falha de aderência entre o adesivo e o revestimento.
Y	Falha de aderência entre o carretel e o adesivo.

Dos resultados obtidos, três mostraram a fratura no interior do revestimento com resíduo de adesivo, sendo dois da condição 1 (Figura 50 (a) e (b)) e um da condição 2 (Figura 51s (b)),

caracterizando, portanto, uma fratura coesiva; o resultado mostrado na Figura 43 (a) mostra a fratura no adesivo. Sendo assim, segundo esta classificação as três falhas obtidas neste presente ensaio foram tipo B e Z, sendo a quarta tipo Z. Portanto, o resultado do último ensaio (Figura 51 (a)) não pode ser considerado como valor de tensão associado à aderência do revestimento, uma vez que a fratura ocorreu no adesivo e, portanto, o valor de 26,4 MPa é referente à resistência deste último.

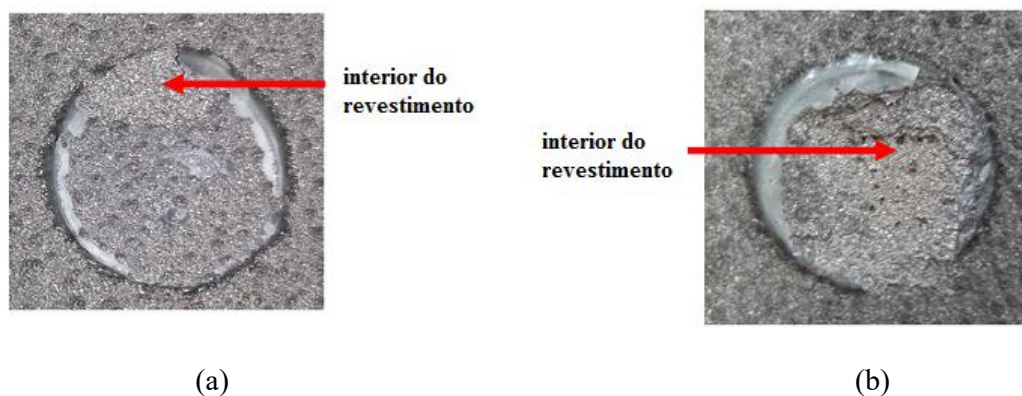


Figura 50 – Resultado do Pull-Off para a Condição 1.

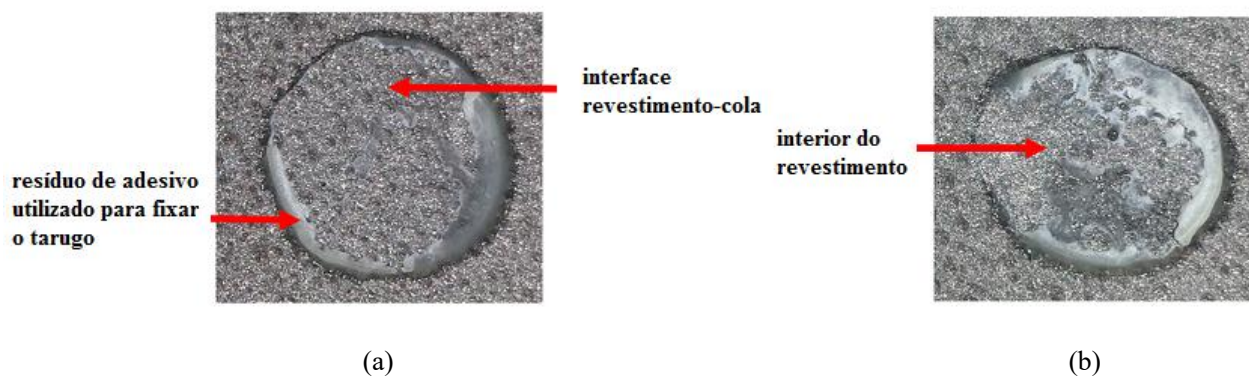


Figura 51 - Resultado do Pull-Off para a Condição 2.

As Figura 52, Figura 53 e Figura 54 mostram as fractografias obtidas por MEV, onde é possível verificar com mais detalhes a fratura ocorrida no ensaio de Pull-off.

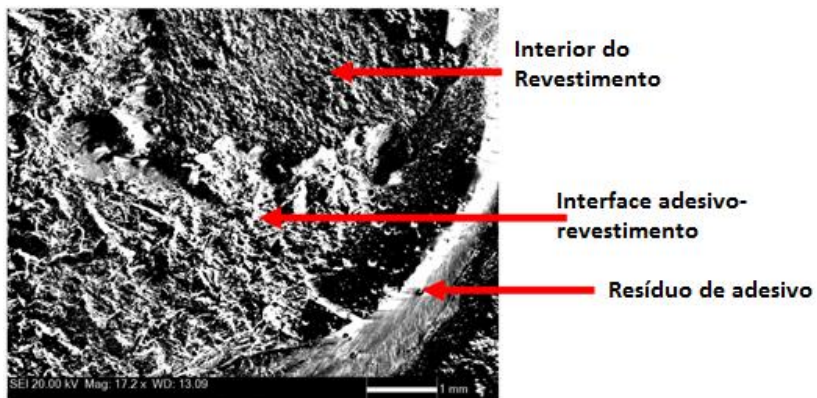


Figura 52 – Ensaio aplicado à amostra de condição 1.

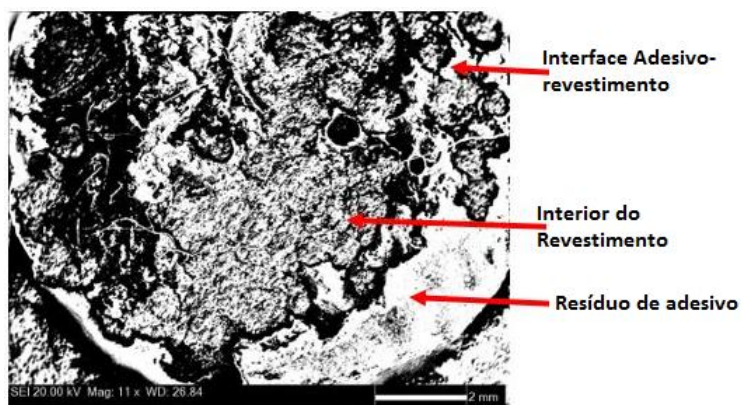


Figura 53 – Primeiro ensaio aplicado à amostra de condição 2.

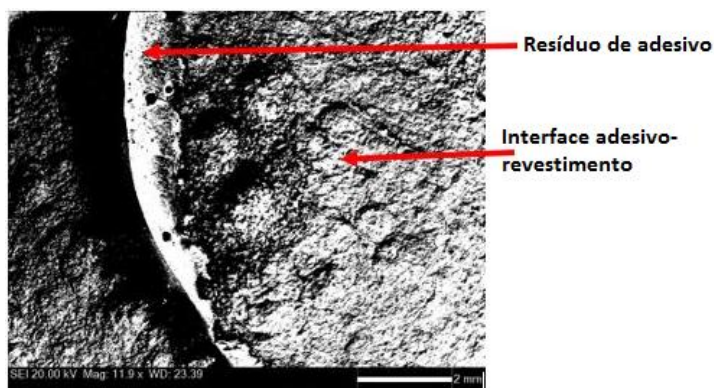


Figura 54 – Segundo ensaio aplicado à amostra de condição 2.

Ambas as condições apresentaram fraturas bastante semelhantes, inclusive em resistência à tração de adesão.

Para tensão, foram encontrados os valores mostrados na Tabela 9; a partir dos valores desta tabela, foram obtidas as forças de ruptura em cada caso, conforme mostrado na Tabela 10.

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A}$$

Onde,

σ_r : Tensão de ruptura

F_r : Força de ruptura

A : Área da superfície colada

Sendo o diâmetro do Dolly igual a 15mm, tem-se a área da superfície colada igual a 176,71mm².

Tabela 9 – Resultado do Ensaio de Aderência - Tensão

Condição	Ensaio	MPa	Modo de Falha
1	1	27,8	B e Z
	2	29,7	B e Z
2	1	26,4	Z
	2	24,9	B e Z

Tabela 10 – Resultado do Ensaio de Aderência - Força

Condição	Ensaio	Força (kN)
1	1	4,91
	2	5,25
2	1	4,67
	2	4,40

As médias de tensão obtidas para as condições 1 e 2 são 28,75 MPa e 24,9 MPa, respectivamente. Os valores recomendados pela Norma PETROBRAS N-2568 são de 7 MPa para revestimentos de alumínio e 10 MPa para revestimentos de aço inoxidável (PETROBRAS, 2011).

Antunes realizou o ensaio de Pull-off em 5 condições diferentes, sendo 2 compostas principalmente por Fe-Cr e 3 compostas significativamente por Fe-Co. Como resultado, obteve fraturas do tipo Z e mista A/B. Nos resultados de tensão, foi obtida tensão mínima de 14 MPa e máxima de 25,3 MPa, com resistência à tração de adesão média global de 20,9 MPa (Antunes, 2013). Os principais fatores que justificam a falha sob tensões inferiores às obtidas no presente trabalho são a presença de defeitos no revestimento e tipo de liga utilizada como revestimento.

Malek *et al.* realizaram teste de Pull-off em 6 amostras de aço doce com revestimentos de liga de alumínio (99,5% de alumínio) termicamente aspergidos por arco elétrico. Os resultados mostraram uma resistência à tração de adesão média global igual a 10,83 MPa, sendo os valores mínimo e máximo iguais a 9,38 MPa e 12,38 MPa, respectivamente. Apesar do fato da liga utilizada possuir propriedades mecânicas inferiores à de ligas Fe-Cr ou Fe-Co, este ensaio apresentou valores significativamente inferiores aos do presente trabalho (Malek, *et al.*, 2013).

A Tabela 11 abaixo mostra um comparativo entre os valores encontrados na literatura para os ensaios de aderência e os valores obtidos no presente trabalho.

Tabela 11 – Comparativo entre os resultados obtidos no presente trabalho e resultados de outros autores.

Autor	Tensão	Revestimento
Antunes	20,9 MPa	Fe-Cr e Fe-Co
Malek	10,83 MPa	Liga de Alumínio (99,5% Al)
Neste trabalho	26,82 Mpa	Fe-Cr-Ni e Fe-Co-Cr-Ni

Os principais fatores que justificam a falha coesiva estão relacionados à presença de defeitos no revestimento, ou seja, poros, óxidos e microtrincas. Além disso, a estrutura lamelar também confere ao revestimento um comportamento diferente quando comparado a um material homogêneo.

5 CONCLUSÃO

De acordo com o presente trabalho, foi possível observar que os revestimentos estudados apresentaram baixo percentual de defeitos (porosidades, óxidos e microtrincas) e uniformidade da camada aspergida.

Quanto aos valores encontrados para Processamento Digital de Imagem (PDI), a condição 1 (liga Fe-Cr) apresentou menor porosidade (3,59%). Entretanto, a diferença entre os percentuais das duas condições estudadas (aproximadamente 0,22) é insignificante, uma vez que diversos fatores externos, isto é, erros atribuídos ao processamento da imagem, podem alterar o resultado. Além disso, ambas as condições se encontraram dentro das faixas mencionadas nas literaturas. Tanto o menor quanto o maior percentual de defeitos encontrados foram na condição 1 (mínimo igual a 2,66% e máximo igual a 5,43%). A técnica de processamento digital de imagem permite uma avaliação qualitativa mais precisa dos defeitos existentes no revestimento.

O ensaio de aderência forneceu resultados extremamente satisfatório, com resistência à tração de adesão média global de 26,82 MPa. Estes valores mostraram-se bem superiores ao exigido na norma de referência, 10 MPa. Ambas as condições apresentaram resultados semelhantes.

Os resultados obtidos através de aspersão térmica a arco elétrico mostram que esta é uma técnica de deposição de metal bastante eficaz para a formação de revestimentos com baixo percentual de porosidades, bem como aderência elevada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Modelar numericamente o ensaio de Pull-Off através do método de Elementos Finitos.
- 2) Realizar ensaio de corrosão em ambos revestimentos, para efeitos comparativos, utilizando-se a câmara de névoa salina.
- 3) Através do método de difração de raios X, detectar e identificar os diversos tipos de óxidos e carbetos presentes no revestimento antes e após o ensaio de corrosão.
- 4) Através de ensaios de desgaste abrasivo, estudar o comportamento dos revestimentos de ambas condições.
- 5) Analisar separadamente os defeitos encontrados (percentual de porosidade, óxidos e microtrincas).
- 6) Analisar o percentual de defeitos para revestimentos obtidos por outras técnicas de aspensão térmica, de forma a comparar com os resultados obtidos no presente trabalho.
- 7) Realizar a mesma análise de imagem para amostras tubulares, para então comparar com os resultados obtidos para amostras de chapa.

7 Bibliografia

- Antunes, F. J, et al. 2015.** Correlation Between Chemical Composition and Adherence of Cr and Co Coatings Deposited by Electric Arc. *The Journal of Adhesion*. 2015.
- Antunes, Fernando José. 2013.** Avaliação da Adesão e da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Cr e Co obtidos através da técnica de Aspersão Térmica. Rio de Janeiro : s.n., 2013.
- Brito, Vinícius dos Santos de Sá. 2010.** Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico. Rio de Janeiro : s.n., 2010.
- Canarim, Rubens Chinali. 2013.** Influência da composição na mistura de pós de Alumínio e Ferro na formação de revestimentos de Alumineto de Ferro depositados por Aspersão Térmica à chama. Bauru, SP : Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2013.
- Deshpande, T., Sampath, S. e Zhang, H. 2006.** Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings – Case study for Ni-Al. Nova Iorque : s.n., 2006.
- Dias da Silva, Marcio. 2009.** Qualificação do Processo de Aspersão Térmica de Produtos para Aplicação Petroquímica. Florianópolis : s.n., 2009.
- Freitas, Bruno Cavalcante. 2015.** Estudo das propriedades microestruturais de ligas de níquel-cromo e cobalto-cromo obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico. Rio de Janeiro : s.n., 2015.
- Gan, Jo Ann e Berndt, Christopher C.** Thermal Spray Tips by ASM Thermal Spray Society. Swinburne : Swinburne University of Technology Thermal Spray Group.
- Gartner, F., et al.** New Challenges for Wire and Rod Flame Spraying. *HSU Hamburg*. [Online] Helmut Schmidt University (HSU) - Institute of Materials Technology. http://www.hsu-hh.de/werkstoffkunde/index.php?brick_id=SUqR9AD1xiOQp0pD&action=setlanguage&language=en.
- Ghafouri-Azar, R., Mostaghimi, J. e Chandra, S. 2005.** Modeling development of residual stresses in thermal spray coatings. *Science Direct*. 2005.
- Gordon.** Combustion Powder Thermal Spray Process Flame Spray Process. *Gordon England, Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry*. [Online] [Citado em: 14 de Junho de 2015.] <http://www.gordonengland.co.uk/cps.htm>.
- Harding, J.H., et al. 1995.** Modeling the deposition of Thermal Barrier of Thermal Barrier Coatings. *ASM International*. 1995.
- Khalil, Adriana Márcia Vavassori. 2009.** ESTUDO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A PLASMA PARA DEPOSIÇÃO DE TITÂNIO. Curitiba : s.n., 2009.
- Kopeliovich, Dmitri. 2014.** http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion_tests. <http://www.substech.com>. [Online] 2014.
- Lima, Carlos Roberto Camello e Trevisan, Roseana da Exaltação. 1999.** Ensaios de Adesão em Revestimentos Metal-cerâmicos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma. 1999.
- Lima, Carlos Roberto Camello, de Souza, Natália Ferrareso Cardoso e Camargo, Flávio. 2012.** Estudo das características de revestimentos poliméricos aplicados por aspersão térmica para proteção contra desgaste e corrosão de substratos metálicos. 2012, Vol. 17, Nº 4, p.369-375.

- Lira, Leticia Pereira. 2012.** Avaliação da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos aspergidos termicamente em liga de alumínio AA 7475. São Carlos : s.n., 2012.
- Malek, Muhamad Hafiz Abd, et al. 2013.** Performance and Microstructure Analysis of 99.5% Aluminium Coating by Thermal Arc Spray Technique. *ScienceDirect*. 2013.
- Marchis, Luciane Kutianski. 2008.** Correlação dos Mecanismos de Oxidação Com Parâmetros de Aspersão Térmica a Arco Elétrico na Deposição de Alumínio. Curitiba : s.n., 2008.
- McPHERSON, R. 1989.** A REVIEW OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA SPRAYED CERAMIC COATINGS. *Surface and Coatings Technology*. 1989.
- Mendes, Marcio Willians Duarte. 2010.** Revestimentos a base de Ta/Al₂O₃ produzidos por aspersão térmica. *Tese de Doutorado*. Natal : s.n., 2010.
- Novicki, Nilceu. 2008.** Aplicação da Aspersão Térmica na Soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente. Florianópolis : s.n., 2008.
- Paredes, Ramón S. Cortés. 2012.** Aspersão Térmica. Curitiba : s.n., 2012.
- Pawlowski, Lech. 2005.** *The science and engineering of thermal spray coatings*. s.l. : Wiley, 2005.
- Pershin, V., et al. 2002.** Effect of Substrate Temperature on Adhesion Strength of Plasma-Sprayed Nickel Coatings. *ASM International*. 2002.
- PETROBRAS, NORMA. 2011.** NORMA PETROBRAS N-2568. *Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica*. 2011.
- Sidnei Paciornik, Marcos Henrique de Pinho Maurício.** Digital Imaging. *Department of Materials Science and Metallurgy*. Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica.
- Sobolev, V. V. e M.Guilemany, J. 1998.** Oxidation of coatings in thermal spraying. 1998.
- Sobolev, V.V., Guilemany, J.M. e Calero, J.A. 2000.** Development of Coating Structure and Adhesion During High Velocity Oxygen-Fuel Spraying of WC-Co Powder on a Copper Substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2000.
- Sulzer, Metco. 2013.** High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions. s.l. : Sulzer Metco, 2013.
- Tavares, Ricardo Compiani. 2009.** Caracterização do Nb₂O₅ como alternativa na proteção anticorrosiva na indústria do petróleo. Porto Alegre : s.n., 2009.
- Terres, Cristhian José Ferreira. 2006.** Avaliação de Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por aspersão Térmica. Curitiba : s.n., 2006.
- Tucker, Jr., C. Robert. 2013.** *Thermal Spray Coatings*. Ohio : ASM International Handbook Committee and the ASM Thermal Spray Society, 2013. Volume 5A.
- Vreijling, Mark Paul Waldemar. 1998.** Electrochemical Characterisation of Metallic Thermally Sprayed Coatings. *Ph.D. Thesis, TNO Institute of Industrial Technology*. Delft : s.n., 1998.
- Zaat, J. H. 1983.** A quarter of a century of plasma spraying. *Animal Reviews*. 1983.
- Zimmer, André. 2009.** Influência da Aspersão Térmica por plasma e suas altas taxas de resfriamento na cristalinidade de fases do sistema Al₂O₃-TiO₂-Al₂TiO₅. Porto Alegre : s.n., 2009.