

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

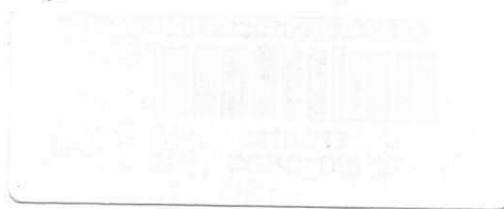
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**RESISTÊNCIA À FRATURA DE REVESTIMENTOS APLICADOS AO AÇO
ASTM A 516 Gr 60 PARA USO NA ÁREA DE PETRÓLEO E GÁS**

Danielton Gomes dos Santos

Campina Grande

Dezembro/2011



2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**RESISTÊNCIA À FRATURA DE REVESTIMENTOS APLICADOS AO AÇO
ASTM A 516 Gr 60 PARA USO NA ÁREA DE PETRÓLEO E GÁS**

Danielton Gomes dos Santos

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais como requisito parcial à
obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

Orientador: Marco Antônio dos Santos, D. Sc.

Agência Financiadora: CAPES

Campina Grande

Dezembro/2011



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

S237r Santos, Danielton Gomes dos.
Resistência à fratura de revestimentos aplicados ao aço ASTM A516 Gr60 para uso na área de petróleo e gás / Danielton Gomes dos Santos. - Campina Grande, 2011.
100f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia. Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio dos Santos.
Referências.

1. Revestimentos de Níquel. 2. Tintas Protetoras. 3. Resistência à Fratura de Revestimentos. 4. Defeitos em Pintura. I. Título.

CDU 621.793.5 (043)

**RESISTÊNCIA À FRATURA DE REVESTIMENTOS APLICADOS AO AÇO
ASTM A 516 Gr 60 PARA USO NA ÁREA DE PETRÓLEO E GÁS**

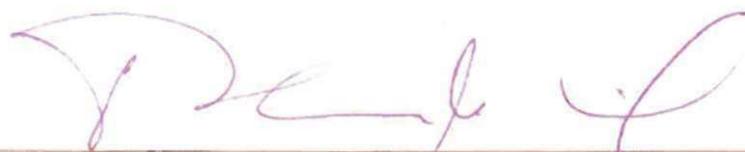
Danielton Gomes dos Santos

Dissertação aprovada em 05 de dezembro de 2011, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

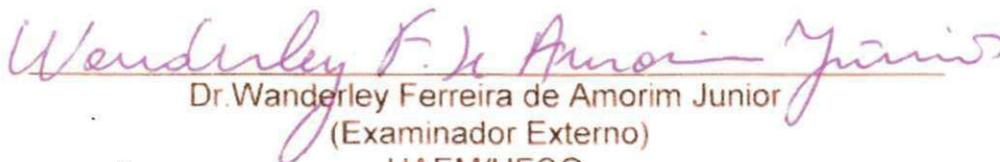
Banca Examinadora:



Dr. Marco Antonio dos Santos
(Orientador)
UAEM/UFCG



Dr. Theophilo Moura Maciel
(Examinador Interno)
UAEM/UFCG



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior
(Examinador Externo)
UAEM/UFCG

*As coisas que o olho não viu, e o ouvido não
ouviram, e não subiram ao coração do
homem, são as que Deus preparou para os
que o amam. 1 Coríntios 2:9*

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e a minha esposa, o meu muito obrigado por todo incentivo e compreensão.

VITAE DO CANDIDATO

- **Engenheiro Mecânico – Universidade Federal de Campina Grande/ 2007**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** pelo milagre da vida, pelo seu grande amor com que nos ama, proporcionando tão grande salvação em Cristo Jesus nosso Senhor.

Aos meus amados pais **Ivanildo Batista dos Santos** e **Maria Zeneide Gomes dos Santos**, pelo amor, compreensão, por todo o incentivo e por sempre me orientarem no caminho da vida.

A minha amada esposa **Paula de Sousa Costa** pelo seu amor, carinho e compreensão nos períodos em que precisei viajar para diferentes lugares para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos **Daniel Gomes dos Santos**, **Daniele Gomes dos Santos** e **Danielba Gomes dos Santos** por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos de minha vida e a todos os familiares pelo apoio que sempre me deram.

Aos professores **Marco Antonio dos Santos** e **Theophilo Moura Maciel** pela oportunidade que me concederam, pela dedicação, ensinamentos e orientação para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos **Marcos Mesquita da Silva**, **Siderley Fernandes Albuquerque**, **Maria do Socorro S. Lima** e a todos os integrantes do Laboratório de Soldagem (LABSOL) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG pelo apoio.

Ao professor **Gecilio Pereira da Silva** do Núcleo de Corrosão de Cuité pela facilidade concedida na realização dos revestimentos de níquel.

Aos bolsistas **José Orlando Rodrigues dos Santos** e **Marcus Vinicius Ferreira dos Santos** pela colaboração, e tempo disponibilizados na análise das superfícies dos revestimentos antes e após os ensaios mecânicos.

Ao **Zoroastro Torres Vilar** pela colaboração, tempo e dedicação na realização dos ensaios de tração.

Ao Prof. **Gelmires de Araújo Neves**, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais (PPG-CEMat) da UFCG pela atenção e dedicação.

Ao professor **Marcelo Ferreira Motta** da UFC pela disponibilização do rugosímetro.

Ao pessoal do **SENAI** de Campina Grande/PB e, em especial, ao **Prof. Sergio Rodrigo**, pela preparação dos corpos de prova para a execução dos revestimentos e dos os ensaios de tração.

A **Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica** da UFCG pelas facilidades na realização da parte experimental deste trabalho (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e estruturas Ativas, Laboratório de Metalografia e o Laboratório de Microscopia).

Ao CENPES (**PETROBRÁS**) pela execução dos revestimentos com tintas protetoras utilizados neste trabalho.

A **PETROBRÁS** e **FINEPE** pelo financiamento do projeto que gerou este trabalho.

A **REMULT** pelas facilidades que permitiram a realização deste trabalho.

A **CAPES** pelo fornecimento da bolsa de estudo.

A todos que de alguma forma ou outra, contribuíram para a realização desta dissertação.

RESISTÊNCIA À FRATURA DE REVESTIMENTOS APLICADOS AO AÇO ASTM A 516 Gr. 60 PARA USO NA ÁREA DE PETRÓLEO E GÁS

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se a resistência à fratura de revestimentos aplicados em substrato metálico do tipo aço manganês (ASTM A 516 Gr 60), visando aplicações na indústria de petróleo e gás. Para tanto foram confeccionados corpos de prova de tração de secção transversal retangular (Norma ASTM E 8M), usando como substrato o aço ao manganês (ASTM A 516 Gr. 60). Os revestimentos estudados foram: a) Níquel depositado pelo processo eletrolítico, com espessura média de camada depositada de 20 μm ; b) Tintas epóxi "Novolac" (N-2912 – Petrobrás, Tipos I, II e III, desenvolvidas no CENPES-PETROBRÁS), tendo como finalidade principal a proteção contra a corrosão. Com o objetivo de analisar a resistência à fratura do revestimento e ao mesmo tempo o comportamento desta resistência com a rugosidade do substrato, corpos de prova de tração com três perfis de rugosidade R_y (20, 40 e 60 μm) foram confeccionados para os ensaios com revestimento de Níquel eletrolítico. Para os revestimentos com tintas poliméricas a rugosidade do substrato foi do tipo Sa 2 ½ (média de 80 μm - jateamento a seco). Por outro lado, os revestimentos com tintas epóxi foram submetidos a testes de aderência por tração (Norma ASTM 4541). Os ensaios de tração, com a finalidade de determinar a resistência à fratura do revestimento, foram realizados à temperatura ambiente com os seguintes níveis de cargas: 30%, 50%, 70%, 90%, 110%, 120% e 130% do limite de escoamento do substrato. Os resultados mostraram que para os revestimentos de níquel a trinca surgia com uma carga de 90% da tensão de escoamento do substrato. Os revestimentos com as tintas epóxi do tipo I, II e III apresentaram uma boa resistência ao aparecimento da trinca durante os carregamentos, visto que apenas a tinta tipo I apresentou trincas ao nível de 110% da tensão de escoamento do substrato. Testes de aderência, por tração, realizados nos revestimentos com as tintas

epóxi apresentaram uma resistência de 15 MPa, valor consistente para estes revestimentos.

Palavras Chave: Revestimentos de Níquel, Tintas Protetoras, Resistência à Fratura de Revestimentos, Defeitos em Pinturas, Teste de Aderência, Aço ASTM A 516 Gr. 60.

FRACTURE RESISTANCE OF APPLIED COATINGS IN ASTM A 516 GR. 60 STEEL FOR USE IN OIL AND GAS INDUSTRY

ABSTRACT

In this work the fracture resistance of applied coatings in metallic substratum of type manganese steel (ASTM A 516 Gr. 60) for applications in petroleum and gas industry was evaluated. For this, traction specimens of rectangular traverse section were made (Norma ASTM AND 8M), using steel (ASTM A 516 Gr. 60) as substratum manganese. The studied coverings were: a) Nickel deposited by electrolytic process with medium thickness of 20 μm ; b) Epoxy paints of type I, II and III (N-2912 – Petrobrás) developed in CENPES-PETROBRÁS for protection against the corrosion. With the objective of analyzing the fracture resistance of the coatings and at the same time the relationship between this resistance and surface roughness, traction specimens with three roughness profiles R_y (20, 40 and 60 μm) were made for the tests with electrolytic Nickel coating. For the coatings with epoxy paints the substratum roughness was $Sa\ 2\ \frac{1}{2}$ (average of 80 μm – dry-sand blasting). On the other hand, the coatings with epoxy paints were submitted to traction adherence tests (Norma ASTM 4541). The traction tests with the purpose to determine the fracture resistance of the coatings were accomplished at room temperature with the following loads levels: 30%, 50%, 70%, 90%, 110%, 120% and 130% of the substratum flow stress. The results showed that for the nickel coatings the cracks appeared with a load of 90% of the substratum flow stress. The coatings with the epoxy paints of the type I, II and III presented a good resistance to cracks during the loading. Only the type I paint presented cracks at the level of 110% of substratum flow stress. The epoxy paints presented a resistance of 15 MPa to traction adherence tests, a solid value for these coatings.

Words Key: Nickel Coverings, Protecting Paints, Fracture Resistance of Applied Coverings, Defects in Paintings, Traction Adherence Tests, ASTM A 516 Gr. 60 Steel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	JUSTIFICATIVA.....	24
3	OBJETIVO	25
3.1	Objetivo Geral.....	25
3.2	Objetivos Específicos	25
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	26
4.1	Aço C-Mn.....	26
4.2	Ensaio de Tração.....	26
4.3	Revestimentos para Metais	31
4.3.1	Principais Tipos de Falhas em Revestimentos.....	34
4.3.2	Principais Causas de Falhas em Revestimentos	34
4.4	Tipos de Revestimentos	35
4.4.1	Eletrodeposição: Níquel Eletrolítico	36
4.4.2	Tintas Protetoras.....	38
4.5	Defeitos em Revestimentos de tintas	39
4.5.1	Olhos de Peixe.....	39
4.5.2	Escorrimento.....	40
4.5.3	Bolhas.....	41
4.5.4	“Casca de Laranja”.....	41
4.5.5	Descascamento	42
4.5.6	Crateras	43
4.5.7	Poros.....	44
4.5.8	Manchas	45
4.5.9	Impregnação de Materiais Estranhos.....	46
4.6	Preparação da Superfície Antes da Deposição Metálica.....	46

4.7	Caracterizações das Propriedades dos Revestimentos	47
4.8	Métodos de Avaliação de Falhas em Revestimentos	50
4.8.1	Método da Queda de Potencial.....	50
4.8.2	Método da Inspeção Visual.....	50
4.8.3	Método da Emissão Acústica.....	51
4.8.4	Método de Ultra Som	54
5	MATERIAIS E MÉTODOS	57
5.1	Materiais.....	57
5.2	Métodos.....	60
5.2.1	Corpos de Prova Revestidos com Níquel Eletrolítico.....	60
5.2.2	Corpos de Prova Revestidos com Tintas Epóxi.....	66
5.2.3	Ensaio de Tração dos Corpos de Prova Revestidos.....	68
5.2.4	Medida de Espessura da Camada dos Revestimentos.....	69
5.2.5	Teste de Aderência dos Revestimentos de Tintas Protetoras	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
6.1	Espessura da Camada dos Revestimentos.....	73
6.1.1	Revestimentos de Níquel Eletrolítico	73
6.1.2	Revestimentos de Tintas Protetoras	73
6.2	Análise Preliminar dos Corpos de Prova Revestidos.....	75
6.2.1	Revestimentos de Níquel Eletrolítico	75
6.2.2	Revestimentos de Tintas Protetoras.....	77
6.3	Resultados dos Ensaio de Tração (Fratura no Revestimento)	80
6.3.1	Revestimentos de Tintas Protetoras.....	80
6.3.2	Resultado do Teste de Aderência das Tintas Protetoras.....	88
6.3.3	Revestimentos de Níquel Eletrolítico	88
7	CONCLUSÕES.....	94

8	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	96
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Esquema de ensaio de tração. [ACEROSITASA, 2009].....	27
Figura 4.2 - Diagrama tensão versus deformação. [CIMM, 2010].....	28
Figura 4.3 – Curvas típicas dos metais. [CIMM, 2011].....	29
Figura 4.4 - Máquina universal de tração. [CIMM, 2011].....	30
Figura 4.5 - Esquema da ligação mecânica entre substrato e revestimento. [SCHWEITZER, 2006].....	32
Figura 4.6 - Esquema mostrando o ar aprisionado em uma depressão. [SCHWEITZER, 2006].....	33
Figura 4.7- Tipos de falhas em revestimentos. [SCHWEITZER, 2006]	34
Figura 4.8 - Causas de falhas nos revestimentos. [SCHWEITZER, 2006]	35
Figura 4.9 - Nucleação e crescimento de um depósito. [JUNIOR, 1994].....	37
Figura 4.10 - (a) e (b) Exemplos de olhos de peixe. [EMBRATECNO, 2011]...	39
Figura 4.11 - (a) e (b) Exemplos de escorrimentos. [EMBRATECNO, 2011]....	40
Figura 4.12 - (a) e (b) Exemplos de bolhas. [EMBRATECNO, 2011]	41
Figura 4.13 - Exemplo de “Casca de laranja”. [EMBRATECNO, 2011]	42
Figura 4.14 – (a) e (b) Exemplos de descascamento. [EMBRATECNO, 2011] 43	
Figura 4.15 - (a) e (b) Exemplos de crateras. [EMBRATECNO, 2011].....	44
Figura 4.16 - (a) e (b) Exemplos de poros. [EMBRATECNO, 2011].....	45
Figura 4.17 - (a) e (b) Exemplos de manchas em superfícies pintadas. [EMBRATECNO, 2011]	45
Figura 4.18 - (a) e (b) Exemplos de materiais estranhos em pinturas. [EMBRATECNO, 2011]	46
Figura 4.19 - Jateamento abrasivo. [SILVA, 2009].....	47
Figura 4.20 - Arranjo básico de um ensaio de tração. [MENEZES, 2007].....	48
Figura 4.21 - Esquema de cortes no revestimento para testes de aderência. [NBR 11003, 2009].....	48
Figura 4.22 - Porosidade em implantes médicos. [www.protesedoquadril.com.br Acesso em: 29/11/2011].....	49
Figura 4.23 - Sinal de onda mecânica. [HELLIER, 2003]	52
Figura 4.24- Cadeia de emissão acústica. [MAGALHÃES, 1999].....	53

Figura 4.25 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-som. [ANDREUCCI, 2008]	54
Figura 5.1 - Chapa mostrando o sentido de laminação	58
Figura 5.2 - Chapa cortada	59
Figura 5.3 - Projeto e desenho do CP de tração (unidades em mm).....	59
Figura 5.4 - Esquema que demonstra o GAP. [SCHMIDT, 2008].....	61
Figura 5.5 - Rugosímetro.....	61
Figura 5.6 – Níveis de rugosidade	62
Figura 5.7 - Revestimentos de níquel eletrolítico série "A" (Perfil de rugosidade do substrato de 40 μ m).....	65
Figura 5.8 - Revestimentos de níquel eletrolítico série "B" (Perfil de rugosidade do substrato de 20 μ m).....	65
Figura 5.9 - Revestimentos de níquel eletrolítico série "C" (Perfil de rugosidade do substrato de 60 μ m).....	66
Figura 5.10 - Revestimentos de tintas série "T1" (perfil de rugosidade do substrato de 80 μ m).....	67
Figura 5.11 - Revestimentos de tintas série "T2" (perfil de rugosidade do substrato de 80 μ m).....	67
Figura 5.12 - Revestimentos de tintas série "T3" (perfil de rugosidade do substrato de 80 μ m).....	68
Figura 5.13 - Microscópio ótico acoplado a um computador	70
Figura 5.14 – Equipamento para teste de aderência. [ASTM 4541, 1995]	70
Figura 5.15 - Esquema do pistão pneumático. [ASTM 4541, 1995].....	71
Figura 5.16 – Fluxograma dos procedimentos aplicados	72
Figura 6.1 – Espessura da camada de níquel eletrolítico. Aumento de 100X. .	73
Figura 6.2 - Espessura da Série de "T1". Aumento de 100X.....	74
Figura 6.3- Espessura média para a Série de "T2". Aumento de 100X.....	74
Figura 6.4- Espessura média para a Série de "T3". Aumento de 100X.....	74
Figura 6.5 – a) e b) - Aspecto superficial dos revestimentos de níquel antes dos carregamentos. Série A.....	76
Figura 6.6 - a) e b) - Aspecto superficial dos revestimentos de níquel antes dos carregamentos. Série B. Aumento de 200X.....	76

Figura 6.7 - a) e b) - Aspecto superficial dos revestimentos de níquel antes dos carregamentos. Série C. Aumento de 100X.	77
Figura 6.8 - Olho de peixe da série "T1". Aumento: 100X.	78
Figura 6.9 - Manchas na série "T1". Aumento: 200X.	78
Figura 6.10 - Impurezas na série "T1" (a) Sujeira; (b) Pêlos. Aumento: 100X. .	78
Figura 6.11 - Defeitos na série "T2" a) Crateras; b) Manchas. Aumento: 100X.	79
Figura 6.12 - Defeitos na série "T3" a) Crateras; b) Manchas. Aumento: 100X.	79
Figura 6.13 - Impurezas na série "T3" a) Pêlos; b) Crateras. Aumento: 100X. .	80
Figura 6.14 - Trincas na série "T1" (a) e (b). Aumento: 100X.	81
Figura 6.15 - Trinca na série "T1". Aumento: 1000X (MEV).	82
Figura 6.16 – Revestimento do tipo "T2" submetido a um carregamento de 110% da tensão de escoamento do substrato (a) e (b) (Não se observa trincas). Aumento: 100X.	83
Figura 6.17 – Revestimento do tipo "T3" submetido a um carregamento de 110% da tensão de escoamento do substrato (a) e (b) (Não se observa trincas). Aumento: 100X.	83
Figura 6.18- Trincas do 1º e 3º CP da série "T2" (a) e (b) respectivamente. Aumento: 100X.	84
Figura 6.19 - Trincas no 1º e 3º CP da série "T2". Aumento de 500X e 200X, respectivamente (MEV).	84
Figura 6.20 - Trincas do 1º CP da Série "T3". a) e b) Aumento de 50X.	85
Figura 6.21 - Trincas do 1º CP da Série "T3". a) e b) Aumento de 100X e 200X respectivamente (MEV).	85
Figura 6.22 - 2º CP da Série "T3".	86
Figura 6.23 - Trincas do 3º CP da Série "T3".	87
Figura 6.24 - Trincas do 3º CP da Série "T3". a) e b) Aumentos de 50 e 100X respectivamente (MEV).	87
Figura 6.25 - (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "A". Aumento de 100X.	89

Figura 6.26 Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "A". Aumentos de 100X e 1500X respectivamente (MEV).....	89
Figura 6.27- (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "B". Aumento de 100X.....	90
Figura 6.28 - Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "B". Aumentos de 1500X e 100X. (MEV).....	90
Figura 6.29 - (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "C". Aumentos de 200X e 100X.....	91
Figura 6.30 - (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "C". Aumentos de 500X. (MEV).....	91
Figura 6.31 - Trincas em um revestimento de níquel eletrolítico da série "B"....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Composição química do aço ASTM A 516 Gr 60	57
Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 Gr. 60	57
Tabela 5.3 – Valores de GAP e corrente utilizados	60
Tabela 5.4 - Composição das soluções eletrolíticas / condições operacionais de eletrodeposição do Ni.	64
Tabela 5.5 – Algumas características das tintas protetoras Epóxi “Novolac” – Norma N – 2912 (Petrobrás).....	67
Tabela 6.1 - Comparativo entre revestimentos de níquel eletrolítico e tintas....	93

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

μm – microns

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP's – Corpos de provas

C – Carbono

CO_2 – Dióxido de carbono

EUA – Estados Unidos da América

END – Ensaios não destrutivos

Gr - Grau

H_2S - Sulfeto de hidrogênio

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

LE – Limite de escoamento

LR – Limite de resistência

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

Mn – Manganês

Ni – Níquel

NiP – Níquel - Fósforo

NBR – Norma Brasileira

PA – Para análise

Ry - Parâmetro de rugosidade máxima

Série A – Corpos de prova de níquel com 40 microns de rugosidade superficial

Série B – Corpos de prova de níquel com 20 microns de rugosidade superficial

Série C – Corpos de prova de níquel com 60 microns de rugosidade superficial

Série T1 – Corpos de prova revestidos com a tinta 1

Série T2 – Corpos de prova revestidos com a tinta 2

Série T3 – Corpos de prova revestidos com a tinta 3

UAEM – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

1 INTRODUÇÃO

Com o descobrimento de novas jazidas de petróleo e gás um novo impulso de estudos de novas tecnologias tem sido efetuado no sentido do desenvolvimento de materiais mais resistentes, com o intuito de melhorar a resistência mecânica dos componentes sujeitos a deformações em serviço.

As falhas nas estruturas tem sido a causa dos maiores gastos com manutenção. E quando as mesmas trabalham em locais de difícil acesso, quanto mais tempo ela permanecer em trabalho sem a parada, melhor. Os gastos com a manutenção em estruturas nos EUA tem sido da ordem de 4 % do PIB e uma forma de aumentar a resistência delas é fazendo-se uso de revestimentos nas superfícies, pois os mesmos agem como barreiras entre o componente mecânico e o ambiente muitas vezes agressivo. Os revestimentos propiciam assim uma maior vida útil ao equipamento, uma vez que os mesmos oferecem uma maior resistência à corrosão. Para propiciar esse aumento na resistência à corrosão, os revestimentos são constituídos de materiais menos reativos, o que evita o ataque da superfície a ser protegida.

No entanto pouco se sabe como tais revestimentos se comportam quando solicitados. Uma trinca na superfície pode ter seu início através de um risco ou através de um processo de corrosão por pite, por exemplo. Em revestimentos finos a vida útil está inteiramente associada ao início da trinca, uma vez que a propagação da mesma se dá de maneira muito rápida. Existem dúvidas de como variáveis como o processo de revestimento, se químico, eletrolítico ou através de tintas protetoras influenciam no comportamento dos revestimentos. Se revestimentos de níquel ou tintas protetoras e, em que condições, favorecem uma maior ou menor resistência mecânica. A resposta a essas perguntas facilitariam o uso destes revestimentos em diversas aplicações industriais bem como o uso seguro dos mesmos, evitando assim a sua troca prematura.

Assim, este estudo tem como objetivo principal avaliar resistência à fratura de revestimentos dos tipos tintas epóxi e níquel eletrolítico aplicados em substrato metálico do tipo aço manganês (ASTM A 516 Gr 60), visando aplicações na indústria de petróleo e gás.

2 JUSTIFICATIVA

Atualmente a sociedade tem conhecimento de um grande conjunto de possibilidades de proteção em ambientes corrosivos e abrasivos que quando utilizados de modo adequado permitem aumentar a vida útil de uma estrutura, assim como alongar os períodos entre as manutenções necessárias. A eficiência do tipo de proteção utilizado está no reconhecimento da corrosividade do ambiente no qual a estrutura será exposta e na escolha apropriada do revestimento. Os revestimentos protetores são películas aplicadas sobre a superfície metálica que dificultam o contato da superfície com o meio corrosivo, objetivando minimizar a deterioração da mesma pela ação do meio. Daí a importância de se avaliar como esses revestimentos são influenciados por fatores como: rugosidade superficial, processos de aplicação, tipos de revestimentos etc. Muito embora os revestimentos protetores sejam usados nas mais diversas aplicações industriais, contudo pouco se sabe sobre o comportamento dos mesmos quando submetidos a carregamentos. Assim, a relevância do presente trabalho está no enfoque sobre resistência à fratura de revestimentos protetores quando submetidos a carregamentos de tração.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Aço C-Mn

Entre todos os materiais industriais existentes, o aço carbono é o que apresenta menor relação custo/resistência mecânica, além de ser um material fácil de soldar e de conformar, e também fácil de ser encontrado no comércio. Por todos esses motivos, o aço carbono é o chamado "material de uso geral" em tubulações industriais. Isto é, só se deixa de empregar o aço carbono quando houver alguma circunstância especial que o proíba, e desta forma, todos os outros materiais são utilizados apenas em alguns casos especiais. Em uma refinaria de petróleo, por exemplo, mais de 90% de toda tubulação é de aço-carbono [1].

O teor de manganês no aço carbono é normalmente aumentado com o objetivo de aumentar a profundidade de endurecimento e de melhorar a resistência e a tenacidade. Este aço já entra na categoria de aço de baixa liga, se considerado o limite inferior do teor de liga de 1% estabelecido pela ISO [2].

O manganês além de atuar como agente dessulfurante atua do mesmo modo que o silício e o alumínio como elemento desoxidante. O manganês que não se combina com o enxofre ou com o oxigênio pode atuar de duas maneiras: quando o teor de carbono é baixo, ele se dissolve na ferrita aumentando sua dureza e resistência mecânica. Com teor de carbono mais elevado, admite-se que se forme o composto Mn_3C que se associaria com o Fe_3C , aumentando ainda mais a dureza e a resistência do aço.

4.2 Ensaíos de Tração

As propriedades mecânicas é uma das características mais importantes dos materiais. Quando em operação os equipamentos são submetidos a

esforços e quando não são devidamente dimensionados eles podem levar a uma falha. No caso de superdimensionamentos temos o desperdício de material e de energia e no caso de subdimensionamentos temos o grande risco de falhas que podem levar a acidentes. Assim sendo, a determinação da resistência dos materiais é de fundamental importância e o método utilizado para essa avaliação é o ensaio de tração.

Esses ensaios são realizados no próprio produto ou em corpos de prova de tamanhos especificados pelas normas. Nesta modalidade de ensaio o material é submetido a um esforço de tração até a ruptura do mesmo. Os esforços são medidos pela própria máquina de ensaio. Dessa maneira pode-se saber como os materiais reagem a esses esforços e conseqüentemente determinar seu limite de resistência e quando os mesmos se rompem. Na Figura 4.1 observa-se um corpo de prova do tipo tração preso a garra da máquina, preparado para ser submetido ao ensaio.

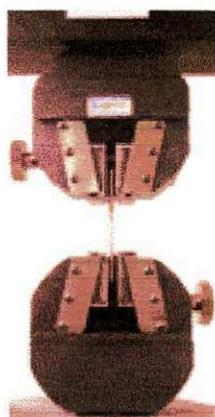


Figura 4.1 - Esquema de ensaio de tração. [ACEROSITASA, 2009]

Os ensaios de tração fornecem gráficos de tensão versus deformação, que mostra a relação entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o ensaio. Muitas informações podem ser obtidas através da observância desse diagrama, como o limite elástico, o módulo de elasticidade,

o limite de proporcionalidade, o de escoamento, o limite de resistência, e de ruptura e a estrição.

Quando submetidos a cargas os metais deformam-se. A intensidade e o tipo de deformação sofrido pelo metal são funções da ductilidade do metal, da intensidade das forças aplicadas e do caminho da deformação. Na Figura 4.2 observa-se uma curva esquemática de tração versus deformação.

As deformações resultantes das forças aplicadas podem ser classificadas em dois tipos:

- Deformação elástica – é aquela em que removidos os esforços atuando sobre o corpo, ele volta a sua forma original;
- Deformação plástica – é aquela em que removidos os esforços, não há recuperação da forma original.

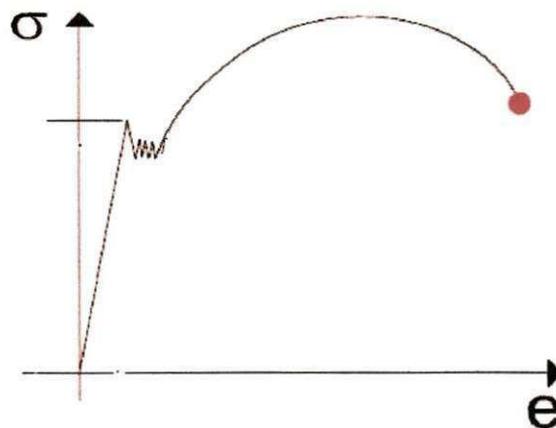


Figura 4.2 - Diagrama tensão versus deformação. [CIMM, 2010]

Existem dois formatos típicos de curvas para os materiais metálicos: as curvas para os metais dúcteis e as curvas para os metais frágeis. Em termos genéricos pode-se dizer que:

- Um material dúctil é aquele que pode ser alongado, flexionado ou torcido, sem se romper. Ele admite deformação plástica permanente, após a deformação elástica. A deformação plástica em geral é acompanhada de encruamento. Na curva tensão deformação destes materiais, a região plástica é identificável: O ponto de escoamento determina a transição entre as fases elástica e plástica (com ou sem patamar na curva), Figura 4.3 (a).
- Um material frágil rompe-se facilmente, ainda na fase elástica. Para estes materiais o domínio plástico é praticamente inexistente, indicando sua pouca capacidade de absorver deformações permanentes. Na curva tensão deformação, a ruptura se situa na fase elástica ou imediatamente ao fim desta, não havendo fase plástica identificável, Figura 4.3 (b).

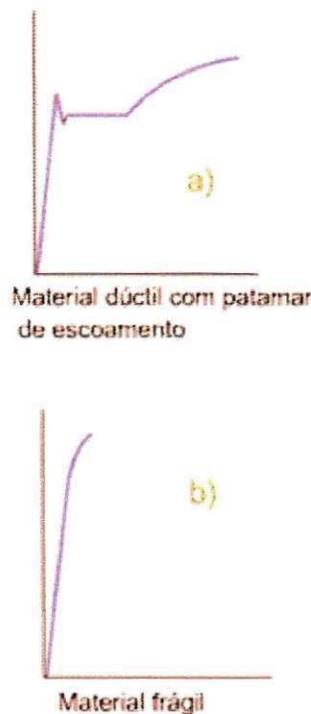


Figura 4.3 -- Curvas típicas dos metais. [CIMM, 2011]

Para a realização de ensaios de tração faz-se necessário o uso de normas, pois se garante com isso, a reprodutibilidade dos testes aonde quer que o ensaio seja executado. Uma das normas utilizadas para

dimensionamento dos corpos de prova e a realização dos ensaios trativos é a norma ASTM E 8M [3].

As máquinas de testes de tração mais comuns para os ensaios de resistência são as máquinas universais, Figura 4.4.

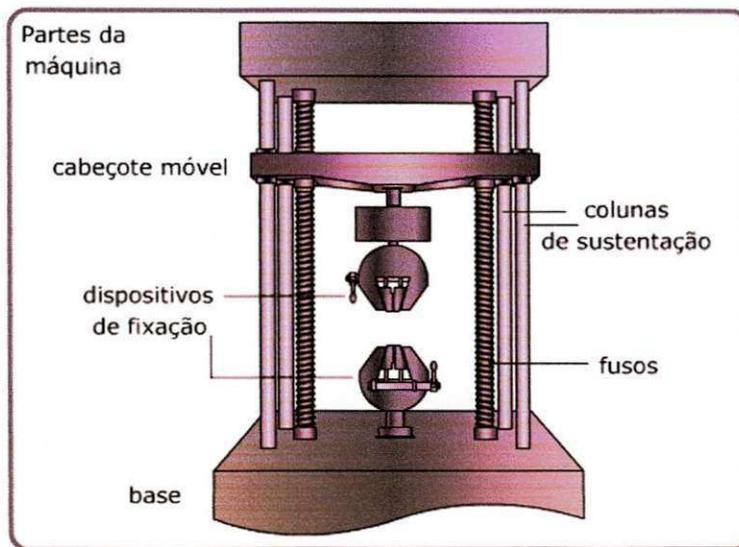


Figura 4.4 - Máquina universal de tração. [CIMM, 2011]

Quanto ao tipo de operação, as máquinas de ensaio podem ser eletromecânicas ou hidráulicas. A diferença entre elas é a forma como a carga é aplicada.

4.3 Revestimentos para Metais

Uma técnica para reduzir a corrosão nos metais é de cobrir estes com metais ou ligas menos reativos. Os revestimentos metálicos consistem, portanto na interposição de uma película metálica entre o meio corrosivo e o metal que se quer proteger.

Em se tratando das propriedades dos revestimentos, estes atuam de acordo com a necessidade requerida, proporcionando: excelente resistência química, maior proteção aos equipamentos, resistência à corrosão, conferindo também; maior durabilidade com economia, resistência ao desgaste, maior vida útil aos equipamentos, maior segurança e proteção.

O tempo de proteção dado por um revestimento depende do tipo de revestimento (natureza química), das forças de coesão e adesão, da sua espessura e da permeabilidade à passagem do eletrólito através da película. Assim, se a proteção é somente por barreira, tão logo o eletrólito chegue à superfície metálica, iniciará o processo corrosivo, enquanto que, se houver um mecanismo adicional de proteção (inibição anódica ou proteção catódica), haverá um prolongamento da vida do revestimento.

A aderência de um revestimento é influenciada pela rugosidade superficial do substrato, Figura 4.5. Ao se fazer, por exemplo, um lixamento, o aumento da área adesiva pode ser aumentado cinco vezes. A vantagem da rugosidade superficial é caracterizada somente se o revestimento penetra completamente em todas as irregularidades superficiais [4].

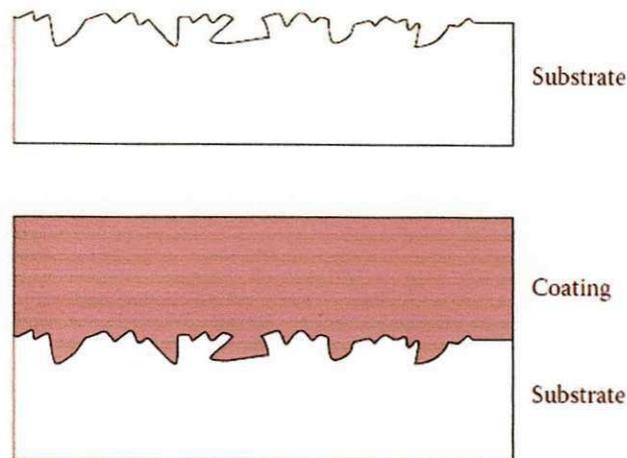


Figura 4.5 - Esquema da ligação mecânica entre substrato e revestimento. [SCHWEITZER, 2006]

A rugosidade da superfície após a limpeza, particularmente com abrasivos, deve ser proporcional à espessura mínima recomendada pelo esquema de pintura, sendo comum adotar-se um perfil médio de rugosidade do material de cerca de $1/4$ a $1/3$ da espessura total da camada de tintas prevista pelo esquema de pintura [5].

A espessura da camada é em função da aplicação em serviço. A norma ISO 4527 que trata das especificações de revestimentos de níquel-fósforo não especifica as espessuras das camadas, mas sugerem valores de acordo com as aplicações a que os revestimentos se propõem. A seguir, na Tabela 4.1, se tem exemplos de espessuras com as suas respectivas aplicações de acordo com a referida norma.

Tabela 4.1 - Espessuras mínimas requeridas pela norma ISO 4527. [ISO, 2003]

Condição de serviço (corrosividade)	Espessura (μm)
<i>Muito amena</i> : para aplicações eletrônicas	0,1
<i>Leve</i> : proteção contra corrosão em ambientes fechados secos	5
<i>Moderada</i> : ambientes de atmosfera industrial, ambientes fechados com condensação de umidade	13
<i>Severa</i> : exposição a sais alcalinos em elevada temperatura, ambiente não-marinho mas exposto ao ar livre onde freqüentemente pode ocorrer molhamento devido à chuva ou ao orvalho	25
<i>Muito severa</i> : ambientes marinhos e outros ambientes de extrema agressividade, exposição a ácidos, a elevadas temperaturas e pressões	75
<i>Excepcionalmente severa</i> : aplicação na exploração de petróleo	125

Se a penetração total não é alcançada, então há menos contato na interface do revestimento. Isto pode deixar espaços vazios entre o revestimento e o substrato, resultando em bolhas de ar retidas. Essas bolhas de ar aprisionadas nos espaços vazios permitirão acúmulo de umidade, resultando na eventual perda de aderência, Figura. 4.6 [4].

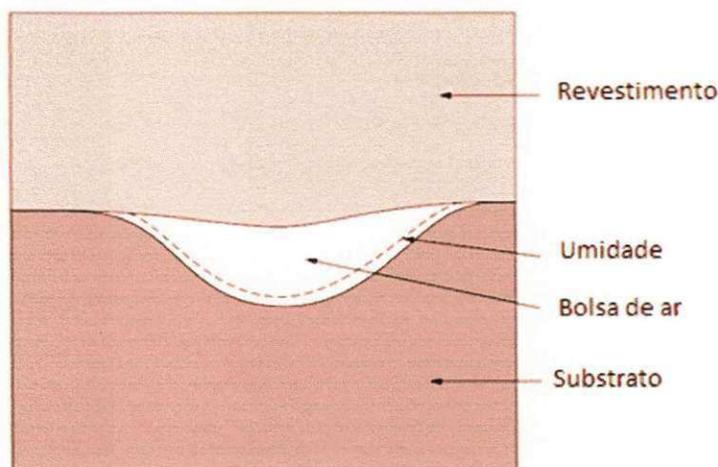


Figura 4.6 - Esquema mostrando o ar aprisionado em uma depressão. [SCHWEITZER, 2006]

4.3.1 Principais Tipos de Falhas em Revestimentos

Os revestimentos se apresentam como camadas que se superpõem formando o revestimento como um todo. Assim sendo, as falhas nos revestimentos podem ser por falta de coesão entre as camadas e por falta de adesão entre as camadas e o substrato, Figura 4.7.

A existência de coesão e adesão sinaliza uma força ótima entre as camadas, garantindo um revestimento adequado para uso. Qualquer melhoria adicional dos sistemas deveria ser buscada então na direção de aumentar estas forças inerentes das camadas.

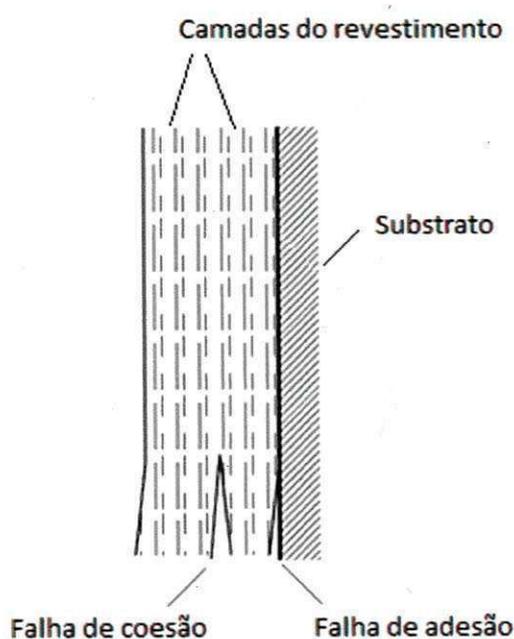


Figura 4.7- Tipos de falhas em revestimentos. [SCHWEITZER, 2006]

4.3.2 Principais Causas de Falhas em Revestimentos

As principais causas que levam os revestimentos a falhas podem ser devido a fatores mecânicos, químicos e térmicos, Figura 4.8. Tensões de

As principais causas que levam os revestimentos a falhas podem ser devido a fatores mecânicos, químicos e térmicos, Figura 4.8. Tensões de compressão e tração geram tensões nos revestimentos que podem levá-lo ao desprendimento inviabilizando o uso dos mesmos. Durante a formação das camadas dos revestimentos, caso partículas de sujeira penetrem nas camadas, o revestimento sofre perda de coesão, devido às partículas que impedem que as camadas se sobreponham de maneira satisfatória.

As camadas também podem sofrer mudanças devido à temperatura, às vezes rapidamente, qualquer diferença no coeficiente de expansão pode causar condições de tensão na interface de tal intensidade que o revestimento é separado do substrato.

Este evento pode ser especialmente desvantajoso porque os efeitos de temperatura tendem a ser menos perceptíveis que os fatores mecânicos e químicos.

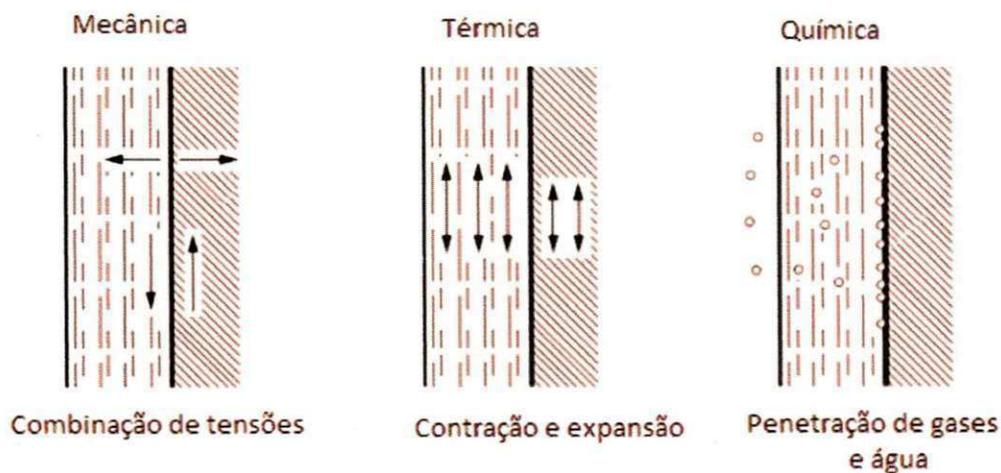


Figura 4.8 - Causas de falhas nos revestimentos. [SCHWEITZER, 2006]

4.4 Tipos de Revestimentos

Os revestimentos podem ser aplicados de muitas e diversas formas [33], mas serão apresentados apenas os que são alvos de estudo do referido trabalho.

4.4.1 Eletrodeposição: Níquel Eletrolítico

O conceito de eletrodeposição é usado para definir o recobrimento de peças através de um metal condutor ou outra substância como resultado de uma emigração de partículas carregadas eletricamente a uma solução aquosa iônica com o auxílio de corrente elétrica a fim de impedir a deteriorização de peças devido à oxidação, corrosão ou ataque de bactérias. As partículas podem ser íons, moléculas grandes (proteínas), colóides ou macromoléculas (goma ou látex). Na eletrodeposição de metais, utiliza-se uma célula eletrolítica contendo uma solução eletrolítica. Esta solução contém sais iônicos do metal a ser depositado.

O processo de eletrodeposição segue as seguintes etapas: desengraxamento, lavagem, decapagem, lavagem, eletrodeposição, lavagem e secagem [8].

A formação da camada de revestimento metálico pode ser explicada da seguinte maneira: inicialmente, Figura 4.9 (a) deve-se considerar que o processo de nucleação se dá de forma heterogênea, por conta da dificuldade de se obter uma superfície livre de defeitos superficiais, defeitos esses que servem como pontos de nucleação, Figura 4.9 (b). A partir desses pontos de nucleação (e proporcionalmente a eles) os íons em solução se adsorvem na superfície do cátodo, Figura 4.9 (c), durante este processo ocorre uma transferência de elétrons, e o íon passa a ser um ad-átomo, quando então ele se difunde pela superfície para se juntar em agregados de ad-átomos, Figura 4.9 (d), e formar um núcleo termodinamicamente estável. A partir desse ponto, ele cresce com a adição de mais ad-átomos, até que começa a ter a intersecção desses núcleos, Figura 4.9 (e); ao final, a camada se torna contínua, Figura 4.9 (f) e passa a haver um espessamento desta [9].

A Figura 4.9 apresenta a seqüência de nucleação e crescimento, para se obter um revestimento uniforme.

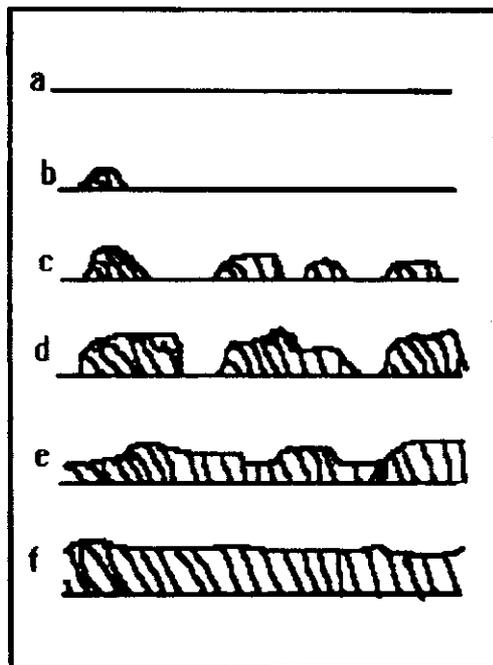


Figura 4.9 - Nucleação e crescimento de um depósito. [JUNIOR, 1994]

A eletrodeposição com níquel pode ser utilizada tanto para aplicações decorativas, como também para aplicações de engenharia. Com esse processo consegue-se adquirir revestimentos com espessuras entre 0,1 – 30 μm [6].

Freqüentemente o níquel eletrolítico é utilizado como camada intermediária de outros processos.

As principais características destes revestimentos com níquel são:

- Resistência à corrosão
- Resistência ao desgaste
- Resistência à fadiga
- Resistência a cargas localizadas
- Dureza e ductilidade.

Este revestimento também é utilizado para recompor o dimensional de revestimentos desgastados.

Suas principais aplicações são nos setores:

- Aeroespacial
- Automotivo
- Alimentos
- Eletro eletrônico
- Máquinas e equipamentos
- Petroquímico e Petrolífero
- Plásticos
- Siderurgia e Mineração

4.4.2 Tintas Protetoras

A pintura industrial consiste na aplicação de uma película, em geral orgânica, entre o meio corrosivo e o material metálico que se quer proteger, os quais são revestimentos com espessuras inferiores a 1 mm, aplicados em instalações industriais, instalações portuárias, embarcações e estruturas metálicas diversas [12].

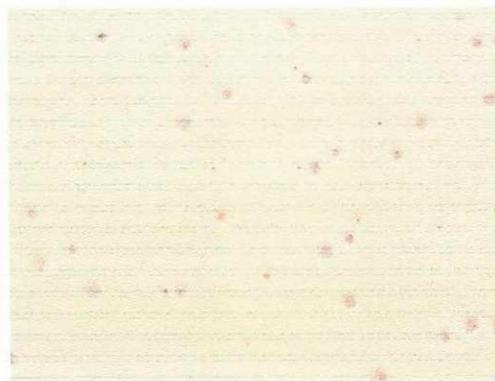
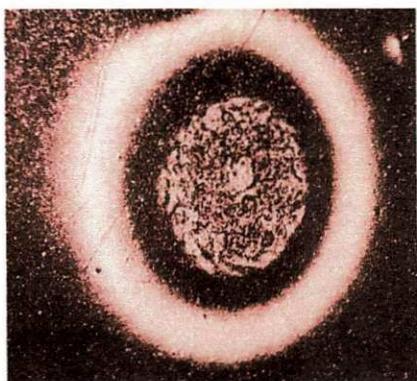
As tintas, assim sendo, são usadas com a finalidade de se obter uma proteção por barreira. Para que se tenha um bom aproveitamento do revestimento, alguns cuidados precisam ser tomados, entre eles estão: limpeza adequada da superfície, primeira demão, camada intermediária e camada de acabamento.

Alguns defeitos que costumam acompanhar os revestimentos de tintas, são denominados, "olhos de peixe", escorrimento, bolhas, casca de laranja, descascamento, crateras, poros, manchas e impregnação de materiais estranhos.

4.5 Defeitos em Revestimentos de tintas

4.5.1 Olhos de Peixe

“Olhos de peixe” são crateras que se caracterizam por um centro formado por uma zona uniforme de pintura, cercado por uma depressão seguida de uma borda de tinta que tem um formato similar a um olho de peixe, daí a sua denominação, Figura 4.10. São causados por glóbulos fluidos não dispersos ou por gotículas em suspensão no ar, depositadas sobre a superfície da tinta. Gotículas de óleo e graxas são grandes causadores desses defeitos. Muitas vezes esses defeitos desaparecem com o "envelhecimento da tinta", devido à lenta dissolução do material causador do problema. A filtração da tinta pode ajudar algumas vezes, se for usado um filtro absorvente ou um auxiliar de filtração. A solução mais eficaz é determinar a origem do problema e remover o material causador [13].



b)

Figura 4.10 - (a) e (b) Exemplos de olhos de peixe. [EMBRATECNO, 2011]

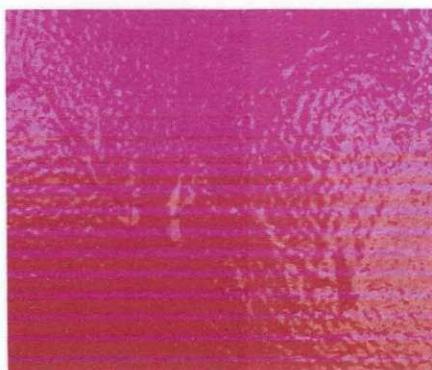
4.5.2 Escorrimento

Em superfícies verticais as tintas tendem, por ação da gravidade, a se deslocar enquanto líquidas, em forma de onda ou gotas até a parte inferior da mesma, Figura 4.11.

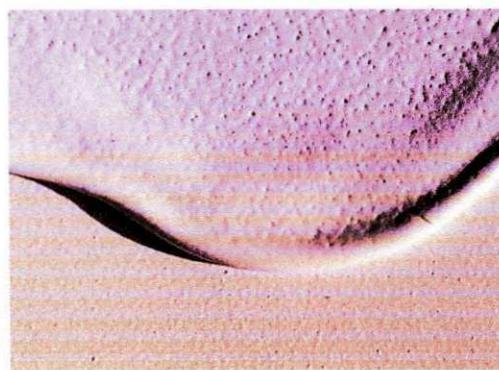
Estes termos descrevem os movimentos provocados pela força gravitacional que ocorrem em revestimentos que se encontram na posição vertical. Este defeito é devido a uma mobilidade excessiva (viscosidade muito baixa) e pode ocorrer durante a aplicação ou quando a tinta é curada na estufa. O escorrimento pode ser diminuído pelo aumento da viscosidade da tinta ou pela aplicação de camadas de tinta mais finas [13].

Para Raphael Condessa [14] as principais causas do escorrimento, são:

- Aplicação excessiva de tinta;
- Excesso de diluição da tinta;
- Erro na proporção de medida para mistura em tintas com mais de um componente.



a)



b)

Figura 4.11 - (a) e (b) Exemplos de escorrimentos. [EMBRATECNO, 2011]

4.5.3 Bolhas

As bolhas apresentam-se como protuberâncias semi-esféricas que variam de tamanho e intensidade, Figura 4.12 [15].

Suas principais causas são:

- ✓ Ambiente muito quente durante a pintura;
- ✓ Alta viscosidade da tinta;
- ✓ Uso de thinners ou diluentes não recomendados;
- ✓ Regulagem inadequada do revólver de pulverização;
- ✓ Velocidade de aplicação e distância entre o revólver e a superfície incorreta;
- ✓ Intervalo insuficiente entre demãos;
- ✓ Inabilidade do Pintor.



a)



b)

Figura 4.12 - (a) e (b) Exemplos de bolhas. [EMBRATECNO, 2011]

4.5.4 “Casca de Laranja”

A "casca de laranja" é uma aspereza ou ondulação que lembra o aspecto rugoso da casca de uma laranja. A "casca de laranja" é, muitas vezes, causada por nivelamento insuficiente e é um defeito comum, tanto em tintas

aplicadas por pulverização como nas aplicadas a rolo. A "casca de laranja" pode ser o resultado de viscosidade elevada da película, que restringe o fluxo e o nivelamento do filme, Figura 4.13. Pode ser também, o resultado de movimentos provocados por gradientes de tensão superficial. As pulverizações secas ou solventes muito voláteis também podem contribuir para a formação da "casca de laranja". Se o problema for devido à viscosidade muito elevada, a solução deste defeito pode ser o uso de menor teor de sólidos, uma resina de menor peso molecular ou uma concentração menor de pigmentos. Agentes controladores de fluidez podem ser eficazes na eliminação dos movimentos induzidos por tensão superficial [13].

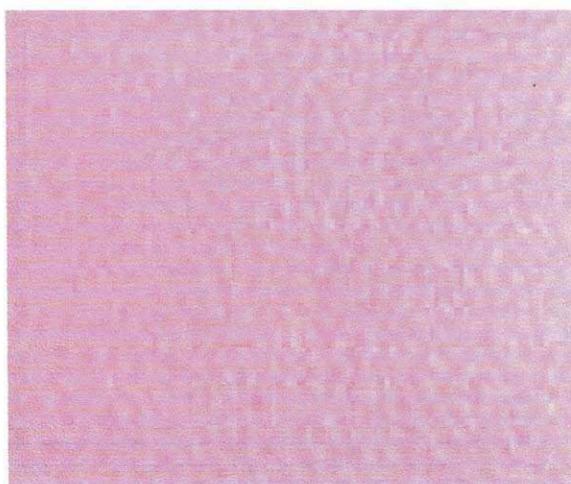


Figura 4.13 - Exemplo de "Casca de laranja". [EMBRATECNO, 2011]

4.5.5 Descascamento

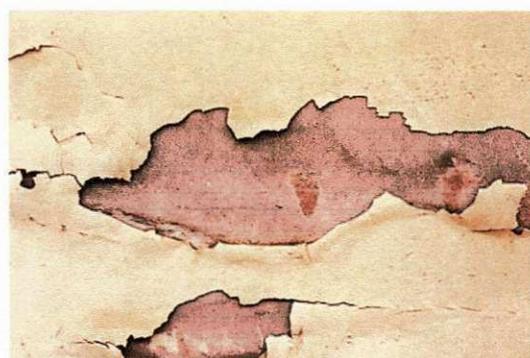
Descascamento do filme de tinta do substrato, parcial ou totalmente, consiste na perda de aderência entre a película e o substrato ou entre demãos, Figura 4.14.

As principais causas de descascamento são:

- ✓ Contaminação da superfície principalmente por óleo, sal, graxa, água, umidade, etc.;
- ✓ Tintas incompatíveis;
- ✓ Superfícies de difícil aderência (lisas, com pouca rugosidade) ou pela falta de um primer de aderência
- ✓ Condensação no substrato
- ✓ Aplicação de tinta sobre superfície não tratada.



a)



b)

Figura 4.14 – (a) e (b) Exemplos de descascamento. [EMBRATECNO, 2011]

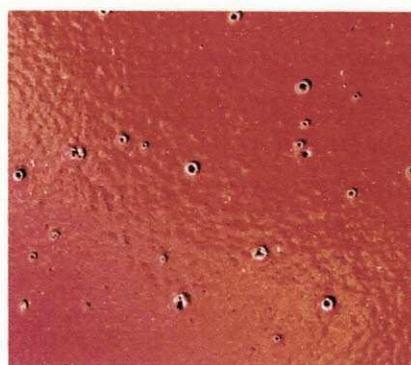
4.5.6 Crateras

Crateras são pequenas depressões semi-esféricas numa película. Estas depressões possuem, freqüentemente, gotas ou bandas de material no centro e bordas circulares mais altas. As causas mais comuns das crateras são bolhas não colapsadas, partículas de gel de resinas e contaminação do substrato com: sujeira, fibras, auxiliares de filtração, gotículas de silicone não dissolvido ou de óleo (da linha de ar comprimido ou dos equipamentos), Figura 4.15. As crateras podem ser eliminadas freqüentemente com cuidados na fabricação e na aplicação da tinta. A diluição cuidadosa da tinta e da resina com solventes e diluentes pode evitar a formação de partículas de géis. Cuidados na limpeza, no bombeamento e na transferência da tinta e das

resinas durante a fabricação impedem a precipitação devida a incompatibilidades entre os materiais nas tubulações. A manutenção dos filtros e a filtração adequada podem eliminar géis de resinas, aglomerados de pigmentos, fibras, etc. do produto acabado. O uso de separadores de óleo e filtros nas linhas de ar comprimido, bem como a manutenção periódica pode reduzir a incidência da contaminação durante a aplicação a revólver. A ventilação adequada e o controle do ar podem reduzir as bolhas não colapsadas e as poeiras [13].



a)



b)

Figura 4.15 - (a) e (b) Exemplos de crateras. [EMBRATECNO, 2011]

4.5.7 Poros

As porosidades se manifestam nos revestimentos de pinturas na forma de pequenas discontinuidades em forma de orifícios, Figura 4.16 [15].

Suas principais causas são:

- ✓ Oclusão de ar ou solvente no filme;
- ✓ Superfície contaminada;
- ✓ Atomização deficiente do equipamento, muito grossa;
- ✓ Espessura insuficiente do revestimento;
- ✓ Perfil de rugosidade muito alto do revestimento;

- ✓ Temperatura da superfície muito alta;
- ✓ Falta de habilidade do pintor;



a)



b)

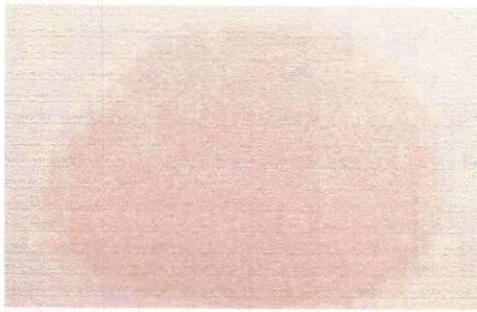
Figura 4.16 - (a) e (b) Exemplos de poros. [EMBRATECNO, 2011]

4.5.8 Manchas

Manifesta-se pela presença de manchas na superfície do revestimento, Figura 4.17.

Causas:

- ✓ Contaminação da superfície, dos equipamentos de aplicação ou da área de trabalho;
- ✓ Tinta mal misturada, heterogênea;
- ✓ Respingos de solvente sobre a tinta fresca ou seca.



a)



b)

Figura 4.17 - (a) e (b) Exemplos de manchas em superfícies pintadas. [EMBRATECNO, 2011]

4.5.9 Impregnação de Materiais Estranhos

Pinturas contaminadas com poeiras e/ou grãos abrasivos, contaminação da tinta ainda úmida pelo abrasivo que cai sobre ela são exemplos de materiais estranhos que podem impregnar nas pinturas, Figura 4.18. Essa contaminação também pode acontecer devido à presença de pelos ou fiapos na superfície da pintura.



a)



b)

Figura 4.18 - (a) e (b) Exemplos de materiais estranhos em pinturas. [EMBRATECNO, 2011]

4.6 Preparação da Superfície Antes da Deposição Metálica

A preparação da superfície inclui a limpeza da mesma, pois é o passo mais importante em qualquer operação de revestimento. Para uma boa aderência dos revestimentos as superfícies devem ser livres de óleos, produtos de corrosão e partículas soltas. Os metais podem ser limpos com solventes, produtos químicos, lixamento, jateamento e escovação. A escolha do método de limpeza depende do substrato e do tamanho e forma do objeto.

O jateamento abrasivo, Figura 4.19, é a técnica mais utilizada para obtenção de limpeza e rugosidade da superfície, consistindo na propulsão de partículas abrasivas na direção do substrato a velocidades relativamente altas [16]. Para selecionar de maneira correta o abrasivo mais adequado para determinado jateamento, deve-se considerar o tipo de substrato, a condição da superfície antes da limpeza, a técnica de jateamento abrasivo utilizada, os graus de limpeza e de rugosidade desejados com o jateamento e a reutilização ou não do abrasivo. Além disso, os abrasivos devem estar secos, limpos, pontudos e cortantes, livres de óleo, graxa, umidade e outros contaminantes [17].

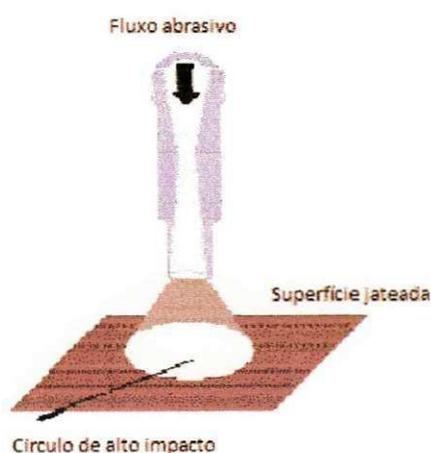


Figura 4.19 - Jateamento abrasivo. [SILVA, 2009]

4.7 Caracterizações das Propriedades dos Revestimentos

Independentemente das excelentes propriedades que um revestimento venha possuir estas serão inúteis a menos que ele também tenha uma boa aderência. Na Figura 4.20 observa-se um tipo de arranjo para um teste de aderência.

A aderência é um requisito essencial para o bom desempenho do revestimento, pois de nada adianta ter uma camada com espessura ideal e livre de poros se a mesma não tem aderência suficiente. Ela é medida, em geral, como a força necessária para separar o revestimento do substrato, sendo o preparo adequado da superfície do substrato o fator determinante para obtenção de bons resultados [17].

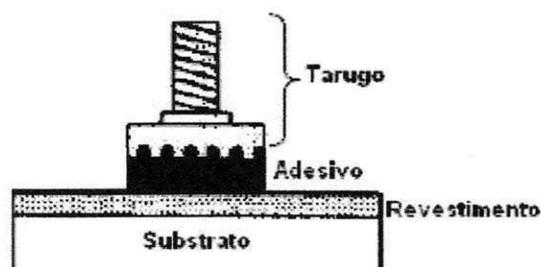


Figura 4.20 - Arranjo básico de um ensaio de tração. [MENEZES, 2007]

Outra forma de se medir a aderência de pinturas é através da norma NBR 11003 [18] que determina que se faça um corte na forma de "X" sobre a superfície pintada com estilete de aço. Após a marcação é colocado um adesivo sobre o corte e então o adesivo é retirado. Observa-se então quanto da tinta ficou no adesivo e tem-se uma avaliação da aderência da pintura. Esse método de corte é aplicado para espessuras de até 600 μm . Para espessuras de até 125 μm usa-se o corte em grade, onde um dispositivo contendo seis gumes é utilizado para se efetuar os cortes, Figura 4.21.

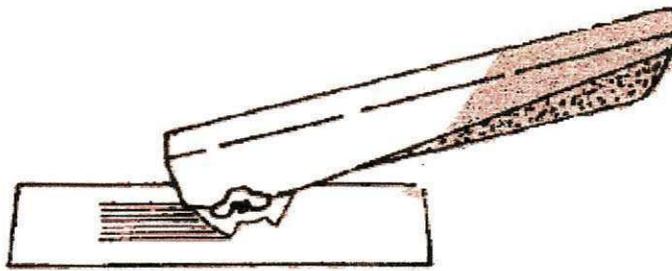


Figura 4.21 - Esquema de cortes no revestimento para testes de aderência. [NBR 11003, 2009]

Muitas das propriedades dos revestimentos, tais como adesão e resistência à corrosão estão diretamente relacionadas à porosidade. A porosidade é relacionada por muitos parâmetros. Estes incluem características da superfície do substrato, como aspereza e morfologia, pré-tratamento de substrato e espessura do revestimento.

Apesar de na maioria das vezes as porosidades causarem diminuição da aderência entre o revestimento e o substrato e diminuição da resistência à corrosão, a existência de poros num revestimento pode não ser prejudicial. Pelo contrário, existem casos onde a porosidade é desejada, por exemplo, em revestimentos usados como barreira térmica que são geralmente compostos por óxidos cerâmicos, onde a inclusão de 8 a 15 % de porosidade aumenta ainda mais suas capacidades isolantes. A porosidade também aumenta a resistência a choques térmicos e ciclos de temperatura, além de ser muito útil em próteses de implantes médicos, onde 4% de poros são incluídos com o objetivo de permitir que a matéria do osso cresça entre o revestimento e com isso o processo de cicatrização seja acelerado, Figura 4.22, [19].



Figura 4.22 - Porosidade em implantes médicos. [www.protesedoquadril.com.br Acesso em: 29/11/2011]

4.8 Métodos de Avaliação de Falhas em Revestimentos

Para observação das trincas nos revestimentos oriundas dos ensaios estáticos faz-se necessário o uso de algumas técnicas, entre elas podemos citar: método da queda de potencial, ultra-som, emissão acústica e observação visual.

4.8.1 Método da Queda de Potencial

Esse método tem a vantagem de ser um método de identificação de trincas rápido e simples. Um dispositivo mede a queda de tensão entre as bordas de uma trinca superficial que é decorrente direto da impedância do material. Esse sinal é amplificado e lido.

Para efetuar a medição, um equipamento gera uma tensão que passa por um amplificador. Esse sinal é transmitido ao corpo de prova por meio de conectores. A corrente aplicada no corpo de prova proporciona uma queda de tensão quando a mesma encontra uma trinca. O sinal medido é passado por um amplificador que também permite eliminar ruídos.

Esse método embora eficiente para muitos casos, não identificaria uma trinca pequena de dimensões da ordem de microns.

4.8.2 Método da Inspeção Visual

O teste da inspeção visual é um método de ensaio não destrutivo que tem sido negligenciado por grande parte da indústria. Foi o primeiro teste não destrutivo usado na indústria de ensaios não destrutivos, mas foi o último método a ser formalmente reconhecido.

Alguns cuidados devem ser levados em consideração na realização do teste visual, como por exemplo, a quantidade de luz que atinge o olho partindo de um objeto depende da limpeza da superfície do mesmo. No teste visual, a quantidade de luz pode ser afetada pela distância, reflectância, brilho, contraste, a limpeza, textura, tamanho e forma do objeto de teste.

A limpeza é um requisito básico para um teste visual bem sucedido. A sujeira pode mascarar ou ocultar objetos de análise como pequenas trincas superficiais, e superfícies brilhantes podem causar ofuscamento e que impede a observação de defeitos. A temperatura excessiva pode causar distorções na visão devido ao efeito da onda de calor. Uma das grandes variáveis em ver um objeto é a quantidade de luz que é refletida a partir dele, e do ângulo em que a luz atinge o olho. A oxidação excessiva ou aspereza pode causar a difusão da luz e limitar a luz que volta para o olho. Isso pode ser facilmente corrigido aumentando a quantidade de luz ou melhorando a condição da superfície do objeto em exame.

A quantidade de luz necessária para um teste visual depende de vários fatores, como velocidade ou reflexão, precisão e outras variáveis de controle. Estas variáveis incluem processos fisiológicos, estados psicológicos e experiência do inspetor, saúde e fadiga. Todos esses fatores contribuem para a precisão de uma inspeção visual. Um dos fatores-chave para ver um objeto iluminado é a diferença (contraste) entre a luz sobre o objeto e o fundo [20].

Esse método também não seria eficiente na identificação de uma trinca de dimensões microscópicas.

4.8.3 Método da Emissão Acústica

A palavra "acústica" tem origem na palavra grega "*akoustikos*", que tem a ver com "Audição". Por séculos, o precursor do colapso estrutural tem sido a de que os sons são emitidos antes da falha de um componente. Um galho de árvore emite um som antes da quebra, o gelo fino produz sons que alertam o iminente colapso. A análise dessas emissões se tornou uma ciência em si, tornou-se um teste reconhecido como não destrutivo (END). Método comumente usado para detectar e localizar falhas em estruturas mecanicamente carregadas. A emissão acústica pode fornecer informações completas sobre a origem de uma descontinuidade (falha) em um componente tensionado e também fornece informações relativas ao desenvolvimento dessa falha quando componente é submetido a uma tensão contínua ou repetitiva [20].

A emissão acústica constitui uma técnica de ensaio não destrutivo (END) baseada na captação de sinais sonoros resultantes das ondas de tensão geradas durante um processo dinâmico de deformação [21]. Uma instrumentação adequada, formada por sensores localizados ao longo da estrutura, transforma esses sinais em sinais elétricos e produz a informação que permite ao operador avaliar as condições e o comportamento do material quando em serviço. A tensão é o estímulo que produz os sinais de emissão acústica podendo ser induzida de diversas formas tais como o carregamento mecânico, pressurização com um gás ou um líquido, por gradientes térmicos ou outros. Na Figura 4.23 observa-se o espectro de uma onda sonora.

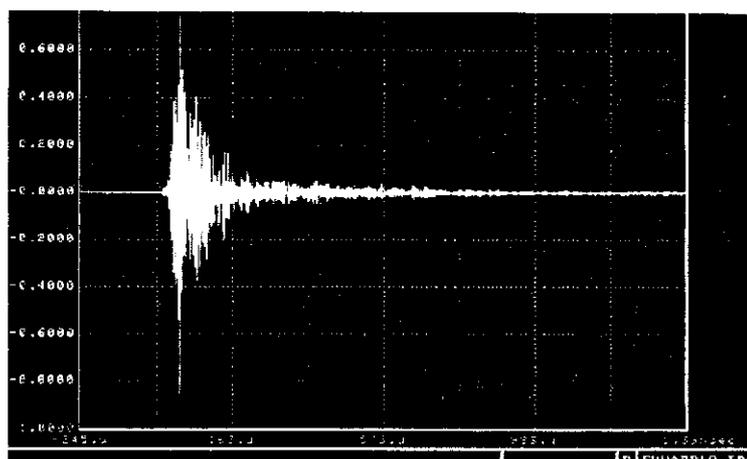


Figura 4.23 - Sinal de onda mecânica. [HELLIER, 2003]

A emissão acústica é um método de análise que permite a detecção do crescimento de fissuras, fratura de inclusões, transformações dentro do campo metalúrgico ou outros efeitos que produzam emissão detectável. Modernamente, podem ser detectadas emissões produzidas por níveis muito baixos de deformações em alguns tipos de materiais [21].

A emissão acústica como método de controle não destrutivo tem aplicação no estudo do comportamento de juntas coladas, nomeadamente na degradação das propriedades dos filmes adesivos e na progressão da corrosão em estruturas. Em alguns casos a emissão acústica revela-se uma técnica mais efetiva que a radiografia, sobretudo porque implica reduções de custo da ordem de 75%.

Na cadeia de emissão acústica estão incluídas três funções essenciais: detecção, condicionamento e tratamento do sinal, conforme ilustra a Figura 4.24; a cadeia é constituída por um ou vários sensores colocados sobre a estrutura, um pré-amplificador, um amplificador e nos modernos sistemas a unidade de tratamento onde se inclui um discriminador e um sistema de registro e análise de sinais.

Esse método é muito indicado quanto se tem como objeto de estudo um material frágil, uma vez que materiais frágeis propagam mais facilmente o som

em comparação com os materiais dúcteis, que é o caso do material usado no referido trabalho.

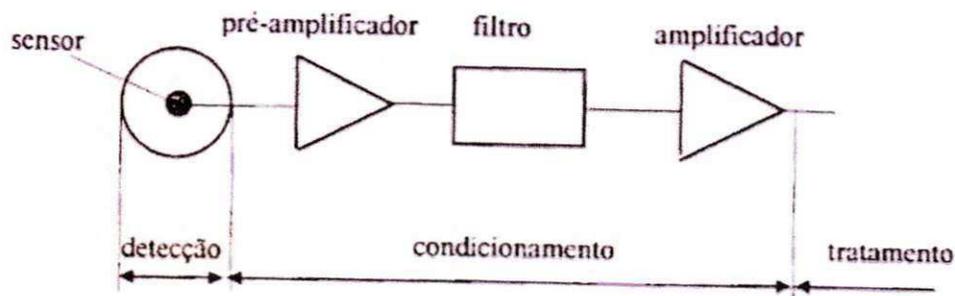


Figura 4.24- Cadeia de emissão acústica. [MAGALHÃES, 1999]

4.8.4 Método de Ultra Som

O método de ultra-som baseia-se na análise das modificações sofridas pelas ondas ultrasônicas quando ao se propagarem no interior do material atuam contra obstáculos que produzem fenômenos de reflexão e absorção devida a fricção interna. Os ultra-sons situam-se num domínio de frequências entre 0.5 e 20 MHz, frequências não captáveis pelo ouvido humano que tem como limite superior audível os 20 kHz. Na Figura 4.25 observa-se um típico caso de inspeção por ultra-som, onde o transdutor é posicionado sobre a amostra que se deseja inspecionar e quando as ondas ultrasônicas encontram uma descontinuidade (defeito) ela retorna mais cedo ao transdutor que identifica a mesma como uma amplitude.

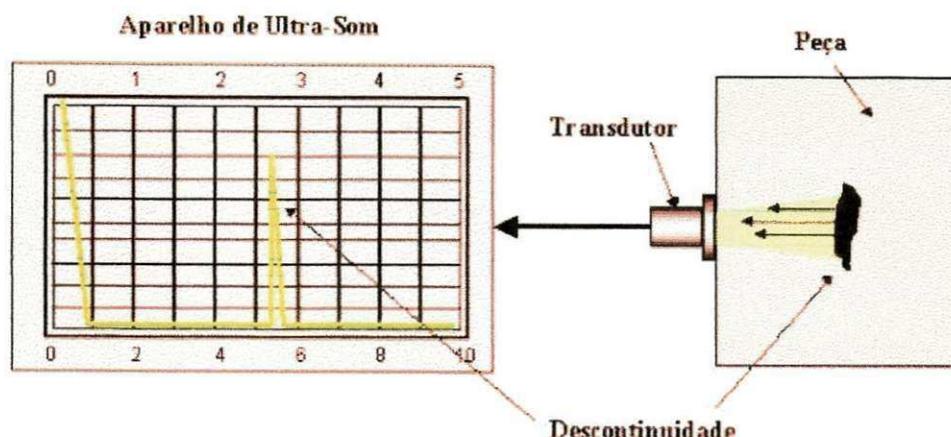


Figura 4.25 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-som. [ANDREUCCI, 2008]

Segundo Andreucci [22] o método ultra-sônico possui as seguintes vantagens e desvantagens com relação a outros métodos não destrutivos.

Vantagens:

O método ultra-sônico possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, por exemplo:

- ✓ Trincas devido ao tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia);
- ✓ Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção;
- ✓ No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados;
- ✓ Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultra-sônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação;
- ✓ A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultra-

sônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não a sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para a determinação de um reparo.

Limitações:

- ✓ Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor;
- ✓ O registro permanente do teste não é facilmente obtido;
- ✓ Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método;
- ✓ Requer o preparo da superfície para sua aplicação. Em alguns casos de inspeção de solda, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, que demanda tempo de fábrica.

Esse método é muito utilizado na detecção e caracterização de vazios em juntas adesivas. A continuidade física, ou a sua ausência, através das interfaces afeta a resposta característica da onda propagada e da onda refletida ao longo da junta e das interfaces. Em se tratando de juntas adesivas as principais limitações resultam da espessura do adesivo e do efeito de interferência nas zonas de transição correspondentes aos extremos da junta adesiva. Este efeito de interferência pode ser interpretado como zonas de colagem deficientes, fato esse que pode não ser verdadeiro. Os defeitos detectáveis com maior facilidade são as porosidades, os vazios e a corrosão possível entre o adesivo e o substrato, na linha de colagem. Uma deficiente preparação da superfície do substrato, uma temperatura de cura insuficiente, ou a contaminação do adesivo, que na prática sabemos conduzem a ligações de má qualidade, não são detectáveis pelo ultra-som [21].

Para espessuras superiores a 13 mm são habituais frequências entre os 0.5 e os 5 MHz. Quando um defeito tem uma profundidade superior a 0.5 mm em

espessuras de 2.5 a 13 mm são recomendadas frequências entre os 5 e os 20 MHz. As elevadas frequências, pelo contrario, são utilizadas na detecção de defeitos que se situam muito próximo da superfície. Para espessuras de peças a inspecionar até 2.5 mm é comum utilizar frequências que vão desde a gama dos 30-75 MHz até as mais altas frequências [21].

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Para a realização deste estudo, o substrato foi uma chapa de aço ASTM A 516 Gr. 60, espessura de 6 mm da USIMINAS – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais, cuja composição química (% Peso) está apresentada na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Composição química do aço ASTM A 516 Gr 60

Análise	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
	0,16	0,16	0,81	0,022	0,007	0,033	0,02	0,002

V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Ca	Sb
0,003	0,004	0,03	0,01	0,01	0,001	0,0056	0,0002	0,0003	0,00

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 Gr. 60

Propriedade Mecânica	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	ϵ (%)
	335,5	484	19,035

A chapa foi adquirida na dimensão de 2,60m x 6,00m x 6,00 mm. Fazendo-se uso de um maçarico a chapa foi cortada em quatro partes iguais nas dimensões de 2,60 x 1,50m, e em seguida 1,30 x 1,50m. Retirou-se uma amostra da chapa com a finalidade de se averiguar a direção de laminação. A

direção de laminação é importante porque os ensaios de tração foram conduzidos com o eixo de tração paralelo à direção de laminação, ou seja, os corpos de prova foram usinados nessa direção, onde se espera uma resistência mecânica maior do substrato. Para isso a amostra passou pelas etapas normais de preparação metalográfica para a identificação da orientação de laminação (lixamento com lixas d'água de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, seguindo-se de polimento com aluminas de granulometria números 4 (1,0 μm), 3 (0,3 μm) e 2 (0,05 μm)). Em seguida a amostra foi analisada por microscopia óptica, em que se verificou que a direção de laminação correspondia na chapa, com a direção das setas (longitudinal) indicada na Figura 5.1.

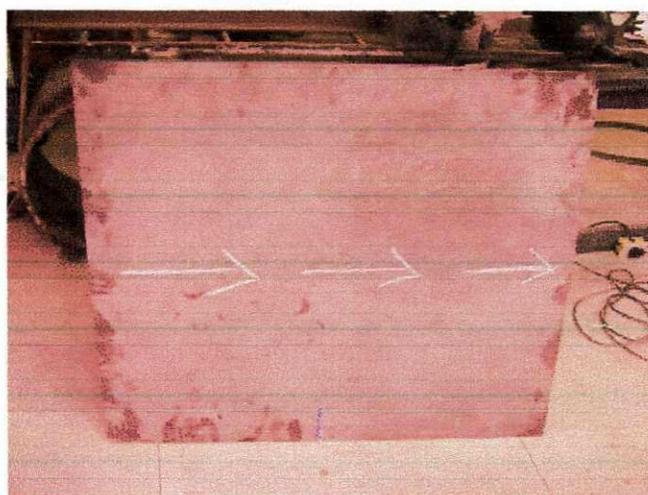


Figura 5.1 - Chapa mostrando o sentido de laminação

Depois de identificado o sentido de laminação, a chapa pôde ser fracionada nas dimensões dos corpos de provas de tração, sempre procurando o maior aproveitamento possível da chapa. A chapa foi enviada para o SENAI-PB onde os corpos de provas foram usinados. Destes, 21 foram retirados para os ensaios de tração. Na Figura 5.2 pode verificar-se as tiras de chapas utilizadas na confecção dos corpos de prova (os de dimensões menores na Figura 5.2).



Figura 5.2 - Chapa cortada

As dimensões dos corpos de prova foram estabelecidas tomando-se como base a norma de tração ASTM E 8M [3]. Assim sendo, seguem-se na Figura 5.3 as dimensões dos corpos de prova de tração.

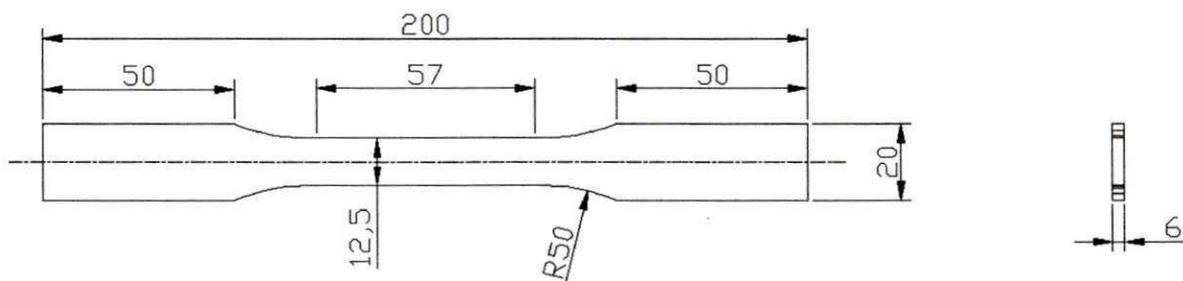


Figura 5.3 - Projeto e desenho do CP de tração (unidades em mm)

5.2 Métodos

5.2.1 Corpos de Prova Revestidos com Níquel Eletrolítico

Após a usinagem, os corpos de prova a serem revestidos com níquel eletrolítico foram limpos com acetona PA para retirada de camadas de óxidos na superfície. Em seguida os mesmos foram submetidos à máquina de eletroerosão disponível na empresa J. Anselmo, localizada no distrito industrial de Campina Grande – PB.

Para se obter a rugosidade desejada, a máquina precisa está calibrada na corrente elétrica adequada. A intensidade da corrente aplicada determina a distância mínima entre o substrato e a ferramenta que é chamada GAP, Figura 5.4. Assim quem determina a rugosidade da superfície é o GAP.

Para a realização dos diferentes níveis de rugosidade na superfície dos corpos de prova (que foram 20, 40 e 60 Ry - parâmetro de rugosidade máxima em micrometros), Figura 5.6, a máquina foi calibrada com os seguintes valores de corrente elétrica apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Valores de GAP e corrente utilizados

Rugosidade (μm)	Corrente (A)
20	3
40	5
60	8

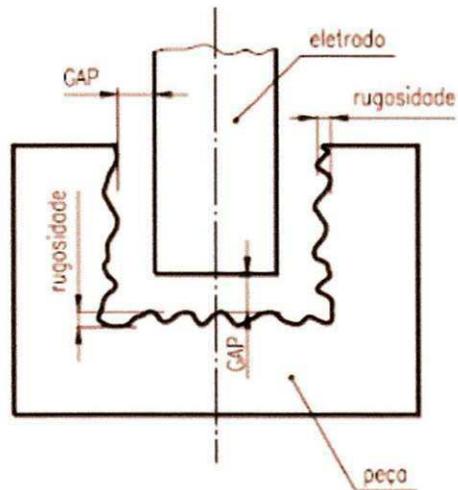


Figura 5.4 - Esquema que demonstra o GAP. [SCHMIDT, 2008]

A rugosidade do substrato foi medida através de um rugosímetro modelo SJ 201, Figura 5.5, disponível no laboratório de metrologia da UFC.



Figura 5.5 - Rugosímetro

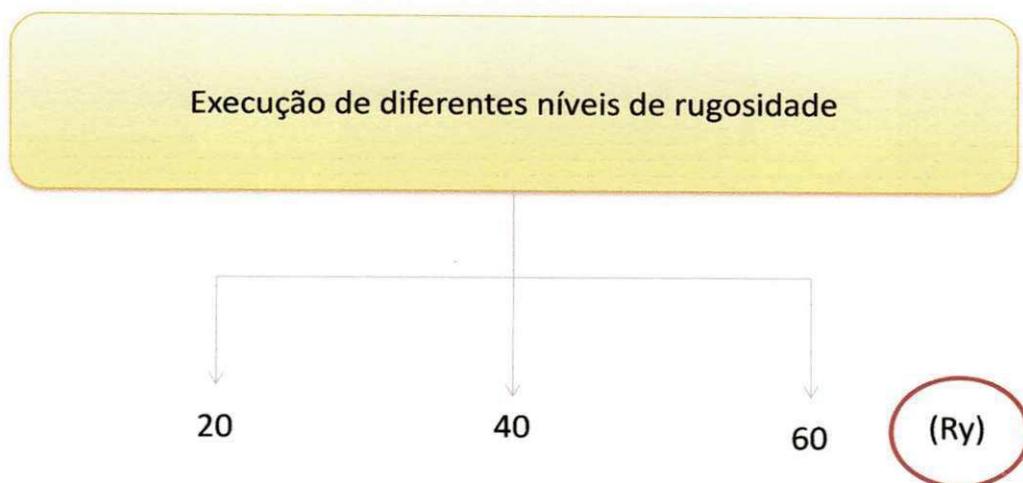


Figura 5.6 – Níveis de rugosidade.

Posteriormente os mesmos foram revestidos com níquel eletrolítico para os ensaios de resistência à fratura. Os revestimentos de níquel eletrolítico foram realizados no núcleo de corrosão da UFCG em Cuité-PB.

Os corpos de prova revestidos com níquel para análise e identificação do início da fratura deste revestimento foram em número de nove, denominados de série “A” com $40\mu\text{m}$ de rugosidade, série “B” com rugosidade de $20\mu\text{m}$ e série “C” com rugosidade de $60\mu\text{m}$ (fator Ry).

Os revestimentos de níquel aplicados sobre as amostras da série “A”, “B” e “C” confeccionadas em aço ASTM A 516 Gr 60, foram obtidos a partir de um banho de níquel convencional. Na preparação do banho eletroquímico foram empregados reagentes com elevado grau de pureza analítica e água bidestilada e deionizada. A composição do eletrólito e as condições operacionais estão apresentadas na tabela 5.4. Como eletrodos auxiliares (ânodos) foram utilizados duas placas de níquel puro (eletrolítico), com área geométrica de $7 \times 10^3, 00 \text{ mm}^2$ cada, dispostas paralelamente. Os eletrodos de trabalho (cátodos) eram as amostras denominadas de série “A”, “B” e “C”. A eletrodeposição foi feita em uma célula eletrolítica convencional termostaticada com capacidade para 1000 mL, conduzida em modo galvanostático e com corrente contínua. A disposição dos eletrodos na célula foi feita de modo que

durante a eletrodeposição o eletrodo de trabalho fica-se inserido entre as placas anódicas a uma distância destas de 40,00 mm. Como fonte de corrente contínua foi utilizado um retificador de corrente da Elquimbra, modelo R SILS-2035, com tensão e corrente de saída de 10 V e 10 A, respectivamente.

Os experimentos foram realizados conforme a seguinte seqüência de tratamentos superficiais:

- Desengraxe em solução de NaOH 30% m/v à temperatura ambiente por 1,0 a 5,0 minutos;
- Lavagem dupla em água bidestilada;
- Ativação em solução de HCl 10% v/v à temperatura ambiente por 1,0 a 5,0 minutos;
- Lavagem dupla em água bidestilada;
- Execução do processo de eletrodeposição;
- Lavagem dupla em água bidestilada;
- Secagem em fluxo de ar quente, $T < 333 \text{ K} (< 60 \text{ }^\circ\text{C})$.

Tabela 5.4 - Composição das soluções eletrolíticas / condições operacionais de eletrodeposição do Ni.

COMPONENTES	CONCENTRAÇÃO / g L ⁻¹	FUNÇÃO
NiSO ₄ .6H ₂ O	280,00 (g L ⁻¹)	Fonte de Ni
NiCl ₂ .6H ₂ O	80,00 (g L ⁻¹)	Fonte de Ni
H ₃ BO ₃	45,00 (g L ⁻¹)	Ajuste de pH
Aditivo abrillantador SurTec NP-A ®	2,0 (mL ⁻¹)	Complexante
Aditivo nivelador ® SurTec 858 fast 2 básico	20, 0 (mL ⁻¹)	Complexante
Aditivo molhador ® SurTec 858 part 3	1, 0 (mL ⁻¹)	Redutor de tensão superficial

- pH = 3,5 -4,5
- Temperatura 50°C
- Densidade de corrente 3,5 A/dm²
- Agitação do eletrólito (agitação magnética) 100 rpm
- Relação área anódica / área catódica ~3/1
- Tempo de eletrólise 15 minutos
- Carga 1575 C

Nas Figuras 5.7 a 5.9, observar-se os corpos de prova revestidos com níquel para os ensaios de tração: série A (Figura 5.7), série B (Figura 5.8) e série C (Figura 5.9).

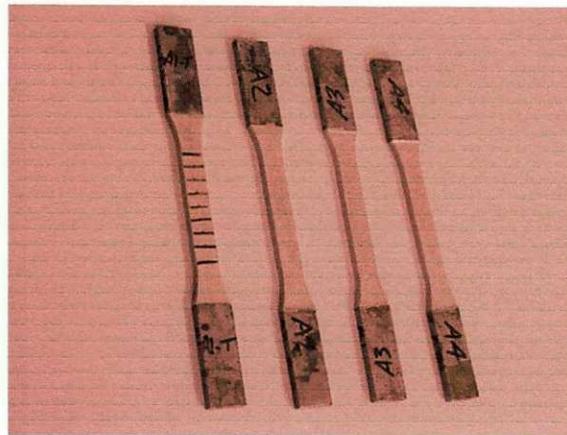


Figura 5.7 - Revestimentos de níquel eletrolítico série "A" (Perfil de rugosidade do substrato de 40µm)

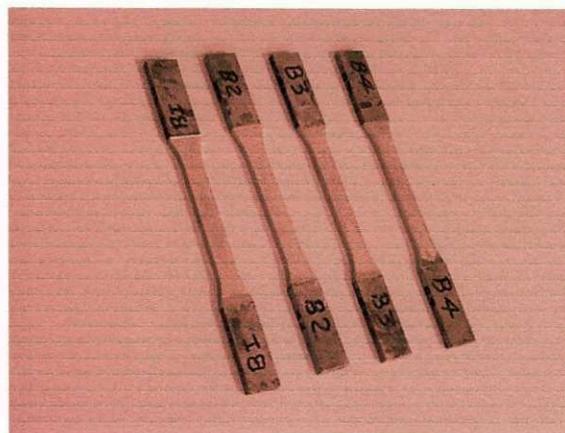


Figura 5.8 - Revestimentos de níquel eletrolítico série "B" (Perfil de rugosidade do substrato de 20µm)

Observa-se que somente a parte útil do corpo de prova foi revestida, deixando a parte onde a garra de tração é fixada livre do revestimento. O isolamento da cabeça do corpo de prova, onde a garra é fixada, foi feito com uma fita adesiva.

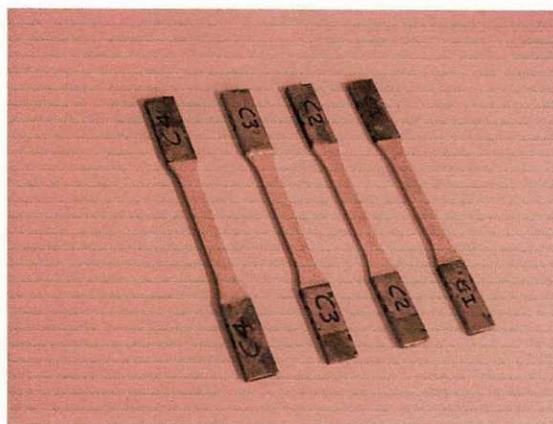


Figura 5.9 - Revestimentos de níquel eletrolítico série "C" (Perfil de rugosidade do substrato de 60 μ m)

5.2.2 Corpos de Prova Revestidos com Tintas Epóxi

Para a execução dos revestimentos com tintas epóxi, corpos de prova também foram enviados ao CENPES da PETROBRÁS. Foram aplicados três tipos de tintas protetoras desenvolvidas para a proteção contra corrosão. O número de corpos de prova enviados foram 9. A composição dos três tipos de tintas usadas nos revestimentos, denominados (T1, T2 e T3) não foram reveladas pela Petrobrás, entretanto, algumas características dos revestimentos podem ser observadas na Tabela 5.5. O perfil de rugosidade do substrato para as tintas foi de 80 μ m, valor este alcançado através de um jateamento abrasivo a seco. Nas Figuras 5.10 a 5.12, podem observar-se os corpos de prova revestidos com os três tipos de tintas protetoras: série T1 (Figura 5.10), série T2 (Figura 5.11) e série T3 (Figura 5.12).

Tabela 5.5 – Algumas características das tintas protetoras Epóxi "Novolac" – Norma N – 2912 (Petrobrás)

Tipo I	De cura térmica ou à temperatura ambiente
Tipo II	Sem solventes, de cura à temperatura ambiente
Tipo III	Sem solventes, de cura à temperatura ambiente, pigmentada com flocos de vidro ou cargas cerâmicas

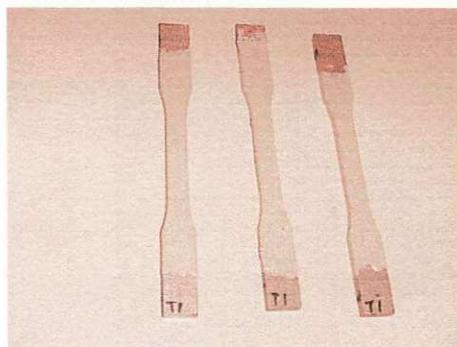


Figura 5.10 - Revestimentos de tintas série "T1" (perfil de rugosidade do substrato de 80 µm)

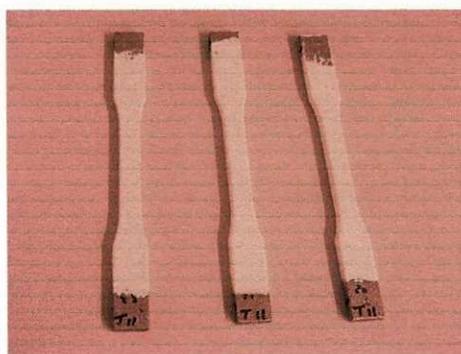


Figura 5.11 - Revestimentos de tintas série "T2" (perfil de rugosidade do substrato de 80 µm)

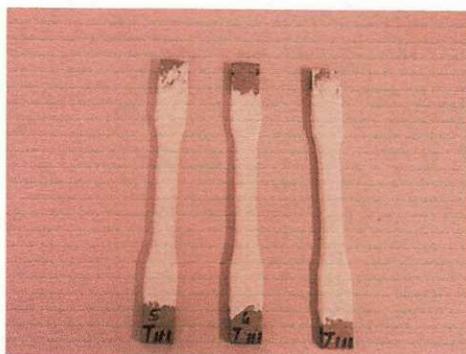


Figura 5.12 - Revestimentos de tintas série "T3" (perfil de rugosidade do substrato de 80 μm)

5.2.3 Ensaio de Tração dos Corpos de Prova Revestidos

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LAMMEA) da UFCG nas condições normais de temperatura (ambiente). Os corpos de prova foram submetidos a cargas de 30, 50, 70, 90, 110, 120 e 130% do limite de escoamento do substrato. A velocidade de deslocamento do atuador da máquina de ensaios, durante a aplicação de carga, foi de 0,5 mm/min. Durante os ensaios observava-se: se alguma trinca havia iniciado no revestimento e para que valor de carregamento.

Os testes seguiram a seguinte estratégia: os corpos de prova eram tracionados para cada nível de carga estabelecido, descarregados e, então, eram analisados através de microscopia óptica. Caso não houvesse a ocorrência de trinca o corpo de prova era então recarregado ao nível seguinte de carga até a verificação da trinca. Como para cada tipo de revestimento tinha-se disponível três corpos de prova, estabeleceu-se a seguinte dinâmica de testes: a) o primeiro corpo de prova era ensaiado com os seguintes níveis de cargas: 30%, 50%, 70%, 90% e 110% da tensão de escoamento do substrato. Caso durante o carregamento de 110% da tensão de escoamento do substrato surgisse a trinca, então; b) o segundo corpo de prova era carregado com os seguintes níveis de carga: 30%, 50%, 70%, 90% e 100% (o objetivo, nesse caso, era verificar se o início da fratura não teria ocorrido para o nível de carga anterior); c) o terceiro corpo de prova de cada série era, então, ensaiado

continuamente até alcançar o carregamento 90% da tensão de escoamento do substrato, com o intuito de verificar se a interrupção do carregamento poderia ter alguma influência nos resultados. Caso a trinca não fosse identificada neste nível de carga, o ensaio continuaria até a carga em que a primeira trinca (ou o início de fratura do revestimento) fosse observada.

Os resultados foram interpretados observando as seguintes características:

- a) O início da fratura no revestimento;
- b) A carga para a qual se tem o início da fratura ou da trinca;
- c) A análise do início da fratura ou da trinca por microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV).

5.2.4 Medida de Espessura da Camada dos Revestimentos

A medida da espessura da camada dos revestimentos de níquel eletrolítico e das tintas protetoras epóxi (Novolac) foram realizadas por meio de microscopia óptica. Para tanto, realizou-se um corte na seção transversal de um corpo de prova de cada série de revestimento, e em seguida esta seção foi analisada no microscópio óptico acoplado a um analisador de imagens, Figura 5.13. Fazendo-se uso de ferramentas de medição disponíveis no próprio software MSQ do microscópio realizou-se a medição de cada camada. Foram analisados sete pontos para cada camada de revestimento e feito então a média dos valores e seu desvio.

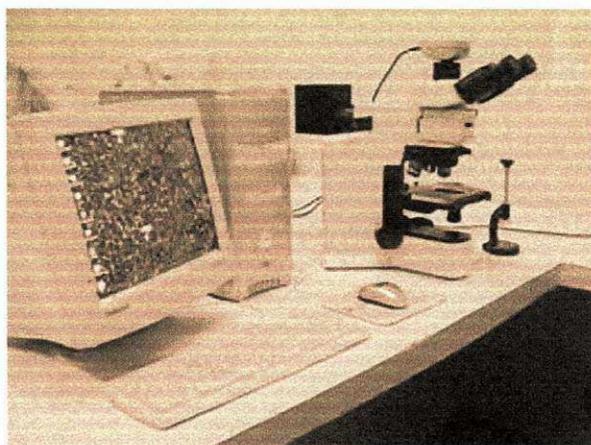


Figura 5.13 - Microscópio óptico acoplado a um computador

5.2.5 Teste de Aderência dos Revestimentos de Tintas Protetoras

O teste de aderência foi realizado nas dependências do CENPES-PETROBRAS. Para isso, foi usado o aparelho pneumático PATTI 110, Figura 5.14.

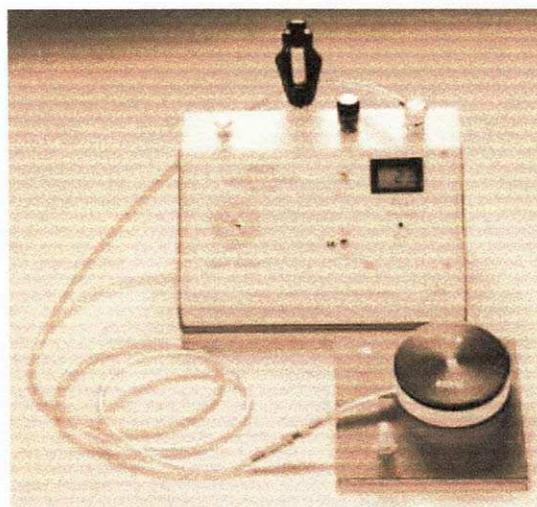


Figura 5.14 – Equipamento para teste de aderência. [ASTM 4541, 1995]

O teste de aderência foi do tipo tração seguindo a norma (ASTM 4541 – Métodos padronizados para determinar a aderência de revestimentos usando aparelhos portáteis). Este aparelho é um medidor que tem uma fonte de pressão (linha de ar comprimido) própria e um sistema de ajuste e controle que permite a escolha de diferentes cargas para o arrancamento do revestimento, Figura 5.15.

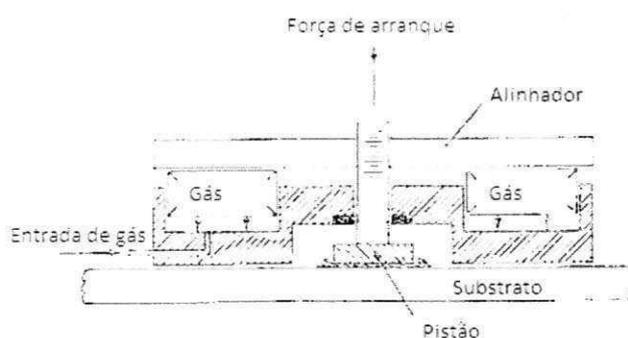


Figura 5.15 - Esquema do pistão pneumático. [ASTM 4541, 1995]

Na Figura 5.16 pode-se observar um fluxograma com o resumo das atividades realizadas de acordo com a metodologia usada.

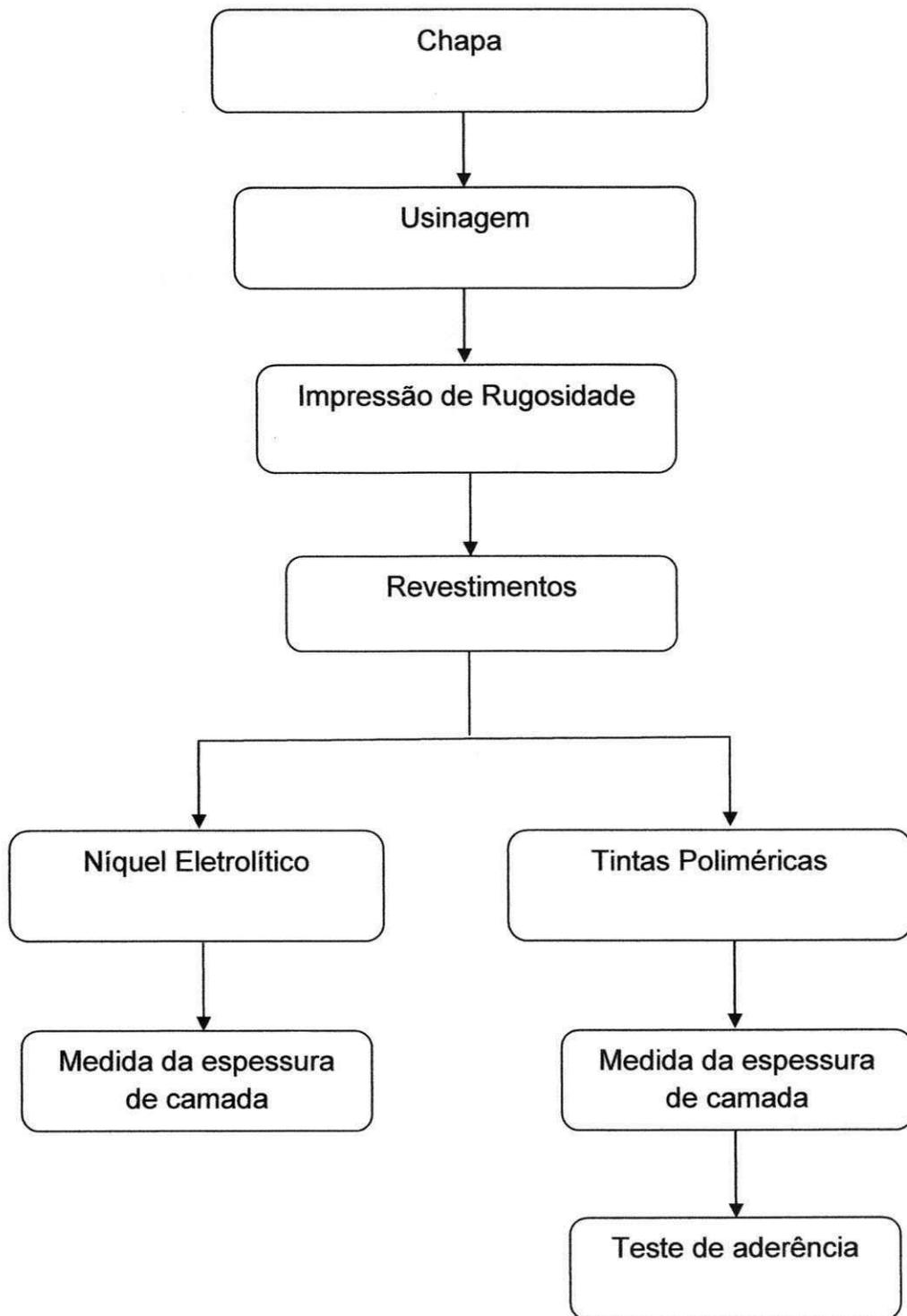


Figura 5.16 – Fluxograma dos procedimentos aplicados

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Espessura da Camada dos Revestimentos

6.1.1 Revestimentos de Níquel Eletrolítico

Na Figura 6.1 observa-se a espessura da camada de níquel eletrolítico depositada no substrato. O valor médio das medidas foi de $(20 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m})$ (obtidas através de microscopia óptica). Pela Tabela 4.1 [23] observa-se que este valor de espessura atende as condições de meios moderados e severos (ambientes industriais), entretanto, de certa forma não aconselhado para situações de severidade mais elevada.

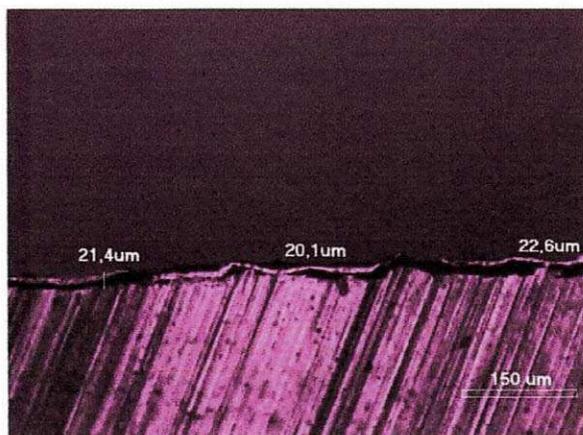


Figura 6.1 – Espessura da camada de níquel eletrolítico. Aumento de 100X.

6.1.2 Revestimentos de Tintas Protetoras

Para os revestimentos com os três tipos de tintas protetoras, T1, T2 e T3, as espessuras médias das camadas foram: tipo T1 ($100 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$); tipo T2 ($200 \mu\text{m} \pm 17 \mu\text{m}$); tipo T3 ($400 \mu\text{m} \pm 13 \mu\text{m}$). Nas Figuras 6.2 a 6.4 observam-se as espessura dos revestimentos para as tintas T1, T2 e T3.

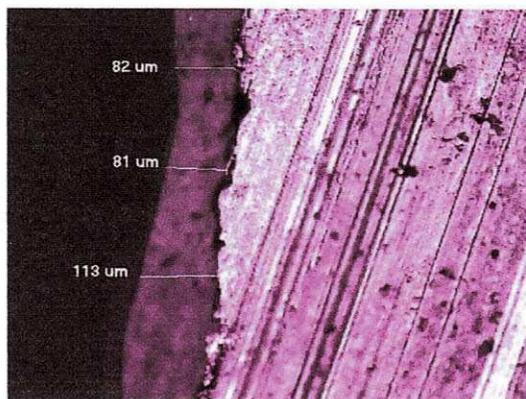


Figura 6.2 - Espessura da Série de "T1". Aumento de 100X.

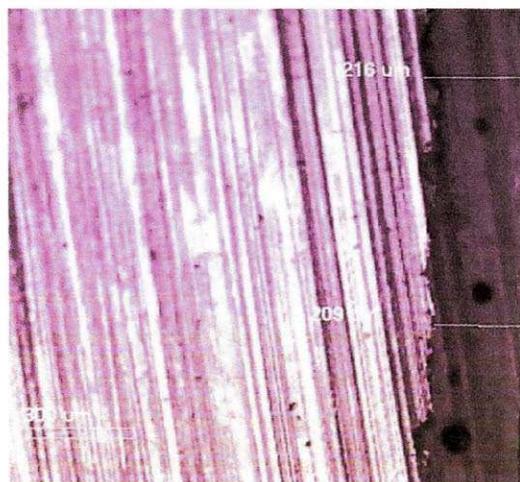


Figura 6.3- Espessura média para a Série de "T2". Aumento de 100X.

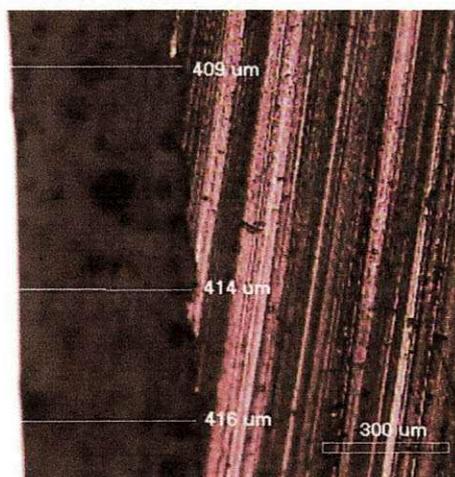


Figura 6.4- Espessura média para a Série de "T3". Aumento de 100X.

Pela Tabela 4.1 [23] observa-se que os valores médios encontrados, para os revestimentos com as tintas protetoras, atendem as condições de trabalho de “meio excepcionalmente severo” (exploração de petróleo), campo este de grande interesse de trabalho para pesquisas.

6.2 Análise Preliminar dos Corpos de Prova Revestidos

Realizou-se uma análise preliminar de todas as séries de revestimentos, antes de se realizar os testes, com o objetivo de verificar-se a presença de defeitos pré-existentes (que poderiam ser iniciadores da fratura durante o carregamento) nos revestimentos, provenientes do processo execução dos mesmos.

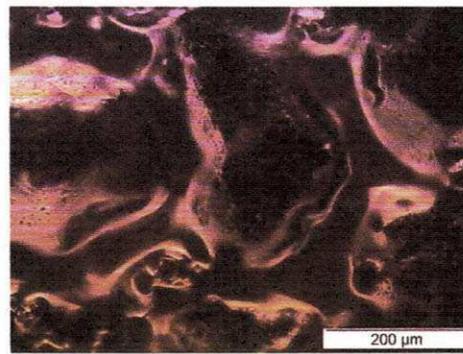
6.2.1 Revestimentos de Níquel Eletrolítico

Para as séries “A”, “B” e “C” verificou-se que a camada revestida reproduziu o perfil da superfície rugosa do substrato metálico, o que era esperado, visto que com camadas dessa ordem de espessura, 20 μ m, o revestimento reproduz o estado superficial do substrato, ou seja, quanto mais rugoso for o estado superficial do substrato antes do revestimento, assim também será o estado superficial do revestimento.

Não foram encontrados trincas nos corpos de prova revestidos com níquel antes do carregamento, conforme se observa nas Figuras 6.5 a 6.7. Observa-se, entretanto, a presença de inúmeras saliências nos revestimentos devido a camadas dessa espessura. Muito embora não tenha sido detectada a presença de trincas, essas saliências podem atuar como pontos concentradores de tensão o que facilita o surgimento de possíveis trincas nessas regiões.

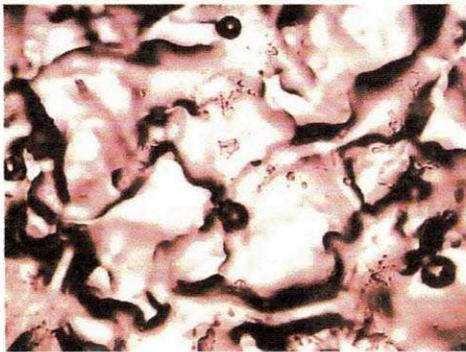


a)

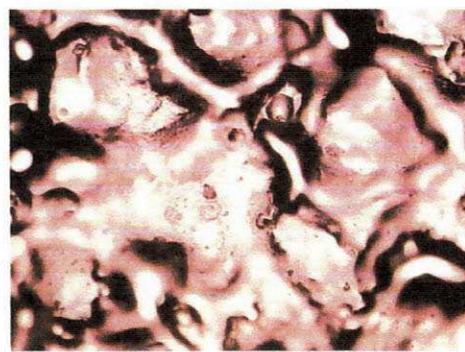


b)

Figura 6.5 – a) e b) - Aspecto superficial dos revestimentos de níquel antes dos carregamentos. Série A.

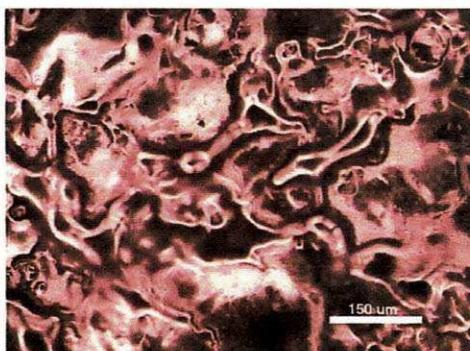


a)

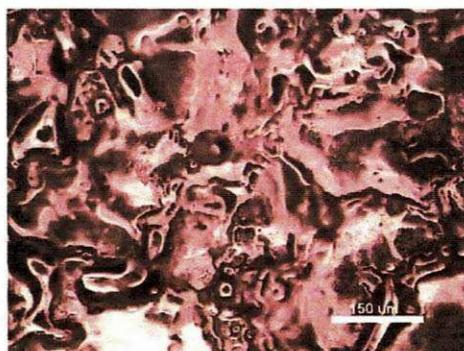


b)

Figura 6.6 - a) e b) - Aspecto superficial dos revestimentos de níquel antes dos carregamentos. Série B. Aumento de 200X.



a)



b)

Figura 6.7 - a) e b) - Aspecto superficial dos revestimentos de níquel antes dos carregamentos. Série C. Aumento de 100X.

6.2.2 Revestimentos de Tintas Protetoras

Para as séries de revestimentos de tintas epóxi (Novolac) dos tipos “T1”, “T2” e “T3” foram também realizadas análises preliminares com o intuito de se ter um registro fotográfico do estado superficial dos corpos de prova antes da realização dos carregamentos. Verificou-se através dessa análise preliminar a presença de alguns defeitos comuns nas pinturas, como por exemplo, “olhos de peixe”, “escorrimento”, “crateras” e “bolhas”. Nas imagens que se seguem verifica-se a presença de tais defeitos nos revestimentos.

Para a série “T1” encontraram-se impurezas, olhos de peixe e manchas, conforme observado nas Figuras 6.8 a 6.10.



Figura 6.8 - Olho de peixe da série "T1". Aumento: 100X.

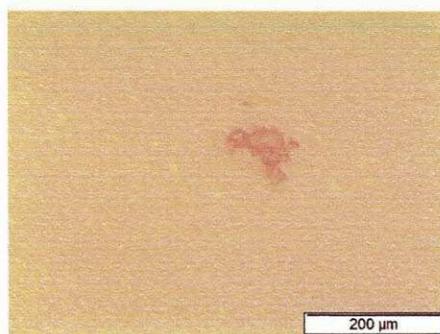
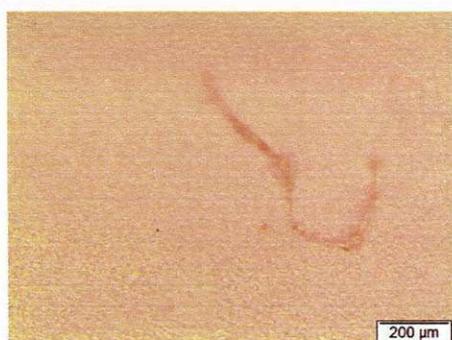
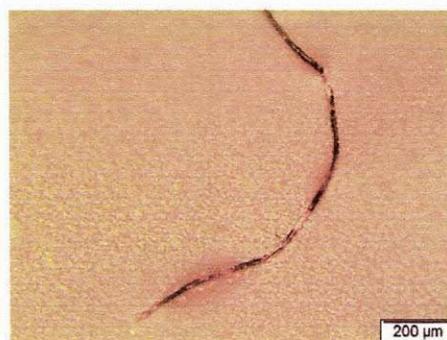


Figura 6.9 - Manchas na série "T1". Aumento: 200X.



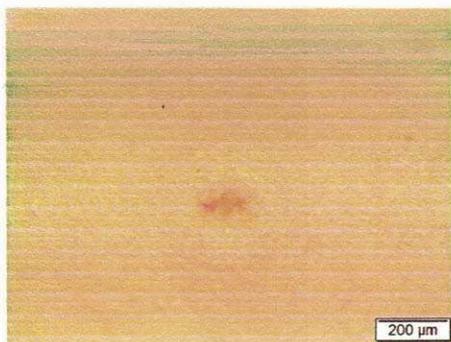
a)



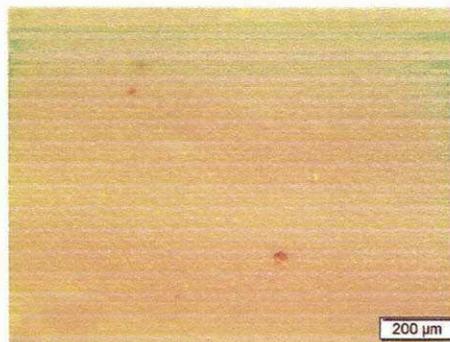
b)

Figura 6.10 - Impurezas na série "T1" (a) Sujeira; (b) Pêlos. Aumento: 100X.

Para a série "T2", da mesma forma, foram encontrados, olhos de peixe, crateras, manchas, impurezas, Figura 6.11.



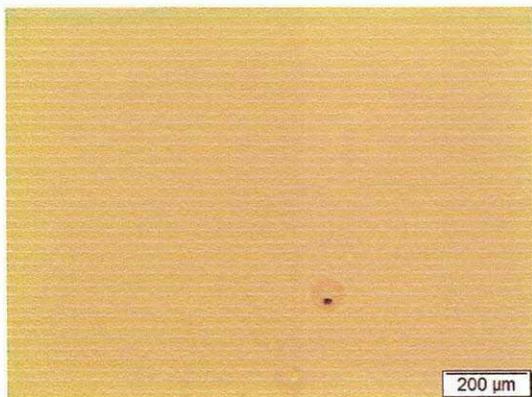
a)



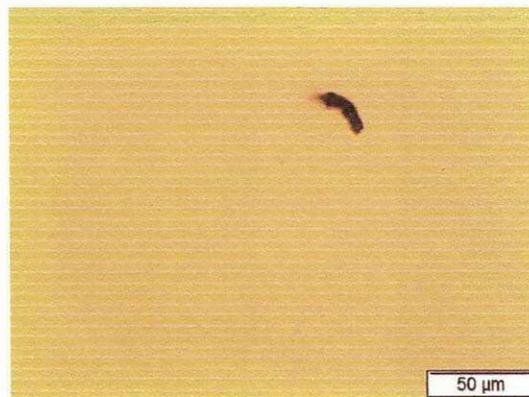
b)

Figura 6.11 - Defeitos na série "T2" a) Crateras; b) Manchas. Aumento: 100X.

Para a série "T3" foram observados crateras e manchas, Figuras 6.12. e 6.13.



a)



b)

Figura 6.12 - Defeitos na série "T3" a) Crateras; b) Manchas. Aumento: 100X.

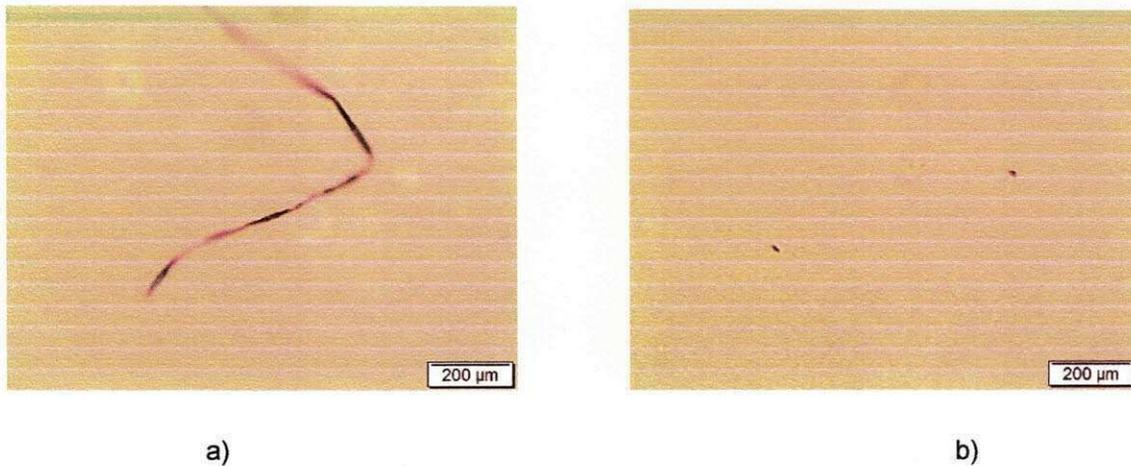


Figura 6.13 - Impurezas na série "T3" a) Pêlos; b) Crateras. Aumento: 100X.

6.3 Resultados dos Ensaios de Tração (Fratura no Revestimento)

6.3.1 Revestimentos de Tintas Protetoras

A série "T1" foi a única série dos revestimentos com tintas protetoras que apresentou trincas. Isto se deu para o carregamento de 110% da tensão de escoamento do substrato.

Nas Figuras 6.14 e 6.15 observam-se as trincas encontradas para o revestimento do tipo T1 (submetido a uma carga de 110% da tensão de escoamento do substrato). Nos outros dois corpos de prova desta série também foram observadas trincas para este mesmo nível de carregamento. Na Figura 6.14 (a) observa-se o surgimento de trincas a partir de pequenos defeitos de processo do tipo crateras. Dessa forma revestimentos de tintas protetoras que apresentam defeitos dessa magnitude e deste tipo, quando submetidos a carregamentos acima da tensão de escoamento do substrato, apresentam a possibilidade de serem iniciadores da fratura do revestimento (neste caso, para a tinta do tipo "Novolac" T1). Na Figura 6.14 (b) observa-se uma trinca que se originou na região central do corpo de prova. Aparentemente, neste caso, não se observa nada na superfície do revestimento que pudesse ter facilitado o início da fratura e, portanto, o início da fratura deve ter ocorrido

pelo fato do carregamento ter ultrapassado o limite de resistência do revestimento (tinta do tipo T1).

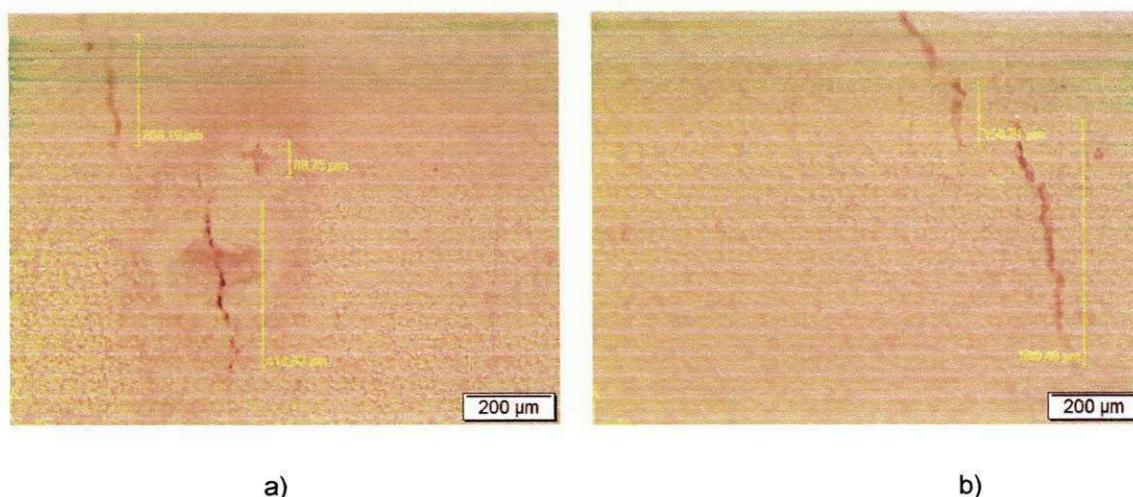


Figura 6.14 - Trincas na série "T1" (a) e (b). Aumento: 100X.

O primeiro corpo de prova da série "T1" apresentou 12 trincas, distribuídas entre as bordas do corpo de prova e a região central. Também foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o intuito de se verificar se a trinca alcançava o substrato, o que não foi observado. Assim muito embora a trinca tenha surgido para esse nível de carregamento a mesma não atravessou o revestimento, conforme pode ser verificado na Figura 6.15. Esta é uma característica interessante já que embora se tenha observado trincas para este nível de carregamento, o efeito protetor da tinta (do revestimento) ainda se faz presente.

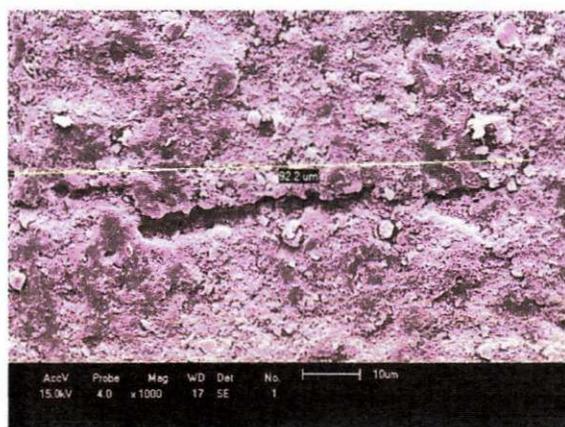


Figura 6.15 - Trinca na série "T1". Aumento: 1000X (MEV).

O segundo corpo de prova da série T1 apresentou 16 trincas também entre as bordas do corpo de prova e a região central. O terceiro corpo de prova da série T1 apresentou 12 trincas também entre as bordas do corpo de prova e a região central. As regiões que apresentaram trincas em maiores quantidades foram próximas as bordas do corpo de prova (cerca de 3 mm da borda do corpo de prova), possivelmente pelo fato de a região próxima a borda ter grande concentração de tensão, o que facilita o surgimento de trincas a partir dessa região .

A série "T2" e a série "T3" não apresentaram trincas para os níveis de carregamentos entre 30 e 110% da tensão de escoamento do substrato, Figuras 6.16 a 6.17.

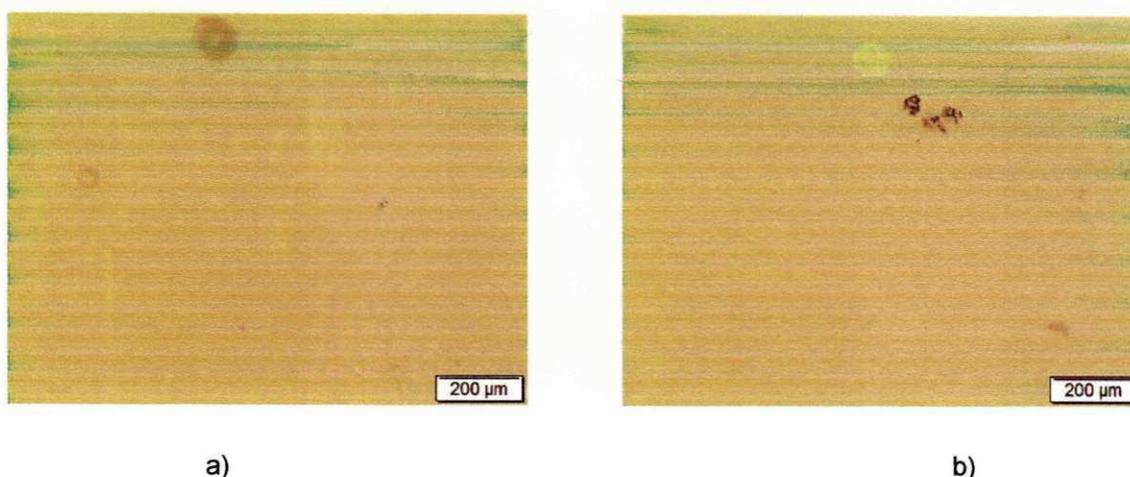


Figura 6.16 – Revestimento do tipo "T2" submetido a um carregamento de 110% da tensão de escoamento do substrato (a) e (b) (Não se observa trincas). Aumento: 100X.

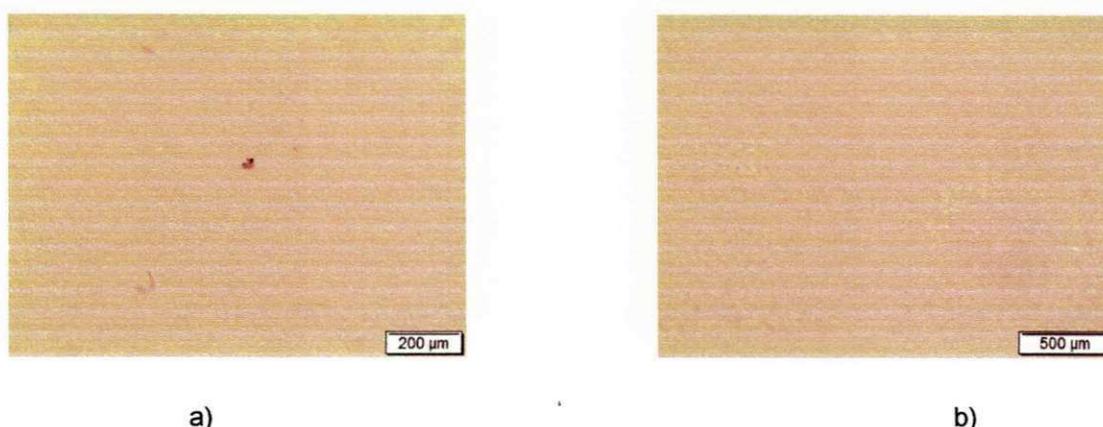


Figura 6.17 – Revestimento do tipo "T3" submetido a um carregamento de 110% da tensão de escoamento do substrato (a) e (b) (Não se observa trincas). Aumento: 100X.

Os revestimentos de tintas protetoras "Novolac" do tipo T2 e T3 não apresentaram trincas nos carregamentos entre 30 a 110% da tensão de escoamento do substrato. Este resultado é muito bom para fins de aplicação destes revestimentos, por exemplo, em tubulações que no momento de montagem podem ser submetidas a carregamentos nesta faixa.

Prosseguindo-se com testes, as séries "T2" e "T3" foram submetidas a níveis de carregamentos de 120% e 130% com o objetivo de determinar-se até que limites de carga poderíamos submeter estes revestimentos sem que surgissem trincas.

A série "T2" submetida a níveis de carregamentos de 120 e 130% da tensão de escoamento do substrato apresentou pequenas trincas na superfície do revestimento (duas a cinco trincas não passantes). Em geral, estas trincas localizavam-se próximas a borda do corpo de prova (2 a 3 mm da borda). Na Figura 6.18 tem-se uma imagem da superfície do revestimento depois de submetido ao carregamento. As trincas observadas para estes carregamentos também não atingiram a superfície do substrato, Figura 6.19.

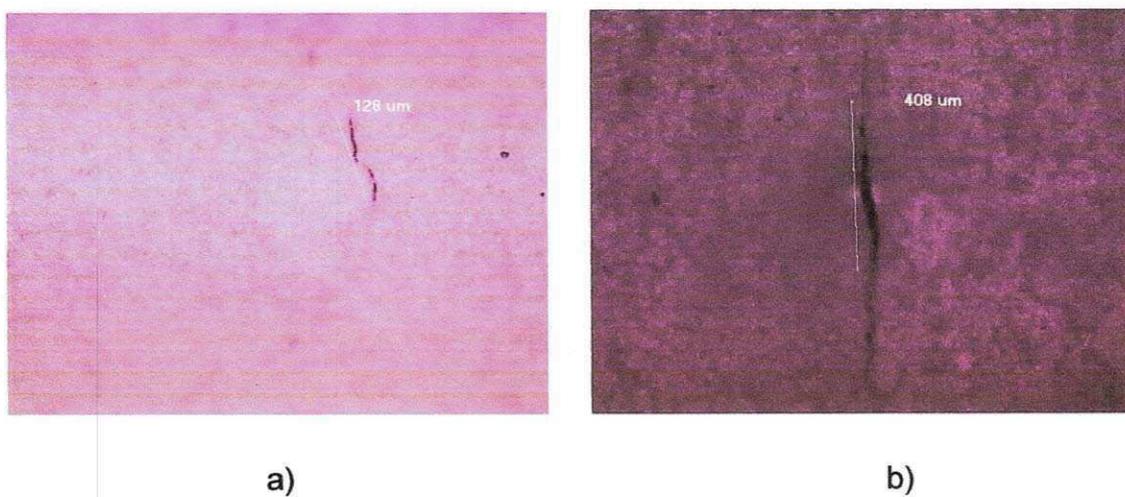


Figura 6.18- Trincas do 1º e 3º CP da série "T2" (a) e (b) respectivamente. Aumento: 100X.

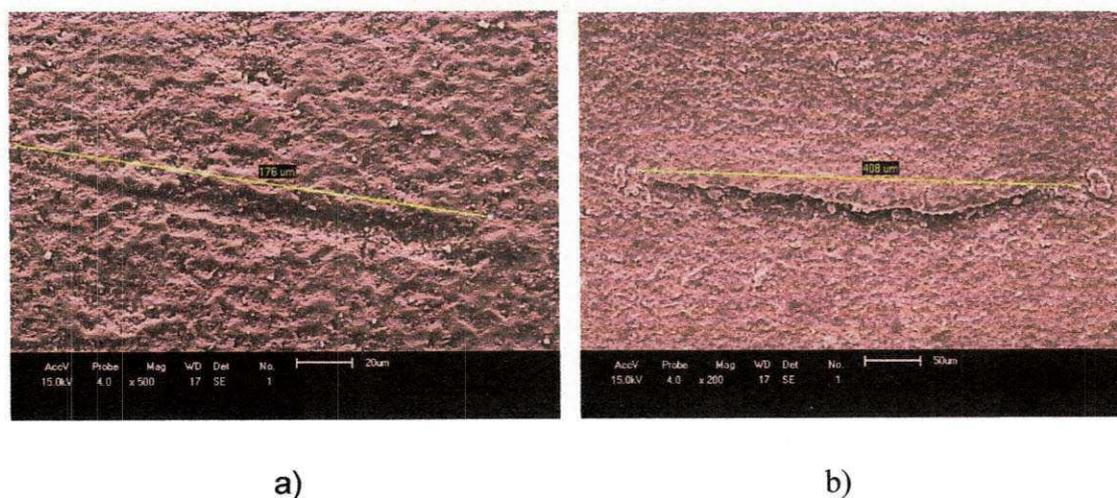


Figura 6.19 - Trincas no 1º e 3º CP da série "T2". Aumento de 500X e 200X, respectivamente (MEV).

A série "T3" também submetida a níveis de carregamentos de 120 e 130% do limite de escoamento do substrato apresentou maiores quantidades de trincas do que a série "T2". O primeiro CP da série "T3" apresentou, para o carregamento de 120% do limite de escoamento do substrato, em geral, 10 trincas superficiais que partiam das bordas do corpo de prova, Figuras 6.20 a 6.21, esse fato também pode estar relacionado com os efeitos da concentração de tensão que há nas regiões próximas a borda, o que facilita o início de uma trinca nessas regiões.

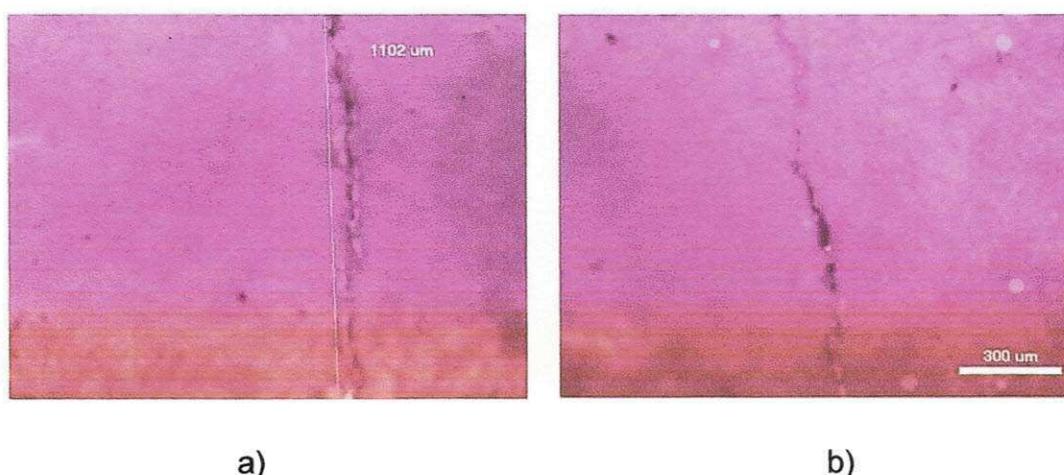


Figura 6.20 - Trincas do 1º CP da Série "T3". a) e b) Aumento de 50X.

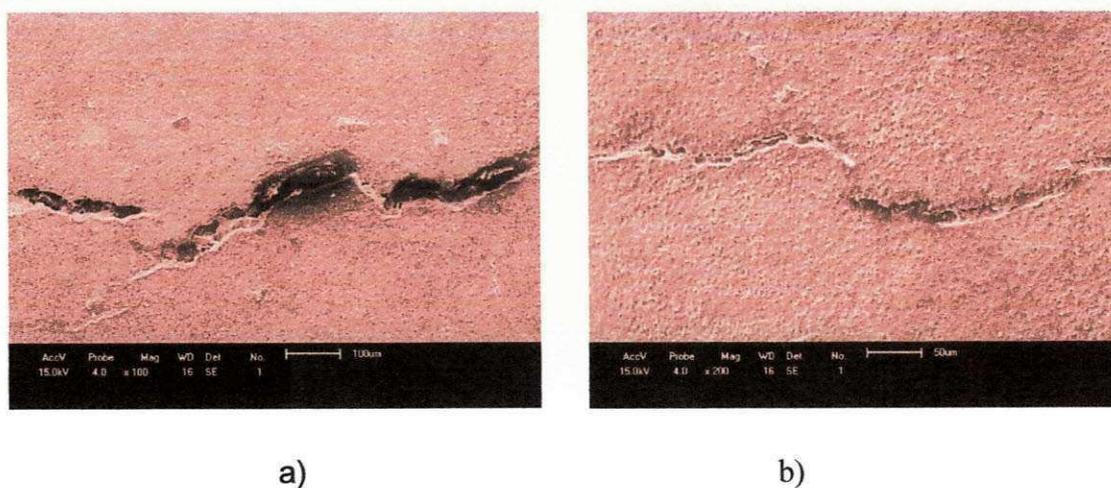


Figura 6.21 - Trincas do 1º CP da Série "T3". a) e b) Aumento de 100X e 200X respectivamente (MEV).

O segundo corpo de prova da série T3, carregado a 120 e 130% do limite de escoamento do substrato, não apresentou nenhuma trinca durante o ensaio, conforme se observa na Figura 6.22.

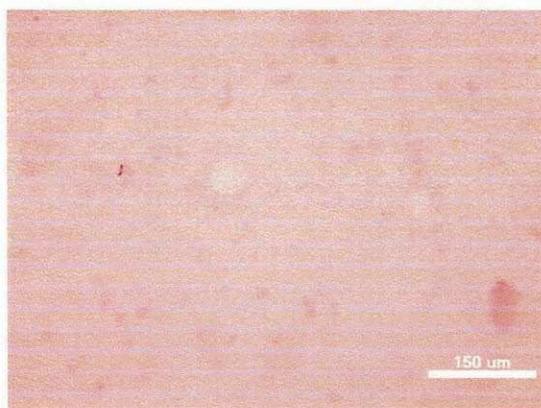
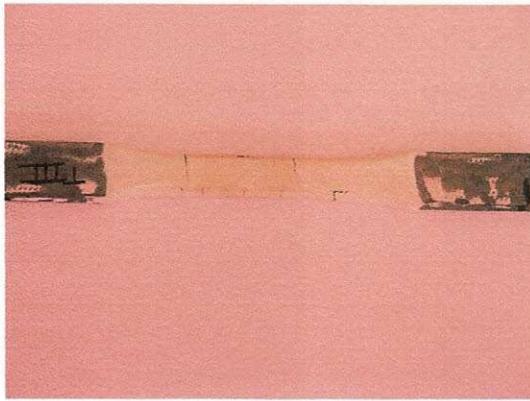
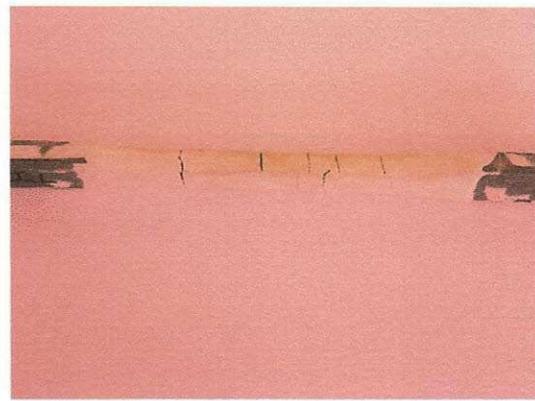


Figura 6.22 - 2º CP da Série "T3".

O terceiro corpo de prova da série "T3", também foi carregado a 120 % e 130% do limite de escoamento do substrato. Para o carregamento de 120% este apresentou inúmeras trincas e para o carregamento a 130%, o revestimento do corpo de prova praticamente estilhaçou, Figuras 6.23 e 6.24. A série T3 para, esses níveis de carregamentos (de 120 a 130% da tensão de escoamento do substrato), quando comparada com a série T2 apresenta um comportamento mais suscetível a formação de trincas. Na série T3, para os carregamentos nos níveis de 120 a 130% da tensão de escoamento do substrato, em geral, as trincas alcançaram a superfície do substrato. Portanto, a série T3 é inadequada para ser usada como tinta protetora para estes níveis de carregamentos. Muito embora a série T3 tenha apresentado a maior espessura de camada de revestimento para as tintas aqui estudadas, quando comparada com a tinta T2 (espessura menor) a mesma apresentou maiores quantidades de trincas superficiais, isto pode estar relacionado ao fato de a tinta T3 ter na sua constituição a presença de pigmentos com flocos de vidro.

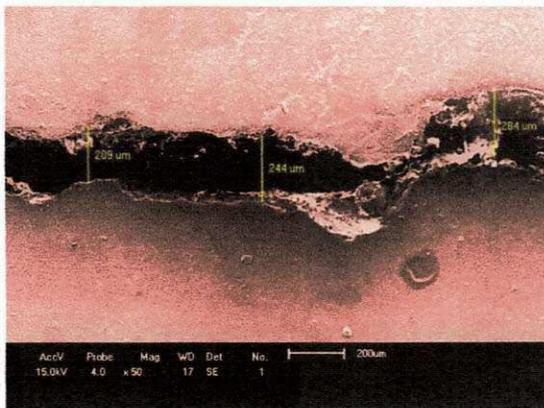


a)

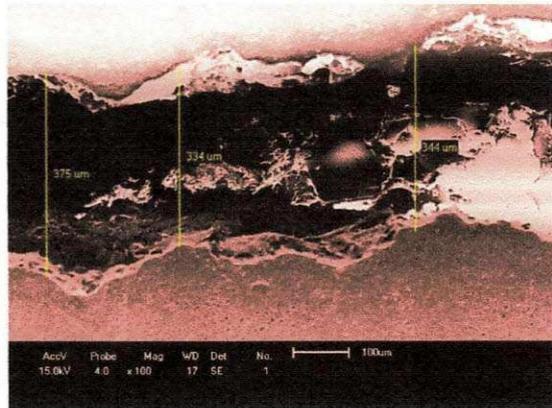


b)

Figura 6.23 - Trincas do 3º CP da Série "T3".



a)



b)

Figura 6.24 - Trincas do 3º CP da Série "T3". a) e b) Aumentos de 50 e 100X respectivamente (MEV).

Assim, pode-se verificar que as tintas T1 atendem as condições de serviço de excepcional severidade norma ISO-4527 [23] desde que não ultrapassem o limite de escoamento do substrato.

A tinta T2, apresentou melhores resultados que a tinta T1, pois atendem as condições de serviço de excepcional severidade para níveis de carregamento acima de 110%, fato este comprovado por a mesma apresentar o início de uma trinca (pequenas trincas superficiais, ou seja, não passantes)

somente para níveis de 120 e 130% da tensão limite de escoamento do substrato. Isto pode estar relacionado devido a tinta T2 não ter tido a influência conjunta de solventes nem de pigmentos com flocos de vidros.

A tinta T3, por sua vez, também atende as condições de serviço de excepcional severidade para níveis de carregamento de 110% da tensão limite de escoamento do substrato, mas quando a carga é elevada para níveis de 120 e 130% observa-se, então, a presença de inúmeras trincas (muitas delas profundas, alcançando a superfície do substrato), possivelmente pelos motivos já comentados anteriormente.

6.3.2 Resultado do Teste de Aderência das Tintas Protetoras

As amostras submetidas aos testes de aderência suportaram cargas superiores a 15 MPa, o que atende aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma N-2912 (Petrobrás) [30] para utilização das tintas Epóxi “Novolac”.

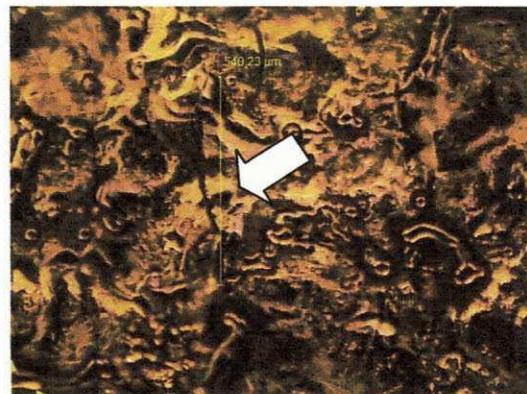
6.3.3 Revestimentos de Níquel Eletrolítico

Para todas as séries de corpos de prova revestidos de níquel eletrolítico, as trincas começam a surgir para carregamentos da ordem de 90% da tensão de escoamento do substrato. Para os carregamentos de 30%, 50% e 70% não foram observadas trincas.

Nas Figuras 6.25 a 6.30 observam-se as superfícies dos revestimentos de níquel eletrolítico, após os testes sob carregamentos de 90% da tensão de escoamento do substrato. Nota-se a presença de trincas superficiais, todas elas passantes.

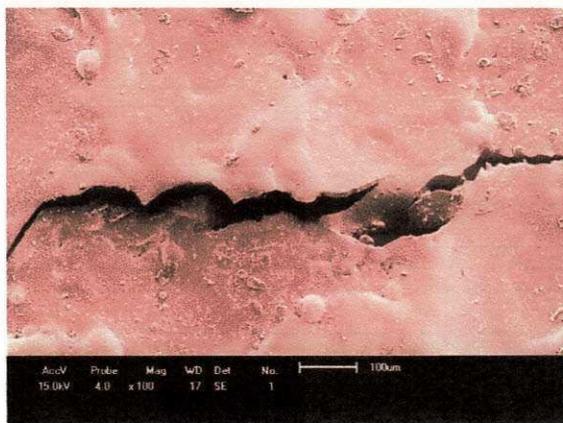


a)

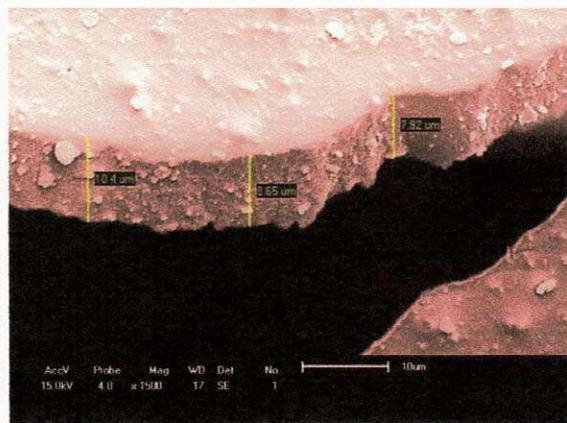


b)

Figura 6.25 - (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "A". Aumento de 100X.

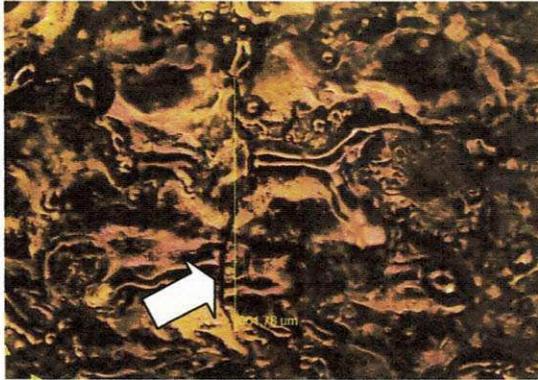


a)

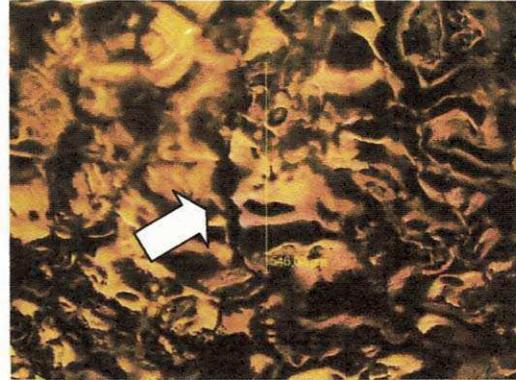


b)

Figura 6.26 Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "A". Aumentos de 100X e 1500X respectivamente (MEV).

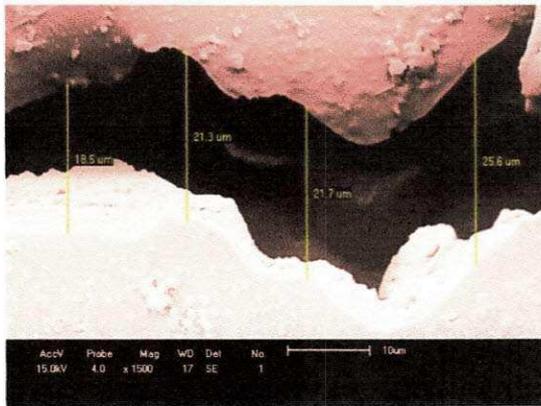


a)



b)

Figura 6.27- (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "B". Aumento de 100X.

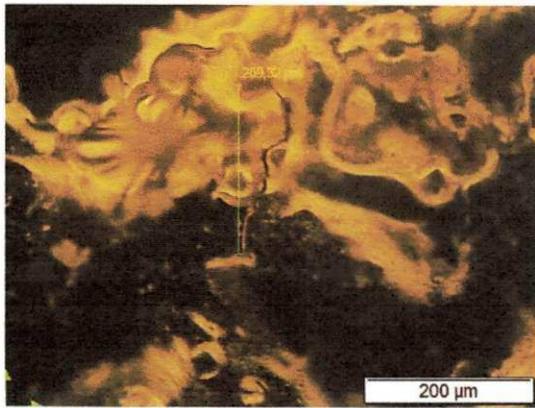


a)



b)

Figura 6.28 - Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "B". Aumentos de 1500X e 100X. (MEV).

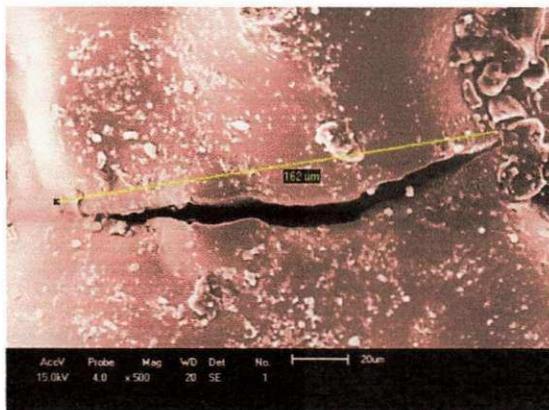


a)

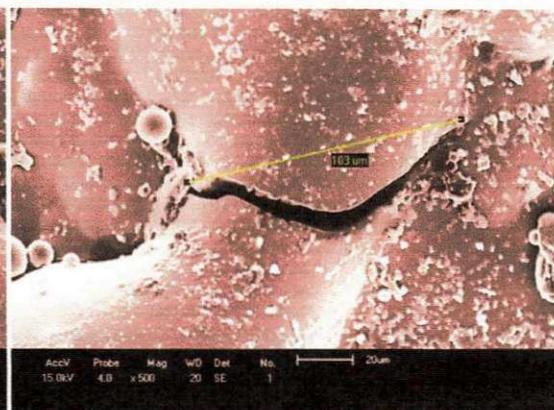


b)

Figura 6.29 - (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "C". Aumentos de 200X e 100X.



a)



b)

Figura 6.30 - (a) e (b) Trincas nos revestimentos de níquel eletrolítico da série "C". Aumentos de 500X. (MEV).

Comparando-se os resultados das observações das três séries de corpos de prova revestidos com níquel eletrolítico, constatou-se que a proporção de trincas era bem maior para a série "B" do que para a série "A". Os corpos de prova da série "B" são os que apresentam o mais baixo perfil de rugosidade, apresentando com isso uma baixa ligação mecânica entre o substrato e o revestimento. Como consequência disto o revestimento começa a sofrer um processo de empolamento para este nível de carga (perda de

aderência), deixando a película de tinta exposta diretamente a carga aplicada e, portanto, facilitando a sua ruptura. A série de revestimentos de níquel que apresentou menor quantidade de trincas para as mesmas condições de ensaio foi a série "C". Esse fato se deve a maior rugosidade do substrato, o que contribuiu para uma maior aderência entre o substrato e o revestimento metálico. Observou-se que para um dos corpos de prova da série "B" os danos foram bem mais significativos, Figura 6.31.

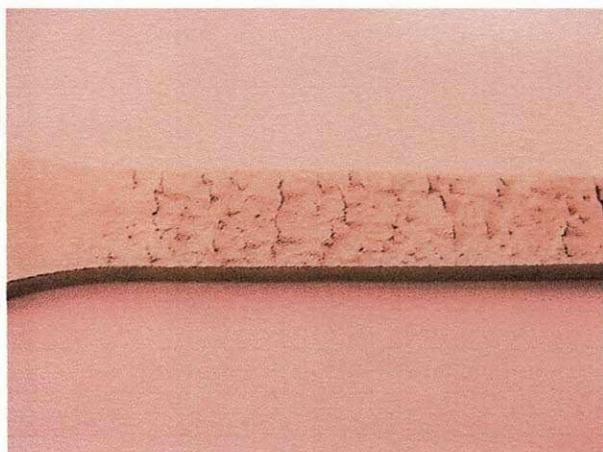


Figura 6.31 - Trincas em um revestimento de níquel eletrolítico da série "B"

Assim sendo os revestimentos de níquel eletrolítico com estes valores de espessura de camada de 20 μm atendem as condições de serviço de moderada a severa (ambientes industriais) segundo a Norma ISO-4527 [23], desde que submetidos a carregamentos que fiquem abaixo de 90% da tensão limite de escoamento do substrato.

Concluindo, ao se comparar os revestimentos de tintas Epóxi "Novolac" (aqui estudados) com os revestimentos de níquel eletrolítico observa-se que: os revestimentos de tintas protetoras atendem as condições de excepcional severidade (exploração de petróleo profunda) enquanto que os revestimentos de níquel eletrolítico suportam apenas as condições de moderada a severa

(ambientes não marinhos e industriais), isto, desde que não sejam submetidos a carregamentos acima de 70% da tensão de escoamento do substrato.

A menor espessura dos revestimentos de níquel eletrolítico (20 μm), neste trabalho, aparentemente limita sua aplicação em situações mais severas. Por outro lado, comparando-se o perfil de rugosidade do substrato dos revestimentos com tintas protetoras (80 μm) com os substratos dos revestimentos com níquel eletrolítico, observou-se que a série de revestimentos de níquel eletrolítico em que o substrato mais se aproximou do perfil de rugosidade do substrato dos revestimentos de tintas protetoras foi a série "C", cujo perfil de rugosidade era de 60 μm . Pelo comportamento do revestimento de níquel eletrolítico da série "C", aparentemente a rugosidade do substrato teve um papel de certa relevância no que se refere a sua melhor resistência a iniciação da fratura.

Na Tabela 6.1 observa-se um resumo comparativo entre os revestimentos de níquel eletrolítico e as tintas poliméricas.

Tabela 6.1 - Comparativo entre revestimentos de níquel eletrolítico e tintas.

	Quantidade de trincas (Média)	Posição (proximidade)	Profundidade (Alcançou o substrato)	Tensão que surgiu	Espessura (μm)	Processo
T1	13	Bordas e centro	Não	110%	100	Tintas poliméricas
T2	5	Bordas	Não	120 e 130%	200	Tintas poliméricas
T3	10	Bordas	Sim	120 e 130%	400	Tintas poliméricas
Série A	Inúmeras	Bordas e centro	Sim	90%	20	Eletrodeposição
Série B	Inúmeras	Bordas e centro	Sim	90%	20	Eletrodeposição
Série C	Inúmeras	Bordas e centro	Sim	90%	20	Eletrodeposição

7 CONCLUSÕES

As tintas do tipo "Novolac", estudadas, apresentaram um bom comportamento no que tange a resistência ao início de uma trinca no revestimento, para condições de serviço de excepcional severidade (exploração de petróleo profunda), visto que para as séries "T2" e "T3" não se observou a presença de trincas para os carregamentos propostos até 110% da tensão limite de escoamento do substrato.

A série de revestimentos do tipo "T1" (tinta "Novolac") apresentou trincas para carregamentos de 110% da tensão limite de escoamento do substrato, revelando assim um comportamento diferente em comparação com as outras tintas. Entretanto, como as pequenas trincas observadas foram superficiais (não alcançavam a superfície do substrato), pode-se considerar que mesmo nestas condições, este revestimento ainda atende as aplicações a que se destina desde que se realize o devido reparo em momento adequado.

Para carregamentos de 120 % da tensão de escoamento do substrato todas as séries de tintas protetoras (revestimentos poliméricos) apresentaram trincas.

Para o objetivo da Petrobrás as tintas que melhor se adéquam são as tintas T2 e T3, pois suportam carregamentos de 110% do limite de escoamento do substrato sem apresentarem trincas superficiais.

O teste de aderência dos revestimentos com tintas epóxi "Novolac" alcançaram valores superiores a 15 MPa, atendendo assim aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma N-2912 (Norma Petrobrás) para utilização das mesmas.

Neste trabalho observou-se que para os revestimentos de níquel eletrolítico aplicados em substratos de diferentes perfis de rugosidades: de 20, 40 e 60 μm (Fator R_y de rugosidade), para a mesma espessura de camada, o

perfil com rugosidade de 60 μm proporcionou uma maior aderência e menor susceptibilidade ao aparecimento de trincas.

8 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Trabalhar com espessuras de camadas maiores para os revestimentos de níquel eletrolítico e com rugosidade do substrato acima de 60 Ry.

Avaliar revestimentos de níquel químico com espessuras de camadas maiores e com rugosidade do substrato acima de 60 Ry.

Trabalhar com os revestimentos de tintas “Novolac” e, em especial, com as tintas da série T1 com pequenas trincas superficiais, não passantes, em ambientes agressivos e verificar se nestas condições o revestimento ainda protege o substrato e por quanto tempo, sob cargas estáticas.

Trabalhar com os revestimentos de tintas “Novolac” e, em especial, com as tintas da série T1 com pequenas trincas superficiais, não passantes, em ambientes agressivos e verificar se nestas condições o revestimento ainda protege o substrato e por quanto tempo, quando submetido a um carregamento cíclico na faixa de 90 a 110% de escoamento do substrato.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais: materiais, projeto, montagem**. 8 ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1997.
- [2] Aços carbono estruturais. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/6339>. Acesso em: 01/09/2010.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8M - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. 2004.
- [4] SCHWEITZER, P. A. **Paint and Coatings : Applications and Corrosion Resistance**. Taylor & Francis Group, 2006.
- [5] SILVA, S.D. **Pintura industrial em pó – desenvolvimento tecnológico 13**, Informações técnicas - WEG, Janeiro, 2009
- [6] SANTOS, Célia Regina Tomachuk. **Estudo da eletrodeposição e caracterização da liga Sn-Ni com o uso de eletrólito de pirofosfato, 1992**. Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas, 1992.
- [7] MENEZES, Dayanne Dutra. **Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto**. Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2007.
- [8] RAMANATHAN, V. L. **Corrosão e seu controle**. Hemus editora LTDA. São Paulo, Brasil.
- [9] JUNIOR, S.O.P. **Estudo do processo de eletrodeposição da liga Zn-Fe**. Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, 1994.

- [10] BAUDRAND, D.W. **Trends in electroless nickel plating and a look at the future. Plating and surface Finishing**, Orlando – 1983.
- [11] DUNCAN, R. N. **Corrosion resistance of electroless nickel for petroleum applications**. In: ELECTROLESS NICKEL CONFERENCE, 2. May, 1981.
- [12] NUNES, L. P. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- [13] Defeitos em películas de tintas. Disponível em: <http://www.silaex.com.br/defeitos_em_pel%C3%ADculas_de_tintas.htm>. Acesso em: 12/09/2011.
- [14] Pintura industrial na proteção anticorrosiva. Disponível em: <http://tratamentoanticorrosivo.blogspot.com/2011/03/tintas-e-resinas.html>>. Acesso em: 01/09/2011.
- [15] Pinturas - falhas e defeitos. Disponível em: <www.embratecno.com.br/PINTURA%20-%20FALHAS%20E%20DEFEITOS.pdf>. Acesso em: 12/09/2011.
- [16] BERNDT, C. C., BERNECKI, T. **Handbook of Thermal Spray Technology**, ASM International, 2004.
- [17] CORTÉS, R.S. **Estudos de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspensão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha**, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1998.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11003 – Tintas - determinação da aderência**. Rio de Janeiro, 2009.
- [19] MENEZES. D.D. **Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto**, UFRJ, 2007.
- [20] HELLIER, Charles J. **Handbook of Nondestructive Evaluating**. Mc Graw-Hill Companies, 2003.

[21] MAGALHÃES, Antônio Gonçalves. **Aplicação das técnicas de emissão acústica**. Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, 1999.

[22] ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por Ultra-Som**. 3 ed. Assessoria e Serviços Técnico LTDA. Abende, 2002.

[23] ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 2003. ISO 4527: metallic coatings: autocatalytic (electroless) nickel phosphorus alloy coatings: specification and test methods.

[24] TELECURSO 2000 (A) - Ensaio de Tração: Cálculo da Tensão.

[25] TELECURSO 2000 (B) Ensaio de Tração: Propriedades Mecânicas Avaliadas.

[26] Technology and Innovation Initiatives. Disponível em: <<http://www.conocophillips.com/EN/tech/initiatives/Pages/index.aspx>>. Acesso: 05/09/2011.

[27] A Curva Tensão Deformação. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/6537>. Acesso em: 05/09/2011.

[28] Máquinas de ensaio universais. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/6545>. Acesso em: 05/09/2011.

[29] DIN – DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. 1988. DIN 50 966: autocatalytic nickel-phosphorus coatings on metal in technical applications. Berlin. 5 p.

[30] **N-2912**. Norma Petrobrás.

[31] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 4541** - Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, 1995.

[32] SILVA, S.D. **Pintura industrial com tintas líquidas** – desenvolvimento tecnológico 12, Informações técnicas sobre tintas líquidas - WEG, Janeiro, 2009.

[33] GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1996.

[34] Itasa. Disponível em: <<http://www.acerositasa.com/calidbr.html>>. Acesso em: 07/12/2012.