

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

DANIELI CRISTINA PEDROSO

ANÁLISE DE CAUSAS DE REJEIÇÕES DE PEÇAS DE AÇO ZINCADAS A QUENTE

São Paulo  
2009

DANIELI CRISTINA PEDROSO

ANÁLISE DE CAUSAS DE REJEIÇÕES DE PEÇAS DE AÇO ZINCADAS A QUENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

ORIENTADORA: PROFa. DRa. SONIA BRAUNSTEIN FALDINI

São Paulo  
2009

DANIELI CRISTINA PEDROSO

ANALISE DE CAUSAS DE REJEIÇÕES DE PEÇAS DE AÇO ZINCADAS A QUENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 17 de agosto de 2009

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Sonia Braunstein Faldini – Orientadora  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Jan Vatauk - Examinador Interno  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Profa. Dra. Zehbour Panossian - Examinador Externo  
Escola Politécnica da Universidade de SP  
Instituto de Pesquisas Tecnológicas/SP

Ao meu esposo, pelo incentivo e compreensão, à  
minha mãe pelas palavras corretas e ao meu pai pelo  
apoio discreto.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade que me foi concedida, pela fonte de sabedoria e persistência.

Agradeço à Profa. Dra. Sonia Braunstein Faldini por todos os momentos de dedicação, me orientando com afinco, buscando continuamente os melhores resultados.

Ao Prof. Dr. Jan Vatauvuk, agradeço as orientações técnicas nos experimentos deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antônio Augusto Couto, meus agradecimentos por sua dedicação em colaborar com o desenvolvimento do meu trabalho, inclusive me ajudando a superar o imprevisto.

A Empresa PLP – Produto para Linhas Preformados, em especial à Gerente da Qualidade Engenheira Ana Lúcia M. André, agradeço por ter acreditado na minha capacidade e ter patrocinado a maior parte deste trabalho.

Meus agradecimentos a todos os colegas de trabalho da empresa PLP que me ajudaram em algum momento à concretização do trabalho, em especial ao José Roberto Amorim que colaborou muito para realização dos experimentos.

A todos os funcionários e professores da Universidade Presbiteriana Mackenzie que colaboraram com preparação das amostras, me ajudaram com textos, ou na preparação dos exemplares.

As empresas Sidertécnica, Metallic e Sergal que me ajudaram a eliminar dúvidas preparando amostras especiais.

Agradecimentos ao Instituto Presbiteriano Mackenzie que por meio do MackPesquisa financiou parcialmente este trabalho.

A Profa. Dra. Zehbour Panossian, agradeço pela avaliação detalhada e pela rica contribuição para que fosse possível concluir este trabalho.

Nenhum de nós é mais inteligente do que todos nós  
juntos.  
Warren Bennis

## RESUMO

Neste trabalho foram analisadas as causas da rejeição de lotes de artefatos da empresa Produto para Linhas Preformados, PLP, fabricados com aços SAE 1010 e SAE 1020 e zincados por imersão a quente. Foram selecionadas amostras de lotes de fabricantes diferentes, com composição química e geometrias distintas, pertencentes a lotes rejeitados e a lotes aprovados de acordo com normas usuais de mercado. As rejeições se devem a problemas relacionados a aderência da camada de zinco. As amostras foram submetidas a exames por microscopia óptica, microscopia de varredura e análises por difração de raio-X para verificação comparativa entre as estruturas das camadas de zinco formadas no processo zincagem por imersão a quente. Para verificar a corrosão nas falhas de revestimento de zinco, foram realizados ensaios de corrosão em três ambientes diferentes: ambiente considerado urbano de baixa poluição; ambiente simulando água do mar; câmara de névoa salina. Não há indício de relação entre a falha nos revestimentos de zinco e a estrutura do substrato; revestimentos irregulares e com fases não muito bem definidas foram encontrados nas peças rejeitadas. Nas regiões com falha, os resultados evidenciam um comportamento semelhante ao da literatura, com formação rápida de ferrugem no início da exposição das peças seguida por uma oxidação lenta.

Palavras-chave: Galvanização. Aço zincado. Camadas intermetálicas. Zincagem a quente

## **ABSTRACT**

In this work the causes of rejection of lots of artifacts from the company Produto para Linhas Preformados, PLP, were analyzed which are made of steel SAE 1010 and SAE 1020 and zinc coated by hot-dip galvanizing. Lots of samples from different manufacturers were selected, with different chemical composition and geometry, but belonging to rejected lots and approved lots in accordance with usual market standards. The rejections are due to problems related to the adhesion of the layer of zinc. The samples were submitted to optical microscopy test, scanning electron microscopy and X-ray diffractions for comparative checking of between the structures of zinc formed layers by hot -dip galvanizing. To verify the corrosion in coating failure, corrosion tests were performed in three different environments: urban environment considered to be low-polluted; environment simulating sea water, salt spray. There is no failure evidence between the zinc coating and the substrate structure; irregular coatings and not very well defined phases were found in the rejected parts. In regions with failures, the results show a behavior similar to the literature with the rapid formation of rust at the beginning of the exposure followed by a slow oxidation.

**Keywords:** Galvanizing. Galvanized steel. Intermetallic layers. Hot-dip galvanizing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Desenho 1 -	Ilustração esquemática do mecanismo de proteção por barreira de revestimento de zinco.....	20
Desenho 2 -	Ilustração esquemática do mecanismo de proteção catódica de revestimento de zinco.....	20
Desenho 3 -	Etapas do Processo de Zincagem por imersão a quente.....	23
Gráfico 1 -	Espessura da camada de zinco em função da temperatura do banho para diferentes tempos de imersão.....	27
Fotografia 1 -	Microestrutura da camada de zincagem em função da temperatura, tempo de imersão de 5 minutos.....	28
Gráfico 2 -	Espessura da camada liga ferro/zinco em função do tempo de imersão.....	29
Gráfico 3 -	Espessura da camada de zinco em função do tempo de imersão, em temperatura não conhecida. Amostra a) tamanho de grão do substrato de 15 $\mu$ m; amostra b) tamanho de grão do substrato de 85 $\mu$ m.....	29
Gráfico 4 -	Curva de Sandelin.....	33
Diagrama 1 -	Diagrama de fase do Zinco.....	34
Fotografia 2 -	Micrografia típica de uma camada de zincagem por imersão a quente.	35
Fotografia 3 -	Demonstração de instalações de redes de transmissão de energia elétrica.....	36
Fotografia 4 -	Exemplo de aplicação de peças zincadas em redes de distribuição de energia elétrica.....	37
Fotografia 5 -	Exemplo de aplicação de peças zincadas em rede de telecomunicações.....	37
Fotografia 6 -	Chapa “L”, SAE 1010, apresentando deslocamento lateral e rejeitada por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323.....	40
Fotografia 7 -	Espaçador, SAE 1010, apresentando deslocamento na extremidade do furo e rejeitado por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323.....	40
Fotografia 8 -	Porca de aço, SAE 1020, forjada, apresentando deslocamento, rejeitada por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323.....	41
Fotografia 9 -	Porca de aço SAE 1020, forjada, apresentando deslocamento após ensaio, rejeitada conforme norma ABNT NBR 7398 .....	41

Fotografia 10 - Placa de aço 1020, zincada utilizada como padrão para os ensaios de corrosão.....	43
Fotografia 11 - Placas 5 (a) e placa 6 (b) - detalhes da área removida.....	44
Fotografia 12 - Espaçador apresentando deslocamento próximo ao furo.....	46
Esquema 1 - Ponto de corte do espaçador.....	46
Fotografia 13 - Região de deslocamento da camada de zinco.....	47
Fotografia 14 - Proteção galvânica do zinco ao ataque de nital .....	48
Fotografia 15 - Microestrutura do ponto A.....	49
Fotografia 16 - Microestrutura do ponto B.....	49
Fotografia 17 - Microestrutura do ponto C.....	49
Fotografia 18 - Microestrutura do ponto D.....	49
Fotografia 19 - Camada de zinco do espaçador aprovado.....	50
Fotografia 20 - Camada de zinco do espaçador rejeitado.....	50
Fotografia 21 - Extensão do deslocamento do revestimento da porca da Fotografia 8	52
Fotografia 22 - Microestrutura da porca apresentada na Fotografia 8.....	52
Espectrograma 1 - Análise química semi-quantitativa do aço (Fotografia 21).....	53
Fotografia 23 - Revestimento de uma porca aprovada.....	54
Fotografia 24 - Amostra de uma porca com camada de zinco aprovada.....	55
Espectrograma 2 - Análise química semi-quantitativa do aço da porca aprovada.....	56
Fotografia 25 - Microestrutura da chapa “L” - Rejeitada.....	57
Fotografia 26 - Microestrutura destacada em vermelho na Fotografia 25.....	57
Fotografia 27 - Microestrutura destacada em amarelo na Fotografia 25.....	58
Espectrograma 3 - Análise química semi-quantitativa do aço da chapa “L” rejeitada.....	59
Fotografia 28 - Microestrutura da chapa “L” - Aprovada.....	59
Fotografia 29 - Microestrutura destacada em vermelho na Fotografia 28.....	60
Fotografia 30 - Microestrutura destacada em amarelo na Fotografia 28.....	60
Fotografia 31 - Microestrutura da porca rejeitada no ensaio de deslocamento.....	61
Fotografia 32 - Microestrutura da porca rejeitada no ensaio de deslocamento (ponto distante do ensaio).....	62
Fotografia 33 - Microestrutura destacada em vermelho na Fotografia 32.....	63
Fotografia 34 - Microestrutura destacada em amarelo na Fotografia 32.....	63

Espectrograma 5 -	Análise química semi-quantitativa do ponto identificado como P1 na microestrutura da Fotografia 33.....	64
Espectrograma 6 -	Análise química semi-quantitativa do ponto identificado como P2 na microestrutura da Fotografia 33.....	64
Espectrograma 7 -	Análise química semi-quantitativa do ponto identificado como P3 na microestrutura da Fotografia 33.....	65
Espectrograma 8 -	Análise química semi-quantitativa do ponto identificado como P4 na microestrutura da Fotografia 34.....	65
Espectrograma 9 -	Análise química semi-quantitativa do ponto identificado como P5 na microestrutura da Fotografia 34.....	65
Fotografia 35 -	Corpo-de-prova 1 - área exposta = 9mm <sup>2</sup> .....	67
Fotografia 36 -	Corpo-de-prova 2 - área exposta = 25mm <sup>2</sup> .....	67
Fotografia 37 -	Corpo-de-prova 3 - área exposta = 49 mm <sup>2</sup> .....	67
Fotografia 38 -	Corpo-de-prova 4 - área exposta = 225 mm <sup>2</sup> .....	67
Fotografia 39 -	Corpo-de-prova 5 - área exposta = 660 mm <sup>2</sup> .....	68
Fotografia 40 -	Corpo-de-prova 6 - área exposta = 1.080 mm <sup>2</sup> .....	68
Fotografia 41 -	Corpo-de-prova 7 - gota salina com fenolftaleína e ferricianeto de potássio.....	70
Fotografia 42 -	Corpo-de-prova 8 - gota salina com a) fenolftaleína e ferricianeto de potássio e b) fenolftaleína.....	70
Fotografia 43 -	Corpo-de-prova 9 - gota salina com ferricianeto de potássio e fenolftaleína .....	70
Fotografia 44 -	Corpo-de-prova 10 - área exposta de 9 mm <sup>2</sup> - sem a presença de oxidação.....	72
Fotografia 45 -	Corpo-de-prova 11 - área exposta de 25 mm <sup>2</sup> - sem a presença de oxidação.....	72
Fotografia 46 -	Corpo-de-prova 12 - área exposta de 90 mm <sup>2</sup> - sem a presença de oxidação.....	72
Fotografia 47 -	Corpo-de-prova 13 - área exposta 660 mm <sup>2</sup> - com a presença de com a presença de pequenos pontos oxidação.....	73
Fotografia 48 -	Corpo-de-prova 14 - área exposta 1080 mm <sup>2</sup> - com a presença de pontos de oxidação.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Taxa de corrosão média do zinco em diferentes tipos de atmosfera, obtidas em ensaios de dois anos de duração.....	19
Tabela 2 -	Camadas de zinco formadas de acordo com a variação de temperatura.....	27
Tabela 3 -	Propriedades das camadas de zincagem por imersão a quente.....	34
Tabela 4 -	Massa de zinco, por unidade de área de materiais zincados.....	39
Tabela 5 -	Áreas removidas para ensaio de resistência em exposição ao meio ambiente.....	44
Tabela 6 -	Área removida das peças utilizadas no ensaio de gota salina.....	45
Tabela 7 -	Áreas removidas para ensaio de corrosão em câmara de névoa salina.....	45
Tabela 8 -	Composição química da camada da porca (Fotografia 8).....	53
Tabela 9 -	Composição química do revestimento da porca aprovada.....	55
Tabela 10 -	Composição química do revestimento da chapa “L” rejeitada.....	58
Tabela 11 -	Composição química do revestimento da chapa “L” aprovada.....	61
Tabela 12 -	Composição do revestimento da porca rejeitada no ensaio de deslocamento por avaliação visual.....	64
Tabela 13 -	Resultados do ensaio de exposição em atmosfera urbana.....	68
Tabela 14 -	Resultados do ensaio de gota salina.....	71
Tabela 15 -	Resultados do ensaio em câmara de névoa salina.....	73

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	17
2.1	REVESTIMENTOS METÁLICOS.....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Revestimentos para proteção contra a corrosão</b> .....	17
<b>2.1.2</b>	<b>Zinco e revestimentos a base de zinco</b> .....	18
<b>2.1.3</b>	<b>Zinco como revestimento anódico</b> .....	19
<b>2.1.4</b>	<b>Tipos de processos para aplicação de zinco</b> .....	21
2.1.4.1	Eletr deposição.....	21
2.1.4.2	Aspersão térmica.....	21
2.1.4.3	Imersão à quente.....	22
2.2	ZINCAGEM POR IMERSÃO A QUENTE NÃO-CONTÍNUO.....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Limpeza</b> .....	24
<b>2.2.2</b>	<b>Zincagem</b> .....	25
<b>2.2.3</b>	<b>Acabamento e inspeção</b> .....	25
<b>2.2.4</b>	<b>Variáveis que influenciam na formação da camada de zinco</b> .....	26
2.2.4.1	Temperatura do banho.....	26
2.2.4.2	Tempo de imersão.....	28
2.2.4.3	Tempo de resfriamento.....	30
2.2.4.4	Composição química do banho de zinco.....	30
2.2.4.4.1	<i>Adição de alumínio</i> .....	30
2.2.4.4.2	<i>Adição de chumbo</i> .....	31
2.2.4.4.3	<i>Adição de bismuto e níquel</i> .....	32
2.2.4.5	Composição química do substrato.....	32
2.3	MORFOLOGIA DO REVESTIMENTO DE ZINCO OBTIDO POR PROCESSO DE ZINCAGEM A QUENTE.....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
3.1	ENSAIOS REALIZADOS NA PLP.....	38
<b>3.1.1</b>	<b>Avaliação visual</b> .....	38
<b>3.1.2</b>	<b>Determinação da espessura da camada de zinco</b> .....	39

3.1.3	<b>Verificação da aderência da camada de zinco.....</b>	39
3.2	PEÇAS COM FALHAS DE DESPLACAMENTO ESCOLHIDAS PARA ESTE TRABALHO.....	40
3.3	MICROSCOPIA ÓPTICA E MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA (MEV).....	41
3.3.1	<b>Preparação de corpos-de-prova.....</b>	41
3.3.2	<b>Microscopia óptica.....</b>	42
3.3.3	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raio-X.....</b>	42
3.4 .	VERIFICAÇÃO DA UNIFORMIDADE DO REVESTIMENTO.....	42
3.5	ENSAIO DE CORROSÃO.....	43
3.5.1	<b>Exposição à atmosfera urbana.....</b>	43
3.5.2	<b>Teste da gota salina (de Evans) .....</b>	44
3.5.3	<b>Ensaio em câmara de névoa salina.....</b>	45
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	46
4.1	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE UM ESPAÇADOR APRESENTANDO DESPLACAMENTO APENAS PRÓXIMO AO FURO.....	46
4.2	MEDIDA DA ESPESSURA E ESTUDO METALOGRÁFICO DOS REVESTIMENTOS DE ZINCO APROVADOS E REJEITADOS.....	49
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS APROVADOS E REJEITADOS.....	51
4.4	CORROSÃO DE ARTEFATOS ZINCADOS.....	66
4.4.1	<b>Exposição dos materiais a atmosfera urbana.....</b>	66
4.4.2	<b>Avaliação da proteção galvânica do revestimento metálico através do teste da gota salina (de Evans).....</b>	69
4.4.3	<b>Avaliação do desempenho do revestimento em câmara de névoa salina.....</b>	71
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	75
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	77
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	78

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas das redes de transmissão e distribuição elétrica e telecomunicações são montadas principalmente por componentes de aço e ferro fundido e ficam expostas ao meio ambiente, sujeito a sérios problemas de corrosão. As manutenções nestas linhas representam custos altos, sendo assim busca-se sempre utilizar materiais que atendam às especificações elétricas e mecânicas, mas que também possuam alta resistência à corrosão.

Para atender as características de resistência à corrosão sem prejudicar as características mecânicas e elétricas, utiliza-se principalmente o zinco como revestimento superficial dos componentes de aço ou ferro fundido, nas suas diversas formas de aplicação, o qual pode proporcionar uma proteção anti-corrosiva a longo prazo, variando de acordo com o processo utilizado.

Há cerca de 250 anos, o zinco é um dos metais mais utilizados como forma de proteção superficial de materiais ferrosos. O efeito proporcionado por este metal é duradouro e efetivo em muitos ambientes. A proteção pode ser atribuída à formação de uma barreira que separa o metal base do ambiente e ao fato do zinco ser mais ativo que o ferro, fazendo com que defeitos como riscos, pequenas falhas ou pequenos deslocamentos do revestimento, não sejam críticos (CONSTRUÇÃO METÁLICA D, 2002).

Os processos típicos utilizados para aplicação do zinco são: zincagem por imersão a quente, aspersão térmica, zincagem eletrolítica e pintura com tintas rica em zinco, (ASGARI; TOROGHINEJAD; GOLOZAR, 2007). Popularmente, estes tratamentos superficiais são conhecidos como galvanização a quente ou galvanização a fogo, metalização, eletro galvanização e galvanização a frio, respectivamente.

Em especial a zincagem por imersão a quente, bastante utilizada como tratamento superficial na área de eletroferragens, é uma solução vantajosa técnica e economicamente, pois é um processo considerado de baixo custo e que minimiza manutenções intermediárias (ABCCEM, 2007).

Os dados empíricos coletados de 1940 a 1980, relativos ao desempenho em campo do aço zincado por imersão a quente em ambientes industriais, indicam que o zinco previne a corrosão da base de aço de modo muito mais eficaz que outros tratamentos superficiais. O campo de aplicação é ilimitado desde que no projeto sejam observados os cuidados necessários ao processo de zincagem (CONSTRUÇÃO METÁLICA A, 2005).

A zincagem por imersão a quente consiste na imersão do componente ferroso

em zinco fundido, formando uma camada constituída por zinco e intermetálicos do sistema Fe-Zn. O produto zincado a quente, além da proteção contra corrosão, é resistente a avarias mecânicas durante a manipulação, estocagem, transporte e instalação. A resistência mecânica é uma característica exclusiva deste revestimento e um dos seus mais destacados diferenciais de superioridade, é a dureza do revestimento, o que o torna especialmente adequado a aplicações que suportam abrasão (CONSTRUÇÃO METÁLICA B, 2005).

Para garantir que a camada de zinco atenda as expectativas de mercado, quando aplicadas em artefatos ferrosos, são realizados ensaios normalizados de acordo com as normas da American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM A 123/A 123M e ASTM A 153/ A 153M. A primeira norma define a espessura da camada, o acabamento, o aspecto visual e a aderência e é aplicada na avaliação de peças grandes, fabricadas por processo não-contínuo e que não podem ser centrifugadas. A ASTM A 153/ A 153M aborda as mesmas características da norma citada anteriormente além dos pontos com roscas e os cuidados com a fragilização por hidrogênio. Esta norma permite avaliar artefatos menores, produzidos por batelada, que precisam ser centrifugados, como peças com roscas. Em ambas as normas são referenciadas outras normas também utilizadas na avaliação dos produtos zincados (ASM HANDBOOK A, 1994).

No Brasil, são utilizadas também normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, normas brasileiras (NBR), que são bastante similares às normas americanas (ASTM). A norma ABNT NBR 6323 especifica a pureza do zinco que deve ser utilizado, a camada mínima de revestimento de acordo com as características dimensionais e de processo do produto e referencia entre outras normas a norma ABNT NBR 7398, a qual apresenta o método de ensaio de aderência e a norma ABNT NBR 7400 que estabelece o método de ensaio para verificação da uniformidade do revestimento.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as possíveis causas e as conseqüências de não-conformidades de revestimentos de zinco, obtidos por zincagem por imersão a quente, sobre artefatos de aço-carbono e ferro fundido, para montagem de conjuntos de fixação de redes de transmissão e distribuição de energia elétrica e redes de telecomunicações.



## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Analisar componentes, em aço revestidos por zincagem por imersão a quente, rejeitados por não estarem em conformidade com as normas vigentes.

Comparar a morfologia de camadas de zinco obtidas após processo de zincagem a quente, rejeitadas e aprovadas, de acordo com as Normas ABNT NBR referenciadas.

Examinar a espessura da camada de zinco e dos intermetálicos formados em peças rejeitadas e aprovadas.

Estudar a proteção anticorrosiva proporcionada por revestimentos à base de zinco, obtidos por zincagem por imersão a quente.

Avaliar a proteção catódica de corpos-de-prova com simulação de diferentes falhas na camada de revestimento.

Com base nos resultados dos ensaios, sugerir as causas das não-conformidades do revestimento.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A zincagem por imersão a quente é o método mais eficiente em termos de custos e de meio ambiente como proteção de materiais ferrosos contra corrosão. Ajuda a poupar recursos naturais como: minério de ferro e energia, prolongando a vida útil dos produtos que utilizam esta proteção, contribuindo economicamente sobre o investimento do capital no material (CONSTRUÇÃO METÁLICA C, 2005).

De acordo com a literatura, a zincagem por imersão a quente apresenta um baixo índice de rejeição, o que contradiz as evidências encontradas na empresa Produto para Linhas Preformados (PLP), durante o controle de qualidade de componentes zincados por fornecedores diversos. Os problemas detectados por amostragem nas peças selecionadas durante a inspeção de recebimento dos lotes, consistiram em: baixa espessura da camada de zincagem, falhas no revestimento ou deslocamento do mesmo. As peças foram avaliadas e rejeitadas conforme normas vigentes para o processo de zincagem a quente.

As rejeições geram dúvidas quanto à interpretação das normas aplicáveis e as conseqüências reais das não-conformidades, criando muitas vezes conflitos com empresas clientes e com fornecedores.

Se um material zincado não-conforme as normas citadas é aprovado, causa

diversos problemas financeiros, técnicos e ambientais às empresas envolvidas na cadeia cliente-fornecedor. Quando o problema é detectado antes da instalação, os prejuízos são grandes, mas contornáveis. A situação pode agravar-se quando as falhas não são detectadas. O produto pode ser instalado com uma expectativa de vida útil alta e não resistir ao meio ambiente onde se encontra, podendo causar prejuízos incalculáveis.

Em base aos fatos citados e diante do alto índice de rejeição durante a inspeção de artefatos zincados por imersão a quente dentro da empresa PLP, surgiu a necessidade do desenvolvimento do presente trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 REVESTIMENTOS METÁLICOS**

Os metais utilizados para revestir substratos metálicos e não metálicos, com espessura menor que a do próprio substrato, são denominados revestimentos metálicos. Os propósitos da aplicação podem variar de acordo com as necessidades de cada produto conforme segue: (PANOSSIAN, 2002);

- proteção do substrato contra a corrosão;
- melhoria das propriedades físicas e mecânicas do substrato, como resistência à abrasão e/ou ao desgaste, condutividade elétrica, refletibilidade e soldabilidade;
- alteração dos dimensionais originais;
- recuperação de peças que já sofreram desgastes.

Além destes propósitos, os revestimentos metálicos também proporcionam aos substratos um aspecto decorativo desejável. Neste trabalho será enfatizada apenas a proteção contra a corrosão.

#### **2.1.1 Revestimentos para proteção contra a corrosão**

Os revestimentos utilizados para proteção contra a corrosão de substratos ferrosos, podem ser classificados em anódicos e catódicos.

Os revestimentos anódicos, também conhecidos como de sacrifício, são capazes de proteger catodicamente o substrato, à custa da sua própria oxidação. Estão inclusos metais e ligas metálicas menos nobres que o substrato. Dentre os revestimentos anódicos, os de zinco têm grande aplicação industrial (PANOSSIAN, 2002).

Revestimentos catódicos são formados por metais mais nobres que o substrato.

### 2.1.2 Zinco e revestimentos a base de zinco

O zinco é um metal de baixo custo, com vasta reserva mundial. Por ser um metal pobre em propriedades mecânicas é pouco utilizado em aplicações de engenharia. Seu principal uso é na forma de revestimentos que podem ser aplicados sobre artefatos ferrosos. Cerca de metade da produção mundial deste metal é utilizada para este fim (SCHWEITZER, 2006).

A tendência à oxidação confirmada pelo valor negativo do seu potencial padrão de redução  $-0,76V$ , coloca o zinco entre os metais mais ativos. Em contato com o oxigênio do ar e umidade forma-se na sua superfície, uma camada composta por óxido de zinco e hidróxidos que funciona como uma barreira física entre o metal e o meio ambiente (GENTIL, 1996). Estes produtos de corrosão não são protetores, assim depois de atingido um estado estacionário o processo corrosivo continua com baixa velocidade.

As substâncias que se formam e podem ser encontradas nos produtos de corrosão são hidróxidos, óxidos, carbonatos e sulfatos metálicos ou uma mistura complexa dos mesmos. A formação destes compostos depende de fatores climáticos e de poluição, como contaminação por dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), cloretos ( $Cl^-$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ), além do pH do meio.

Camadas espessas têm na sua composição principalmente óxido de zinco e carbonatos básicos. O zinco também pode formar camadas protetoras dependendo da contaminação atmosférica e dos elementos de liga presentes na sua composição. Em ambientes neutros, o zinco é relativamente resistente à corrosão, mas é muito sensível a variações de acidez da atmosfera. Apesar do zinco manufacturado estar disponível em muitas formas, tais como folhas, chapas e tiras suas principais aplicações estão no controle à corrosão na forma de revestimentos ou como anodos para a proteção catódica de aço em gasodutos, plataformas petrolíferas, estruturas *offshore* e pontes.

É importante acrescentar que a temperatura tem um papel fundamental na relação ferro-zinco, pois em tubulações de água, com temperaturas acima de  $60^{\circ}C$  pode ocorrer a corrosão do material ferroso nas regiões de descontinuidades do revestimento, causado pela inversão de polaridade do zinco. Nestas situações o ferro atua como anodo (CARBUCICCHIO et al, 2008). Não há praticamente diferença entre a taxa de corrosão dos revestimentos de zinco e do zinco puro assim sendo, a vida útil do zinco pode ser prevista em

função de sua espessura e do ambiente ao qual está exposto. Na Tabela 1 são apresentadas taxas de corrosão do zinco em diferentes ambientes. Verifica-se que em São Paulo, num ambiente industrial, uma peça zincada poderá perder em média 2,5µm ao ano. Assim se a espessura média de zinco for de 40µm, a camada será esgotada após cerca de 16 anos (PANOSSIAN, 1993).

Tabela 1 – Taxa de corrosão média do zinco em diferentes tipos de atmosfera, obtidas em ensaios de dois anos de duração

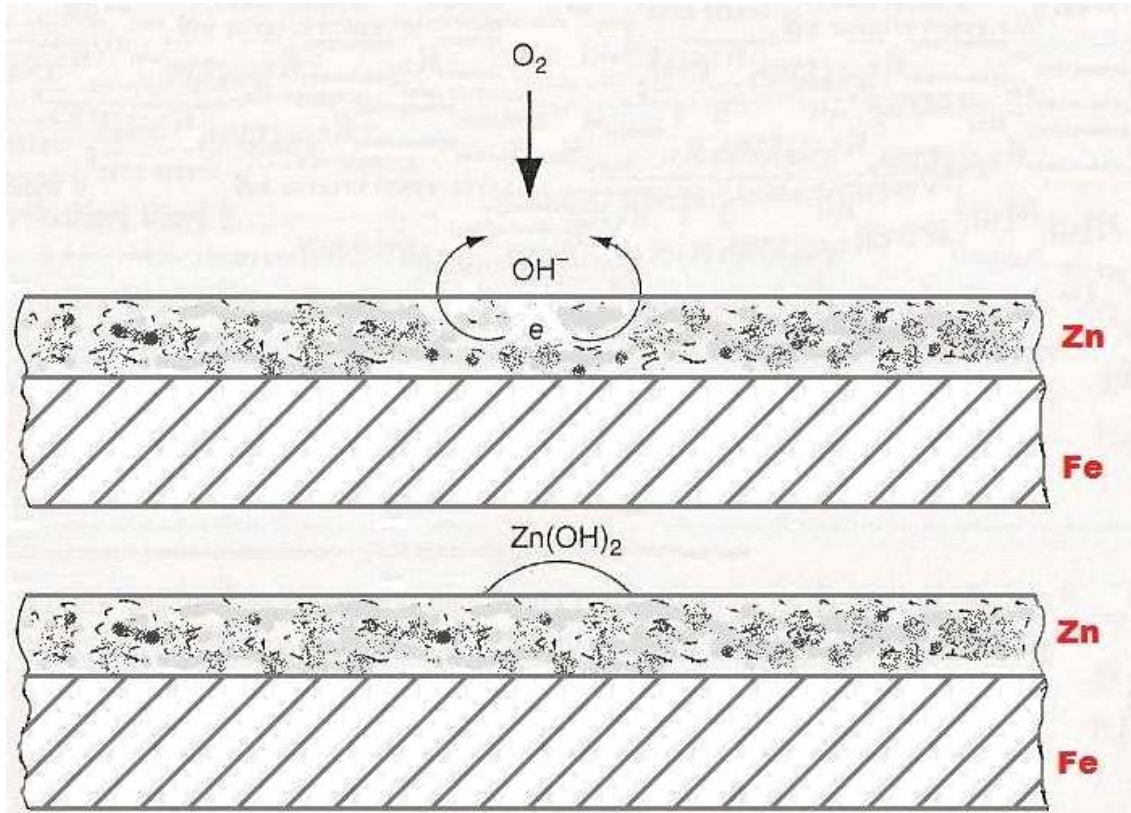
Atmosfera	Intervalo (µm/ano)	
	Países Temperados	São Paulo-Brasil
Rural	0,16 - 1,58	0,7 - 0,9
Urbana	1,11 - 2,37	1,1 - 1,3
Industrial	0,77 - 10,15	2,3 - 2,6
Marinha	0,63 - 15,57	1,6*

Nota:  
 (\*) distante 1 km do mar  
 FONTE: (PANOSSIAN, 1993 )

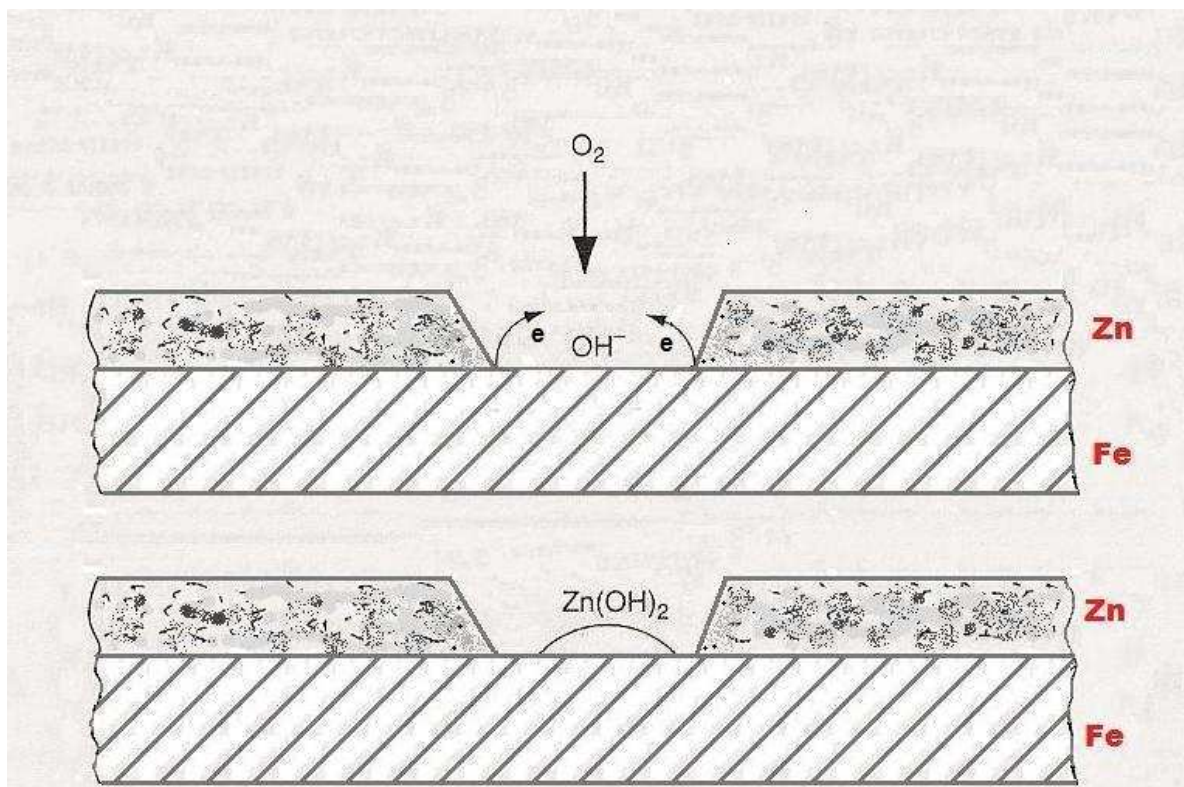
A corrosão branca formada pelo zinco é uma corrosão comum que não é protetiva, ocorre com a presença de água e é formada  $2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$  junto com ZnO, que resulta em pó, o qual é facilmente removido (SCHWEITZER, 2006).

### 2.1.3 Zinco como revestimento anódico

A proteção auferida por revestimentos de zinco sobre materiais ferrosos se dá através de dois mecanismos: proteção por barreira e proteção catódica. Quando a proteção é por barreira, o revestimento de zinco evita o contato do substrato com o meio ambiente agressivo, conforme ilustrado pelo Desenho 1. Em descontinuidades do revestimento, ocorre proteção catódica, e o zinco atua como anodo de sacrifício, Desenho 2.



Desenho 1 - Ilustração esquemática do mecanismo de proteção por barreira de revestimento de zinco



Desenho 2 - Ilustração esquemática do mecanismo de proteção catódica de revestimento de zinco

## 2.1.4 Tipos de processos para aplicação de zinco

Revestimentos a base de zinco sobre materiais ferrosos podem ser obtidos pelos processos de zincagem por imersão a quente, eletrodeposição e aspersão térmica, sendo os dois primeiros citados os mais utilizados.

Comparando os processos de eletrodeposição e zincagem por imersão a quente, no primeiro a camada de zinco metálico é obtida por redução de sais de zinco em solução aquosa enquanto que na imersão a quente utiliza-se zinco metálico previamente fundido. A faixa de espessuras dos revestimentos obtidos é diferente para cada processo e em geral, a escolha de um desses tipos dependerá da finalidade do revestimento e da espessura desejada.

### 2.1.4.1 Eletrodeposição

O processo de eletrodeposição pode ser do tipo contínuo ou não-contínuo (batelada) e possui por princípio a redução, por meio de corrente elétrica contínua, do íon metálico a metal sobre o substrato. Após o término do processo, verifica-se a formação de uma camada do elemento puro e ausência de qualquer reação entre este e o metal do substrato (ASHIRU; SHIROKOFF, 1996).

A espessura dos revestimentos obtidos por eletrodeposição geralmente é baixa podendo chegar a valores da ordem de  $0,05\mu\text{m}$ . Quando a finalidade é proteção contra a corrosão, estes revestimentos são vantajosos para espessuras de até  $40\mu\text{m}$ .

A eletrodeposição permite um maior controle de espessura, sendo adequado para peças pequenas como parafusos e rebites e para chapas ou fios que serão expostos em ambientes internos e externos pouco poluídos.

Algumas desvantagens deste processo são: falta de uniformidade da espessura dos revestimentos (por ser um processo envolvendo correntes elétricas), espessura baixa; contaminação por hidrogênio e necessidade de pós-tratamento.

### 2.1.4.2 Aspersão térmica

A aspersão térmica é a deposição por impacto do material metálico, no estado plástico ou fundido, sobre o substrato a ser protegido. Neste processo, utiliza-se uma pistola, similar à usada para pintura, porém com aquecimento. O material a ser aspergido é introduzido na pistola na forma de pó metálico, metal previamente fundido ou arame.

O revestimento obtido consiste em pequenas partículas achatadas (plaquetas) dispostas umas sobre as outras e paralelas à superfície do substrato. Este revestimento é áspero e apresenta um grau variável de porosidade sendo necessário proceder a um tratamento de selagem para o preenchimento dos poros. Os selantes devem ter boa penetração, não devem absorver água e nem reagir com o substrato, com o revestimento ou com o meio corrosivo. No caso do zinco, costuma-se usar resinas vinílicas, fenólicas, poliuretânicas e epoxídicas (PANOSSIAN, 1993).

A espessura das camadas quando se deseja proteção contra a corrosão geralmente varia entre 100 $\mu\text{m}$  e 250 $\mu\text{m}$ . Este processo é adequado para peças de grande porte e pode ser aplicado *in loco*.

#### 2.1.4.3 Imersão a quente

O processo de imersão a quente é um processo simples, um dos mais antigos e baratos entre os processos de revestimento metálico. É um processo que consiste na imersão do artefato metálico em banho fundido de zinco com aproximadamente 99% de pureza. O revestimento formado é constituído por diferentes ligas do metal base com o zinco de revestimento. Cada fase possui pequenas quantidades de ferro que diminui gradualmente quando aumenta a distancia entre o artefato e a camada mais superficial de zinco, a qual é totalmente isenta de ferro.

As características de cada uma das camadas formadas por intermetálicos ferro-zinco, dependem da natureza do substrato, da composição do banho fundido, das condições de deposição, do tempo e da temperatura de cada uma das fases do processo. A espessura total do revestimento, de acordo com a norma ASTM A 123/A, pode variar de 35 $\mu\text{m}$  a 100 $\mu\text{m}$ , porém na prática verificam-se camadas de até 300 $\mu\text{m}$ .

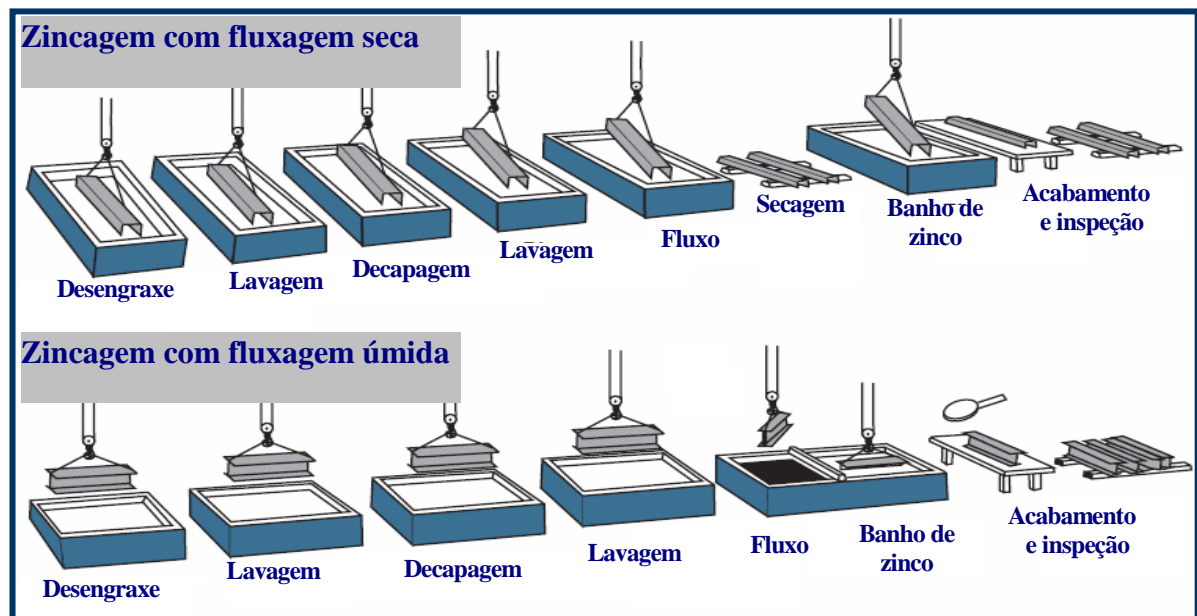
O processo pode ser contínuo ou não-contínuo de acordo com o material a ser processado. No caso de arames e chapas o processo precisa necessariamente ser contínuo e no caso de artefatos são processados por batelada. Os processos contínuos são normalmente automatizados e presentes em grandes indústrias e os processos não-contínuos são manuais ou semi-automático (ASM HANDBOOK A, 1994).

A imersão a quente em processo não-contínuo é apropriada para espessuras acima de 35 $\mu\text{m}$  e para processo contínuo para espessuras na faixa de 4,2 $\mu\text{m}$  a 54,6 $\mu\text{m}$  sendo estes valores não-rígidos, podendo variar de acordo com o processo (PANOSSIAN, 2002).

## 2.2 ZINCAGEM POR IMERSÃO A QUENTE NÃO-CONTÍNUO

O processo de zincagem por imersão a quente não-contínuo consiste basicamente nas etapas demonstradas no Desenho 3, com variações que dependerão da zincagem com fluxagem seca ou fluxagem úmida. As etapas demonstradas podem ser divididas em 4 fases:

- a) limpeza (desengraxe, decapagem, fluxagem, lavagens e secagens)
- b) zincagem
- c) acabamento
- d) inspeção



Desenho 3 – Etapas do Processo de Zincagem por imersão a quente.  
 FONTE: GALVINFO CENTER, 2008



### 2.2.1 Limpeza

A limpeza é a etapa do processo na qual são removidas todas as impurezas das peças, as quais se encontram sob formas diversas, originárias dos processos de fabricação, manuseio, transporte ou estocagem e possuem características físico-químicas variadas. Devido à diversidade das sujidades, que podem ser óleos minerais, vegetais e animais, resíduos secos de óleos emulsificados, óleos combustíveis e lubrificantes, óleos de proteção temporária, sabões e gorduras, óxidos e carepas, foram desenvolvidos diferentes processos com a finalidade de se conseguir peças isentas de impurezas, requisito essencial para um acabamento perfeito. Os processos de limpeza podem ser químico, mecânico ou térmico e em geral, consistem de: desengraxe, decapagem e fluxagem, capazes de remover e preparar as peças para imersão no banho de zinco. Cada um desses processos é apropriado para eliminar sujidades distintas, sendo que variações devem ocorrer entre empresas, de acordo com as características dos resíduos encontrados sobre as peças (RAHRIG, 2004; ABM, 1976; ASM HANDBOOK A, 1994).

No processo de desengraxe, pode ser utilizada uma solução aquosa alcalina, a quente. Este processo de limpeza é capaz de eliminar sujidades orgânicas, poeira, graxa e óleos. O desengraxe pode ser realizado a temperaturas entre 65°C e 82°C e a solução desengraxante controlada periodicamente para manter a concentração e não prejudicar a limpeza dos materiais.

O desengraxe é seguido do processo de decapagem, onde é utilizado ácido sulfúrico ou ácido clorídrico, responsável pela remoção da camada superficial de oxidação e carepas presentes nos artefatos (RAHRIG, 2004).

Logo após os processo de desengraxe e decapagem, as peças são submetidas à lavagem com água para remoção dos resíduos conforme demonstrado no Desenho 3.

O ácido quando sulfúrico é usado na faixa de concentração entre 3% e 4%, a temperatura variando de 60°C a 79°C. No caso de ácido clorídrico a concentração varia de 5% a 15%, com temperatura de 24°C a 38°C (ASM HANDBOOK A, 1994).

Um processo cada vez mais utilizado é o processo de jateamento, o qual atua como uma limpeza mecânica na peça. Este processo pode substituir ou reduzir o tempo do processo de decapagem. É capaz de remover carepas, óxidos superficiais e melhorar a aderência do zinco ao material.

O jateamento, apesar de bastante funcional, é um processo que foi descoberto acidentalmente para este fim. O propósito principal do jateamento é aumentar a resistência à

fadiga eliminando a tensão superficial do material. Entretanto quando as partículas individuais, em alta velocidade, movem-se na superfície do metal, produzem pequenas depressões arredondadas, causando deformações plásticas na superfície do metal no instante do contato, o que causa um aumento da área superficial e conseqüentemente da área de aderência. O efeito normalmente estende-se em profundidades entre 0,13mm e 0,25mm ou até 0,50mm abaixo da superfície (ASM HANDBOOK A, 1994).

Devido a todos os processos de remoção de sujidades não serem suficientes para proporcionar uma superfície quimicamente pura, após o desengraxe é feita a fluxagem úmida ou seca para proporcionar uma superfície com altíssimo grau de limpeza e permitir uma perfeita reação entre o ferro e o zinco (RAHRIG, 2004). A ação de um fluxante processa-se sob duas formas: a) parte é consumida na dissolução e escorificação das sujidades remanescentes e b) o restante exerce a função de “mordente”, isto é proporciona um molhamento eficiente da peça pelo zinco fundido (metais fundidos têm tensão superficial elevada e baixo poder umectante). Na “fluxagem seca”, as peças são imersas em uma solução aquosa e em seguida colocadas em uma estufa ou esteiras com temperatura entre 120°C e 150°C, formando assim uma película seca de sais sobre as peças. No processo por “fluxagem úmida” as peças são imersas no fluxo e imediatamente seguem para a zincagem, (ABM, 1976). Independentemente do processo, a solução utilizada é o cloreto de amônio e zinco ( $ZnCl_2 \cdot 2NH_4Cl$ ) (ASM HANDBOOK B, 1992).

### **2.2.2 Zincagem**

Na fase de imersão do material no zinco fundido, em temperatura superior a 427°C ocorre uma reação metalúrgica entre o zinco e o ferro, formando a camada de zinco (RAHRIG, 2004).

A camada obtida tem uma estrutura típica de difusão, constituída de camadas intermediárias de liga Zn-Fe e uma camada externa de zinco puro.

### **2.2.3 Acabamento e inspeção**

Após imersão, o excesso de zinco é removido por processo de vibração, centrifugação ou até manualmente, variando de acordo com a geometria do produto (RAHRIG, 2004).

A inspeção do material deve ocorrer primeiramente visualmente, verificando se

foram retirados todos os excessos de zinco que possam prejudicar a montagem com a contra-peça e se ocorreram falhas e deslocamentos. A verificação do material deve ser continuada seguindo as normas de inspeção específicas para zincagem por imersão a quente.

#### **2.2.4 Variáveis que influenciam na formação da camada de zinco**

Além da limpeza do material base, outros fatores como a temperatura do banho, o tempo de imersão no banho, a adição de outros elementos metálicos ao banho de zinco fundido, a composição química do substrato e a velocidade de resfriamento após zincagem, influenciam na adesão do revestimento de zinco (ABM, 1976).

##### **2.2.4.1 Temperatura do banho**

A temperatura de fusão do zinco puro é aproximadamente igual a 419,5°C. Os banhos de zinco líquido são operados normalmente em temperaturas entre 440°C e 470°C. Acima de 480°C a velocidade de dissolução do ferro no zinco líquido é extremamente elevada, e os efeitos destas temperaturas, tanto nas peças a serem zincadas como no tanque de zincagem, são considerados prejudiciais (ABM, 1976).

Em estudo realizado, para verificar a relação entre a espessura da camada de zinco formada e a temperatura do banho, foi possível verificar que para um tempo fixo e temperaturas entre 450°C e 530°C, a espessura da camada aumenta gradativamente até 480°C, conforme Gráfico 1; em 490°C, a espessura diminui bruscamente, e em temperaturas superiores permanece mais baixa, porém com pequenas variações (BICAO et al; 2008).

Diferentes microestruturas são apresentadas nas Fotografias 1, (a), (b), (c) e (d), mostrando o impacto da temperatura do banho de zinco na formação das camadas de zincagem. A temperatura alterou inclusive a composição química de cada fase formada, as quais estão relacionadas na Tabela 2.

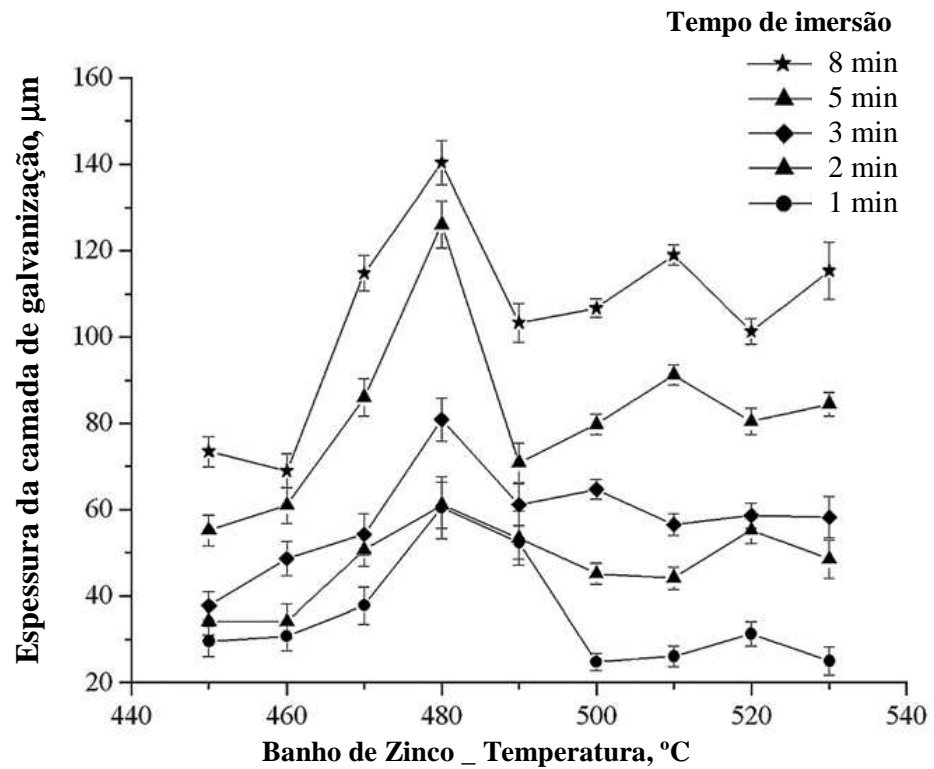


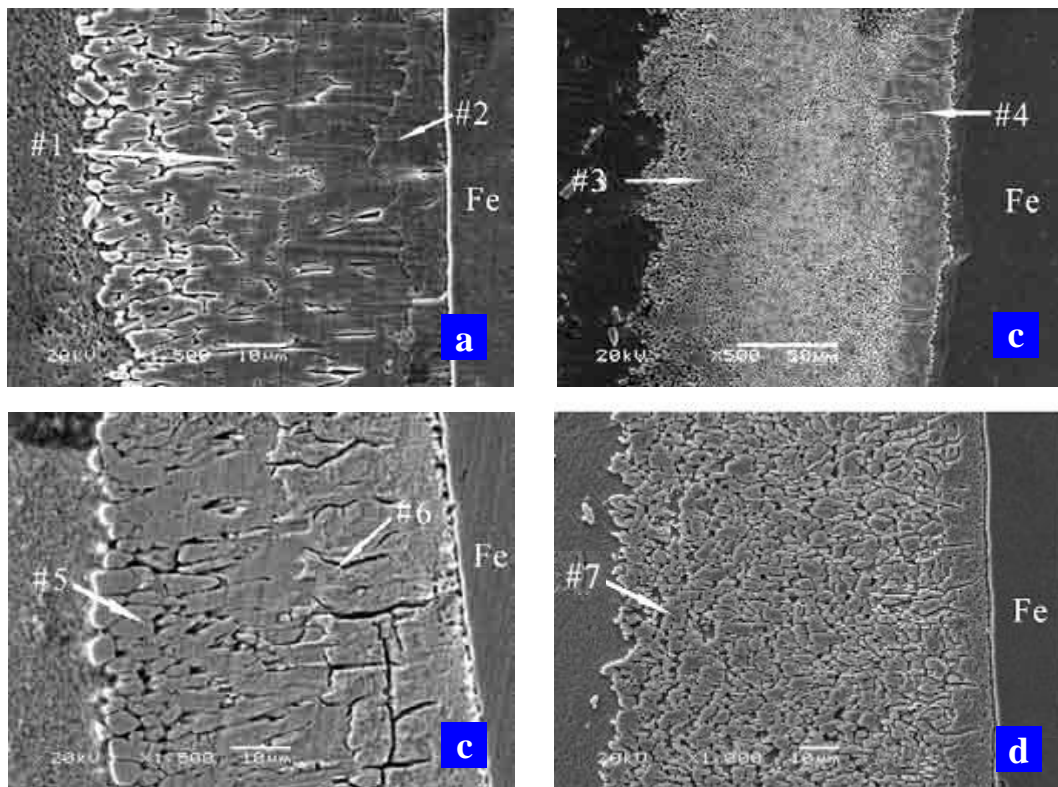
Gráfico 1 - Espessura da camada de zinco em função da temperatura do banho para diferentes tempos de imersão

Fonte: (BICAO et al; 2008)

Tabela 2 - Camadas de zinco formadas de acordo com a variação de temperatura

Número da fase	Fe (%)	Zn (%)	Fase	Temperatura(°C)
1	6,75	93,25	ζ	460
2	10,67	89,33	δ	460
3	6,24	93,76	ζ	480
4	10,89	89,11	δ	480
5	6,92	93,08	ζ	490
6	9,80	90,20	δ	490
7	8,72	91,28	δ	520

Fonte: (BICAO et al; 2008)



Fotografia 1- Microestrutura da camada de zincagem em função da temperatura, tempo de imersão de 5 minutos  
 FONTE: (BICAO et al; 2008)

#### 2.2.4.2 Tempo de imersão

O tempo de imersão no zinco fundido influencia diretamente a espessura da camada de zinco conforme demonstrado no Gráfico 2 (ASM HANDBOOK A, 1994).

Em estudo realizado por Bicao, em uma mesma temperatura de banho, o crescimento da camada ocorre conforme Gráfico 1, onde a maior espessura de camada obtida foi de 140µm com 480°C e 8 minutos de imersão, enquanto que na mesma temperatura, com 1 minuto e 2 minutos de imersão foram obtidas espessuras com aproximadamente 60µm (BICAO et al; 2008).

Os Gráficos 3a e 3b mostram a relação entre tempo de imersão e espessura da camada de zinco, em temperatura desconhecida (JORDAN; MARDER, 1997).

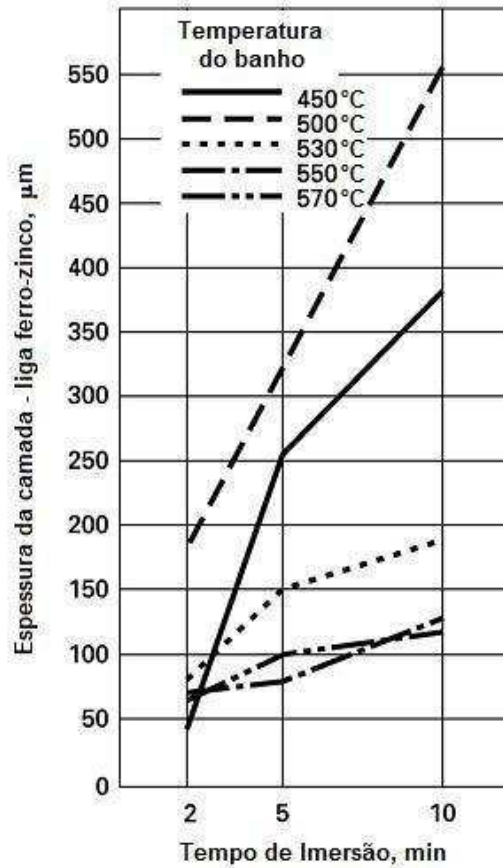


Gráfico 2 – Espessura da camada liga ferro/zinco em função do tempo de imersão  
 FONTE: ASM HANDBOOK A, 1994

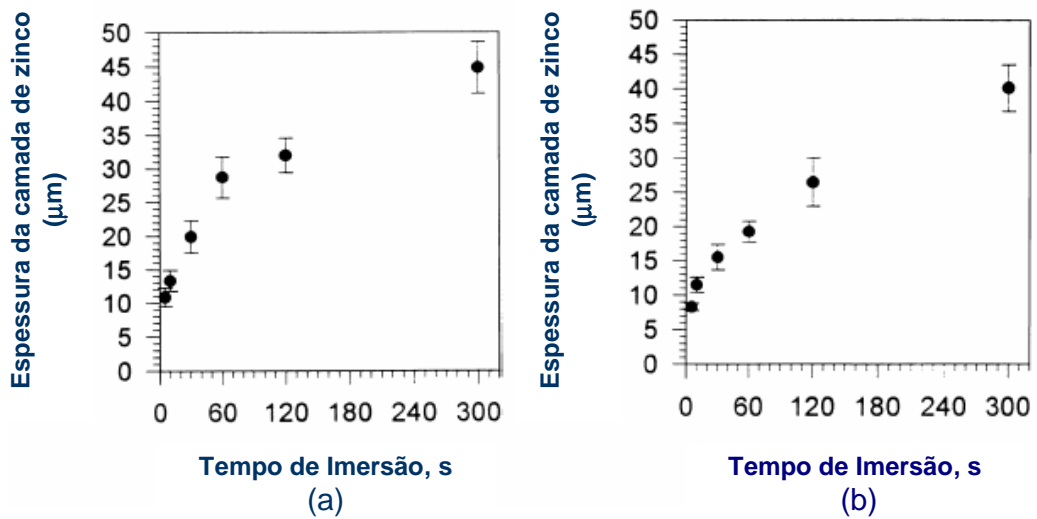


Gráfico 3- Espessura da camada de zinco em função do tempo de imersão, em temperatura não conhecida. Amostra a) tamanho de grão do substrato de 15µm ; amostra b) tamanho de grão do substrato de 85µm  
 FONTE: JORDAN; MARDER, 1997

### 2.2.4.3 Tempo de resfriamento

A adesão do revestimento de zinco no substrato é também afetada pela velocidade de resfriamento logo após a zincagem, e isto ocorre devido ao coeficiente de dilatação térmica do zinco ser maior que o do ferro. Por meio de resfriamento rápido, a diferença de contração pode provocar um enfraquecimento da ligação entre o ferro e o zinco, podendo ocorrer uma descamação do revestimento (ABM, 1976).

Em peças com grande massa pode ocorrer o mesmo problema de adesão, porém causado por um outro fator. A peça por possuir grande massa e desta forma demorar para resfriar, permite que a reação Fe-Zn continue, podendo transformar a camada superficial de zinco puro em camadas de liga zinco-ferro, as quais são mais frágeis do que a camada de zinco puro (ASM HANDBOOK A, 1994).

### 2.2.4.4 Composição química do banho de zinco

A norma ABNT NBR 6323 define que o zinco utilizado para zincagem deve ser no mínimo do tipo “comum” conforme a norma ABNT NBR 5996, onde a pureza mínima deve ser de 98% de zinco, com o máximo de 1,6% de chumbo, 0,05% de ferro e 0,5% de cádmio. Informação similar pode ser encontrada na norma ASTM A-123, a qual define categorias da norma ASTM B 6 que pode ser utilizada na zincagem. O aceitável é que o banho de zinco tenha 2% de impureza, pois metalurgicamente não há grandes vantagens em ter um banho de alta pureza (ASM HANDBOOK A, 1994).

Os elementos cádmio e ferro normalmente estão presentes no banho como contaminantes, sem serem colocados intencionalmente (ASM HANDBOOK A, 1994).

#### 2.2.4.4.1 Adição de alumínio

O alumínio é provavelmente o mais importante elemento de liga para ser adicionado no banho de zinco (MARDER, 2000). Em concentrações mínimas, acima de 0,01%, o alumínio proporciona maior fluidez do zinco e maior brilho da camada de zinco, efeito relacionado com a formação de uma camada de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sobre a camada superficial (ASM HANDBOOK B, 1992). A adição de alumínio em banho de zinco entre 0,1% a 0,3%, reduz o crescimento de camadas intermetálicas frágeis Fe-Zn, formando a camada  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  (Zn), a qual é bastante dúctil (MARDER, 2000).

A adição do alumínio no banho de zinco possui influência direta na formação das camadas dos artefatos zincados, formando inclusive uma fina camada intermetálica rica em alumínio, com aproximadamente 2% de alumínio, entre as fase zeta ( $\zeta$ ) e o substrato (FURDANOWICZ; SHASTRY, 1999).

Em estudo realizado por Lima, comprovou-se a presença de quantidades de alumínio (1400 ppm ou 0,14%) no banho de zinco reduziu a espessura da camada de zinco e aumentou o brilho das peças analisadas. Teores mais altos de alumínio, entre 0,7% a 1,0%, favoreceram a formação da corrosão branca e aumentaram a resistência à corrosão vermelha (LIMA, 2007).

Quando se adiciona alumínio no banho, em teores entre 0,1% a 0,2%, obtém-se camadas constituídas quase que exclusivamente pela fase eta (zinco puro). Somente na interface substrato/revestimento é que se verifica a formação de uma liga zinco/ferro, contendo 6% de ferro. Isto ocorre devido à formação de um composto de ferro/alumínio na interface zinco/aço capaz de inibir o crescimento de intermetálicos de ferro/zinco. Esta inibição, no entanto, é temporária. Por esta razão, a peça deve permanecer no banho apenas por curtos períodos. Para tempos de imersão maiores, a fase inibidora é atacada, iniciando-se o crescimento das fases intermetálicas ferro-zinco. Este crescimento, inicialmente é localizado, porém depois de certo tempo torna-se generalizado.

#### 2.2.4.4.2 *Adição de chumbo*

A principal função da adição do chumbo no banho de zinco é o aumento da fluidez do zinco fundido, porém entre outras desvantagens menores, é considerado um contaminante ambiental, portanto busca-se continuamente sua substituição.

Na zincagem por imersão a quente a adição de chumbo em banhos de zinco, mesmo em pequena quantidade, entre 0,01% e 0,10%, pode influenciar a variação no brilho e na resistência a corrosão das peças zincadas. Em experimentos realizados por Asgari, foi relacionado que quantidades maiores de chumbo tornaram as camadas mais opacas, isto devido à modificação da estrutura do material. Quantidades mais elevadas de chumbo, reduzem a resistência elétrica das camadas de zinco, conseqüentemente reduzem a resistência à corrosão (ASGARI; TOROGHINEJAD; GOLOZAR, 2007).



#### 2.2.4.4.3 Adição de bismuto e níquel

Bismuto e níquel em concentrações de 1000 ppm (0,1%) provavelmente reduzem a fluidez do banho, pois proporcionam camadas finas de zinco. Em concentrações de 1000 ppm (0,1%), o bismuto aumenta a resistência à corrosão branca e diminuiu a resistência à corrosão vermelha, independentemente da espessura da camada dos revestimentos (LIMA, 2007).

No Brasil, a Votorantim Metais, produz ligas de zinco, com adição de 0,5% de níquel, com a finalidade de neutralizar a ação indesejável do “silício reativo”, presente nos aços baixo carbono, que são utilizados na maioria das estruturas metálicas. Este elemento evita que o revestimento de zinco tenha camadas espessas e melhora o desempenho do processo, com o principal objetivo de evitar desperdícios de zinco. O zinco utilizado possui pureza de 99,995% (SIDERURGIA BRASIL, 2008).

#### 2.2.4.5 Composição química do substrato

O aço possui em sua composição, entre outros elementos, o silício e o fósforo, os quais influenciam na formação da camada de zinco. A espessura da camada de zinco é modificada principalmente pelo teor de silício presente no aço, pois este elemento, ativa a reação Fe-Zn, e colabora para a formação de subcamadas intermediárias, podendo inclusive tornar a camada de zinco mais espessa do que o especificado, por favorecer a formação dos intermetálicos e por conseqüência torná-la mais frágil (SIDERURGIA BRASIL, 2008).

A curva de Sandelin, apresentada no Gráfico 4, mostra a variação da espessura da camada de zinco em relação à concentração do silício contido no aço. Nesta ilustração, a área do gráfico identificada como “I” é conhecida como área de Sandelin, onde pode ser observada a maior espessura de camada para um teor de silício entre 0,05% e 0,15%. Para aços com mais de 0,25% silício, a espessura da camada aumenta com a porcentagem de silício, até atingir um valor praticamente constante a partir de 0,4% de silício, identificado como “II”. Com base nestes dados é recomendado que a porcentagem de silício no aço, seja superior que 0,4% ou entre 0,05% e 0,15% (GALVINFO CENTER, 2008).

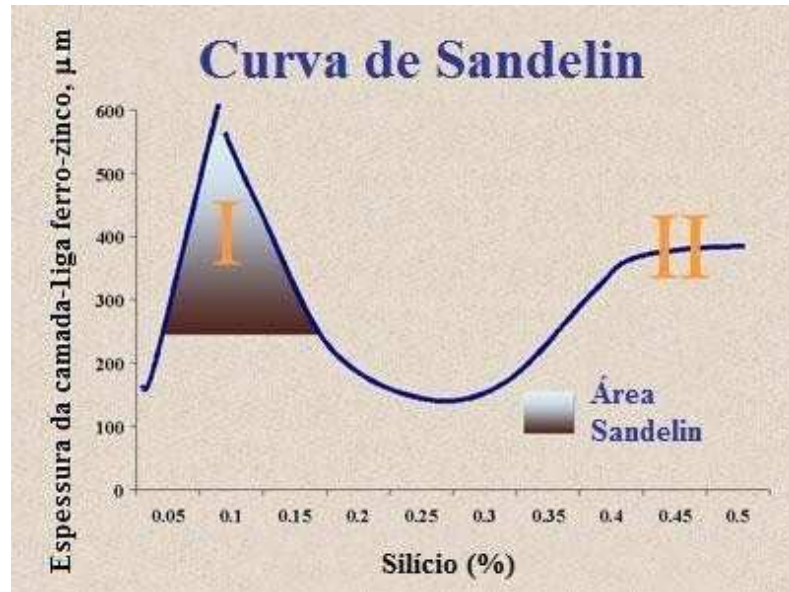


Gráfico 4 - Curva de Sandelin  
 FONTE: GALVINFO CENTER, 2008

### 2.3 MORFOLOGIA DO REVESTIMENTO DE ZINCO OBTIDO POR PROCESSO DE ZINCAGEM A QUENTE

Como já foi citado, existem algumas variáveis que são responsáveis pela constituição da camada de zinco. Numa condição bastante comum de um artefato de aço baixo carbono revestido em banho de zinco fundido, em condições normais de operação (sem nenhum elemento de adição), pode ser considerada a formação de quatro fases do revestimento (PANOSSIAN, 2002):

- fase gama ( $\gamma$ ) - fina camada, próxima ao substrato;
- fase delta ( $\delta$ ) - camada mais compacta e mais grossa;
- fase zeta ( $\zeta$ ) - uma camada com pequena porcentagem de ferro ;
- fase eta ( $\eta$ ) - uma camada mais externa constituída de zinco puro.

Com exceção da fase eta, todas as outras fases presentes no revestimento após o processo de zincagem a quente possuem dureza elevada e são frágeis. Se a formação de camadas intermediárias for reduzida ou nula, de maneira que o depósito seja composto quase inteiramente de zinco puro, o revestimento seria dúctil e o material zincado poderia ser dobrado sem causar trincamento ou esfoliação do zinco, porém as ligas constituintes das camadas intermetálicas possuem dureza superior a do zinco puro, sendo resistentes ao desgaste, mas, frágeis, conforme Tabela 3 (ABM, 1976).

Tabela 3- Propriedades das camadas de zincagem por imersão a quente

Camada	Composição	Dureza DPN	% Fe	Temperatura de fusão (°C)
Eta	Zn	70	0	454
Zeta	FeZn <sub>13</sub>	179	6	530
Delta	FeZn <sub>7</sub>	244	7-12	530-670
Gama	Fe <sub>8</sub> Zn <sub>10</sub>	....	21-28	670-780

FONTE: ASM HANDBOOK A, 1994

A formação das camadas de zinco pode ser melhor esclarecida com o diagrama de fase do zinco (Diagrama 1).

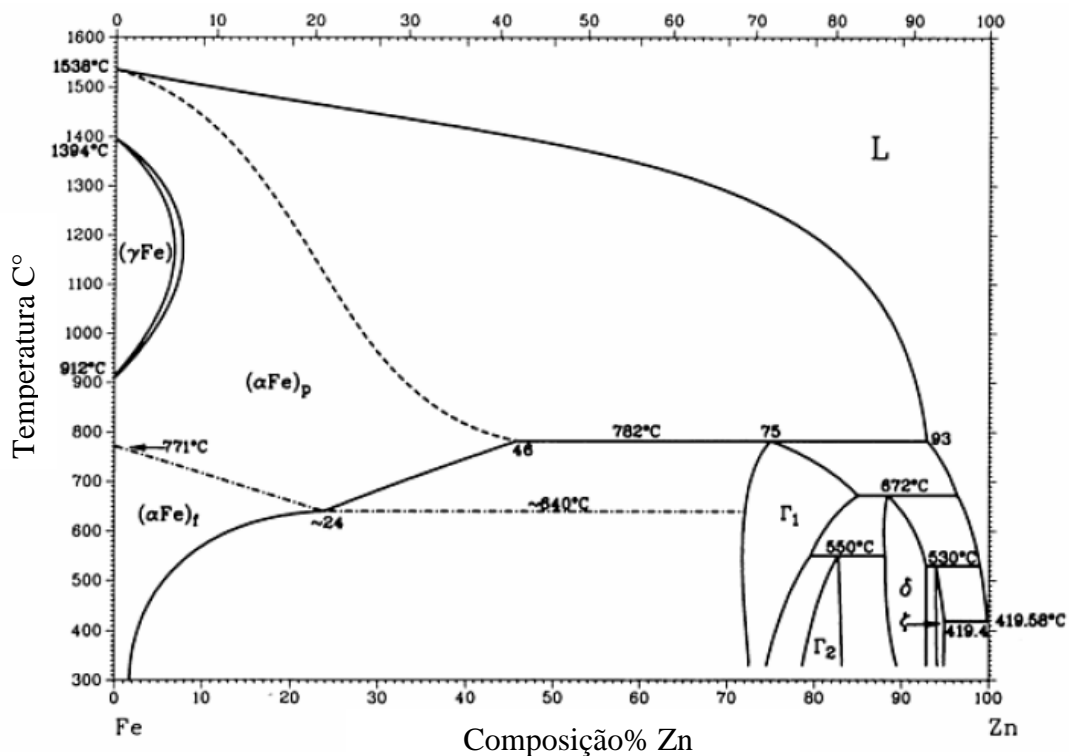
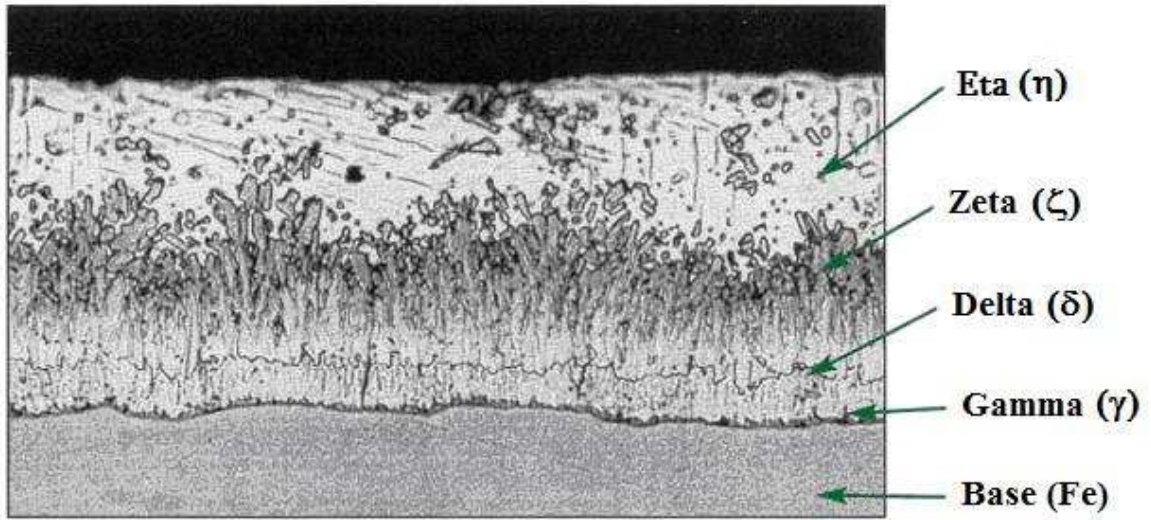


Diagrama 1- Diagrama de fase do Zinco

Fonte: ASM HANDBOOK A.

Usualmente as fases intermediárias compreendem a maior parte do revestimento. A resistência do revestimento depende fundamentalmente da estrutura das camadas de fases intermediárias, as quais são porosas e possuem pouca coesão metálica devido ao crescimento direcional e a variações volumétricas que ocorrem. As fases formadas num revestimento à base de zinco estão representadas na Fotografia 2 (AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, 2008).



Fotografia 2 - Micrografia típica de uma camada de zincagem por imersão a quente.  
FONTE: GALVINFO CENTER, 2008

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do presente trabalho foram escolhidos alguns componentes, fabricados com aços SAE 1010 e SAE 1020, revestidos com zinco, pelo processo de zincagem a quente. Os componentes ensaiados são utilizados na montagem de redes de transmissão (Fotografia 3 (a) e (b)) e distribuição elétrica (Fotografia 4) e telecomunicações (Fotografia 5). Foram selecionados artefatos com diferentes geometrias e processados em fornecedores distintos e que tiveram aprovação ou rejeição após serem submetidos na empresa PLP aos seguintes quatro ensaios: ensaio visual, verificação da espessura da camada, verificação da aderência e verificação da uniformidade do revestimento. Nesta empresa, os ensaios são realizados na ordem que foram citados.



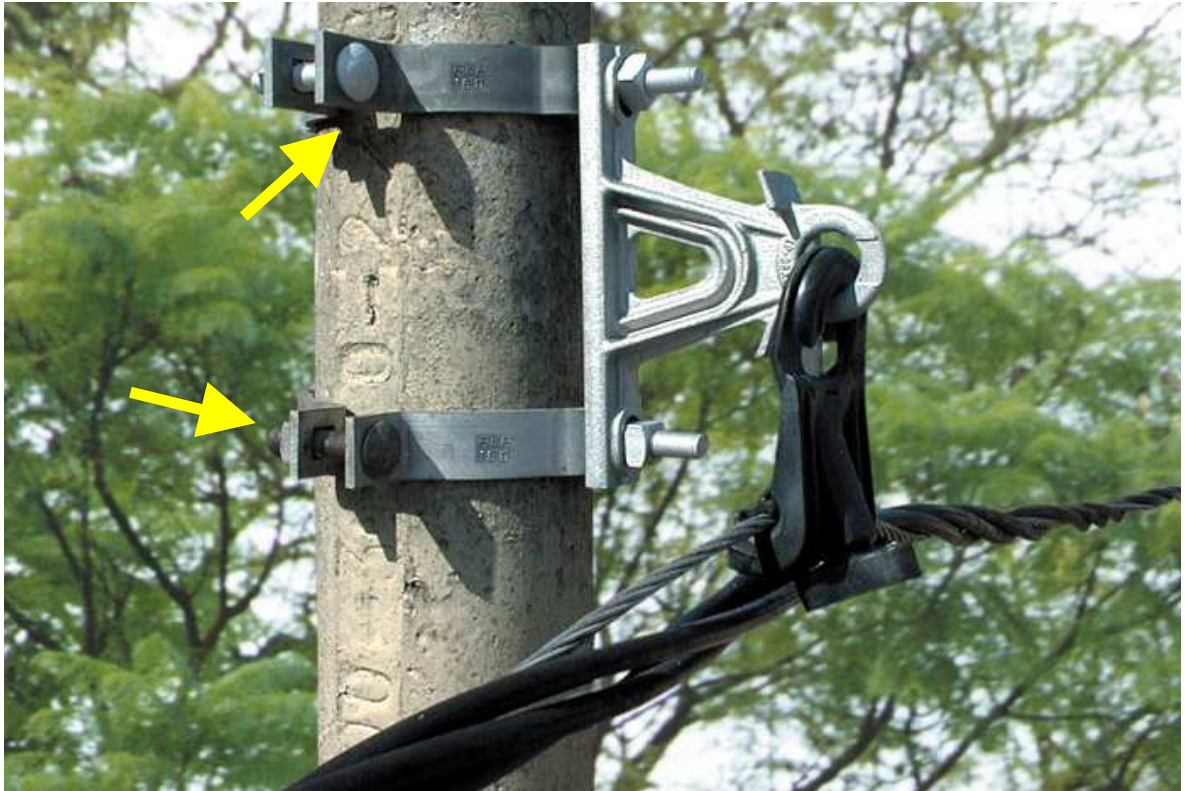
(a)



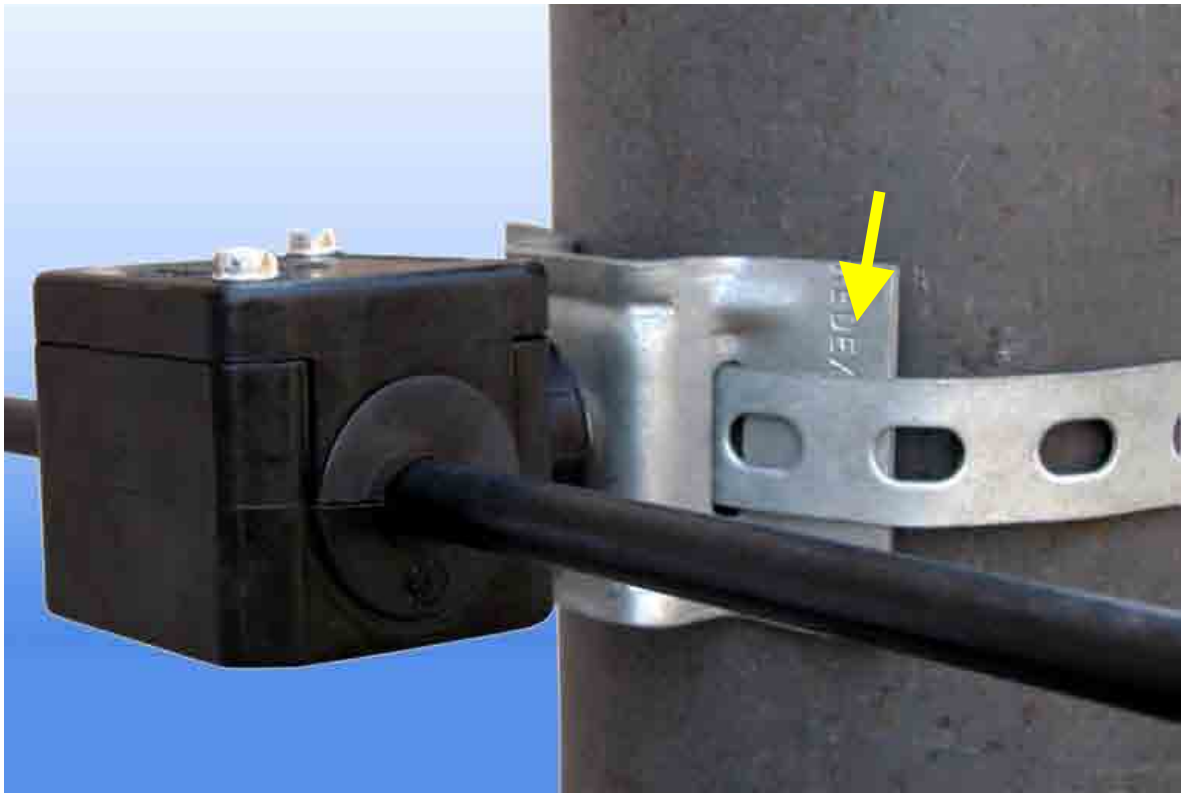
(b)

Fotografia 3 - Demonstração de instalações de redes de transmissão de energia elétrica





Fotografia 4 - Exemplo de aplicação de peças zincadas em redes de distribuição de energia elétrica



Fotografia 5 - Exemplo de aplicação de peças zincadas em rede de telecomunicações

Após a seleção de componentes rejeitados e aprovados, corpos-de-prova foram preparados e submetidos à microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura para verificação comparativa entre as estruturas das camadas de zinco formadas no processo de zincagem por imersão a quente. Também foram realizados ensaios de corrosão em três ambientes diferentes: ambiente considerado urbano de baixa poluição; ambiente simulando água do mar; câmara de névoa salina.

Nos itens a seguir são detalhados os métodos dos ensaios executados na PLP, antes da rejeição de lotes e após a seleção para avaliação das causas da rejeição.

### 3.1 ENSAIOS REALIZADOS NA PLP

Para a execução na empresa PLP dos ensaios normalizados foram seguidas as normas ABNT relacionadas abaixo:

- ABNT NBR 6323, galvanização de produtos de aço ou ferro fundido - Especificação
- ABNT NBR 7398, produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente - Verificação da aderência do revestimento;
- ABNT NBR 7399, produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente - Verificação da espessura do revestimento por processo não-destrutivo - Método de ensaio;
- ABNT NBR 7400, produto de aço ou ferro fundido - Revestimento de zinco por imersão a quente - Verificação da uniformidade do revestimento - Método de ensaio;
- ABNT NBR 8094, material metálico revestido e não-revestido - Corrosão por exposição à névoa salina.

#### 3.1.1 Avaliação visual

Conforme definido pela norma ABNT NBR 6323, artefatos revestidos de zinco por imersão a quente podem ter no máximo  $8\text{mm}^2$  de área não-protegida para serem aprovados. Outros aspectos visuais como a variação de tonalidade, brilho, cristalização do revestimento, excesso de zinco, inclusão de fluxo e presença de corrosão branca não são motivos de rejeição, desde que os três últimos não prejudiquem a funcionalidade e/ou a durabilidade do produto.

A avaliação visual por amostragem de lotes recebidos na empresa PLP, consistiu em verificar a presença de áreas não-protetidas. Na presença destas, foi necessário comparar qualitativamente estas áreas com uma área padrão de  $8\text{mm}^2$ .

### 3.1.2 Determinação da espessura da camada de zinco

A espessura da camada de zinco pode ser determinada por ensaio não-destrutivo com método magnético. Na empresa PLP e para a definição das peças aprovadas e que fazem parte deste trabalho, foi utilizado o equipamento de marca Mytutoyo, conforme procedimento descrito na norma ABNT NBR 7399. Os critérios de aceitação de espessura de revestimentos estão definidos na Tabela 4 a qual é parte integrante da norma ABNT NBR 6323.

Tabela 4 -Massa de zinco, por unidade de área de materiais zincados

Material	Massa mínima por unidade de área ( $\text{g}/\text{m}^2$ )		Espessura média do revestimento ( $\mu\text{m}$ )	
	Amostra individual	Média da amostra	Amostra individual	Média da amostra
Fundidos	450	500	63	70
Conformados mecanicamente				
Espessuras (e):				
$e < 2,0\text{mm}$	300	350	42	49
$2,0\text{mm} \leq e < 4,0\text{mm}$	350	400	49	56
$4,0\text{mm} \leq e < 6,0\text{mm}$	450	500	63	70
$e \geq 6\text{mm}$	530	600	74	84
Roscados:				
$\phi \geq 9,5\text{mm}$	305	380	43	53
$\phi < 9,5\text{mm}$	260	305	37	42

Nota 1: a espessura do revestimento de zinco é determinada através da equação;  $e = m_A / 7,14$

e: é a espessura do revestimento de zinco, expressa em micrômetros ( $\mu\text{m}$ );

$m_A$ : é a massa do revestimento de zinco por unidade de área, expressa em gramas por metro quadrado ( $\text{g}/\text{m}^2$ );

7,14 é a massa específica do zinco, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Nota 2: quando houver espessuras e tipos de aços diferentes em uma única peças, devem-se considerar os pontos de menor espessura de zinco para a determinação da massa mínima por unidade de área.

Fonte: ABNT NBR 6323

### 3.1.3 Verificação da aderência da camada de zinco

A verificação da aderência da camada de zinco foi realizada por meio de um ensaio destrutivo com procedimento descrito na norma ABNT NBR 7398. De acordo com



este ensaio foi utilizado um martelo basculante, com as características definidas na própria norma.

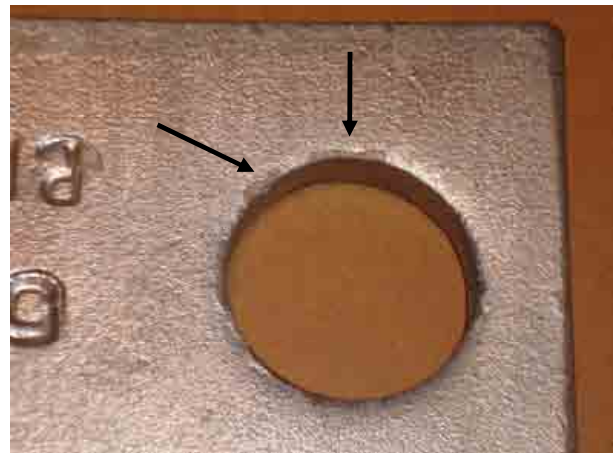
O critério de aprovação foi baseado na ausência de esfoliações da camada de revestimento após a mesma ter sido atingida pelo martelo. Se houver esfoliação sob o fio da lamina a peça também é considerada aprovada.

### 3.2 PEÇAS COM FALHAS DE DESPLACAMENTO ESCOLHIDAS PARA ESTE TRABALHO

Nas Fotografias de 6 a 9 são apresentadas peças com falhas e deslocamento, separadas de lotes rejeitados. Nas três primeiras fotografias, são mostradas peças rejeitadas por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323. A Fotografia 9 apresenta a porca rejeitada por estar com deslocamento após a submissão do ensaio de verificação de aderência do revestimento de acordo com a norma NBR 7398.



Fotografia 6 - Chapa "L", SAE 1010, apresentando deslocamento lateral e rejeitada por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323



Fotografia 7 - Espaçador, SAE 1010, apresentando deslocamento na extremidade do furo e rejeitada por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323



Fotografia 8 -Porca de aço SAE 1020, forjada, apresentando deslocamento, rejeitada por avaliação visual conforme norma ABNT NBR 6323



Fotografia 9 -Porca de aço SAE 1020, forjada, apresentando deslocamento após ensaio, rejeitada conforme norma ABNT NBR 7398

### 3.3 MICROSCOPIA ÓPTICA E MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA (MEV)

Antes das amostras serem submetidas aos ensaios de microscopia óptica e microscopia de varredura, foram preparados corpos-de-prova conforme subitem 3.3.1. As peças apresentando falhas foram comparadas com peças semelhantes, porém de lotes aprovados. O procedimento de preparação e ensaio de peças aprovadas e rejeitadas foi o mesmo.

#### 3.3.1 Preparação de corpos-de-prova

As amostras como recebidas foram cortadas numa cortadeira com disco abrasivo (cut-off - Panambra). Para não danificar o revestimento de zinco os corpos-de-prova já cortados foram envolvidos em papel alumínio e embutidos a quente em baquelite, numa embutidora metalográfica Tempopress da Panambra.

As amostras embutidas foram lixadas usando uma lixadeira automática DP-10 com lixas de carbetto de silício nas granulometrias 240, 320, 400 e 600 mesh. Posteriormente, os corpos-de-prova, embutidos e lixados foram polidos utilizando pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e então atacados com Nital 5% por 5 segundos.

Para a avaliação da estrutura do substrato do espaçador, mostrado na Fotografia 7, o mesmo foi decapado em ácido clorídrico concentrado (37% massa/massa) para remoção total do revestimento de zinco, antes do embutimento.

### 3.3.2 Microscopia óptica

A microscopia óptica serviu para: dimensionar com precisão a espessura do revestimento, observar a proteção galvânica da camada de zinco, verificar a estrutura do substrato, verificar as falhas do revestimento e a estrutura de cada uma das fases zinco-ferro.

Foi utilizado um microscópio óptico OLYMPUS BX60M, acoplado a um sistema de digitalização e análise de imagens da Arotec, utilizando o software de captura de imagens Image-Pro Express, versão 5.1.0.12, onde foi possível imprimir fotografias das microestruturas analisadas.

### 3.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raio-X

A camada de zinco das peças selecionadas foi avaliada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca FEI, modelo Quanta 600 FEG, com espectrômetro de dispersão de energia (EDS) de SDD (Silicon Drift Detector) modelo XFlash 4030, marca Bruker, com software para microanálise Esprit e também da Bruker, para verificar as características das diferentes fases do revestimento e determinação dos elementos químicos presentes na camada Zn-Fe. Antes dos ensaios as amostras foram cobertas de carbono com o equipamento de marca Bal-Tec, modelo Sputter Coater SCD 050.

## 3.4 VERIFICAÇÃO DA UNIFORMIDADE DO REVESTIMENTO

O ensaio para verificação da uniformidade do revestimento da camada de zinco (ensaio de preece) é um ensaio destrutivo, realizado conforme descrito na norma ABNT NBR 7400. Este ensaio consiste na imersão do artefato em uma solução de sulfato de cobre por diversas vezes na solução. Em cada imersão, o zinco do revestimento reage com os íons de cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) formando cobre metálico (Cu), o qual é facilmente removido. A não possibilidade de remoção deste depósito caracteriza ausência do revestimento e o depósito do cobre metálico sobre o substrato. A norma ABNT NBR 6323 define o número mínimo de imersões a partir das quais o revestimento é considerado uniforme (aprovado).

### 3.5 ENSAIO DE CORROSÃO

Foram ensaiadas placas de aço SAE 1020, com 213mm de comprimento, 37mm de largura e 4,9mm de espessura. Na Fotografia 10 é apresentada uma destas placas na face que foi avaliada (área 7.881mm<sup>2</sup>).



Fotografia 10 -Placa de aço 1020, zincada utilizada como padrão para os ensaios de corrosão

Como o objetivo deste ensaio foi verificar a proteção anticorrosiva da camada de zinco, foram removidas diferentes áreas de revestimento, com o auxílio de uma fresa. A espessura da camada retirada foi de 2mm e cada área retirada variou entre 9mm<sup>2</sup> e 1080mm<sup>2</sup>

As peças foram expostas em três ambientes distintos

- a) ambiente considerado urbano de baixa poluição;
- b) ambiente simulando água do mar;
- c) câmara de névoa salina.

Os detalhes sobre os ensaios e as quantidades de peças são descritos nos subitens a seguir.

#### 3.5.1 Exposição à atmosfera urbana

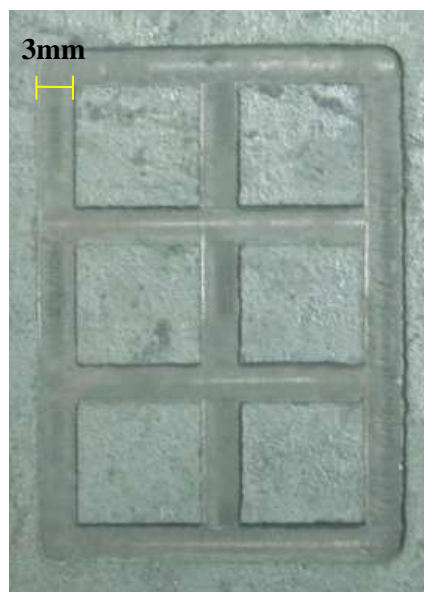
Para estes ensaios foram preparadas 6 placas com as mesmas características da placa da Fotografia 10 e que tiveram removidas áreas diferentes do revestimento de zinco.

As placas foram expostas a um ambiente considerado urbano sem poluentes e avaliadas visualmente a cada 24 horas até surgimento dos primeiros sinais de ferrugem.

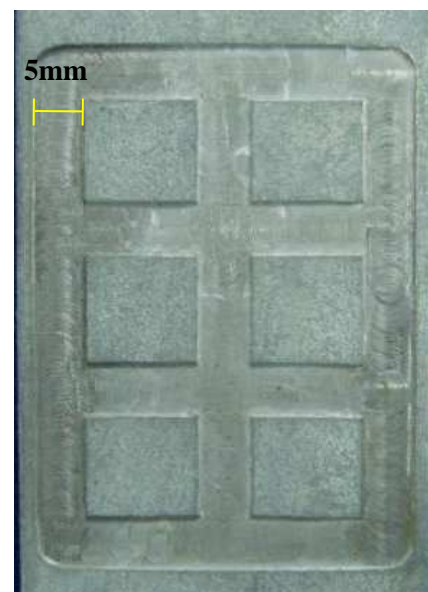
A Tabela 5 apresenta a área removida de cada uma das placas ensaiadas. Como informação adicional a Fotografia 11 ilustra as áreas removidas das placas 5 e 6.

Tabela 5 - Áreas removidas para ensaio de resistência em exposição ao meio ambiente

Placa	Dimensões área removida (mm x mm)	Área total removida (mm <sup>2</sup> )	Áreas não-removida
1	3 x 3	9	7872
2	5 x 5	25	7856
3	7 x 7	49	7832
4	15 x 15	225	7656
5	Conforme Fotografia 11 (a)	618	7263
6	Conforme Fotografia 11 (b)	1150	6731



(a)



(b)

Fotografia 11 -Placas 5 (a) e placa 6 (b) -detalhes da área removida

### 3.5.2 Teste da gota salina (de Evans)

As soluções estoque para este ensaio foram: cloreto de sódio 3% (massa/volume), ferricianeto de potássio, com concentração de 0,1 mol/L (coloração amarela) e fenolftaleína (incolor).

Com estas soluções foram obtidas 2 misturas distintas; ambas de coloração amarelo pálido.

Mistura A: 60 ml de NaCl 3% + 1 ml ferricianeto de potássio 0,1 mol/L + 0,5 ml fenolftaleína;

Mistura B: 60 ml de NaCl 3% + 1 ml ferricianeto de potássio 0,1 mol/L.

A presença de ferricianeto de potássio no cloreto de sódio permite verificar a formação de íons  $Fe^{2+}$  (a solução fica tingida de azul) resultantes da corrosão do aço. Em presença da fenolftaleína as áreas catódicas, onde ocorre a redução do oxigênio dissolvido, apresentam coloração rosa.

Foram ensaiadas 3 placas, numerada de 7 a 9. Em cada uma foi colocada, sobre a área sem revestimento, uma ou mais gotas das misturas preparadas. Na Tabela 6 são especificadas as dimensões das áreas removidas e as respectivas misturas .

Tabela 6 -Área removida da peças utilizadas no ensaio de gota salina

Placa	Dimensões área removida (mm x mm)	Área total removida (mm <sup>2</sup> )	Áreas não-removidas (mm <sup>2</sup> )	Mistura
7	3 x 3	9	7872	A
8 a	3 x 30	90	7791	A
8 b				B
9	0 x 0	0	7881	A

### 3.5.3 Ensaio em câmara de névoa salina

Para realização do ensaio foi seguida a norma ABNT NBR 8094.

Cinco peças, numeradas de 10 a 14, previamente submetidas à remoção de diferentes áreas do seu revestimento conforme Tabela 7, foram colocadas na posição vertical, por 60 horas em uma câmara de névoa salina com 5% de cloreto de sódio. O ensaio foi continuado até o término de 300 horas.

Tabela 7 -Áreas removidas para ensaio de corrosão em câmara de névoa salina

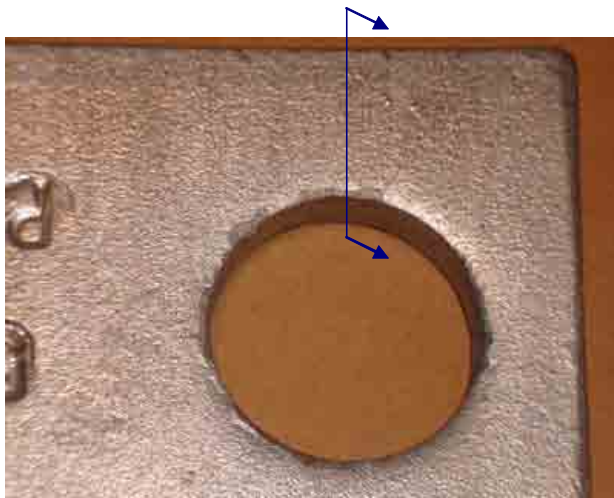
Placa	Dimensões área removida(mm x mm)	Área total removida (mm <sup>2</sup> )	Áreas não-removidas
10	3 x 3	9	7872
11	5 x 5	25	7856
12	3 x 30	90	7791
13	Conforme Fotografia 11 (a)	618	7263
14	Conforme Fotografia 11 (b)	1150	6731

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

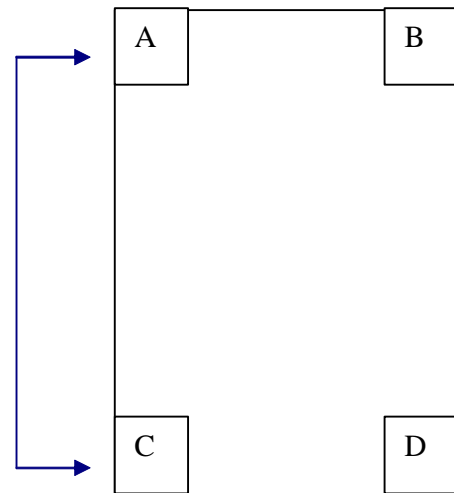
Neste item, são apresentados os resultados organizados de acordo com os ensaios realizados.

### 4.1 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE UM ESPAÇADOR APRESENTANDO DESPLACAMENTO APENAS PRÓXIMO AO FURO

A rejeição de peças do lote selecionado para este estudo foi baseada na presença de pontos de deslocamento do revestimento somente na região do furo, com área total superior a  $8\text{mm}^2$  como é observado na Fotografia 12. Este fato originou a suspeita da microestrutura do aço encontrar-se diferente nas regiões do deslocamento, com relação ao restante do substrato. Para realização da análise metalográfica, foi preparado o corpo-de-prova após corte conforme ilustrado na Fotografia 12 e no Esquema 1.



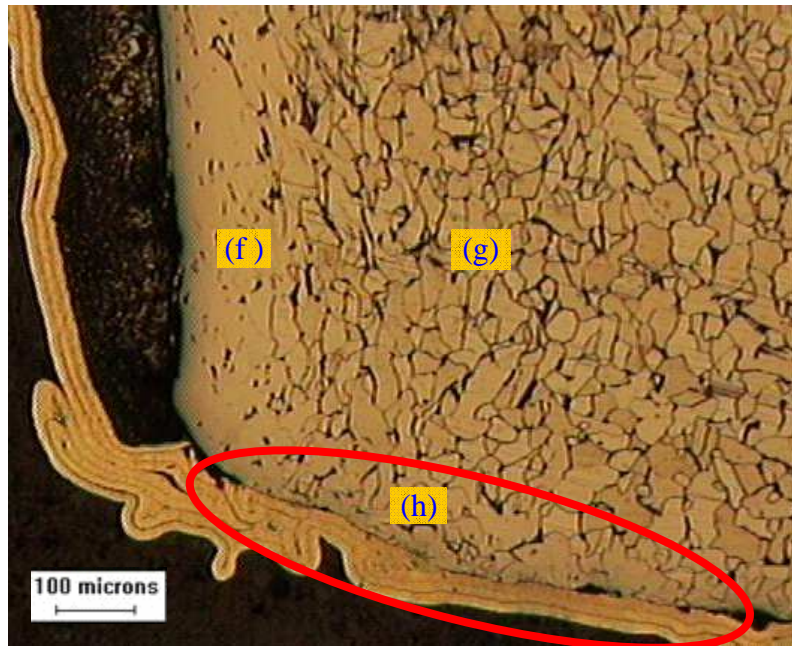
Fotografia 12 - Espaçoador apresentando deslocamento próximo ao furo;



Esquema 1 - Ponto de corte do espaçoador

A Fotografia 13 mostra a microestrutura após ataque com nital, da região (D) do espaçoador, a qual apresentava deslocamento.

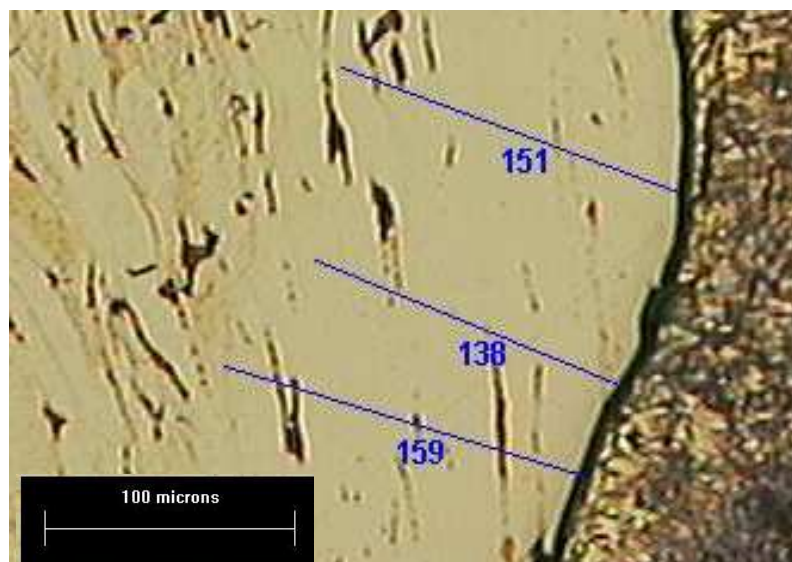




Fotografia 13 – Região de deslocamento da camada de zinco

A fotografia 13 foi dividida em três regiões distintas: (f) próxima a camada de revestimento, (g) na parte central do substrato e (h) substrato junto ao deslocamento. A região (f) é caracterizada pela ausência de revelação dos grãos; na região (g) são visualizados grãos bem definidos. O mesmo ocorre na região (h) onde se verifica também vestígio de zinco.

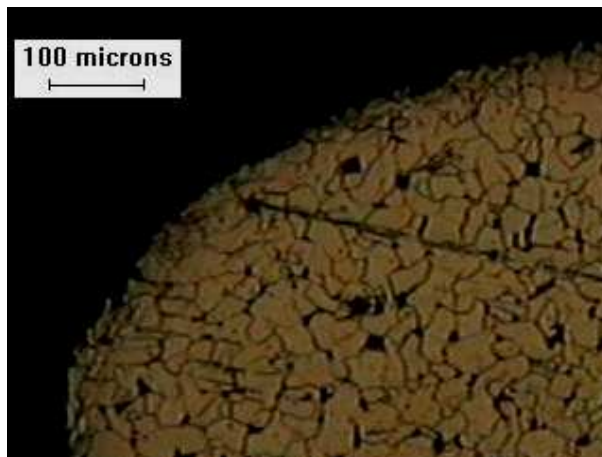
Na tentativa de revelação da estrutura dos grãos em (f) o ataque foi repetido por duas vezes, mantendo o mesmo resultado. Este comportamento sugere uma proteção catódica da camada de revestimento sobre os grãos do substrato, que não puderam ser revelados com nital e assim a avaliação da estrutura do substrato não foi conclusiva. Na Fotografia 14 observa-se o alcance da proteção catódica que é em média 50% maior do que a espessura da camada de zinco.



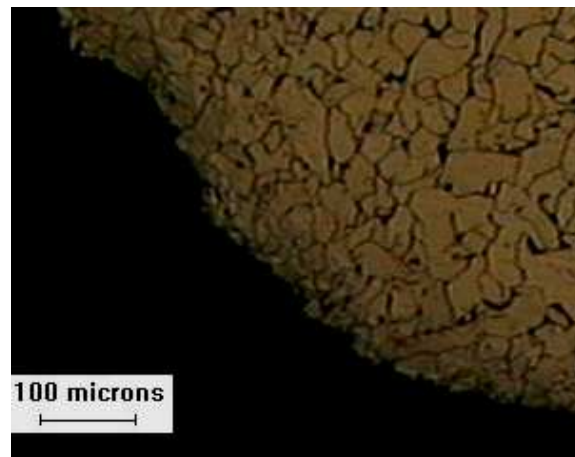


## Fotografia 14 - Proteção galvânica do zinco ao ataque de nital

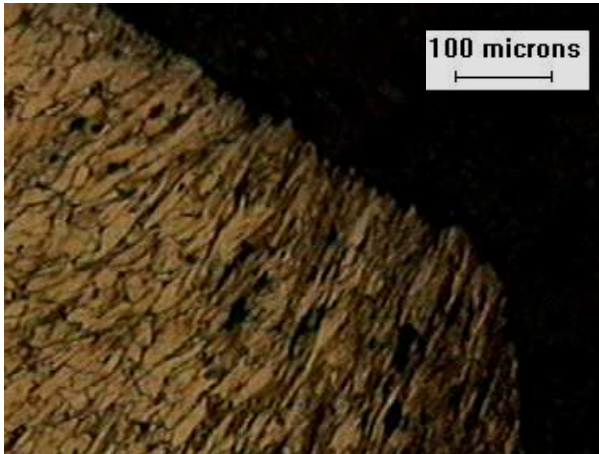
Para revelar os grãos na região com proteção catódica, um outro corpo-de-prova da peça apresentada na Fotografia 12 e com mesmas características, foi decapado com ácido clorídrico concentrado (37%) e então preparado para realização do ensaio metalográfico. As microestruturas das regiões A, B, C e D, indicadas nas Fotografias 12, são apresentadas nas Fotografias 15 a 18 respectivamente. Nota-se que apenas a microestrutura da região C mostrada na Fotografia 17 apresenta-se diferente em relação às outras; em C se observam grãos aparentemente deformados enquanto em A, B e D os grãos são semelhantes e não-deformados (Fotografias 15, 16 e 18). Como em C não houve deslocamento e os grãos da região D (com deslocamento) não apresentaram modificações significativas comparadas aos grãos em A e B, não foi verificada nenhuma relação entre estrutura do substrato e falhas na camada de zinco. A hipótese de a microestrutura diferente ser a causadora do deslocamento não pode ser comprovada e assim não se pode atribuir o deslocamento às modificações nos grãos. No caso particular do espaçador, a deformação provavelmente está relacionada ao processo de estampagem para obtenção do furo do espaçador.



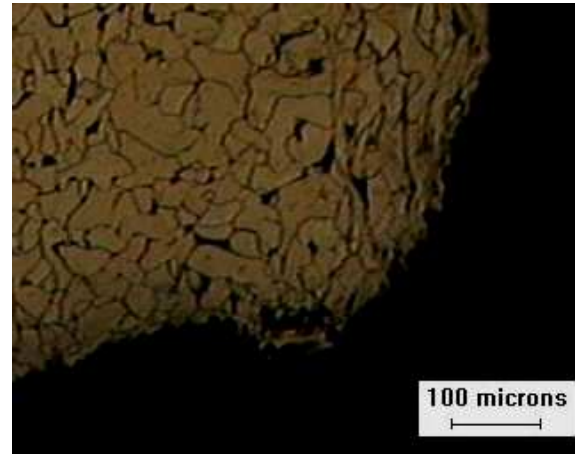
Fotografia 15 - Microestrutura do ponto A



Fotografia 16 - Microestrutura do ponto B



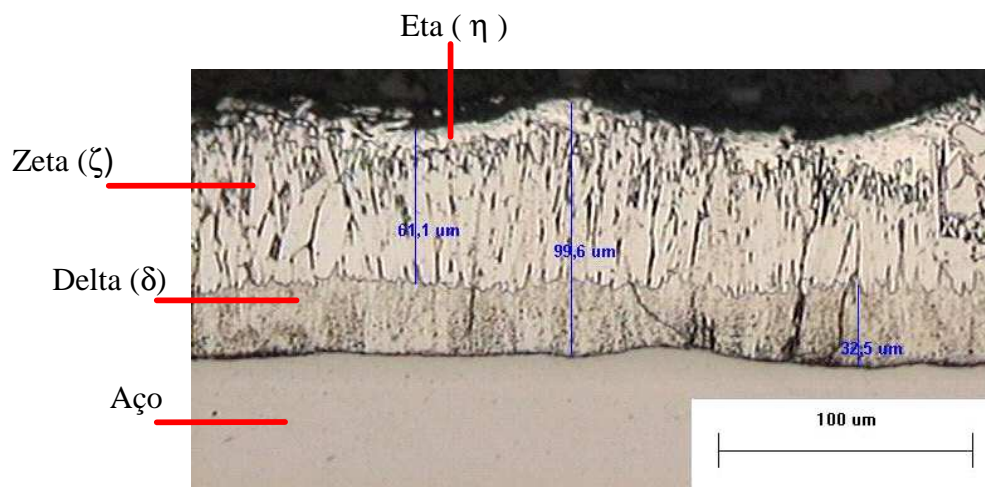
Fotografia 17 - Microestrutura do ponto C



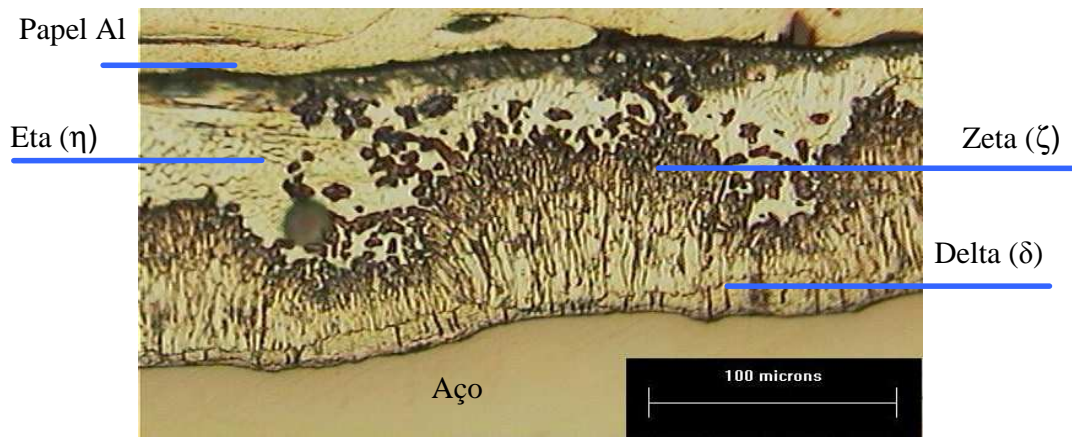
Fotografia 18 - Microestrutura do ponto D

#### 4.2 MEDIDA DA ESPESSURA E ESTUDO METALOGRÁFICO DOS REVESTIMENTOS DE ZINCO APROVADOS E REJEITADOS

A morfologia do revestimento do espaçador de aço SAE 1010, proveniente de lotes aprovado e rejeitado, pode ser observado nas Fotografias 19 e 20 respectivamente. O perfil da camada da peça aprovada se mostra regular, possuindo as fases delta ( $\delta$ ), eta ( $\eta$ ) e zeta ( $\zeta$ ) com separação bem definida e dimensões condizentes com o observado na literatura em peças submetidas a processos similares (American Galvanizers Association, 2008). O espaçador com deslocamento e rejeitado tem revestimento mais espesso e bem irregular verificando-se desvios de espessura da ordem de até 50%. Não há regularidade no crescimento dos intermetálicos; a fase delta ( $\delta$ ) é mínima, na fase zeta ( $\zeta$ ) os cristais não estão bem formados e a fase eta ( $\eta$ ) mostra-se sem contorno definido.



Fotografia 19 – Camada de zinco do espaçador aprovado



Fotografia 20 – Camada de zinco do espaçador rejeitado

Outras peças com deslocamento apresentaram alterações semelhantes na espessura da camada de revestimento e na morfologia das fases.