



**UFES- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CT- CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELA GONÇALVES FERREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO MECANO TRIBOLÓGICA E  
COMPORTAMENTO EM CORROSÃO DE REVESTIMENTOS  
DEPOSITADOS POR ATRITO**

**VITÓRIA**

**2010**

**MARCELA GONÇALVES FERREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO MECANO TRIBOLÓGICA E  
COMPORTAMENTO EM CORROSÃO DE REVESTIMENTOS  
DEPOSITADOS POR ATRITO**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA pela  
Universidade Federal do Espírito Santo.**

**Área de concentração: Materiais e  
Processos de Fabricação.**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo**

**Co – orientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco**

**VITÓRIA**

**2010**

**MARCELA GONÇALVES FERREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO MECANO TRIBOLÓGICA E COMPORTAMENTO  
EM CORROSÃO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ATRITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos  
requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo – orientador  
**Universidade Federal do Espírito Santo – UFES**

---

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco – co-orientador  
**Universidade Federal de Uberlândia – UFU**

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva – examinador interno  
**Universidade Federal do Espírito Santo – UFES**

---

Prof. Dr. Eduardo Albertin – Examinador externo  
**Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo**

**Vitória (ES), 20 de dezembro de 2010.**

**Dedico este trabalho aos meus pais Maria da Penha G. Ferreira e Aylton Ferreira de Jesus, que jamais pouparam esforços para realizar meus sonhos e a memória da minha tia Dulce Regina, que nunca se esqueceu de mim em suas orações.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, provedor de toda ciência e sabedoria, pelo sustento e por sua fidelidade durante todos os dias da minha vida.

Aos meus pais, Aylton Ferreira e Maria da Penha Gonçalves, meus exemplos de caráter e determinação, pela dedicação durante todos os anos da minha vida.

À Minha família AMADA E UNIDA Adriana, Renato, Junior, Glaucia, Thalita, Matheus, Daniel, Renata, por entenderem a minha ausência nos momentos em que minha dedicação foi exclusiva a este trabalho, por me apoiarem nos muitos momentos difíceis que passei ao longo desta etapa da minha vida.

Aos amigos que fiz na Universidade Federal do Espírito Santo, em especial Karin Farin Pinho, por sua amizade verdadeira e apoio incondicional em vários momentos, Gustavo Amaral, Emmanuelli Zangerolame, Gabriel Haddad, Felipe Palácio, Camila Zangerolame.

Ao meu orientador e professor Dr. Marcelo Camargo, meu respeito e minha admiração por seu brilhantismo profissional e por sua paciência em momentos difíceis.

Ao professor Dr. Sinésio Domingues Franco pela orientação e à professora Vera Lúcia Franco pelo apoio e as palavras amigas no momento certo.

Ao professor Rafael Ariza Gonçalves, por sua ajuda e orientação durante o período de testes em Uberlândia, por sua amizade e cooperação em todos os momentos no LTAD (Laboratório de Técnicas em Atrito e Desgaste).

Ao professor Dr. Cherlio Scandian pela oportunidade, confiança e pela honra que me deu em desfrutar de seus conhecimentos em sala de aula.

Às funcionárias Maria José e Celina, pelo incentivo e palavras nos momentos em que apenas uma palavra e um gesto de carinho foram suficientes.

Aos professores do Programa em Pós Graduação da Engenharia Mecânica da UFES, em especial professor Dr. Flávio José. Ao aluno de iniciação científica Eduardo Bruschi, por sua ajuda no MEV.

Aos amigos que fiz em Uberlândia: Sandra Silva, Gabriela Mendes, Larissa Lemos, Hermes Oliveira, Henry Fong e Fernanda, Camila Formoso, Rodrigo Muniz, Renato Pacheco, Raphael Pires, Jhonathas Santos e Stefania, Jonatha Michael Lima, Flávio Santos, Thiago Ferreira, Juliano Oséias que me receberam muito bem em Uberlândia, oferecendo sem hesitar e com grande satisfação toda estrutura disponível.

Às amigas Cinara e Sara pelo apoio e amizade que sempre ultrapassaram as montanhas.

À Kirlene Fernandes por seu apoio e confiança.

Ao Edgar Adrian de Oliveira e Juliana Gomes por sua cooperação de suma importância nas análises finais das amostras.

Ao fomento a pesquisa através de bolsa de mestrado oferecida pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao programa PROCAD (Programa Nacional de Cooperação Acadêmica).

## RESUMO

Diversos processos de reparo por atrito estão sendo estudados atualmente, dentre os quais se destaca o recobrimento por atrito ou, em inglês, *Friction Surfacing*. Esta técnica consiste na deposição do material de um pino em uma chapa ou substrato através de altas rotações e altas cargas axiais no pino, com um deslocamento horizontal do substrato. Durante o trabalho buscou-se caracterizar o revestimento depositado por atrito, através de ensaios de corrosão, jato de impingimento e análise microestrutural através de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microscopia Óptica. Para isso, utilizou-se um equipamento do Laboratório de Técnicas em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia, a Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA), capaz de realizar reparos por atrito, dentre eles ensaios de preenchimento (FHPP), o qual foi modificado e implementado um sistema de controle de uma plataforma, possibilitando assim a realização dos ensaios de recobrimento com aço AISI 420, onde são fornecidos ao programa de controle os parâmetros de reparo. Entre as vantagens desse processo destacam-se a excelente união metalúrgica entre o recobrimento e o substrato, associada a uma microestrutura refinada. Através dessa técnica, pode-se então aplicar diferentes tipos de materiais sobre substratos, resultando em incrementos na resistência à corrosão e/ou desgaste. Como material base foi utilizado um aço carbono e como material de deposição foi utilizado o aço inoxidável martensítico AISI 420. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da variação dos principais parâmetros de processo no revestimento, por meio da avaliação da microestrutura, espessura da camada revestida, microdureza e avaliação da resistência à corrosão quando submetido a testes de Corrosão estática e Jato de impingimento. Os resultados mostraram que houve um refino de grão na zona afetada pelo calor, aumentando assim a sua dureza. Finalmente, da análise do revestimento obtiveram-se resultados de desgaste e resistência à corrosão satisfatório, quando comparado ao material utilizado como revestimento.

Palavras-chave: Revestimento por atrito, erosão, corrosão, AISI 420.

## ABSTRACT

Many processes of friction welding have been studied, among which stands out a process known as Friction Surfacing. This technique consists on deposition of the material by one bolt at other material using increases rotations and forces. To perform it, an equipment from the Laboratory of Techniques in Friction and Wear of the Federal University of Uberlandia has been used, the Processing Unit of Pins for Friction (UPPA), which was able to repair things by friction, among them the filling trials (FHPP), which has been modified and implemented a control system of a platform, then allowing to accomplish the trials for coating with steel AISI 420, which are supplied to the controlling program the repairing parameters. The advantages of this technique are the excellent metallurgical bond among the materials associate to a refined structure. Through this technique is possible to apply different types of materials on substrates, resulting in increments on resistance against corrosion or erosion. The base material used was a carbon steel and the material of deposition was made of stainless steel AISI 420. The aim of this study is to evaluate the effect of the main parameters of the coating process' variation, through the evaluation of the Scanning Electron Microscopy and Optical Microscopy's microstructure of the coated layer's thickness, microhardness and evaluation of the resistance to the corrosion when submitted the tests of static Corrosion, Erosion and solids-free impingement. The results showed that there was a grain refinement in the affected heat zone, thereby increasing its hardness. The analysis of the coating showed resulted of higher wear and corrosion resistance when compared to the original material of the rod.

Keywords: friction surfacing, hard coatings, AISI 420.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema do processo de revestimento por atrito, conforme adaptada de [8].	4
Figura 2.2 - Procedimento de recobrimento pelo equipamento de Processamento de Pinos por Atrito – UPPA 1.	5
Figura 2.3 - Seção transversal que exhibe a interface entre o revestimento e substrato em $\mu\text{m}$ [11].	8
Figura 2.4 - Região com valor ótimo para velocidade de avanço [7].	8
Figura 2.5 - Seção transversal mostrando o <i>undercut</i> [7].	9
Figura 2.6 - Diagrama esquemático de uma montagem típica de célula de polarização [14].	15
Figura 2.7 - Representação esquemática da taxa de erosão em função de, a) tempo de exposição; b) ângulo de impacto por meio de diferentes curvas válidas para metais dúcteis ( $\alpha$ ), metais duros ( $\beta$ ), cerâmicos frágeis ( $\gamma$ ) e borracha ( $\delta$ ); c) tamanho de partícula e d) velocidade de impacto [17].	16
Figura 2.8 - Representação esquemática dos mecanismos de erosão por partículas sólidas: a) microcorte e/ou microsulcamento; b) fadiga; c) deformação plástica; d) fratura frágil [19].	17
Figura 3.1 - Unidade de Processamento de Pinos por Atrito - UPPA1.	19
Figura 3.2 - Esquema do perfil de dureza.	21
Figura 3.3 - Bancada experimental dos testes de corrosão eletroquímica, (a) potenciostato/galvanostato e (b) célula eletroquímica usada nos experimentos.	22
Figura 3.4 - Desenho esquemático do dispositivo de Jato impingimento [14].	23
Figura 4.1 - Microestrutura da barra de aço inoxidável 420 constituída por martensita revenida e carbonetos. Ataque realizado com Reagente Villela, durante 50 segundos	25
Figura 4.2 - Microestrutura do substrato, aço ASTM A36 constituída por ferrita e perlita. Ataque realizado com Reagente Villela, durante 50 segundos	25
Figura 4.3 - Microestrutura do substrato, aço ASTM A36 constituída por ferrita e perlita. Ataque realizado com reagente Villela, durante 50 segundos.	26
Figura 4.4 - Revestimento 4.	26
Figura 4.5 - Revestimento 4.	27
Figura 4.6 - Revestimento 6 – <i>Undercut</i> .	27

Figura 4.7 - Perfil de microdureza dos revestimentos produzidos à diferentes Velocidades de avanço do substrato. Força de 1000 Kgf e velocidade de rotação de 5000 rpm. ....	29
Figura 4.8 - (a) Fotomicrografia da interface substrato/revestimento, (b) mapa de composição MEV, evidenciando a existência de camada de revestimento através do Cr. ....	30
Figura 4.9 - Perfil de microdureza dos revestimentos produzidos à diferentes velocidades de rotação. Força de 1000 Kgf e velocidades de avanço de 200 mm/min.....	31
Figura 4.10 - Perfil de microdureza dos revestimentos produzidos à diferentes forças aplicada ao pino.Velocidade de avanço de 200 mm/min e velocidade de rotação de 5000 rpm. ....	32
Figura 4.11 - Em a) R4 com velocidade de avanço de 200 mm/min. b) R5 com velocidade de avanço de 300 mm/min. Ambos utilizaram Força de 1000 Kgf e velocidade de rotação de 5000 Rpm. ....	33
Figura 4.12 - Variação da espessura a partir do início do processo de deposição por atrito. O comprimento de queima foi de 50 mm.....	33
Figura 4.13 - Efeito da velocidade de rotação na espessura média dos recobrimentos depositados por atrito.....	34
Figura 4.14 - Efeito da força na espessura média dos recobrimentos depositados por atrito. ....	35
Figura 4.15 - Efeito da velocidade de avanço na espessura média dos recobrimentos depositados por atrito.....	36
Figura 4.16 - Amostra revestimento R2. Metal base ZTA. ....	37
Figura 4.17 - Amostra R2. Metal base ZTA mais afastada da interface. ....	37
Figura 4.18 - Microestrutura: ferrita-perlita, transição para granulação mais fina.....	38
Figura 4.19 - Micrografia mostrando maior refinamento da martensita na região próxima a interface do revestimento R2 e metal base - 27 mm do início do Recobrimento, $V_{avanço} = 100$ mm/s.....	38
Figura 4.20 - Amostra do revestimento R2 a 33 mm do início.....	39
Figura 4.21 - (a) Figura mostrando a baixa difusão do revestimento no substrato e as agulhas de martensita e/ou bainita. (b).Mapa de composição MEV, evidenciando a existência de camada de revestimento através do Cr.....	39

Figura 4.22 - Microestrutura martensítica e/ou bainítica do revestimento depositado por atrito.....	40
Figura 4.23 - Fotografia mostrando a presença de precipitados de carbonetos.....	40
Figura 4.24 - Evolução da perda de massa acumulada das amostras PINO 420 e revestimento 6 (R6) teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	41
Figura 4.25 - Taxa média de desgaste do PINO 420 e revestimento 6 (R6), teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	42
Figura 4.26 - Aspecto topográfico típico após teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	43
Figura 4.27 - Aspecto topográfico típico após teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	43
Figura 4.28 - Aspecto topográfico típico após teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	44
Figura 4.29 - Aspecto topográfico após erosão em amostra R7 com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência normal.....	44
Figura 4.30 - Aspecto topográfico típico após a erosão em amostra do metal base, erosão à 90°, velocidade média de impacto de 6,8 m/s e concentração média de areia 5,9% (peso).....	45
Figura 4.31 - Aspecto topográfico típico após a erosão em amostra do Pino 420, erosão à 90°, velocidade média de impacto de 6,8 m/s e concentração média de areia 5,9% (peso).....	45
Figura 4.32 - Perfis topográficos transversais da superfície após 25 minutos de ensaio, (a) Pino 420, (b) R6, erosão com incidência a 90°, concentração média de areia 5,9% (peso), velocidade média de impacto de 6,8 m/s.....	46
Figura 4.34 - Comparação entre as amostras dos revestimentos 6 e 7, metal base e amostra de Pino 420.....	48
Figura 4.35 - Pites na superfície dos revestimentos R6 e R7 testados sob condição de corrosão estática.....	50

Figura 4.36 - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras a velocidades de R4, R7, R612 e R621 sob condição de jato corrosivo, velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	51
Figura 4.37 - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras a velocidades de metal base, R6 e PINO 420 sob condição de jato corrosivo a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	52
Figura 4.38 - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras a velocidades de Metal base e R6 sob condição de jato corrosivo a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	53
Figura 4.39 - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do R6 – Estático, R6 – Impingimento e R6v2 sob condições de jato corrosivo e estático a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	54
Figura 4.40 - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras PINO 420 – jato e PINO 420 – estático sob condições de jato corrosivo e estático a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	54
Figura 4.41 - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras metal base – estática e metal base – jato e sob condições estático e jato corrosivo e a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.....	55

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2. 1 - Resumo com a influência dos parâmetros no depósito do revestimento. .....	9
Tabela 2.2 - Valores de potenciais de eletrodos medidos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio a 25 °C (77 °F), concentração de íons 1,0 molar, e a 1,0 atm. .....	13
Tabela 3.1 – Composição química nominal (% em peso) do aço inoxidável 420.....	18
Tabela 3.2 – Composição química (% em peso) do aço carbono comum ASTM 36.	18
Tabela 3.3 – Condições de processamento para obtenção dos depósitos .....	19
Tabela 4.2 – Parâmetros eletroquímicos para o Pino 420, R6, R7 e metal base.....	47

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	ix
SUMÁRIO .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 REVESTIMENTO POR ATRITO.....	4
2.1.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO REVESTIMENTO POR ATRITO .....	6
2.1.2 APLICAÇÕES.....	7
2.1.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO PROCESSO:.....	7
2.2 CORROSÃO .....	10
2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DA CORROSÃO.....	11
2.2.2 MECANISMOS DA CORROSÃO .....	12
2.2.3 TAXA DE CORROSÃO .....	14
2.3 EROSÃO .....	15
3 METODOLOGIA .....	18
3.1 MATERIAIS .....	18
3.2 MICROESTRUTURA E DUREZA.....	20
3.3 ENSAIOS DE CORROSÃO EM ÁGUA DO MAR SINTÉTICA.....	21
3.4 ENSAIOS DE EROSÃO E CORROSÃO-IMPINGIMENTO .....	23
4.1 MICROESTRUTURA dos materiais de adição e base .....	25
4.2 DEFEITOS NA DEPOSIÇÃO.....	26
4.3 MICRODUREZA .....	28
4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE REVESTIMENTO POR ATRITO .....	32
4.4.1 ASPECTO SUPERFICIAL DO REVESTIMENTO DEPOSITADO .....	32
4.4.2 ESPESSURA DO REVESTIMENTO.....	33
4.4.3 EFEITO DO PROCESSO NO SUBSTRATO .....	36
4.5 ENSAIO PURAMENTE EROSIVO .....	41
4.6 TESTES DE CORROSÃO EM ÁGUA DO MAR SINTÉTICA (CONDIÇÃO ESTÁTICA).....	46
4.7 - TESTES DO JATO SEM AREIA .....	50

<b>4.7.1 - ENSAIOS JATO DE IMPINGIMENTO .....</b>	<b>51</b>
<b>4.7.2 COMPARAÇÃO CORROSÃO ESTÁTICA E JATO IMPINGIMENTO .....</b>	<b>53</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das grandes preocupações das empresas é diminuir o número de paradas de equipamentos para manutenção, bem como o tempo de duração da mesma, pois a cada intervenção registram-se perdas, não só pelo custo da manutenção, mas também pelo custo da parada, total ou parcial, da produção. Esses custos são consideravelmente elevados quando se trata da indústria de produção de petróleo, principalmente quando a intervenção é realizada em águas profundas (regiões com elevada pressão hidrostática, presença de água e/ou em áreas classificadas)<sup>[1]</sup>.

Técnicas de recobrimento de superfície são cada vez mais utilizadas nas indústrias para prolongar a vida útil de alguns componentes de seus equipamentos. Vários processos de recobrimento a base de soldagem por fusão, como soldagem a arco plasma (PAW), soldagem à arco submerso (SAW), soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (GTAW), soldagem à arco por eletrodo revestido (SMAW), revestimento à laser e outros mais<sup>[2]</sup>, estão em amplo uso industrial para a produção de revestimentos. Contudo, tais processos podem apresentar altos níveis de dissolução do recobrimento no substrato, microestrutura com grãos grosseiros, além de muitas vezes ocorrer problemas de trinca a quente, porosidade e formação de carbonetos, nitretos e fases intermetálicas frágeis<sup>[4, 5]</sup>.

Diante desse cenário industrial tem-se o desenvolvimento de uma técnica de reparo por atrito que comprova sua eficiência frente aos tradicionais métodos de soldagem. O Processo de Revestimento por Atrito (*Friction Surfacing*) é uma tecnologia emergente na área da engenharia de revestimentos metálicos e desenvolveu-se no princípio básico da deposição de material resistente ao desgaste e/ou corrosão. Por ser um processo em estado sólido, supera muito dos problemas existentes nos revestimentos por soldagem tradicionais e oferece grande flexibilidade em termos de materiais que podem ser depositados, como também uma grande variedade que poderão vir a ser usados como substrato<sup>[3]</sup>.

A Primeira patente do Processo de Revestimento por Atrito foi emitida em 1941 por Klopstock, e informações a respeito do processo de desenvolvimento de



Revestimento por atrito, apareceram primeiramente em 1959, mas só recentemente tal processo foi desenvolvido como prática industrial<sup>[2]</sup>. Durante a década passada o processo de “Recobrimento por Atrito” tornou-se bem fundado, com um grande número de aplicações comerciais, dentre os quais em recobrimento superficial em sede de válvulas com stellite, reparo e produção de peças para a indústria de turbina a gás, especialmente lâminas de turbina a gás, e vários tipos de ferramentas de usinagem tais como punções e brocas<sup>[2,3]</sup>. A técnica de revestimento por atrito apresenta um grande potencial para aplicações tecnológicas, como por exemplo, revestimento do topo de filetes de bombas multifásicas, sujeitas à erosão e corrosão<sup>[2]</sup>.

O revestimento obtido deve cumprir uma série de requisitos para ser considerado de interesse. Em primeiro lugar, sua aderência ao substrato deve ser boa, de maneira que não sofra delaminação com facilidade, deve resistir às condições de trabalho para as quais está dirigido, que podem incluir temperaturas extremas, atmosferas corrosivas ou desgastes mecânicos elevados. Por último, o revestimento deve contribuir para melhorar determinadas propriedades do material utilizado como substrato<sup>[8]</sup>.

Até a presente data, revestimentos em materiais, como o aço ferramenta, aço inoxidável<sup>[18]</sup>, inconel<sup>[25]</sup>, alumínio<sup>[6]</sup> e compósitos de matriz metálica de alumínio são utilizados ou estão sendo testados em substrato de aço carbono e alumínio<sup>[2]</sup>.

Por ser uma técnica recente, pouco ainda se compreende sobre a relevância dos parâmetros do processo.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo mostrar os resultados obtidos através de ensaios de recobrimento com aço AISI 420, permitindo assim uma análise sobre a influência da variação dos parâmetros do processo, tais como: rotação, força axial e velocidade de avanço da mesa sobre a dureza superficial e a resistência à corrosão estática do revestimento, erosão e sob condição de jato de Impingimento.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho, no período de 1996 a 2010.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia e descreve como foram produzidas as amostras, ou seja, o processo de recobrimento pela Técnica de Revestimento por atrito (*Friction Surfacing*), as caracterizações físicas e microestruturais, além dos recursos laboratoriais utilizados.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nos ensaios de corrosão pura, corrosão – jato de impingimento e erosão pura. Por meio da discussão dos resultados, este trabalho visa contribuir com o conhecimento em aspectos como a qualidade do revestimento feito em aço inoxidável frente a situações de corrosão e erosão, ou seja, como materiais revestidos em aço inoxidável 420 comportam-se em ambientes corrosivos e erosivos.

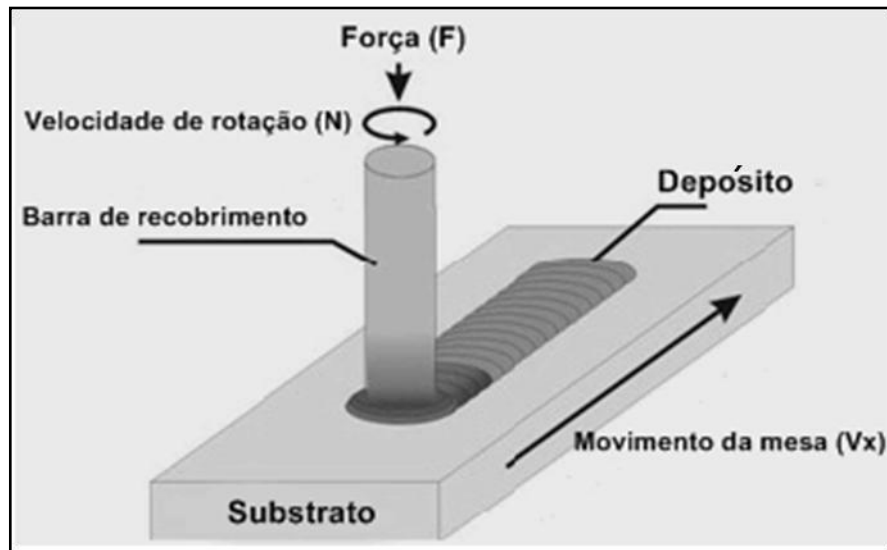
O quinto capítulo traz as conclusões e as contribuições dos resultados experimentais e discussões envolvidas.

O sexto capítulo traz sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 REVESTIMENTO POR ATRITO

O processo de revestimento por atrito, mostrado na Figura 1, é um processo derivado da soldagem por Atrito, retendo, portanto todos os seus benefícios: fase sólida, microestruturas forjadas e excelente ligação metalúrgica entre o substrato e o material adicionado<sup>[8]</sup>.

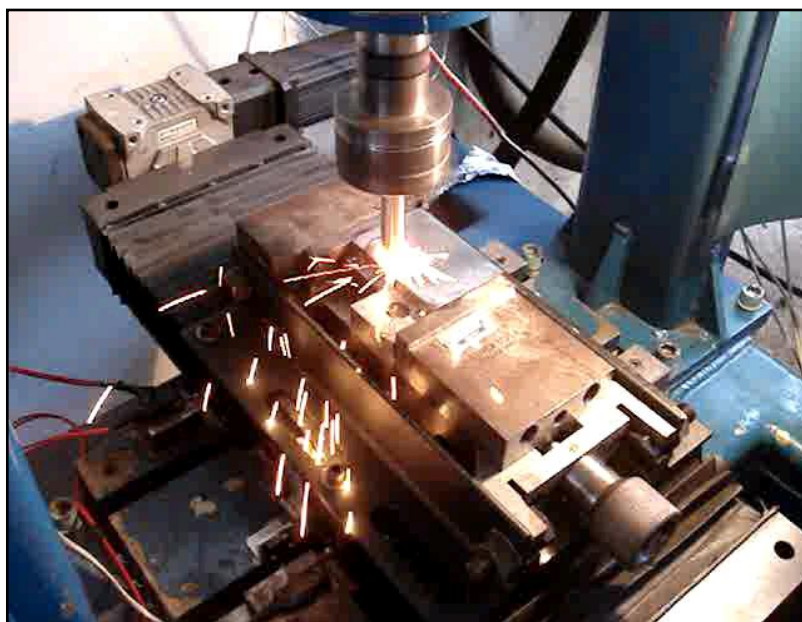


**Figura 2.1** - Esquema do processo de revestimento por atrito, conforme adaptada de Voutchkov et al.<sup>[8]</sup>

O processo consiste em fazer um pino consumível, girar em alta velocidade de rotação ( $N$ ), aplicando sobre este onde uma força ( $F$ ), com o intuito de mantê-la pressionada contra o substrato. Isso resulta em intensa geração de calor através do atrito na interface entre a barra consumível e a superfície a ser revestida. Durante o processo de revestimento, a camada de aplicação de metal atinge uma temperatura próxima à do ponto de fusão, enquanto simultaneamente sofre deformação plástica, num processo de forjamento do material do revestimento sobre o substrato<sup>[3, 6]</sup>.

O substrato é fixado à uma mesa que se movimenta no plano horizontal com velocidade ( $V_x$ ). A medida que à mesa se movimenta o metal plastificado na ponta

da barra consumível deposita-se no substrato, onde a força axial consolida o metal plastificado resultando na formação de camada contínua. A figura 2.2 ilustra o procedimento de recobrimento sendo realizado no equipamento de processamento de pinos por atrito.



**Figura 2.2** – Procedimento de recobrimento pelo equipamento de Processamento de Pinos por Atrito – UPPA 1.

A espessura da camada de recobrimento alcança de 0,5 a 3,0 mm, dependendo do material e do diâmetro da barra de revestimento. Sua análise macrográfica é caracterizada por uma topografia com ondulações finas, sendo necessária a retirada de pelo menos 0,1mm da espessura, a fim de se gerar a superfície acabada<sup>[7]</sup>.

A seleção dos parâmetros de processo é de grande importância na obtenção dos revestimentos através do processo de revestimento por atrito. Os três parâmetros principais no revestimento por atrito são: velocidade de rotação da barra consumível, velocidade transversal do substrato e a força axial que age na barra de rotação do consumível. Características do recobrimento como, largura, espessura da camada recoberta e resistência da união entre o substrato e a camada de revestimento, dependem destes parâmetros para um dado sistema de materiais da barra consumível e substrato.

### 2.1.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO REVESTIMENTO POR ATRITO

Como todos os processos de fabricação, o processo de revestimento por atrito apresenta vantagens e limitações que serão apresentadas a seguir.

#### VANTAGENS

Em comparação com os principais métodos de revestimento através de soldagem por fusão convencional, o processo de revestimento por atrito apresenta as seguintes vantagens<sup>[2, 4, 9,10]</sup>:

- O recobrimento é extremamente regular e plano, com ausência de irregularidades;
- O processo em si é ambientalmente limpo. Por não utilizar arco elétrico, esse processo não produz fumos durante a soldagem, que são prejudiciais à saúde do soldador/operador, não emite radiações eletromagnéticas nocivas, e não produz respingos de metal líquido durante a soldagem.
- O calor é gerado exatamente onde é necessário, tornando o processo Eficientemente energético.
- Viabilidade de automação do sistema.
- Dissolução praticamente nula.
- Microestrutura com granulometria fina.
- Ausência de porosidade.
- Pequena ZAC (Zona Afetada pelo Calor).
- Por não haver fusão do material, não há trinca a quente.

#### LIMITAÇÕES

O Processo de revestimento por atrito, tem se expandido da técnica de Laboratório a um processo comercial em grande escala. Contudo, questionamentos básicos tais como, a faixa apropriada dos parâmetros para o processo de revestimento por atrito, permanecem em grande parte sem respostas. As limitações do processo estão sendo reduzidas com o passar do tempo, por meio de pesquisas e desenvolvimentos intensivos e sucessivos<sup>[8]</sup>.

Dentre as principais limitações do processo estão as grandes dificuldades de fixação do material a ser adicionado, no caso de revestimentos extensos, necessidade do uso de barra de apoio e altos investimentos com equipamentos<sup>[7]</sup>.

### **2.1.2 APLICAÇÕES**

As características únicas do revestimento por atrito podem fornecer soluções e benefícios em diversas aplicações industriais, como por exemplo:

- Resistência ao desgaste;
- Proteção contra corrosão;
- Propriedades condutoras térmicas/elétricas desejadas, e reparos homogêneos para componentes de elevado custo.

### **2.1.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO PROCESSO:**

Pesquisas feitas até o momento revelaram que no processo de revestimento por atrito a força aplicada na barra ( $F$ ), a velocidade de rotação ( $N$ ) e a velocidade de avanço do substrato ( $V_x$ ) são de importância crucial para a qualidade do revestimento e da ligação na interface substrato/revestimento.

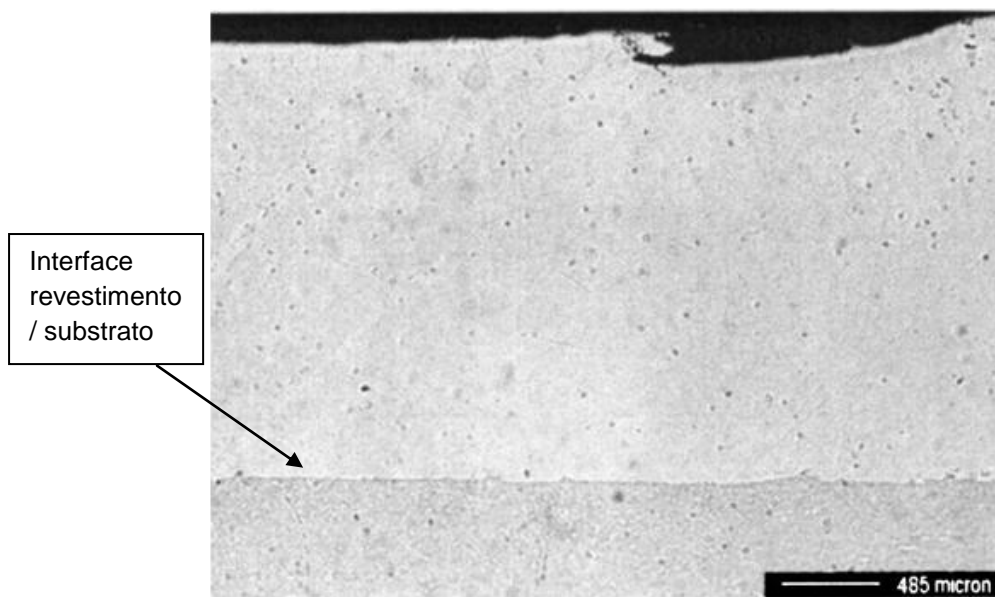
Três variáveis que refletem a qualidade do revestimento podem ser consideradas: espessura do revestimento, largura do revestimento e a adesividade do revestimento no substrato<sup>[1, 2, 3, 7, 8]</sup>.

A análise metalográfica de uma secção transversal de uma superfície bem recoberta pelo processo é mostrada na Figura 2.3.

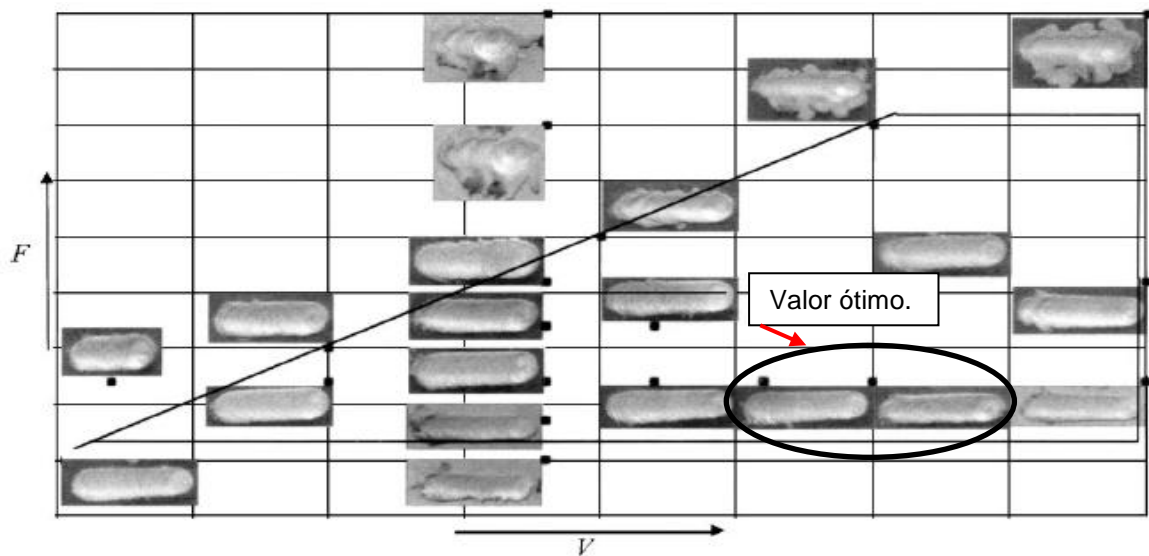
Segundo VITANOV et al.<sup>[7]</sup>, alguns parâmetros influenciam o processo da seguinte maneira:

- Quanto maior a força aplicada, proporcionalmente maior será a resistência na adesão entre o revestimento depositado e o substrato;
- Quanto maior a força, menor será a espessura do recobrimento;

- Quanto maior a força aplicada, menor será o *undercut*. (Falta de adesão entre os materiais nas bordas do cordão de depósito);
- Quanto maior a velocidade de avanço da mesa, menor será a espessura do revestimento, e menor também o tempo de ligação, proporcionando menor resistência do cordão de depósito;
- Quanto menor a velocidade de avanço da mesa, maior será a espessura do revestimento e quanto maior a espessura do revestimento, menor será a adesão.



**Figura 2.3** - Seção transversal que exhibe a interface entre o revestimento e substrato em  $\mu\text{m}^{[11]}$ .



**Figura 2.4** – Região com valor ótimo para velocidade de avanço<sup>[7]</sup>.

Segundo VITANOV et al.<sup>[7]</sup>, a velocidade de avanço tem um valor ótimo por volta do centro de gravidade do trapézio da figura, conforme ilustrado na figura 2.4.

Ainda segundo VITANOV et al.<sup>[7]</sup>, quanto mais rápido o movimento do substrato, menor será a área de adesão e maior será o *undercut*, conforme mostrado na figura 2.5.

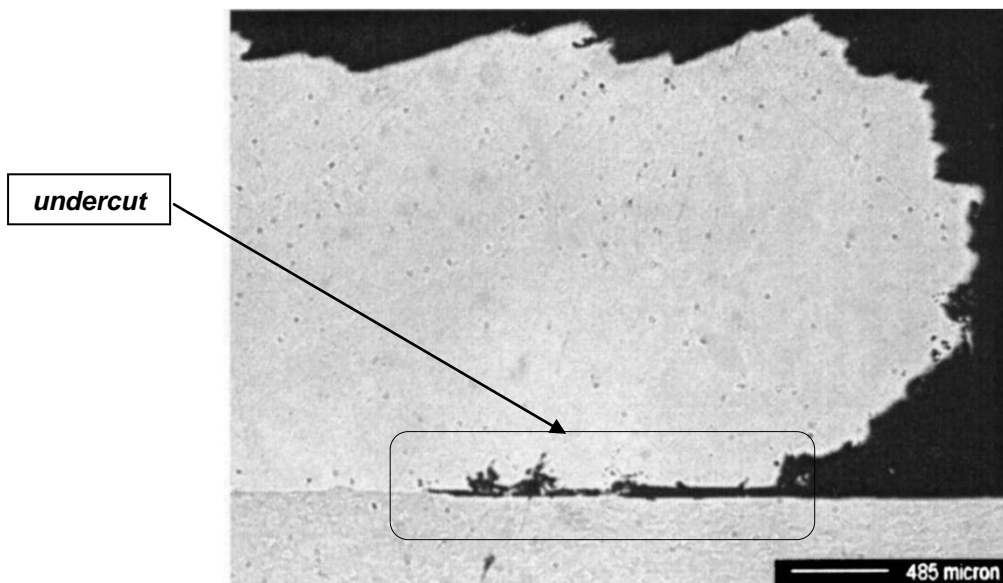


Figura 2.5 – Seção transversal mostrando o *undercut*<sup>[7]</sup>.

Tabela 2. 1 - Resumo com a influência dos parâmetros no depósito do revestimento.

Parâmetros		Resistência da ligação	Espessura do revestimento	Largura do revestimento	“Undercut”
Força	↑	↗	↘	↗	↘
	↓	↘	↗	↘	↗
Velocidade de avanço do substrato	↑	↗	↘	↘	↗
	↓	↘	↗	↗	↘
Rotação	↑	↗	↘	↘	↗
	↓	↘	↗	↗	↘



A Tabela 2.1 estabelece uma comparação entre a influência dos parâmetros de processo e o *undercut*, quando há variação nos parâmetros força, velocidade de avanço do substrato e velocidade de rotação.

## 2.2 CORROSÃO

Num aspecto muito difundido e aceito mundialmente, a corrosão é definida como a deterioração de um material, normalmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos. Essa deterioração ocorre devido a desgastes, variações químicas ou outras modificações estruturais indesejáveis, que tornam o material inadequado para o uso<sup>[12]</sup>.

Pode-se classificar as perdas econômicas relacionadas à corrosão como diretas e indiretas. As perdas diretas ou custos diretos estão relacionados à aplicação de métodos de proteção, como pinturas, revestimentos e proteção, e a substituição de peças e equipamentos devido ao efeito da corrosão.

As perdas indiretas ou custos indiretos totalizam custos mais elevados que as perdas diretas e nem sempre podem ser quantificadas. Elas estão relacionadas aos custos que as trocas e paralisações de peças e equipamentos acarretam. São exemplos de perdas indiretas: perda de eficiência, parada de produção, perdas e contaminações de produtos, entre outros.

A corrosão avança paralelamente ao desenvolvimento tecnológico, já que praticamente todos os setores da indústria sofrem com a corrosão, ou seja, os da mineração, metalurgia, alimentação, bebidas, química, indústria petrolífera (extração, transporte, refino e distribuição), automobilística, construção civil e construção naval, entre outras.

Devido aos custos relacionados a este fenômeno, os países avançados tecnologicamente têm investido muito na prevenção e combate da corrosão com objetivo de amenizar assim os prejuízos causados por ela.

### 2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DA CORROSÃO

A corrosão pode, de modo geral, ser classificada como seca ou aquosa. A corrosão seca, também chamada de corrosão química, acontece na presença de meios não iônicos tais como: gases, líquidos anidros e metais fundidos<sup>[12]</sup>. O mecanismo da corrosão química pode ocorrer também à temperatura ambiente, meio gasoso e ainda em alguns meios líquidos, isentos de água.

A corrosão em meios aquosos é a mais comum, e isto é esperado, uma vez que a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre no meio ambiente, no qual a água é o principal solvente<sup>[13]</sup>.

A corrosão aquosa (úmida) ou eletroquímica tem como característica principal do seu mecanismo o fato de que este só ocorre na presença de um eletrólito. A reação de corrosão é composta de duas reações parciais: uma reação anódica e uma reação catódica que se processam em pontos distintos<sup>[18]</sup>, ou seja, envolve materiais condutores de corrente elétrica (eletrodo) em um meio iônico (eletrólito). Além da existência de uma diferença de potencial na interface eletrodo/eletrólito.

Esta diferença de potencial é causada principalmente pelas diferenças microscópicas na estrutura metalúrgica do metal (composição, impurezas, tratamentos térmicos e mecânicos, condições de superfície) ou pelas características do meio corrosivo, tais como: composição química, diferenças em concentração, aeração, temperatura, velocidade, pH, teor de oxigênio, condição de imersão e movimento relativo entre o material metálico e o meio<sup>[12]</sup>.

Além desta classificação primária podem-se dividir ainda os tipos de corrosão quanto às características da aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos<sup>[12]</sup>.

Além destas das classificações de corrosão, existem outras que se baseiam nas características visuais da localização e morfologia do ataque, nos mecanismos de corrosão e no meio corrosivo<sup>[12]</sup>, como resumido a seguir:

- Morfologia - Uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intragranular, intergranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;

- Mecanismos - por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada à sollicitação mecânica (corrosão sob tensão), entre outros.
- Fatores mecânicos: Sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- Meio corrosivo – atmosférica, pelo solo, induzida por microorganismos, pela água do mar, sais fundidos, etc;
- Localização por ataque - por pite, intergranular, transgranular, etc.

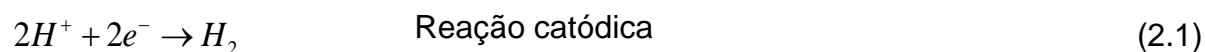
A corrosão do tipo uniforme é a mais comum de todas e é caracterizada por se manifestar em toda a superfície da peça em contato com o meio corrosivo. Quando a corrosão ocorre de forma localizada, o ataque é geralmente em toda a subsuperfície, podendo levar a falhas prematuras da estrutura, pela rápida penetração com pouca perda de massa. Esse tipo de corrosão é o mais perigoso, difícil de medir, prever e controlar.

## 2.2.2 MECANISMOS DA CORROSÃO

Quando um metal reage em sua superfície ele tem a tendência de perder elétrons. Este mecanismo pode ser explicado através das reações de oxi-redução que ocorrem de forma simultânea na superfície do material, ou seja, sempre que ocorre a oxidação (perda de elétrons), ocorre também à redução (ganho de elétrons). Estas reações vêm acompanhadas da troca de elétrons.

Reações catódicas são aquelas que resultam em redução dos elementos reagentes, já a dissolução de um metal resultante da sua oxidação é definida como uma reação anódica.

Exemplos de reações catódicas e anódicas são apresentados nas equações 2.1 e 2.2.



Experimentalmente verificou-se que os metais apresentam tendências diferentes a se oxidar, foi então desenvolvida uma tabela, chamada de tabela de potenciais de eletrodo, que dispõe a ordem preferencial de doação de elétrons, ou seja, ordena

quais elementos tem maior facilidade de perder elétrons e conseqüentemente oxidar.

Quando se coloca um metal em forma de lâmina, placa, bastão, entre outros nas soluções eletrolíticas, determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as duas fases, sólida e líquida<sup>[12]</sup>. Esta diferença de potencial é chamada diferença de potencial eletroquímico devido ao fato deste ser de natureza elétrica e química, e são medidos em condições específicas de temperatura, pressão e concentração, como mostrado na tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Valores de potenciais de eletrodos medidos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio a 25 °C (77 °F), concentração de íons 1,0 molar, e a 1,0 atm<sup>[15]</sup>.

Reação do eletrodo	Potencial de eletrodo padrão (E°) (volts)	Reação do eletrodo	Potencial de eletrodo padrão (E°) (volts)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Au}$	+1,500	$\text{Ga}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ga}$	-0,530
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pd}$	+0,987	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,740
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hg}$	+0,854	$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,910
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0,800	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,763
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Hg}$	+0,789	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1,180
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,337	$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1,630
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0,000	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,660
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,126	$\text{Hf}^{4+} + 4\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hf}$	-1,700
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,250	$\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Be}$	-1,850
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,440	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3,050

O potencial é medido em relação a um eletrodo de referência ou de potencial padrão. Assim valores relativos de potenciais podem ser determinados experimentalmente usando-se o eletrodo padrão ou normal de hidrogênio que foi escolhido como referência e, arbitrariamente, fixado como potencial zero<sup>[12]</sup>.

Outros eletrodos podem ser utilizados para medir potenciais eletroquímicos, como o eletrodo de referência de calomelano, de prata cloreto de prata e de cobre sulfato de cobre.

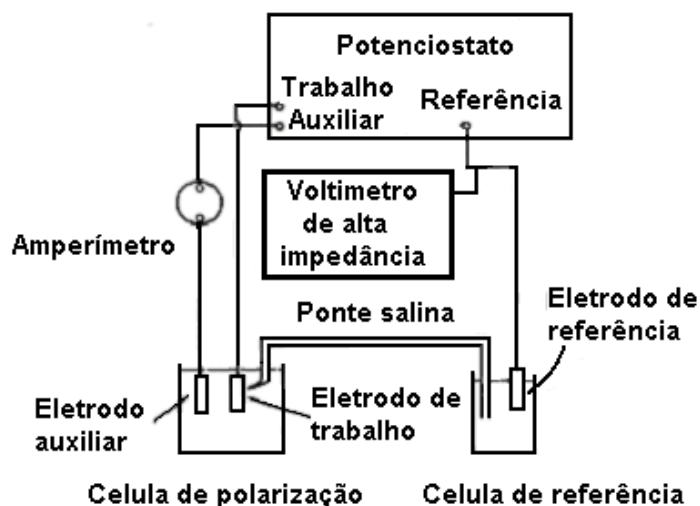
O eletrodo de calomelano consiste em mercúrio em contato com cloreto mercurioso,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , em uma solução de KCl. O de prata cloreto de prata é construído de um fio de platina revestido de prata, que é, por sua vez convertido parcialmente em AgCl imerso em solução de ácido clorídrico diluído e o eletrodo de cobre sulfato consiste de cobre metálico imerso em solução saturada de sulfato de cobre<sup>[14]</sup>.

Uma limitação do uso desta tabela deve-se ao fato dela não levar em conta algumas características cinéticas da reação como a velocidade. Além deste fato, esses potenciais não podem ser considerados em condições práticas devido terem sido mensurados em condições controladas.

### 2.2.3 TAXA DE CORROSÃO

Os equipamentos utilizados para a determinação das curvas polarização dinâmica são os potenciostatos/galvanostatos descritos na figura 2.6, os quais são formados por uma célula com três eletrodos, sendo eles: o eletrodo de trabalho (material a ser testado), o eletrodo de referência (uma ponte salina) e o eletrodo auxiliar (platina ou grafite) para fechar o circuito. Além dos eletrodos, os equipamentos apresentam uma fonte de tensão ou de corrente estabilizada, onde são acoplados um amperímetro e um voltímetro de alta impedância.

O potenciostato/galvanostato acoplado a um microcomputador gera as curvas de polarização que serão usadas para obter-se a taxa de corrosão, através da medição da corrente de corrosão anódica que circula no metal no potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ). No caso de corrosão localizada, outros parâmetros também podem ser medidos como potencial de pite, corrente de passivação.



**Figura 2.6** – Diagrama esquemático de uma montagem típica de célula de polarização<sup>[14]</sup>.

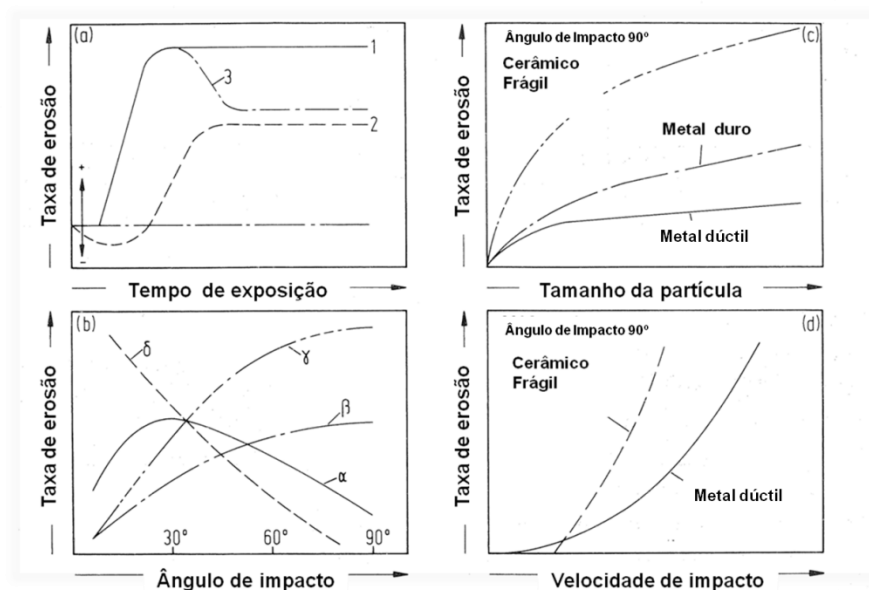
## 2.3 EROSÃO

Erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou líquidas ou a implosão de bolhas formadas no fluido contra a superfície de um corpo sólido<sup>[16]</sup>.

Zum Gahr 1987<sup>[17]</sup> considera seis tipos de desgastes erosivos, quais sejam: (a) erosão por partículas sólidas em meio gasoso, (b) erosão por partículas sólidas em meio líquido, (c) erosão devido à ação de líquidos, (d) erosão-corrosão, (e) erosão por cavitação e (f) erosão térmica.

Os diversos tipos de erosão possuem seus mecanismos particulares e condições específicas para o seu desenvolvimento. Na erosão por partículas sólidas, os principais parâmetros que devem ser considerados são: velocidade do fluido, ângulos de impacto, características das partículas sólidas, meio de transporte do abrasivo (fluido) e mecanismo de degradação<sup>[14]</sup>.

A figura 2.7 ilustra os gráficos de representação esquemática da taxa de erosão em função de tempo de exposição, ângulo de impacto, tamanho da partícula e velocidade de impacto.



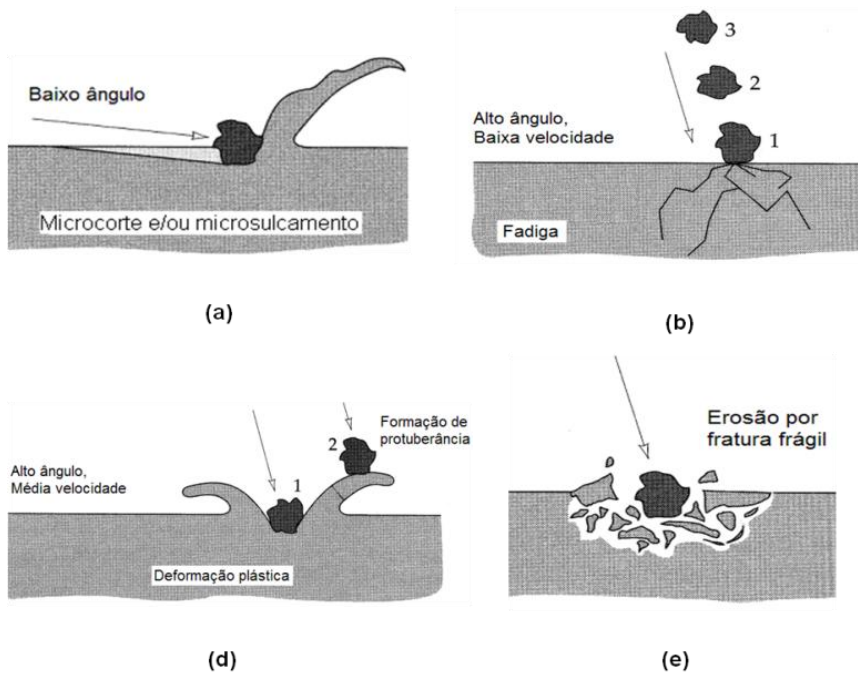
**Figura 2.7** – Representação esquemática da taxa de erosão em função de, a) tempo de exposição; b) ângulo de impacto por meio de diferentes curvas válidas para metais dúcteis ( $\alpha$ ), metais duros ( $\beta$ ), cerâmicos frágeis ( $\gamma$ ) e borracha ( $\delta$ ); c) tamanho de partícula e d) velocidade de impacto<sup>[17]</sup>.

A Figura 2.7 (a) mostra uma região de instabilidade da taxa de erosão no período inicial do ensaio, devido a fatores do tribosistema e após esta região a taxa permanece constante.

O ângulo de impacto é também um parâmetro de ensaio que influencia significativamente a taxa de erosão em diversos tipos de materiais, devido ao efeito do mecanismo de remoção de material, mostrado na Figura 2.7 (b). Nestes materiais, os sistemas que prevalecem são os mecanismos de corte e sulcamento, onde há deformação plástica, maiores taxas de desgaste ocorrem à 30.º

A partícula abrasiva é um parâmetro importante a ser verificado, pois sua forma e tamanho influenciam no processo de erosão. A Figura 2.7 (c) mostra que existe um tamanho de partículas a partir do qual a taxa de erosão não sofre grandes acréscimos, principalmente em materiais dúcteis.

Outro parâmetro que influencia significativamente a taxa de erosão é a velocidade de impacto com que as partículas sólidas chegam à superfície das peças, gerando uma determinada energia de impacto. Nos materiais duros, a energia de impacto requerida para iniciar o desgaste é maior do que em materiais moles Figura 2.7 (d). A Figura 2.8 mostra de forma esquemática os mecanismos básicos de desgaste erosivo, que ocorrem por meio de partículas sólidas<sup>[19]</sup>



**Figura 2.8** – Representação esquemática dos mecanismos de erosão por partículas sólidas: a) microcorte e/ou microsulcamento; b) fadiga; c) deformação plástica; d) fratura frágil<sup>[19]</sup>.



### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS

Foram confeccionadas amostras em aço carbono comum, A36, revestidas em aço inoxidável 420, cujas composições químicas nominais são apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2.

**Tabela 3.1** – Composição química nominal (% em peso) do aço inoxidável 420.

C	Mo	Ni	V	Si	P	S	Ti	Cr	Mn
0,208	-	1,52	0,028	1,10	0,031	0,019	0,041	11,8	0,73

**Tabela 3.2** – Composição química (% em peso) do aço carbono comum ASTM 36.

C	Mn	Cr	Mn	Ni	Mo	Si	S	P
0,13	0,94	0,02	0,01	0,01	0,01	0,19	0,008	0,014

O teor de carbono das amostras de Aço inoxidável 420 foi analisado no Espectrômetro de Fluorescência por Raios X modelo Thermo ARL 9900.

O processo de deposição de revestimento por atrito foi realizado no aparelho de Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA) da Universidade Federal de Uberlândia, mostrado na figura 3.1.

O aço Inoxidável 420 é conhecido por sua alta dureza e conseqüente resistência ao desgaste, é utilizado desde setores como de cutelaria até em equipamentos para turbinas.



**Figura 3.1** - Unidade de Processamento de Pinos por Atrito - UPPA1.

Apesar do planejamento experimental ser uma técnica muito utilizada na área de processo de fabricação, neste estudo tal procedimento não pode ser realizado devido a limitações construtivas do equipamento. Cabe ressaltar que a UPPA foi projetada para reparo por atrito, assim não previa as necessidades de maior flexibilidade para um processo de deposição por atrito, como por exemplo, maior diâmetro do pino ou maior extensão de avanço. Deste modo, neste trabalho foram utilizadas as seguintes condições de processamento para obtenção dos depósitos.

A seguir a tabela 3.3 com as condições de processamento.

**Tabela 3.3** – Condições de processamento para obtenção dos depósitos

REVESTIMENTO	Força [kgf]	Velocidade mesa [mm/min]	Rotação [rpm]
1	1000	50	5000
2	1000	100	5000
3	1000	150	5000
4	1000	200	5000
5	1000	300	5000
6	1000	200	3000
7	1300	200	5000
8	1000	100	3000

### 3.2 MICROESTRUTURA E DUREZA

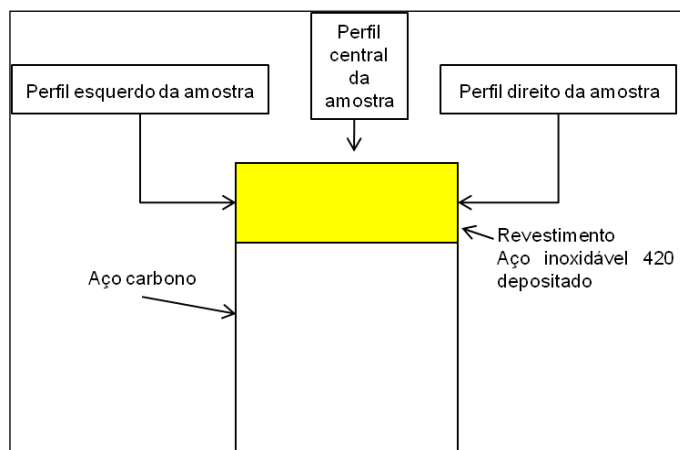
Para análise da microestrutura dos corpos de prova foi necessária a preparação metalográfica que fornecesse resultados confiáveis sobre a qualidade do reparo. Dessa forma, as amostras foram cortadas mediante eletroerosão e retificação nas direções transversal e longitudinal ao material depositado, sendo posteriormente embutidas em resinas termoendurecíveis, programado para trabalhar a uma temperatura de 160°C para aquecimento máximo e 55° C para resfriamento final, no laboratório LTAD da UFU.

A cada amostra procedeu-se o lixamento escalonado até a granulometria de 1200 mesh. Em seguida, efetuou-se o polimento, com pastas de diamante para posteriormente proceder-se o ataque químico com uma solução do reagente Villela, durante 50 segundos.

O estudo das microestruturas dos aços foi realizado usando Microscópio Eletrônico de Varredura Digital EVO 40XVP (ZEISS), equipado com sistema de microanálise EDS (IXRF) do laboratório de Caracterização Microestrutural do Departamento de Engenharia Mecânica da UFES.

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados no centro do corte transversal do revestimento, com auxílio do microdurômetro Shimadzu HMV-AD multi-teste, onde se utilizou uma carga de 50 gf ( $HV_{0,05}$ ). As indentações foram realizadas na direção vertical, a partir da região superior do aço inoxidável depositado, com uma variação das mesmas de 0,05 mm, até atingir o substrato a uma distância de aproximadamente 5,5 mm da superfície.

A posição das amostras foi seguida de acordo com a posição de referência ilustrada na figura 3.2, que foi tomada por base nos ensaios de dureza.

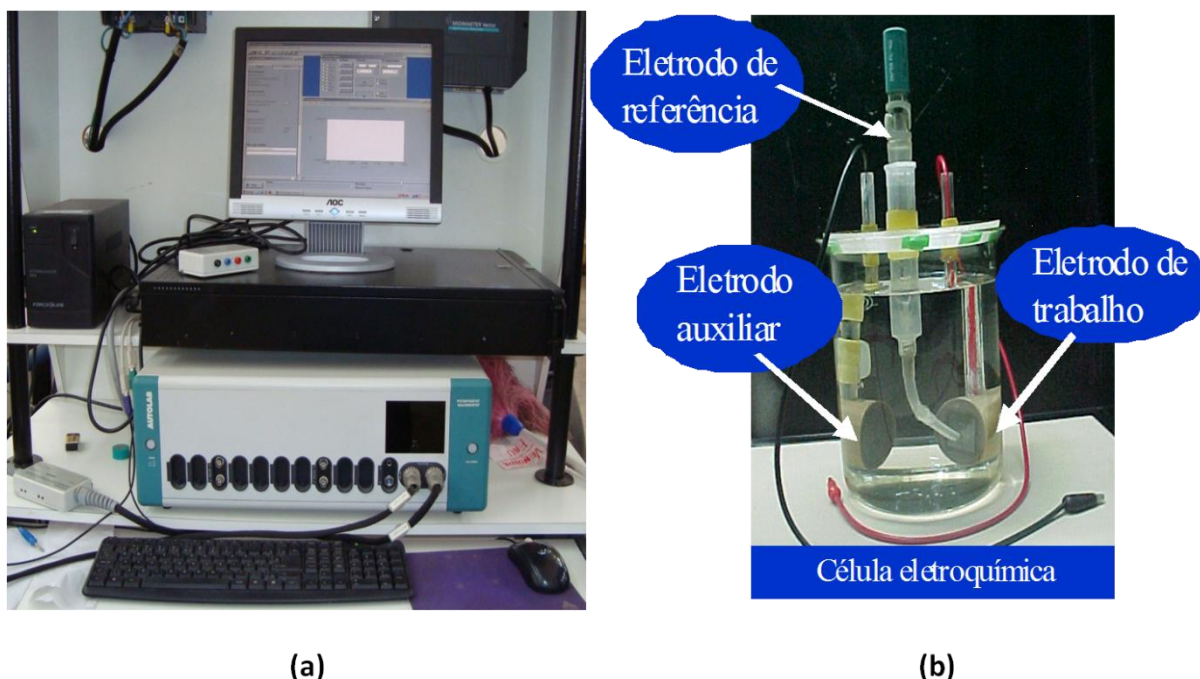


**Figura 3.2** – Esquema do perfil de dureza.

A microestrutura do revestimento, da zona afetada pelo calor e do metal de base foi observada tanto no microscópio ótico quanto no microscópio eletrônico de varredura (UFES E UFU). Para tal caracterização, algumas amostras foram atacadas com reagente Villela, durante 50 segundos

### **3.3 ENSAIOS DE CORROSÃO EM ÁGUA DO MAR SINTÉTICA**

Os ensaios de corrosão eletroquímica foram realizados em uma célula eletroquímica convencional com três eletrodos conectados a um potenciostato/galvanostato, com as seguintes características: corrente máxima de  $\pm 1$  A, tensão máxima de  $\pm 30$  V, conversor A/D/A para 4 canais com 16 bits de resolução, acoplado a um micro computador apresentado na figura 3.3.



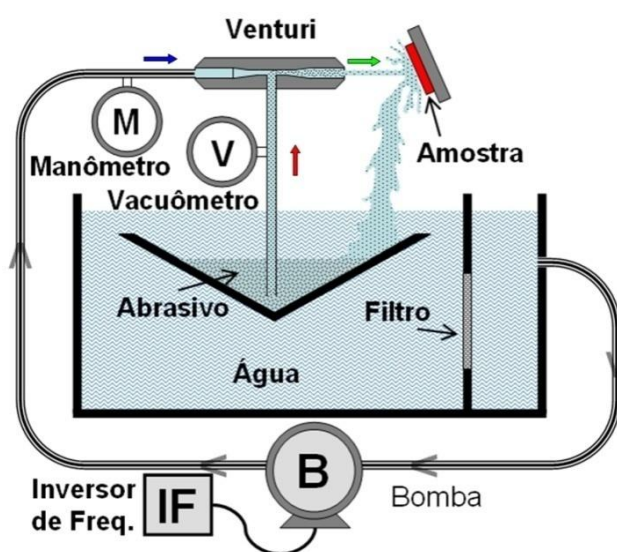
**Figura 3.3** – Bancada experimental dos testes de corrosão eletroquímica, (a) potenciostato/galvanostato e (b) célula eletroquímica usada nos experimentos.

Os eletrodos foram montados em um Becker de 1 L de maneira que o eletrodo de trabalho ficasse na frente do eletrodo padrão à distância de aproximadamente 2 mm. O eletrodo de trabalho (amostra de teste) teve uma área de exposição com  $1 \text{ cm}^2$ . O eletrodo auxiliar utilizado foi de grafite e o eletrodo de referência de Ag/AgCl saturado, montados segundo a norma ASTM G5–94 [26]. A solução eletrolítica utilizada foi água do mar sintética (900 ml), preparada segundo a norma ASTM D1141-98<sup>[23]</sup>.

A amostra foi imersa e mantida nesta condição por cinco minutos para a estabilização do potencial de equilíbrio, antes da realização da varredura. O potencial do eletrodo foi variado de um valor de 200 mV mais negativo que o potencial de circuito aberto (potencial de corrosão), até o potencial no qual a densidade de corrente atingisse o valor de  $1,0 \text{ mA/cm}^2$ , quando o teste era concluído. A velocidade de varredura foi de  $1,0 \text{ mV/s}$ . A partir das curvas de polarização foram obtidos o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), o potencial de passivação ( $E_{\text{pass}}$ ), o potencial de pites ( $E_{\text{pite}}$ ) e a densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ). Durante os testes, o pH foi controlado e mantido entre 8,31 e 8,38.

### 3.4 ENSAIOS DE EROSÃO E CORROSÃO-IMPINGIMENTO

Após a etapa de caracterização microestrutural e de avaliação do comportamento em corrosão estática (sem movimentação do fluido), foram realizados os ensaios de erosão pura, e corrosão pura (procedimento no jato de impingimento). Os ensaios foram feitos no equipamento tipo jato do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia, representado esquematicamente na Figura 3.4.



**Figura 3.4** - Desenho esquemático do dispositivo de Jato impingimento<sup>[14]</sup>.

A velocidade utilizada no jato foi de 7,0 m/s, para um ângulo de 90°. A concentração da areia utilizada nos teste foi de 6% em peso. A areia utilizada como partícula erosiva foi a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), segundo a norma NBR – 7214, com granulometria 0,15 mm – In 100. Utilizou-se a água de torneira como fluido, cuja temperatura média foi mantida em 25 °C para todos os testes.

Para cada condição de teste foram realizadas no mínimo duas repetições, a fim de confirmar a reprodutibilidade dos ensaios. Apesar dos tempos de ensaio não serem tão longos, cerca de 25 minutos no total, foi feita a troca da areia a cada duas horas de uso para evitar o efeito da degradação da partícula erosiva, com base na metodologia adotada por SILVA (2008).

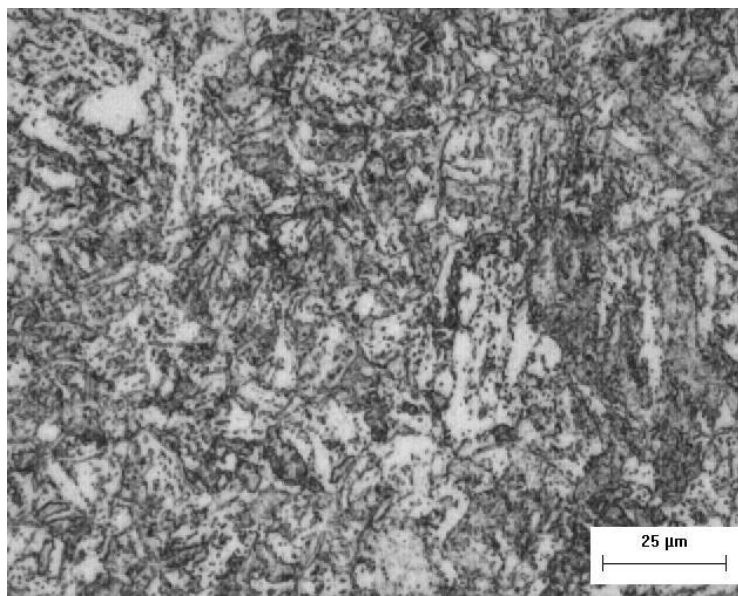
O ensaio de erosão pura e corrosão-impingimento teve duração total de vinte e cinco minutos, sendo que a cada cinco minutos era interrompido, a amostra era retirada, limpa em ultra-som com acetona e pesada em balança analítica com resolução de 0,1 mg, com o objetivo de determinar a perda de massa.

A taxa de desgaste (gramas de material removido/gramas de partículas erosivas) foi determinada dividindo-se a perda de massa pelo fluxo de partículas erosivas<sup>[14]</sup>.

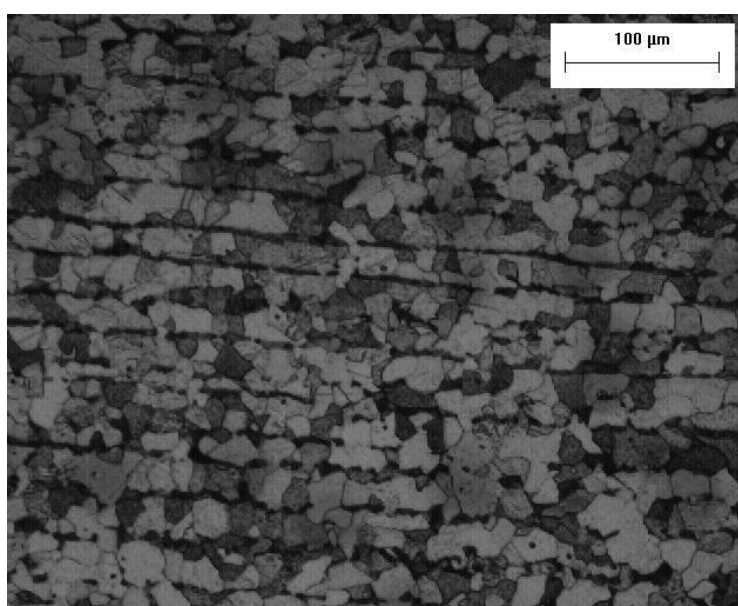
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MICROESTRUTURA DOS MATERIAIS DE ADIÇÃO E BASE

O material da barra de aço inoxidável 420 apresenta uma microestrutura martensítica revenida com precipitação de carbonetos, figura 4.1.

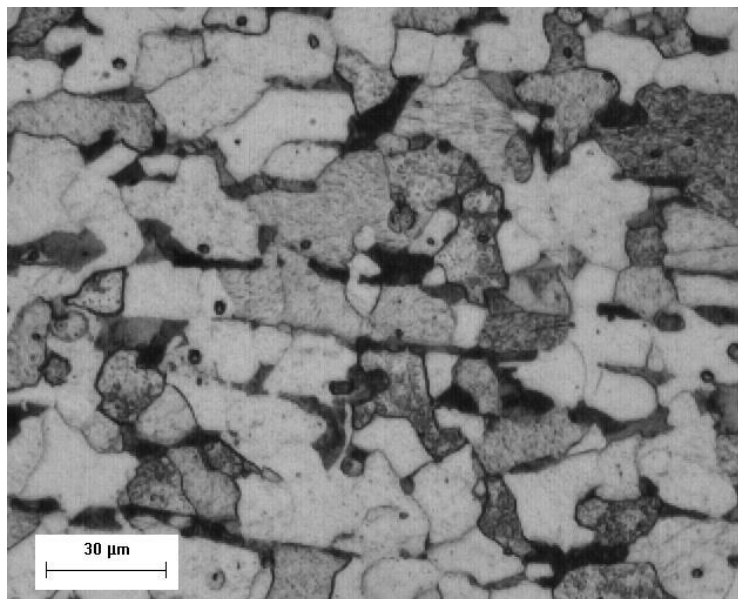


**Figura 4.1** – Microestrutura da barra de aço inoxidável 420 constituída por martensita revenida e carbonetos. Ataque realizado com Reagente Villela, durante 50 segundos.



**Figura 4.2** – Microestrutura do substrato, aço ASTM A36 constituída por ferrita e perlita. Ataque realizado com Reagente Villela, durante 50 segundos.



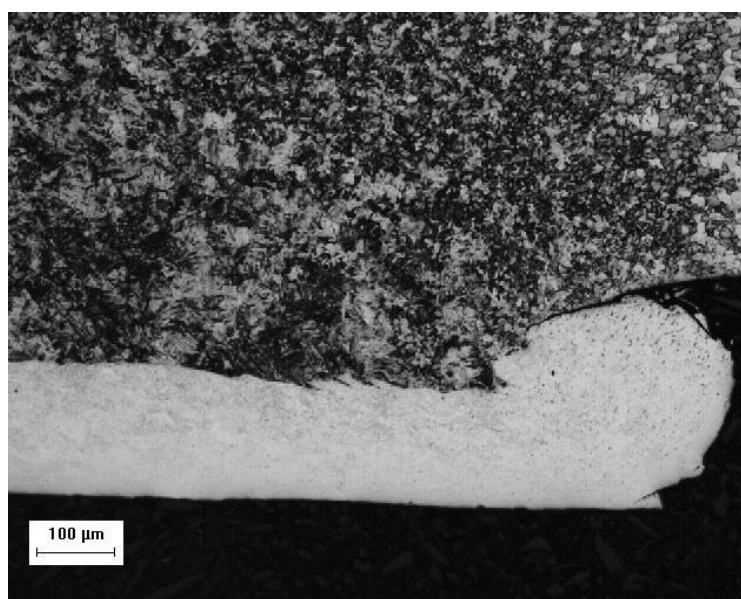


**Figura 4.3** – Microestrutura do substrato, aço ASTM A36 constituída por ferrita e perlita. Ataque realizado com reagente Villela, durante 50 segundos.

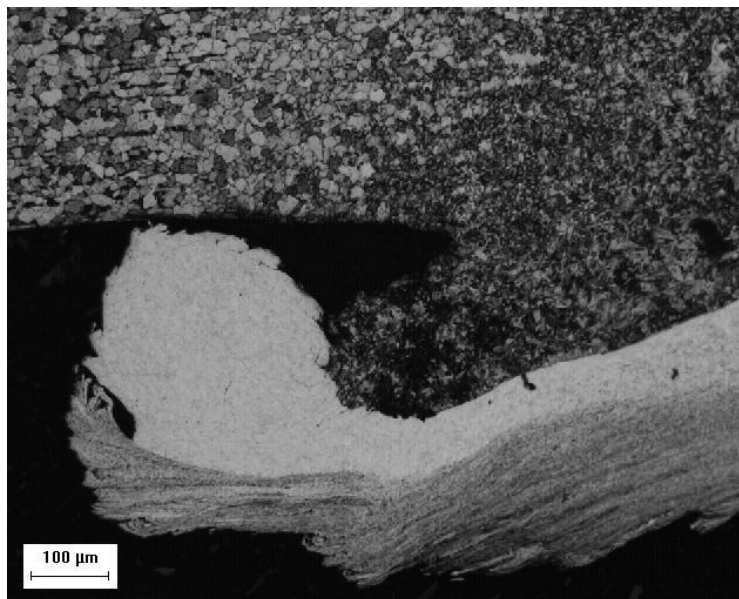
A microestrutura do substrato, aço ASTM A 36, é mostrada nas figuras 4.2 e 4.3. Pode ser observada a estrutura ferrítica - perlítica.

## 4.2 DEFEITOS NA DEPOSIÇÃO

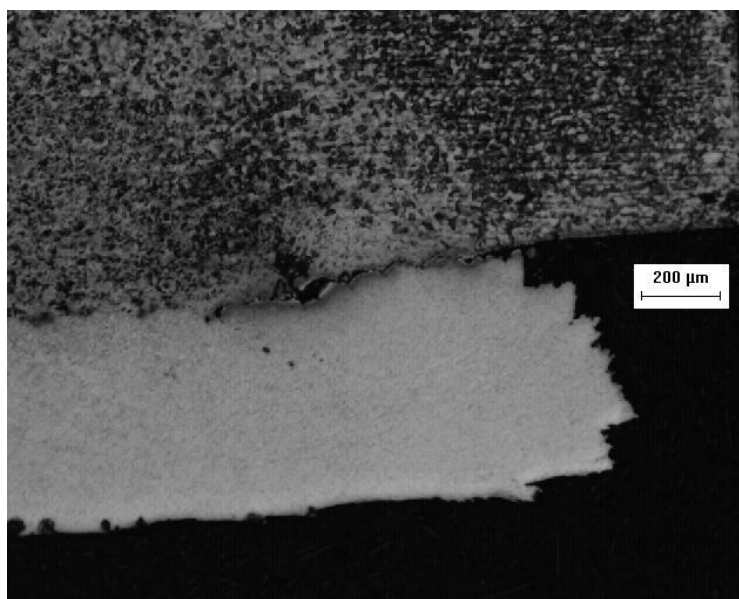
As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 abaixo ilustram um tipo de defeito comum nos revestimentos depositados por atrito.



**Figura 4.4** - Revestimento 4.



**Figura 4.5** - Revestimento 4.



**Figura 4.6** - Revestimento 6 – *Undercut*.

Dependendo dos parâmetros de processamento adotados, pode ocorrer deformação plástica do substrato. Segundo RAFI et al.<sup>[3]</sup> e VITANOV et al.<sup>[7]</sup> quanto mais rápido maior a velocidade de avanço, menor a área depositada e maior o *undercut*<sup>[7,11]</sup>.

### 4.3 MICRODUREZA

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação dos perfis de microdureza dos revestimentos produzidos com diferentes velocidades de deslocamento do substrato, rotação do pino e força aplicada sobre o mesmo.

Em comparação, todas as camadas de revestimentos, figuras 4.7, 4.9 e 4.10, apresentaram significativamente maior dureza, em média de 800 HV<sub>0,05</sub>, comparadas às barras adquiridas do fornecedor (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1** - Média das durezas obtidas na camada de revestimento depositado.

Material	Barra AISI 420	Revestimento com avanço de 100 mm/min	Revestimento com avanço de 200 mm/min	Revestimento com avanço de 300 mm/min
<b>Dureza Média em HV<sub>0,05</sub></b>	<b>261 ± 6</b>	<b>791 ± 19</b>	<b>745 ± 68</b>	<b>790 ± 56</b>

Com o teor de carbono analisado, a dureza do aço temperado seria de no máximo 515 HV, segundo diversas referências, porém os valores obtidos da ordem de 850HV são muito maiores quando comparados com a dureza das barras de aço temperado citada acima, sendo assim verifica-se que outro mecanismo também está atuando.

Bem possível que, a deformação da austenita durante o atrito tenha levado ao aumento do número de sítios para a nucleação da martensita e assim como resultado, causou o refino do tamanho das plaquetas segundo PORTER et al.<sup>[27]</sup>

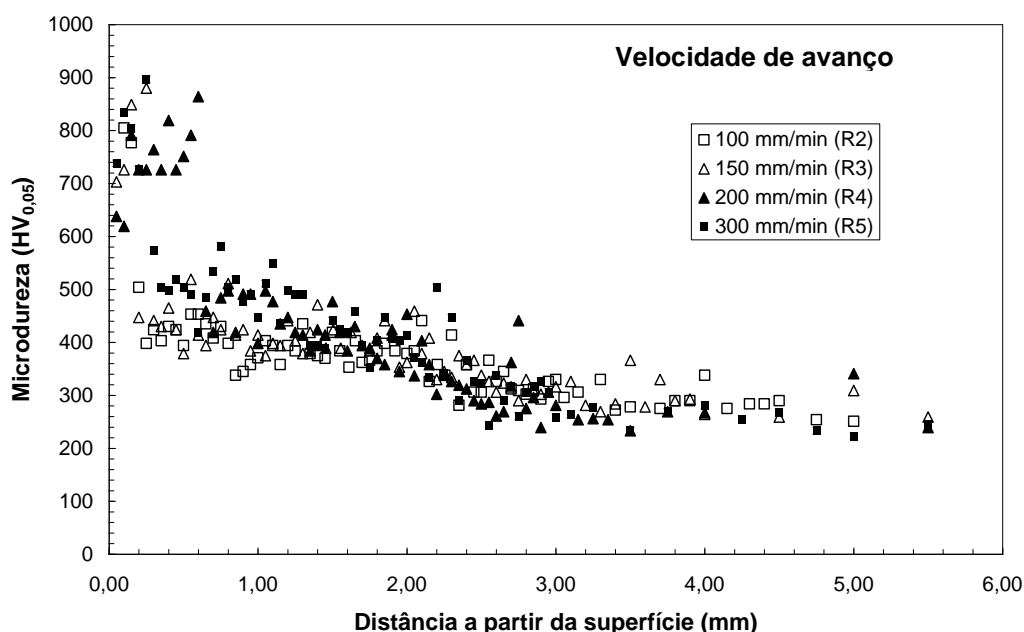
Deste modo, além do efeito do carbono em solução sólida, o refino da martensita e o encruamento explicam os valores de dureza elevados que foram medidos.

As barras de aço inoxidável AISI 420 utilizadas para o revestimento estavam em condição de têmpera e revenimento, com dureza média de 261 ± 6 HV<sub>0,05</sub>. Durante o processo de revestimento, a superfície do material atinge temperaturas na faixa de 1100 °C a 1200 °C<sup>[2, 10, 20]</sup>, que estão bem acima da temperatura de austenitização, perdendo assim, as condições iniciais de tratamento térmico (têmpera e revenimento) que o aço inoxidável martensítico estava submetido. Como as taxas de resfriamento são muito altas, o material é temperado, formando

martensita, proporcionando uma microestrutura fina e sem precipitados de cromo(ou poucos), em comparação ao mesmo material revenido<sup>[2]</sup>.

O resultado do teste de microdureza em relação à velocidade de avanço do substrato é mostrado na figura 4.8. Nestes ensaios, os valores dos parâmetros, força axial e velocidade de rotação do pino foram fixados em 1000 kgf e 5000 rpm respectivamente, variando-se a velocidade do substrato em 100, 150, 200 e 300 mm/min.

Em todos os casos, a dureza encontrada da ZAC diminuiu em função da distância da interface, até atingir a dureza inalterada do substrato. O aumento na dureza próximo da interface pode ser relacionado diretamente com a presença de ferrita de Widmanstätten<sup>[21]</sup>, tal microestrutura é o resultado da entrada de calor através do atrito e deformação plástica. O efeito combinado de calor e deformação plástica provoca uma diminuição no tamanho do grão (o que as imagens obtidas do MEV mostraram), que leva ao endurecimento nas regiões próximas à interface.

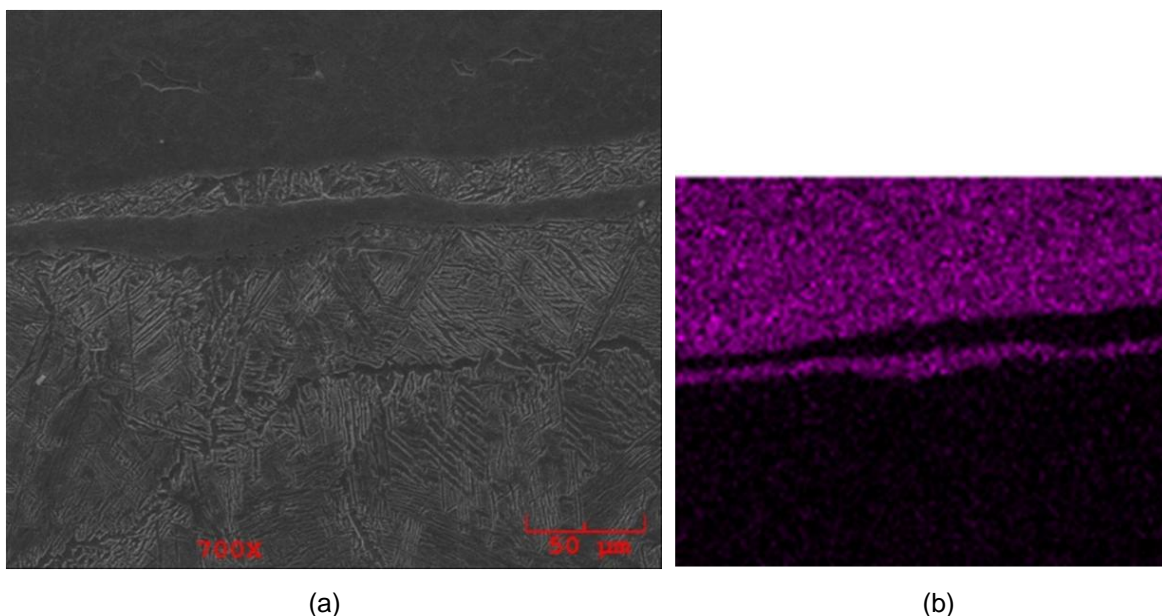


**Figura 4.7** – Perfil de microdureza dos revestimentos produzidos à diferentes Velocidades de avanço do substrato. Força de 1000 Kgf e velocidade de rotação de 5000 rpm.

De acordo com o gráfico mostrado na figura 4.7, em velocidades mais baixas de avanço, maior é o calor propagado para o substrato, resultando em maior zona afetada pelo calor zona (ZAC). As regiões que apresentam maior dureza no

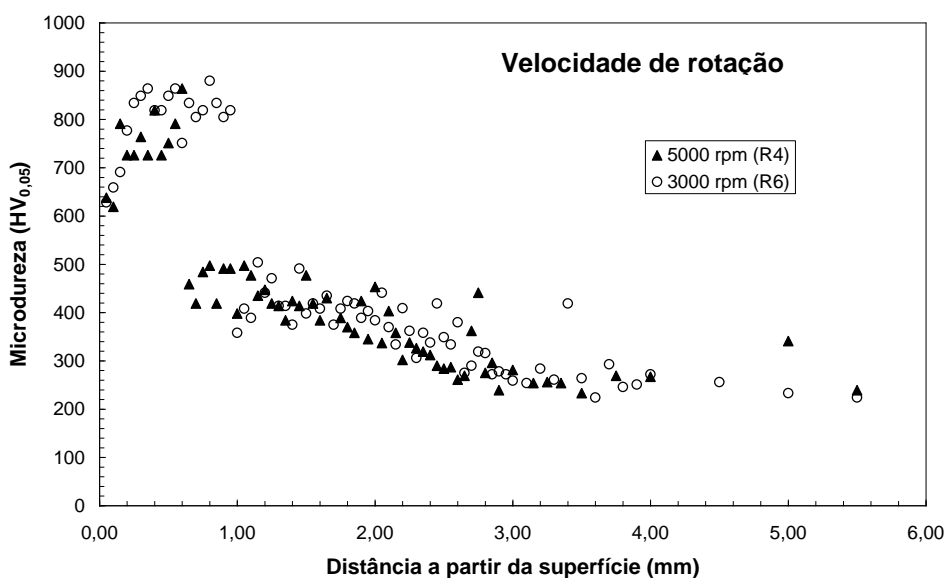
substrato indicam a extensão da ZAC. Por outro lado, maiores velocidades de avanço favorecem uma maior dureza nas regiões da ZAC, o que deve estar associada principalmente às características da estrutura formada.

Em todas as velocidades de avanço, a dureza média da camada revestida apresentou valores parecidos, apresentando alguns picos de maior dureza na superfície acima da interface, provavelmente devido à mistura mecânica dos dois materiais figura 4.8 e/ou às diferenças nas taxas de resfriamento local e/ou difusão do carbono do metal base para o revestimento.



**Figura 4.8** – (a) Fotomicrografia da interface substrato/revestimento (MEV 700X), (b) mapa de composição MEV, evidenciando a existência de camada de revestimento através do Cr.

Nas figuras 4.9 e 4.10 foram estabelecidas comparações de dureza com variações de velocidade de rotação do pino (revestimentos 4 e 6) e força aplicada ao mesmo (revestimentos 4 e 7) respectivamente.

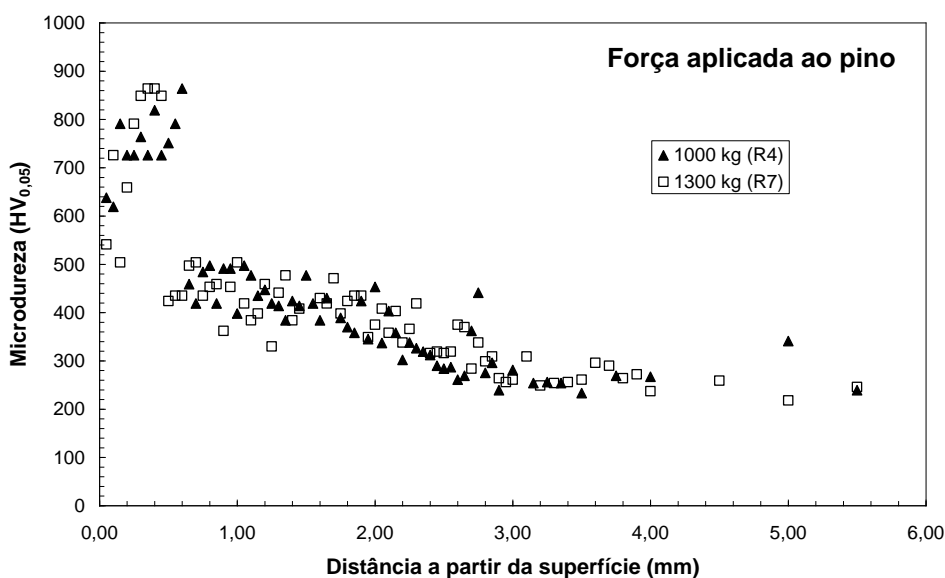


**Figura 4.9** - Perfil de microdureza dos revestimentos produzidos à diferentes velocidades de rotação. Força de 1000 Kgf e velocidades de avanço de 200 mm/min.

Pode ser observado que tais fatores pouco influenciam na dureza, tanto do revestimento quanto da ZAC. Como já citado na literatura, estes fatores exercem grandes influências em outros parâmetros: a velocidade de rotação do pino é o principal controlador da largura do revestimento enquanto a força aplicada controla a ligação entre revestimento e substrato<sup>[7, 8, 11]</sup>.

Nota-se, através da análise do gráfico da figura 4.10:

- Brusca queda de dureza na interface;
- A dureza na superfície aparenta ser menor que a medida no centro do revestimento. Isso pode estar associado à dinâmica do processo, onde se tem na superfície aporte de calor. O que pode resultar em maior dissolução de carbonetos e conseqüentemente na formação de martensita retida.



**Figura 4.10** - Perfil de microdureza dos revestimentos produzidos à diferentes forças aplicada ao pino. Velocidade de avanço de 200 mm/min e velocidade de rotação de 5000 rpm.

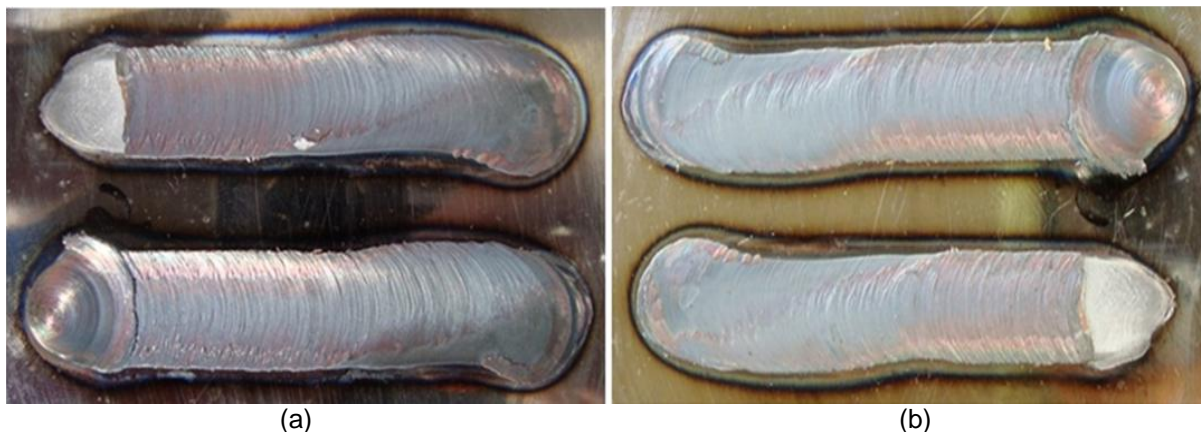
## 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE REVESTIMENTO POR ATRITO

### 4.4.1 ASPECTO SUPERFICIAL DO REVESTIMENTO DEPOSITADO

De acordo com a figura 4.11 pode-se verificar pela aparência do cordão de revestimento, ondulações espaçadas de forma regular, na parte superior do recobrimento. A formação dessas ondulações está relacionado com o tipo de transferência da barra consumível do pino 420 para o substrato. A transferência do metal em estado plastificado, da ponta da barra do consumível para o substrato, tem como resultado camadas de metal depositadas devidamente espaçadas com forma elíptica<sup>[3]</sup>.

A mudança de cor nas superfícies indica oxidação nas camadas de revestimento. Nos revestimentos produzidos à altas velocidades de rotação, maiores que 1200 rpm, a ocorrência de tal fato é justificado pela entrada de mais calor no sistema<sup>[3,8]</sup>.

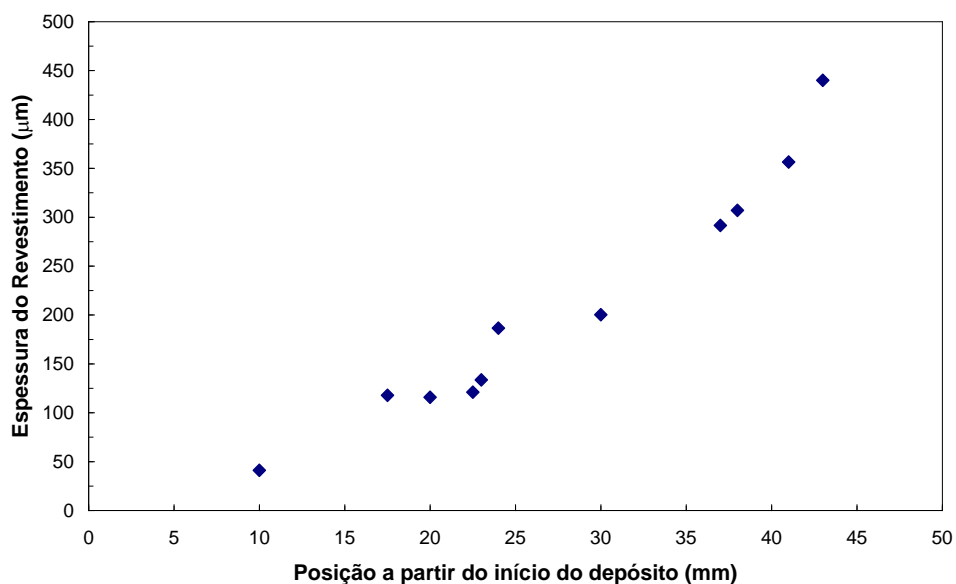
A Figura 4.11 mostra a aparência superficial dos revestimentos R4 e R5, respectivamente, os ensaios foram feitos com mesmo valor de velocidade rotacional, cerca de 5000 rpm, porém as velocidades de avanço foram diferentes.



**Figura 4.11** - Em a) R4 com velocidade de avanço de 200 mm/min. b) R5 com velocidade de avanço de 300 mm/min. Ambos utilizaram Força de 1000 Kgf e velocidade de rotação de 5000 rpm.

#### 4.4.2 ESPESSURA DO REVESTIMENTO

A Figura 4.12 abaixo ilustra a variação da espessura do revestimento produzido por atrito. Como esperado maiores espessuras são obtidas de certa distância do ponto de contato inicial do pino, a qual corresponde ao momento em que o processo de deposição por atrito se estabiliza.



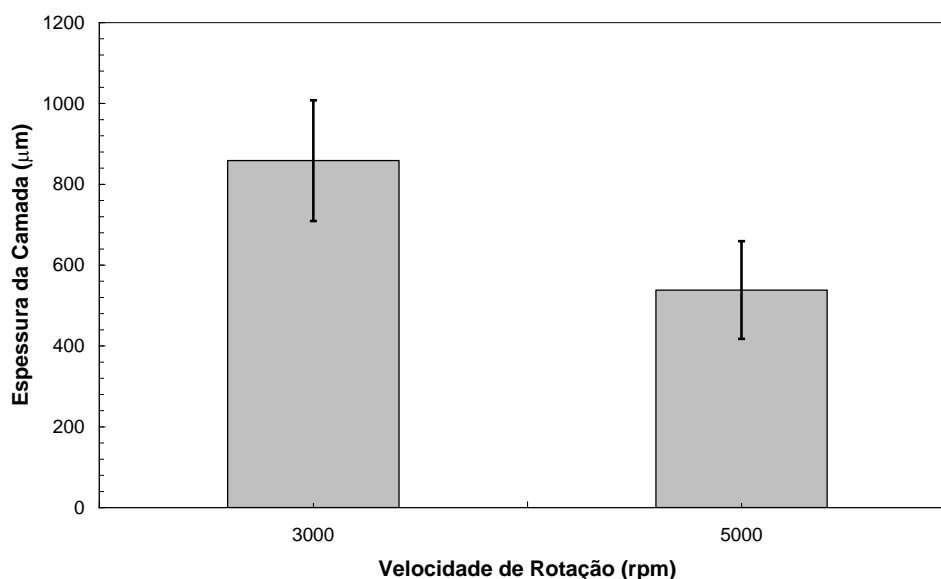
**Figura 4.12** - Variação da espessura a partir do início do processo de deposição por atrito. O comprimento de queima foi de 50 mm.



Para avaliar o efeito da velocidade de avanço do substrato, de rotação e da força aplicada ao pino no processo, foram realizadas medidas de espessura do recobrimento em microscópio óptico. Os valores apresentados nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15, correspondem a valores médios obtidos em regiões mais centrais do recobrimento, entre 20 e 30 mm a partir do ponto onde pino inicia o contato com a chapa de aço do substrato. Os valores mais elevados encontram-se na região de saída do pino, onde o contato é finalizado.

O efeito da velocidade de rotação é apresentado na figura 4.13. Este resultado está de acordo com a literatura<sup>[2, 3, 4, 7, 8]</sup>, onde tal literatura diz que quanto maior a velocidade de rotação do pino menor será a espessura da camada depositada.

Apesar do aumento na freqüência de material transferido ocorrer com a diminuição da velocidade de rotação, ainda assim não afetou significativamente o aumento da espessura da camada de revestimento<sup>[3]</sup>.

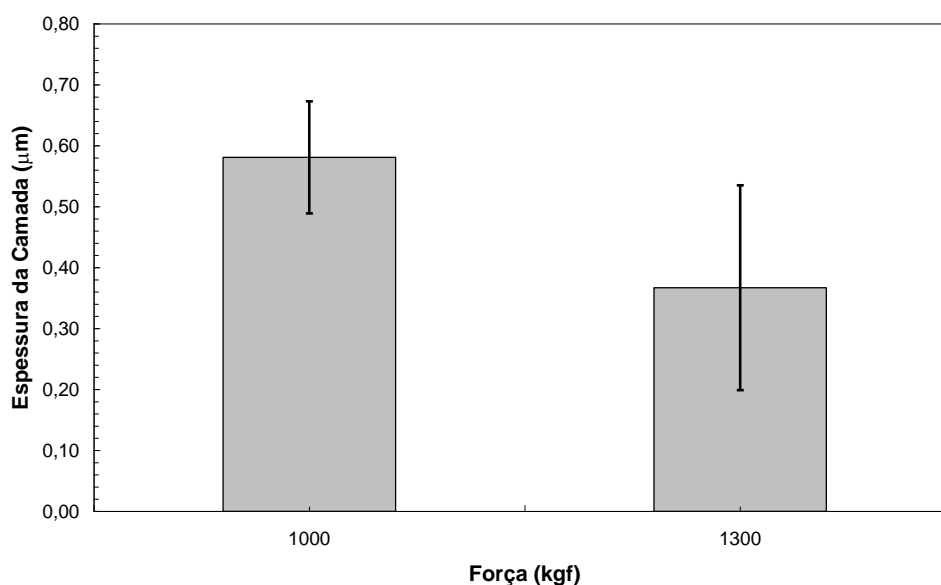


**Figura 4.13** – Efeito da velocidade de rotação na espessura média dos recobrimentos depositados por atrito.

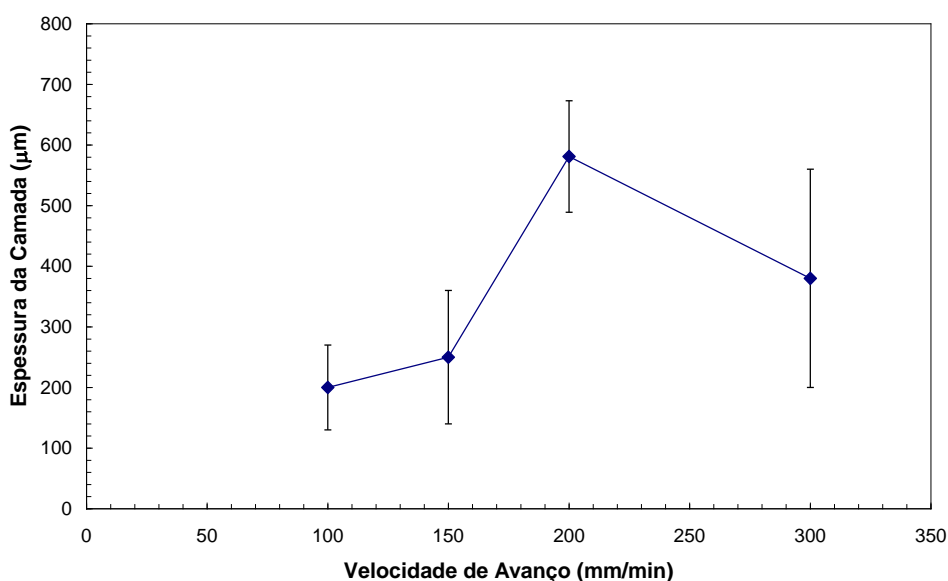
A Figura 4.14 mostra que um aumento da força sobre o pino provoca uma redução da espessura do revestimento, o que também está de acordo com a literatura<sup>[2, 3, 4,10]</sup>, onde quanto maior for a força aplicada sobre o pino, proporcionalmente menor será a espessura do recobrimento.

Para mesma força e velocidade de rotação, a espessura deveria diminuir com o aumento da velocidade de avanço<sup>[2, 3, 4, 8, 10]</sup>, isto não é observado na figura 4.15.

Provavelmente as velocidades mais baixas não foram suficientes para que houvesse uma transferência uniforme de massa do pino para a superfície do metal base, devido à descontínua distribuição da plasticidade do metal. Para velocidades de avanço do substrato muito baixas ou muito altas, um revestimento regular não é obtido por uma impossibilidade de uma contínua distribuição da plasticidade do metal<sup>[4, 25]</sup>.



**Figura 4.14** - Efeito da força na espessura média dos recobrimentos depositados por atrito.



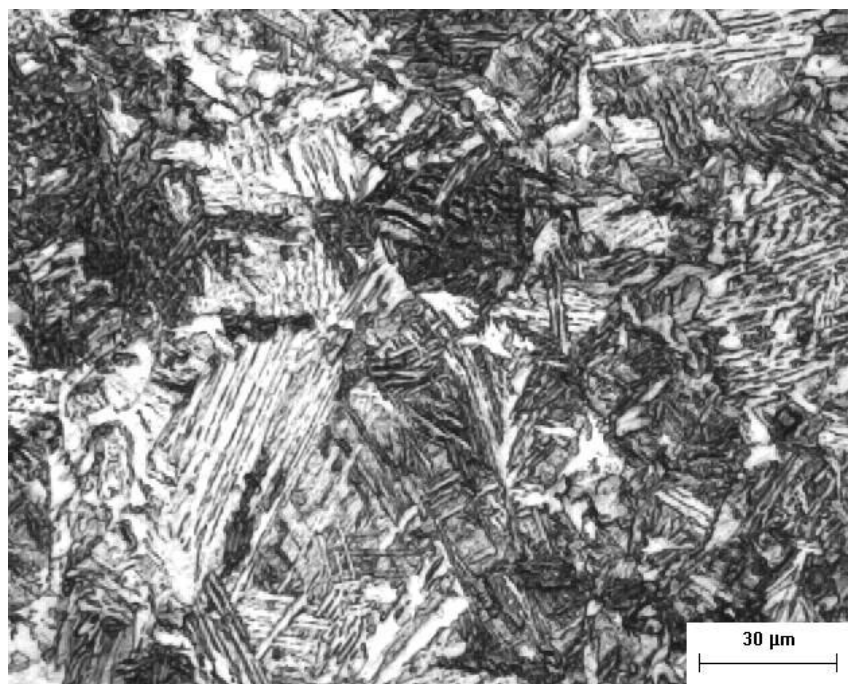
**Figura 4.15** - Efeito da velocidade de avanço na espessura média dos recobrimentos depositados por atrito.

A posterior queda da espessura para um aumento da velocidade entre 200 e 300 mm/min (mesmo considerando o grande desvio), está de acordo com os resultados obtidos por outros autores<sup>[2, 3, 4, 10]</sup>. Devido a limitações do equipamento não foi possível investigar velocidades de avanço maiores.

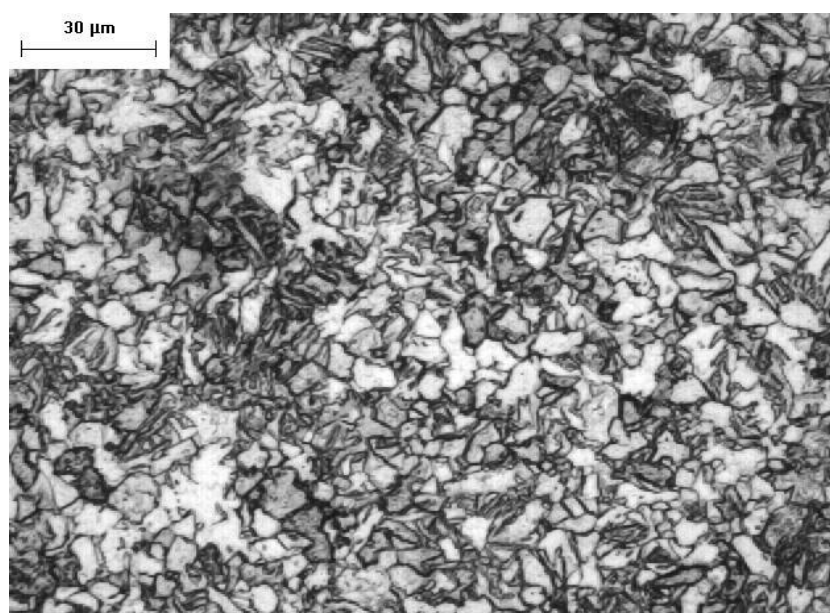
#### 4.4.3 EFEITO DO PROCESSO NO SUBSTRATO

Como os resultados de microdureza mostraram, os efeitos térmicos do processo de deposição por atrito geram uma zona afetada pelo calor. Os aspectos da zona termicamente afetada (ZTA) são apresentados nas figuras 4.16 e 4.17.

A estrutura contendo ferrita de Widmanstätten, ou ferrita acicular, apresentou valores de dureza de cerca de 500HV. Este comportamento se deve ao fato que a ferrita acicular resulta de uma transformação ocorrida em temperaturas mais baixas, onde o processo não é puramente difusional, mas proporciona um aumento na densidade de discordâncias existente na matriz – principal responsável pela maior dureza encontrada para a ferrita acicular.

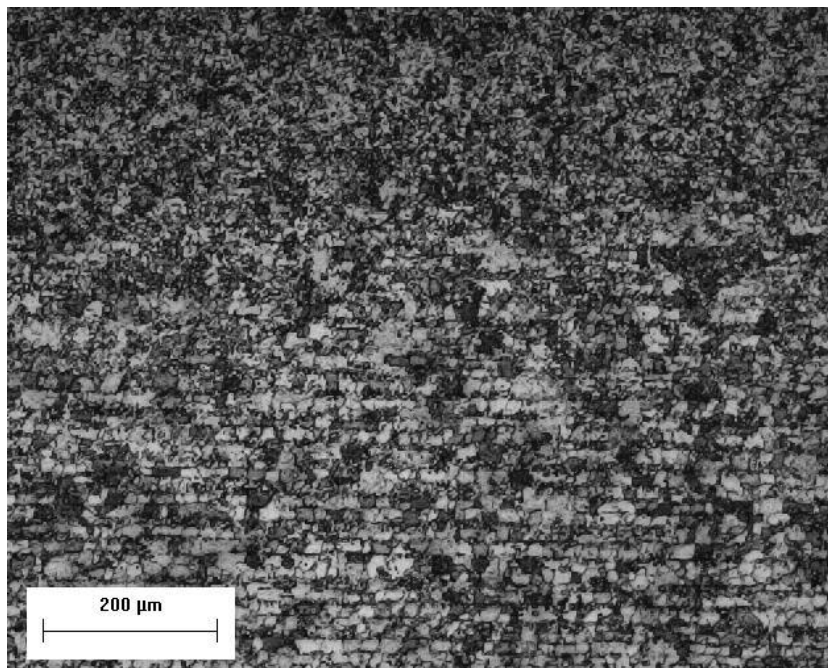


**Figura 4.16** - Amostra revestimento R2. Metal base ZTA.



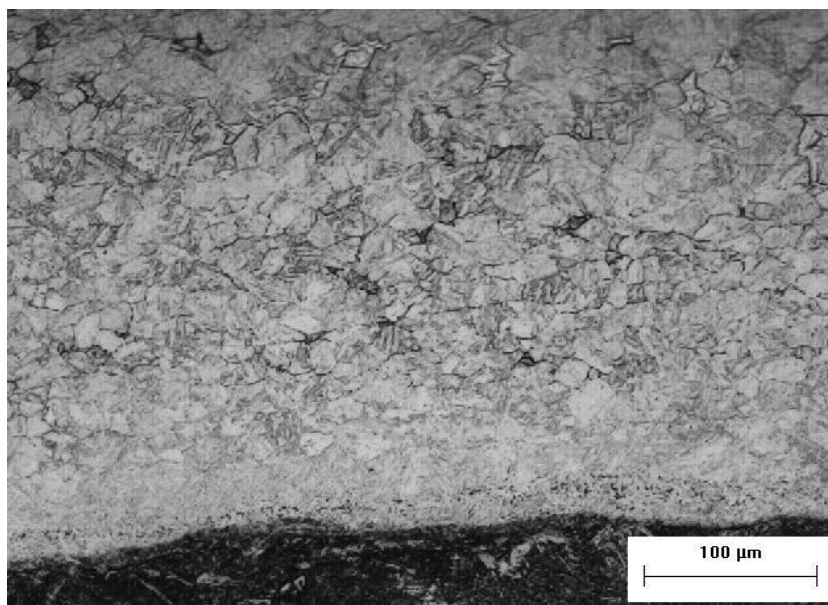
**Figura 4.17** - Amostra R2. Metal base ZTA mais afastada da interface.

A figura 4.18 mostra a região de transição ferrita-perlita para uma granulação mais fina.

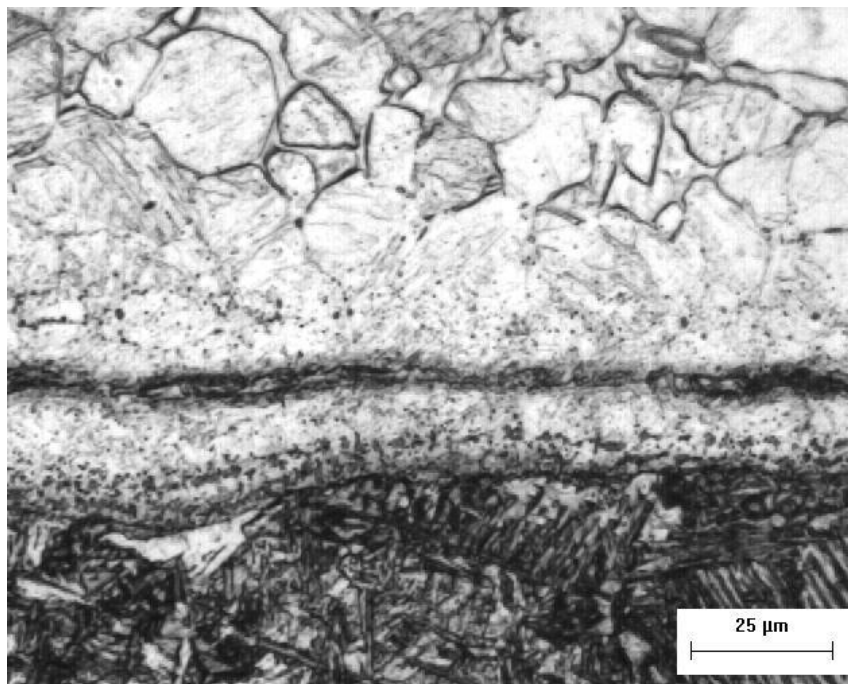


**Figura 4.18** - Microestrutura: ferrita-perlita, transição para granulação mais fina.

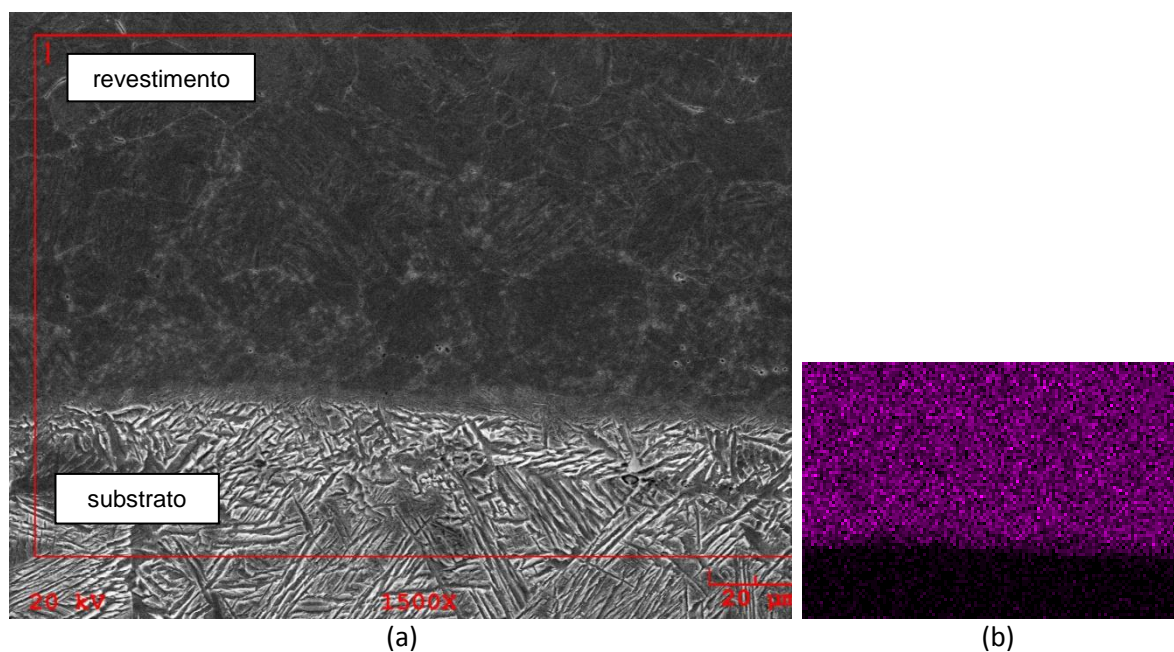
As figuras 4.19, 4.20 e 4.21 mostram as microestruturas entre o revestimento e o metal base, a região de interface do R2, figura que ilustra a baixa difusão do revestimento no substrato, respectivamente.



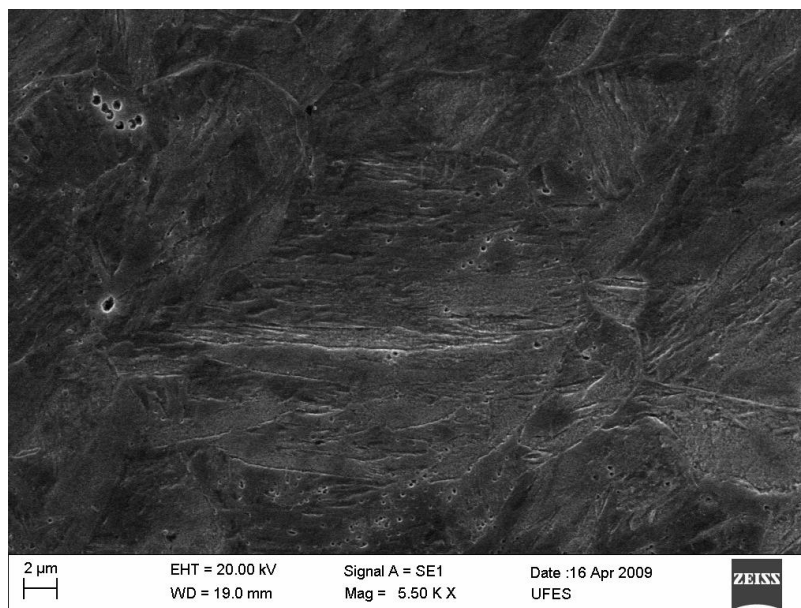
**Figura 4.19** – Micrografia mostrando maior refinamento da martensita na região próxima a interface do revestimento R2 e metal base - 27 mm do início do Recobrimento,  $V_{\text{avanço}} = 100 \text{ mm/s}$ .



**Figura 4.20** – Amostra do revestimento R2 a 33 mm do início.



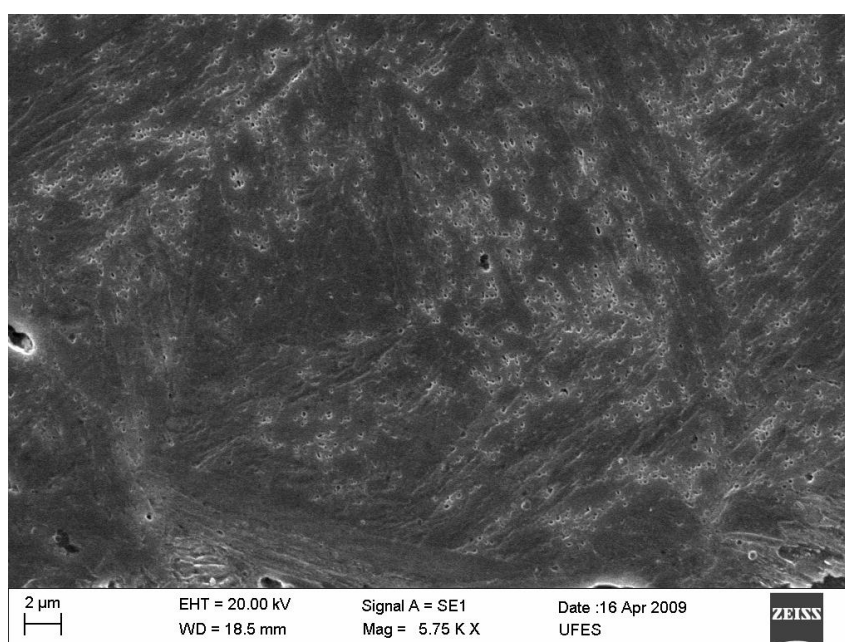
**Figura 4.21** - (a) Figura mostrando a baixa difusão do revestimento no substrato e as agulhas de martensita e/ou bainita. (b). Mapa de composição MEV, evidenciando a existência de camada de revestimento através do Cr.



**Figura 4.22** – Microestrutura martensítica e/ou bainítica do revestimento depositado por atrito.

Nota-se ainda na figura 4.22, o detalhe da estrutura martensítica do revestimento depositado por atrito. Também podem ser observados alguns pites, muito provavelmente originados pela remoção de carboneto pelo ataque metalográfico.

A figura 4.23 apresenta o aspecto microestrutural de uma outra região que aparentemente mostra ter havido maior precipitação de carbonetos, durante o processo de deposição por atrito.

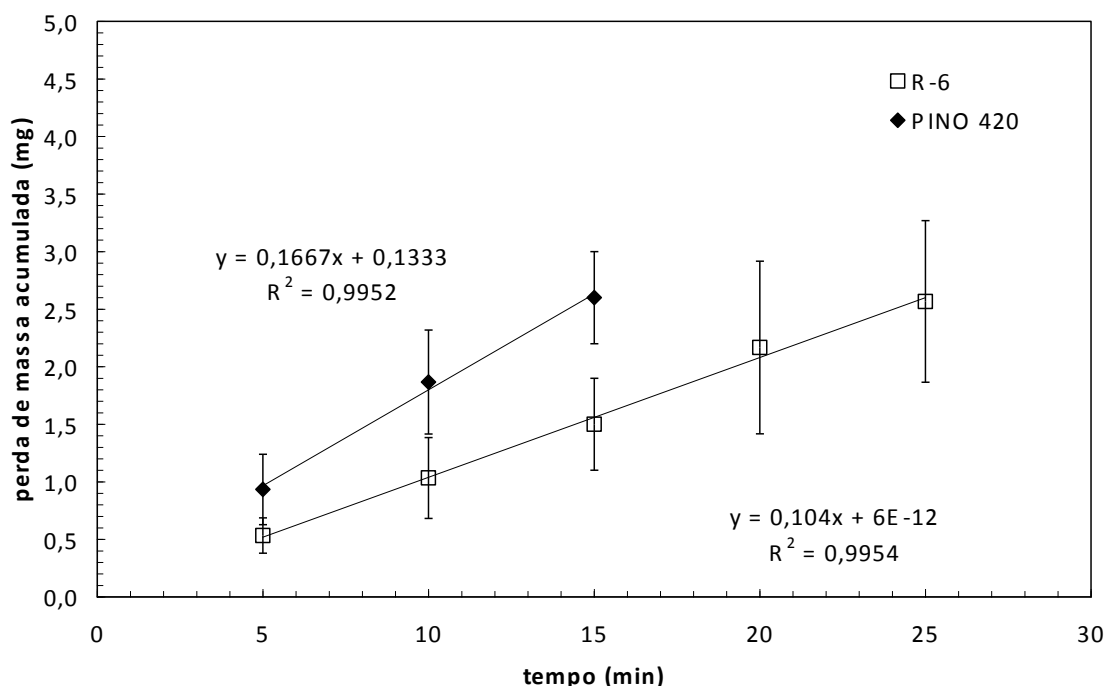


**Figura 4.23** – Fotografia mostrando a presença de precipitados de carbonetos.

#### 4.5 ENSAIO PURAMENTE EROSIVO

Os resultados encontrados nos ensaios de erosão pura são apresentados e discutidos neste tópico.

A figura 4.24 apresenta a evolução da perda de massa acumulada média (miligramas) com o tempo de teste (minutos) de amostras de PINO 420 e da amostra R6. Estes resultados foram obtidos para uma condição de teste menos severa, isto é, velocidade e impacto das partículas erosivas de 6,8 m/s e concentração de 5,9%. Observa-se um comportamento perfeitamente linear com índices de correlação  $R^2$  superiores a 0,99.

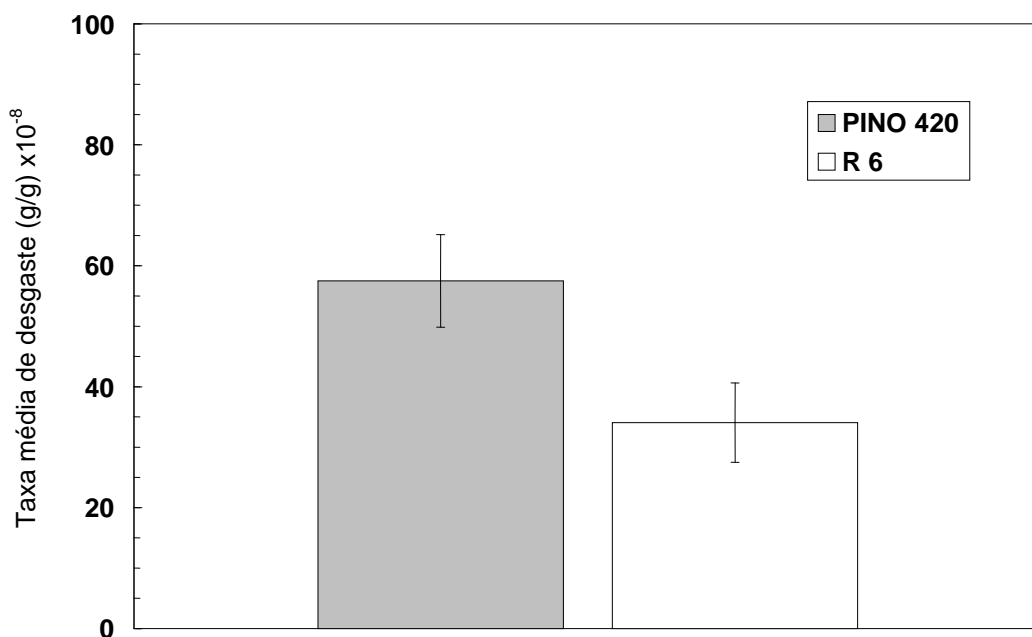


**Figura 4.24** – Evolução da perda de massa acumulada das amostras PINO 420 e revestimento 6 (R6) teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

A Figura 4.25 apresenta a taxa de desgaste (g/g) com o tempo, determinada pela divisão da perda de massa da amostra pela quantidade de partículas que a erodiram em um mesmo intervalo de tempo. Novamente, observa-se que a taxa de desgaste instantânea é menor para as das amostras revestidas. Esta diferença está ligada com a dureza muito maior do revestimento (em média 800 HV<sub>0,05</sub>).



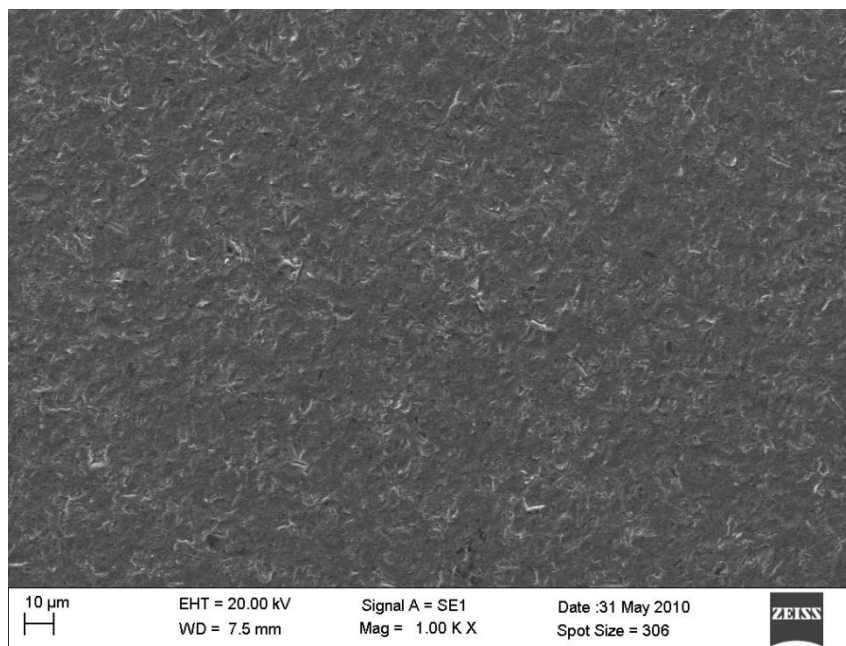
A taxa média de desgaste apresenta certa dispersão como mostrado na figura 4.25. No entanto, estatisticamente, existe uma diferença significativa na taxa média de desgaste entre a microestrutura de martensita revenida característica do material do pino e microestrutura martensítica após deposição, obtida pelo processo de depósito por atrito. A taxa média de desgaste foi calculada pela inclinação das retas de perda de massa acumulada com o tempo.



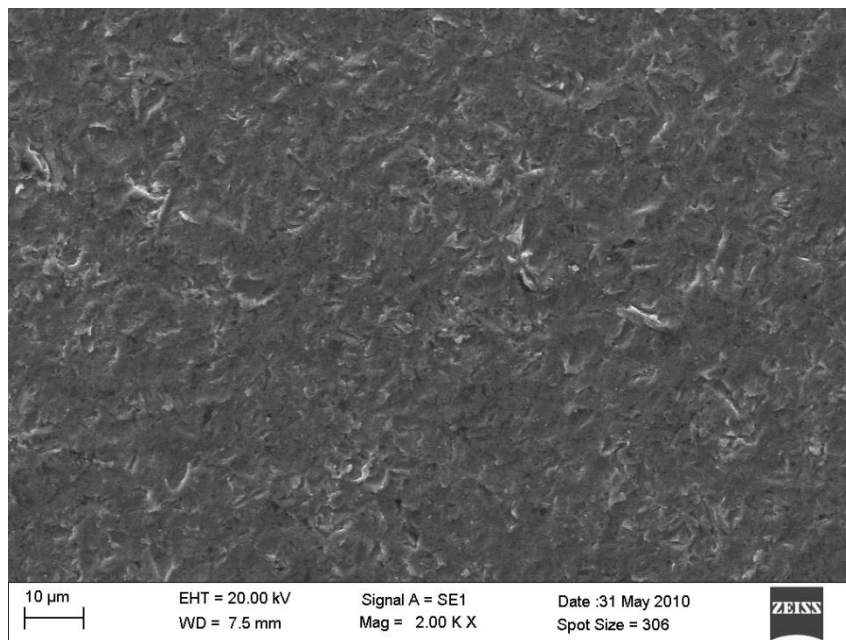
**Figura 4.25** - Taxa média de desgaste do PINO 420 e revestimento 6 (R6), teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

A comparação entre a resistência ao desgaste erosivo do revestimento e do material do substrato, mais especificamente a zona afetada pelo calor, mostra que o comportamento do revestimento é melhor, assim como mostrado na figura 4.26.

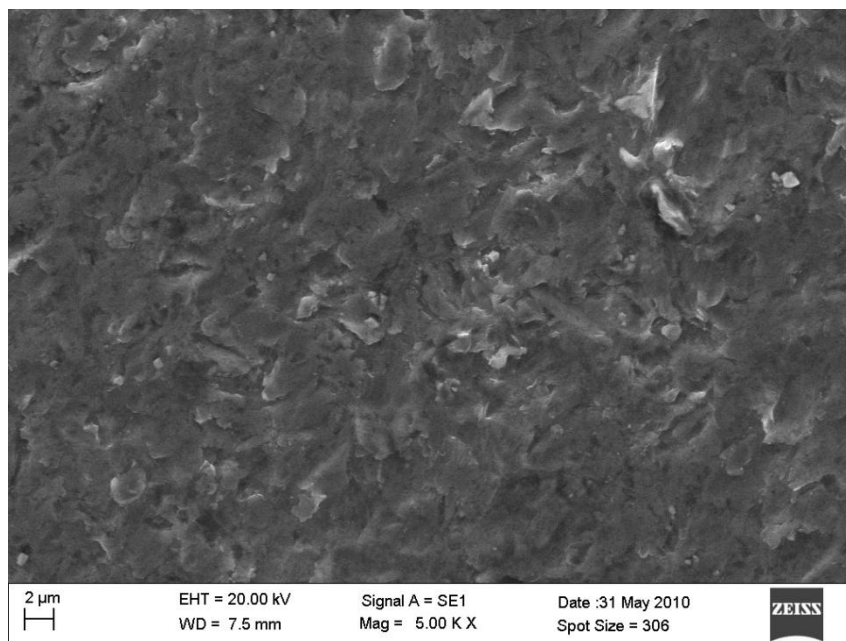
O mecanismo de desgaste observado na incidência normal (90°) é caracterizado por uma superfície altamente deformada e encruada, formada por crateras, decorrentes dos impactos sucessivos das partículas erosivas figura 4.26, 4.27, 4.28. Este mecanismo dúctil foi observado para todas as amostras analisadas, pino 420, material base e também amostra R6.



**Figura 4.26** - Aspecto topográfico típico após teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

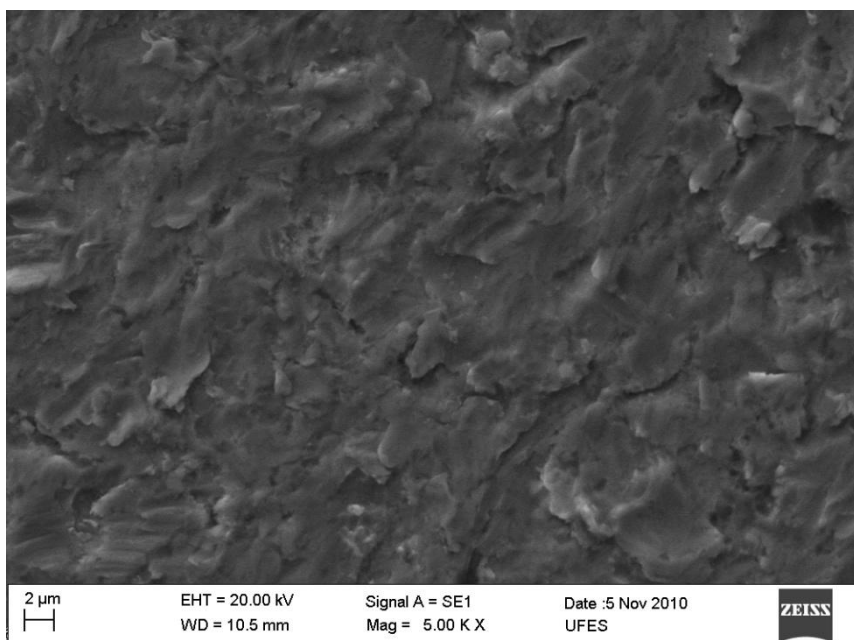


**Figura 4.27** - Aspecto topográfico típico após teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.



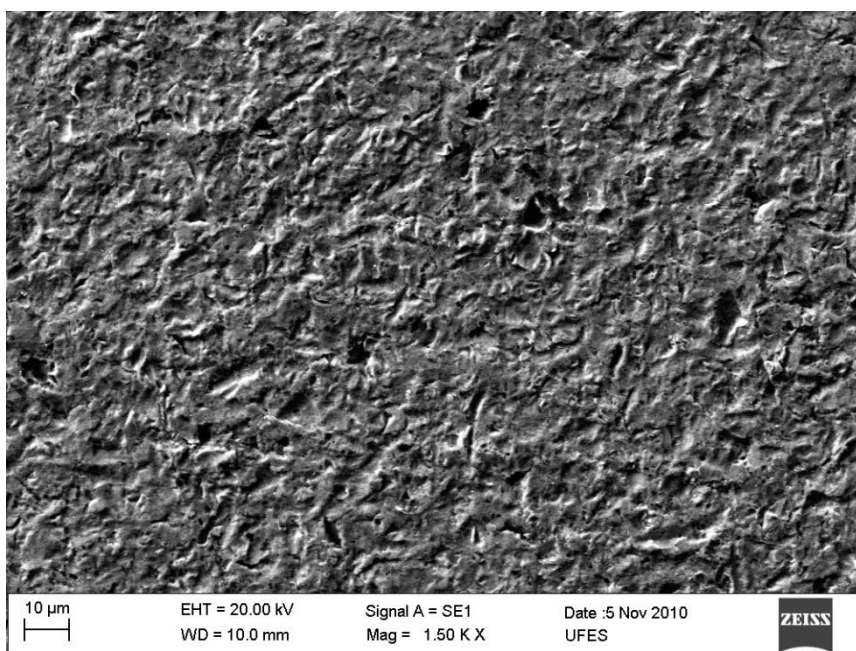
**Figura 4.28** - Aspecto topográfico típico após teste de erosão com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

A figura 4.29 apresenta o aspecto topográfico após erosão em uma amostra R7.

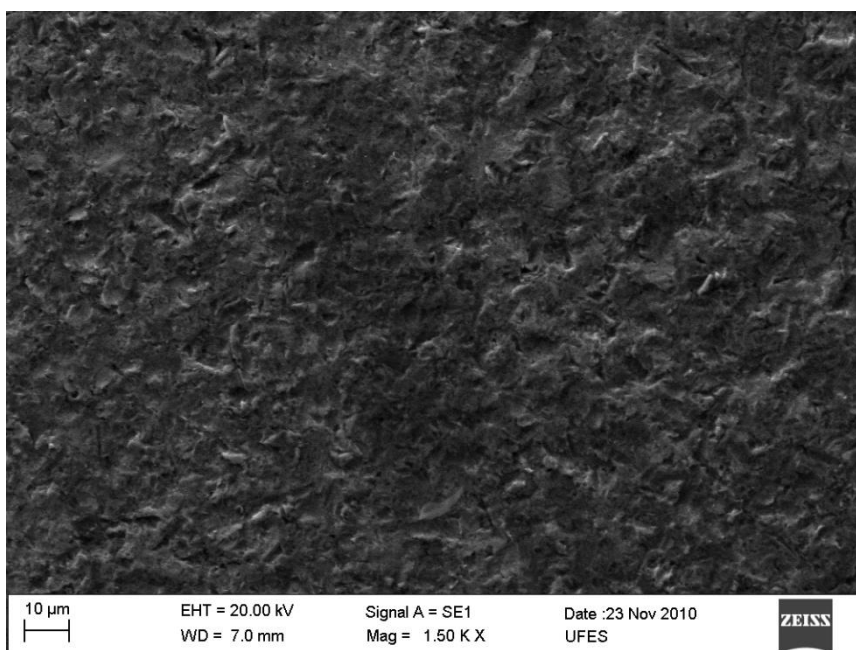


**Figura 4.29** - Aspecto topográfico após erosão em amostra R7 com velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência normal.

As figuras, 4.30 e 4.31 apresentam o aspecto topográfico das amostras de metal base e PINO 420, respectivamente.

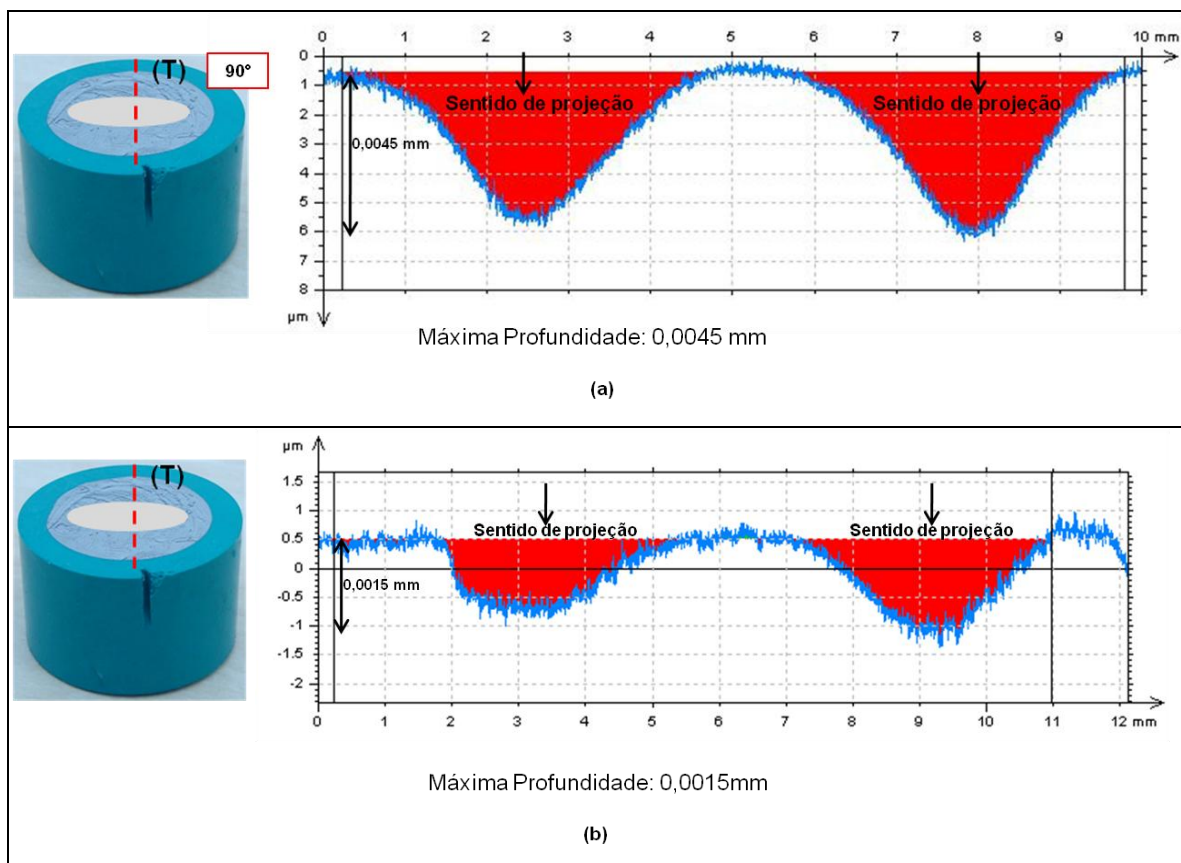


**Figura 4.30** – Aspecto topográfico típico após a erosão em amostra do metal base, erosão à 90°, velocidade média de impacto de 6,8 m/s e concentração média de areia 5,9% (peso).



**Figura 4.31** – Aspecto topográfico típico após a erosão em amostra do Pino 420, erosão à 90°, velocidade média de impacto de 6,8 m/s e concentração média de areia 5,9% (peso).

A figura 4.32 mostra os perfis obtidos por análise topográfica. O perfil observado das crateras de desgaste é típico do desgaste erosivo de partículas a 90°. O resultado corrobora os valores de perda de massa.



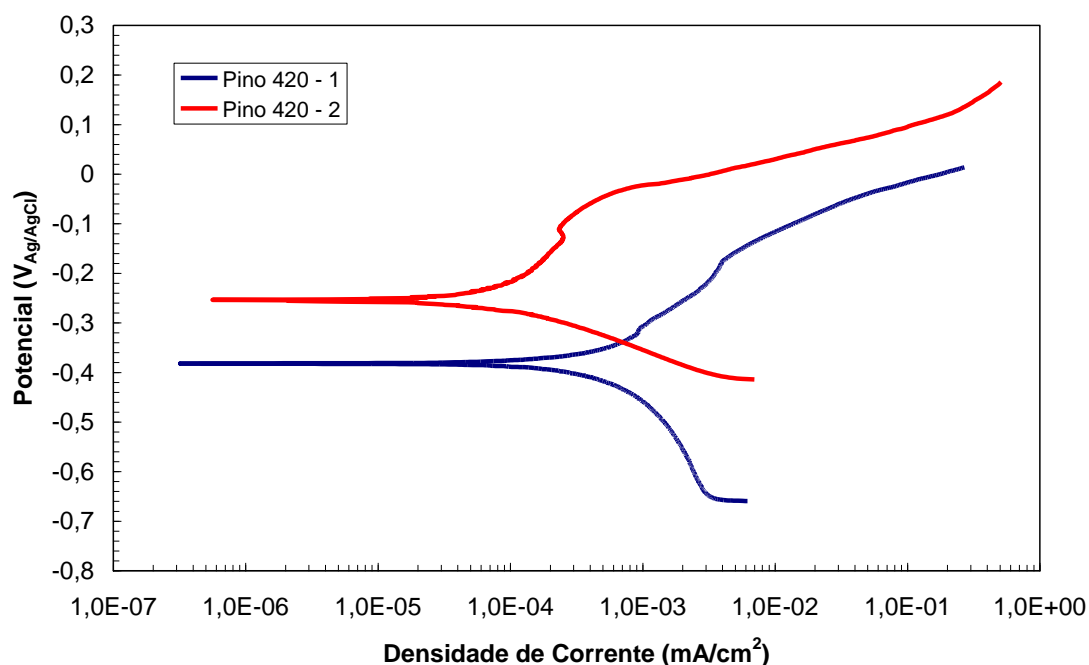
**Figura 4.32** – Perfis topográficos transversais da superfície após 25 minutos de ensaio, (a) Pino 420, (b) R6, erosão com incidência a 90°, concentração média de areia 5,9% (peso), velocidade média de impacto de 6,8 m/s.

#### 4.6 TESTES DE CORROSÃO EM ÁGUA DO MAR SINTÉTICA (CONDIÇÃO ESTÁTICA)

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação de propriedades eletroquímicas dos diversos tipos de amostras com revestimento em água do mar sintética. Também foram avaliados os resultados de corrosão para o Pino 420 e metal base.

As curvas de polarização potenciodinâmicas obtidas para as duas amostras de aço Inoxidável 420, denominadas de Pino 420, são apresentadas na figura 4.33. Os

testes foram realizados em duplicata para verificar a repetibilidade dos resultados. A amostra Pino 420-2 apresentou potenciais de corrosão mais nobres e menores densidade de corrente.



**Figura 4.33** – Comparação entre curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em água do mar sintética para as amostras Pino 420 e réplica (duplicata).

**Tabela 4.2** – Parâmetros eletroquímicos para o Pino 420, R6, R7 e metal base.

Amostra	Potencial de corrosão Ag/AgCl (V)	Potencial de pite Ag/AgCl (V)
<b>Pino 420 1</b>	<b>- 0,38 V</b>	<b>-</b>
<b>Pino 420 2</b>	<b>- 0,26 V</b>	<b>- 0,1 V</b>
<b>R6</b>	<b>- 0,20 V</b>	<b>0,20 V</b>
<b>R7</b>	<b>- 0,22 V</b>	<b>0,22 V</b>
<b>Metal base</b>	<b>- 0,64 V</b>	<b>-</b>

A tabela 4.2 resume o potencial de corrosão e o potencial de pites, obtidos nos experimentos de água do mar sintética sem movimentação do fluido, condição estática.

Nota-se que, o potencial eletroquímico para o R7 aumenta para valores acima do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), aumentando também, a densidade de corrente até essa alcançar um intervalo de potencial, onde apresenta uma pequena variação com o aumento do potencial denominando, assim, esta região de região passiva. A amostra R7 apresentou essa região passivada localizada em uma região de maior densidade de corrente comparada à amostra R6. As amostras apresentaram potencial de Pitting aproximadamente numa mesma faixa de potencial, sendo ligeiramente maior na amostra do revestimento R7.

Foi estabelecida comparação na figura 4.34 entre as curvas de polarização potenciodâmica das amostras com revestimentos R6, R7, Metal base e Pino 420. Pode ser observado que o metal base apresenta um potencial de corrosão bem abaixo dos valores encontrados para as amostras revestidas. Analisando a curva da figura 4.34, para o metal base, pode ser visto contínua dissolução anódica, nota-se que nessa situação nenhuma camada protetora é formada, o processo de corrosão começa a se propagar sem dificuldades, isto é, quando o potencial aumenta, a densidade de corrente envolvida também aumenta, indicando que nenhum tipo de passivação ocorreu.

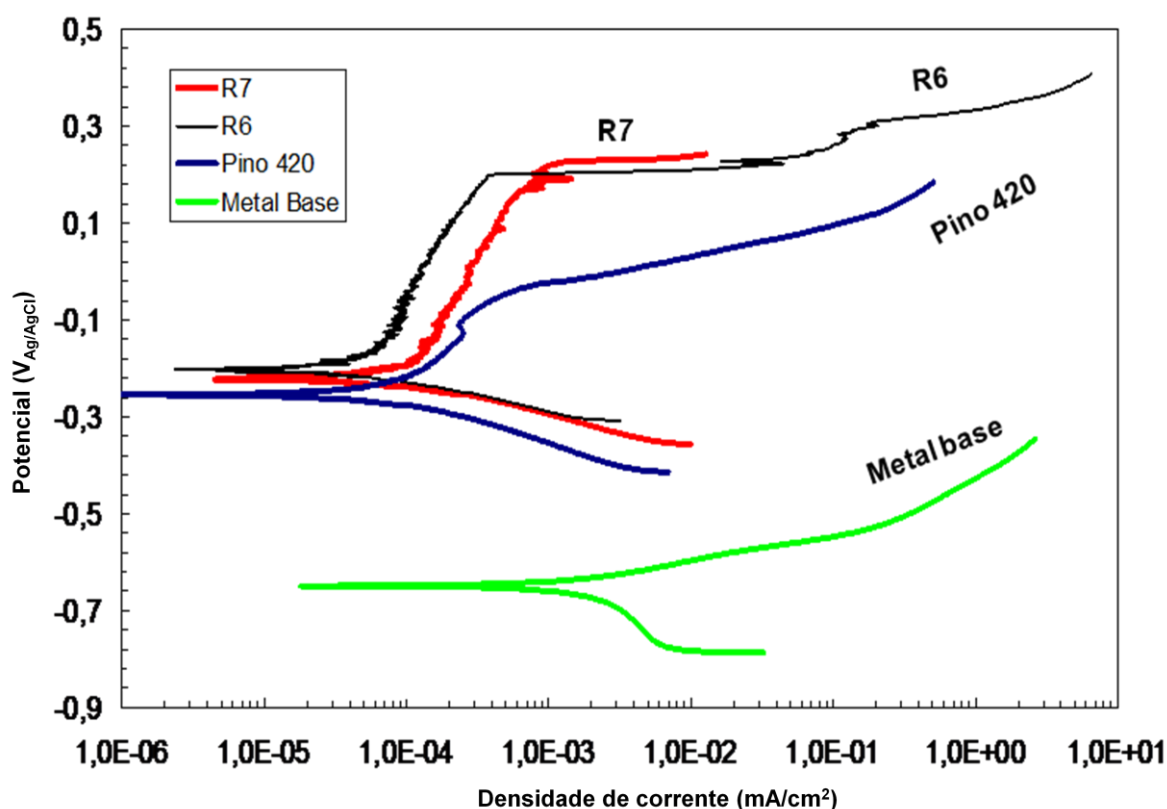


Figura 4.34 – Comparação entre as amostras dos revestimentos 6 e 7, metal base e amostra de Pino 420.

O potencial de corrosão para a amostra Pino 420 ficou em - 0,25 V, sendo assim, seu potencial ficou abaixo do potencial das amostras R7 e R6, essas com potenciais respectivamente de -0,22 V e -0,20 V. As amostras revestidas apresentaram menores densidades de corrente comparado ao Pino Inox 420. As amostras com revestimento apresentaram regiões de passivação num menor valor de densidade de corrente. A amostra Pino inox 420 apresentou menor região passiva, e logo em seguida dissolução anódica, com o aumento do potencial juntamente com a densidade de corrente.

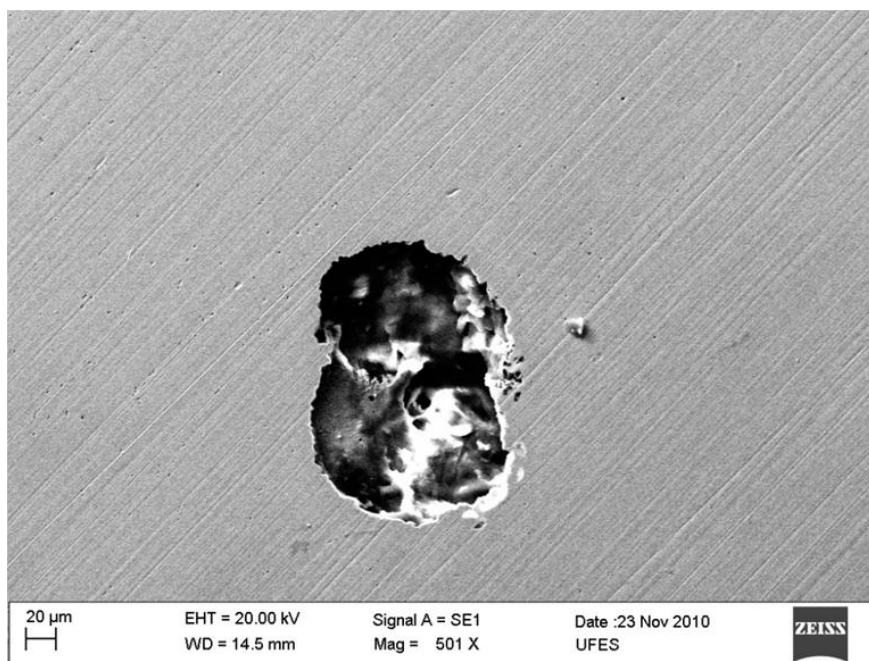
Como esperado, nas amostras de metal base, o potencial de corrosão (-0,65 v) é mais negativo que do aço inoxidável, tanto do pino quanto do revestimento, tabela 4.2. A densidade de corrente limite é da ordem de  $2 \cdot 10^{-5}$  A.cm<sup>2</sup>. Como a solução não foi desaerada, a transferência de massa (difusão) do oxigênio dissolvido é quem controla a reação catódica.

Os resultados aqui apresentados mostram que quando o revestimento está íntegro, o processo de deposição produziu uma boa resistência à corrosão, melhor que a medida para o aço inoxidável 420, temperado e revenido nas condições do fornecedor. Isto é devido à microestrutura mais refinada e sem carbonetos precipitados (ou poucos) gerada no processo de deposição por atrito em comparação com a martensita revenida e carbonetos do material da barra de aço inoxidável 420, como citado por<sup>[3]</sup>.

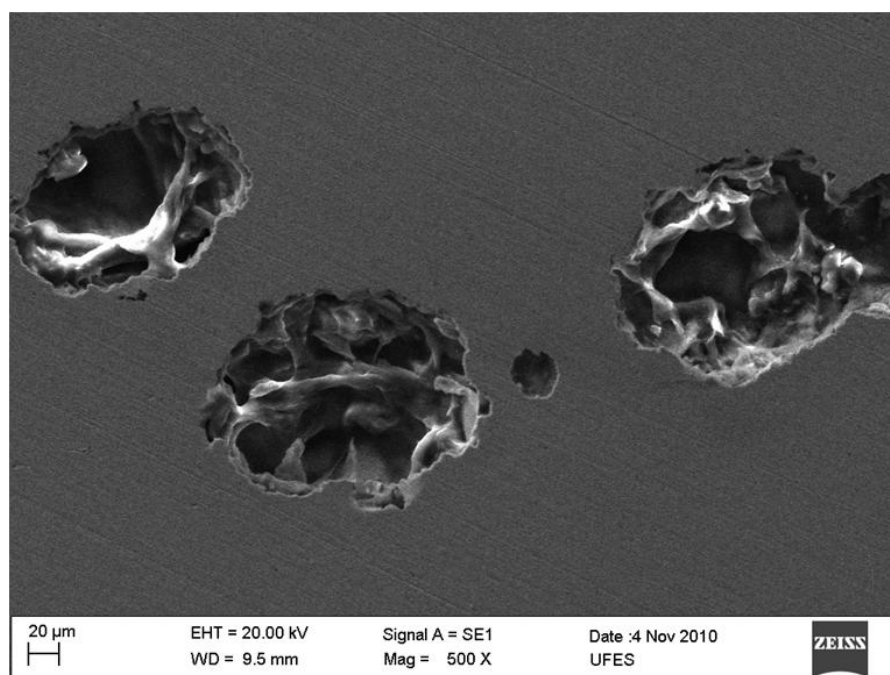
De acordo com LÓPEZ et al.<sup>[22]</sup>, ao realizar testes de polarização anódica com uma taxa de 15 mV/min, partindo-se de um potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) até um potencial E, as densidades de corrente começam a aumentar rapidamente sobre uma estreita faixa de potencial. Este comportamento normalmente indica que houve perda na proteção da superfície contra a corrosão, através da formação de Pites na superfície da amostra, este aumento na densidade de corrente favorece a quebra do filme passivo sobre toda a superfície.

A velocidade de varredura, de 1,0 mV/s, realizada no presente trabalho foi bem abaixo da citada no trabalho de LÓPEZ et al.<sup>[22]</sup>, contudo, ainda assim ocorreu formação de Pites na superfície da amostra, esse tipo de corrosão localizada em pequenas áreas, pode ser verificado nas amostras R6 e R7, quando submetidas aos ensaios de corrosão estática, mostrados na figura 4.35 (a) e (b).





(a)



(b)

**Figura 4.35** - Pites na superfície dos revestimentos R6 e R7 testados sob condição de corrosão estática.

#### 4.7 - TESTES DO JATO SEM AREIA

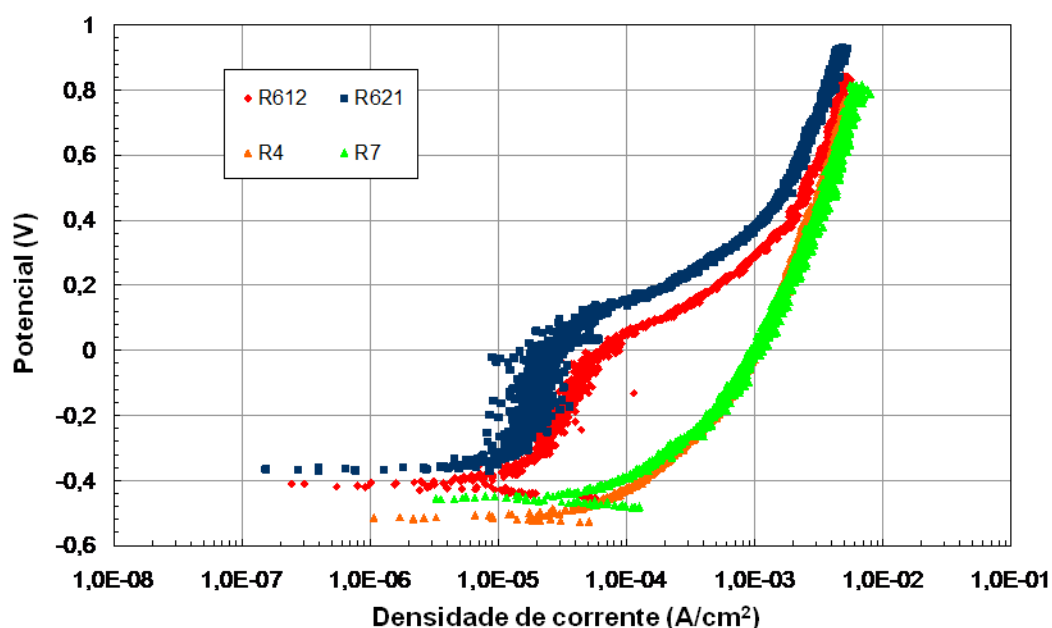
Os testes de jato impingimento foram realizados com metodologia semelhante ao de erosão pura, porém sem utilizar areia. Neste caso, o fluido utilizado foi a água do

mar sintética, segundo a norma ASTM D1141-98<sup>[23]</sup>. Durante os testes, o pH foi controlado e mantido entre 8,20 e 8,25.

O erosímetro foi instrumentado com um potenciostato para a monitoração do potencial e corrente de corrosão. Em todos os testes, o potencial de corrosão das amostras foi monitorado e ao final dos testes, foram levantadas curvas de polarização com uma velocidade de varredura com 1,0 mV/s.

#### 4.7.1 - ENSAIOS JATO DE IMPINGIMENTO

A figura 4.36 demonstra as curvas de polarização potenciodinâmica obtidas nas amostras de revestimento R6, R4 e R7.

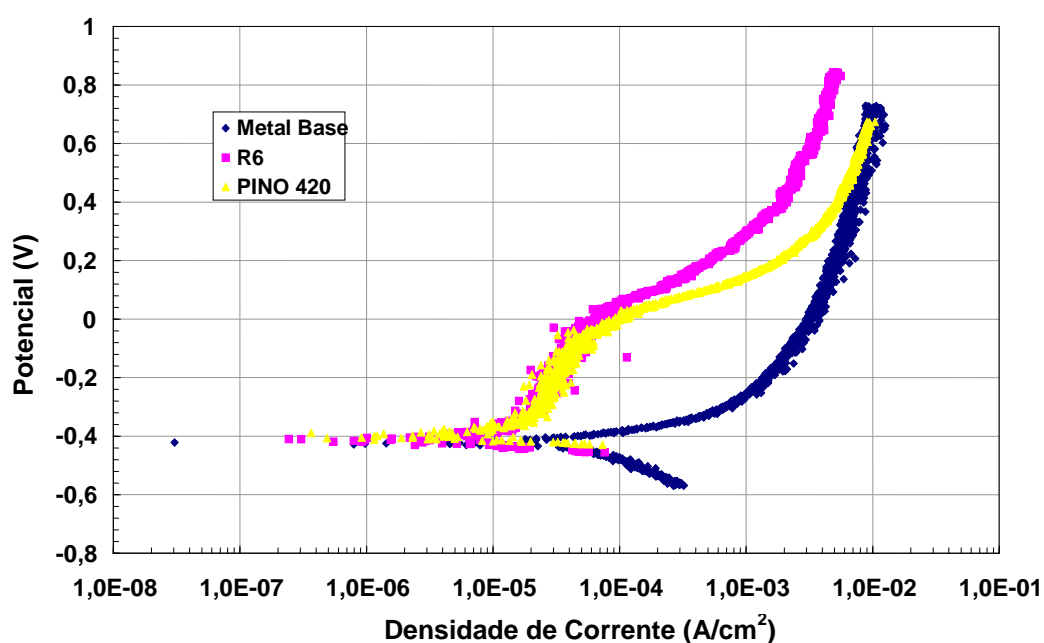


**Figura 4.36** – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras a velocidades de R4, R7, R612 e R621 sob condição de jato corrosivo, velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

A curva acima comprova o fato de que o R6 foi o que apresentou melhor integridade no revestimento. O R6 apresentou potencial de corrosão -0,36 V e o R7, potencial de corrosão -0,4 V, ou seja, apresentaram potenciais de corrosão com valores muito próximos. Sendo assim, quando as curvas de polarização são comparadas às

amostras R4 e R7, verifica-se que as amostras R6 apresentam um potencial menos eletronegativo, ou seja, uma maior resistência à corrosão.

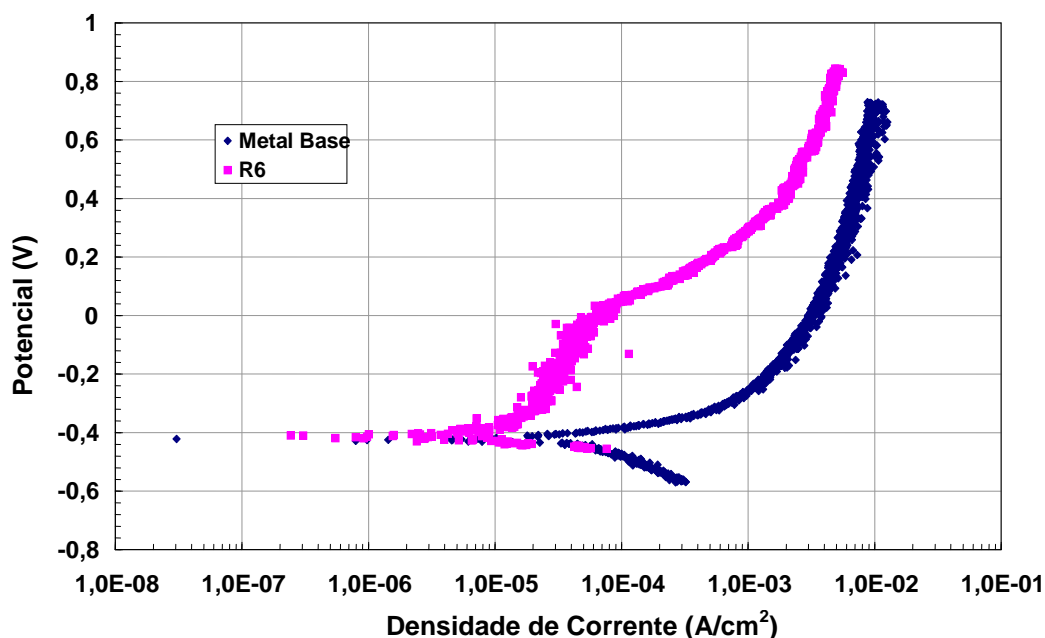
A figura 4.37 estabelece comparações do R6 com as amostras de metal base e PINO 420. A amostra R6 ainda que sob influência do escoamento do fluido, continuou apresentando melhor desempenho frente às condições de corrosão, seu potencial de corrosão está aproximadamente numa mesma faixa de potencial, cerca -0,4 V, que o PINO 420 e Metal base, porém o R6 apresentou menor densidade de corrente.



**Figura 4.37** - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras a velocidades de metal base, R6 e PINO 420 sob condição de jato corrosivo a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

Quando é comparado o revestimento R6 com a amostra metal base, assim como na figura 4.38, nota-se que o potencial eletroquímico aumenta para valores acima do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), aumentando também, a densidade de corrente até essa alcançar um intervalo de potencial onde apresenta uma pequena variação com o aumento do potencial denominando, assim, esta região passiva. O R6 apresentou menor variação da densidade de corrente em certo intervalo de potencial, contudo o

metal base apresentou em sua curva de polarização, contínua dissolução anódica do aço carbono.



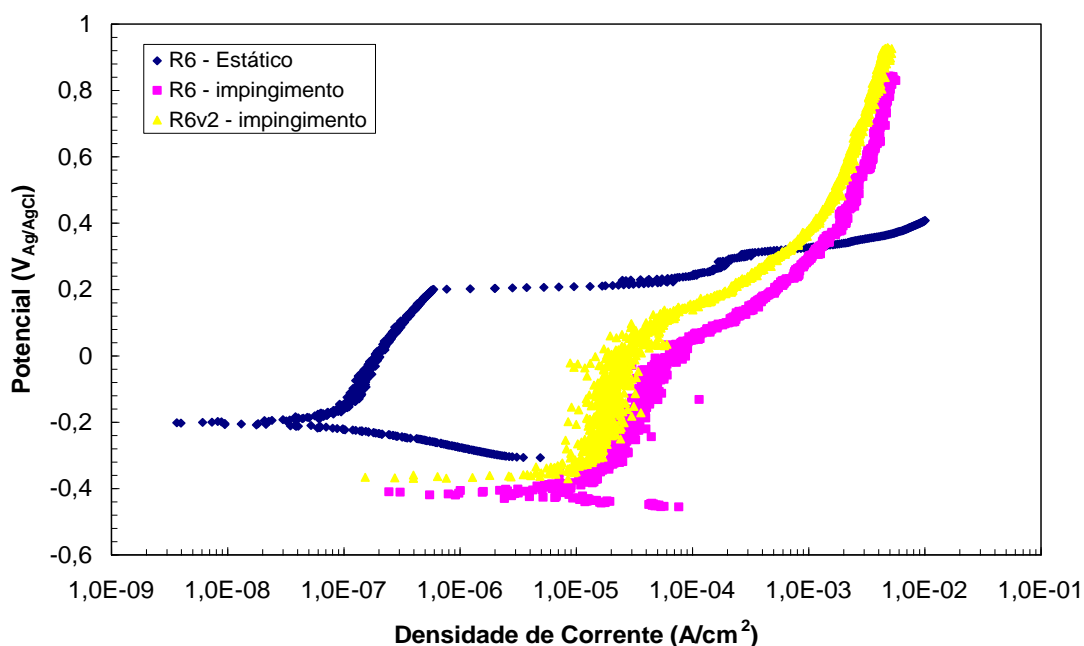
**Figura 4.38** - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras a velocidades de Metal base e R6 sob condição de jato corrosivo a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

#### 4.7.2 COMPARAÇÃO CORROSÃO ESTÁTICA E JATO IMPINGIMENTO

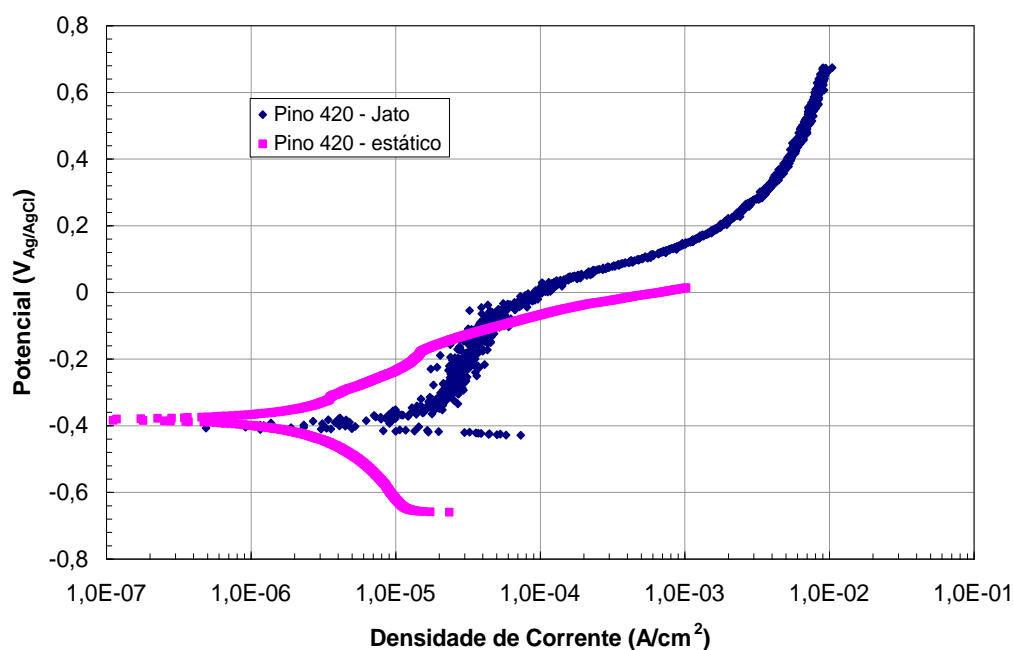
A figura 4.39 descreve o comportamento das amostras R6 quando submetidas a dois tipos diferentes de ensaios, a amostra R6 quando submetida a condição estática apresentou potencial de corrosão mais nobre, cerca - 0,2 V, porém logo em seguida observa-se um processo de corrosão por dissolução anódica. As amostras R6 e R6v2 sob condição de jato de impingimento apresentaram potenciais de corrosão semelhantes, cerca de -0,4 V, porém menos nobres que o R6 – Estático.

A influência do jato de impingimento pode ter sido uma das causas para diferentes comportamentos, a remoção do filme passivo permite a entrada de oxigênio e promove a repassivação da camada<sup>[22]</sup>.

As curvas de polarização potenciodinâmica das amostras Pino 420-Jato e Pino 420-estático são apresentadas na figura 4.40.



**Figura 4.39** - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do R6 – Estático, R6 – Impingimento e R6v2 sob condições de jato corrosivo e estático a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.



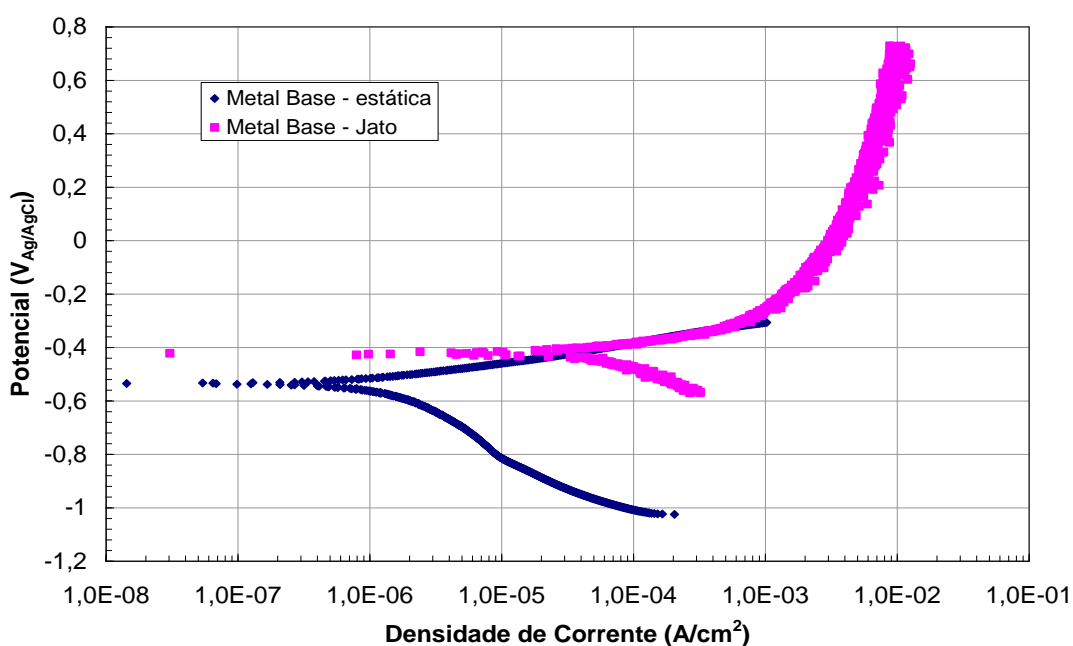
**Figura 4.40** - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras Pino 420 – jato e Pino 420 – estático sob condições de jato corrosivo e estático a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

As amostras Pino 420 apresentaram potenciais de corrosão semelhantes 0,4 V, quando submetida à condição de jato de Impingimento no Pino 420 Jato, a

densidade de corrente apresenta uma pequena variação com o aumento do potencial, observa-se então um melhor desempenho quanto à corrosão. A amostra Pino 420 – estático, apresentou contínua dissolução anódica, indicando que nenhum tipo de passivação ocorreu.

A variação de ensaio da condição estática, estático Pino 420 – estático, para condições de impingimento de fluido aliada à corrosão, Pino 420 – Jato, indica que a amostra quando testada sob influência de escoamento no jato, facilitou a passivação.

De acordo com LÓPEZ et al.<sup>[22]</sup>, artigos informam que o aumento da velocidade, implica no aumento da resistência à corrosão de materiais passivados, devido a uma melhor transferência de oxigênio através do eletrólito e, como consequência, possível aeração.



**Figura 4.41** - Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras metal base – estática e metal base – jato e sob condições estático e jato corrosivo e a velocidade média de impacto de 6,8 m/s, concentração média de areia 5,9% (peso) e ângulo de incidência de 90°.

Os resultados dos testes de corrosão em água do mar sintética para as amostras Metal base – estática e Metal base – Jato são mostrados na figura 4.41. A amostra de Metal base quando submetida à condição estática apresenta contínua dissolução anódica, quando em condição de jato, apresentou maior potencial de corrosão.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se o entendimento e a ampliação dos conhecimentos a fim de se verificar se a técnica de revestimento por atrito *friction surfacing*, em amostras de metal base astm a36 revestidos com aço inoxidável 420, é eficaz.

Tendo em vista os materiais, métodos de análise e condições experimentais foi possível concluir que:

- Com relação à microestrutura da Zona afetada pelo calor (ZAC), houve um refino de grãos na região de transição entre o metal base não afetado e o início da ZAC. Tal refinamento prosseguiu até as proximidades da interface do revestimento, onde o maior aporte térmico resultou na formação da ferrita de Widmanstätten. No material depositado obteve-se uma microestrutura martensítica mais refinada e sem carbonetos precipitados (ou poucos), em comparação com a martensita revenida da barra de aço inoxidável 420 utilizada para o revestimento. Além de apresentar maior refinamento da martensita na região próxima a interface entre revestimento e metal base;
- O revestimento apresentou boa adesão dos materiais na interface em alguns locais. Contudo, em algumas regiões foi constatado o aparecimento do *undercut* quando visto em seção transversal. Esta pequena região, localizada nas bordas do cordão de revestimento não ligado, faz parte dos processos de revestimentos por atrito, e é visto mesmo em seções transversais que mostrem união bem formada entre o revestimento e o substrato. Ainda como característica, tem-se a ocorrência de pouca difusão do material do revestimento para o substrato;
- A taxa de desgaste erosivo instantânea é menor para as amostras revestidas R6 quando comparadas ao Pino 420, esta diferença está relacionada com a dureza mais elevada do revestimento, comparada a do próprio Pino 420. Existe uma diferença significativa na taxa média de desgaste entre a microestrutura de martensita revenida, característica do material do pino, e da microestrutura da martensita, após o processo de deposição por atrito;
- A espessura da camada de revestimento diminuiu tanto para um aumento da velocidade de rotação, quanto para força aplicada ao pino. Contudo, não foi possível

uma boa avaliação do efeito da velocidade de avanço do metal base na espessura da camada, devido à incapacidade do equipamento em produzir revestimentos com maiores velocidades de avanço, pois segundo a literatura consultada para baixas velocidades, um revestimento regular não é obtido por uma impossibilidade de uma contínua distribuição da plasticidade do metal;

- As variáveis, velocidade de avanço e velocidade de rotação, devem ser escolhidas cuidadosamente, pois o aumento de uma delas desfavorece as características do outro, como por exemplo, o aumento da velocidade rotacional e aumento da velocidade de avanço, que resultam em alta resistência na união metalúrgica entre o material do substrato e o revestimento. Contudo altas velocidades de rotação conduzem a uma redução na largura do revestimento. Portanto, a escolha destas variáveis deve ser feita de modo a se conhecer a exigência de aplicação do material;
- De acordo com a análise do percentual de carbono do aço inoxidável 420, a dureza do aço temperado deveria ser de no máximo 515 HV, porém apresentou valores bem maiores da ordem de 850HV, deste modo verifica-se que outro mecanismo também está atuando. Possivelmente, a deformação da austenita durante o atrito tenha levado ao aumento do número de sítios para a nucleação da martensita e tenha resultado no refino do tamanho das plaquetas. Deste modo, além do efeito do carbono em solução sólida, o refino da martensita e o encruamento explicam os valores de dureza elevados que foram medidos.
- Em comparação, todas as camadas de revestimentos apresentaram uma dureza consideravelmente superior à das barras adquiridas do fornecedor. Tal fato foi devido a uma microestrutura martensítica mais refinada e a perda do tratamento térmico de revenimento da camada de revestimento durante o processo, já que a barra antes do processo apresentava martensita revenida em sua microestrutura. Em todos os casos, a alta dureza da ZAC comparada à do metal base é devido às alterações da microestrutura, que incluem a formação de martensita e bainita.
- Em relação à corrosão, a amostra do Pino 420 apresentou potencial abaixo do potencial das amostras de revestimento. As amostras revestidas apresentaram menores densidades de corrente comparado ao Pino Inox 420, e ainda regiões de passivação num menor intervalo de densidade de corrente. Os resultados obtidos mostraram que quando o revestimento está íntegro o processo de deposição



produziu uma boa resistência à corrosão, melhor que o aço inoxidável 420, temperado e revenido nas condições do fornecedor. Isto se deve à microestrutura mais refinada e sem carbonetos precipitados (ou poucos) gerada no processo de deposição por atrito.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Refazer os revestimentos para maiores velocidades de avanço do metal base;
- Avaliação do revestimento no processo de múltiplos passos.
- Estudar a influência da variação dos parâmetros em outras características da camada revestida, como por exemplo, a força de união metalúrgica entre os materiais e a largura do revestimento.
- Avaliar a resistência da camada revestida através de ensaios erosão-corrosão, ou seja, ensaios de erosão realizados em água do mar sintética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BORGES, B. M.; HENRIQUE JÚNIOR, M. M.; FORMOSO, C. M.; FRANCO, V. L. D. S.; FRANCO, S. D. **Uso da Técnica de Reparo por Atrito na Produção de Recobrimentos com o aço AISI 420.** V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, 2009.
- [2] RAFI, H. K.; RAM, G.D.J.; PHANIKUMAR, G.; RAO, K. P. **“Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13.”** Materials and Design, 32, p. 82-87, 2010.
- [3] RAFI, H. K.; RAM, G.D.J.; PHANIKUMAR, G.; RAO, K. P. **“Friction surfaced tool steel (H13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity.”** Surface & Coatings Technology, 205, p. 232-242, 2010.
- [4] RAFI, H. K.; RAM, G.D.J.; PHANIKUMAR, G. and RAO, K. P. **“Friction Surfacing of Austenitic Stainless Steel on Low Carbon Steel: Studies on the Effects of Traverse Speed.”** Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. II, 2010, London, U.K.
- [5] CSELLE, T.; BARIMANI, A. Surface and Coatings Technology 76, 1995, p. 712.
- [6] SHINODA, T.; KAWAI, M. **“Surface modification by novel friction thermomechanical process of aluminum alloy castings.”** Surface and Coatings Technology 169 –170, p. 456-459, 2003.
- [7] VITANOV, V.I.; VOUTCHKOV, I.I.; BEDFORD, G.M. **“Decision support system to optimise the Frictec (friction surfacing) process.”** Journal of Materials Processing Technology, 107, p. 236-242, 2000.
- [8] VOUTCHKOV, I.; JAWORSKI, B.; VITANOV, V.I.; BEDFORD, G.M. **“An integrated approach to friction surfacing process optimization.”** Journal of Materials Processing Technology, 141, p. 26-33, 2001.

- [9] LIU, X.M.; ZOU, Z.D.; ZHANG, Y.H.; QU, S.Y.; WANG, X.H. **“Transferring mechanism of the coating rod in friction surfacing.”** Surface & Coatings Technology, 202, p.1889-1894, 2008.
- [10] BEDFORD, G.M.; VITANOV, V.I.; VOUTCHKOV, I. **“On the thermo-mechanical events during friction surfacing of high speed steels.”** Surface and Coatings Technology, 141, 2001, p. 34-39.
- [11] VITANOV, V.I.; VOUTCHKOV, I. **“Process parameters selection for friction surfacing applications using intelligent decision support.”** Journal of Materials Processing Technology, 159, p. 27-32, 2005.
- [12] GENTIL, V., 2007. **Corrosão**. Livros Técnicos e Científicos Editora, 5ª edição, Rio de Janeiro.
- [13] WOLYNEC, S., 2003. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 166 p.
- [14] SILVA, F. J., 2008. **Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, MG. Brasil, 241 p.
- [15] ASM Handbook, 2003. **“Corrosion: fundamentals, testing, and protection”**. American Society for Metals International, vol. 13A, 1050 p.
- [16] BHUSHAN, B., 1999. **“Principles and applications of tribology”**. ISBN 0-471-59407-5, editora Wiley-Interscience, pp. 1020.
- [17] ZUM GAHR, K. H., 1987. **“Microstructure and wear of materials”**. Elsevier, 599 p.
- [18] DUTRA, A. C. e NUNES, L. P., 1991. **Proteção catódica: Técnica de Combate a Corrosão**. 2ª edição, Editora McKlausen. Rio de Janeiro
- [19] STACHOWIAK, G. W. and BATCHELOR, A.W., 2001. **“Engineering tribology”**. Butterworth-Heinemann, 2ª edição, 744 p.

- [20] CHANDRASEKARAN, M.; BATCHELOR, A.W.; JANA, S. **“Friction Surfacing of Metal coating on Steel and aluminium substrate”**. Journal of Materials Processing Technology, 72, p. 446 – 452, 1997.
- [21] PIRES, R. R.; CAIXETA, L. A.; PAES, M. T. P.; FRANCO, S.D. **Influência da força axial, da rotação e das geometrias do pino e do furo, na qualidade do reparo de trincas por atrito**. 63º Congresso Anual da ABM – Internacional – 28 de Julho a 1 de Agosto de 2008, Santos – SP, Brasil.
- [22] LÓPEZ, D.; FALLEIROS, N. A.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **“Corrosion-Erosion behaviour of austenitic and martensitic high nitrogen stainless steels”**. Wear, 263, p. 347-354, 2007.
- [23] ASTM D 1141-98, **“Standard practice for the preparation of substitute ocean water”**, ASTM American Society for Testing and Materials.
- [24] SANTA ANNA, L. B., 2008. **Estudo da corrosão e erosão nos aços abnt 8550 e inoxidável 301**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Vitória, ES. Brasil, 67 p.
- [25] VITANOV, V.I.; VOUTCHKOV, I.I.; BEDFORD, G.M. **“Neurofuzzy approach to process parameter selection for friction surfacing applications”**. Surface and Coatings Technology, 140, p. 256-262, 2001.
- [26] ASTM G5-94, **“Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements”**. Designation G5 - 94. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. v.03.02, 1994.
- [27] PORTER, D.A.; EASTERLING, K.E., 1992. **“Phase Transformations in Metals and Alloys.”** Chapman-Hall, 2ª edição, 227 p.