

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL EM PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO DE
ARAMES DE CAMADA PESADA**

Cirano Gewehr Campanher

Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção de título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre - RS

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL EM PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO DE
ARAMES DE CAMADA PESADA**

Cirano Gewehr Campanher
Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre - RS
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Jane Zoppas Ferreira

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit (PPGEM – UFRGS)

Prof^a Dr^a. Carla Schwengber ten Caten (PPGEP - UFRGS)

Dr. Fabio Domingos Pannoni (GERDAU)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Outubro de 2009.

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio, paciência e compreensão em todos os momentos.

Vocês são co-adjuvantes de minhas conquistas.

Agradecimentos

À professora Dr^a. Jane Zoppas Ferreira pelas orientações e excelente suporte acadêmico no desenvolvimento deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR) da Escola de Engenharia da UFRGS, pelo apoio nas análises realizadas.

Aos colegas da Gerdau, às equipes da Trefila 2, Laboratório da Gerdau Riograndense e Laboratório Metalúrgico da Aços Especiais Piratini. Em especial agradeço aos colegas Luiz Alberto Canozzi Cesa pelos valiosos ensinamentos no dia-a-dia e aos colegas Marcos Augusto Zilles Mattiello e Jader Daniel de Brito, pelo suporte técnico e colaboração na parte experimental deste trabalho.

À minha mãe pelo amor, estímulo e motivação nos estudos, ao meu pai pelo exemplo de qualidade no trabalho, à minha irmã pela atenção e carinho.

À Solange, minha esposa, pelo amor, paciência e firmeza nas horas difíceis. Aos meus queridos filhos João Vicente e João Vítor, pedras preciosas que Deus nos confiou.

A Deus, pela vida, saúde, capacidade de sonhar e de transformar os sonhos em realidade.

Sumário

Sumário.....	vi
Trabalhos Publicados.....	viii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de abreviaturas e símbolos.....	xii
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Processo contínuo de galvanização por imersão a quente.....	4
3.1.1 Histórico.....	4
3.1.2 Etapas do processo de galvanização.....	4
3.2 Camadas da galvanização.....	10
3.3 Propriedades das camadas da galvanização.....	12
3.3.1 Espessura (ou peso) da camada.....	13
3.3.2 Uniformidade da camada.....	16
3.3.3 Aderência da Camada.....	17
3.4 Fases Ferro Zinco – Equilíbrio e cinética.....	19
3.4.1 Diagrama de fases.....	19
3.4.2 Formação das fases de Fe-Zn.....	22
3.4.3 Cinética da reação Ferro-zinco.....	24
3.5 Fatores relevantes do processo de galvanização.....	26
3.5.1 Características superficiais do aço.....	27
3.5.2 Composição química do aço.....	27
3.5.3 Composição química do banho de zinco.....	31
3.5.4 Temperatura do banho de zinco.....	34
3.5.5 Tempo de imersão.....	36
3.5.6 Sistema de saída do banho de zinco.....	37
3.5.7 Velocidade da linha.....	40

3.5.8 Resfriamento	42
3.6 Considerações para o experimento.....	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Descrição do experimento.....	44
4.2 Visão geral - Linha de galvanização – Gerdau Riograndense.....	45
4.3 Características do forno de zinco (cuba de galvanização)	51
4.3.1. Tipo de imersão	51
4.3.2. Sistema de saída do banho de zinco	52
4.3.3. Sistema de resfriamento	53
4.4 Condições do teste.....	55
4.5 Características do arame testado.....	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Composição química do aço	60
5.2 Composição química do banho de zinco.....	61
5.3 Tipos de imersão (meia cuba e cuba completa).....	62
5.4 Resultados dos testes DOE	63
5.5 Fatores relevantes para o peso e aderência da camada	64
5.6 Peso da camada de galvanização.....	65
5.7 Análise de regressão para o peso de camada de zinco.....	67
5.8 Aderência	68
5.9 Conjugação otimizada de parâmetros.....	70
5.10 Ensaio de Preece	71
5.11 Ensaios em câmara úmida e em névoa salina	72
5.12 Avaliação em microscópio ótico	75
5.13 Avaliação em MEV	76
5.14 Espessuras das camadas em função dos parâmetros testados	84
5.15 Tempo de imersão em função da velocidade.....	88
5.16 Influência do resfriamento	90
5.17 Amostras de arames de camada leve	90
6 CONCLUSÕES	91
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	93
8 REFERÊNCIAS.....	94
9 RECONHECIMENTOS.....	97

Trabalhos Publicados

Congressos

- Cirano Gewehr Campanher, Marcos Augusto Z. Mattiello, Jane Zoppas Ferreira; PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO DE ARAMES DE CAMADA PESADA. Seminário Regional de Siderurgia Gerdau, Porto Alegre, 05 de novembro de 2009.

Índice de Figuras

Figura 1 - Etapas Básicas do Processo de Galvanização por imersão a quente	4
Figura 2 - Corte das camadas de galvanização [10]	11
Figura 3 – Proteção catódica [10].....	12
Figura 4 – Vida útil para aço galvanizado por imersão a quente [12].....	14
Figura 5 – Diagrama de equilíbrio ferro-zinco em detalhe [8].....	19
Figura 6 - Representação esquemática da formação das fases Fe-Zn na galvanização. [8]	23
Figura 7 - Crescimento das camadas individuais de Fe-Zn em um substrato de aço. Temperatura de galvanização de 450°C. [8].....	25
Figura 8 - Influência do teor de silício na camada de zinco [19].....	28
Figura 9 – Curva Sandelin – Peso da camada de zinco em função do teor de silício do aço [21]	29
Figura 10 – Influência da temperatura sobre a velocidade de crescimento da camada [1].....	35
Figura 11 – Influência do tempo de imersão no peso da camada de zinco [6].....	36
Figura 12 - Bico soprador de nitrogênio	39
Figura 13 – Variáveis envolvidas no arraste de zinco [27]	41
Figura 14 - Sistema de desbobinamento dos arames	46
Figura 15 - Forno de recozimento (por imersão em chumbo)	47
Figura 16 - Sistema de decapagem química (com solução de ácido clorídrico).....	47
Figura 17 - Sistema de fluxagem (com cloreto duplo de zinco e amônio).....	48
Figura 18 - Estufas de secagem dos arames.....	48
Figura 19 - Forno de zinco (cuba de galvanização)	49
Figura 20 - Tanques de passivação	50
Figura 21 – Sistema de bobinamento dos arames	50
Figura 22 – Imersão do arame em meia cuba e em cuba completa.....	51
Figura 23 – Roldanas de posicionamento dos arames para imersão em cuba completa ou em meia cuba	52
Figura 24 - Sistema prensa gaxeta	52
Figura 25 - Sistema de raspagem com Nitrogênio	52
Figura 26 - Saída vertical (detalhe da pedra de imersão e do sistema de sopragem com nitrogênio) [26]	53
Figura 27 - Sistema prensa gaxeta – arames de camada leve	54
Figura 28 - Resfriamento com jatos d'água – arame camada pesada	54
Figura 29 – Componentes e elementos de ajuste da linha de galvanização.....	55
Figura 30 - Válvula reguladora de pressão de nitrogênio.....	56
Figura 31 - Temperatura do banho de zinco	56
Figura 32 - Medição de temperatura do arame por pirômetro.....	57
Figura 33 - Arame galvanizado (produto acabado)	59
Figura 34 - Retirada de cadinho com amostra do banho de zinco	61
Figura 35 - Resposta do peso da camada de zinco em relação aos parâmetros testados (alfa = 0,05)	64
Figura 36 - Resposta da aderência da camada de zinco em relação aos parâmetros testados (alfa = 0,05)	65
Figura 37 - Camada de galvanização (g.m ⁻²) em função da velocidade do arame, vazão de nitrogênio e diâmetro do bico de nitrogênio.....	66
Figura 38 - Interação de dois fatores sobre o peso da camada de galvanização	67

Figura 39 - Exemplo de amostras - ensaio de enrolamento.....	68
Figura 40 - Aderência da camada (ok = 1 / não ok = -1) em função da velocidade do arame, vazão de nitrogênio e diâmetro do bico de nitrogênio.....	69
Figura 41 – Correlação entre aderência e peso da camada de zinco	69
Figura 42 – Interação de dois fatores sobre a aderência (ok = 1 / não ok = -1)	70
Figura 43 - Resultados do ensaio de Preece	71
Figura 44 - Resultados de peso de camada e nº de imersões (ensaio Preece).....	72
Figura 45 - Resultados do ensaio em névoa salina para o metal base	73
Figura 46 - Resultados do ensaio em névoa salina para o revestimento	74
Figura 47 - Imagens obtidas em microscópio ótico	75
Figura 48 - Camadas de galvanização (amostra teste DOE – Gerdau Riograndense) – aumento de 4.000 vezes	76
Figura 49 - Amostra 3 - aumento de 5.000 vezes	77
Figura 50 - Amostra 7 - aumento de 2.000 vezes	77
Figura 51 – Composição química da fase eta	78
Figura 52 – Composição química da fase zeta	79
Figura 53 – Composição química da fase delta	80
Figura 54 – Composição química da fase gama	81
Figura 55 - Relação entre aderência e espessura da camada eta	83
Figura 56 - Relação entre aderência e relação r	84
Figura 57 - Espessura da camada eta em função da velocidade.....	85
Figura 58 - Espessura da camada eta em função da velocidade.....	86
Figura 59 - Parâmetro r em função da velocidade de galvanização.....	87
Figura 60 - Parâmetro r em função da velocidade de galvanização.....	88
Figura 61 – Comprimentos de imersão em meia cuba e cuba completa.....	89

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 – Classificação dos produtos galvanizados conforme peso</i>	14
<i>Tabela 2 – Massa mínima da camada de zinco (g/m^2) em arames [14]</i>	15
<i>Tabela 3 - Características das fases intermetálicas de Fe-Zn [8]</i>	20
<i>Tabela 4 - Crescimento da camada à 450°C até 300 segundos em um substrato de ferro (0,003%C) em um banho de ferro zinco puro saturado (0,03 %Fe) [8]</i>	25
<i>Tabela 5 – Efeitos em relação ao teor de carbono [5]</i>	30
<i>Tabela 6 – Designação do galvanizado conforme composição [4]</i>	34
<i>Tabela 7 – Sistemas de saída para arames de camada leve [1]</i>	37
<i>Tabela 8 – Sistemas de saída para arames de camada pesada [1]</i>	37
<i>Tabela 9 – Dados típicos do sistema de sopragem com nitrogênio [26]</i>	39
<i>Tabela 10 – Composição química do arame testado</i>	58
<i>Tabela 11 – Características dimensionais do arame testado</i>	58
<i>Tabela 12 – Composição química do aço</i>	60
<i>Tabela 13 – Composição química de zinco primário tipo fino [22]</i>	61
<i>Tabela 14 – Resultados das amostras do banho de zinco</i>	62
<i>Tabela 15 – Resultados conforme tipo de imersão</i>	62
<i>Tabela 16 - Resultados do teste DOE</i>	63
<i>Tabela 17 - Espessuras das camadas eta, zeta e delta (medições realizadas através do MEV)</i>	82
<i>Tabela 18 – Espessuras da camada conforme resfriamento</i>	90
<i>Tabela 19 – Resultados dos arames de camada leve</i>	91

Lista de abreviaturas e símbolos

α	fase alfa
Γ	fase gama
Γ_1	fase gama 1
δ	fase delta
ζ	fase zeta
η	fase eta
z	espessura da camada zeta
d	espessura da camada delta
e	espessura da camada eta
r	relação entre as espessuras das camadas zeta, delta e eta
LMC	distância de imersão em meia cuba
LCC	distância de imersão em cuba completa

Resumo

O presente estudo teve por objetivo aprofundar o conhecimento do processo de galvanização de arames de camada pesada, contribuindo para a redução da variabilidade e melhorias deste processo na Gerdau Riograndense, onde é utilizado em uma das linhas de galvanização de arames.

A metodologia adotada envolveu as etapas de caracterização do processo, em seus parâmetros e condições operacionais, bem como o estudo da influência destes fatores sobre as propriedades e características dos arames, com foco naquelas associadas à resistência à corrosão.

A parte experimental envolveu a realização de testes em uma linha contínua de galvanização de arames, utilizando-se a metodologia D.O.E (Design of Experiments), com coleta de amostras de arame sob diversas condições operacionais e posterior realização de ensaios e análises destas amostras em laboratório.

Através da avaliação dos resultados dos ensaios e análises, correlacionando-os com os parâmetros e condições testadas na linha, foi possível chegar a conclusões sobre os fatores controláveis mais relevantes e determinar o ajuste ótimo dos mesmos para obtenção de melhores resultados de resistência à corrosão nos arames de camada pesada.

Os principais resultados avaliados foram o peso e aderência do revestimento galvanizado e os parâmetros testados foram velocidade da linha, diâmetro do bico de nitrogênio e vazão de nitrogênio do sistema de raspagem. Mediante o experimento realizado foi possível identificar possibilidade de otimização (redução) no consumo de zinco, assim como melhoria nos resultados de qualidade do produto, associadas à aderência do revestimento. Correlacionando a aderência com as dimensões microscópicas das camadas de galvanização (η , ζ , δ) foi possível conhecer limites destas dimensões para atendimento às especificações de aderência.

Abstract

The aim of this work is to improve the knowledge of the hot-dip galvanization process for heavy coated galvanized steel wires. The knowledge will be used to support stabilization and improvements in a continuous wire galvanizing line at Gerdau Riograndense.

The method that was adopted involved the process characterization, including parameters and operational conditions, as well as the study of the influence of these factors on the properties and wire characteristics, focusing on those related to resistance of wire corrosion.

The experimental part of the study consisted of tests conducted in a continuous wire galvanizing line, using D.O.E. (design of experiments) methodology, where wire samples were collected in different operational conditions then analyzed and tested in the laboratory.

Through evaluation of these tests and analyses, it was possible to determine the most relevant process parameters and the best combination of each, to achieve improved results in the resistance of wire corrosion.

The principal results evaluated were the weight and adherence of the galvanized coating. The parameters tested were the velocity of the line, the diameter of the nitrogen nozzle and the flow of the gas wiping system. It was identified in the experiment that it was possible to optimize (reduce) the consumption of zinc as well as improve product quality, especially concerning the adherence of the zinc coating. Correlating the adherence of the coating with the microscopic dimensions of the galvanizing layers (η , ζ , δ) it was possible to understand the limits of these dimensions to comply with the specifications of adherence.

1 INTRODUÇÃO

O processo de zincagem por imersão a quente, também conhecido como processo de galvanização a fogo, está entre as técnicas mais tradicionalmente utilizadas para proteção do aço contra a corrosão, em função das propriedades conferidas ao aço, a um custo relativamente baixo. Trata-se de um processo de revestimento metálico, onde o substrato metálico (usualmente o aço) é imerso em um banho de zinco fundido, formando-se sobre o material camadas de ligas ferro-zinco e de zinco puro. Estas camadas são espessas e aderentes, proporcionando ao material uma boa proteção contra a corrosão, além da melhora em seu aspecto superficial. [1]

O mecanismo de proteção de revestimentos de zinco ocorre através de duas formas: proteção por barreira física e proteção galvânica. Na proteção por barreira, a camada de zinco interposta entre o substrato de aço e o meio externo evita a exposição do aço ao meio corrosivo. Na proteção galvânica, o zinco, por ser menos nobre ou anódico, em relação ao aço nas condições ambientais, atua como anodo de sacrifício, se corroendo preferencialmente em relação ao substrato de aço, mesmo que uma parte do substrato seja exposta ao ambiente externo, em função de cortes ou arranhões na camada de zinco. Além disso, as partes danificadas são preenchidas pelos produtos de oxidação do zinco, que também impedem a corrosão do substrato. [2]

O processo de galvanização por imersão a quente pode ser por batelada ou por processo contínuo. No processo de galvanização por batelada, comumente aplicável a peças maiores e mais espessas, o material é movimentado, sendo imerso e retirado seqüencialmente em tanques (banhos), onde ocorre cada etapa do processo de galvanização (limpeza, fluxagem, galvanização e passivação).

No processo contínuo de galvanização, aplicável a materiais bobinados (chapas, arames, tubos, etc.), a imersão do material nos tanques (banhos) é realizada através da tração do material por uma de suas extremidades, promovendo a sua passagem através de diversos tanques (banhos) instalados em linha.

Os produtos galvanizados obtidos por processo contínuo são comumente classificados em dois tipos: de camada leve e de camada pesada, onde a diferença entre os dois tipos basicamente está na quantidade de zinco do revestimento, que é maior nos produtos de camada pesada, destinados a aplicações em ambientes mais corrosivos ou que requerem maior vida útil do revestimento.

Este estudo está concentrado no processo contínuo de galvanização de arames de camada pesada, avaliando-se a influência de diversos parâmetros do processo de galvanização sobre as características dos arames galvanizados, principalmente quanto à resistência à corrosão.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Contribuir para a redução da variabilidade e melhorias no processo de galvanização de arames de camada pesada na Gerdau Riograndense, mediante maior conhecimento do processo, incluindo suas características, principais parâmetros e condições operacionais, bem como estudo da influência destes fatores sobre as propriedades e características dos arames, com foco na resistência à corrosão dos arames.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Analisar as características dos arames galvanizados sob diversos aspectos físico-químicos, visando-se conhecer melhor os efeitos das variações de parâmetros de processo sobre as propriedades dos arames associadas à resistência à corrosão;
- Determinar a melhor combinação de parâmetros de processo para a galvanização de arames de camada pesada, estabelecendo uma base de referência para ajustes do processo;
- Correlacionar as propriedades associadas à resistência à corrosão com as espessuras das camadas de zinco e ferro-zinco formadas sobre o arame.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo contínuo de galvanização por imersão a quente

3.1.1 Histórico

A descoberta da proteção contra a corrosão de produtos de aço por meio da imersão em zinco fundido deve-se ao químico francês Melouin, que em 1741 descobriu que o recobrimento de zinco poderia proteger o aço da corrosão. Em 1837, o engenheiro Sorel patenteou a galvanização a fogo utilizando o termo galvanização porque é a corrente galvânica que protege o aço (em homenagem a Luigi Galvani, 1737-1798, um dos primeiros cientistas a pesquisar a eletricidade e seus benefícios). [3]

A aplicação comercial de revestimentos de zinco foi iniciada por Crawford em 1839 e Moorewood e Rogers em 1846, em Wolverhampton, Grã Bretanha. Até 1940, praticamente toda a produção de produtos galvanizados era realizada por processo em batelada. Atualmente, 99% da galvanização é realizada em processo contínuo. [4]

Por mais de 140 anos, a galvanização a fogo tem sido um sucesso comercial como método de proteção contra a corrosão em uma grande variedade de aplicações do aço, tais como: em utilidades domésticas, processos químicos, papel e celulose, construção civil, automotiva e de transporte. [5]

3.1.2 Etapas do processo de galvanização

O processo de galvanização por imersão a quente pode ser dividido em quatro etapas básicas, conforme ilustrado na Figura 1:



Figura 1 - Etapas Básicas do Processo de Galvanização por imersão a quente

▪ **Etapa de Limpeza**

Antes do processo de imersão em banho de zinco líquido, o material a ser galvanizado deve ser limpo, a fim de eliminar qualquer óxido e outras sujidades da superfície, que possam reagir com o banho de zinco. A etapa de limpeza é subdividida em desengraxe e decapagem.

a) Desengraxe

Na etapa de desengraxe, as peças são imersas em um desengraxante, solução alcalina a quente ou a frio, à base de carbonatos, silicatos, hidróxidos, fosfatos, detergentes e outros, a fim de remover substâncias orgânicas, como óleos e graxas. Quanto maior a alcalinidade, maior a eficiência. Para o desengraxe de superfícies ferrosas, a alcalinidade deve ser alta (pH em torno de 12). A temperatura normalmente utilizada é próxima a 85°C e o tempo de imersão entre 1 e 20 minutos, dependendo da natureza e grau de contaminação do material. [2]

A importância do desengraxe é fundamental, pois a presença de substâncias gordurosas na superfície das peças prejudica a ação dos ácidos da decapagem (etapa posterior).

Após o desengraxe, é realizada lavagem com água, com o objetivo de remover resíduos e o excesso de desengraxante, evitando-se a contaminação dos banhos seguintes.

Para materiais com tintas, vernizes e resinas, que não podem ser removidos por banhos de desengraxe alcalino, deve-se fazer um tratamento prévio com solventes ou removedores, ou através de jateamento abrasivo. [6]

b) Decapagem

A etapa de decapagem tem como função remover óxidos presentes na superfície do material. As peças são imersas em banhos de soluções ácidas, sendo normalmente utilizada solução de ácido clorídrico de 15 a 18% HCl, em temperatura

ambiente, ou ácido sulfúrico de 7,5 a 15%, a quente, numa temperatura de 70 a 90°C. [7]

Uma típica camada de óxidos de ferro apresenta os seguintes elementos e compostos:

- Fe (ferro base)
- FeO (óxido de ferro no estado menos oxidado)
- Fe₃O₄ (óxido de ferro no estado intermediário de oxidação)
- Fe₂O₃ (óxido de ferro no estado mais oxidado)

A camada de FeO contribui com 80% da espessura da camada total e é o elemento mais solúvel em ácidos. A camada de Fe₃O₄ contribui com cerca de 18% e é menos solúvel do que a anterior. A camada de Fe₂O₃ corresponde com o restante de 2% e corresponde ao estado mais estável e menos solúvel destes óxidos. [6]

O ácido clorídrico (comercialmente chamado de muriático) é o mais comumente usado no processo de decapagem nas galvanizações brasileiras, nas concentrações de 6 a 12%. [6]

A limpeza ou decapagem mecânica é utilizada às vezes para remoção de outros elementos estranhos não removíveis pelo desengraxe e decapagem. Em alguns casos, sua utilização é imprescindível e deve ocorrer antes das etapas de desengraxe e decapagem. Este processo é adequado para remoção de cascas ou resíduos sólidos dos processos de solda que utilizam eletrodos recobertos, incrustações de areia de fundição, carepas de laminação ou forjamento e remoção de tintas. A decapagem mecânica ou abrasiva, geralmente proporciona espessuras de revestimento maiores devido à maior rugosidade que provoca e é utilizada geralmente em peças fundidas. [2], [7]

Posteriormente à decapagem, é realizada lavagem em água corrente, em banhos subseqüentes, com o objetivo de remover partículas e resíduos ácidos, evitando-se a contaminação dos banhos seguintes.

- **Etapa de fluxagem**

O processo de fluxagem consiste em colocar o material em contato com uma camada de sal de fluxo fundido (fluxante), formando uma película fina que dissolve os traços de sais e de óxido de ferro persistentes na superfície do aço. No momento da imersão das peças no banho de zinco a película de fluxo sublima-se e leva consigo as impurezas dissolvidas. [7]

Normalmente são utilizados sais duplos de cloreto de zinco ($ZnCl_2$) e cloreto de amônio (NH_4Cl), em concentrações variáveis entre 5 a 30%, em temperaturas de 65 a 100°C. [6]

Durante a passagem do material através do fluxo, o cloreto de amônio decompõe-se, formando ácido clorídrico, que ataca a superfície do material. [4]

A camada de fluxo tem as seguintes funções principais: [8]

- Limpeza da superfície do material e do zinco líquido, de forma que o zinco e o aço possam reagir.
- Reduzir os riscos de respingos quando peças úmidas são imersas no banho.
- Raspar o material durante a retirada, produzindo camadas mais finas.
- Reduzir a oxidação da superfície do zinco líquido, com conseqüente redução na formação de cinzas.
- Evitar a queima ou sobreaquecimento na imersão de peças maiores ou submetidas à galvanização dupla
- Reduzir a distorção de peças finas, através do pré-aquecimento.

Existem dois métodos de fluxagem e em função deles o processo de galvanização é designado a seco ou úmido. [7]

Na galvanização a seco as peças ainda molhadas da lavagem após a decapagem são imersas em uma solução aquosa de cloretos de zinco e de amônio (solução fluxante) a frio ou a quente, sendo posteriormente secas em uma estufa de pré-aquecimento. Como resultado, tem-se a formação de uma película seca de sais fluxantes sobre o substrato de aço. [7]

Na galvanização por processo úmido, a mistura de cloretos de zinco e de amônio forma uma camada de sais fundidos na superfície do banho de galvanização, formando um colchão que sobrenada o zinco. As peças ainda úmidas da lavagem após a decapagem são introduzidas lentamente no banho de galvanização, atravessando a camada de sais fundidos. Esta, ao mesmo tempo em que dissolve as impurezas superficiais, absorve também a umidade residual. [7]

Existe também a possibilidade de combinar os dois métodos acima descritos.

A utilização de estufas para pré-aquecimento ocorre somente na galvanização a seco. Sua finalidade é obter um melhor rendimento da cuba de galvanização, evitando os choques térmicos das peças e a vaporização da água da solução fluxante. A temperatura da estufa deve ser cuidadosamente controlada, de forma a evitar a volatilização excessivamente rápida do fluxo. [7]

▪ **Etapa de Galvanização**

A galvanização consiste na imersão do material em uma cuba de zinco fundido a temperatura usualmente entre 445 e 460°C, onde o Ferro reage com o zinco fundido, formando as camadas que compõem o revestimento. [2]

O zinco utilizado em banhos de galvanização é preferencialmente o de tipo High Grade ou Intermediate, da ASTM, (conforme NBR 7013 [9]), com baixos teores de chumbo (0,05 a 0,30%). [4]

A partir do substrato de aço (metal base), formam-se camadas de ligas ferro-zinco sobrepostas, sendo que a camada mais externa é praticamente de zinco puro.

Cada camada de liga ferro-zinco é uma fase diferente formada, em função da inter-difusão do zinco e do ferro, proporcionada pela alta temperatura do banho. Assim, forma-se um gradiente de composição, onde as fases mais próximas ao substrato de aço são ligas mais ricas em ferro e as mais externas, ligas mais ricas em zinco. [1]

A temperatura de galvanização, embora alta o suficiente para fundir o zinco e permitir a difusão, não é suficiente para alterar substancialmente as propriedades mecânicas do aço. [1]

O tempo de imersão influencia diretamente a espessura da camada. Quanto maior o tempo de imersão, mais espessa é a camada, até determinado limite, passando a ocorrer uma estabilidade. [6]

No banho de zinco inevitavelmente se formam borras e cinzas ao longo das operações de galvanização. A borra de zinco, mais conhecida como “areião”, é proveniente do ataque do zinco ao ferro, e é composta por cristais de ferro-zinco insolúveis à temperatura normal de trabalho, que se depositam no fundo da cuba de galvanização. A composição normalmente verificada na prática é de cerca de 96% de Zn e 4% de Ferro. Além de representar uma perda de zinco, a borra prejudica o aquecimento da cuba (baixa condutividade térmica) e o aspecto das peças zincadas, quando adere à sua superfície. [6]

A cinza de zinco, mais conhecida como “terra de zinco”, é um resíduo composto de óxido de zinco, zinco metálico e cloretos em teores variáveis, e forma-se na superfície do banho devido à oxidação do zinco com o oxigênio do ar e as escórias da reação fluxo-zinco-ferro. Como agentes que promovem a geração de cinzas, podem-se citar a temperatura do banho – que quanto mais alta, gera maior oxidação da superfície do banho, e a agitação do banho – que quanto maior, mais favorece a formação de cinzas. [6]

Esses materiais residuais, particularmente os flutuantes devem ser retirados do banho regularmente, pois podem provocar a sua aderência ao revestimento galvanizado [7].

O material galvanizado, após a imersão no banho de zinco, é retirado, resfriado e algumas vezes pós-aquecido. Um bom controle de resfriamento é também necessário, uma vez que o zinco pode continuar reagindo com o substrato, produzindo ligas adicionais e afetando as propriedades do revestimento. [8]

Imediatamente após sair do banho de zinco, o material galvanizado passa através de um sistema de controle de arraste de zinco e espessura da camada, que pode ser por raspagem, geralmente em gaxetas (para arames de camada leve) ou por sopragem com gás, normalmente gás sulfídrico ou nitrogênio (para arames de camada pesada).

▪ **Etapa de Passivação**

Após a galvanização, é necessária a passivação da superfície, sendo a cromatização a mais utilizada, a fim de retardar o início da oxidação do zinco. Trata-se de uma imersão em soluções cromatizantes, à base de ácido crômico e bicromato, com a finalidade de retardar o aparecimento da chamada “corrosão branca” (capa protetora em torno de $0,5\mu\text{m}$ de cromato de zinco insolúvel). Esta passivação confere ao material um aspecto ligeiramente amarelado, sendo mais claro quanto menor a concentração da solução ou menor o tempo de imersão [6]. Existem formulações de cromatizantes que conferem um aspecto mais azulado ao zinco, chamado de cromatização incolor (ou azul).

Outra alternativa é a fosfatização, que é utilizada antes da pintura com o objetivo de proporcionar aderência entre o zinco e a tinta. [2]

Depois de raspado, resfriado e passivado o material galvanizado é finalmente bobinado em rolos, para posterior estocagem e disponibilização para uso.

3.2 Camadas da galvanização

A anatomia do aço galvanizado consiste em uma camada externa de zinco, uma camada intermediária de compostos intermetálicos (ligas Ferro zinco) e o substrato de aço. Cada uma destas regiões é afetada pelo tempo e temperatura do

banho de zinco, assim como pela composição química tanto do banho como do material. [8]

O processo de galvanização forma ligações metálicas entre o zinco e o aço ou ferro, criando uma espécie de barreira na superfície do próprio metal. Durante a galvanização, o zinco líquido reage com o ferro do aço e forma uma série de camadas de liga de ferro-zinco. A Figura 2 ilustra, em corte, as camadas de aço galvanizado, e mostra uma microestrutura típica de revestimento, que consiste em três camadas de liga (gama, delta, zeta) e uma camada de zinco metálico puro (eta). [10]

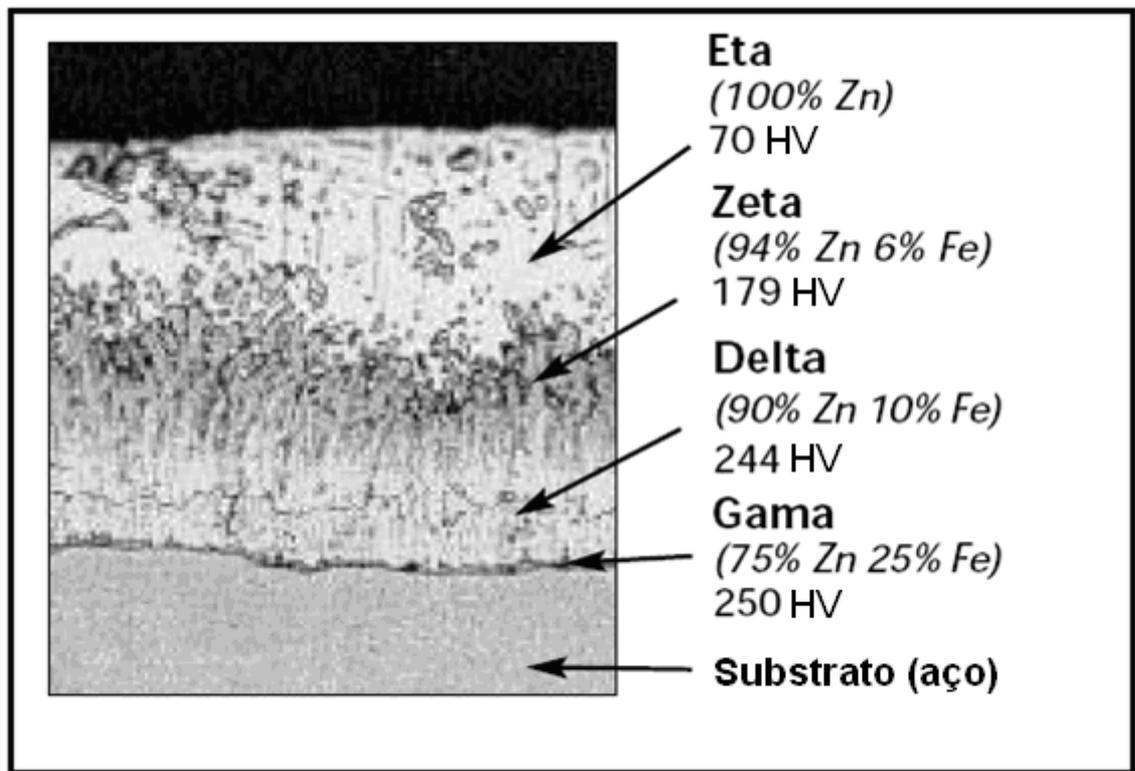


Figura 2 - Corte das camadas de galvanização [10]

A Figura 2 apresenta próximo ao nome de cada camada sua dureza respectiva, expressa em HV (dureza Vickers). Tipicamente, as camadas gama (Γ), delta (δ) e zeta (ζ) são mais duras que o substrato de aço. A dureza destas camadas intermediárias confere excelente proteção contra danos no revestimento por abrasão. A camada eta (η) do revestimento galvanizado é bem dúctil, conferindo ao revestimento certa resistência ao impacto. [10]

As camadas do aço galvanizado conferem excelente resistência à corrosão ao material, mesmo em caso de arranhões ou descontinuidades na camada de zinco. Isso ocorre porque o zinco atua como ânodo de sacrifício, por ação galvânica, protegendo o metal base, enquanto houver zinco na área intermediária exposta (Figura 3). [10]

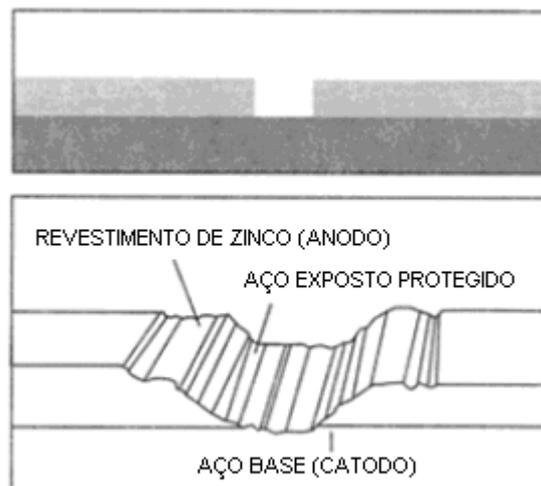


Figura 3 – Proteção catódica [10]

3.3 Propriedades das camadas da galvanização

Para que o revestimento galvanizado aplicado sobre o material cumpra adequadamente as suas funções (aumentar a resistência à corrosão e melhorar o aspecto superficial do material), as seguintes propriedades são de fundamental importância:

- Espessura da camada;
- Uniformidade;
- Aderência.

3.3.1 Espessura (ou peso) da camada

Verifica-se experimentalmente que o tempo de vida do revestimento depende da espessura da camada e do ambiente de trabalho.

De uma forma simplificada, a vida útil do revestimento pode ser estimada através da seguinte fórmula empírica: **[1]**

$$t = R \times e$$

onde:

t : vida em serviço (anos);

R : constante de proporcionalidade, específica do meio (anos/ μm);

e : espessura da camada (μm).

As espessuras das camadas de zinco costumam ser expressas em micrômetros (μm) ou em peso de camada por unidade de área revestida ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). A equivalência entre estas duas unidades é:

$$1 \mu\text{m} = 7,14 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$$

A Figura 4 ilustra a relação entre a vida útil estimada e a espessura do revestimento galvanizado, para vários tipos de ambientes. A área sombreada representa os mínimos requisitos de espessura encontrados nas especificações mais comuns de galvanizações por imersão a quente por batelada, ASTM A123 **[11]**.

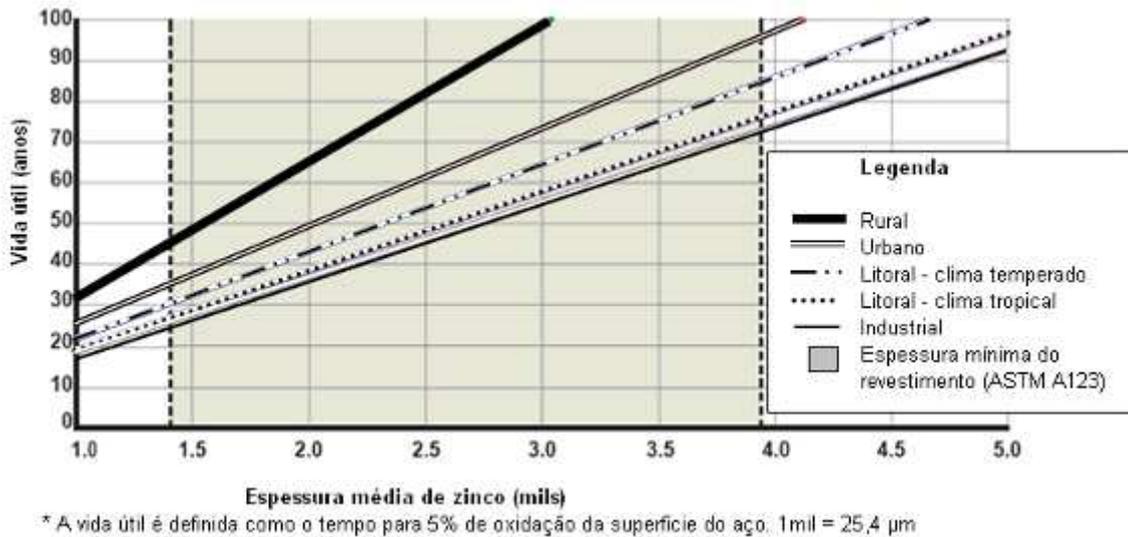


Figura 4 – Vida útil para aço galvanizado por imersão a quente [12]

A norma ABNT NBR 6323 — Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente [13] - estabelece a espessura do revestimento de zinco exigida conforme o tipo e espessura do material.

A principal classificação dos produtos galvanizados está justamente relacionada com a espessura da camada de zinco, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos produtos galvanizados conforme peso da camada de zinco [1]

Tipo de camada	Peso de camada (g.m^{-2})
Camada leve (ou simples)	~ 50 a 150
Camada pesada (ou dupla) Classe A	~ 200 a 300
Camada pesada (ou dupla) Classe B	Acima de 400

Via de regra, procura-se utilizar produtos com maior camada, quando estes serão utilizados em ambientes mais agressivos ou em aplicações que requeiram maior vida útil do revestimento. Entretanto, quando não se tem o conhecimento da aplicação ou do meio em que o produto será utilizado, costuma-se empregar

camadas mais espessas onde há mais aço. Especificamente no caso de arames, emprega-se maior espessura de camadas em arames de maior diâmetro. [1]

Conforme NBR 6331/1982 [14], a massa mínima da camada de zinco em arames não pode ser inferior aos valores da Tabela 2.

Tabela 2 – Massa mínima da camada de zinco (g/m²) em arames [14]

Diâmetro nominal do arame zincado (mm)	CAMADA LEVE		CAMADA PESADA	
	Macio	Duro	Macio	Duro
0,25 a 0,32	20	15	45	45
0,32 a 0,4	20	15	70	70
0,4 a 0,5	20	15	90	90
0,5 a 0,63	30	20	110	110
0,63 a 0,71	30	20	120	120
0,71 a 0,8	30	20	140	140
0,8 a 0,9	40	30	150	150
0,9 a 1,0	40	40	170	150
1,0 a 1,25	40	40	180	170
1,25 a 1,4	50	40	200	180
1,4 a 1,6	60	50	210	190
1,6 a 1,8	60	60	230	200
1,8 a 2,0	70	60	240	210
2,0 a 2,24	70	60	240	210
2,24 a 2,5	70	60	250	230
2,5 a 2,8	90	70	260	230
2,8 a 3,15	100	70	270	240
3,15 a 3,55	110	80	270	250
3,55 a 4,0	120	90	280	260
4,0 a 5,0	130	100	290	275
5,0 a 7,1	140	110	290	290
7,1 a 10,0	140	110	300	300

Nota: Os arames recozidos e zincados após trefilação são denominados “macios” e aqueles sem recozimento, “duros”.

Para determinação, em laboratório, da massa de zinco em amostras de arames galvanizados, os procedimentos são definidos pela norma NBR 7397 [15]. Há ainda, outros ensaios aplicáveis a arames, como, por exemplo, o de resistência à tração, definido pela norma NBR 6207 [16].

3.3.2 Uniformidade da camada

Em peças galvanizadas podem ocorrer algumas variações na espessura do revestimento, devido a diferenças locais de escorrimento de zinco, ao formato da peça e ao ângulo com que as diversas superfícies saem do banho.

Entretanto, como a proteção que o zinco oferece ao aço é sacrificial, mais importante que a uniformidade é a espessura média (determinada em ensaios químicos de medição de peso de camada), pois permite quantificar o volume (massa) de zinco disponível para proteger o aço [1].

Por outro lado, a uniformidade é importante, sob o ponto de vista de aparência do material galvanizado. Em casos de revestimentos com a camada de zinco puro muito fina (forte raspagem), pode acontecer o afloramento da camada de liga, que é mais escura e com menos brilho, nos pontos de menor espessura de camada. Também se deve levar em conta o caráter micro e macro da não uniformidade. No caso de arames, variações de espessura na mesma seção transversal, como excentricidades ou ovalizações (típicas de alguns processos), não afetam a resistência do arame, já variações longitudinais, dependendo da extensão, podem ser críticas [1].

O método mais tradicional para o ensaio de uniformidade de revestimentos galvanizados é o ensaio de Preece, introduzido por Pettenkofer em 1857 para o ensaio de revestimentos galvanizados em arames. O ensaio consiste em imersões sucessivas dos corpos-de-prova, por períodos de um minuto, em uma solução de sulfato de cobre, de concentração especificada, onde é estabelecido o número de imersões que o corpo-de-prova deve resistir sem apresentar depósito de cobre. [7]

Por fim, conforme reconhecido na própria norma NBR 6331/1982 [14], referente a arames de aço de baixo teor de carbono, zincados, para uso geral: “a superfície da camada pesada, particularmente aquela produzida pela zincagem por imersão a quente, não é perfeitamente lisa e isenta de irregularidades. Para a camada pesada não se deve aplicar as tolerâncias de diâmetro sobre irregularidades identificadas pelo inspetor, de comum acordo com fabricante, como inerentes ao processo de zincagem por imersão a quente”. [14]

3.3.3 Aderência da Camada

O objetivo primário da galvanização de peças é a obtenção de uma proteção anti-corrosiva de longa duração, através da aplicação do revestimento de zinco mais espesso, compatível com os requisitos mecânicos e físicos do produto acabado. No entanto, o aumento da espessura do revestimento pode às vezes ser acompanhado de perda na resistência mecânica e à deformação. Assim, é importante que o revestimento possua adequada aderência, resistindo a tensões e deformações, sem trincar ou descamar.

Entre os vários tipos de ensaios de aderência, destacam-se: [7]

- Ensaio da lâmina – é definido pelas especificações da NBR 7398 [17], ASTM-A-123 [11] e ASTM-A-386 [18]. Este tipo de ensaio, aplicável a todos os tipos de materiais galvanizados, avalia a descamação do revestimento quando submetido ao esforço externo de uma lâmina afiada.
- Ensaio de martelo basculante – aplicável somente a chapas, é descrito nas normas NBR 7398 [17] e ASTM A-123 [11].
- Ensaio de enrolamento – aplicável a fios e arames, consiste no enrolamento em torno de um mandril de diâmetro especificado, conforme estabelecido na NBR 7398. [17]
- Ensaio de dobramento – aplicável a folhas ou chapas, consiste no dobramento por meio de um mandril de diâmetro especificado [17]

No caso de arames, a aderência é especialmente importante para os materiais que sofrerão posterior conformação, como arames para telas e grampos. Basicamente, a aderência está relacionada com a continuidade entre uma fase e outra. Assim, quanto mais similares (química e fisicamente) forem duas fases consecutivas maior será a aderência. [1]

Com exceção da camada η , todas as camadas de liga presentes nos revestimentos galvanizados têm dureza elevada e ductilidade baixa. As camadas

intermediárias são porosas e possuem pouca coesão metálica devido ao crescimento direcional e à variação volumétrica entre as fases durante o resfriamento. Em função disso, as camadas de ferro-zinco são responsáveis por rupturas durante deformações. Quando estes revestimentos são submetidos a dobramento, desenvolvem-se trincas nas camadas intermediárias. Estas trincas podem ser perpendiculares e/ou paralelas à superfície. Quando a camada η (zinco sem liga) for apenas um pouco mais fina que a camada de fases frágeis, é mais comum se desenvolverem trincas paralelas à superfície, provocando uma tendência do revestimento a se soltar como escamas no dobramento da peça. Se, ao contrário, a camada η for muito fina ou inexistente, as trincas tendem a se desenvolverem perpendicularmente à superfície, não ocorrendo descamação no dobramento da peça. Neste caso, desenvolvem-se trincas finas praticamente imperceptíveis que não afetam a aderência e que, do ponto de vista da corrosão, não são tão prejudiciais, uma vez que entra em ação a proteção catódica fornecida pelo zinco, além do possível preenchimento com produtos de corrosão impermeáveis. [7]

Se o revestimento for composto quase que inteiramente de zinco puro (fase η), o revestimento será extremamente dúctil e o material galvanizado poderá ser dobrado sem trincamento ou escamação da camada. A aderência é maior quando a camada é composta ou quase que só de zinco ou quase que só de liga. Situações intermediárias são sempre mais críticas. [1]

Outro fator que afeta a aderência, além da proporção entre as camadas, é a espessura total da camada. Uma camada mais espessa tende a expor mais as dificuldades de aderência, porque aumenta as tensões trativas nas interfaces entre as diferentes fases. Assim, mesmo quando há uma proporção desfavorável (aproximadamente metade liga, metade zinco), se a camada é fina, os problemas de aderência podem não aparecer, mas se a camada for mais espessa pode haver descascamento. A espessura a partir da qual começam a haver problemas não é uma constante. Para casos de arames galvanizados camada leve com raspagem parcial do zinco puro, esta espessura é proporcional ao diâmetro do arame. Ou seja, arames de maior diâmetro aceitam uma camada maior do que arames de menor diâmetro. [1]

3.4 Fases Ferro Zinco – Equilíbrio e cinética

3.4.1 Diagrama de fases

O diagrama de fases Ferro-Zinco mais amplamente aceito é o de Kubachewski, representado na Figura 5.

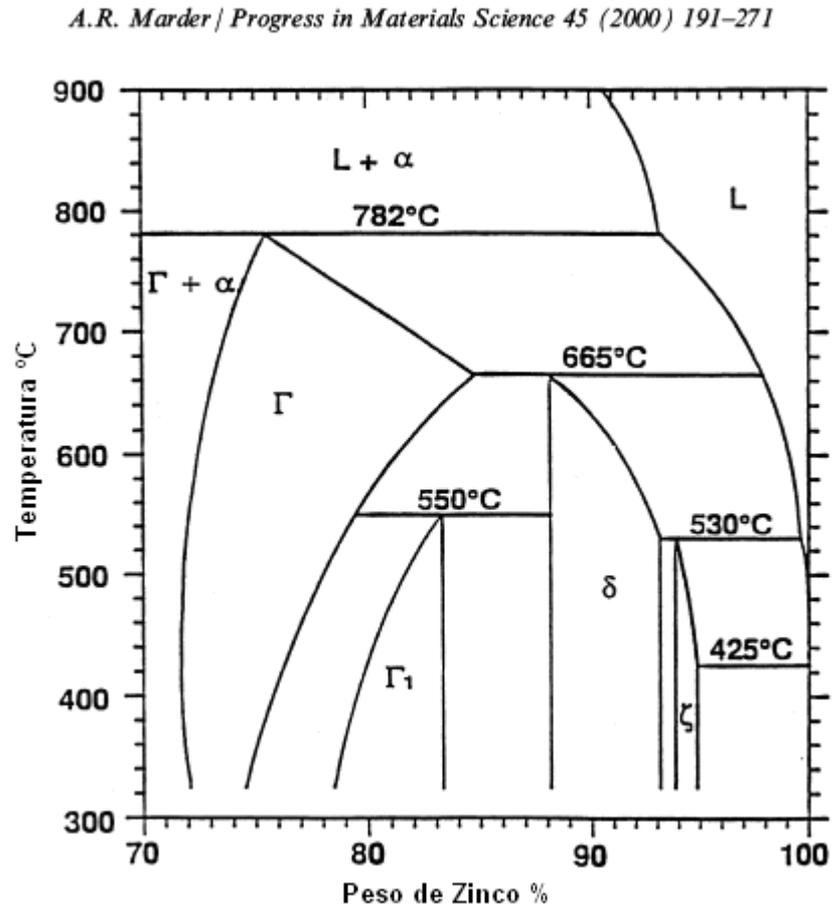


Figura 5 – Diagrama de equilíbrio ferro-zinco em detalhe [8]

As fases encontradas no diagrama e suas características estão destacadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das fases intermetálicas de Fe-Zn [8]

Fases	Fórmula	Estrutura do cristal
α (alfa)	Fe(Zn)	CCC
Γ (gama)	Fe ₃ Zn ₁₀	CCC
Γ_1 (gama ₁)	Fe ₅ Zn ₂₁	FCC
δ (delta)	FeZn ₁₀	Hexagonal
ζ (zeta)	FeZn ₁₃	Monoclínico
η (eta)	Zn(Fe)	HCP

As primeiras fases formadas durante longo tempo de imersão são zeta (ζ), delta (δ), gama1 (Γ_1) e gama (Γ). Apesar de não estar representada no diagrama de equilíbrio, a fase eta (η) é uma solução sólida de ferro no zinco, com solubilidade de 0,03 % de ferro. [8]

A seguir estão descritas cada fase intermetálica de ferro-zinco encontradas em camadas galvanizadas por imersão a quente, em ordem crescente de concentração de ferro:

a) Fase zeta (ζ)

A Fase zeta (ζ), FeZn₁₃, possui um conteúdo de ferro de aproximadamente 5 a 6%. É formada a partir da reação peritética entre a fase delta (δ) e o zinco líquido a 530 +/- 10 °C. Durante os estudos de difusão controlada, a fase zeta (ζ) foi identificada entre a fase eta (η) e a fase delta (δ). A fase zeta (ζ) é isomórfica com uma célula unitária e estrutura atômica que contém um átomo de ferro e um átomo de zinco cercado por 12 átomos de zinco nos vértices de um octaedro levemente distorcido. [8]

Característica mecânica: Fase dura e quebradiça.

b) Fase delta (δ)

A fase delta (δ), FeZn_{10} , possui uma faixa de concentração de ferro de 7,0 a 11,5 % e uma única célula hexagonal. Forma-se a partir de outra reação peritética entre gama (Γ) e líquido, à 665°C. No passado, a fase delta (δ) era separada em duas morfologias, delta1P, morfologia delimitada encontrada no lado rico em zinco, e delta1K, morfologia compacta encontrada no lado rico em ferro, verificada em imersões de longa duração (4 horas) e alta temperatura (553°C). Ambas as morfologias tem a mesma estrutura cristalográfica e são atualmente referidas como a fase delta (δ). [8]

Característica mecânica: Fase com considerável tenacidade e ductilidade (boa aderência).

c) Fase gama (Γ)

A fase gama (Γ), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, é cúbica de corpo centrado, e possui uma faixa de composição de ferro de 23,5 a 28,0 % à 450°C. É formada como resultado de uma reação peritética à 782°C entre o ferro alfa e o zinco líquido, e exibe uma máxima solubilidade de ferro em zinco na temperatura peritética de 665°C na fase delta (δ). [8]

A fase gama (Γ) é muito fina (da ordem de 1 a 2 μm) e de difícil visualização. [7]

Característica mecânica: Fase dura e quebradiça.

d) Fase gama1 (Γ_1)

A fase gama1 (Γ_1), $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$, possui uma estrutura cúbica de face centrada, com uma composição de ferro de 17 a 19,5 % à 450°C. É formada como resultado de uma reação peritetóide entre a fase gama (Γ) e a fase delta (δ) a 550 +/- 10°C. A fase gama1 (Γ_1) aparece como uma camada ininterrupta entre as fases gama (Γ) e delta (δ), e pode ser produzida mediante aquecimento a baixas temperaturas por longos períodos de tempo. A fase gama1 (Γ_1) possui muitas semelhanças cristalográficas com a fase gama (Γ), porém os arranjos destas fases são bastante diferentes. [8]

Característica mecânica: Fase dura e quebradiça.

3.4.2 Formação das fases de Fe-Zn

A nucleação seqüencial das fases de FeZn ocorre na interface Ferro-Zinco, começando com a fase zeta (ζ), seguida pela fase delta (δ), e após um tempo de incubação, a fase gama (Γ). Em microscópio ótico, a fase gama (Γ) é tão pequena que é considerada como contendo ambas as fases gama (Γ) e gama1 (Γ_1). [8]

O desenvolvimento das fases é mostrado esquematicamente na Figura 6, onde a seqüência da reação é representada cronologicamente. O instante zero é representando por t_0 , e o desenvolvimento das fases ocorre com o tempo, onde $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$. Nos estudos dos substratos de ferro (0,003 %C, 0,258 %Mn), foi verificado que a nucleação de fase zeta (ζ) é imediatamente seguida pela formação da fase delta (δ) na interface ferro alfa / fase zeta (ζ) (tempo t_2). Não se verifica aparentemente demora na formação das fases zeta (ζ) ou delta (δ), uma vez que ambas formam uma camada contínua após 5 segundos de imersão. Por outro lado, a fase gama (Γ) forma-se após um tempo de incubação de 30 segundos (t_3). [8]

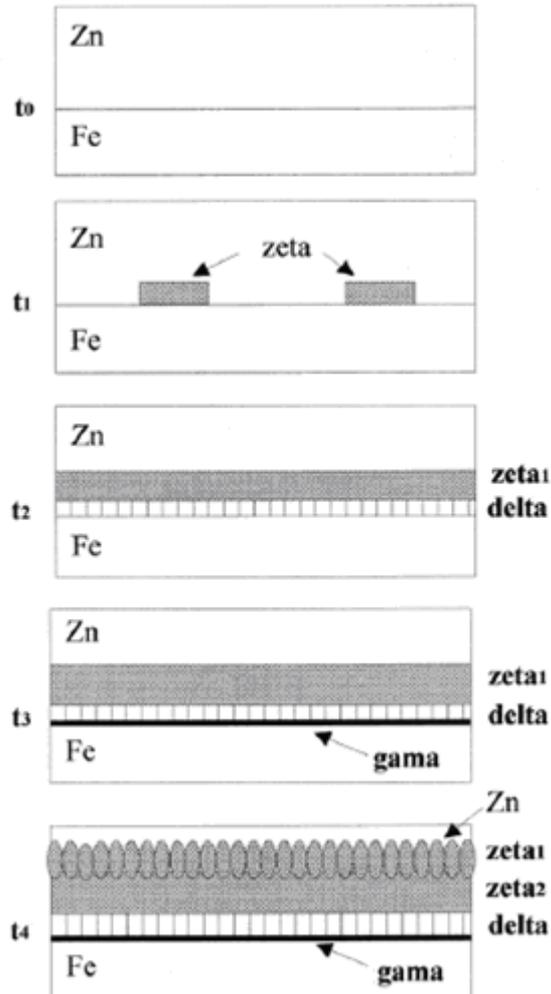


Figura 6 - Representação esquemática da formação das fases Fe-Zn na galvanização. [8]

A fase zeta (ζ) possui duas camadas, zeta 1 e zeta 2, dependendo da supersaturação do ferro no zinco fundido. Adjacente à camada da fase delta (δ), a fase zeta (ζ) cresce em uma morfologia colunar que é supersaturada em ferro (zeta 2). O crescimento progressivo destes cristais ocorre mais que a formação de cristais de nova fase zeta (ζ). Entretanto, se o zinco fundido está supersaturado com ferro e há suficiente nucleação de novos cristais, numerosos pequenos cristais de zeta (ζ) podem formar-se no zinco fundido, que são então separados um do outro pela solidificação da fase eta (η), formando então a fase zeta1 (t₄). [8]

3.4.3 Cinética da reação Ferro-zinco

A compreensão das transformações de fase que ocorrem na interface entre o substrato de aço e o zinco líquido é necessária para prever e controlar a microestrutura das camadas galvanizadas. Este entendimento é complexo, em função dos seguintes fatores principais [8]:

- Várias reações ocorrem ao mesmo tempo, incluindo umidificação do substrato sólido pelo zinco líquido, dissolução do aço pelo zinco, solidificação isotérmica dos componentes intermetálicos, transformações de fase por difusão em estado sólido, e solidificação da liga de zinco líquido;
- As reações são muito rápidas e em alguns casos ocorrem em menos de um segundo;
- A frente de transformação na maioria das vezes torna-se instável e por isso não é governada por simples equilíbrio termodinâmico.

Cada fase do revestimento de zinco exibe diferente cinética de crescimento, dependendo da temperatura de imersão, que também afeta a cinética da camada total. Por exemplo, em tempos curtos de imersão (até 300 segundos) a 450°C (Figura 7), a fase zeta (ζ) cresce rapidamente no início, então desacelera, enquanto a camada delta (δ) cresce devagar e após certo tempo sua espessura aumenta mais rapidamente. A camada de fase gama (Γ e Γ_1) forma-se somente após longos períodos de tempo e alcança a máxima espessura de aproximadamente 1 μm . [8]

Todas estas transformações são governadas pela difusão do zinco no substrato de ferro, como foi demonstrado em experimentos no zinco líquido e estudos de difusão do estado sólido. Entretanto, o ferro também se difunde através das camadas de compostos intermetálicos zinco-ferro, mas sua taxa de difusão é muito menor. [8]

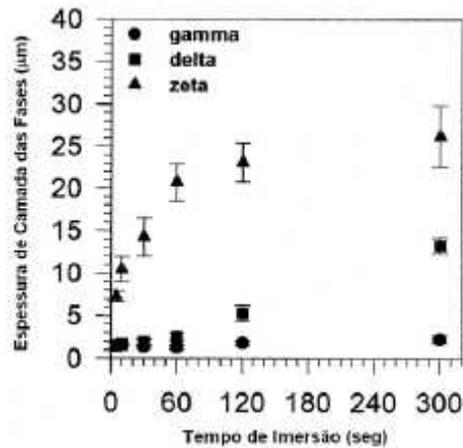


Figura 7 - Crescimento das camadas individuais de Fe-Zn em um substrato de aço. Temperatura de galvanização de 450°C. [8]

Para avaliar a cinética do crescimento da camada de liga ferro-zinco, é geralmente utilizada a equação

$$Y = K t^n, \text{ onde:}$$

Y é a espessura da camada formada, K é a constante da taxa de crescimento, t é o tempo de reação e n é uma constante de tempo de taxa de crescimento. [8]

A constante de tempo da taxa de crescimento, n , é uma indicação do tipo de controle cinético do crescimento da camada em estudo. A Tabela 4 ilustra valores típicos de n para as camadas de liga:

Tabela 4 - Crescimento da camada à 450°C até 300 segundos em um substrato de ferro (0,003%C) em um banho de ferro zinco puro saturado (0,03 %Fe) [8]

<u>Camada de liga</u>	<u>Valor de n</u>
Gama (Γ)	0,24 +/- 0,06
Delta (δ)	0,51 +/- 0,11
Zeta (ζ)	0,32 +/- 0,03
Total	0,35 +/- 0,02

Para tempos curtos, menores que 300 segundos, a fase zeta (ζ) domina a morfologia do revestimento, enquanto que para tempos longos a fase delta (δ) predomina na estrutura do revestimento. [8]

3.5 Fatores relevantes do processo de galvanização

Muitos fatores influenciam a formação das camadas de galvanização, sua espessura, as fases presentes e a proporção entre estas, podendo alterar significativamente os resultados do processo de galvanização e, conseqüentemente a qualidade do produto final. Entre os principais fatores, podem-se citar:

- Características superficiais do aço;
- Composição química do aço;
- Composição química do banho de zinco;
- Temperatura do banho de zinco;
- Tempo de imersão;
- Sistema de saída do banho de zinco;
- Velocidade da linha;
- Resfriamento.

A influência de cada um destes fatores sobre os resultados do processo de galvanização é descrita a seguir.

3.5.1 Características superficiais do aço

Para uma galvanização bem sucedida, a preparação da superfície metálica é tão importante quanto o banho em zinco fundido. A superfície deve ser isenta de gorduras, sujeiras, óxidos, restos de pinturas, etc., daí a importância da etapa de limpeza, a fim de assegurar o perfeito contato e conseqüentes reações entre o aço e o zinco. Caso contrário, surgirão problemas tais como: falta de aderência e zonas sem revestimento, prejudicando o poder protetor do revestimento. [7]

O estado físico da superfície de aço tem uma importância considerável. Assim, as deformações a frio, tais como: cortes, perfurações, dobramentos, laminações a frio, estampagem, podem provocar heterogeneidades na superfície e possibilidade de posteriores problemas de fragilização por hidrogênio, que é gerado e pode penetrar no aço na etapa de decapagem ácida. [7]

Outro ponto a ser observado quanto ao substrato é a rugosidade. Quanto maior a rugosidade superficial, maior também a superfície específica exposta à reação entre o zinco e o substrato, o que gera maior ancoragem mecânica da última camada que fica por arraste durante a remoção da peça, produzindo revestimentos mais espessos. [2]

Assim, uma superfície preparada por decapagem mecânica proporciona uma espessura maior de revestimento do que uma preparada por decapagem química, em função da maior rugosidade obtida no primeiro caso.

3.5.2 Composição química do aço

A composição química do aço, e até mesmo a forma na qual certos elementos estão presentes no aço, influenciam profundamente a formação da camada. Na realidade, uma vez que a reação do ferro com o zinco é uma reação superficial, mais importante que a composição média é a composição do aço em alguns micrômetros de profundidade. Os elementos que mais ativam a reação entre o zinco e o aço são: o silício, o carbono, o fósforo, o manganês e o enxofre, sendo que dentre estes, os que mais influenciam, em condições normais, são o silício e o carbono. [1]

a) Influência do silício

Dentre as impurezas e elementos de liga presentes nos aços, é principalmente o silício que influencia os mecanismos de reação, modificando a estrutura e a espessura do revestimento galvanizado. A Figura 8 ilustra a influência da concentração de silício na espessura do revestimento de zinco.

Influência do teor de silício na camada de zinco

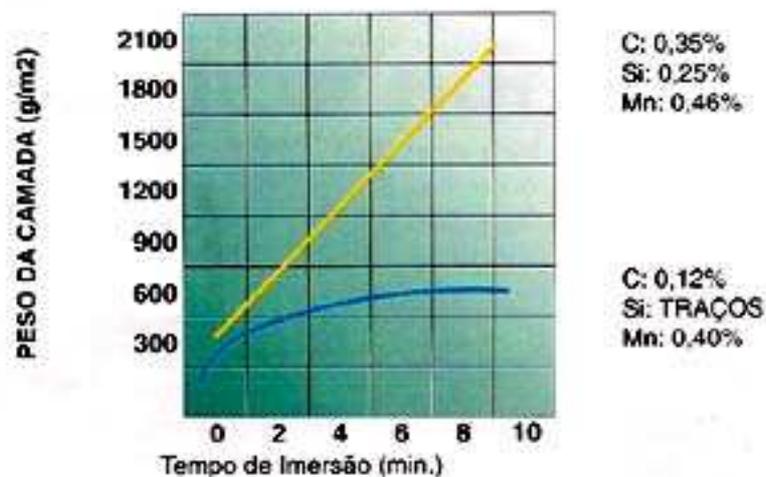


Figura 8 - Influência do teor de silício na camada de zinco [19]

A quantidade de silício adicionada durante o processo de fabricação do aço para desoxidação do mesmo pode afetar a aparência dos produtos galvanizados. A composição recomendada de silício é ou inferior a 0,04% ou entre 0,15% e 0,25%.

[20]

Fora destas faixas os aços são considerados aços reativos, com revestimentos de zinco que tendem a ser mais espessos, e com uma coloração cinza escura, característica das camadas intermetálicas, ao invés de um revestimento brilhante, típico do zinco puro. Muitas vezes, numa mesma peça, pode ser observada a presença de manchas escuras opacas, indicativo de variação de composição no material, sendo estas manchas regiões de maior concentração de silício **[2]**

A faixa de teor de silício entre 0,05% e 0,15% é conhecida como faixa Sandelin, em homenagem ao metalurgista Dr. Sandelin, que estudou em 1940 o comportamento do revestimento galvanizado em função do teor de silício nos aços. [20]. Sandelin observou a ocorrência de picos de reatividade entre ferro e zinco em concentrações de silício e temperaturas específicas, conforme ilustrado no gráfico da Figura 9. Na faixa Sandelin, as reações entre o ferro e zinco são intensas e imprevisíveis, sendo praticamente impossível o controle da camada, o que pode comprometer a qualidade do revestimento. [21]

Portanto, a galvanização de aços com esta faixa de silício deve ser evitada. Como é bastante difícil obter-se aços com teores de silício abaixo de 0,03%, na prática normalmente recomenda-se trabalhar em uma faixa entre 0,12% e 0,2% de silício. Acima de 0,2% embora a evolução no peso de camada seja menos agressiva em função do aumento no teor de silício, a espessura do revestimento também é relativamente grande. [1]

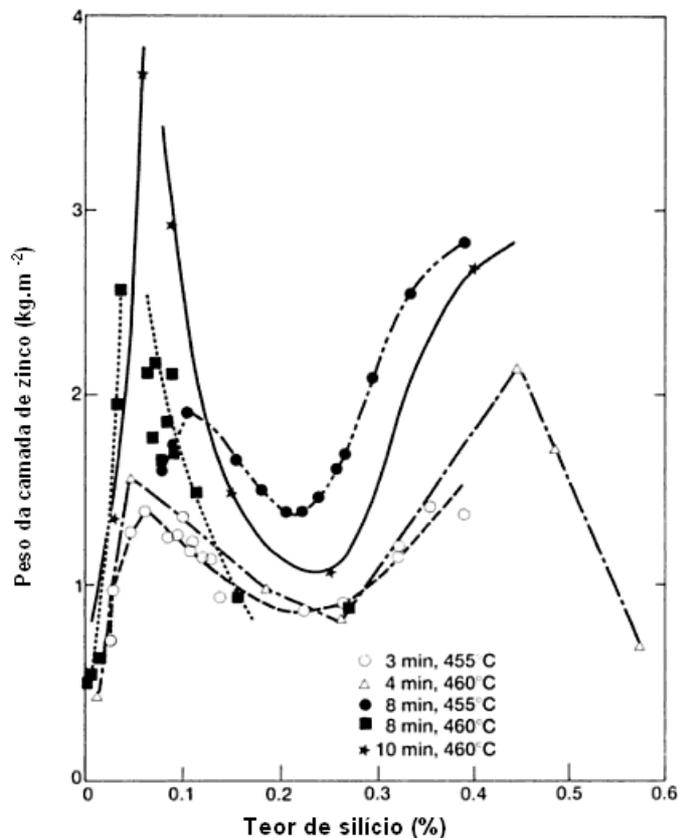


Figura 9 – Curva Sandelin – Peso da camada de zinco em função do teor de silício do aço [21]

b) Influência do carbono

Geralmente, quanto maior o teor de carbono do aço, maior a reatividade deste com o zinco. Resumidamente, o efeito individual do teor de carbono sobre a galvanização pode ser dividido em três faixas distintas, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Efeitos em relação ao teor de carbono [5]

Teor de carbono (%)	Efeito
Abaixo de 0,2%	Sem efeito sobre o revestimento, em temperaturas normais de galvanização.
Entre 0,2 e 0,3%	As camadas Zn-Fe tornam-se mais espessas.
Acima de 0,3%	Ocorre um aumento adicional na velocidade da reação entre ferro e zinco.

Entretanto, a forma como o carbono se apresenta no aço influencia muito o seu efeito sobre a galvanização. Para teores de até 1% de carbono no aço, a estrutura perlítica é que apresenta maior velocidade de ataque pelo zinco fundido. A partir de 1% de carbono, a estrutura esferoidizada é mais sujeita ao ataque. [2]

As camadas galvanizadas no aço são similares às obtidas no ferro puro. A principal diferença no aço é a presença da camada descontínua gama, à qual se atribui melhoria na aderência. Se o carbono está presente como grafite ou martensita revenida, a taxa de crescimento da liga é pouco alterada, mas quando o carbono é encontrado no aço como perlita lamelar ou cementita esferoidizada, a taxa de ataque aumenta cerca de 5,5 vezes e 4 vezes, respectivamente. Duas principais causas são atribuídas para estas alterações de comportamento conforme a microestrutura. Bablik, Götzl e Kukaczka (1952) sugerem que as estruturas lamelares e globulares aumentam a área superficial na qual a reação pode ocorrer. Price e Charles (1973) propõem que o crescimento da camada de liga é modificado pela presença de partículas grossas de Fe_3ZnC , que são encontradas nas camadas intermetálicas gama e delta. [21]

3.5.3 Composição química do banho de zinco

Os constituintes do zinco utilizado na galvanização influenciam o aspecto, espessura, composição do revestimento galvanizado e sua resistência à corrosão. As influências provocadas no revestimento pelas impurezas ou adições nem sempre estão perfeitamente esclarecidas, encontrando-se freqüentemente desacordo entre os dados de diversos autores, principalmente na quantificação dos teores de aditivos e suas conseqüências. [7]

Os tipos de zinco mais correntemente utilizados em galvanização são aqueles cujo teor em zinco é da ordem de 98 a 98,5%, sendo o restante constituído de 1,2 a 1,6% de chumbo, 0,2 a 0,5% de cádmio, 0,02 a 0,05% de ferro, correspondendo ao tipo Prime Western da ASTM B-6 e ao tipo comum da ABNT – EB - 302. [7]

Como uma referência adicional, a norma NBR 5996 [22] estabelece os tipos de lingotes de zinco primário que podem ser utilizados no banho de galvanização.

Para aços a adição ao banho de pequenas quantidades de certos elementos tais como alumínio, chumbo, germânio, titânio, níquel, bismuto, cobre, cádmio e estanho podem contribuir para inibir a reatividade entre ferro e zinco e aumentar a fluidez do banho. [7], [4]

Para aços reativos, onde a presença de silício e fósforo aumenta significativamente a espessura do revestimento, gerando uma aparência acinzentada ao revestimento e problemas de aderência, a adição de certos elementos de liga ao banho contribui para a solução destes problemas. Entre eles podem-se citar: alumínio, estanho, antimônio, chumbo, magnésio, níquel e bismuto. [23]

Além dos elementos citados acima, vários óxidos metálicos tais como ZnO, ZrO₂, TiO₂ e V₂O₅ têm sido utilizados como aditivos no banho de zinco para formar revestimentos por barreira galvânica. A adição de ZnO, por exemplo, melhora as características de resistência à corrosão e ao desgaste em placas galvanizadas [24].

Dentre os elementos mais importantes que exercem importante influência nos banhos de zinco, podem-se citar o chumbo, o ferro, o estanho e o alumínio.

a) Chumbo

A presença do chumbo no zinco, no seu teor de saturação (1,2% a 450°C) é útil porque este elemento, por um lado melhora a molhabilidade do aço pelo zinco fundido e por outro, tem o efeito de aumentar a espessura do revestimento em relação ao zinco puro. O excesso de chumbo deposita-se no fundo e protege a cuba do ataque pelo zinco. [7]

É bastante usual utilizar-se uma camada de chumbo com cerca de 50 a 150 mm no fundo do tanque de galvanização, evitando-se desta forma o contato do zinco com a chapa de ferro do fundo do tanque. Desta forma, além de reduzir-se a formação de borra de zinco, facilita-se a retirada de *dross* (ou “areião”), que são as partículas de liga ferro-zinco que se depositam no fundo da cuba e que necessitam ser retiradas periodicamente para não aderirem ao revestimento. [4]

Na prática, o chumbo, por ser mais denso que o zinco, tende a depositar-se no fundo da cuba, não interferindo significativamente no processo de galvanização. Em termos práticos, os objetivos são a proteção da soleira e a facilidade na remoção de borra do processo de galvanização. [6]

b) Ferro

A solubilidade do ferro no zinco à saturação é de cerca de 0,02% a 450°C, e é esse teor que se encontra na camada eta do revestimento (externa). Para quantidades mais elevadas formar-se-ão cristais de FeZn_{13} que se dispersarão no banho de zinco, aparecendo no revestimento de zinco, conseqüentemente provocando uma fragilização deste. Um teor de ferro acima de 0,1% tem um efeito prejudicial [7]

c) Estanho

A adição do estanho no zinco tem como tendência provocar um aumento da espessura das camadas de liga e da espessura total do revestimento provocando uma diminuição da ductilidade. [7]

c) Alumínio

Os efeitos produzidos pela presença do alumínio no zinco são múltiplos e discutidos por diversos autores. Em princípio, há certo acordo sobre os seguintes pontos: [7]

- Para teores baixos (da ordem de 0,01%), o alumínio provoca um aumento de brilho do revestimento, sem outras modificações de estrutura ou propriedades;

- acima de cerca de 0,03%, começa a haver uma diminuição de espessura das camadas de liga do revestimento;

- acima de 0,1%, as modificações de estrutura do revestimento aumentam, com o desaparecimento das camadas de liga, redução sensível de espessura do revestimento e melhora de sua ductilidade.

A adição de alumínio ao banho de galvanização depende, portanto, da natureza e do destino das peças a galvanizar. Essa adição é indispensável quando se deseja obter revestimentos finos e dúcteis (como no caso de fios e chapas); ela é inútil e mesmo contra-indicada no caso de material pouco sujeito a deformações no qual se pretende apenas uma boa proteção contra a corrosão. [7]

Pequenas quantidades de alumínio (0,005 a 0,05%) são adicionadas aos banhos de galvanização desde 1910 com o objetivo de aumentar o brilho, mas recentemente, a necessidade de um revestimento mais dúctil aumentou a quantidade de alumínio adicionada (0,2 a 0,3%), uma vez que o alumínio evita a formação de camadas Fe-Zn quebradiças e duras. Por outro lado, o alumínio em excesso pode reagir com o fluxo, formando cloreto de alumínio, que é gasoso nas temperaturas de galvanização. Neste caso, o fluxo torna-se viscoso e inadequado para as suas finalidades. A fim de evitar este tipo de problema, recomenda-se trabalhar em uma concentração de alumínio em torno de 0,10 a 0,12%. [4]

Conforme o teor de alumínio e outros, o revestimento de zinco possui uma designação específica, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Designação do galvanizado conforme composição [4]

Revestimento	Designação
Zinco - 0,2% Al	(Z)
Zinco - 5% Al - 0,1% mischmetal	Galfan (ZA)
Zinco - 5% Al - 0,1% liga de Mg	Superzinc
55% Al - Zinco - 1,6% liga de Si	Galvalume (AZ)
Zinco - 10% Fe	Galvanneal (ZF) Monogal

3.5.4 Temperatura do banho de zinco

A temperatura do zinco fundido é um fator importante no processo da galvanização pelos efeitos que a mesma tem sobre as características do revestimento, sobre a conservação das cubas e sobre a contaminação dos banhos. A dinâmica da reação zinco-ferro é função direta da temperatura. [7]

Ao aumentar a temperatura, aumenta a reatividade do aço com o zinco, pelo favorecimento da difusão, o que tende a gerar camadas de liga ferro-zinco mais espessas. Este efeito apresenta um pico conforme pode ser evidenciado no gráfico da Figura 10. Ao mesmo tempo, o aumento da temperatura diminui a espessura da camada de zinco puro, pela diminuição da viscosidade do banho e conseqüentemente do arraste do zinco líquido. [1]

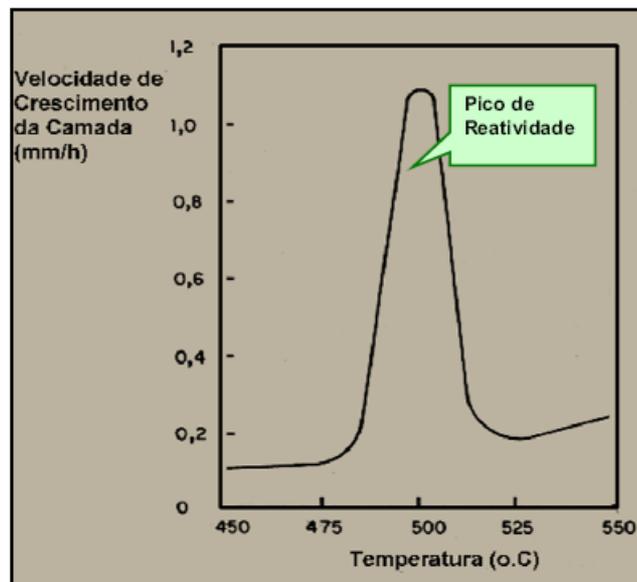


Figura 10 – Influência da temperatura sobre a velocidade de crescimento da camada [1]

Na prática, os banhos de zinco na galvanização são mantidos em uma faixa de 445 °C a 465°C, acima da temperatura de fusão do zinco, que é de 419°C. A elevação da temperatura pode ocasionar alguns inconvenientes, como intensificação do ataque do zinco às paredes de aço da cuba de galvanização, maior consumo de energia para aquecimento do banho e a formação de um revestimento constituído principalmente de liga de zinco-ferro, o que afeta diretamente a aderência da camada. A elevação de temperatura pode ainda aumentar as perdas, pela formação de borra na superfície do banho. Dentro da faixa de operação normal, um aumento de temperatura acarreta: [2]

- maior fluidez do zinco fundido, gerando camadas mais finas de zinco puro;
- maior facilidade de drenagem do banho após a imersão;
- maior aquecimento do metal base, com necessidade de maior tempo de resfriamento após a imersão, o que implica em uma camada de zinco puro mais fina, principalmente em peças resfriadas ao ar;
- maior gradiente de temperatura, podendo gerar distorções, dependendo da geometria e tamanho da peça.

Em baixas temperaturas, a deposição do zinco é irregular, devido ao aumento na viscosidade do banho. [25]

Cabe ressaltar que o ataque do ferro pelo zinco é particularmente intenso acima de 470°C, razão pela qual se evita trabalhar próximo desta temperatura, especialmente quando se utilizam cubas de aço nos fornos de galvanização, pois neste caso as cubas ficam sujeitas a um maior desgaste, reduzindo sua vida útil.

Conforme estudo e experimentos realizados por Nasr e equipe [23], é possível prever a massa de zinco depositada em função da temperatura do banho, velocidade da galvanização e do tempo de imersão. No estudo citado foi estabelecido um modelo, em polinômio de segunda ordem que correlaciona estas variáveis, permitindo determinar condições otimizadas de operação.

3.5.5 Tempo de imersão

Em geral, quanto maior o tempo de imersão, maior é a formação de ligas Fe-Zn. Entretanto, depois de ultrapassado determinado limite, a espessura de camada tende a estabilizar. Observa-se um crescimento acentuado no primeiro minuto de imersão, etapa que corresponde à rapidez da reação entre o zinco e o ferro para, em seguida, ocorrer uma etapa de reação mais lenta, correspondendo a um conseqüente crescimento mais lento da camada, conforme gráfico da Figura 11 [6]:



Figura 11 – Influência do tempo de imersão no peso da camada de zinco [6]

3.5.6 Sistema de saída do banho de zinco

Imediatamente após sair do banho de zinco, o material galvanizado passa através de um sistema de controle de arraste de zinco e de espessura da camada, que pode ser por raspagem, geralmente em gaxetas (para arames de camada leve) ou por sopragem com gás, normalmente gás sulfídrico ou nitrogênio (para arames de camada pesada). O objetivo de ambos os sistemas, é remover o excesso de zinco sobre o arame, permitindo alcançar a espessura e aspecto superficial do revestimento conforme as especificações desejadas.

O sistema de saída do banho é definido pela forma de saída (vertical ou inclinada) e pelo tipo de sistema de controle de arraste do zinco e de espessura da camada. As Tabelas 7 e 8 sintetizam as particularidades dos sistemas de saída mais utilizados, para arames de camada leve e pesada, respectivamente [1]:

Tabela 7 – Sistemas de saída para arames de camada leve [1]

Sistema de saída	Características
1. Com raspador	A saída do arame é inclinada. São afixadas em cada arame abraçadeiras de amianto que promovem a raspagem da camada externa de zinco. O controle de espessura da camada é rudimentar, e o resfriamento é lento, o que prejudica o brilho do revestimento.
2. Com gaxetas (Pad wiping)	A saída do arame pode ser vertical ou inclinada. A raspagem é feita pela passagem dos arames através de gaxetas, que são resfriadas com água. O controle de espessura da camada é um pouco mais preciso, com maior brilho em relação ao sistema com raspador.

Tabela 8 – Sistemas de saída para arames de camada pesada [1]

Sistema	Características
1. Com vermiculita (Sistema convencional)	A saída do arame é vertical. Sobre o banho de zinco é colocada uma camada de vermiculita com lubrificante, geralmente óleo, por onde passam os arames ao serem extraídos do banho, controlando-se o arraste de zinco e a oxidação do mesmo na superfície, pela ausência de oxigênio.
2 – Com gás sulfídrico	A saída do arame é vertical. Os arames passam através de um leito de carvão, onde é queimado gás sulfídrico com propano ou GLP. Forma-se uma película (filme) de sulfeto de zinco circundante ao arame, que além de

	<p>controlar a espessura da camada, impede a oxidação do zinco, pela ausência de oxigênio.</p> <p>O sistema apresenta bom desempenho, porém apresenta o inconveniente do gás sulfídrico ser insalubre e prejudicial ao meio ambiente. Além disso, o sistema requer cuidados operacionais de limpeza e renovação periódica do leito de carvão.</p>
2.4 – Com nitrogênio	<p>A saída do arame é vertical. Os arames galvanizados passam por bicos sopradores de nitrogênio, com pressão e vazão controlada.</p> <p>O sistema apresenta ótimo desempenho em altas velocidades, com bom aspecto superficial. Em relação ao sistema com gás sulfídrico, apresenta a vantagem de o gás nitrogênio ser inerte.</p>

O sistema com gás sulfídrico, apesar de ser confiável para controle do peso da camada, apresenta algumas limitações, tais como [26]:

- Condições de compactação do leito: o carvão do leito precisa ser renovado em intervalos curtos de tempo, com o cuidado de não gerar perturbações na compactação do material e no fio. Em função disso, algumas caixas de carvão são equipadas com um dispositivo de vibração, porém os resultados dependem muito dos cuidados operacionais durante a renovação do material.
- Flexibilidade: Uma vez que o leito de carvão é instalado em caixas dedicadas a sistemas multi-fios, a passagem de um novo fio, em caso de rompimento ou troca do tipo de arame, requer a parada completa da linha de produção.
- Otimização dos ajustes por arame: Devido ao sistema ser do tipo multi-fios, não é possível otimizar a eficiência do sistema de raspagem individualmente por fio, e o peso da camada fica sujeito às condições do leito de carvão.

Em função disso, normalmente o sistema com gás sulfídrico é limitado e os pesos de camada variam muito em função do diâmetro do fio e da velocidade do arame. Por outro lado, no sistema com raspagem com nitrogênio o funcionamento e ajustes são independentes para cada fio, onde cada arame possui um bico individual, por onde é soprado nitrogênio, perpendicularmente ao eixo do fio. A pressão e vazão são pré-ajustadas conforme o diâmetro do fio, a velocidade da linha e camada de zinco desejada. [26]

Diferentemente do sistema com gás sulfídrico, o sistema com nitrogênio não requer intervenções constantes, e em caso de quebras na linha, a passagem do arame pode ser feita sem parada dos demais fios, uma vez que o bico abre em duas partes, conforme ilustrado na Figura 12.

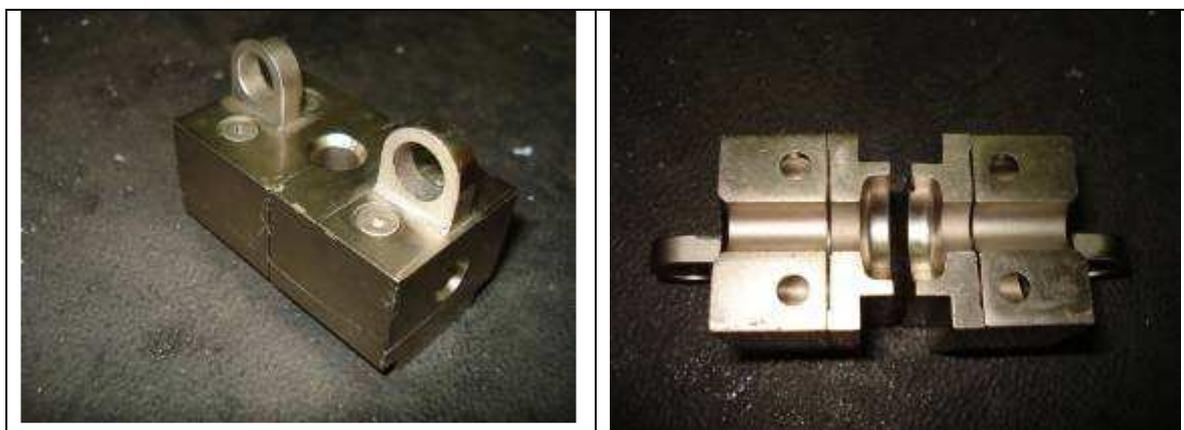


Figura 12 - Bico soprador de nitrogênio

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

A Tabela 9 ilustra valores típicos de operação em sistemas com sopragem de nitrogênio:

Tabela 9 – Dados típicos do sistema de sopragem com nitrogênio [26]

Diâmetro fio (mm)	Velocidade (m/min)	Camada de zinco (g/m ²)	Vazão de nitrogênio (Nm ³ /h)
1,4	31,25	205	1,5
1,6	31,25	225	1,65
1,6	75	225	2,15
2,5	75	225	2,25
4	22,5	191	2,25

Uma ampla faixa de pesos de camada é possível no sistema com nitrogênio. Contudo, o projeto da linha de galvanização e de seus equipamentos deve levar em consideração alguns fatores importantes, tais como [26]:

a) Espaçamento entre fios – a verticalidade e posicionamento dos fios em relação aos bicos devem ser perfeitas a fim de evitar qualquer contato entre o bico e o fio durante seu movimento.

b) Estabilidade do movimento do fio – não são aceitáveis choques mecânicos no sistema de desbobinamento dos arames ou vibrações no arame.

c) Sistema de resfriamento – o sistema de resfriamento dos fios (jatos d'água) deve ser ajustado conforme a velocidade do arame.

d) Qualidade do gás de sopragem (N_2) – É necessário utilizar nitrogênio puro (99,99%), a fim de evitar a formação de óxidos de zinco.

Para arames de camada pesada, os parâmetros mais importantes e que afetam consideravelmente o revestimento galvanizado são: a pressão e a vazão de nitrogênio, assim como o diâmetro dos bicos sopradores de nitrogênio.

3.5.7 Velocidade da linha

Com o objetivo de aumento em produtividade nas linhas de galvanização, a tendência atual é operar-se com velocidades de linha cada vez mais altas. Contudo, diversos fatores devem ser avaliados para estabelecimento da velocidade ideal de produção, visando-se os melhores resultados de qualidade do produto.

A quantidade de zinco líquido que escorre do material retirado do banho de galvanização depende da rapidez da solidificação do zinco, que depende do tempo em que a superfície do material se mantiver acima de cerca de 420°C (ponto de fusão do zinco). Isso depende essencialmente das trocas térmicas do arame com o ambiente externo, que variam conforme a massa do material, temperatura do banho, temperatura do ar ambiente, temperatura da água e velocidade da passagem do material pelas áreas de resfriamento. Uma retirada rápida do material promove uma solidificação mais rápida, originando um revestimento espesso, porém mais irregular.

Uma retirada lenta permite um escorrimento mais lento, originando um revestimento mais uniforme e menos espesso. [7]

Ao mesmo tempo, quanto maior a velocidade da linha de galvanização, menor é o tempo de imersão do material no banho de zinco, portanto diminui o tempo de reação e, conseqüentemente, a espessura das camadas intermetálicas de ferro-zinco. [1]

Além disso, quanto maior a velocidade da linha, maior é o arraste de zinco líquido e portanto aumenta a espessura da camada de zinco puro. [1] A Figura 13 ilustra a extração vertical do arame, e as variáveis envolvidas no arraste do zinco. [27]

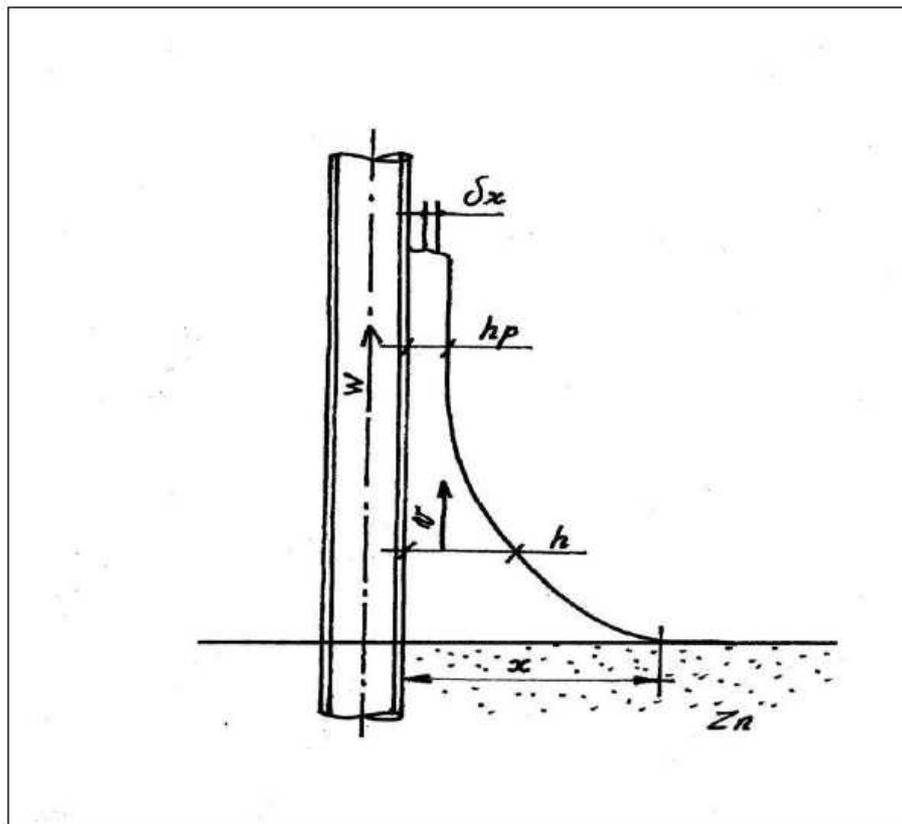


Figura 13 – Variáveis envolvidas no arraste de zinco [27]

A espessura do revestimento (h_p) pode ser expressa através da seguinte equação [27]:

$$h_p = (4/3) \cdot (W/U)^{0,5}$$

onde:

W = velocidade do arame

$$U = (d.g) / \mu$$

d = densidade do fluido arrastado pelo arame

g = aceleração da gravidade

μ = viscosidade cinética do fluido na temperatura considerada.

Confirma-se, portanto, que quanto maior a velocidade de extração do arame (W), maior tende a ser a espessura da camada (hp).

A influência da velocidade depende também do método de extração e raspagem na saída do banho de zinco. Em processos para obtenção de camada leve, onde o excesso de zinco líquido é raspado, o aumento da velocidade diminui a camada, pois diminui o tempo de reação. Por outro lado, em processos camada pesada sem raspagem do zinco líquido, o aumento da velocidade aumenta a camada, pois aumenta o arraste, conforme descrito acima. [1]

3.5.8 Resfriamento

A taxa de resfriamento do material após sair do banho de galvanização é um parâmetro importante e deve ser bem controlado. O calor retido pelo material quando removido do banho, permite a continuação da reação Fe-Zn, até alcançar a superfície do revestimento, em alguns casos causando uma quase total ausência da camada externa de zinco puro [25].

Além disso, é necessário solidificar a camada galvanizada ($T < 419^{\circ}\text{C}$) em tempo evitando-se o arraste de zinco através dos equipamentos subsequentes, bem como minimizar a oxidação do zinco, que é tanto mais intensa quanto maior a temperatura. Por outro lado, se a taxa de resfriamento for muito elevada, podem ocorrer trincas na camada galvanizada, em função de diferenças de variações volumétricas durante a solidificação das fases Fe-Zn. Além disso, o resfriamento

muito acelerado pode comprometer o crescimento dos grãos, afetando o brilho do revestimento.

O resfriamento do material geralmente é feito através de imersão em tanques de água ou por meio de jatos d'água, assim como através do contato com o ar, seja por meio de sopradores ou em contato com o próprio ar ambiente.

3.6 Considerações para o experimento

A partir do estudo desta revisão bibliográfica, e uma vez conhecidos os principais fatores que influenciam os resultados do processo de galvanização, foi delineada a parte experimental deste trabalho.

No experimento realizado, foram selecionados e submetidos à variação alguns parâmetros operacionais da linha de galvanização, mantendo-se sob controle e em condições conhecidas os demais fatores do processo.

Mediante verificação dos resultados do processo de galvanização frente aos parâmetros ajustados, foi possível confirmar os conhecimentos teóricos na prática, bem como desenvolver novos conhecimentos e modelos teóricos associados às evidências práticas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição do experimento

A parte experimental deste trabalho foi realizada em uma das linhas de galvanização da Gerdau Riograndense, aplicando-se o método D.O.E (Design of Experiments) em um arame de camada pesada ABNT 1055, ovalado, com diâmetro nominal de 2,1mm, por ser um arame de camada pesada cujo volume de produção é representativo na Gerdau Riograndense. Para análise estatística dos dados foi utilizado o Minitab® Statistical Software^(a). O plano de amostragem envolveu coleta de amostras de arames sob diferentes condições operacionais, variando-se três fatores controláveis fundamentais na linha de galvanização: velocidade do arame, vazão de nitrogênio e diâmetro do bico de nitrogênio, por serem parâmetros relevantes e de fácil ajuste na prática. O tipo de D.O.E. realizado foi o de Fatorial 2^k , com 3 replicações para os 3 fatores controláveis a dois níveis, totalizando-se 24 amostras. Os níveis testados foram: velocidades de 33 e 48 m.min⁻¹, vazão de nitrogênio de 1 e 3 m³.h⁻¹ e diâmetros do bico de nitrogênio de 6 e 8mm.

Posteriormente as amostras foram ensaiadas e analisadas em laboratório, incluindo os seguintes itens:

- Avaliação de peso de camada de galvanização, conforme norma NBR 7397 **[15]**;
- Avaliação de aderência da camada galvanizada por ensaio de enrolamento, conforme norma NBR 6756 **[28]**;
- Avaliação de uniformidade da camada galvanizada por ensaio Preece, conforme norma NBR 6323 **[13]**;

^(a) MINITAB® e todas outras marcas registradas e logotipos para os produtos e serviços da Companhia são de propriedade exclusiva da Minitab Inc. Todas as outras marcas referenciadas permanecem propriedade de seus respectivos donos. Veja minitab.com para maiores informações.

- Ensaio de corrosão do arame por exposição em câmara úmida, conforme norma NBR 8095 [29];
- Ensaio de corrosão do arame por exposição à névoa salina, conforme norma NBR 8094 [30] e ASTM B 117 [31].
- Avaliação das amostras de arame em microscópio ótico e em MEV (microscópio eletrônico de varredura).
- Avaliação de composição química do aço através de espectrômetro de emissão óptica.
- Avaliação de composição do banho de zinco através de ICP (técnica de plasma de acoplamento indutivo).

4.2 Visão geral - Linha de galvanização – Gerdau Riograndense

A linha de galvanização onde foram realizados os testes é composta pelos seguintes equipamentos principais: sistema de desbobinamento dos arames, forno de recozimento, sistema de decapagem química, sistema de fluxagem, estufas, forno de zinco, tanques de passivação e bloco de bobinamento dos arames.

Os arames trefilados a serem galvanizados alimentam a linha de galvanização pelo sistema de desbobinamento, conforme ilustrado na Figura 14. Há dois tipos de sistema de desbobinamento: com bobina de arame estacionária e extração pela parte superior, ou com bobina de arame giratória e desbobinamento tangencial.



Figura 14 - Sistema de desbobinamento dos arames

Uma vez extraídos das bobinas, os arames são direcionados paralelamente através da linha de galvanização, passando inicialmente pelo forno de recozimento, que possui dois banhos de chumbo líquido. Este forno está ilustrado na Figura 15.

O primeiro tanque do forno de chumbo opera a 450°C e tem a função de pré-aquecer o material, bem como remover as impurezas da superfície do arame. O segundo tanque opera a 720°C e tem a função de promover o recozimento do arame.

Conforme as características desejadas no material, o arame pode passar apenas pelo primeiro tanque ou em ambos os tanques de chumbo. Para aplicações onde é requerida maior resistência mecânica, o arame passa apenas pelo primeiro tanque. Quando há a necessidade de um arame mais macio e maleável, o mesmo é recozido, passando através dos dois tanques.

O arame de camada pesada testado neste trabalho passou somente pelo primeiro tanque de chumbo, pois as características de sua aplicação requerem maior dureza e resistência mecânica.



Figura 15 - Forno de recozimento (por imersão em chumbo)

Após o forno de chumbo, os arames passam por um sistema de resfriamento a água e entram no sistema de decapagem química com ácido clorídrico. O tanque de ácido opera a 60°C e é selado, com cortinas de água em sua entrada e saída. Após o tanque de ácido, os arames passam por um tanque de lavagem com água. O sistema de decapagem química está ilustrado na Figura 16.



Figura 16 - Sistema de decapagem química (com solução de ácido clorídrico)

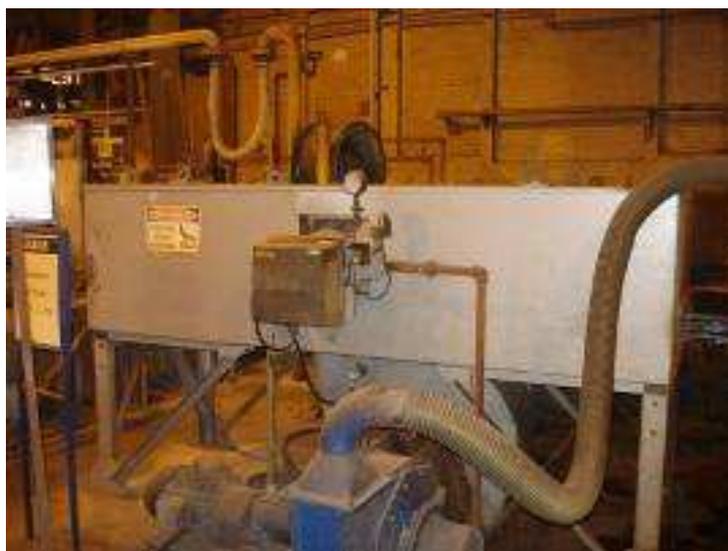
Na saída do sistema de decapagem há um sistema soprador de ar, que tem por finalidade remover resíduos de água sobre os arames, evitando assim o arraste de água para a próxima etapa, que é a fluxagem.

O sistema de fluxagem, ilustrado na Figura 17, utiliza cloreto duplo de zinco e amônio e tem por finalidade preparar a superfície dos arames para a imersão na cuba de zinco.



Figura 17 - Sistema de fluxagem (com cloreto duplo de zinco e amônio)

Após a fluxagem, os arames passam através de estufas de secagem, conforme ilustrado na Figura 18. Este sistema é aquecido com gás natural e possui renovação forçada de ar com ventiladores. A finalidade desta secagem é evitar que o arame entre úmido na próxima etapa, que é a imersão no banho de zinco líquido.



**Figura 18 - Estufas de secagem dos arames
(Temperatura de operação: 210°C +/- 5°C)**

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

Logo após a secagem, os arames são imersos no forno de zinco. A cuba de galvanização, ilustrada na Figura 18, é de material cerâmico, e opera a uma temperatura próxima de 450°C, aquecida por meio de queimadores a gás natural, instalados em uma campânula sobre o banho de zinco líquido.



Figura 19 - Forno de zinco (cuba de galvanização)
(Temperatura de operação: 452°C)

Após a imersão e extração dos arames da cuba de galvanização, o material passa através de tanques de passivação, onde se utiliza solução cromatizante. Este sistema está ilustrado na Figura 20, e possui em sua saída sopradores de ar para remoção de umidade residual sobre os arames.



Figura 20 - Tanques de passivação

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

A etapa final da linha de galvanização é o bobinamento dos rolos de arame, conforme ilustrado na Figura 21. O sistema de bobinamento traciona e forma os rolos de arames, com controle de velocidade individualizada por arame, através de motores com variadores de frequência.

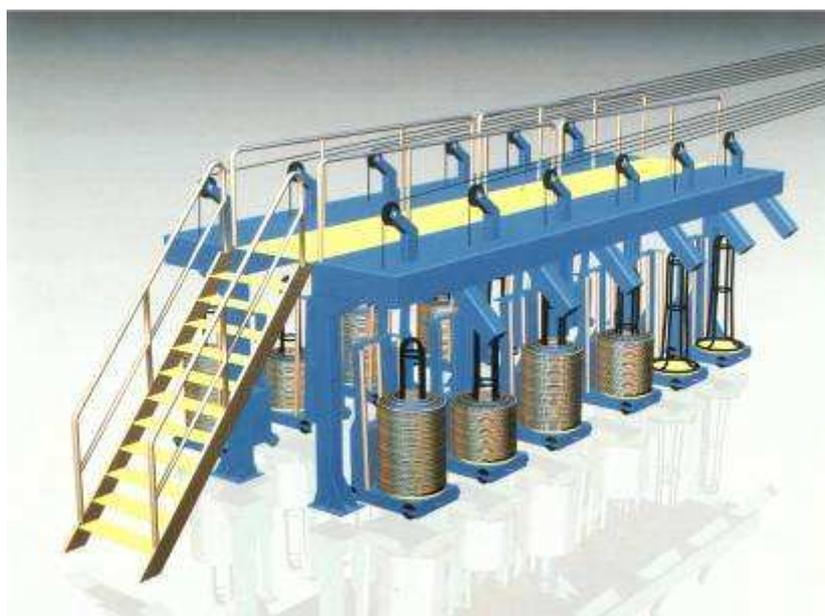


Figura 21 – Sistema de bobinamento dos arames

4.3 Características do forno de zinco (cuba de galvanização)

As características e particularidades do forno de zinco onde foram realizados os testes estão descritas a seguir.

4.3.1. Tipo de imersão

O sistema de entrada dos arames no forno de zinco possui duas opções de imersão, denominadas imersão em cuba completa e imersão em meia cuba, conforme o trajeto percorrido pelo arame ao atravessar o banho de zinco.

Na região de entrada do banho, o arame é apoiado em roldanas situadas externamente ao banho. Através do posicionamento do arame acima ou abaixo destas roldanas, é possível ajustar o arame para imersão em cuba completa ou imersão em meia cuba, conforme ilustrado nas Figuras 22 e 23. Na região de saída do arame, há uma pedra submersa no banho de zinco, denominada pedra de imersão, por onde o arame tracionado é guiado, forçando-se sua imersão no banho.

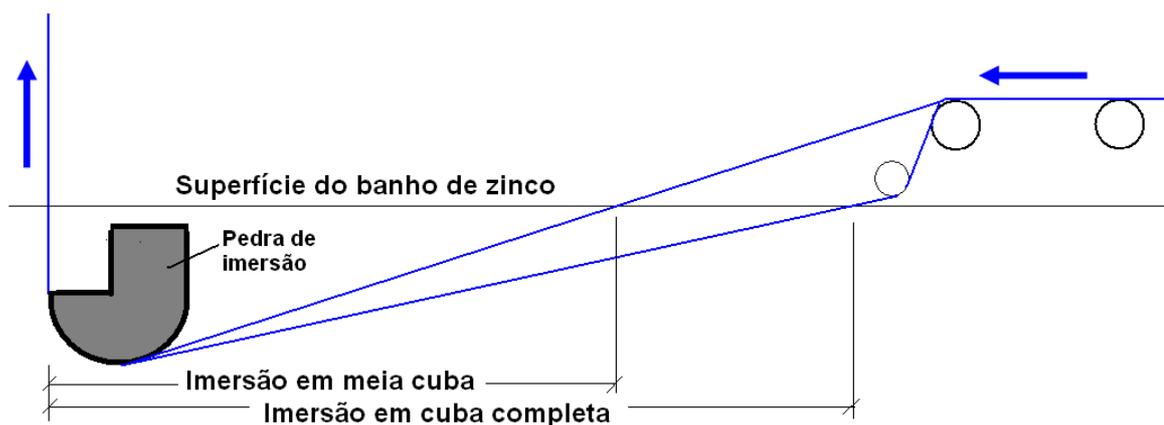


Figura 22 – Imersão do arame em meia cuba e em cuba completa



Figura 23 – Roldanas de posicionamento dos arames para imersão em cuba completa ou em meia cuba

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

4.3.2. Sistema de saída do banho de zinco

O forno de zinco possui duas opções de sistema de saída dos arames: ou com raspagem em prensa gaxeta ou com sopragem de nitrogênio. Estes sistemas, ilustrados nas Figuras 24 e 25, tem por finalidade o controle de arraste de zinco e de espessura da camada, conforme descritos no item 3.5.6 - Sistema de saída do banho de zinco.



**Figura 24 - Sistema prensa gaxeta
(para arames de camada leve)**

**Figura 25 - Sistema de raspagem
com Nitrogênio
(para arames de camada pesada)**

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

A Figura 26 ilustra a pedra de imersão e o sistema de sopragem com nitrogênio.

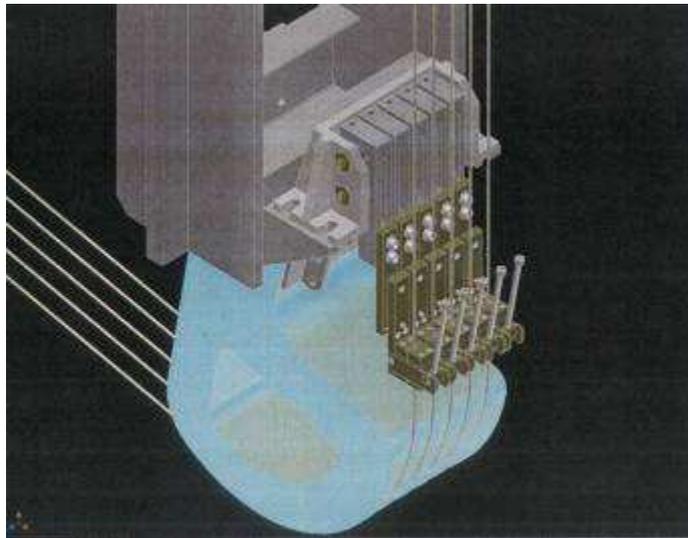


Figura 26 - Saída vertical (detalhe da pedra de imersão e do sistema de sopragem com nitrogênio) [26]

4.3.3. Sistema de resfriamento

O resfriamento do arame, depois de retirado do banho de zinco, é realizado de duas formas: ou por sistema prensa gaxeta ou por jatos de água.

Para arames de camada leve, o resfriamento é realizado por sistema prensa gaxeta, onde o arame passa através de gaxetas resfriadas internamente com água. Este sistema está ilustrado na Figura 27.



Figura 27 - Sistema prensa gaxeta – arames de camada leve

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

Para arames de camada pesada, o resfriamento é realizado por meio de jatos de água na saída, situados logo após os bicos de sopragem com nitrogênio. Este sistema está ilustrado na Figura 28.

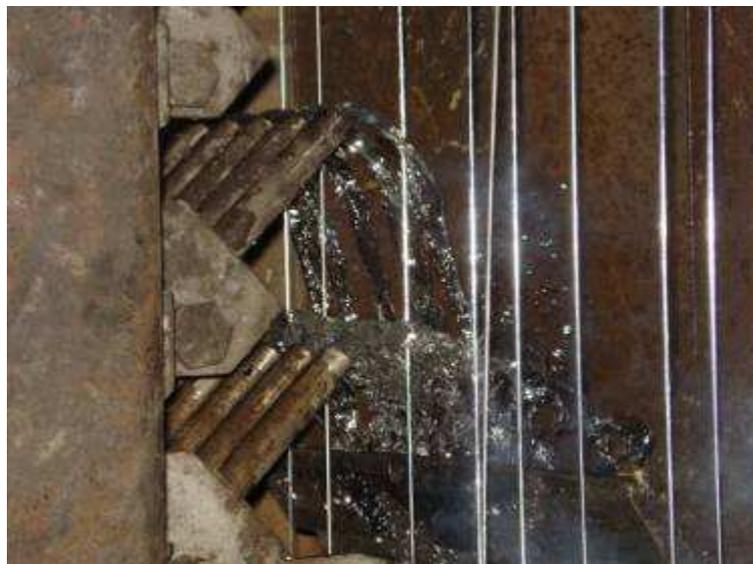


Figura 28 - Resfriamento com jatos d'água – arame camada pesada

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

4.4 Condições do teste

O plano de amostragem envolveu testes variando-se três fatores controláveis (parâmetros) fundamentais na linha de galvanização:

- Velocidade do arame
- Vazão de nitrogênio
- Diâmetro do bico de nitrogênio

A Figura 29 ilustra os componentes e elementos de ajuste da linha de galvanização correspondentes às variáveis citadas acima:



a. Bico de nitrogênio



b. Ajuste de vazão de nitrogênio



c. Ajuste de velocidade do arame

Figura 29 – Componentes e elementos de ajuste da linha de galvanização
Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

Durante as amostragens realizadas, foram monitoradas também a pressão de nitrogênio e as temperaturas do banho de zinco e dos arames na entrada e saída da cuba de galvanização:

a) Pressão de nitrogênio

A pressão de nitrogênio foi monitorada e manteve-se constante durante os testes, em 4 kgf. cm^{-2} , Este controle é feito através de uma válvula reguladora de pressão, conforme Figura 30.



Figura 30 - Válvula reguladora de pressão de nitrogênio
Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

b) Temperaturas

A temperatura da cuba de zinco manteve-se constante durante todo o teste, em $452 \pm 1^\circ\text{C}$, conforme ilustrado na Figura 31.



Figura 31 - Temperatura do banho de zinco
Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

Além disso, foram monitoradas durante o teste as temperaturas do arame na entrada e saída da cuba de zinco, mediante leitura com pirômetro ótico, conforme ilustrado na Figura 32:

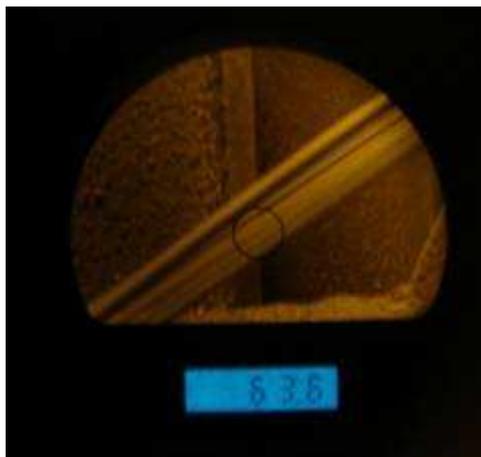


Figura 32 - Medição de temperatura do arame por pirômetro

Fonte: Linha de Galvanização 2 – Gerdau Riograndense – Nov/2008

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Temperatura média de entrada do arame na cuba de zinco: 63°C
- Temperatura média de saída do arame (antes do resfriamento): 340°C
- Temperatura média de saída do arame (após o resfriamento com água): 44°C

As temperaturas da cuba e do arame mantiveram-se praticamente constantes durante os testes realizados, e em conformidade com os limites especificados para operação do forno de zinco, de forma que estes fatores não foram considerados influentes sobre as variações nos resultados das amostras coletadas durante os testes na linha.

Além disso, para avaliação de outras condições de contorno do teste, foram coletadas amostras especiais para avaliação, como segue:

- Amostras do banho de zinco em 3 locais (início, meio e fim da cuba);
- Amostras de arames galvanizados camada pesada com imersão em cuba completa;

- Amostras de arames galvanizados sem água de resfriamento (somente resfriados ao ar).
- Amostras de arames de camada leve processados no mesmo momento que os arames de camada pesada, na mesma cuba de zinco.

4.5 Características do arame testado

O arame de camada pesada testado apresenta as seguintes especificações:

- Composição química: conforme norma ABNT NBR NM 87/00 - Aço carbono e ligados para construção mecânica – designação e composição química [32]. Os dados de especificação estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Composição química do arame testado

Designação	%C	%Mn	%P (máx.)	%S (Max.)
ABNT 1055	0,5 a 0,6	0,6 a 0,9	0,04	0,05

- Características dimensionais: conforme norma ABNT NBR 5589/82 - Arames de baixo teor de carbono. Diâmetros, tolerâncias e pesos [33]. Os dados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Características dimensionais do arame testado

Carga de Ruptura Mínima (kgf)	Camada de Zinco Mínima (g.m ⁻²)	Aderência da Camada de Zinco
500	210	8 a 10 voltas sobre o próprio diâmetro

Equivalente	Diâmetro (mm)			Ovalização
	Nominal	Mínimo	Máximo	Máx.(mm)
2,03 a 2,10	2,1	1,88	2,25	0,23 a 0,37

- Propriedades mecânicas e de Revestimento: conforme norma ABNT NBR 6331/82 - Arame de aço de baixo teor de carbono, zincado para uso geral [14].
- Sem recozimento (arame “duro”) – Ou seja, o arame testado não foi recozido no forno de chumbo, em função de suas especificações exigirem maior dureza e resistência mecânica.
- Camada de zinco mínima (conforme NBR 6331/1982 [14]): 210 g.m^{-2}

A Figura 33 ilustra as características do arame, como produto acabado.



Figura 33 - Arame galvanizado (produto acabado)

Fonte: Especificações de produto - Gerdau

A partir das características do arame e mediante o uso de softwares específicos do fabricante do forno de zinco (FIB - Le Four Industriel Belge S.A.), foram determinadas aproximações iniciais para os parâmetros operacionais da linha de galvanização, para o resultado esperado de espessura de camada.

Como recomendação prática, normalmente utiliza-se o diâmetro do bico de nitrogênio entre 3 a 4 vezes o diâmetro do arame. No caso do arame testado, onde o diâmetro nominal é de 2,1mm, o bico de nitrogênio recomendado situa-se entre 6 e 8 mm, que foram os bicos testados durante o experimento D.O.E.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Composição química do aço

A composição química do aço foi analisada em 3 amostras do arame testado, e os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Composição química do aço

AMOSTRA A											
C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sn [%]	V [%]	Nb [%]
0,56	0,66	0,21	0,018	0,011	0,052	0,007	0,027	0,002	0,011	0,001	<0,001

AMOSTRA B											
C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sn [%]	V [%]	Nb [%]
0,57	0,65	0,21	0,018	0,010	0,054	0,003	0,025	0,001	0,011	<0,001	<0,001

AMOSTRA C											
C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sn [%]	V [%]	Nb [%]
0,56	0,65	0,20	0,018	0,011	0,053	0,004	0,026	0,001	0,011	0,001	<0,001

Esta composição está em conformidade com as especificações para o tipo de aço testado (ABNT 1055), estabelecida pela norma ABNT NBR NM 87/00 [32] e não apresenta variação relevante entre as amostras analisadas. Além disso, a faixa de silício está dentro do recomendado (fora da faixa de risco do efeito Sandelin). Em função disso, a composição química do aço foi considerada como fator não influente na variação de resultados das amostras avaliadas.

5.2 Composição química do banho de zinco

A liga de zinco aplicada na linha de galvanização utiliza como referência as especificações da ABNT NBR 5996 – Zinco Primário [22], para zinco primário do tipo fino. Estas especificações estão apresentadas na Tabela 13. Cabe ressaltar que estas especificações servem apenas como referência, uma vez que na prática são adotadas especificações mais restritivas, cujas informações são de propriedade da Gerdau. Estas especificações definem também teores de outros elementos químicos, como o de alumínio, por exemplo.

Tabela 13 – Composição química de zinco primário tipo fino [22]

Tipo	Teor Zn	Teor máximo impurezas (%)		
		Chumbo	Cádmio	Ferro
Fino	99,90	0,07	0,03	0,02

Durante os testes, foram coletadas 3 amostras de zinco da cuba de galvanização (nas regiões de entrada, intermediária e de saída dos arames). A Figura 34 ilustra a coleta de amostra do banho de zinco na linha de galvanização.



Figura 34 - Retirada de cadinho com amostra do banho de zinco

Os resultados das análises destas amostras estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados das amostras do banho de zinco

Amostra	Zn [%]	Al [%]
Início	98,00	0,002
Meio	98,17	0,0
Fim	99,00	0,005

Os valores acima estão dentro dos limites admissíveis normalmente adotados para linhas de galvanização, conforme mencionados no item 3.5.3. Sendo assim, a composição do banho de zinco foi considerada como não influente na variação dos resultados das amostras de arame galvanizado avaliadas.

5.3 Tipos de imersão (meia cuba e cuba completa)

A fim de avaliar o efeito do tempo de imersão sobre o resultado da galvanização, foram coletadas amostras de arame camada pesada com imersão em cuba completa e em “meia cuba”. Os resultados encontrados estão ilustrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados conforme tipo de imersão

Resultados - camada de Zinco (g.m⁻²)				
Amostra	Veloc (m/min)	Vazão N₂ (m³/h)	Bico N₂ (mm)	Cuba completa
15	48	3	8	439,2
16	33	3	8	407,5
17	33	3	8	374,7
18	48	1	6	411,7
19	48	1	6	460
20	33	3	6	415,3
21	48	1	6	435
22	48	3	6	432,3
23	33	1	6	339
24	33	1	6	349,7

Observa-se que, para arames de camada pesada a imersão em cuba completa gera camadas de zinco muito mais espessas, devido ao maior tempo de imersão, o que na prática significa desperdício de zinco. Em função disso, confirmou-se que a configuração mais adequada e econômica, dentro dos limites de velocidade testados, é a imersão em meia cuba. Sendo assim, o estudo foi focado nesta configuração de imersão.

5.4 Resultados dos testes DOE

A Tabela 16 apresenta os principais resultados obtidos no teste DOE:

Tabela 16 - Resultados do teste DOE

Amostra	Velocidade (m/min)	Vazão N ₂ (m ³ /h)	Bico de N ₂ (mm)	Camada Zn (g/m ²)	Aderência	Preece (nº imersões)
1	33	1	8	351	RUIM	3
2	48	1	8	445	RUIM	3
3	33	3	6	276	BOA	1
4	48	1	8	448	RUIM	2
5	48	3	6	385	RUIM	3
6	48	1	8	391	RUIM	3
7	33	3	8	487	RUIM	4
8	48	3	8	441	RUIM	3
9	33	1	6	370	BOA	1
10	48	3	8	457	RUIM	1
11	33	1	8	372	RUIM	2
12	33	1	8	330	BOA	5
13	48	3	6	373	RUIM	3
14	33	3	6	294	BOA	1
15	48	3	8	439	RUIM	4
16	33	3	8	291	BOA	2
17	33	3	8	294	BOA	2
18	48	1	6	406	RUIM	1
19	48	1	6	414	BOA	1
20	33	3	6	338	BOA	1
21	48	1	6	369	RUIM	1
22	48	3	6	376	RUIM	2
23	33	1	6	294	BOA	1
24	33	1	6	333	BOA	2

5.5 Fatores relevantes para o peso e aderência da camada

Os gráficos das Figuras 35 e 36 apresentam, em ordem de relevância, quais são os parâmetros e interações entre parâmetros que mais influenciaram os resultados de peso de camada e aderência de camada. Pode-se afirmar, com 95% de confiança (alfa de 0,05) que os fatores velocidade e diâmetro do bico de nitrogênio possuem efeito significativo sobre o peso de camada de zinco. Outro termo a considerar é interação entre a vazão de nitrogênio e o diâmetro do bico de nitrogênio. O fator vazão de nitrogênio isoladamente não é relevante, assim como as interações entre os parâmetros, identificadas no gráfico como AB, AC e ABC.

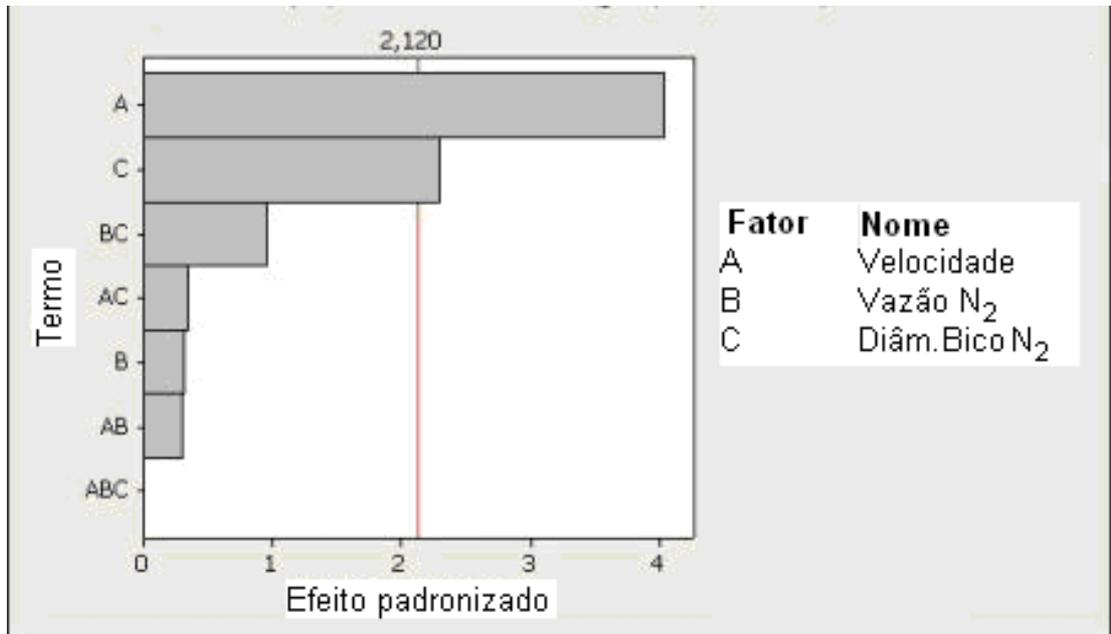


Figura 35 - Resposta do peso da camada de zinco em relação aos parâmetros testados (alfa = 0,05)

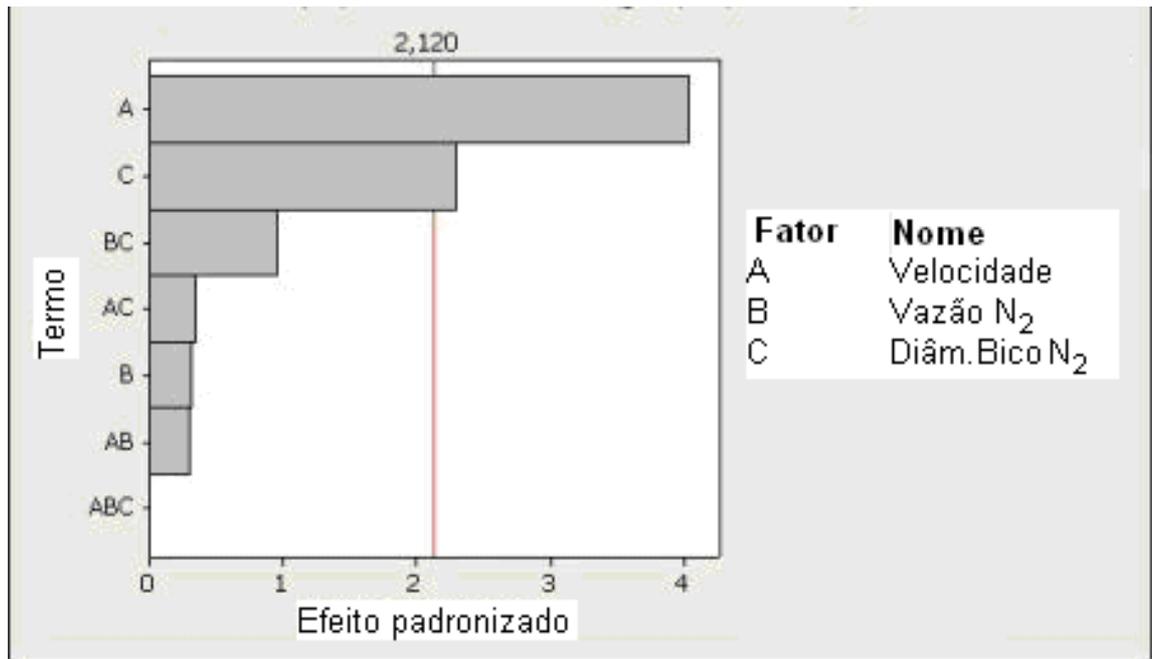


Figura 36 – Resposta da aderência da camada de zinco em relação aos parâmetros testados (alfa = 0,05)

5.6 Peso da camada de galvanização

Em todas as amostras analisadas, o peso da camada de galvanização ficou acima do limite mínimo de 210 g.m⁻² estabelecido pela norma NBR 6331/1982 [14] para o tipo de arame testado. Os valores obtidos variaram de um mínimo de 276 g.m⁻² a 486 g.m⁻², com valor médio de 374 g.m⁻².

A Figura 37 apresenta os resultados verificados no peso da camada de zinco, em relação aos parâmetros testados na linha de galvanização. Verificou-se que o peso da camada de galvanização aumenta com o aumento do diâmetro do bico de nitrogênio e com a velocidade do arame, enquanto a vazão de nitrogênio não influencia muito nos resultados, com ligeira queda na camada de zinco ao aumentar-se a vazão de nitrogênio. Esta correlação, ao ser avaliada por método estatístico, apresentou valor de R-Sq (coeficiente de determinação R²) de 0,3%, o que confirma que o efeito isolado da variação na vazão de nitrogênio não é significativo sobre o peso da camada de galvanização.

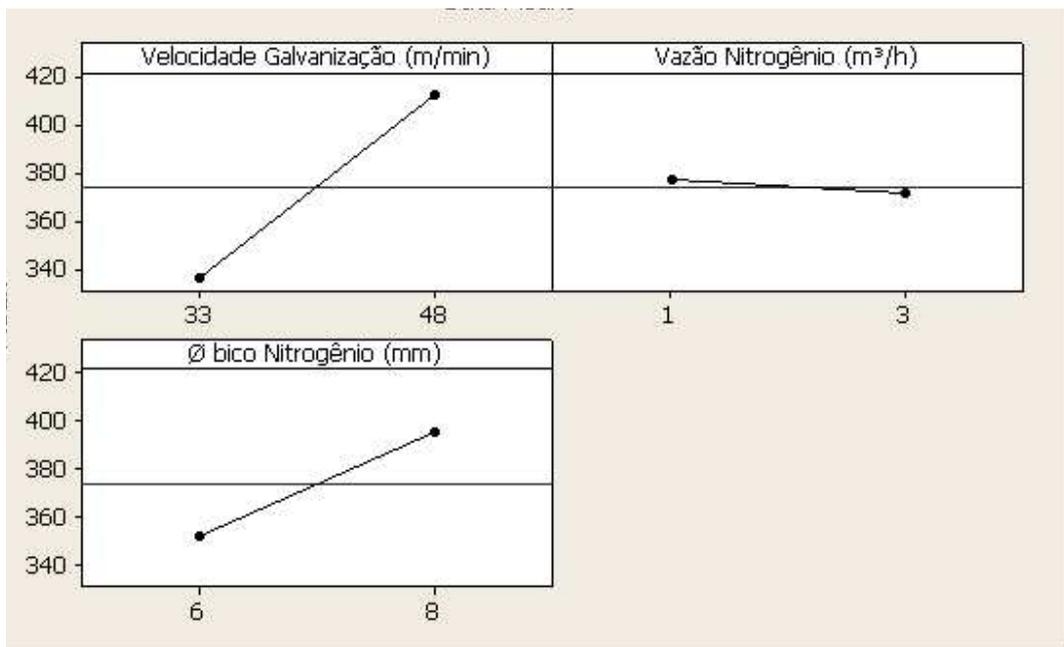


Figura 37 - Camada de galvanização (g.m⁻²) em função da velocidade do arame, vazão de nitrogênio e diâmetro do bico de nitrogênio

A Figura 38 ilustra as influências combinadas (interações) dos parâmetros testados sobre os resultados do peso de camada. Observa-se que:

- O efeito isolado da variação na vazão de nitrogênio sobre o peso da camada não é significativo independente da velocidade de galvanização;
- O efeito da variação no diâmetro do bico de nitrogênio sobre o peso da camada é positivo, ou seja, quanto maior o diâmetro, maior é o peso da camada e este efeito independe da velocidade de galvanização;
- A raspagem do arame é maior para vazões de nitrogênio maiores e bicos de nitrogênio menores (ponto de mínima camada, no gráfico de vazão de nitrogênio x diâmetro do bico de nitrogênio);

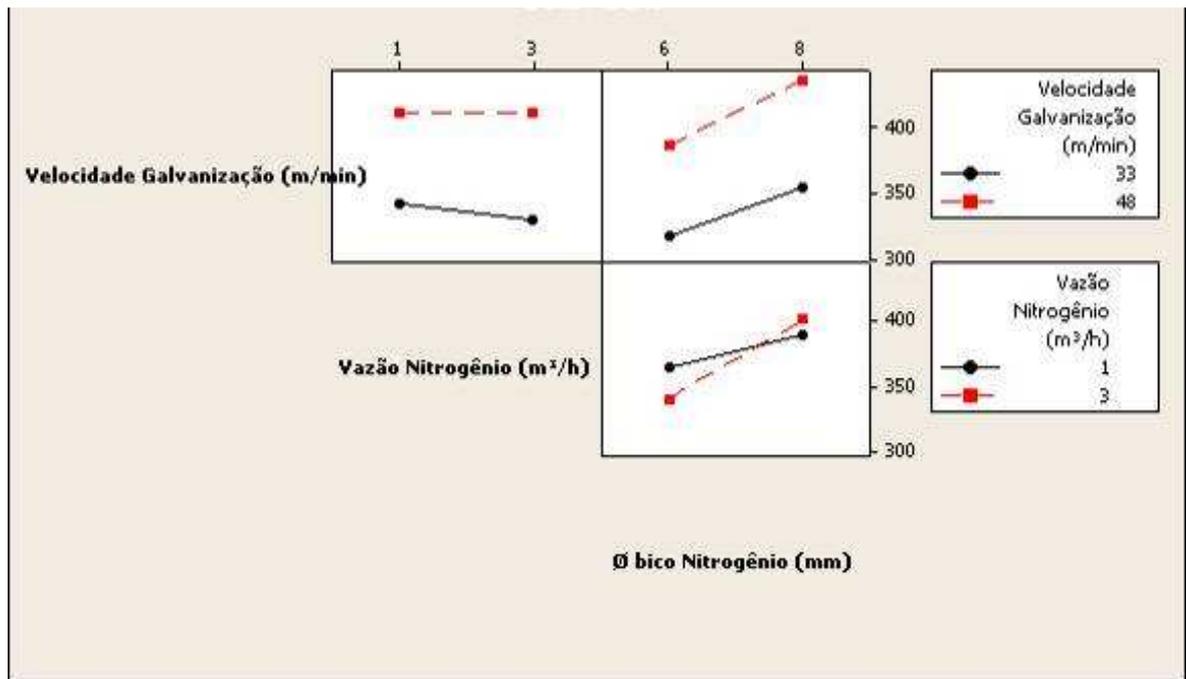


Figura 38 - Interação de dois fatores sobre o peso da camada de galvanização

5.7 Análise de regressão para o peso de camada de zinco

Por meio de análise de regressão, considerando os dados obtidos no experimento, pode-se, através do software Minitab, determinar a equação para o peso esperado da camada de zinco em função da velocidade de galvanização, vazão de nitrogênio e diâmetro do bico de nitrogênio. A equação obtida, com coeficiente de determinação R^2 de 58,1% é:

$$\text{Camada Zinco (g.m}^{-2}\text{)} = 148 + 5,08. \text{ Velocidade (m.min}^{-1}\text{)} - 65,9 \text{ Vazão (m}^3\text{.h}^{-1}\text{)} + 3,7 \text{ Diâmetro (mm)} + 8,99 \text{ Vazão (m}^3\text{.h}^{-1}\text{)} \times \text{Diâmetro (mm)}$$

A equação acima também pode ser expressa com os níveis codificados, considerando-se os menores valores testados como nível -1 e os maiores valores testados como nível +1, de forma a normalizar todos os termos, em uma mesma base. Desta forma, a equação passa a ser:

$$\text{Camada Zinco (g.m}^{-2}\text{)} = 374 + 38,1. \text{ Velocidade (m.min}^{-1}\text{)} - 2,95. \text{ Vazão (m}^3\text{.h}^{-1}\text{)} + 21,6. \text{ Diâmetro (mm)} + 8,99 \text{ Vazão (m}^3\text{.h}^{-1}\text{)} \times \text{Diâmetro (mm)}$$

Confirma-se pela equação normalizada acima que o fator mais significativo (de maior peso) é a velocidade, seguido pelo diâmetro do bico de nitrogênio e pela interação vazão de nitrogênio com diâmetro do bico de nitrogênio. Isto está em conformidade com os resultados apresentados no gráfico da Figura 35.

5.8 Aderência

Quanto ao parâmetro de aderência, avaliado através do teste de enrolamento, o percentual de amostras com boa aderência foi de 42%, sendo este parâmetro determinante para aprovação das amostras. A Figura 39 ilustra exemplos de resultados das amostras testadas, com resultados de aderência boa e ruim.



Aderência boa



Aderência ruim

Figura 39 - Exemplo de amostras - ensaio de enrolamento

A Figura 40 apresenta os resultados verificados na aderência da camada, em relação aos parâmetros testados na linha de galvanização. Como convenção, adotou-se os valores 1 para aderência boa e -1 para aderência ruim, conforme resultados do ensaio de enrolamento. De uma forma geral, constataram-se melhores resultados de aderência para arames produzidos em velocidades mais baixas, com o uso de bicos de nitrogênio menores, enquanto a variação na vazão de nitrogênio novamente não teve influência sobre os resultados de aderência.

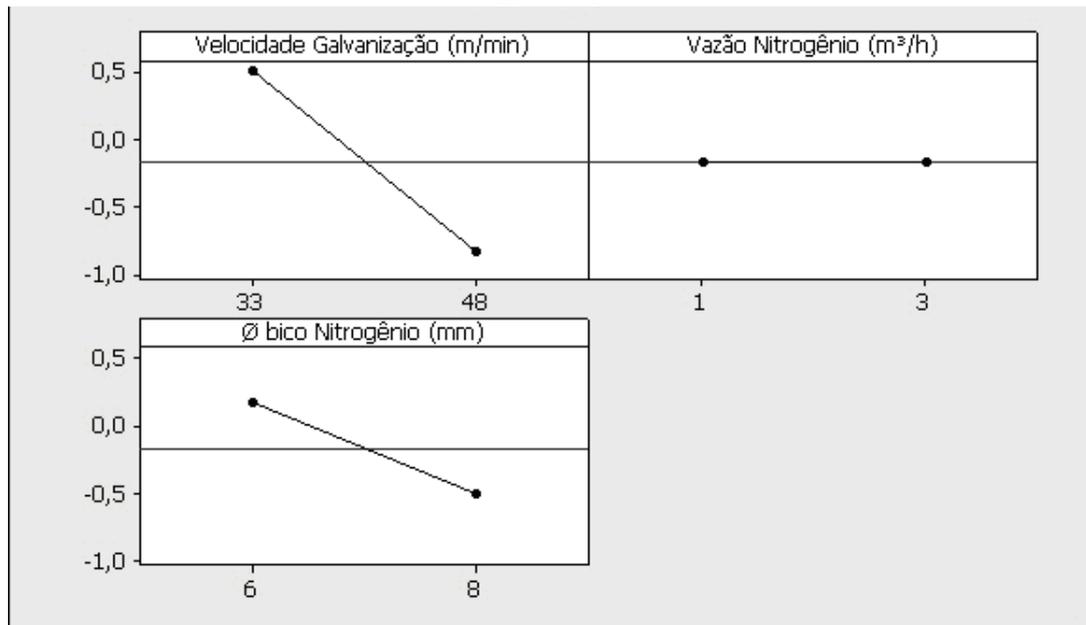


Figura 40 - Aderência da camada (ok = 1 / não ok = -1) em função da velocidade do arame, vazão de nitrogênio e diâmetro do bico de nitrogênio

Além disso, comparando-se os gráficos das Figuras 37 e 40, confirma-se que ao aumentar-se o peso de camada, a aderência diminui. Esta correlação é significativa, conforme pode ser evidenciada no gráfico da Figura 41, onde se verifica que o valor de R-Sq (coeficiente de determinação R^2) é de 52,7%.

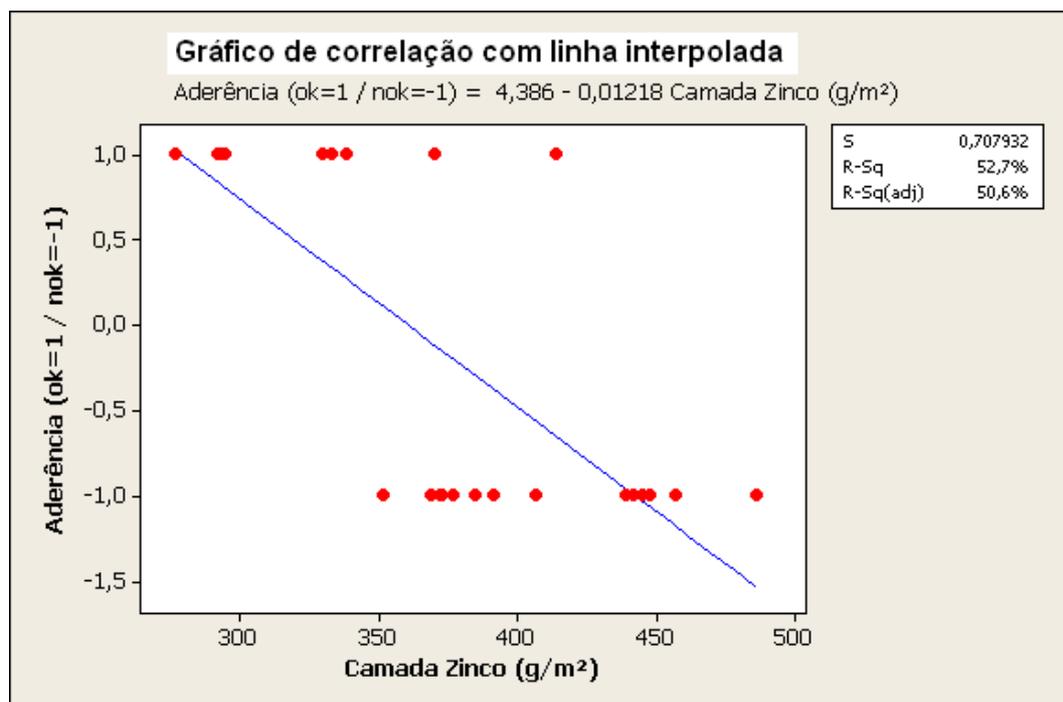


Figura 41 – Correlação entre aderência e peso da camada de zinco

A Figura 42 ilustra as influências combinadas (interações) dos parâmetros testados na linha de galvanização sobre os resultados de aderência da camada.

Observa-se que:

- O efeito da variação no diâmetro do bico de nitrogênio sobre a aderência da camada é maior em velocidades mais baixas e para vazões de nitrogênio mais baixas.

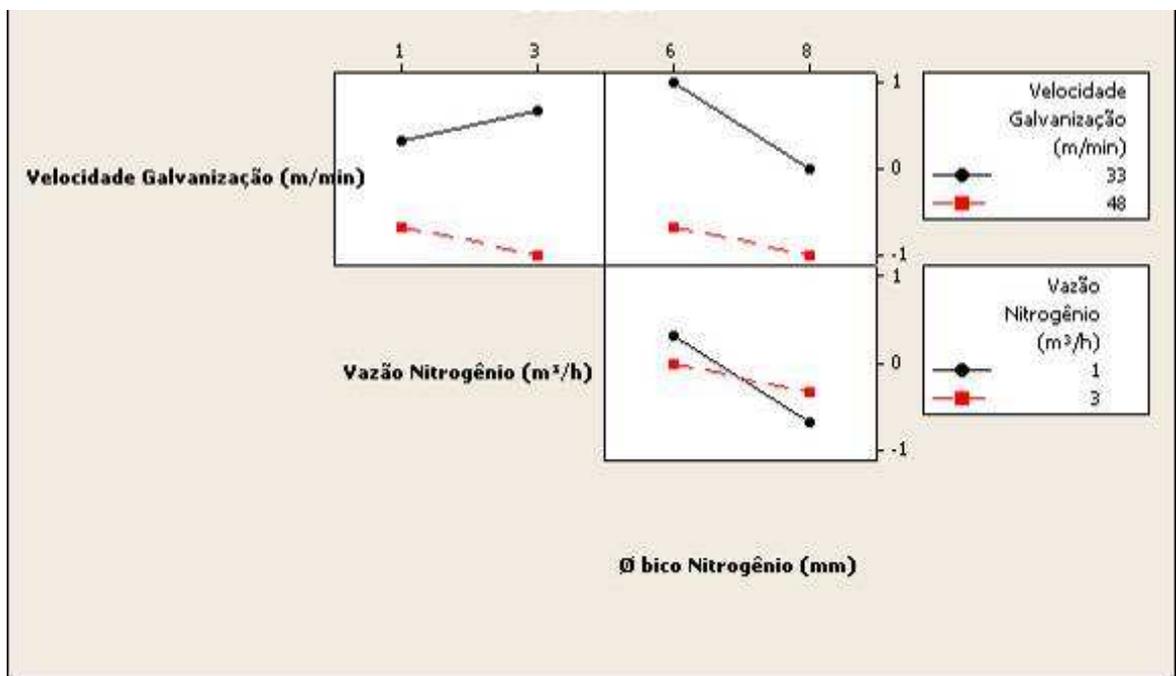


Figura 42 – Interação de dois fatores sobre a aderência (ok = 1 / não ok = -1)

5.9 Conjugação otimizada de parâmetros.

Através do software Minitab, foi possível determinar a conjugação otimizada de parâmetros da linha de galvanização para o arame testado, visando-se obter boa aderência de camada, com o menor peso de camada associado (menor consumo possível de zinco), uma vez que todas as amostras atenderam ao peso de camada estabelecido por norma. Assim, os parâmetros recomendados para o arame testado são: velocidade de $33 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, vazão de nitrogênio de $1 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ e diâmetro do bico de

nitrogênio de 6 mm. Mediante utilização destes parâmetros na linha de galvanização, o peso de camada resultante previsto é de 332 g.m². Este valor está ainda bem acima do estabelecido pela norma, o que mostra que é possível minimizar a camada sem comprometer as propriedades do material.

5.10 Ensaio de Preece

No ensaio de Preece o número de imersões, para as amostras avaliadas, variou de 1 a 5. O histograma da Figura 43 ilustra estes resultados:

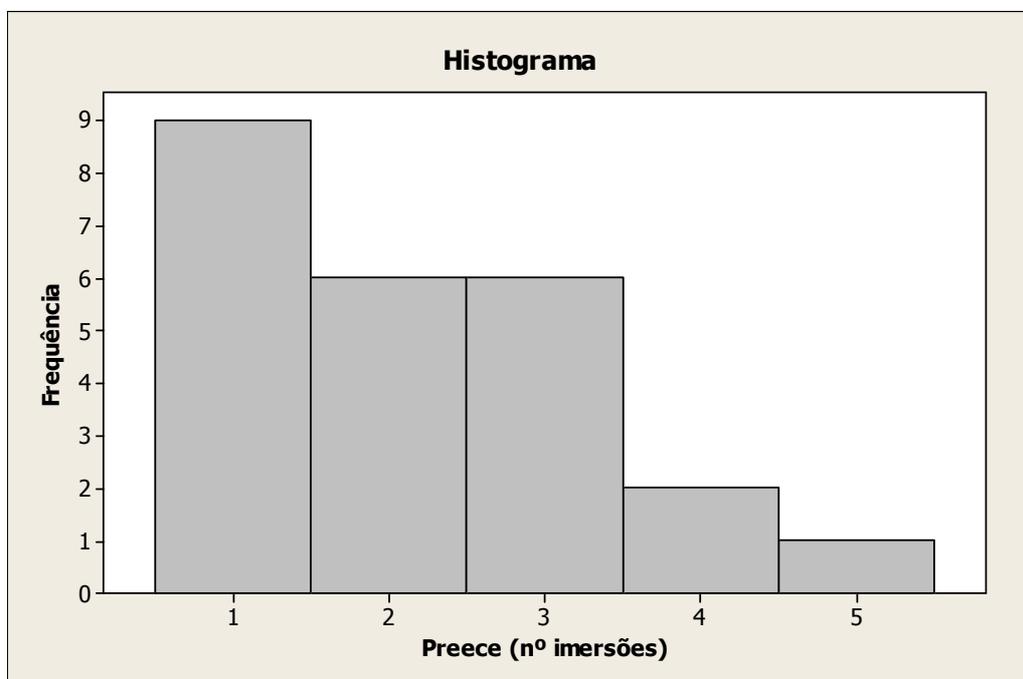


Figura 43 - Resultados do ensaio de Preece

Observa-se que a maioria das amostras revelou o substrato de aço já na primeira imersão, com apenas uma amostra suportando até 5 imersões.

O gráfico de dispersão da Figura 44 apresenta os resultados de número de imersões no ensaio Preece em função do peso de camada para todas as amostras do teste D.O.E. O coeficiente de determinação R-Sq (R^2) verificado é de 10,1%, o que significa uma correlação fraca entre o número de imersões e o peso de camada. Isso pode ser explicado em função da geometria ovalada da seção do arame, com

uma inerente e esperada excentricidade na camada de galvanização, o que tende a expor a superfície do material na região de camada menos espessa, independentemente do peso total da camada de zinco.

Face aos resultados verificados, pôde-se verificar que o ensaio de Preece isoladamente não é conclusivo. Assim, os resultados deste ensaio devem ser considerados em conjunto com os resultados dos demais ensaios realizados, para fins de análises e conclusões.

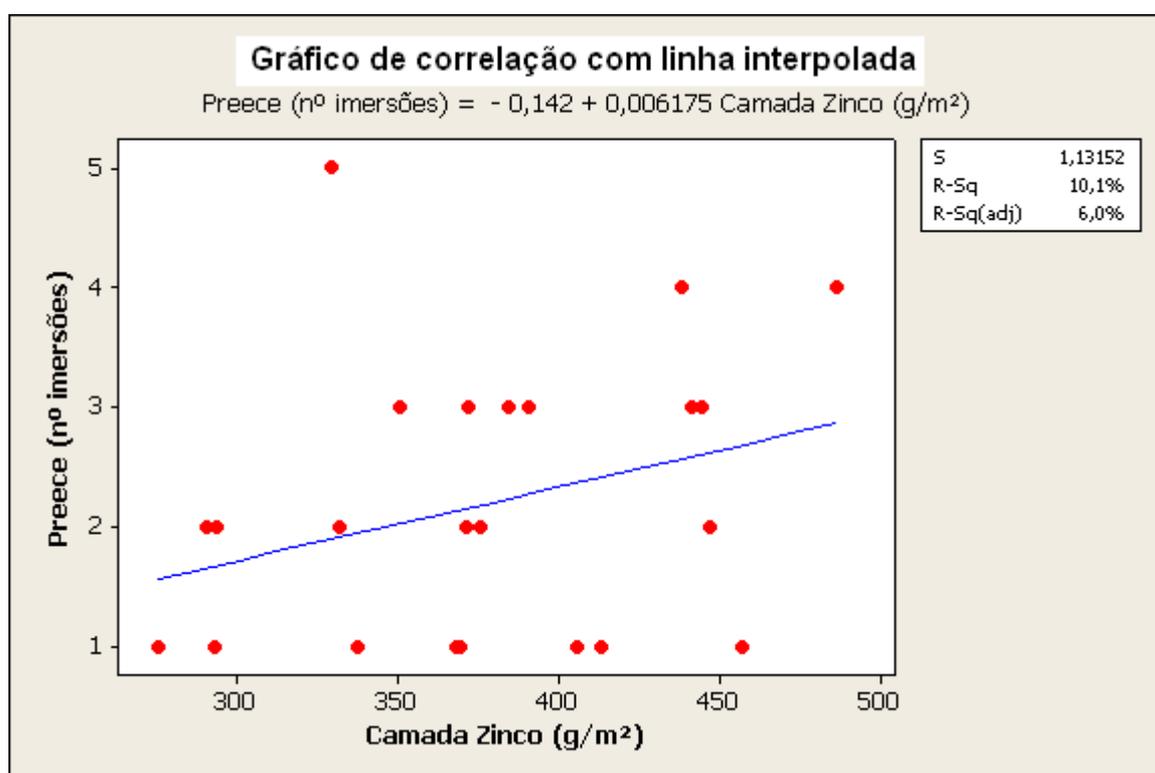


Figura 44 - Resultados de peso de camada e nº de imersões (ensaio Preece)

5.11 Ensaios em câmara úmida e em névoa salina

O ensaio por exposição em câmara úmida foi realizado durante 1.850 horas e não foi observada corrosão vermelha em nenhuma das amostras testadas, verificando-se apenas corrosão branca (do revestimento de zinco). As amostras ensaiadas foram as de nº 1 a 6, conforme identificação da Tabela 16. Para o ensaio por exposição à névoa salina foram selecionadas 4 amostras:

- As amostras de nº 1 e 2, conforme identificação da Tabela 16;
- As mesmas amostras, de nº 1 e 2, porém após submetê-las a ensaio em câmara úmida por 1.850 horas (amostras identificadas como 1U e 2U).

Os critérios para avaliação da corrosão no ensaio em névoa salina foram os da norma NBR 10443 [34]. Foram avaliados os aspectos e graus de corrosão do metal base e do revestimento, ao longo do tempo de exposição. Os resultados para o metal base e revestimento estão apresentados graficamente nas Figuras 45 e 46, respectivamente.

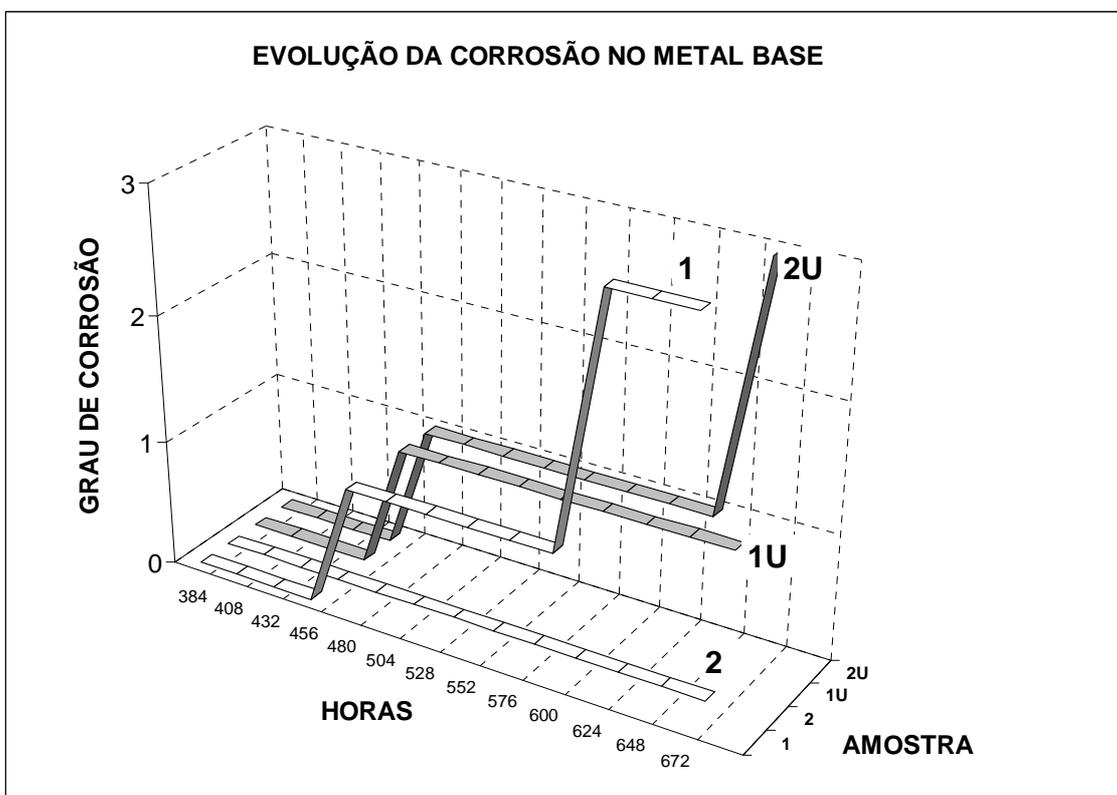


Figura 45 - Resultados do ensaio em névoa salina para o metal base

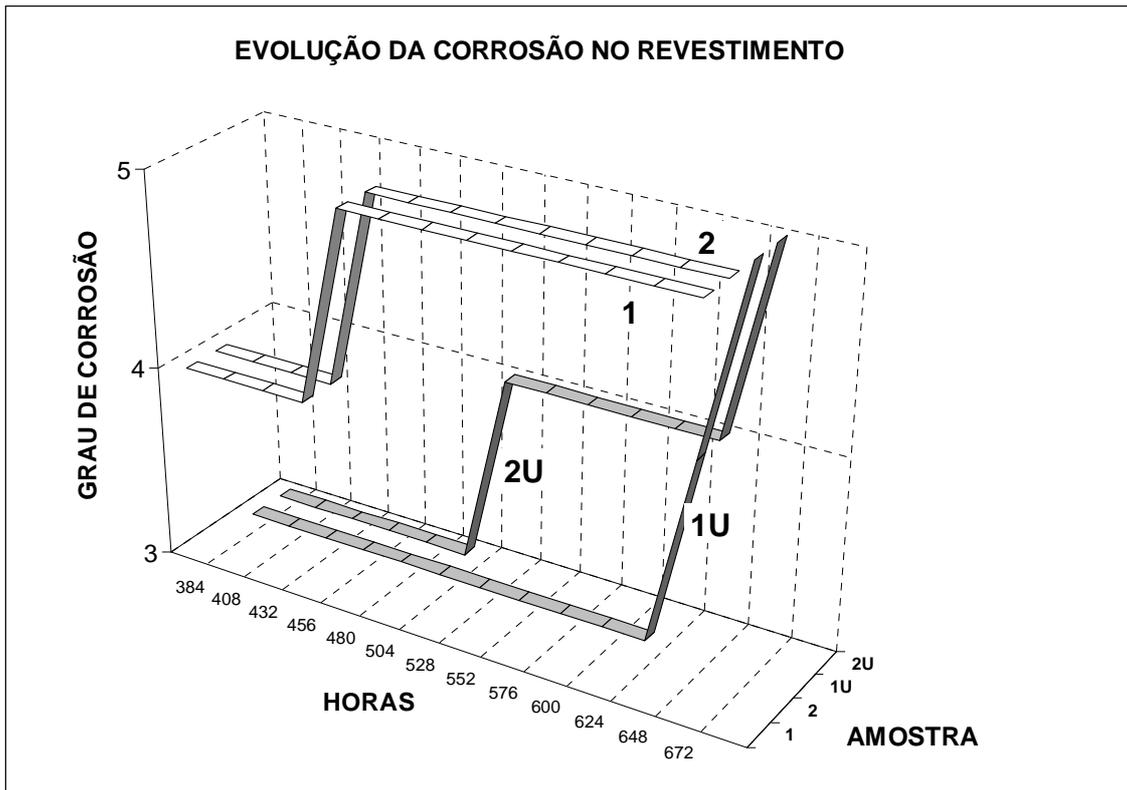


Figura 46 - Resultados do ensaio em névoa salina para o revestimento

A partir dos resultados, verifica-se que de uma forma geral a evolução da corrosão foi mais demorada para as amostras previamente submetidas ao ensaio de câmara úmida. Este fenômeno pode ser explicado devido ao fato dos produtos da corrosão em câmara úmida formarem uma camada protetora (passivação do material), o que retardou a evolução da corrosão em névoa salina.

Além disso, foi possível verificar que não houve evolução na corrosão do metal base para a amostra 2, cujo peso da camada é superior ao da amostra 1, conforme dados da Tabela 16.

Com relação à corrosão no revestimento, observou-se uma evolução mais rápida da corrosão na amostra 2U em relação à 1U. Uma possível explicação para este fenômeno deve-se ao fato do peso de camada da amostra 2U ser maior que o da amostra 1U, com tendência a ter pior aderência, estando portanto sujeita a trincas no revestimento, com exposição do substrato e conseqüentemente maior corrosão do revestimento.

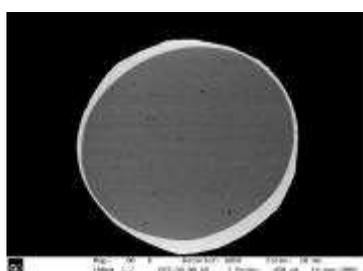
5.12 Avaliação em microscópio ótico

Para visualização das amostras de arame galvanizado em microscópio, foi utilizado ataque das amostras com solução de ácido nítrico (1 ml concentrado) e álcool amílico (99 ml), com tempo de ataque entre 10 a 20 segundos. [35]

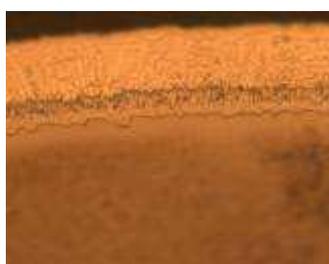
Através da análise em microscópio ótico foi possível uma pré-visualização das camadas do revestimento. A Figura 47 apresenta algumas imagens obtidas. Conforme pode ser evidenciado na Figura 47.a, constatou-se uma não uniformidade na espessura das camadas de galvanização ao longo da superfície do arame, em função da geometria ovalada da seção do arame.

Esta excentricidade foi verificada somente na camada *eta* e está associada ao fato da raspagem com nitrogênio ser realizada em bico com seção circular, para uma seção de arame ovalada. Assim, a superfície do arame mais próxima à superfície interna do bico de nitrogênio fica sujeita a maior raspagem, o que não ocorre com a superfície mais afastada, onde a raspagem é menor, e portanto há maior retenção de zinco.

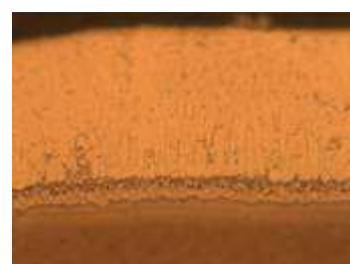
A uniformidade na espessura das camadas intermediárias (*zeta*, *delta* e *gama*) deve-se ao fato destas espessuras dependerem da reação entre ferro e zinco, não sendo afetadas pela excentricidade da raspagem.



a. Excentricidade
(aumento de 90 vezes)



b. Amostra 3
(aumento de 500 vezes)



c. Amostra 7
(aumento de 500 vezes)

Figura 47 - Imagens obtidas em microscópio ótico

5.13 Avaliação em MEV

Através do MEV foi possível identificar as camadas de galvanização (fases eta, zeta, delta e gama), bem como a composição química das mesmas. As Figuras 48 a 50 ilustram as imagens obtidas, enquanto nas Figuras 51 a 54 podem-se verificar os resultados das composições químicas das camadas de galvanização.

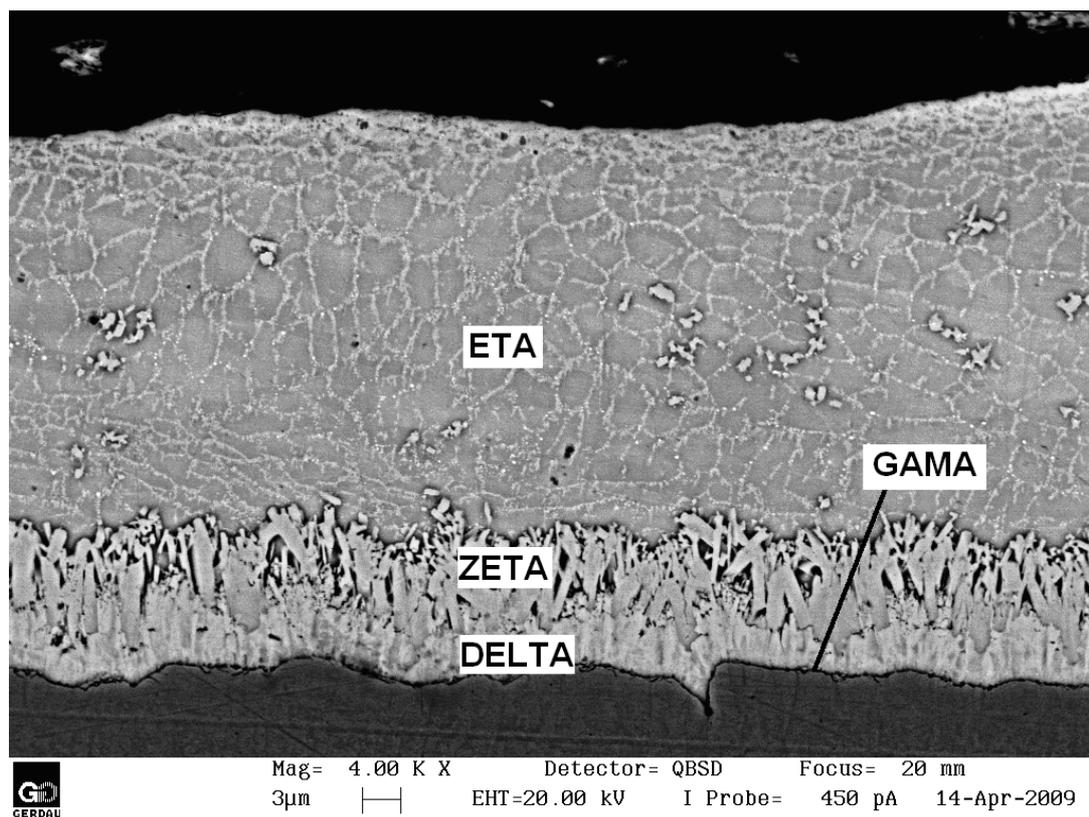


Figura 48 - Camadas de galvanização (amostra teste DOE – Gerdau Riograndense) – aumento de 4.000 vezes

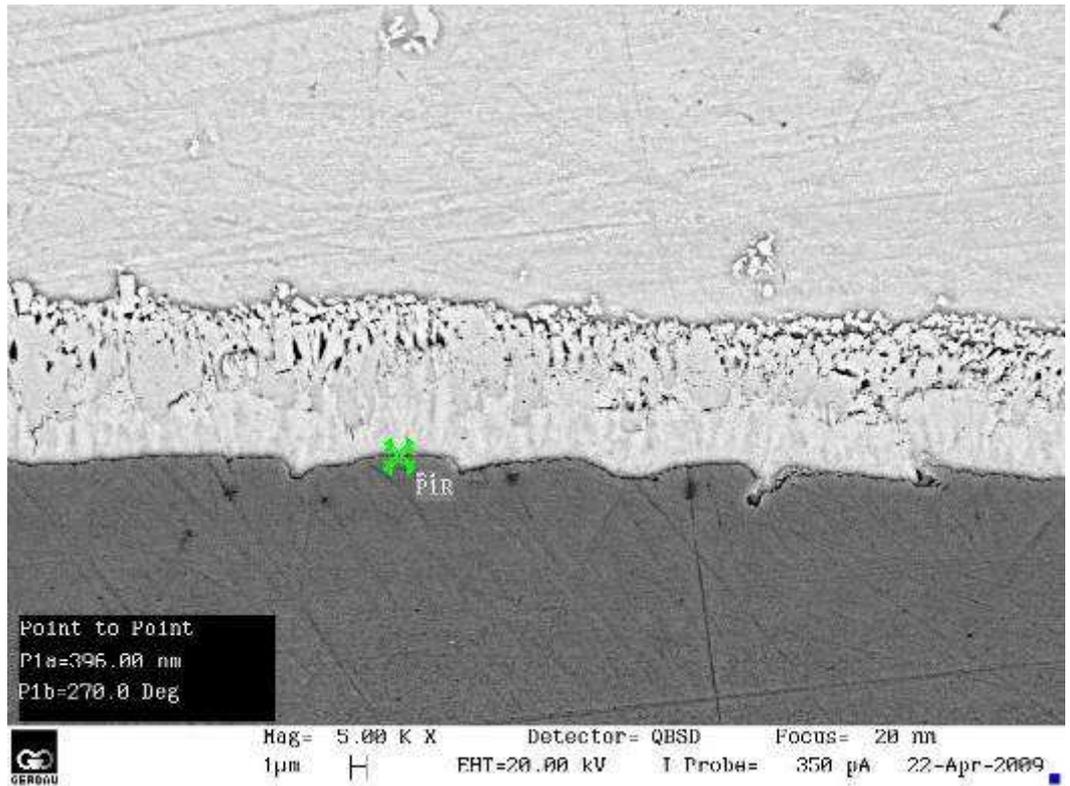


Figura 49 - Amostra 3 - aumento de 5.000 vezes

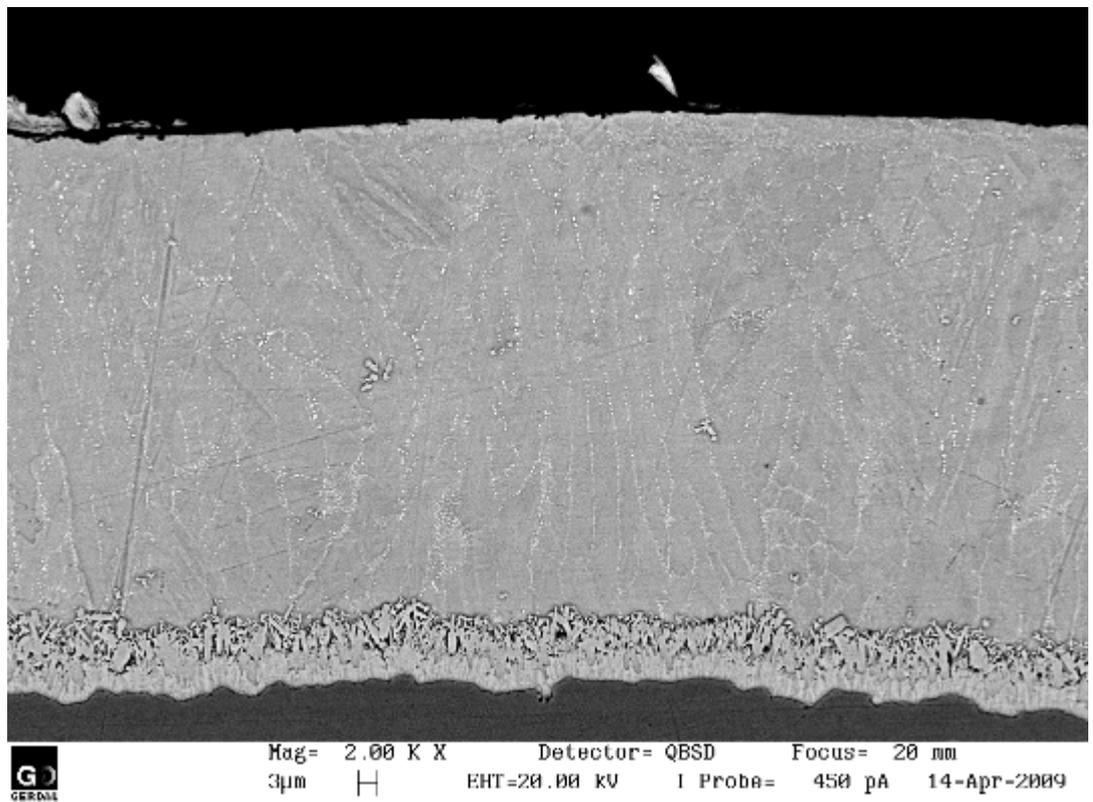
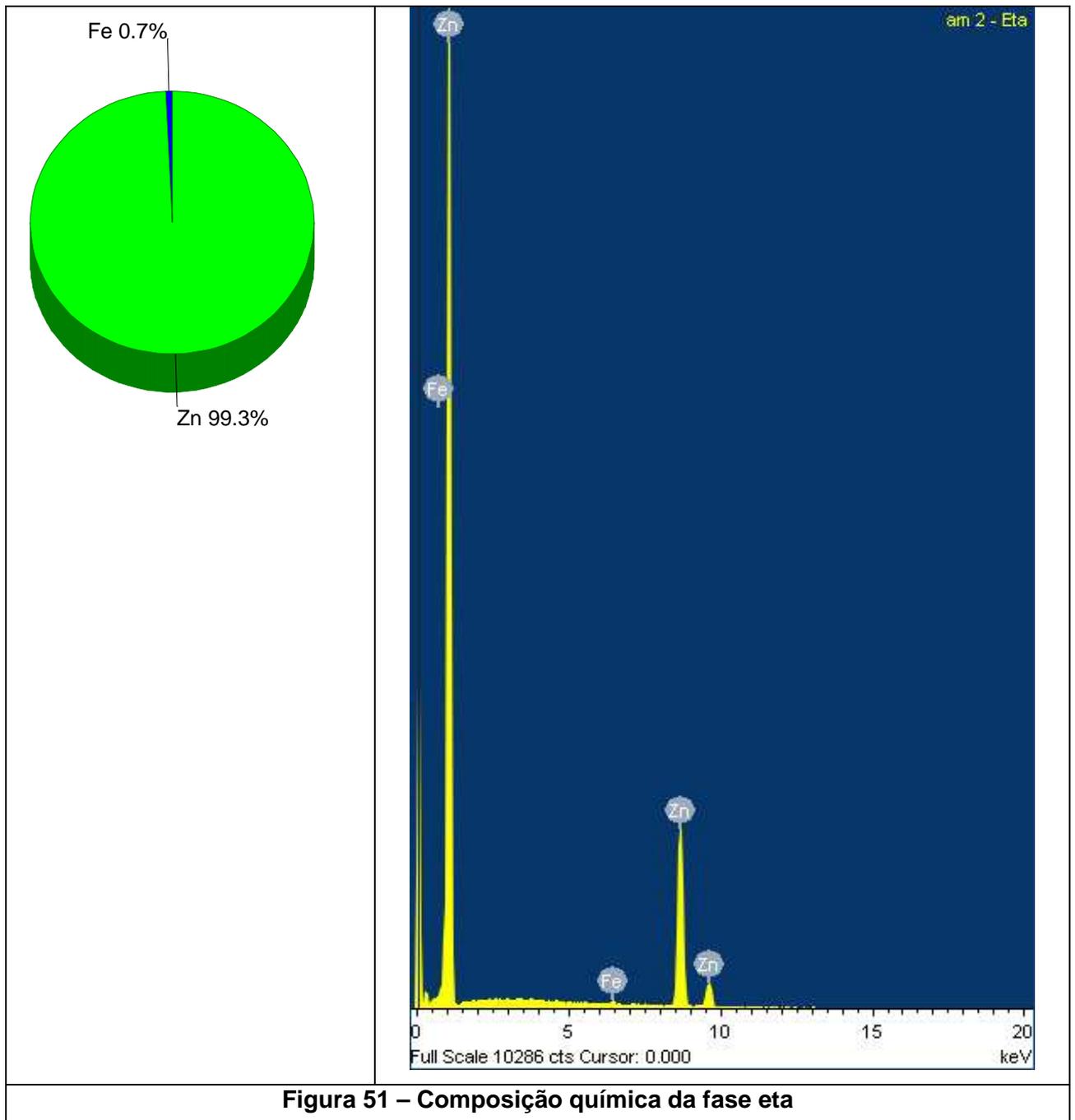


Figura 50 - Amostra 7 - aumento de 2.000 vezes

Na Figura 51 podem-se evidenciar os teores de ferro e zinco do material, respectivamente 0,7% e 99,3%, obtidos ao posicionar o cursor do MEV sobre a região da fase eta. O gráfico à direita mostra todos os elementos identificados no material nesta posição. Constatase teor de zinco bem próximo de 100%, conforme valor típico da fase eta.



Na Figura 52 podem-se evidenciar os teores de ferro e zinco do material, respectivamente 6,3% e 93,7%, obtidos ao posicionar o cursor do MEV sobre a região da fase zeta. O gráfico à direita mostra todos os elementos identificados no material nesta posição. Consta-se teor de zinco bem próximo a 94%, conforme valor típico da fase zeta.

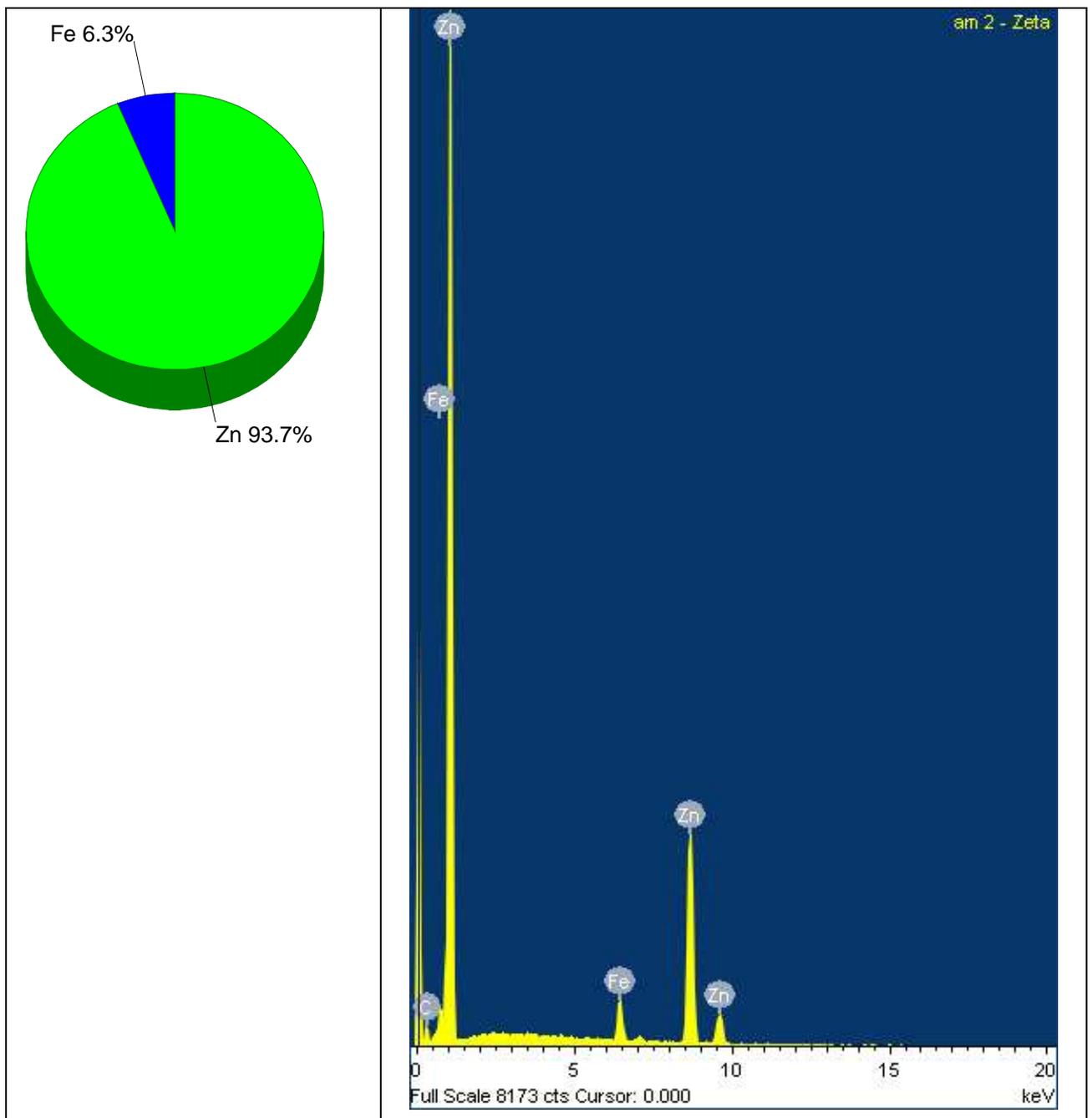


Figura 52 – Composição química da fase zeta

Na Figura 53 podem-se evidenciar os teores de ferro e zinco do material, respectivamente 15,6% e 84,4%, obtidos ao posicionar o cursor do MEV sobre a região da fase delta. O gráfico à direita mostra todos os elementos identificados no material nesta posição. Constatam-se teores de zinco e ferro próximos de 90% e 10%, respectivamente, conforme valores típicos da fase delta.

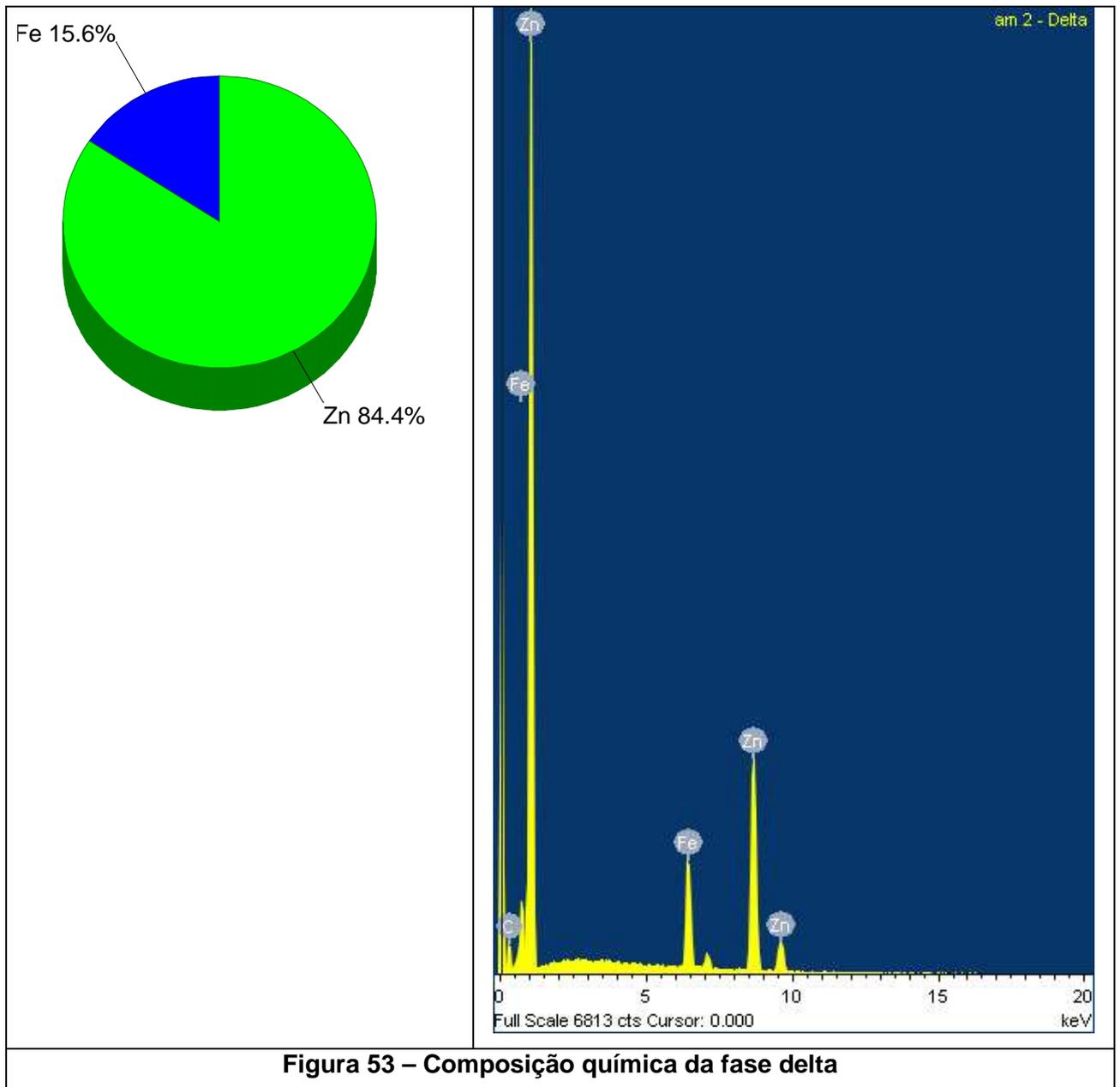
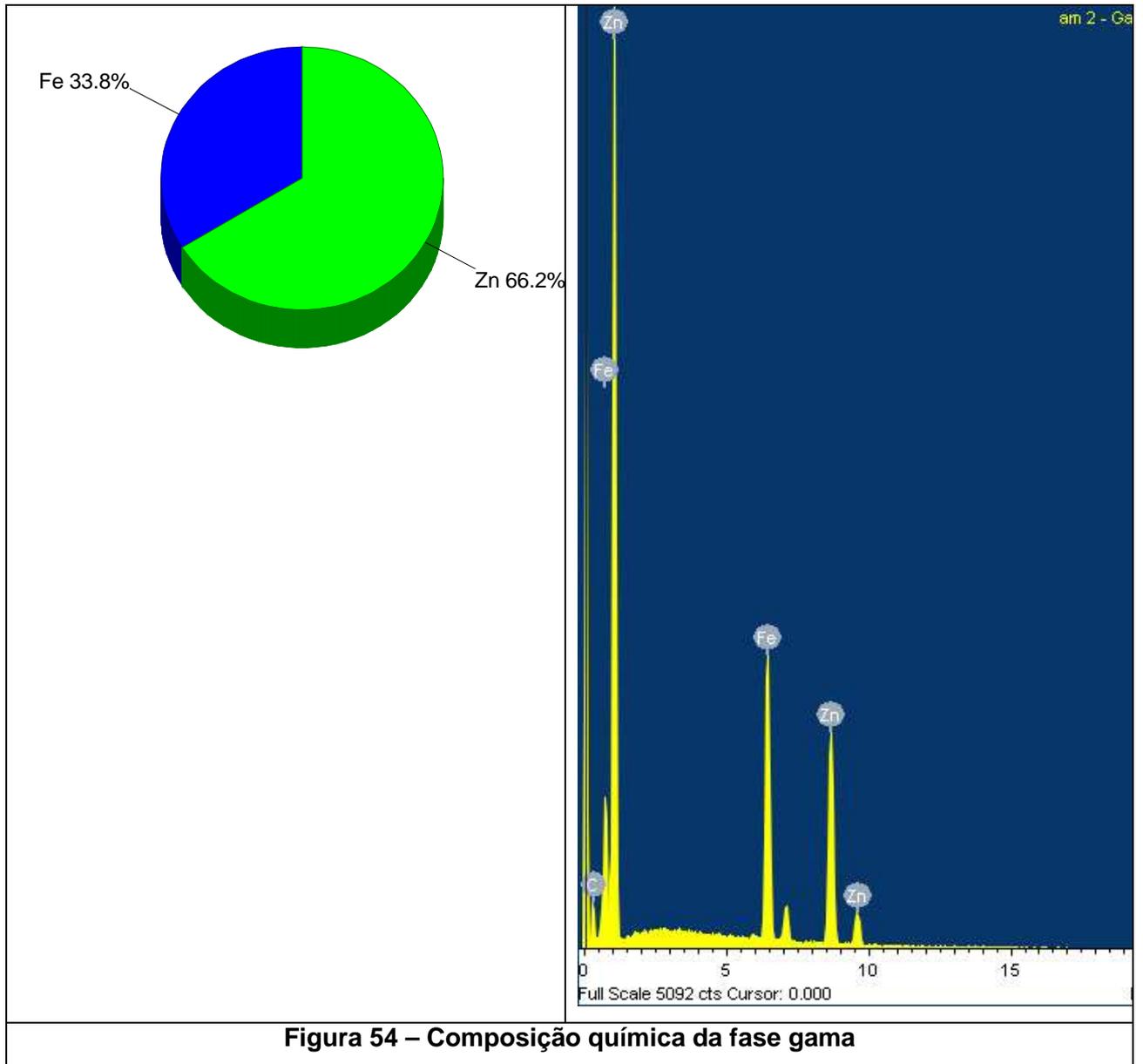


Figura 53 – Composição química da fase delta

Na Figura 54 podem-se evidenciar os teores de ferro e zinco do material, respectivamente 33,8% e 66,2%, obtidos ao posicionar o cursor do MEV sobre a região da fase gama. O gráfico à direita mostra todos os elementos identificados no material nesta posição.



Na Tabela 17 são apresentadas as dimensões das camadas *eta*, *zeta* e *delta*, conforme medições realizadas pelo MEV para algumas amostras selecionadas aleatoriamente dentre todas as amostras da Tabela 16. A camada *gama* foi desconsiderada neste estudo, em função de suas dimensões reduzidas, o que impossibilitou sua medição nas amostras visualizadas.

Tabela 17 - Espessuras das camadas *eta*, *zeta* e *delta* (medições realizadas através do MEV)

Amostra	Aderência	<i>eta</i> (µm)	<i>zeta</i> (µm)	<i>delta</i> (µm)	Relação $r = (z + d) / e$
2	RUIM	50	6	4	0,20
3	BOA	22	7	5	0,55
7	RUIM	81	8	3	0,14
8	RUIM	43	7	5	0,27
12	BOA	41	7	4	0,28
14	BOA	28	7	5	0,44
17	BOA	30	8	5	0,40
18	RUIM	57	5	3	0,15
22	RUIM	44	6	5	0,23
24	BOA	23	6	4	0,47

A partir dos dados da Tabela 17 é possível verificar graficamente os resultados de aderência em função das dimensões das camadas. O gráfico da Figura 55 ilustra a relação entre a aderência da camada galvanizada e a espessura da camada *eta* (µm). Observa-se um limite máximo próximo de 40 µm, acima do qual ocorre a transição da aderência de boa para ruim.

A mesma avaliação foi feita comparando-se os resultados de aderência em função das dimensões das camadas *zeta* e *delta*, porém não foi identificado neste estudo um valor limite destas dimensões correlacionado à transição entre aderência boa para ruim. Foi também avaliada a relação entre as dimensões das camadas, através da relação *r*, definida neste trabalho como:

$$r = (z+d) / e$$

onde: z = espessura da camada zeta (μm);
 d = espessura da camada delta (μm);
 e = espessura da camada eta (μm);

O gráfico da Figura 56 ilustra os resultados de aderência e relação r para todas as amostras visualizadas no MEV. Evidencia-se que para valores de r acima de aproximadamente 0,3 a aderência é boa, sendo ruim abaixo deste limite.

Dentre as amostras de camada pesada analisadas no MEV as que atendem a esta condição ($r > 0,3$) são as amostras 3, 12, 14, 17 e 24, que são as mesmas que atendem ao critério de dimensão da camada *eta* abaixo de $40\mu\text{m}$. Verificando-se na Tabela 16, constata-se que todas estas amostras foram produzidas a uma velocidade de 33 m.m^{-1} , para valores variáveis de vazão de nitrogênio e diâmetro dos bicos de nitrogênio. Isso confirma a recomendação apresentada no item 5.8, que indica ser 33 m.min^{-1} a velocidade mais adequada para o arame testado.

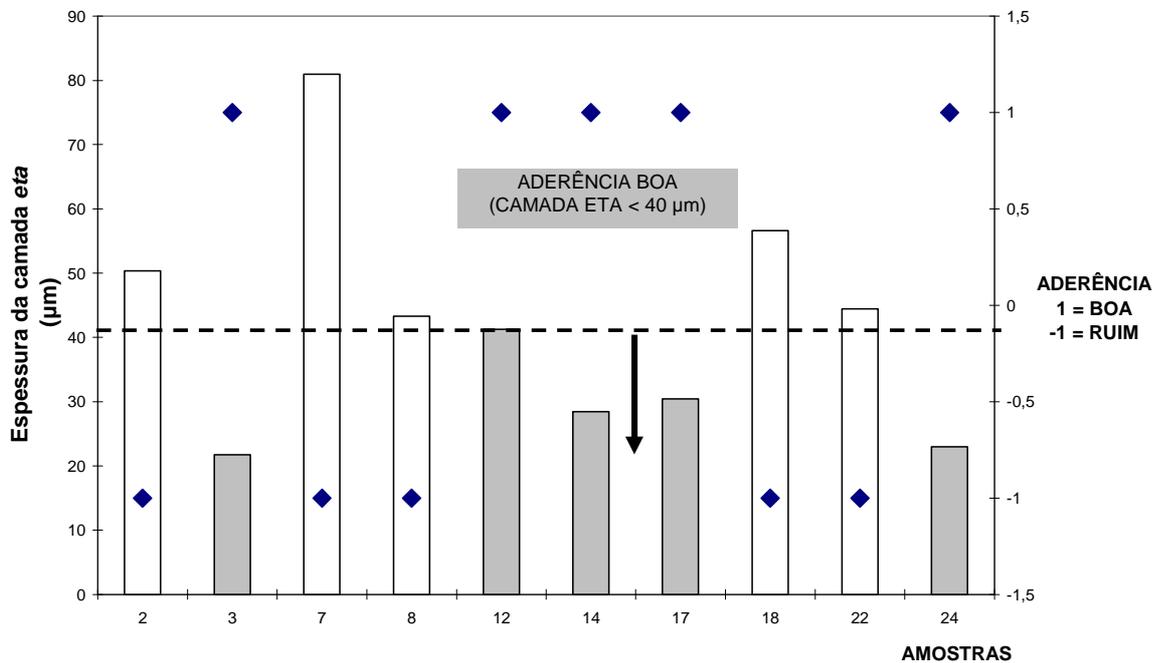


Figura 55 - Relação entre aderência e espessura da camada eta

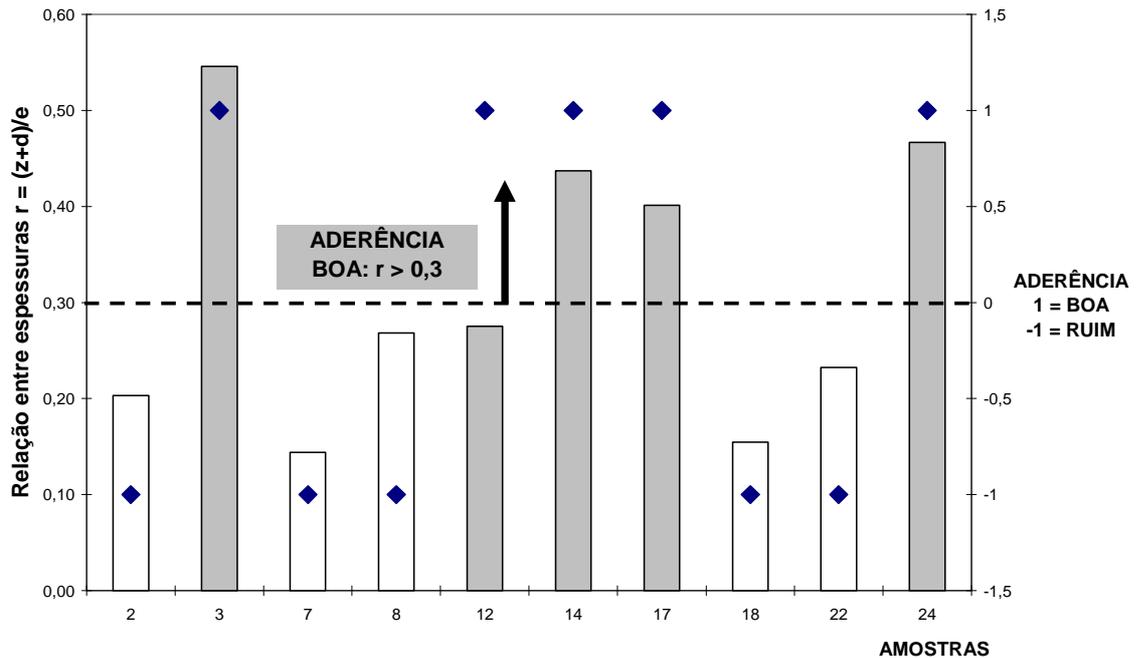


Figura 56 - Relação entre aderência e relação r

5.14 Espessuras das camadas em função dos parâmetros testados

Os gráficos das Figuras 57 a 60 ilustram os resultados das espessuras da camada eta e do parâmetro r em função da velocidade de galvanização, diâmetro do bico de nitrogênio e vazão de nitrogênio, dentro das faixas em que foram testados estes parâmetros.

Na Figura 57 verifica-se o comportamento da espessura da camada eta, em função do diâmetro do bico de nitrogênio e da velocidade de galvanização. Observa-se que a camada eta atinge sua espessura mínima para o mínimo diâmetro do bico de nitrogênio e mínima velocidade de galvanização. À medida que o diâmetro do bico de nitrogênio e a velocidade de galvanização aumentam, a espessura da camada eta também aumenta, atingindo um determinado patamar, a partir do qual se mantém no máximo.

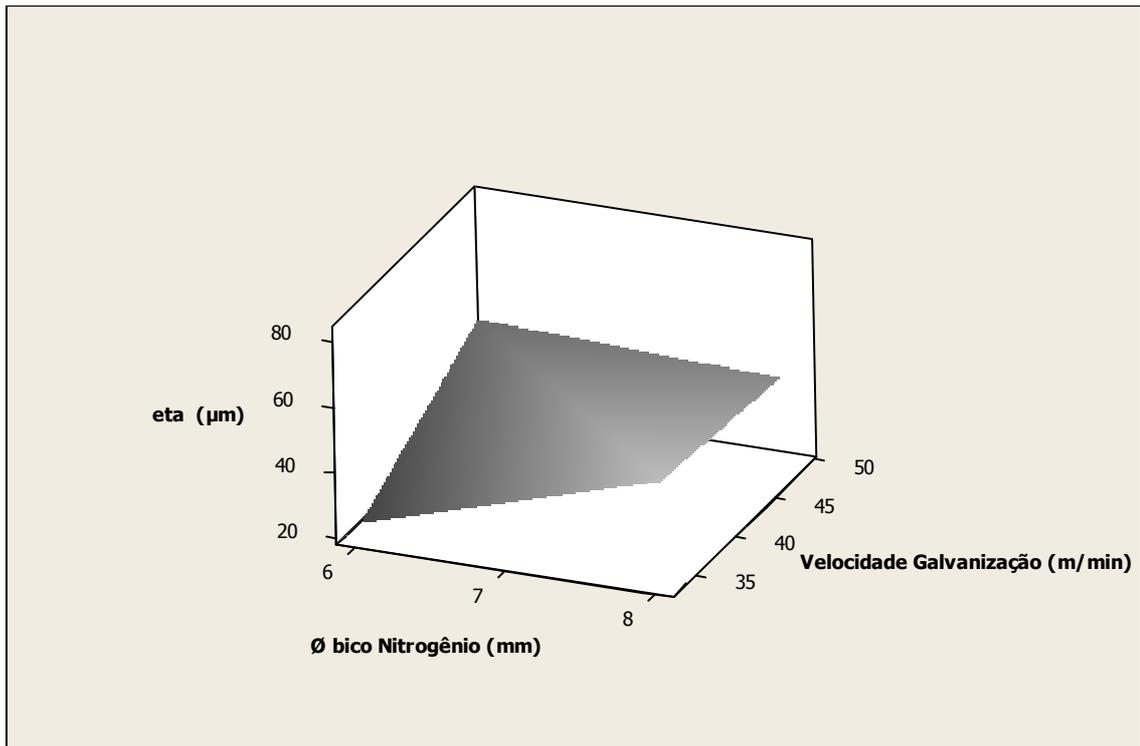


Figura 57 - Espessura da camada *eta* em função da velocidade de galvanização e do diâmetro do bico de nitrogênio

Na Figura 58 verifica-se o comportamento da espessura da camada *eta*, em função da vazão de nitrogênio e da velocidade de galvanização. Observa-se um comportamento similar ao anteriormente descrito, com a diferença de que a influência da vazão de nitrogênio é menor que a do bico de nitrogênio.

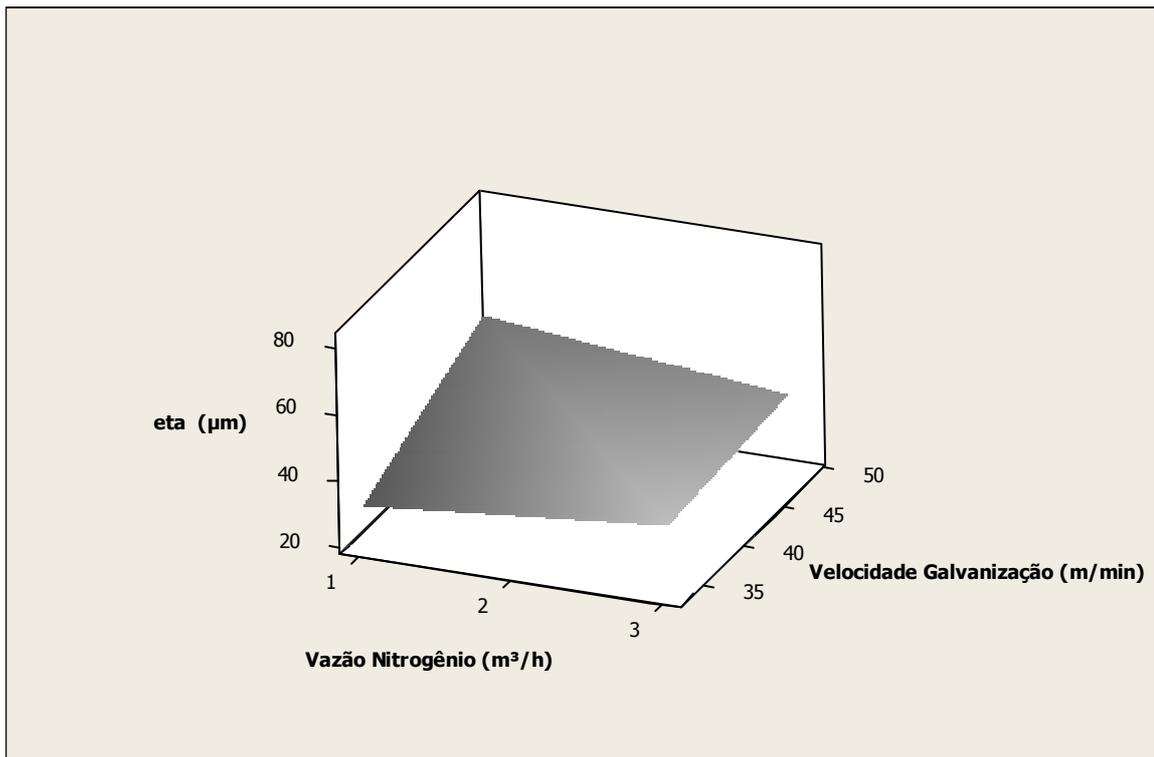


Figura 58 - Espessura da camada eta em função da velocidade de galvanização e da vazão de nitrogênio

Na Figura 59 verifica-se o comportamento do parâmetro r , em função do diâmetro do bico de nitrogênio e da velocidade de galvanização. Observa-se que o parâmetro r atinge seu valor máximo para o mínimo diâmetro do bico de nitrogênio e mínima velocidade de galvanização. À medida que o diâmetro do bico de nitrogênio e a velocidade de galvanização aumentam, o parâmetro r diminui, atingindo um determinado patamar, a partir do qual se mantém no mínimo.

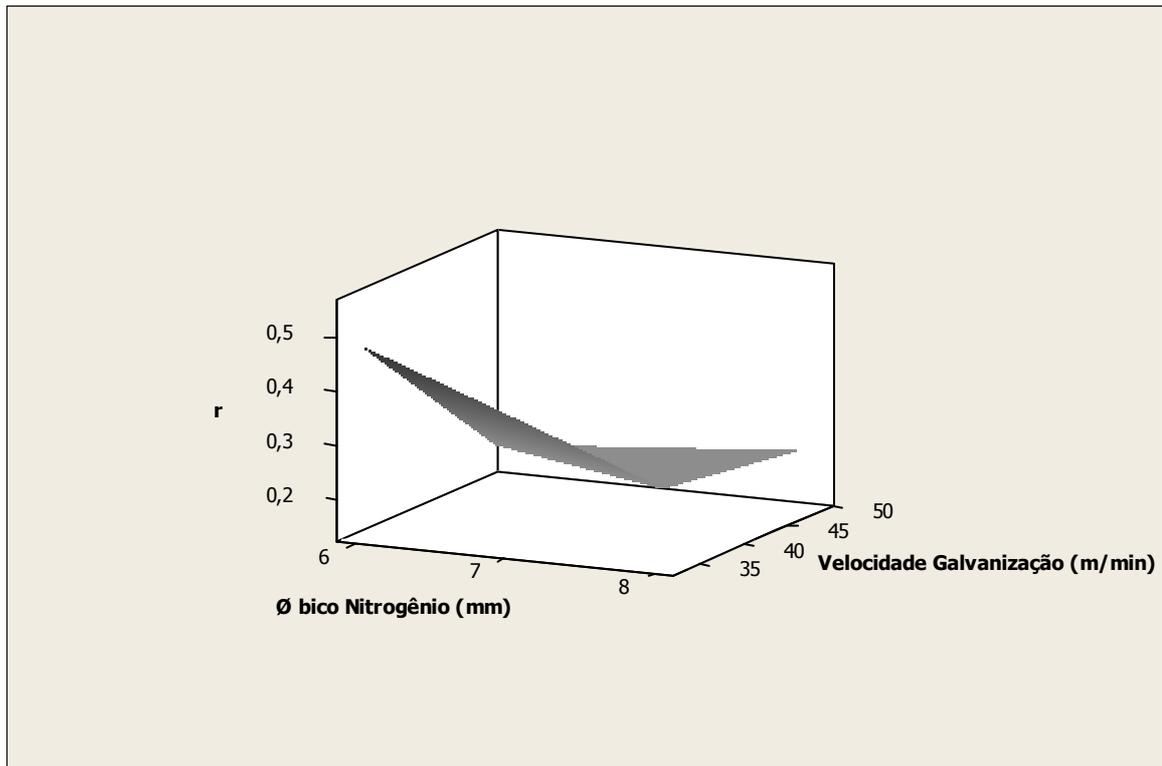


Figura 59 - Parâmetro r em função da velocidade de galvanização e do diâmetro do bico de nitrogênio

Na Figura 60 verifica-se o comportamento do parâmetro r, em função da vazão de nitrogênio e da velocidade de galvanização. Observa-se que o parâmetro r atinge seu valor máximo para a máxima vazão de nitrogênio e mínima velocidade de galvanização. À medida que a vazão de nitrogênio diminui e a velocidade de galvanização aumenta, o parâmetro r diminui.

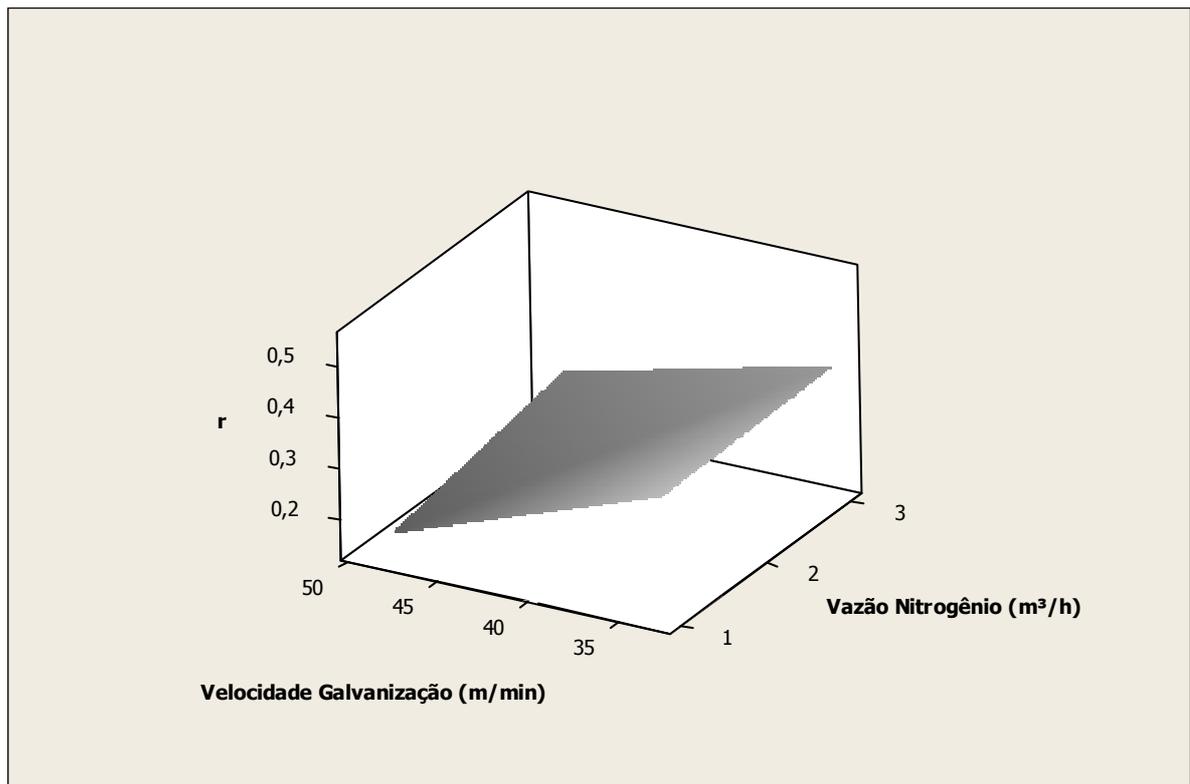


Figura 60 - Parâmetro r em função da velocidade de galvanização e da vazão de nitrogênio

5.15 Tempo de imersão em função da velocidade

A fim de estabelecer uma relação entre a velocidade do arame e o tempo de imersão, foram medidas as distâncias de imersão em meia cuba (*LMC*) e em cuba completa (*LCC*), conforme representados na Figura 61. Os valores verificados foram:

$$LMC = 6,90 \text{ m}$$

$$LCC = 9,0 \text{ m}$$

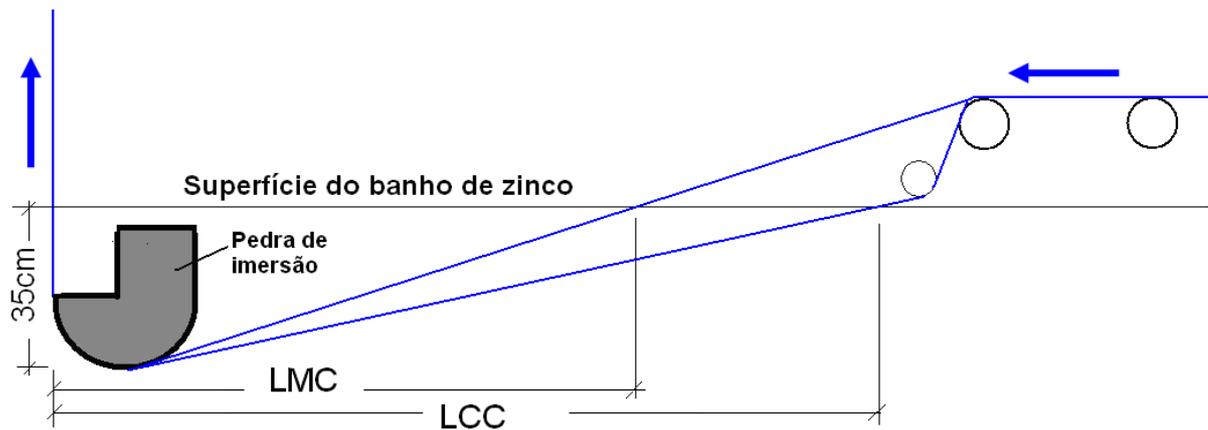


Figura 61 – Comprimentos de imersão em meia cuba e cuba completa

Assim, o tempo de imersão do experimento realizado pode ser calculado a partir da velocidade do arame, considerando-se a seguinte relação:

Para imersão em meia cuba:

$$\text{Comprimento imerso do arame} = [(0,35^2 + LMC^2)^{0,5}] + 0,35$$

$$\text{Comprimento imerso do arame} = 7,26 \text{ m}$$

$$\text{Tempo de imersão [min]} = 7,26 / \text{Velocidade de imersão [m/min]}$$

Para imersão em cuba completa:

$$\text{Comprimento imerso do arame} = [(0,35^2 + LCC^2)^{0,5}] + 0,35$$

$$\text{Comprimento imerso do arame} = 9,36 \text{ m}$$

$$\text{Tempo de imersão [min]} = 9,36 / \text{Velocidade de imersão [m/min]}$$

As relações acima permitem converter os dados de velocidade de imersão em tempo de imersão, parâmetro que permite comparar os resultados deste teste com o de outros testes, onde o comprimento de imersão ou as dimensões da cuba de galvanização forem diferentes.

5.16 Influência do resfriamento

Para uma avaliação simplificada do efeito do resfriamento com jatos d'água sobre a camada de galvanização, foram coletadas amostras de arame camada pesada com o sistema de jatos d'água desligado (resfriamento somente ao ar).

Com relação ao ensaio de enrolamento não houve variação relevante entre os resultados com ou sem resfriamento, sendo ambos aprovados.

Através de análise no MEV, constatou-se que a amostra sem resfriamento apresentou espessuras de camada de liga zeta e delta um pouco maiores em relação à amostra com resfriamento, conforme resultados da Tabela 18.

Tabela 18 – Espessuras da camada conforme resfriamento

Amostra	Camada zeta (µm)	Camada delta (µm)
Com resfriamento	6,4	4,3
Sem resfriamento	7,4	5,3

Isto está de acordo com o esperado, uma vez que na amostra sem resfriamento a reação entre ferro e zinco é mais prolongada, formando-se portanto mais liga Fe-Zn.

5.17 Amostras de arames de camada leve

Visando confirmar as condições de estabilidade da linha de galvanização durante o teste, foram também coletadas e avaliadas amostras de arames de camada leve como referência. Estes arames foram processados simultaneamente e na mesma cuba de zinco que os de camada pesada (fios processados em paralelo). O tipo de arame de camada leve foi do tipo ABNT 1045, ovalado, duro (sem recozimento) e produzido com imersão completa. A Tabela 19 apresenta os resultados verificados.

Tabela 19 – Resultados dos arames de camada leve

Identificação	Tipo	Bitola (mm)	Velocidade (m/min)	Peso da camada (g/m ²)	Preece (n° imersões)	Aderência
CL1	14x16	2,20 x 2,70	65	76	3	ok
CL2	15x17	2,40 x 3,00	62	77	2	ok
CL3	14x16	2,20 x 2,70	65	97	1	ok

O peso de camada verificado em todas as amostras de camada leve está de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 6331/82 [14], que são de 60 g/m² e 70 g/m² para os arames 14x16 e 15x17, respectivamente.

Verificando os demais resultados da Tabela 19, constata-se que os arames de camada leve utilizados como referência durante os testes estão plenamente dentro das especificações, o que confirma uma relativa estabilidade da linha e das demais condições e variáveis da linha de galvanização durante a realização dos testes nos arames de camada pesada.

6 CONCLUSÕES

Através deste trabalho foi possível aprofundar o conhecimento do processo de galvanização de arames de camada pesada, e testar a resposta do peso e aderência da camada de galvanização frente à variação dos fatores controláveis velocidade do arame, diâmetro do bico de nitrogênio e vazão de nitrogênio. Ao mesmo tempo, foi possível conhecer mais em detalhe das camadas de galvanização e a influência da dimensão das mesmas sobre a aderência do revestimento.

Analisando-se os resultados do experimento D.O.E. deste trabalho, verifica-se que todos os resultados de peso de camada obtidos atenderam ao limite mínimo estabelecido pela norma NBR 6331/1982 [14], que é de 210 g.m⁻², nas faixas de parâmetros testadas. Considerando-se o ajuste de parâmetros da linha de galvanização conforme ajuste otimizado sugerida no item 5.5 (velocidade de 33

m.min⁻¹, vazão de nitrogênio de 1 m³.h⁻¹ e diâmetro do bico de nitrogênio de 6 mm), a camada prevista é de 332 g.m⁻², o que também está acima do limite estabelecido pela norma.

Desta forma, pode-se concluir que o resultado do peso de camada conforme a norma NBR 6331/1982 [14] está assegurado em qualquer ajuste dentro dos limites de parâmetros testados, sendo os parâmetros indicados no item 3.5 (velocidade de 33 m.min⁻¹, vazão de nitrogênio de 1 m³.h⁻¹ e diâmetro do bico de nitrogênio de 6 mm) uma sugestão para otimização no consumo de zinco e conseqüentemente redução de custos.

Já para os resultados de aderência da camada, onde o grau de criticidade quanto à variação nos parâmetros da linha de galvanização é maior, deve-se ter especial atenção com as dimensões das camadas de galvanização, em especial à dimensão da camada *eta* e à relação entre as dimensões das camadas, que está estabelecida neste trabalho pela relação *r*. Verificando-se os parâmetros sugeridos no item 5.5 com os parâmetros associados às amostras com aderência boa, constata-se que dentre todos os parâmetros o mais importante é a velocidade e que se adotando os parâmetros sugeridos no item 5.5, a aderência também será boa.

Ainda quanto ao resultado de aderência boa associado à relação *r*, cabe ressaltar que o limite verificado para aderência boa ($r > 0,3$) considerou uma ampla faixa de pesos de camada, conforme evidenciado nos dados da Tabela 16. Em função disso, valores de *r* baixos significam camadas totais maiores, com conseqüentes problemas de aderência em função das tensões trativas entre as camadas. Ao mesmo tempo, camadas intermediárias (*zeta*, *delta*, *gama*) mais finas tendem a ser mais tensionadas e frágeis, o que também explica a piora na aderência com a diminuição de *r*.

Em função da geometria ovalada da seção do arame, com uma inerente e esperada excentricidade na camada de galvanização, a determinação das espessuras das camadas em microscópio (óptico e MEV) foi um pouco prejudicada. Esta excentricidade da camada para o arame ovalado é uma evidência importante,

pois sinaliza a possibilidade de problemas de exposição do substrato na região de maior raspagem, com evolução da corrosão.

Os resultados dos ensaios de corrosão evidenciaram o esperado, de que a evolução da corrosão é menor quando o peso de camada é maior. Outro comportamento importante observado foi o retardo da corrosão do arame em atmosfera salina, quando submetido previamente ao ensaio em câmara úmida, o que evidencia que os produtos da corrosão em câmara úmida (corrosão branca) funcionam como uma barreira que protege contra o avanço da corrosão vermelha (do metal base).

A visualização e maior entendimento das camadas de galvanização, associando-as aos parâmetros da linha de galvanização e aos resultados dos ensaios de corrosão são fundamentais para o avanço na estabilização do processo de arames de camada pesada na Gerdau Riograndense. Este e outros testes D.O.E. são a base para o estabelecimento das especificações de processo, com definição dos parâmetros operacionais padronizados para todos os arames de camada pesada produzidos pela Gerdau.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Realização de outros experimentos D.O.E. similares para arames de camada pesada de seção circular, variando-se diâmetro do arame e outros parâmetros de processo, como temperatura, por exemplo.

Aprofundar estudo dos efeitos do resfriamento após o banho de zinco sobre as camadas de galvanização;

Avançar na padronização dos parâmetros ótimos para cada tipo de arame de camada pesada.

8 REFERÊNCIAS

- 1 GRACIA Jr., Loreno e Mallet, Ana. **Curso de Galvanização do Grupo Gerdau**, 1985, 1989, 1993.
- 2 SCATOLIN, Francieli. **Estudo dos parâmetros operacionais de cromatização de arames galvanizados. Trabalho de diplomação do curso de Engenharia de Materiais - UFRGS**, 2005.
- 3 ZEMPULSKI, Ladislau Nelson; ZEMPULSKI, Marina Fernanda Stocco. **Galvanização eletrolítica. Dossiê Técnico, Instituto de Tecnologia do Paraná, Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas – SBRT**. Disponível em: < <http://sbrtv1.ibict.br/upload/dossies>> Acesso em 24.07.2009.
- 4 ARAÚJO, Luiz Antonio de. **Manual de Siderurgia**, v.2, cap. XIII, p. 345- 351, 1997. Editora Arte e ciência.
- 5 PANNONI, Fabio Domingos. **Princípios da galvanização a fogo**. CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço. Disponível em: < http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/noticia_listar_artigos.asp >. Acesso em 21 mar 2009.
- 6 PORTAL DA GALVANIZAÇÃO; **Aspectos importantes na Galvanização a Fogo**. Disponível em: <http://www.portaldagalvanizacao.com.br/galvanizacao_fluxograma.asp> Acesso em: 28 jul.2009.
- 7 CABRAL, Eva Raimann; MANNHEIMER, Walter Arno. **Galvanização: Sua aplicação em equipamento elétrico: princípios e processos, normalização e controle de qualidade, aplicação e situação no Brasil / CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**, p.57 a 76, p. 120 a 121, 1979
- 8 A.R.MARDER, **The metallurgy of zinc-coated steel, Progress in Materials Science**, p.193 – 213, 2000. Progress in Materials Science 45 (2000) 191-271. Disponível em: < www.sciencedirect.com > Acesso em: 06 set.2008.

- 9 **NBR 7013 – Chapas e bobinas de aço revestidas pelo processo contínuo de imersão a quente - Requisitos gerais.** Jul 2003
- 10 **AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Products, 2000.** Disponível em: <http://www.galvanizeit.org/images/uploads/publicationPDFs/SP_COOR_00.pdf> Acesso em: 12 mai.2009.
- 11 **ASTM A123 - Standard specification for zinc (hot-dip galvanized) coatings on iron and steel products.** 2009
- 12 **AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Zinc Coatings,** 2006. Disponível em:<http://www.galvanizeit.org/images/uploads/publicationPDFs/Zinc_Coatings.pdf>Acesso em: 12 mai.2009.
- 13 **ABNT NBR 6323 — Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido – Especificação.** Nov 2007
- 14 **NBR 6331. Arame de aço de baixo teor de carbono, zincado, para uso geral.** Jul 1982.
- 15 **NBR 7397 - Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente – Determinação da massa do revestimento por unidade de área – Método de ensaio.** Segunda edição 21.05.2007
- 16 **NBR 6207 - Arame de aço - Ensaio de tração.** Out 1982
- 17 **NBR 7398 - Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Verificação da aderência do revestimento - Método de ensaio.** Set 2009
- 18 **ASTM A386 - Withdrawn 1984: Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Assembled Steel Products**

- 19 METÁLICA. **O que é Galvanização a fogo (zincagem por imersão a quente).** Disponível em: <<http://www.estruturametlica.com.br/>>/Artigos técnicos. Acesso em: 20 mai.2009.
- 20 AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. **Different Appearances.** Disponível em:<<http://www.galvanizeit.org/aga/inspection-course/types-of-inspection/finish-appearance/different-appearances/>> Acesso em: 20 mai.2009.
- 21 PORTER, Frank, International Lead Zinc Research Organization. **Zinc handbook: properties, processing, and use in design**, cap. 10, p.218-221, 1991.
- 22 NBR 5996 – **Zinco Primário**. Ago 1984
- 23 NASR, Jalel Ben; SNOUSSI, Ali; BRADAI, Chedly; HALOUANI, Foued; **Optimization of hot-dip galvanizing process of reactive steels: Minimizing zinc consumption without alloy additions.** Materials Letters 62 (2008) 3328-3330. Disponível em: < www.sciencedirect.com > Acesso em: 06 set.2008.
- 24 SHIBLI, S.M.A; MANU, R.; BEEGUM, Semina. **Studies on the influence of metal oxides on the galvanic characteristics of hot-dip zinc coating.** Surface and Coatings Technology 202 (2008) 1733-1737. Disponível em: < www.sciencedirect.com > Acesso em: 06 set.2008.
- 25 ABREU, Y. de; SILVA, A. da; **Study of zinc coatings on steel substrate attained by two different techniques.** Surface and Coatings Technology 120-121 (1999) 682-686. Disponível em: < www.sciencedirect.com > Acesso em: 06 set.2008.
- 26 FIB LE FOUR INDUSTRIEL BELGE sa-nv, **The Dynamic wiping: A solution to the rationalization of Zinc consumption in vertical galvanizing.** FIB NEWS N°7, 2003.
- 27 FIB LE FOUR INDUSTRIEL BELGE sa-nv, **Dynamic Wiping; Service Manual for Annealing & Galvanizing Line**, Gerdau Açominas S.A, 2002.

- 28 NBR 6756 - **Fios de aço zincados para alma de cabos de alumínio e alumínio-liga – Especificação.** Jul 2007
- 29 NBR 8095 – **Material metálico revestido e não-revestido - Corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada.** Jul 1983
- 30 NBR 8094 - **Material metálico revestido e não-revestido - Corrosão por exposição à névoa salina.** Jul 1983
- 31 ASTM B117 - **Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.** ASTM International (2009).
- 32 NBR NM 87 - **Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química.** Out 2000.
- 33 NBR 5589 - **Arames de aço de baixo teor de carbono. Diâmetros, tolerâncias e pesos.** Mar 1982.
- 34 NBR 10443 - **Tintas e vernizes - Determinação da espessura da película seca sobre superfícies rugosas - Método de ensaio.** Nov 2008
- 35 ASM Handbook, Volume 9, **Metallography and Microstructures**, p. 600, 602, 933, 939, Ohio, U.S.A., Dec 2004

9 RECONHECIMENTOS

Partes da entrada e saída de dados contidas nesta publicação foram impressas com permissão da Minitab Inc. Todo material é de propriedade e direitos autorais exclusivos da Minitab Inc. Todos os direitos reservados.