

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Departamento de Metalurgia

DESENVOLVIMENTO DE PARÂMETROS DE PROCESSO PARA ARAME  
GALVANIZADO CAMADA PESADA UTILIZANDO A FERRAMENTA DOE (DESIGN  
OF EXPERIMENTS)

**João Vitor Moka**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre  
2007

Dedico este trabalho de diplomação à minha família e em memória de meus pais.

### **AGRADECIMENTOS**

A minha família, em especial ao meu irmão Marcelo Carlos Mogan que me incentivou a conquistar uma vaga nesta Universidade e acompanhou meus primeiros passos durante o início da vida acadêmica.

Aos meus pais que formaram a base de minha educação e caráter, e que de certa forma ainda estão presentes em minha vida.

Aos meus professores pelo papel de educadores proporcionando uma elevada qualidade de ensino na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aos colegas da Gerdau Riograndense pelo auxílio na elaboração do trabalho e na realização dos procedimentos experimentais.

A todos que contribuíram para este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Metalúrgica.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	III
SUMÁRIO .....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	X
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. DOE – Design Of Experiments .....	3
2.1.1. Modelo Fatorial 2 <sup>K</sup> .....	6
2.2. Galvanização.....	6
2.2.1. Vida Útil da Camada de Zinco .....	7
2.2.2. Comparação entre processo de revestimento de zinco.....	9
2.2.3. Galvanização a Fogo – Camada pesada .....	11
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	25
3.1. Material.....	25
3.2. Etapas para realização do Design of Experiments (DOE).....	26
3.3. Ensaio Realizados.....	26
3.3.1. Ensaio de Tração.....	27
3.3.2. Medida de camada .....	27
3.3.3. Ensaio de pino.....	28
3.3.4. Ensaio de Preece .....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	30
5. CONCLUSÕES .....	46
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráfico mostrando a relação entre espessura ( $\mu\text{m}$ ) e peso ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) de Camada de Zinco em relação à durabilidade (anos) em diferentes atmosferas. (MET@LLICA 2007).....	8
Figura 2.2	Micrografia de uma camada galvanizada mostrando as diferentes fases intermetálicas do Fe-Zn (PENHA 2004).....	12
Figura 2.3	Diagrama de fases “concentração x temperatura” para o sistema Fe-Zn. (PENHA 2004). .....	14
Figura 2.4	Imagem mostrando dispositivo responsável pela raspagem da camada de zinco através da vazão de nitrogênio.....	18
Figura 2.5	Imagem mostrando suporte para bicos de nitrogênio utilizados no sistema dinamic wiping. ....	19
Figura 2.6	Imagem mostrando conjunto de bicos de nitrogênio utilizados para produção de arame camada pesada.....	19
Figura 2.7	Fluxograma mostrando as etapas do processo de galvanização a fogo. ....	21
Figura 3.1	Imagem mostrando um esquema do equipamento utilizado para a realização de ensaio de medida de Camada de Zinco ( $\text{g}/\text{m}^2$ ). .....	27
Figura 3.2	Imagem mostrando ensaio de pino para verificar a aderência da camada de zinco depositada sobre o arame de aço, pelo processo de galvanização a fogo.	28
Figura 4.1	Tabela apresentando a ordem e nomenclatura das amostras retiradas para execução do DOE e os resultados das variáveis resposta após realizados os ensaios em laboratório.....	31
Figura 4.2	Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Camada de Zinco. ....	32

Figura 4.3	Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Força.....	32
Figura 4.4	Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Aderência.....	33
Figura 4.5	Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Ensaio de Preece. ....	33
Figura 4.6	Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Camada de Zinco. ....	34
Figura 4.7	Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Força.....	35
Figura 4.8	Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Aderência.....	35
Figura 4.9	Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Ensaio de Preece. ....	36
Figura 4.10	Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Camada de Zinco. ....	37
Figura 4.11	Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Força. ....	37
Figura 4.12	Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Aderência. ....	38
Figura 4.13	Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Ensaio de Preece.....	38
Figura 4.14	Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Camada de Zinco. O fator controlável descrito é variado entre seu	

	nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.....	39
Figura 4.15	Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Força. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.....	40
Figura 4.16	Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Aderência. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.....	40
Figura 4.17	Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Ensaio de preece. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.....	41
Figura 4.18	Janela de trabalho para a variável resposta Camada de Zinco gerada pelo desenho de projeto. ....	42
Figura 4.19	Janela de trabalho para a variável resposta Força gerada pelo desenho de projeto.....	43
Figura 4.20	Janela de trabalho para a variável resposta Aderência gerada pelo desenho de projeto.....	43
Figura 4.21	Janela de trabalho para a variável resposta Ensaio de Preece gerada pelo desenho de projeto. ....	44
Figura 4.22	Tabela dinâmica responsável por ilustrar o efeito de cada fator controlável nas variáveis resposta. Ao alterar os valores listados em vermelho, seu efeito é	

visualizado nos gráficos com as retas que o representam e quantificados pelos  
números em azul. .... 45



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1	Valores experimentais de R para diferentes meios. ....	8
Tabela 2.2	Espessuras típicas por classificação de camada.....	15
Tabela 2.3	Tabela mostrando os possíveis métodos de retirada de arame após a imersão na cuba de zinco. ....	17
Tabela 3.1	Composição química do aço ABNT 1065 (% em peso) .....	25
Tabela 3.2	Características especificadas para o produto camada pesada.....	25
Tabela 4.1	Fatores controláveis utilizados para realização do DOE.....	30
Tabela 4.2	Variáveis resposta utilizadas para avaliar os fatores controláveis e caracterizar as especificações do produto. ....	30
Tabela 4.3	Parâmetros de processo utilizados para produção de arame galvanizado camada pesada. ....	44
Tabela 4.4	Variáveis Resultado obtidas pelo emprego dos fatores controláveis (Tabela 4.3). .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DOE.....	Design Of Experiments
K.....	Fatores controláveis
t.....	Vida em serviço
R.....	Resistência à corrosão específica do meio
e.....	Espessura da camada
N <sub>2</sub> .....	Gás nitrogênio
Fe.....	ferro base
FeO .....	óxido de ferro no estado menos oxidado
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	óxido de ferro no estado intermediário de oxidação
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	óxido de ferro no estado mais oxidado
FeZn .....	liga ferro zinco
ZnCl <sub>2</sub> .....	Cloreto de zinco
NH <sub>4</sub> Cl.....	Cloreto de amônia
C.....	Carbon
o	
Si .....	Silício
Mn .....	Manganês
P .....	Fósforo
Cr.....	Cromo
Ni .....	Níquel
Mo.....	Molibdênio
Cu.....	Cobre

As.....Antimônio

Sn .....Estanho

ABNT.....Associação Brasileira de Normas Técnicas

## RESUMO

No presente trabalho desenvolveu-se parâmetros adequados para a produção de arame galvanizado denominado camada pesada, produzido através do processo de galvanização a quente. Foram analisadas as condições físicas do equipamento para a obtenção de um produto com especificações técnicas pré-estabelecidas. Para tanto foi utilizado a ferramenta denominada DOE (Design of Experiments), baseada em conceitos estatísticos visando à otimização do tempo de realização dos experimentos e a diminuição do custo para realização do procedimento experimental. Estudaram-se parâmetros de velocidade, vazão de nitrogênio e diâmetro de bico de nitrogênio, para obter um produto com elevada resistência à corrosão proporcionada por uma espessa camada de zinco homogeneamente distribuída ao longo da superfície do arame trefilado.

**ABSTRACT**

In this work evaluate the processing parameters to produce galvanized wires with “thick layer” by Hot Dip Galvanized. The mechanical conditions of the equipment were analyzed to asses the technical specifications of the product. During this study DOE Tools (Design of Experiments Tool) were used to minimize the time spend during the experimental procedure and to decrease economical costs. Processing parameters such as line speed, nitrogen flown and diameter of the nitrogen knife were studied to obtain a material with higher corrosion resistance with a homogeneous heavy zinc layer distribute along the wire surface.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais as indústrias necessitam desenvolver e adaptar seus produtos para atender o mercado consumidor com um dinamismo cada vez maior. Para atender esta necessidade foram desenvolvidas inúmeras ferramentas baseadas em metodologias de trabalho específicas e em conhecimento estatístico. O DOE (Design Of Experiments) é uma dessas tecnologias que se baseia em significância estatística, correlação e regressão buscando a melhoria ou desenvolvimento de um produto ou processo. A utilização de um DOE permite economia de tempo proporcionada pela diminuição do número de experimentos realizados para verificar os resultados objetivados, e assim reduzir de custos.

A diminuição do número de ensaios é necessária porque evita a perda de utilização do parque de máquinas não atrasando a fabricação dos produtos que devem chegar ao mercado consumidor. Essa metodologia permite uma redução na perda econômica gerada para o desenvolvimento ou melhoria que será desenvolvida.

Fazendo-se mão deste recurso, desenvolveu-se a produção de arame galvanizado denominado de camada pesada (devido à quantidade de zinco agregada como revestimento protetor para evitar a corrosão do aço), nas instalações industriais de uma planta de galvanização a quente. Primeiramente, foram verificadas quais eram as características dos produtos desejados pelo cliente, para então realizar o planejamento de um experimento adequado atendendo as expectativas. Nesta fase são analisados os fatores controláveis e os não controláveis (intrínsecos ao processo), para definir qual é o melhor modelo de experimento necessário bem como o número de replicações para obter um resultado confiável. A partir deste desenho de experimentos foram executados os ensaios e interpretados os resultados obtidos, considerando os dados estatísticos aliados aos dados práticos, para então realizar a

produção em escala do produto, garantindo seu desenvolvimento no menor tempo e com o menor custo possível.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DOE – Design Of Experiments

A metodologia conhecida como Design Of Experiments, em português, Projeto de Experimentos utiliza como princípios fundamentais a aleatorização, a repetição e organização para reduzir o erro. Foi introduzida por Fischer por volta de 1920 e inicialmente aplicada a experimentos de agricultura (HARLOW, BRDLEZ 2001). Posteriormente, essa metodologia difundiu-se rapidamente em campos como agronomia, biologia, engenharia química e engenharia industrial. Atualmente, o DOE é utilizado em todas as áreas do conhecimento, mesmo que virtualmente.

O DOE usa intensivamente as técnicas de significância estatística, correlação e regressão, para ajudar a entender o comportamento de um produto ou processo exposto a várias condições. O que existe de exclusivo no DOE é a oportunidade que ele proporciona para controlar e planejar as variáveis usando uma experiência, ao contrário da simples observação e acumulação de eventos do mundo real na forma conhecida como “observação empírica”.

DOE pode proporcionar:

- Avaliação de sistemas de Voz de Cliente, para encontrar a melhor combinação de métodos que produzem feedback válido sem aborrecer os clientes.
- Avaliação de fatores para identificar a causa-raiz de um problema ou defeito.
- Condução ou teste de combinações de soluções possíveis para encontrar a estratégia de melhoria ótima.



- Avaliação de projetos, produtos ou serviços para identificar problemas potenciais e reduzir defeitos já a partir do dia um (PANDE, NEUMAN,CAVANAGH 1999).

Na indústria este método pode proporcionar uma investigação sistemática das variáveis de produtos e processos que podem influenciar em um produto de qualidade. Após identificar estas variáveis é possível direcionar esforços para melhorar a qualidade, confiabilidade, ou até mesmo a manufatura de um produto. Em alguns casos, recursos para pesquisa são limitados, então é necessário planejar e recolher o maior número de informações possíveis para que um experimento seja bem sucedido e apresente respostas confiáveis em um menor tempo e com um menor investimento. Também, torna-se possível analisar a interação entre duas variáveis de entrada observando a resposta de saída, relacionando o grau de interação entre elas (Minitab 2007).

Geralmente, esta ferramenta caracteriza-se por quatro etapas denominadas de planejamento, caracterização, otimização e verificação.

**Planejamento:** Essa etapa é bastante importante porque tem a função de garantir que a execução do projeto ocorra, evitando problemas com disponibilidade de material, pessoas, recursos financeiros e ainda gerando um banco de dados que pode ser utilizado a qualquer momento para dar continuidade ao projeto. Existem alguns passos básicos que podem orientar esta etapa.

- Definição do problema: Avaliar qual é o problema que necessita ser estudado permitindo escolher quais serão as variáveis a serem estudadas.
- Definição do objetivo: Esclarecer o objetivo do projeto irá permitir que a perguntas corretas sejam respondidas e que sejam geradas informações relevantes.
- Realizar um experimento que realmente produza informações significativas: Nesta etapa são revisadas as informações básicas sobre o processo ou produto, revistos os conceitos teóricos e observadas experiências anteriores procurando aumentar o conhecimento sobre o assunto. Aqui são avaliados quais fatores ou condições do processo afetam a desempenho ou qualidade do produto ou processo, contribuindo para sua variação. Por último, pode ser buscar quais são as condições para um processo ou produto com características ótimas ou estáveis.

- Garantir o controle do processo e sistemas de medidas: Ambos, processo e sistema de medidas devem possuir um sistema de controle baseados em funções estatísticas. Caso isso não seja possível é necessário reproduzir cada etapa do processo, para obter um controle de medidas confiável que permita obter resultados reais.

**Monitoração:** Existem muitas variáveis que podem influenciar os processo de fabricação, ou mesmo a fabricação de um produto. Monitorar um processo auxilia na redução do número de variáveis que influenciam realmente a qualidade do produto, direcionando esforços para aperfeiçoar as variáveis chaves, para que se tenha ou não uma curva de resposta para os resultados. Existem diversos métodos para gerar estas respostas:

- Modelo de dois níveis completo e fatorial fracionado são muito utilizados na indústria.
- Modelo Plackett-Burman, apresenta baixa resolução, mas sua utilidade e robustez são amplamente reconhecidos.
- Modelos fatoriais com mais de dois níveis, são utilizados em pequenos experimentos.

**Otimização:** Depois de identificar as variáveis principais, é necessário realizar a otimização das mesmas para atingir os objetivos desejados.

**Verificação:** Nessa etapa são testados os parâmetros escolhidos como ideais, e então medidos seus intervalos de resposta e calculado os desvios inerentes ao processo ou produto (geralmente oriundos de variáveis não controladas).

Alguns passos básicos devem ser seguidos para uma boa utilização de um DOE, as premissas acima, como definir um objetivo claro, possuir um sistema de medidas ou processo confiável devem ser acompanhadas por outras, como a possibilidade de diferenciar variáveis que podem ser controladas das que são inerentes ao processo e não controláveis. Outra premissa bastante importante deve ser garantir a aleatorização de ensaios para evitar a influência de parâmetros externos, ainda deve-se ter o cuidado de impedir a variação dos resultados promovidos por eventos que não sejam parte do processo.

Existe também a necessidade de associação de fenômenos ocorridos durante o teste e sua possível causa, evitando que alguns fatores sejam “mascarados”, ou até mesmo que os fenômenos sejam confundidos. Estabelecer uma ordem de experimentos e avaliar o número de

ensaios é necessário para obter resultados confiáveis. Após todos estes cuidados, é importante definir um tempo de verificação dos resultados antes de encerrar o projeto, evitando qualquer tipo de erro na conquista do objetivo delineado (ANDERSON, KRABER 2001).

### 2.1.1. Modelo Fatorial $2^K$

São projetos que envolvem apenas K fatores, cada um deles com dois níveis: alto e baixo. Esses níveis podem ser classificados em discretos (máquinas, operadores, turnos) e contínuos (temperatura, pressão, velocidade e avanço). Neste tipo de projeto, são avaliados experimentos com muitas variáveis e em etapa inicial de desenvolvimento. Nas indústrias, este tipo de modelo é ideal porque gera uma quantidade de ensaios pequena com uma eficiência de resposta muito grande.

O desenvolvimento de um experimento fatorial permite avaliar fatores de controle em um processo baseados nos conceitos estatísticos de desvio padrão, análise de variância, e distribuições estatísticas do tipo normal e “t” distribuição. Este modelo é adequado para analisar parâmetros iniciais de um desenvolvimento de produto, onde cada fator ainda é desconhecido e deseja-se estudar seu efeito e suas interações na parametrização ou melhoria de qualidade em um processo ou produto.

### 2.2. Galvanização

Alguns metais apresentam uma condição termodinâmica instável e tendem a mudar para uma condição estável pela formação de óxidos, hidróxidos, sais, etc. Desta maneira a corrosão é um processo espontâneo e indesejável. Uma das formas de combater a corrosão consiste em evitar o contato do metal com o meio corrosivo. Pode-se, por exemplo, recobrir o metal com revestimentos metálicos e orgânicos, de espessura e composição adequadas (SPINELLI e TAVARES, 2001).

A metalurgia encarrega-se através do emprego de grandes quantidades de energia, de extrair os metais que se encontram na forma de óxidos ou compostos para as mais diversas aplicações. Entretanto, os metais na sua forma pura geralmente são instáveis, por estarem em um nível energético superior ao do composto que lhe deu origem tendendo a voltar à forma de composto. O processo de oxidação do ferro é bastante conhecido devido ao grande emprego

deste material, tendo-se tornado a palavra enferrujar, sinônimo de corroer. A “ferrugem” é um composto avermelhado, resultante da reação do ferro com o oxigênio e com a umidade do ar e não serve como barreira para a continuidade do processo. Assim, o processo de corrosão nunca pára, sendo apenas mais lento ou mais rápido conforme as condições do meio.

Entretanto o aço é um excelente material do ponto de vista mecânico e econômico. Assim, sua proteção permite conjugar estas propriedades com uma maior durabilidade. A proteção mais apropriada é a aplicação de revestimentos protetores. Os revestimentos metálicos são, entre os revestimentos protetores, os de maior durabilidade, sendo o revestimento com zinco um dos mais utilizados por conferir excelentes propriedades a um custo relativamente baixo. O zinco é o metal mais indicado e mais utilizado para a proteção de superfícies metálicas contra a corrosão, devido à sua facilidade de aplicação e seu baixo custo. Através de cálculos termodinâmicos e de medidas de potencial de eletrodo, vê-se que o zinco é um metal bastante reativo, portanto com uma tendência apreciável para se corroer. Na prática, o zinco sacrifica-se sofrendo corrosão, protegendo assim o metal-base (SPINELLI e TAVARES, 2001).

Assim, a Galvanização tem dois grandes objetivos: proteger o aço contra a corrosão e melhorar seu aspecto superficial. O conceito de galvanização está citado abaixo:

“... o revestimento de um produto de aço por uma camada de zinco através da imersão deste, previamente preparado, em um banho de zinco fundido, a cerca de 450°C, obtendo-se um revestimento protetor e de melhor aspecto (MALLET 2007).”

### 2.2.1. Vida Útil da Camada de Zinco

A vida útil da Camada de Zinco é proporcional à sua espessura, porém a constante de proporcionalidade da equação é dada pelo meio. Sendo assim a vida útil da camada de zinco pode ser estimada através da equação  $t = R \times e$  [1].

$$t = R \times e \quad [1]$$

Onde:

t: Vida em serviço (anos);

R: resistência à corrosão específica do meio (anos/ $\mu\text{m}$ );

e: espessura da camada ( $\mu\text{m}$ ).

Os valores de R na Tabela 2.1 não devem ser considerados como valores exatos, mas como referência, pois se devem levar em conta as dificuldades de caracterização da atmosfera de cada região (uma atmosfera pode ser, ao mesmo tempo, marítima, industrial, tropical, etc.) e as dificuldades experimentais. A Figura 2.1 abaixo apresenta uma estimativa de durabilidade do revestimento de zinco para diferentes atmosferas.

Tabela 2.1 Valores experimentais de R para diferentes meios.

Meio	R
Atmosfera polar ou deserto	6,7
Atmosfera seca tropical	4
Atmosfera seca subtropical	4
Atmosfera rural	2,1
Atmosfera marinha tropical	1,3
Atmosfera pequenos sítios povoados	1,0
Atmosfera grandes cidades	0,5
Atmosfera marinha	0,3
Atmosfera industrial	0,25
Atmosfera marinha-industrial	0,22
Água doce pesada	0,2
Água do mar	0,12
Água doce leve	0,06

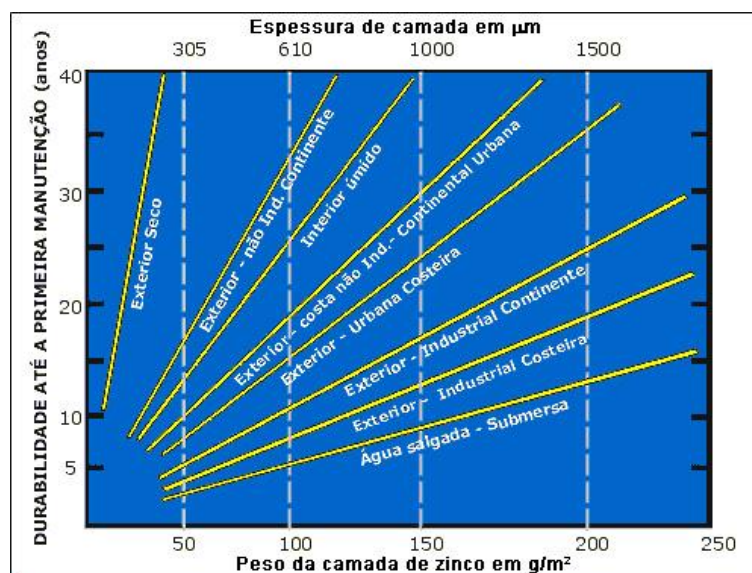


Figura 2.1 Gráfico mostrando a relação entre espessura ( $\mu\text{m}$ ) e peso ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) de Camada de Zinco em relação à durabilidade (anos) em diferentes atmosferas. (MET@LLICA 2007)

### 2.2.2. Comparação entre processo de revestimento de zinco

Sendo a vida útil sempre proporcional à espessura, independente das condições de uso e do processo de obtenção, a escolha do melhor processo para obtenção do revestimento de zinco depende do tipo (formato e dimensões) do produto, da espessura necessária de camada (em função da vida útil desejada) e do custo de produção aceitável em função do preço do produto.

Existem muitas formas de se aplicar uma camada de zinco sobre o aço, abaixo estão listadas algumas:

- Ø Galvanização a fogo (ou imersão a quente);
- Ø Eletrodeposição;
- Ø Metalização;
- Ø Sherardização (ou cementação);
- Ø Galvanização mecânica (ou tamboreamento);
- Ø Pintura;

#### **Galvanização a Fogo**

É o processo onde o revestimento de zinco é obtido pela imersão de peças de aço em um banho de zinco fundido a uma temperatura de 450°C. Este resulta na formação de camadas espessas, aderentes e bastante protetoras, compostas de uma camada de liga e outra de zinco puro. É um processo bastante indicado para linhas contínuas de arames.

#### **Eletrodeposição**

É um processo aonde se consegue um revestimento muito fino, uniforme, livre de poros e bastante protetor. As peças ou produtos de alguma forma são conectados ao cátodo de uma instalação eletrolítica, onde o eletrólito contém um sal de zinco e o ânodo também é de zinco. Os cátions de zinco da solução irão reduzir-se no cátodo, formando o revestimento. Este é muito aderente e dútil, sendo uma camada de zinco puro. A limitação do processo esta na

espessura da camada. Quando se deseja obter camadas muito espessas, o processo é economicamente inviável.

### **Metalização**

Deposição de zinco através de um spray de zinco fundido. Obtêm-se uma camada sem liga (sem difusão), mas muito porosa (densidade 6,4). A Aderência não é boa. Não é um processo adequado para linhas contínuas de arames.

### **Sherardização**

Neste processo, colocam-se as peças juntamente com um mistura de zinco em pó, óxido de zinco e um fluxo (geralmente hidróxido de amônia) em um tambor de aço rotativo aquecido a uma temperatura de 350° à 450°C, por algumas horas. O revestimento se dá por um processo de difusão. É considerado um processo de alta produtividade quando comparado com o processo de imersão a quente (para peças) e produz um revestimento mais fino do que este. Entretanto recobre roscas ou outros detalhes no corpo das peças, e o custo de manutenção do tambor e os custos com tratamento de efluentes são mais altos. Não é apropriado para arames.

### **Galvanização Mecânica**

É um processo para aplicação de altas camadas de zinco em pregos e outras peças pequenas. Também é usado um tambor rotativo, com um revestimento especial, onde são colocados, à temperatura ambiente, os pregos, pó de zinco, água, promotores químicos e esferas de vidro. A energia mecânica gerada pela rotação do cilindro é transmitida através das esferas de vidro causando a penetração das partículas de zinco, primeiro na superfície do aço e depois na superfície do revestimento de zinco. O recobrimento segue muito bem os contornos da superfície original, respeitando roscas e outras marcas. Como não há temperaturas elevadas, não há perda de propriedades mecânicas. A qualidade da camada ainda é questionável, independente de toda a divulgação que esta recente tecnologia vem recebendo. Também não é apropriada para arames.

## **Pintura**

Aplicação de tintas ricas em pó de zinco (acima de 90%). É um processo de difícil controle e baixa aderência. Adequado apenas para pequenas manutenções de peças anteriormente zincadas.

Concluindo, embora haja vários processos de deposição de zinco em aço, apenas dois são aplicáveis em linhas contínuas de arames: a galvanização a fogo e a eletrodeposição. Entretanto, este último, economicamente falando, permite apenas a obtenção de camadas muito finas que, embora de excelente qualidade, não atendem às exigências normais de espessura de camada requeridas para a durabilidade necessária a estes produtos. Assim, usa-se para arames a **galvanização a fogo**.

### 2.2.3. Galvanização a Fogo – Camada pesada

Quando uma peça de aço é mergulhada em um banho de zinco, existe um período inicial de segundos ou minutos, que é função das dimensões da peças ou arame, em que o aço é trazido à temperatura do banho. Ao ser atingido esta temperatura ou próximo dela, forma-se uma camada aderente de liga ferro-zinco na superfície do aço e outra de zinco puro. Ambas as camadas contribuem para a resistência à corrosão e para a vida útil do revestimento aplicado.

A camada de zinco e ferro, de estrutura complexa, relativamente não dútil comparada com o próprio zinco, tem espessura que depende da temperatura do banho e do tempo de imersão. A sua formação é mais rápida quanto mais alta for à temperatura do banho e sua espessura cresce com o tempo de permanência nele (Gentil 2003). No processo de galvanização a fogo o revestimento caracteriza-se pela sobreposição de camadas compostas por diferentes fases, com uma última composta praticamente por zinco puro. Isto devido ao uso de altas temperaturas (440-480°C), o que permite a interdifusão do ferro e do zinco. Assim próximo ao aço estão às ligas mais ricas em ferro e mais externamente estão as mais ricas em zinco. A temperatura, embora alta para fundir o zinco e permitir a difusão, não é alta suficiente para alterar substancialmente as propriedades mecânicas do aço.

A elevação da temperatura pode ocasionar alguns inconvenientes como considerável ataque as paredes de aço da cuba de galvanização, um maior consumo de energia para



aquecimento do banho, bem como a formação de um revestimento constituído principalmente de liga zinco-ferro. Este último inconveniente, inclusive concorrerá para que o revestimento tenha fraca aderência. A elevação da temperatura pode ainda ocasionar a formação de uma camada de borra contendo por volta de 96% de zinco e 4% de ferro, sendo, portanto uma perda (Gentil 2003).

### Fases intermetálicas da liga Fe-Zn

Com a utilização de um microscópio óptico podê-se examinar uma camada de Fe-Zn, utilizando aproximadamente 1000 magnificações, observando-se as fases intermetálicas mostradas na Figura 2.2.

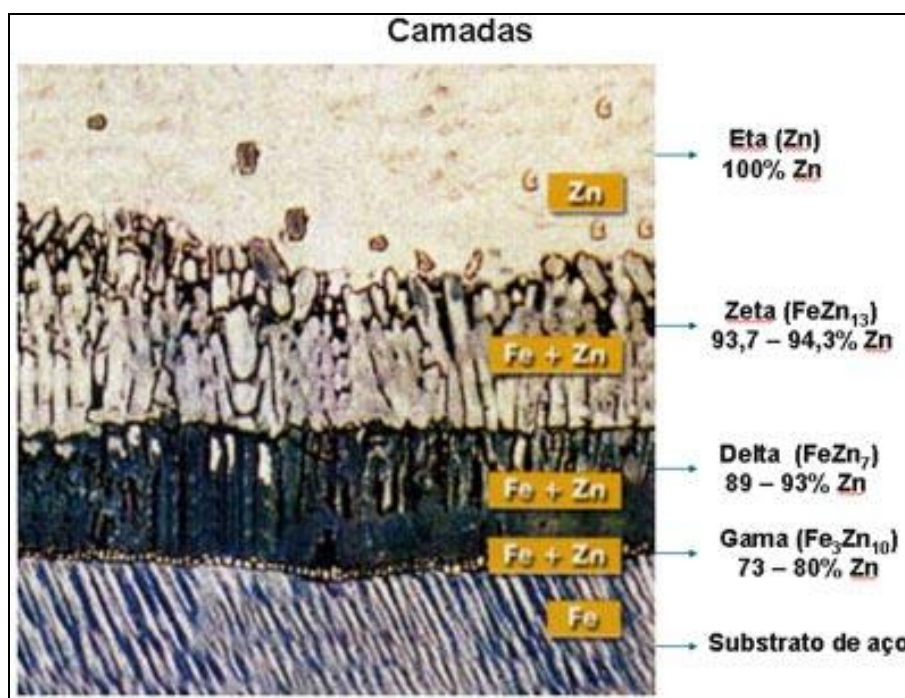


Figura 2.2 Micrografia de uma camada galvanizada mostrando as diferentes fases intermetálicas do Fe-Zn (PENHA 2004).

A fase **gama** ( $\gamma$  ou  $\Gamma$ ) é muito aderente e fina, raramente pode ser vista ao microscópio (somente com grandes magnificações). Cristaliza através do sistema cúbico, é a mais rica em ferro (20 a 27% de Fe) e funde a 680°C.

A fase **delta-1 compacta** ( $\delta_1$ ) é muito dura e bastante fina, sendo pouco visível ao microscópio (salvo com luz polarizada), porque pode ser confundida com uma fase intermediária, espessa e frágil, resultante de sua mistura com a fase zeta ( $\zeta$ ), denominada

**delta-1 em paliçada** ( $\delta_1$ ). A fase delta-1 cristaliza pelo sistema hexagonal, tem um teor de ferro entre 7 a 12 % , e transforma-se entre 620 e 640° C na fase delta ( $\delta$ ) que não é estável a temperatura ambiente.

A fase **zeta** ( $\zeta$ ) apresenta-se geralmente muito trincada no sentido perpendicular à superfície. Cristaliza pelo sistema monoclinico, tem um teor de Fe entre 5,3 e 6.7% e seu ponto de fusão é 530° C. Sua fragilidade depende da forma como se apresenta ou de como é obtida.

A fase **eta** ( $\eta$ ) é constituída praticamente de zinco puro, sendo bastante tenaz e muito dútil. Cristaliza-se pelo sistema hexagonal e seu ponto de fusão é 419,5°C.

Das fases presentes dependerão as propriedades do revestimento e, portanto, do produto. Em análises metalográficas simples distinguem-se duas camadas: a de liga e a de zinco puro. A primeira é mais dura e menos maleável que a segunda.

### **Formação das fases**

A possibilidade de formação ou de surgimento das fases depende da liga e da temperatura atingida no processo de acordo com o diagrama de equilíbrio “concentração x temperatura” para o sistema Fe-Zn observado na Figura 2.3.

### **Crescimento das fases**

O fato de uma fase ser possível não significa que ela existirá em grande quantidade, pois elas têm velocidades de crescimento diferentes, já que são compostos diferentes, portanto, têm reações de formação diferentes. O crescimento das fases tem como mecanismo básico, o fenômeno de interdifusão entre o zinco e o ferro, que depende:

- Ø Diferença de concentração existente entre uma fase e outra;
- Ø Temperatura, uma vez que esta aumenta os espaços interatômicos, facilitando a difusão necessária para o crescimento.

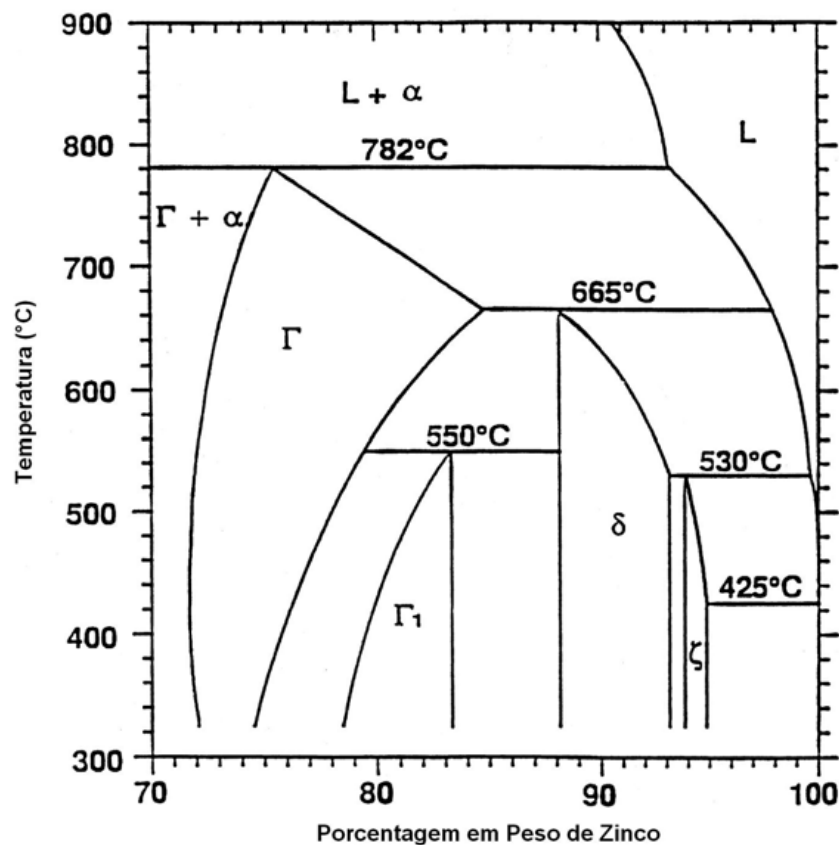


Figura 2.3 Diagrama de fases “concentração x temperatura” para o sistema Fe-Zn. (PENHA 2004).

### Propriedades importantes das camadas

Para que a camada de zinco aplicada sobre os arames, cumpra adequadamente as suas funções (aumentar a resistência à corrosão e melhorar o aspecto superficial) é muito importante que esta camada tenha:

- Ø A espessura necessária (em função da vida útil projetada);
- Ø Uma uniformidade razoável;
- Ø Uma excelente aderência.

### Espessura da camada ou peso da camada

A espessura (ou peso da camada) é a característica mais importante e mais de um revestimento de zinco já que a vida útil deste, esta diretamente relacionada à sua espessura. As

espessuras das de zinco costumam ser expressas em micron ( $\mu$ ) ou em peso de camada por unidade de área revestida ( $\text{g/m}^2$ ). A equivalência entre as duas é:

$$1\mu\text{m} \approx (7,14 \text{ g/m}^2)$$

A principal classificação dos produtos galvanizados está justamente relacionada com a espessura da camada de zinco:

Tabela 2.2 Espessuras típicas por classificação de camada.

<b>Tipo de camada</b>	<b>Espessura (<math>\text{g/m}^2</math>)</b>
Camada leve (ou simples)	~50-150 $\text{g/m}^2$
Camada pesada (ou dupla) classe A	~200 a 300 $\text{g/m}^2$
Camada pesada (ou dupla) classe B	~400 a 450 $\text{g/m}^2$

### Uniformidade da camada

Esta propriedade não tem tanta importância quanto à espessura. Como a vida útil da camada é proporcional à espessura, muitos supõe que a uniformidade desta espessura em toda a extensão da peça seja importante para que a corrosão não destrua a parte mais fina em menor tempo. Com base nesta suposição, muitas normas de aceitação de produtos galvanizados exigem que estes sejam aprovados no Ensaio de Preece (teste que detecta os pontos de menor espessura de camada).

Entretanto como a proteção que o zinco oferece ao aço é sacrificial (quando há uma descontinuidade de camada, ele aumenta sua própria taxa de corrosão), mais que a uniformidade, é a espessura média (que é o que se detecta em ensaios químicos de medição de peso de camada), que permite uma estimativa mais precisa do volume (massa) de zinco disponível para proteger o aço. Isto não quer dizer que não se dá importância para a uniformidade, pois se não é muito importante do ponto de vista de proteção, pode ser muito importante do ponto de vista de aparência. Em caso de revestimentos com a camada de zinco puro muito fina, pode acontecer o afloramento da camada de liga, que é mais escura e com menos brilho, nos pontos de menor espessura de camada.

Também devê-se levar em conta o caráter micro e macro da desuniformidade, se variações a pequenas distâncias podem ser compensadas pela proteção sacrificial do zinco, grandes extensões com menor espessura não podem ser protegidas por uma área de maior

espessura, mas muito distante. No caso de arames, variações de espessura na mesma seção transversal, como excentricidade ou ovalização (típicas de alguns processos), não afetam a resistência do arame, já variações longitudinais, dependendo da extensão podem ser preocupantes.

### **Aderência da camada**

A aderência é a capacidade da camada de se manter sobre a superfície revestida, sem trincar ou descamar mesmo que sujeita à tensões e deformações. Basicamente a aderência está ligada com a continuidade entre uma fase e outra. Assim, quanto mais similares (química e fisicamente) forem duas fases consecutivas maior será a aderência.

Todas as fases de liga do revestimento são frágeis e duras. São também porosas e possuem pouca coesão metálica devido às diferenças no crescimento direcional e nas variações volumétricas que ocorrem no resfriamento, uma vez que se organizam em sistemas cristalinos diferentes, portanto, tem diferentes propriedades.

Como as fases têm diferentes propriedades, físicas é normal a ocorrência de trincas no revestimento. Estas trincas podem ser paralelas ou perpendiculares à superfície ou ambas. Quando as trincas são paralelas à superfície, parte do revestimento tende a soltar-se quando dobrado. Quando as trincas são perpendiculares, não ocorre desagregação do revestimento ao dobrá-lo. A proporção entre as camadas afeta a formação das trincas.

Se o revestimento for composto quase que inteiramente de zinco puro (fase  $\epsilon$ ), o revestimento será extremamente dútil e o material galvanizado poderá ser dobrado sem trincamento ou escamação da camada. Quando a camada de zinco puro tem aproximadamente a mesma espessura da camada de ligas (fases frágeis) é comum desenvolverem-se trincas paralelas, o que resulta em revestimento pouco aderente. Se a camada de zinco puro for muito fina ou inexistente, as trincas tendem a se desenvolver perpendicularmente, o que não afeta a aderência porque não leva à escamação.

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. 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 à bitola (diâmetro) do arame. Ou seja, arames grossos aceitam uma camada maior do que arames finos, sendo que a bitola do galvanizado fica em torno de 0,9 a 1,4% maior do que a do trefilado.

Assim, tudo que afeta a formação da camada, sua espessura ou a proporção entre as fases, afeta também a aderência do revestimento. Outros fatores importantes são a composição química do aço (presença de elementos como silício, carbono, fósforo, manganês, nitrogênio), temperatura do banho, tempo de imersão, velocidade da linha de galvanização e composição química do banho. Juntamente com estas, soma-se o sistema utilizado para retirar o arame do banho, que pode ser classificado com na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Tabela mostrando os possíveis métodos de retirada de arame após a imersão na cuba de zinco.

<b>Camada Pesada</b>	<b>Camada leve</b>
Saída inclinada com raspador	Método convencional
Saída inclinada com prensa-gaxeta	Gás wipping
Saída vertical com gaxetas (pad wipping)	Dinamic wipping

Para a fabricação do arame camada pesada, podem ser utilizados os três métodos acima se destacando o último, Dinamic Wipping.

### **Dinamic Wipping**

Este processo suprime a formação do óxido de zinco sobre a camada galvanizada através da passagem do arame em um dispositivo vertical com um gás inerte, o nitrogênio. Entretanto, este gás não tem apenas a função de proteger a camada, mas também de controlá-la, uma vez que controlado a pressão e/ou a vazão do gás nos dispositivos podemos controlar a camada de zinco independentemente da velocidade.

O objetivo de cada dispositivo é reduzir a camada de zinco de maneira a reduzir a quantidade de zinco arrastada. Isto é feito por um fluxo de nitrogênio entrando através de uma “faca circular” em um tubo na saída do arame da cuba, Figura 2.4. Cada tubo (um para cada arame) é alimentado com gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) sob vazão variável. Pelo aumento da vazão do gás, o menisco reduz e a camada resultante também. Como as distâncias entre o banho de zinco e os dispositivos são muito pequenas (< 1 cm), fluxo de nitrogênio saindo do dispositivo

impede o contato da camada com o oxigênio, impedindo a formação de óxido de zinco na superfície da camada.

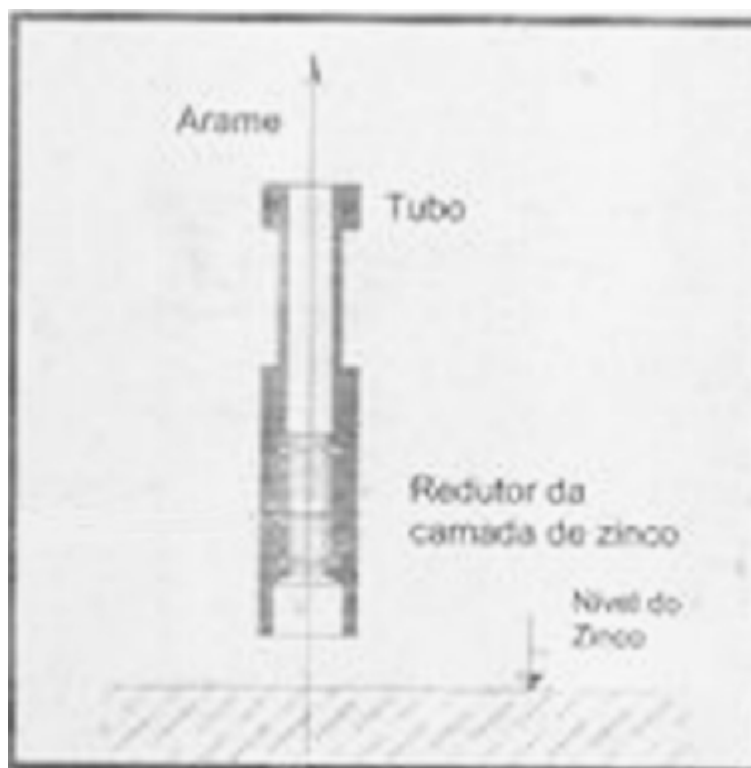


Figura 2.4 Imagem mostrando dispositivo responsável pela raspagem da camada de zinco através da vazão de nitrogênio. (MALLET 2007).

Os dispositivos são fixados através de placas, que podem ser individuais ou não, e possuem uma série de ajustes que permitem o seu perfeito alinhamento com o fio. Os dispositivos são constituídos de uma parte fixa e de partes móveis, os “bicos”, que devem ser trocados conforme a bitola do arame que está sendo produzida, Figura 2.5 e Figura 2.6. O abastecimento de nitrogênio é feito por trás dos dispositivos por mangueiras ou tubulações individuais derivadas da linha central de nitrogênio.

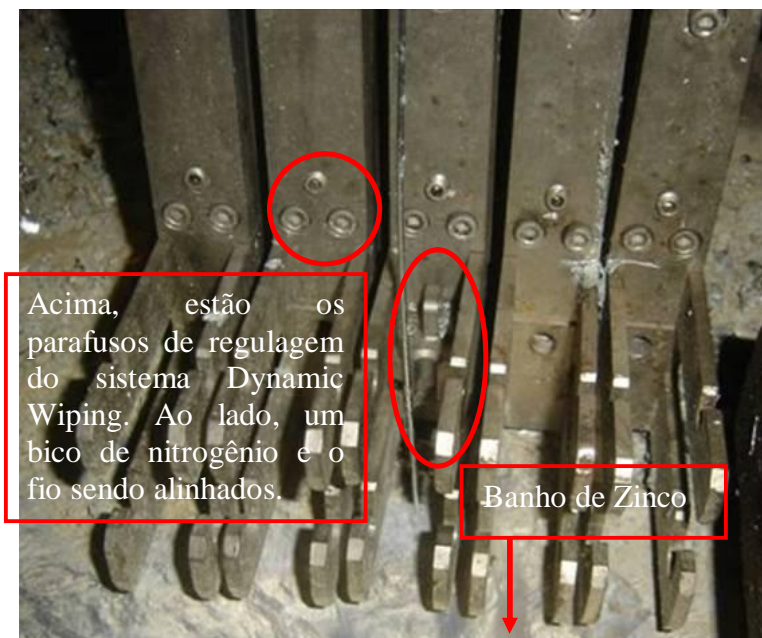


Figura 2.5 Imagem mostrando suporte para bicos de nitrogênio utilizados no sistema dynamic wipping.



Figura 2.6 Imagem mostrando conjunto de bicos de nitrogênio utilizados para produção de arame camada pesada.

O fluxo de nitrogênio (pressão e vazão) é ajustado, manual ou automaticamente, de acordo com uma série de parâmetros:

Ø Velocidade da linha;



- Ø Bitola de arame;
- Ø Bitola do bico;
- Ø Comprimento de imersão;
- Ø Peso de camada desejado;
- Ø Temperatura do banho;
- Ø Temperatura do N<sub>2</sub>;
- Ø Densidade do zinco;
- Ø Aceleração da gravidade.

Mesmo quando o ajuste é manual, há um programa que ajuda a determinar a pressão necessária. As diferenças entre a vazão calculada pelo programa e a realmente necessária na linha, quase sempre, devem-se a dificuldades de manutenção dos bicos e das mangueiras/tubulações de nitrogênio, gerando vazamentos ou entupimentos.

Nos projetos atuais, já foi incorporado um sistema automático de monitoramento e controle da camada que diminui drasticamente toda esta variação, uma vez que o sistema fica continuamente ajustando a vazão do nitrogênio em função das medidas do sensor de camada (uma para cada fio).

As vantagens na utilização deste sensor são velocidade elevada (alta produtividade), boa aparência da camada (sem apresentar defeitos), baixo tempo de imersão, portanto, pequena relação FeZn/Zn, o que é ideal para se conseguir boa aderência e excelente controle da camada, diminuindo o consumo médio de zinco, especialmente quando se usa o sistema automático de controle.

### **Limite inferior**

O sistema com nitrogênio não consegue efetivamente raspar toda a camada de zinco líquido sobre o arame como em um processo de raspagem por gaxetas, apenas consegue regulá-la. Assim, a vazão máxima de nitrogênio possível pode não permitir a obtenção de camadas abaixo de 100g/m<sup>2</sup>.

### Limite superior

Da mesma forma, camadas muito elevadas exigem ou pressões muito baixas de nitrogênio ou velocidades muito altas dos arames. Quando se usa vazão muito baixa, começa-se a ter problemas de qualidade superficial, uma vez que não se consegue impedir o contato do oxigênio com a camada. Por outro lado, o aumento da velocidade da linha é limitado pelos equipamentos de bobinamento e desbobinamento existentes.

### Etapas do processo de galvanização a fogo

O diagrama abaixo apresenta um mapeamento do processo de galvanização de arames através do método de imersão a quente (a fogo), com suas respectivas etapas.



Figura 2.7 Fluxograma mostrando as etapas do processo de galvanização a fogo.

## **Desbobinamento**

Nesta etapa ocorre o posicionamento e avaliação das condições do arame trefilado/laminado para a galvanização. São checadadas a bitola do arame, o tipo de aço descrito na etiqueta de identificação, a ovalização e a presença de algum tipo de defeito superficial capaz de prejudicar a qualidade do produto final, então inicia o processo de passagem do arame ao longo da linha de galvanização.

## **Recozimento**

Alguns arames necessitam passar por um processo de recozimento visando o alívio de tensões, criados durante seu processo de manufatura. Este recozimento acontece em dois tipos distintos de fornos, um forno a resistência elétrica (forno mufla) e outro utilizando um banho de chumbo. Este procedimento visa obtenção das propriedades mecânicas desejadas para alguns produtos e ainda o craqueamento dos lubrificantes utilizados nos processos de laminação e trefilação.

## **Lavagem**

Operação fundamental, pois qualquer resíduo (carepa, óxidos) que permaneça sobre o arame irá contaminar os tratamentos subseqüentes. Ainda tem a função de diminuir a temperatura do arame para o processo posterior.

## **Decapagem**

Óxidos, cascas de óxidos e carepas podem não ser removidos nos processos de recozimento e lavagem. Sua remoção é feita em banhos de soluções ácidas, em um processo conhecido como decapagem.

Uma típica camada de oxidação apresenta os seguintes elementos e compostos:

Fe (ferro base)

FeO (óxido de ferro no estado menos oxidado)

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (óxido de ferro no estado intermediário de oxidação)

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> contribui com cerca de 18% e é menos solúvel do que a anterior e a camada de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> corresponde com o restante de 2% e corresponde ao estado mais estável e menos solúvel destes óxidos.

O ácido clorídrico (muriático) é o mais comumente usado, nas concentrações de 6 a 12%.

O ataque do ácido ocorre através dos poros existentes na camada de oxidação, até atingir o substrato de FeO, promovendo a sua dissolução e propiciando o destacamento da camada de óxido.

### **Lavagem**

Após a decapagem é muito importante que os arames sofram uma lavagem em água corrente, em banhos subseqüentes (de preferência mais de um) com a finalidade de remover os resíduos produzidos nas reações de decapagem, de forma a minimizar as contaminações dos banhos seguintes.

### **Fluxagem**

A ação do fluxante processa-se sob duas formas:

- a) Uma parte é consumida na dissolução e escorificação dos resíduos remanescentes;
- b) O restante exerce a função umectante (ou mordente) proporcionando um eficiente molhamento do arame pelo zinco fundido.

Os principais componentes de um fluxo são os compostos químicos de cloreto de zinco (ZnCl<sub>2</sub>) e cloreto de amônia (NH<sub>4</sub>Cl), formando sais duplos. São utilizadas concentrações variáveis de sal duplo entre 5 a 30%, dependendo do tipo de arame tratado, em temperaturas de 65 a 100°C (PENHA, 2005).

### **Pré-aquecimento**

Os objetivos do pré-aquecimento são diminuir o choque térmico dos arames a serem galvanizadas e prevenir contra respingos de zinco, na área ao redor da cuba de galvanização,

durante a imersão do arame no zinco fundido, fato que acontece quando há umidade (PENHA, 2005).

### **Imersão a quente**

Esta etapa consiste na imersão do substrato, limpo e adequadamente preparado em um banho de zinco líquido, dentro de uma cuba metálica ou cerâmica, a uma temperatura em torno de 450°C.

O substrato é retirado do banho de galvanização e o excesso de zinco é removido por raspagem mecânica ou por gás de raspagem. As reações químicas que resultam na formação da estrutura da camada galvanizada continuam depois do substrato ser removido no banho, e devido a isto o substrato é resfriado com água imediatamente após a sua retirada do banho (AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, 2005).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para desenvolvimento dos parâmetros de produção do arame camada pesada foi utilizada a ferramenta Design of Experiment (DOE – Fatorial 2<sup>3</sup>), com três rep. A coleta de amostras e o desenvolvimento dos parâmetros de produção foram realizados na Gerdau Riograndense. Foi utilizado um aço carbono ABNT 1065 trefilado para um arame ovalado com bitola 2,66mm (menor seção) e 2,72mm (maior seção). Amostras foram coletadas e analisadas no Laboratório de Ensaio Físicos, Químicos e Metalúrgicos da Gerdau Riograndense. Foram realizados ensaios de tração, medidas de camada de zinco, ensaio de aderência de camada, e ensaio de imersão (Preece). Toda a metodologia empregada neste trabalho será descrita a seguir.

#### 3.1. Material

O material utilizado para o desenvolvimento dos parâmetros de produção do arame camada pesada é um aço carbono ABNT 1065 com composição química específica contida na Tabela 3.1. A especificação técnica do produto é apresentada na Tabela 3.2. Sua composição química nominal pode ser visualizada na Tabela 3.1. O diâmetro do arame ovalado empregado é de 2,66mm (menor seção) e 2,72mm (maior seção). Para efeito comparativo da especificação Força de Ruptura (kgf) com os resultados dos testes realizados no processo fabril, seu valor não foi transformado para tensão como era de se esperar em um trabalho de engenharia. Para realizar esta transformação deve ser considerada a área da seção elíptica de um arame com diâmetro médio especificado na Tabela 3.2 para todos os casos citados.

Tabela 3.1 Composição química do aço ABNT 1065 (% em peso)

	C	Mn	P	S
Mínimo	0,60	0,60	-	-
Máximo	0,70	0,90	0,040	0,050

Tabela 3.2 Características especificadas para o produto camada pesada.

Produto	Força de ruptura (Kgf)	Peso de camada (g/m <sup>2</sup> )	Diâmetro (mm)	Diâmetro mín./máx (mm)
Pantaneiro	> 800 kgf	> 230 g/m <sup>2</sup>	2,66 a 2,72mm	2,4 a 3,1mm

### 3.2. Etapas para realização do Design of Experiments (DOE)

Primeiramente foram analisadas as características de camada, diâmetro e força de ruptura descrita pela especificação técnica do produto. Em seguida foram identificadas quais seriam as respostas avaliadas para obtenção de sucesso na parametrização do processo de produção. Foram medidas espessura de camada, força de ruptura, aderência e por último a distribuição da camada ao longo da superfície do arame. Para que aquelas respostas fossem obtidas ocorreu uma avaliação de quais parâmetros seriam controlados e quais seriam definidos com intrínsecos ao processo de galvanização a quente.

Os fatores controláveis são a velocidade (33 m/min - mínima e 48 m/min - máxima), bico de nitrogênio (6 e 8mm) e vazão de nitrogênio (1 e 3 m<sup>3</sup>/h). As variáveis que fazem parte do processo de galvanização a fogo e não podem ser controladas, em específico para este experimento, são a temperatura da cuba de zinco (450°C +/- 10°C), o nível do banho de zinco (um centímetro da borda da cuba), a vibração provocada na estrutura da pedra de imersão no banho de zinco, concentração do ácido clorídrico na decapagem (160 a 180 g/m<sup>3</sup>) e temperatura da cuba de chumbo (o arame não é recozido).

O DOE utilizado foi do tipo fatorial com dois níveis e três fatores, sendo necessário oito ensaios para realizar um experimento completo, ainda, para aumentar a acuracidade dos dados realizaram-se três replicas. A partir da definição destas variáveis resposta e dos fatores controláveis para atingi-las, utilizou-se o software estatístico MINITAB, para gerar uma tabela com a ordem de coletas das amostras que foram ensaiadas posteriormente.

O software aleatorizou esta amostragem permitindo que fosse minimizado o erro humano e da máquina na coleta de amostras. Então, após recolher os corpos de prova realizaram-se os ensaios mecânicos para mensurar as variáveis resposta de acordo com a combinação de fatores setados para cada amostra. Após, com todos os resultados mensurados, fez-se mão das ferramentas estatísticas do DOE para avaliar o melhor parâmetro de produção para o arame camada pesada.

### 3.3. Ensaio Realizados

A seguir são apresentados os procedimentos de realização de todos os ensaios utilizados neste trabalho. Foram coletadas amostras do arame com diferentes combinações de fatores controláveis e submetidos a estes ensaios. As amostras possuíam 2 metros cada uma.

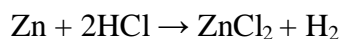
Os corpos de prova para ensaio de tração possuíam tamanho de dez vezes o diâmetro do arame, de acordo com a norma para ensaio de tração de arames, e o restante foi utilizado para a realização dos outros ensaios.

### 3.3.1. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios EMIC-DL 10.000 com capacidade de aplicação de carga de 10 toneladas. Para cada amostra foram realizados três ensaios e determinados a força máxima de ruptura. Os corpos de prova utilizados possuíam a dimensão de 15 centímetros de comprimento.

### 3.3.2. Medida de camada

Os ensaios de camada foram realizados pelo método de volumetria e consistiram em três ensaios para cada amostra, sendo o resultado a média dos mesmos. O método de volumetria é baseado na quantidade de hidrogênio liberado na dissolução de zinco metálico pelo ácido clorídrico de acordo com a equação abaixo.



O corpo de prova padrão possui o comprimento de 100 mm. Suas extremidades devem ser paralelas quando cortadas com alicate de corte. Na Figura 3.1 é mostrado um esquema do equipamento utilizado para a realização do ensaio.

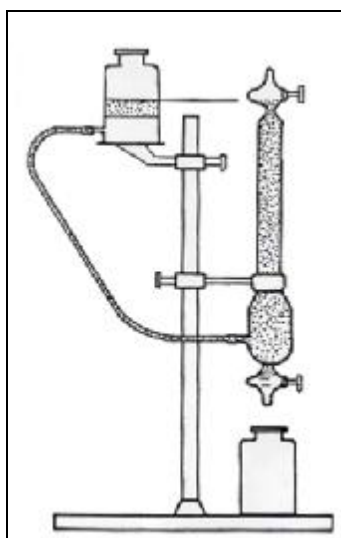


Figura 3.1 Imagem mostrando um esquema do equipamento utilizado para a realização de ensaio de medida de Camada de Zinco ( $\text{g/m}^2$ ).



### 3.3.3. Ensaio de pino

Esse ensaio é utilizado para qualificar a aderência do revestimento de zinco aplicado pelo processo de galvanização a fogo. É cortada uma amostra de 25 centímetros de arame galvanizado, então esta é presa em uma morsa, e com a utilização de uma ferramenta específica o arame é enrolado ao redor de sua própria seção, formando de 10 a 14 espiras justapostas ao redor do seu diâmetro, como pode se visualizado na Figura 3.2. Se o arame apresentar um leve descascamento o teste de aderência deverá ser reprovado.



Figura 3.2 Imagem mostrando ensaio de pino para verificar a aderência da camada de zinco depositada sobre o arame de aço, pelo processo de galvanização a fogo.

### 3.3.4. Ensaio de Preece

Este ensaio tem como objetivo avaliar a distribuição da camada de zinco ao longo da extensão de arame galvanizado. Baseia-se na utilização de uma solução com cobre e imersão do arame na mesma. A solução é preparada com a dissolução de cristais de sulfato de cobre em água destilada na proporção de 36 gramas para cada 100 gramas de água destilada, até atingir a densidade de 1,186 Be a temperatura de 18° C, então adicioná-se óxido de cobre (CuO), ou hidróxido de cobre  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  na proporção de 1g/l. Depois de obtida esta solução é necessário deixá-la neutralizada em repouso durante 48 horas. Então, ele deve ser filtrada e sua densidade corrigida com água destilada até atingir 1,186 Be (+/- 0,002) à temperatura de 18° C, e armazenada em um refrigerador.

O arame deve ser introduzido na solução por um minuto, tomando-se o cuidado para não agitar o líquido, então, o arame é retirado e lavado em água corrente. Após deve ser secado com papel toalha, pano seco e limpo, ou algodão, então, observa-se a deposição de cobre brilhante na superfície do metal base.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da utilização do DOE para obtenção dos parâmetros de processo de produção de arame galvanizado camada pesada.

##### Fatores controláveis e variáveis resposta

Os fatores controláveis (limites inferior e superior) e as variáveis resposta utilizadas neste experimento estão listados respectivamente na Tabela 4.1 e Tabela 4.2. Para as variáveis resposta foram definidos pesos de acordo com o grau de importância da resposta no produto final, sendo a espessura de camada de zinco classificada como peso 10 e as demais variáveis como peso 1, (os pesos aplicados não tem relação direta de proporcionalidade, apenas condizem com a classificação de acordo com o software utilizado para efetuar o DOE).

Tabela 4.1 Fatores controláveis utilizados para realização do DOE.

Velocidade (m/min)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Ø de bico (mm)
33	1	6
48	3	8

Tabela 4.2 Variáveis resposta utilizadas para avaliar os fatores controláveis e caracterizar as especificações do produto.

Variável resposta	Unidade
Camada de Zinco	(g/m <sup>2</sup> )
Força	(kgf)
Aderência	Adimensional
Ensaio de Preece	Nº de Imersões

### Tabela de coleta aleatória de amostras

A seguir é apresentada na Figura 4.1 a tabela de ordem (Run Order) e nomenclatura (Std Order) de retirada de amostras utilizada para realização do experimento. São vinte e quatro corpos de prova submetidos a ensaios de tração, espessura de camada, ensaio de aderência (pino), e Ensaio de Preece. Cada corpo de prova possui uma combinação dos fatores controláveis, totalizando oito combinações diferentes com três replicas. Os resultados obtidos após a realização dos ensaios também são exibidos na Figura 4.1, com eles é realizado o desenho de experimento (DOE) utilizando o software MINITAB, com o objetivo de escolher os melhores parâmetros de produção.

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
SMOrder	SubOrder	Case#R	Block	Velocidade Galvo	Vazão Nitrog	Á Bico Nitro	Camada Fino (µm)	Força (kN)	Aderência (µm-1 / nok-1)	Ensaio Preece	
1	1E	1	1	1	40	1	6	579	872	-1	4
2	2E	2	1	1	40	1	8	466	877	-1	2
3	3E	3	1	1	40	1	6	495	899	-1	3
4	1E	4	1	1	33	3	6	203	873	-1	3
5	1E	5	1	1	33	1	6	476	873	-1	4
6	2E	6	1	1	40	1	6	605	899	-1	3
7	1E	7	1	1	33	1	6	420	894	-1	2
8	2E	8	1	1	33	1	8	530	899	-1	3
9	3E	9	1	1	40	3	6	443	875	-1	3
10	1E	10	1	1	40	3	6	420	899	-1	2
11	1E	11	1	1	33	1	8	515	873	-1	3
12	4	12	1	1	40	3	6	300	875	-1	3
13	7	13	1	1	33	1	6	244	875	-1	6
14	7	14	1	1	33	3	6	266	872	-1	2
15	1E	15	1	1	33	3	6	285	899	-1	2
16	E	16	1	1	40	1	0	090	873	-1	2
17	E	17	1	1	33	1	6	461	871	-1	2
18	E	18	1	1	40	3	8	350	873	-1	5
19	1E	19	1	1	40	1	6	621	872	-1	2
20	1E	20	1	1	33	1	6	249	899	-1	4
21	14	21	1	1	40	1	8	600	873	-1	5
22	5	22	1	1	33	1	8	596	873	-1	2
23	24	23	1	1	40	3	0	312	875	-1	3
24	22	24	1	1	33	3	8	181	899	-1	3

Figura 4.1 Tabela apresentando a ordem e nomenclatura das amostras retiradas para execução do DOE e os resultados das variáveis resposta após realizados os ensaios em laboratório.

O desenho do experimento fornece as relações existentes entre cada fator controlável e suas combinações para cada uma das variáveis resposta escolhidas para caracterizar o produto. Essa análise é baseada nos conceitos estatísticos de desvio padrão, análise de variância, distribuição normal de probabilidade e no método de distribuição em “t”, aplicados ao estudo de parâmetros de processo através de softwares especializados.

As Figuras 4.2 a 4.5 mostram a influência de cada fator controlável e suas combinações sobre as variáveis resposta neste desenho de experimento. Quando o fator controlável ultrapassa a linha em vermelho, ele é considerado um fator que exerce influência

na variável resultado que se está analisando. A magnitude de sua importância também é estimada nestes gráficos.

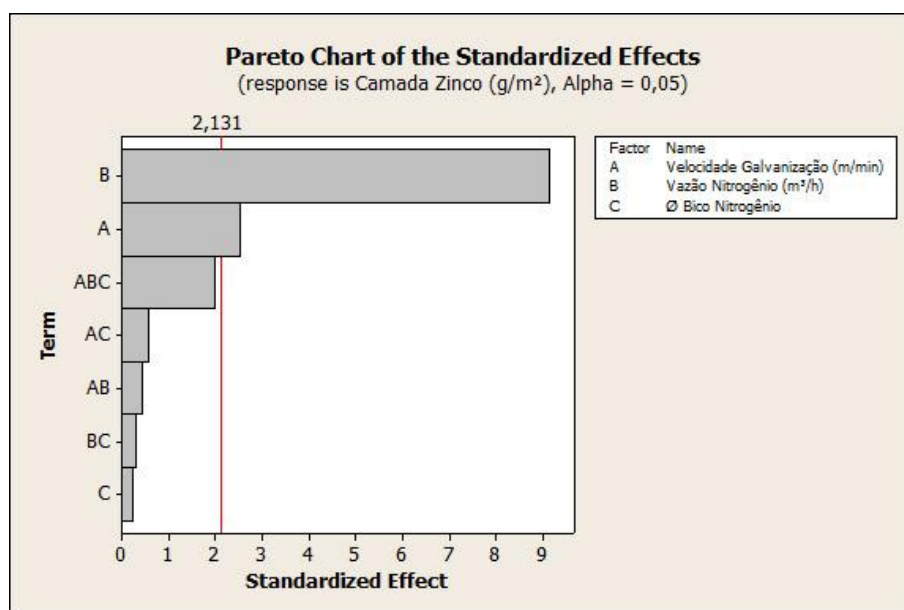


Figura 4.2 Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Camada de Zinco.

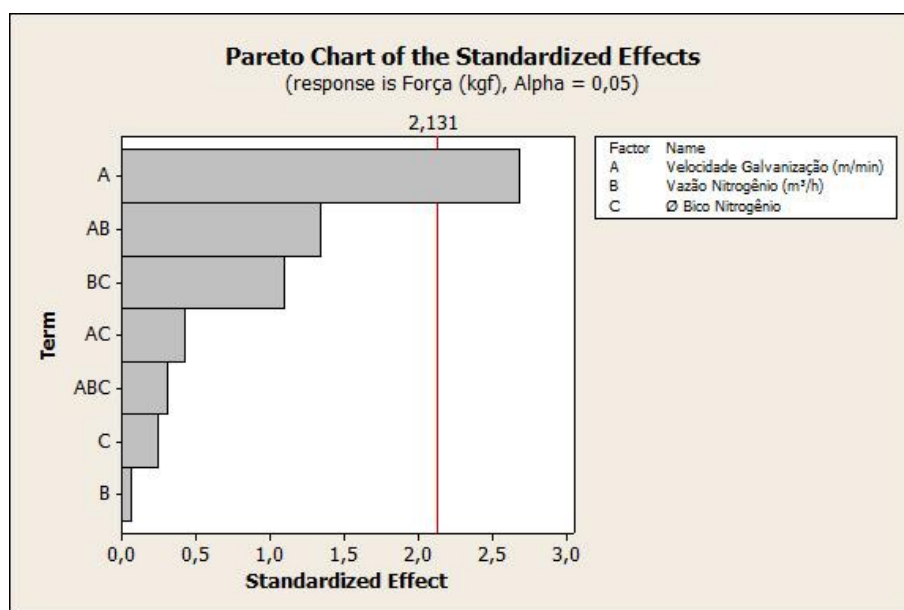


Figura 4.3 Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Força.

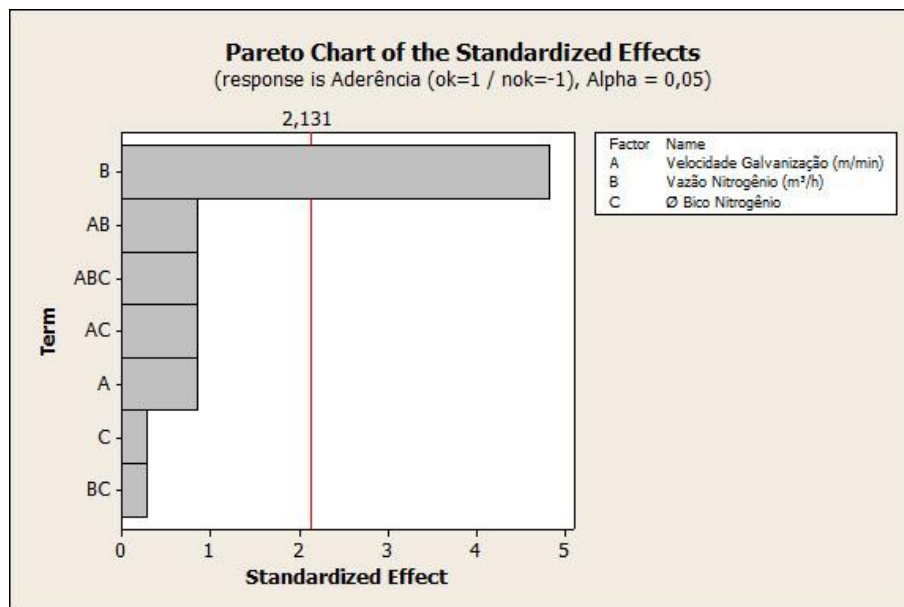


Figura 4.4 Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Aderência.

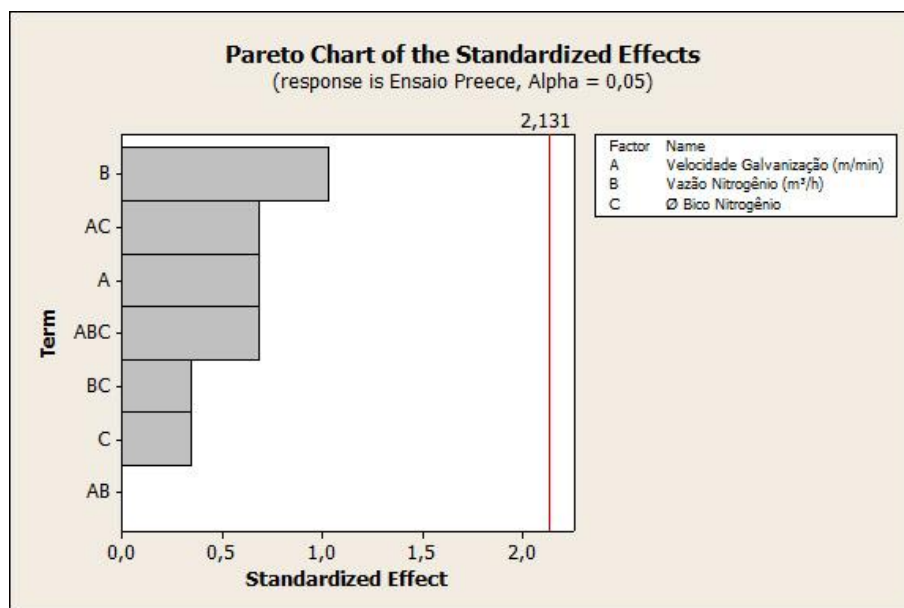


Figura 4.5 Imagem mostrando a influência dos fatores controláveis e suas combinações na variável resposta Ensaio de Preece.

Observando-se a Figura 4.2, nota-se a influência da velocidade de galvanização (m/min) e vazão de nitrogênio (m<sup>3</sup>/h) na variável resposta Camada de Zinco (g/m<sup>2</sup>). Existe uma relação entre a vazão de nitrogênio soprada sobre a seção do arame que esta sendo recoberta, promovendo uma raspagem mais eficiência quanto maior for esta vazão. Para a velocidade, observa-se um aumento da camada conforme a um acréscimo neste fator. Na

Figura 4.3, é observado que a velocidade influencia a variável resposta Força (kgf), provavelmente devido ao tempo de permanência do arame na cuba de recozimento estar diretamente relacionado à velocidade de operação do arame.

A Figura 4.4 permite visualizar a influência da vazão de nitrogênio ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) na variável resposta Aderência de camada de zinco. Um aumento exagerado na espessura de camada promove uma menor aderência de zinco sobre o arame, promovendo seu descascamento. Por último, na Figura 4.5, observa-se a ausência de interação entre os fatores controláveis e a variável resposta Ensaio de Preece que mede a centralização da camada de zinco depositada em relação ao arame.

A seguir, nas Figuras 4.6 a 4.9 é visualizada uma análise da confiabilidade dos dados obtidos com os ensaios práticos. Uma distribuição de pontos homogênea ao longo da reta que representa a distribuição normal de probabilidade assegura a confiabilidade dos dados obtidos durante o experimento para determinar o melhor parâmetro de processo na fabricação do arame galvanizado camada pesada.

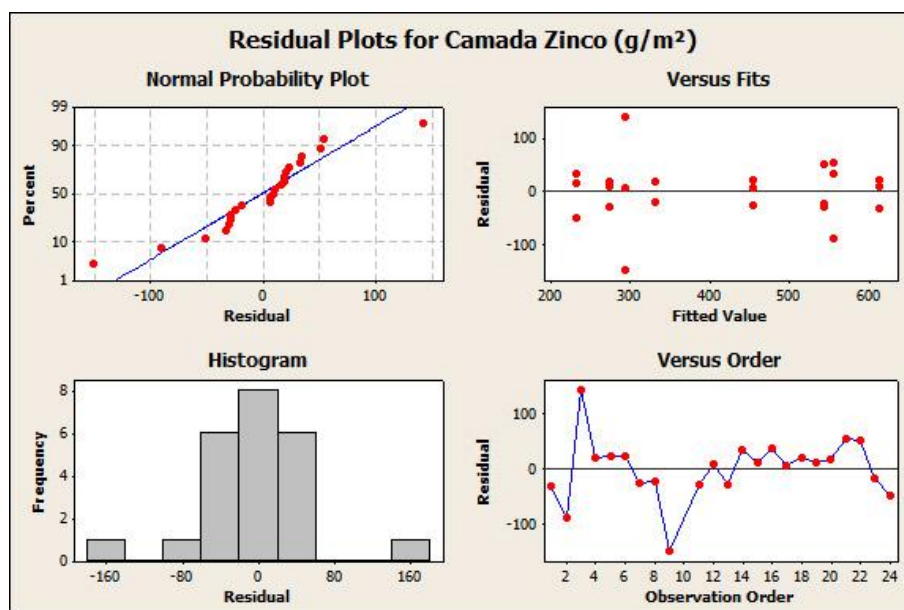


Figura 4.6 Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Camada de Zinco.

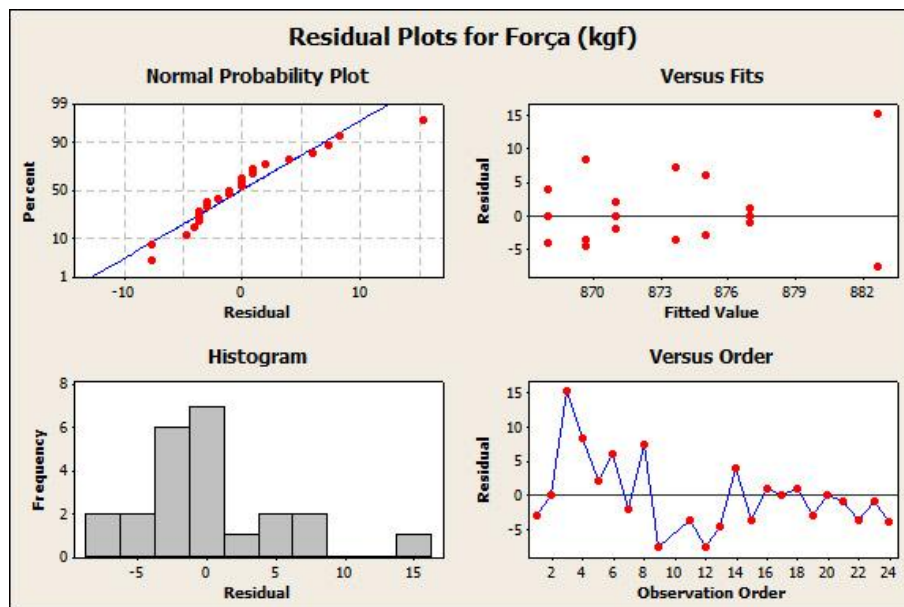


Figura 4.7 Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Força.

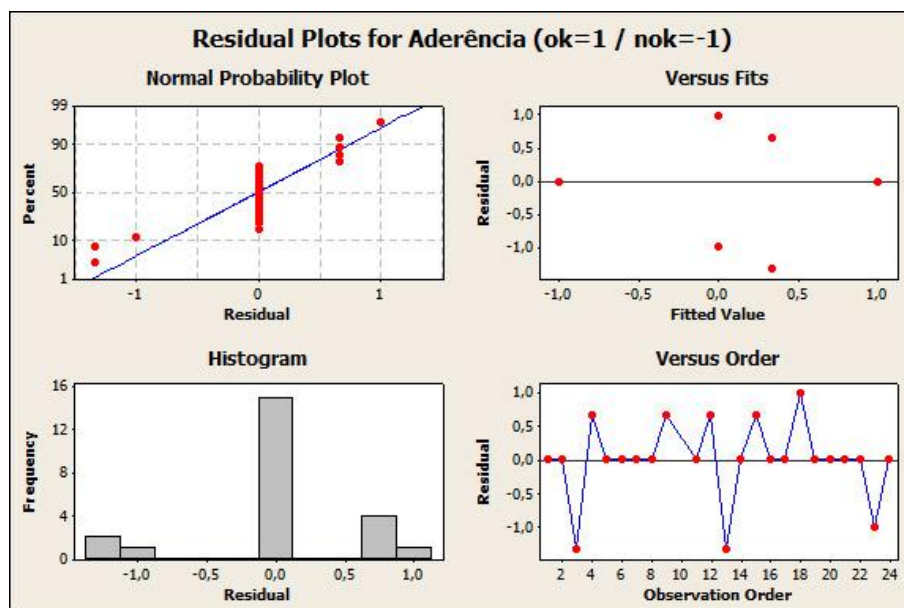


Figura 4.8 Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Aderência.



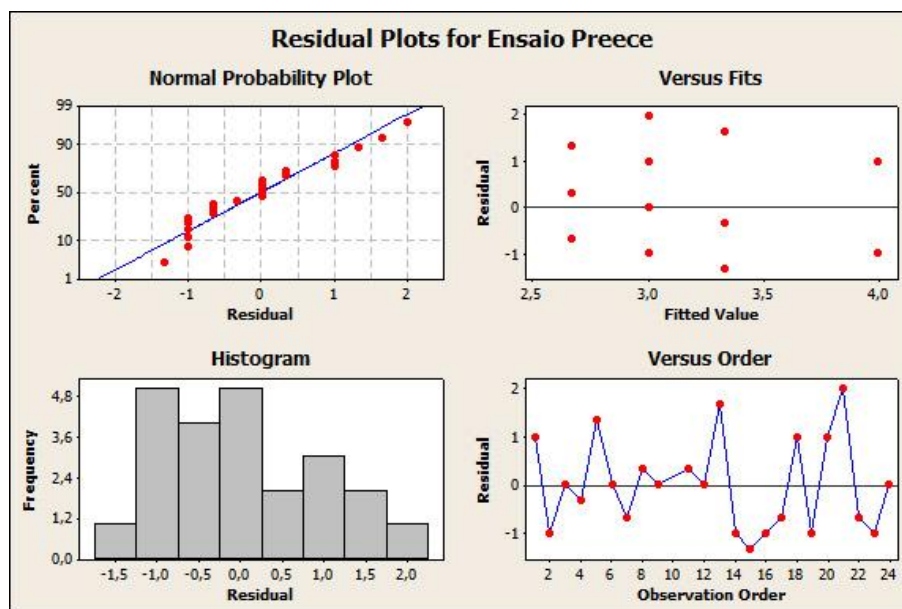


Figura 4.9 Imagem dos gráficos que avalia a confiabilidade dos resultados obtidos para a variável resposta Ensaio de Preece.

Na Figura 4.6 e Figura 4.7, no gráfico “Normal Probability Plot” os pontos estão homogeneamente dispersos ao longo da reta de distribuição normal de probabilidade. Esses indícios se confirmam ao observar-se o gráfico “Histogram”, onde pode se ter uma idéia da ocorrência dos valores e do formato da distribuição segundo a ordem de retirada das amostras. Este tipo de distribuição significa que o erro associado ao processo de retirada e aleatorização de amostras é bastante pequeno.

Seguindo a análise, na Figura 4.8 o gráfico “Normal Probability Plot” revela uma distribuição de resultados concentrada em poucos pontos, o que representa uma maior probabilidade de ocorrência de erros na avaliação da variável resposta Aderência através do procedimento de amostragem e combinação de fatores escolhidos. Esta variável é avaliada através do conceito “passa ou não passa”, onde para amostras aprovadas são classificadas como +1, e as reprovadas como -1, não existindo situações intermediárias. No gráfico “Histogram”, nota-se que os resultados moldam uma distribuição aleatória o que significa um erro associado significativo. A Figura 4.9, no gráfico “Normal Probability Plot”, apresenta um comportamento semelhante ao da Figura 4.8, com uma distribuição mais concentrada em alguns pontos da reta normal de probabilidades e apresentando um gráfico “Histogram” com uma distribuição diferente dos três casos anteriores. Esta última distribuição descreve uma ocorrência de probabilidade de erro significativa que pode interferir na avaliação desta variável resposta.

Dando continuidade a busca pelos melhores parâmetros de processo, é necessário analisar os efeitos de cada fator controlável nas variáveis resposta. As Figuras 4.10 a 4.13 trazem esta informação.

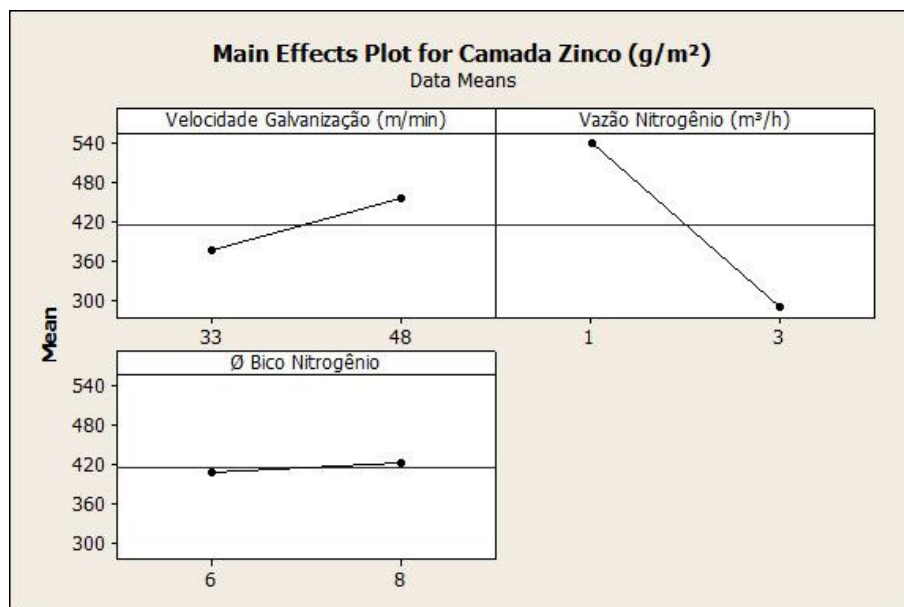


Figura 4.10 Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Camada de Zinco.

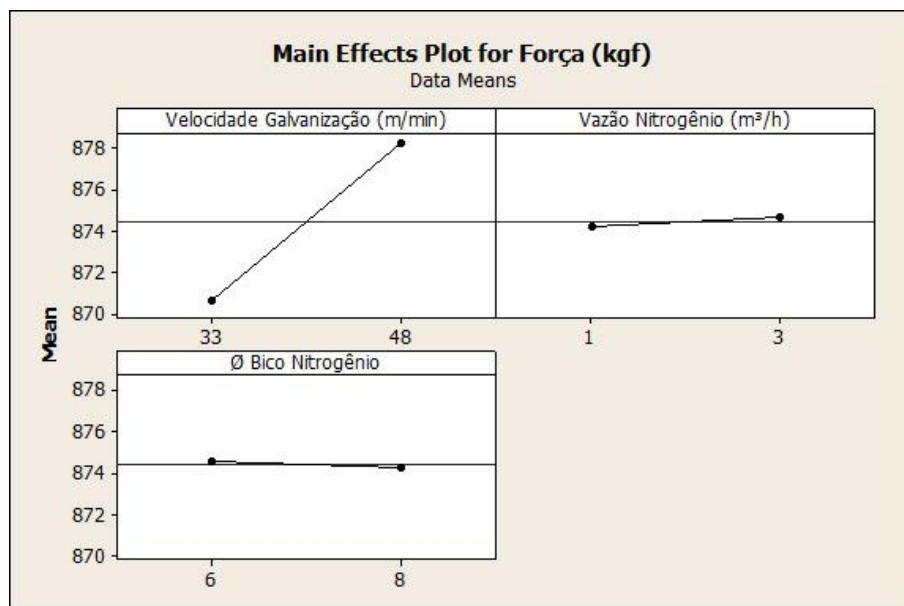


Figura 4.11 Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Força.

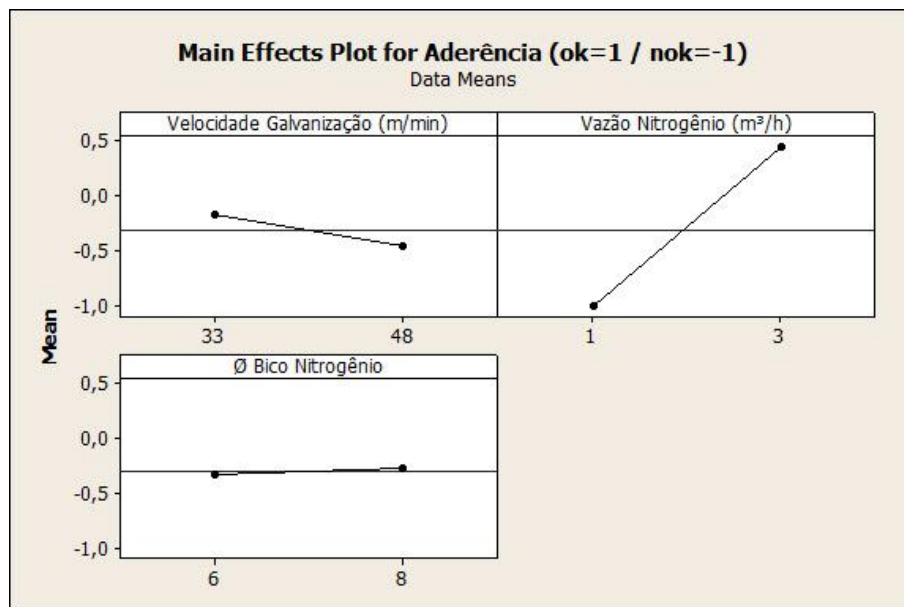


Figura 4.12 Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Aderência.

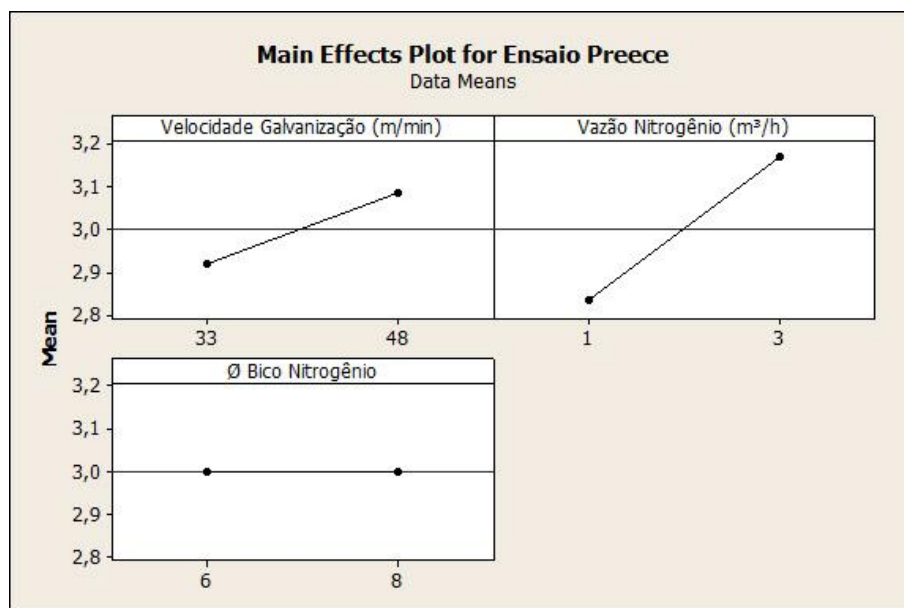


Figura 4.13 Imagem apresentando os principais efeitos causados pela variação dos fatores controláveis na variável resposta Ensaio de Preece.

Na Figura 4.10 observa-se que uma maior vazão de nitrogênio diminui a variável Camada de Zinco severamente, e que um aumento da velocidade de galvanização pode acarretar em um maior arraste de zinco, aumentando a espessura da camada. A Figura 4.11, sugere que o fator com maior influência sobre a variável resposta Força é a velocidade de galvanização, o que pode ser explicado pelo tempo de permanência na cuba de recozimento ativando alguns mecanismos de alívio de tensão. Como conhecimento deve-se salientar que

este produto não passa pelo processo de recozimento, a imersão na cuba responsável por esse fenômeno ocorre somente no seu primeiro tanque, onde a temperatura é de 450° C (+/- 5°C), o que não proporciona o recozimento do material, o que causaria uma queda brusca na força de ruptura.

Seguindo a análise, na Figura 4.12, nota-se que uma vazão elevada de nitrogênio promove uma melhor aderência da camada de zinco depositada, e que a velocidade de galvanização elevada pode prejudicar esta característica. Finalizando esta etapa, a Figura 4.13 demonstra que uma elevada vazão de nitrogênio e velocidade de galvanização favorece a um melhor resultado para a variável resposta Ensaio de Preece.

Nesta análise cada efeito foi estudado individualmente sendo influenciado somente pelos fatores não controláveis do processo. Para este modelo de desenho de projeto considera-se que ocorrem fortes interações entre os fatores controláveis para cada variável resposta. Esta interação é mostrada nas figuras 4.14 a 4.17.

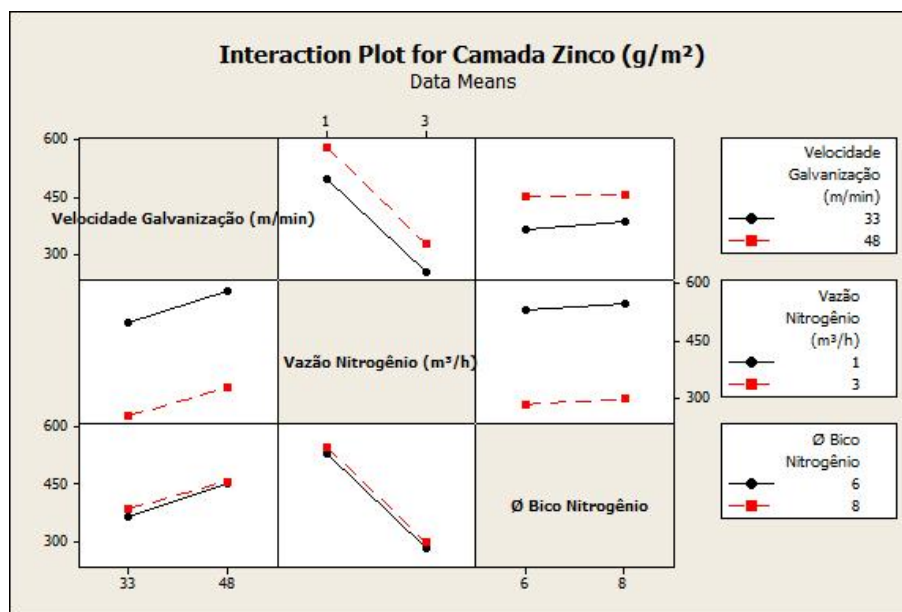


Figura 4.14 Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Camada de Zinco. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.

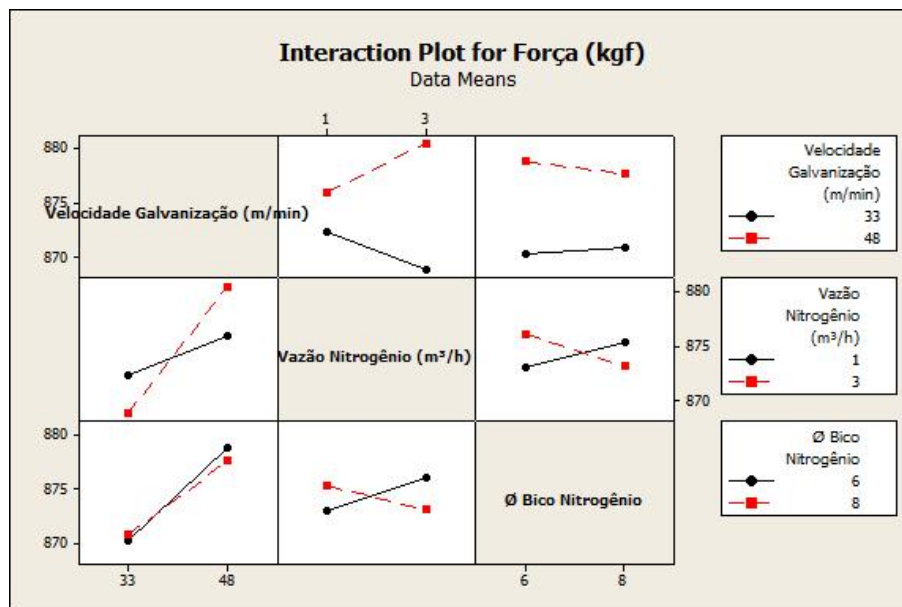


Figura 4.15 Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Força. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.

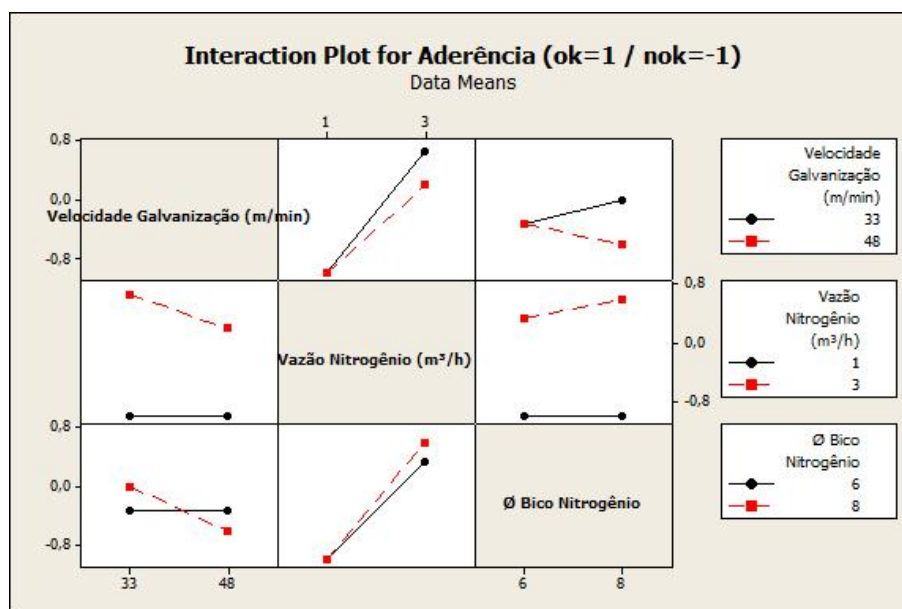


Figura 4.16 Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Aderência. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.

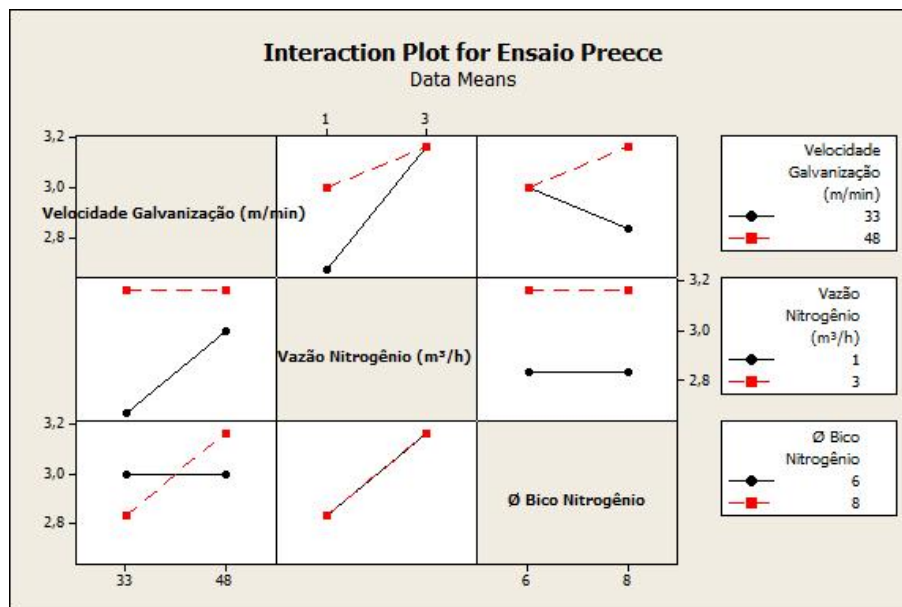


Figura 4.17 Gráfico mostrando a interação entre os fatores controláveis para a variável resposta Ensaio de preece. O fator controlável descrito é variado entre seu nível máximo e mínimo, enquanto os dois fatores restantes são mantidos constantes de acordo com o valor de seu nível máximo e mínimo.

As interações ocorridas entre os fatores controláveis, observadas na Figura 4.14 não alteraram o comportamento de cada fator anteriormente estudado individualmente para variável Camada de Zinco (Figura 4.10), porém sua interação modificou a magnitude da variável resultado. A Figura 4.15 avalia esta interação para a variável resposta Força. Neste caso ocorre uma mudança na taxas de variação do fator controlável velocidade com os fatores bico de nitrogênio e vazão constantes. Seguindo esta análise nota-se que para uma vazão de nitrogênio variando entre 1 e 3 m<sup>3</sup>/h, as taxas de interação dos fatores podem mudar seu comportamento (mudança de inclinação das retas). O comportamento se repete para um diâmetro de bico variando (6 mm e 8 mm).

Na Figura 4.16 observa-se um comportamento do fator controlável vazão de nitrogênio, em relação a variável resposta Aderência, bastante semelhante ao apresentado na abordagem individual mostrada na Figura 4.12. Para os fatores controláveis diâmetro de bico e velocidade de galvanização seu efeito é potencializado com a interação dos fatores, ocorrendo em determinada condição até mesmo uma mudança de comportamento da reta que representa seu efeito. Por último, na Figura 4.17, observou-se que para o fator controlável velocidade de galvanização no seu nível máximo (48 m/min), combinado a variação do diâmetro de bico (6 e

8mm) ocorre uma mudança de inclinação da reta que representa estes fatores no efeito da variável resultado Ensaio de Preece. Os outros feitos provocados pelos fatores controláveis são sentidos através da variação de inclinação da reta que os representa, tornando as variáveis resposta mais ou menos sensíveis a eles, que quando estudadas individualmente.

Cada combinação de fatores controláveis gera um dado valor para a variável resposta. No modelo utilizado para realização desta parametrização é gerada uma figura geométrica que representa o universo de trabalho onde estarão situados os valores para a variável resposta que poderão ser geradas utilizando a oito possíveis combinações dos três fatores controláveis a dois níveis de magnitude. Esta figura geralmente é denominada de janela de trabalho. As Figuras 4.18 a 4.21 mostram as janelas de trabalho para cada variável resposta estudada.

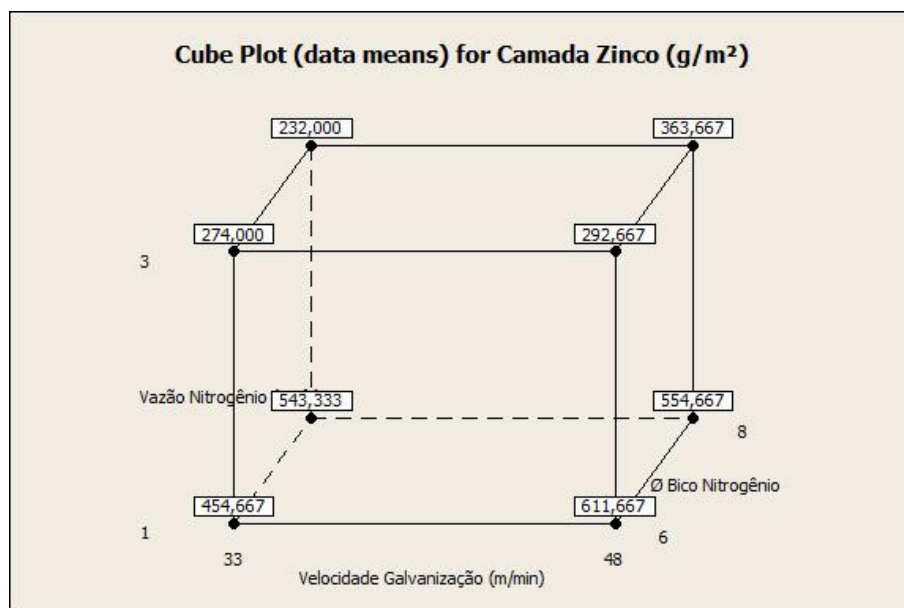


Figura 4.18 Janela de trabalho para a variável resposta Camada de Zinco gerada pelo desenho de projeto.

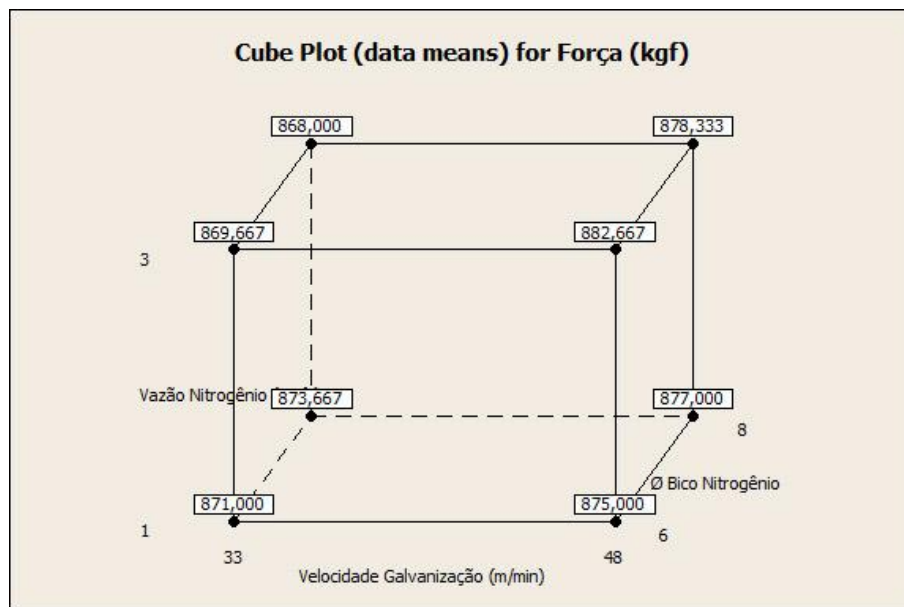


Figura 4.19 Janela de trabalho para a variável resposta Força gerada pelo desenho de projeto.

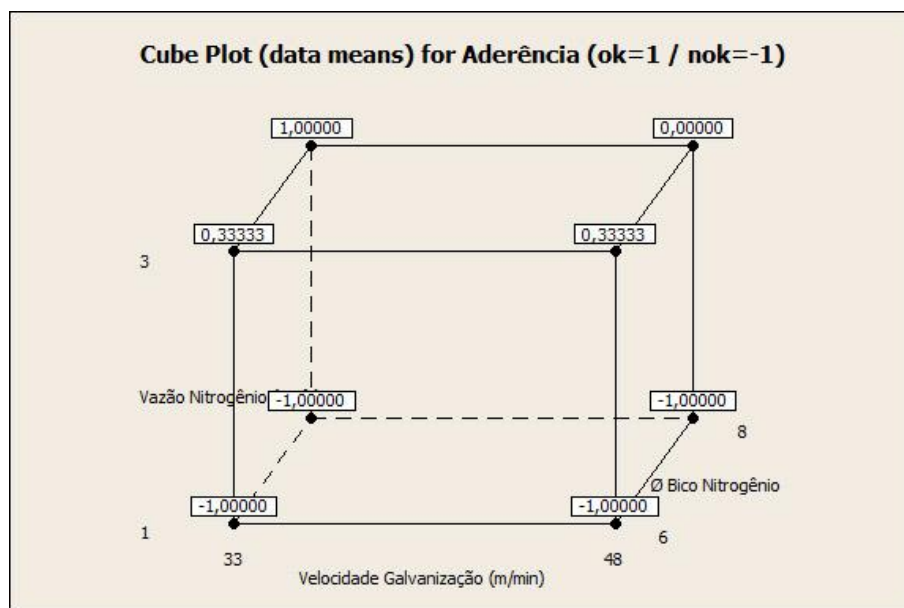


Figura 4.20 Janela de trabalho para a variável resposta Aderência gerada pelo desenho de projeto.



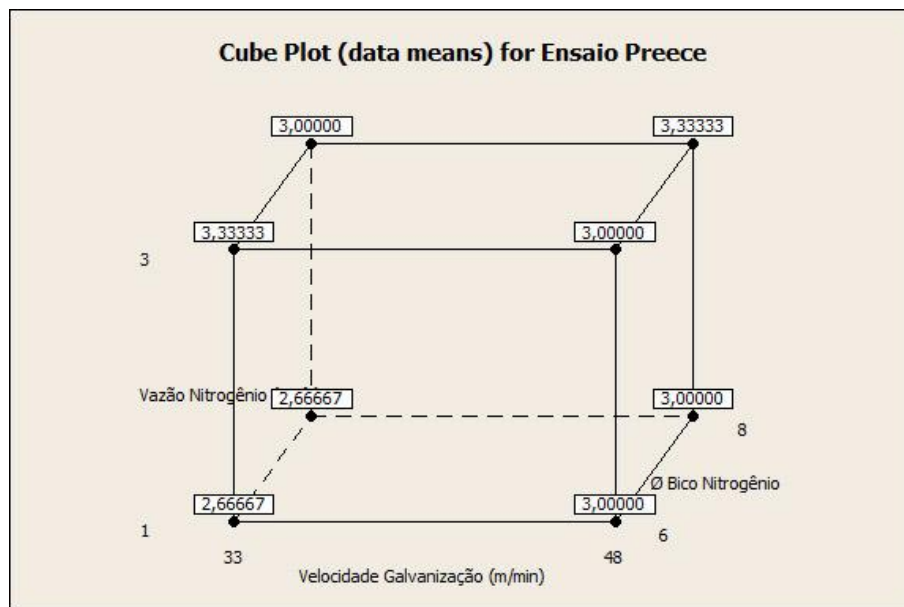


Figura 4.21 Janela de trabalho para a variável resposta Ensaio de Preece gerada pelo desenho de projeto.

Visualizando as janelas de trabalho Figura 4.21 podemos obter uma idéia de qual será nosso universo de possíveis resultados para cada variável resposta estudada. Porém para realizar o elo entre os fatores controláveis e suas interações nas variáveis resposta, é necessário utilizar uma ferramenta dinâmica capaz de descrever simultaneamente o que ocorre ao alterarmos um fator controlável nas variáveis respostas. Esta ferramenta é mostrada na Figura 4.22. Utilizando-se esta o desenho de projeto, definiram-se os parâmetros ideais para a produção do arame galvanizado camada pesada em questão. A Tabela 4.3 resume as magnitudes dos fatores controláveis e a Tabela 4.4, resume a magnitude das variáveis resposta projetadas pelo experimento.

Tabela 4.3 Parâmetros de processo utilizados para produção de arame galvanizado camada pesada.

Parâmetros de processo	Valor
Velocidade de Galvanização (m/min)	40
Vazão de nitrogênio (m <sup>3</sup> /h)	3
Diâmetro de bico (mm)	8

Tabela 4.4 Variáveis Resultado obtidas pelo emprego dos fatores controláveis (Tabela 4.3).

Variável resposta	Valor
Camada de Zinco ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	293
Força (kgf)	873
Aderência (adimensional)	0,5
Ensaio de Preece ( $\text{N}^\circ$ de imersões)	3,15

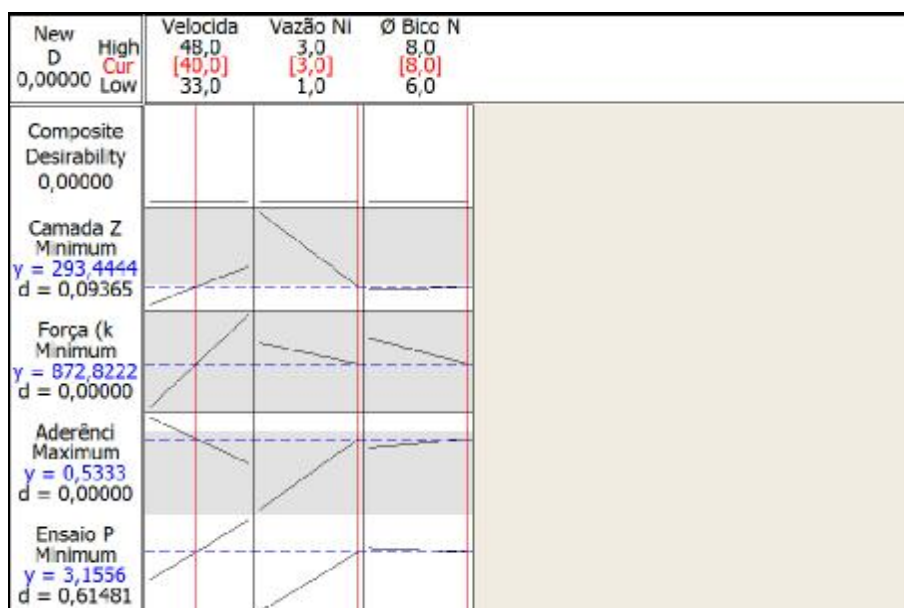


Figura 4.22 Tabela dinâmica responsável por ilustrar o efeito de cada fator controlável nas variáveis resposta. Ao alterar os valores listados em vermelho, seu efeito é visualizado nos gráficos com as retas que o representam e quantificados pelos números em azul.

Na prática, a produção do arame apresentou uma camada de zinco com um valor  $50\text{g}/\text{m}^2$  menor do que o desenhado pelo projeto devido à influência de alguns fatores externos não estudados na análise dos fatores não-controláveis que afetariam o processo de produção. O desconhecimento em relação aos efeitos de fatores como a vibração do sistema de suporte dos bicos de nitrogênio e pedra de imersão pode ter sido decisivo neste resultado. Os outros fatores apresentaram os valores condizentes com o esperado.

## 5. CONCLUSÕES

Observando-se a metodologia empregada para a realização deste trabalho para desenvolvimento de parâmetros de processo para a fabricação de arame camada pesa com a utilização de uma ferramenta DOE (Design of Experiments) pode-se tomar as seguintes conclusões:

- A ferramenta aplicada reduz custos e tempo para amostragem e realização de testes para a definição de parâmetros de processo de produção e na melhoria de parâmetros já existentes em busca de uma melhor qualidade.
- A realização da etapa de identificação e definição de fatores controláveis e fatores não-controláveis atua diretamente no resultado do experimento. É importante realizar um estudo prévio das possíveis interações destes últimos em características desejadas do processo.
- A escolha do modelo de DOE adequado para descrever e atingir as características desejadas deve ser criteriosa. Para estudos iniciais sugerem-se modelos Fatoriais de dois níveis, e em estudos mais detalhados cabem modelos como Taghuchi, Mixture e Response Surface, entre outros.
- A análise estatística utilizada durante o estudo de cada fator controlável é bastante precisa consolidando o método e fornecendo dados suficientes para uma correta escolha de parâmetros.
- Neste desenvolvimento as variáveis resposta Aderência e Ensaio Preece foram prejudicadas na análise devido ao modelo escolhido para avaliá-las. O critério empregado “passa ou não-passa” para a primeira variável resposta não pode ser adequadamente interpretado.

- A velocidade de galvanização é um dos fatores responsáveis por uma maior camada de zinco devido ao arraste produzido na passagem do arame pela cuba de zinco. Uma alta velocidade favorece a produtividade, porém é prejudicial para aderência da camada de zinco.
- O fluxo de nitrogênio realiza uma efetiva raspagem da camada de zinco, executando a retirada do excesso de cobertura metálica de maneira homogênea.
- O arame deve estar alinhado no centro do bico de nitrogênio para evitar uma distribuição não homogênea da camada de zinco evitando defeitos que provoquem uma diminuição da proteção contra a corrosão.
- O fator não controlável vibração, possui uma influência expressiva nos resultados causando uma diminuição na espessura de camada projetada.
- De acordo com os resultados analisados a melhor condição para produção deste arame é utilizando uma velocidade de 40 m/min e uma vazão de nitrogênio de 3m<sup>3</sup>/h com um bico de 8mm de diâmetro. Com estas condições as especificações técnicas são adequadamente atendidas.
- A ferramenta foi adequada para definir os parâmetros de processo. Para evoluir mais detalhadamente na influência de cada um dos fatores pode-se fazer mão da utilização de modelos que garantem uma maior resolução nas respostas desejadas.

Todas as conclusões acima mostram que o método aplicado é bastante eficaz, porém necessita de um detalhado estudo prévio para análise de variáveis resposta e seu método de avaliação, bem como na escolha dos fatores controláveis. Ainda fazendo parte desta etapa de avaliação é necessário estudar previamente as interações dos fatores não controláveis nos resultados objetivados. A diminuição do número de experimentos e nos custos para produzi-los tem grande peso na opção de escolha desta ferramenta. Seguindo uma rotina de planejamento adequado esta é extremamente útil e pode ser explorada de diferentes maneiras objetivando o auxílio em processos industriais e acadêmicos.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser complementado através das seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar a parametrização de outras bitolas de arame camada pesada melhorando a etapa de análise de variáveis e fatores controláveis.
- Efetuar o estudo da influência dos fatores não controláveis nas variáveis resposta obtidas.
- Avaliar os critérios escolhidos para mensurar as variáveis resposta, estudando a metodologia estatística aplicada pela ferramenta, identificando possíveis desvios.
- Utilizar um modelo de DOE capaz de refinar os resultados obtidos identificando fontes de perdas potenciais. Segundo a ferramenta um modelo mais avançado seria ideal para melhorar os parâmetros já obtidos com o modelo fatorial.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. – **Estratégia Seis Sigma**, 1999.

**MINITAB INC.** <<http://www.minitab.com>> Acesso em 22 Março de 2007

HARLOW, E. J.; BRGLEZ, F.; **Design of experiments and evaluation of BDD ordering heuristics**, Published online: 15 May 2001 – Springer-Verlag 2001.

ANDERSON, J. M.; KRABER L. S.; **Keys To Successful Designed Experiments**, Consultants, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, 17 September 1998.

MALLET, ANA; **Curso de Galvanização do Grupo Gerdau**, 2007.

Módulos de capacitação “QUA”, localizados no centro de capacitação da Siderúrgica Riograndense.

SPINELLI, A.; TAVARES, M. R. Cinética de formação de revestimento metálico durante o processo de galvanização. In: 56° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte/MG, 2001.

**MET@LLICA.** <[http://www.metallica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=165](http://www.metallica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=165)> Acesso em 24 de outubro de 2007

GENTIL, V. ; **Corrosão**. 4º edição, Rio de Janeiro, Livros Técnico e Científicos : 2003.

PENHA, F. **O zinco e suas aplicações**. Apresentação da Votorantim Metais, 2004.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. **Hot dip galvanizing for corrosion protection of steel products**.

Site internet <http://www.galvanizeit.org>. Acesso em 2007.