

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SONEGO FERNANDES

REDUÇÃO DO EXCESSO DA CAMADA DE ZINCO EM LINHA DE GALVANIZAÇÃO
DE ARAMES

Recife

2018

LUCAS SONEGO FERNANDES

REDUÇÃO DO EXCESSO DA CAMADA DE ZINCO EM LINHA DE GALVANIZAÇÃO
DE ARAMES

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho

Coorientador: Prof Dr. Edval Gonçalves de Araújo

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

F363r Fernandes, Lucas Sonego.
 Redução do excesso da camada de zinco em linha de galvanização de arames / Lucas Sonego. - 2018.
 107 folhas, il., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho.
 Coorientador: Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
 Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Arame galvanizado. 3. Camada de zinco. 4. Teste fatorial. 5. Sistema de medição. I. Araújo Filho, Oscar Olímpio de (Orientador). II. Araújo, Edval Gonçalves de (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-359

12 de Junho de 2018

“REDUÇÃO DO EXCESSO DA CAMADA DE ZINCO EM LINHA DE
GALVANIZAÇÃO DE ARAMES”

LUCAS SONEGO FERNANDES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO

Prof. Dr. EDVAL GONÇALVES DE ARAÚJO

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA

Prof. Dr. MARINA FUSER PILLIS

AGRADECIMENTOS

A Jesus por cuidar da minha vida, da minha família e por me dar ânimo de seguir o caminho.

A minha esposa, por estar sempre disponível de maneira incondicional. Uma mulher que me faz feliz e que me apoia. Meu presente de Deus.

A minha filha, que tanta alegria e felicidade trouxe a minha família. Que possamos educá-la nos princípios duradouros como recebemos de nossos pais.

Ao meu pai, exemplo de pai, presente em todos os momentos e minha referência de homem. Sempre encarou todas as circunstâncias da melhor maneira possível, dando leveza e tranquilidade a minha família.

A minha mãe, exemplo de mãe cuidadosa, amorosa e querida. Sempre me incentivou a estudar, a superar as fraquezas e não desistir.

Aos meus irmãos Sérgio e Natália, que sempre me cuidaram com tanto carinho e alegria.

A minha grande família, espalhada pelo mundo, que nos apoia a todo momento.

Ao Dr. Oscar Olimpio, por acreditar no projeto, contribuir para realização deste trabalho e por acreditar e incentivar a tão potencial parceria entre a indústria e a academia.

Ao Dr Edval de Araújo, por contribuir de forma decisiva neste projeto, trazendo conhecimentos e técnicas essenciais para o processo experimental.

Ao Jamilson Farias da Silva e ao Eli André de Barros Filho, por acreditarem, incentivarem e apoiarem a realização deste trabalho.

A Herbert Lerthiere que contribuiu significativamente com a programação dos testes e realização dos ensaios físicos.

Aos colegas de trabalho, Hugo Freitas e Demétrio Leite pelo apoio e incentivo.

A todos os colegas e professores do PPGEM da UFPE pelo convívio e aprendizado.

RESUMO

Neste trabalho, o estudo do processo de fabricação de arames galvanizados em linha contínua, bem como da influência das principais variáveis relacionadas à obtenção da camada de zinco foi realizado a fim de reduzir o consumo de zinco e a variabilidade do processo. Um experimento fatorial completo de 4 fatores (velocidade do arame, tipo de gaxeta, tempo de vida da gaxeta e curso de imersão), 2 níveis e 3 réplicas foi realizado para a identificação das principais variáveis e seus efeitos e, para garantir a confiabilidade dos resultados. Nos testes, foi utilizado arame de aço SAE 1406, com diâmetro de 1,60mm e com rota monitorada por inspeções de qualidade a fim de garantir os menores ruídos no experimento. Os principais fatores/níveis na ordem de significância foram: tipo de gaxeta, tempo de vida da gaxeta, curso de imersão e velocidade. Através de um teste de validação dos resultados, foi observada uma redução do consumo de zinco em até 40% e uma redução de 84% na variabilidade do processo, garantindo o atendimento à norma ASTM A123/A123M.

Palavras-chave: Arame galvanizado. Camada de zinco. Teste fatorial. Sistema de medição.

ABSTRACT

In this paper, the study of the manufacturing process of galvanized wires in continuous line, as well as of the effect of the main variables related to the zinc layer formation was performed aiming to reduce the zinc consumption and the process variability. A full factorial test using 4 factors (wire speed, gasket type, gasket life time, immersion course), 2 levels and 3 replicates was performed to identify the main variables and their effects. In the tests, a steel wire SAE 1406, with diameter of 1,60 mm, microrolled form wire rod and with monitored process route by quality inspections in order to guarantee the lowest nuisance in the experiment. The main factors in the significance order were: gasket type, gasket life time, immersion course and wire speed. It was not observed any significant factor in zinc layer variability. By a validation test of the results, was observed zinc consumption reduction up to 40% and reduction of the process variability up to 84%, complying the standard ASTM A123/123M.

Keywords: Galvanized wire. Zinc zayer. Factorial test. Measuring system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxo do processo de obtenção do aço (Gerdau S A, 2016)	19
Figura 2 –	Obtenção do ferro gusa em alto fornos (ENGHAG, 2009)	20
Figura 3 –	Fluxograma esquemático do processo de refino (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016)	21
Figura 4 –	Esquema de um forno básico a oxigênio (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2017)	22
Figura 5 –	Redução de seção do tarugo no processo de laminação a quente (ENGHAG, 2009)	24
Figura 6 –	Resfriamento do fio máquina com o método Stelmor (ENGHAG, 2009)	26
Figura 7 –	Variação das propriedades mecânicas pelo processo de trefilação (SILVA, et al, 2010)	27
Figura 8 –	Decapador mecânico de fio máquina por flexões (ENGHAG, 2009)	30
Figura 9 –	Redução de área transversal através de fieira (ENGHAG, 2009).....	31
Figura 10 –	Regiões da fieira (CETLIN, 1982)	32
Figura 11 –	Alteração da configuração dos grãos na redução de área do arame (CETLIN, 1982)	33
Figura 12 –	Caixa de fieira convencional com refrigeração da fieira (ENGHAG, 2009)	34
Figura 13 –	Defeito tipo pé de corvo na superfície do arame (ENGHAG, 2009)	35
Figura 14 –	Máquina de trefila cumulativa de 2 passes de redução (ENGHAG, 2009)	35
Figura 15 -	Máquina de trefila multipasses com braços de controle (ENGHAG, 2009)	36
Figura 16 -	Trios de rolos ovalizadores e acabadores	37
Figura 17 -	Microcassete em máquina multipasse de trefilação	38
Figura 18 -	Rugosidade superficial de arame trefilado com fieiras e arame trefilado com microcassete (ENGHAH, 2009)	39
Figura 19 -	Arames trefilados armazenados em estocador (esquerda), em bobinas (centro) e em carretéis (direita)	40

Figura 20 -	Gráfico do tempo de decapagem em função da temperatura e concentração do ácido clorídrico (ENGHAG, 2009)	43
Figura 21 -	Relação entre tempo de decapagem, teor de ferro no banho de ácido e concentração do ácido (ENGHAG, 2009)	43
Figura 22 -	Tanque de decapagem química em linha de galvanização contínua de arames	44
Figura 23 -	Lavagem de arames em linha de galvanização contínua pelo processo de transbordamento	45
Figura 24 -	Camadas intermetálicas de FeZn e suas fases (1) gama (γ), (2) delta (δ) e (3) zeta (ζ) (MARDER, 2000)	50
Figura 25 -	Cronologia da formação das camadas intermetálicas em 4 tempos (MARDER, 2000)	51
Figura 26 -	Espessura das camadas das fases em função do tempo (JORDAN et al, 1997)	52
Figura 27 -	Nucleação da camada zeta (ζ) nos picos da superfície rugosa (LORENO et al, 1993)	54
Figura 28 -	Crescimento da camada de zinco em função do teor de silício no aço (CAMPANHER, 2009)	55
Figura 29 -	Influência da temperatura do banho de zinco na espessura de camada (BICAO et al, 2008).....	57
Figura 30 -	Arraste hidrodinâmico do arame na saída do banho de zinco (LORENO et al, 1993).....	58
Figura 31 -	Esquematização da raspagem do excesso de zinco pelo sistema de prensa gaxeta (ENGHAG, 2009).....	60
Figura 32 -	Dispositivos que compõem o sistema de raspagem por nitrogênio (CAMPANHER, 2009)	61
Figura 33 -	Fluxograma do procedimento experimental	63
Figura 34 -	Fluxograma do procedimento experimental	68
Figura 35 -	Exemplo de gráfico de efeitos para um experimento fatorial com 2 fatores quantitativos e 1 fator qualitativo	69
Figura 36 -	Exemplos de (a) gráfico de contorno e (b) superfície de resposta	70
Figura 37 -	Distribuição de frequência de um processo com valor nominal e limites de especificação	70

Figura 38 -	Potência estatística e sensibilidade do experimento para o número de réplicas considerado	84
Figura 39 -	Efeitos dos principais fatores para a camada de zinco	88
Figura 40 -	Efeitos das interações para a camada de zinco	88
Figura 41 -	Gráfico dos efeitos padronizados para α de 0,50 fatores e interações	89
Figura 42 -	Pareto dos efeitos padronizados para todos os fatores e interações considerados	90
Figura 43 -	Pareto dos efeitos padronizados para todos os fatores e interações considerados	90
Figura 44 -	Probabilidade normal do experimento análise de residuais.....	91
Figura 45 -	Histograma dos resíduos análise gráfica da normalidade dos dados.....	91
Figura 46 -	Gráfico dos resíduos versus valores preditos pelo modelo de regressão do experimento.....	92
Figura 47 -	Gráfico de cubo para a média da variável resposta do experimento fatorial para a camada de zinco.....	94
Figura 48 -	Gráfico de contornos para o tipo de gaxeta de grafite	95
Figura 49 -	Gráfico de contornos para o tipo de gaxeta de fibra de vidro	95
Figura 50 -	Gráfico de contorno para avaliação do tempo mínimo de intervalo entre intervenções operacionais na gaxeta para gaxeta de grafite e velocidade de 80 m/min	97
Figura 51 -	Gráfico do pareto dos efeitos dos fatores na variabilidade do processo de obtenção da camada de zinco	98
Figura 52 -	Histograma da capacidade do processo para validação do experimento	99
Figura 53 -	Histogramas de comparação do processo antes e depois das alterações em g/m ²	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Fases da liga FeZn	49
Tabela 2 –	Efeito do teor de carbono na reação do ferro com o zinco	56
Tabela 3 –	Sequência não aleatória de um experimento fatorial completo com 2 fatores e 2 níveis	64
Tabela 4 –	Dados típicos de um experimento com um único fator	65
Tabela 5 –	A Análise de Variância para um fator único	66
Tabela 6 –	Exemplo de experimento fatorial 2 ² para cálculo dos efeitos e interações	67
Tabela 7 –	Exemplo de experimento fatorial 2 ² para cálculo dos efeitos e interações com respostas fictícias	68
Tabela 8 –	Exemplo de balanço de incertezas de sistema direto de medição ..	75
Tabela 9 –	Instrumentos de medição utilizados no experimento e suas especificações	75
Tabela 10 –	Lista de fatores e seus respectivos impactos no processo	76
Tabela 11 –	Fatores definidos para o experimento e seus níveis com suas limitações	77
Tabela 12 -	Listagem dos fatores ruído a serem controlados no experimento ..	78
Tabela 13 -	Controles dos fatores de ruído e definição do bloco	79
Tabela 14 -	Tabela do experimento aleatorizado com os 4 fatores e seus níveis	80
Tabela 15 -	Tempo total requerido pelo teste, câmbios e tempo para coleta de amostras.....	81
Tabela 16 -	Incerteza padrão, combinada e expandida dos instrumentos de medição	82
Tabela 17 -	Incertezas relacionadas às medições diretas e incerteza do sistema indireto de medição	83
Tabela 18 -	Incerteza do sistema de medição após ajustes na solução ácida e retreinamento	83
Tabela 19 -	Respostas da camada de zinco em função dos tratamentos do experimento	84
Tabela 20 -	Análise de variância no experimento fatorial de 4 fatores e 2 níveis	86

Tabela 21 -	Coefficientes do modelo de regressão e correlação com o fenômeno real	93
Tabela 22 -	Níveis dos fatores para alvo mínimo de 55,51 a 56 g/m ²	96
Tabela 23 -	Predição do otimizador para tempo máximo de gaxeta sem necessidade de intervenções	97
Tabela 24 -	Capabilidade do processo sob fatores com níveis ajustados conforme resultado do experimento	99
Tabela 25 -	Capabilidade do processo antes das alterações na configuração dos fatores e rotinas operacionais	100

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	PROCESSO SIDERÚRGICO.....	18
3.1.1	Processo de Redução nos Alto Fornos.....	19
3.1.2	Refino dos Aço.....	21
3.1.3	Lingotamento.....	23
3.1.4	Laminação.....	23
3.1.5	Trefilação.....	27
3.1.6	Desbobinamento do Fio Máquina.....	28
3.1.7	Decapagem do Fio Máquina.....	28
3.1.8	Trefilação Propriamente Dita.....	31
3.2	GALVANIZAÇÃO.....	40
3.2.1	Limpeza Superficial dos Arames.....	41
3.2.2	Fluxagem.....	45
3.2.3	Zincagem.....	46
3.2.4	Passivação.....	47
3.3	A CAMADA DE ZINCO.....	48
3.3.1	Fase Zeta (ζ)	49
3.3.2	Fase Delta (δ)	49
3.3.3	Fase Gama (γ)	50
3.3.4	Fase Eta (η)	50
3.4	FORMAÇÃO DA CAMADA DE ZINCO.....	51
3.4.1	Fatores Importantes na Formação da Camada de Zinco.....	53
3.4.1.1	Características da Superfície do Arame.....	53
3.4.1.2	Composição Química do Aço.....	54
3.4.1.3	Temperatura do Banho de Zinco.....	56
3.4.1.4	Tempo de Imersão.....	57
3.4.1.5	Velocidade de Linha.....	58
3.4.1.6	Composição Química do Banho.....	59
3.4.1.7	Método de Extração.....	59

3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL.....	61
3.5.1	Análise de Variância.....	65
3.5.2	Análise dos Efeitos e Interações dos Fatores.....	67
3.5.3	Predição dos Efeitos.....	69
3.5.4	Capabilidade de Processos.....	70
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	72
4.1	MATERIAIS.....	72
4.2	MÉTODO.....	73
4.2.1	Análise do Sistema de Medição de Camada de Zinco.....	73
4.2.2	Definição dos Fatores.....	76
4.2.3	Fatores Ruído.....	78
4.2.4	Blocagem, Resolução, Aleatorização e Replicação.....	79
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
5.1	SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	82
5.2	EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO.....	83
5.3	VALIDAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	98
6	CONCLUSÕES.....	101
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS.....	104

1 INTRODUÇÃO

O mundo siderúrgico mudou. O cenário do aço até 2010 não é mais o mesmo devido a fatores importantes que conduziram a uma queda contínua e preocupante dos preços dos produtos de aço. Investimentos em produtividade atrelados à tecnologia de processos e automação de ponta embarcada em novos maquinários elevaram a capacidade produtiva de aço de forma a exceder a demanda em aproximadamente 600 milhões de toneladas frente a uma produção mundial de 1,628 bilhões de toneladas em 2016 de acordo com a *World Steel Association*. De acordo com a mesma fonte, entre 2016 e 2017, a utilização da capacidade mundial de aço permeou os 70% e a China, que contribuiu com quase 50% da produção mundial em 2016, estabilizava o mercado global com seu autoconsumo de aço e não haviam grandes preocupações no setor. Porém, o consumo interno chinês tornou-se menor do que sua produção interna, gerando um excedente mantido substancialmente por empresas estatais com fluxo de caixa negativo e consequentes práticas desleais no mercado. Os preços do aço caíram por consequência desse desbalanceamento, fomentando uma concorrência nunca antes vista no mercado de aço global. De acordo com o Instituto Aço Brasil, seria preciso reduzir em 300 milhões de toneladas o excedente de aço no mundo para atingir algum equilíbrio. No Brasil, soma-se aos fatos descritos a entrada de novas empresas produtoras de aço nos últimos anos.

Segundo a *World Steel Association*, o Brasil, que produziu 30,2 milhões de toneladas de aço em 2016, tornou-se um campo de batalha com fortes concorrências internas, disputa de mercado com novos entrantes e combate comercial e político contra importações. Agrava-se o cenário nacional o fato da exponencial evolução tecnológica tornar obsoletas máquinas com apenas três anos de uso, colocando em situação vantajosa os novos entrantes com investimentos mais recentes. Difícil angariar créditos e convencer acionistas para a renovação de parques à volta de tantos desafios e incertezas.

No que tange a produtos siderúrgicos agropecuários, o mesmo discurso é válido com apenas um importante diferencial: a demanda no Brasil ainda é favorável. O preço de insumos em geral tem sido incrementado ano após ano e o principal deles para a produção de arames agropecuários, o zinco, tem sofrido com as variações cambiais já que é negociado pela *London Metal Exchange*, mercado de futuros.

Não surgem outras alternativas senão aumentar eficiências em performance reduzindo ativos, atualizando estratégias, desenvolvendo soluções inovadoras. No Brasil, ainda há constante necessidade de aplicar-se aos processos industriais ferramentas e técnicas experimentais e de gestão para evitar desperdícios. Tais perdas são vitais para a saúde financeira do negócio, sendo fundamental para alavancar possibilidades de manobra de preço, combatendo as importações e assegurando a competitividade internacional.

A primeira alternativa para a produção de arames galvanizados é a utilização correta e sem desperdícios dos insumos. O principal deles é o zinco que, segundo a *London Metal Exchange*, seu preço aumentou em aproximadamente 60% entre 2015 e 2016, chegando nos atuais 2.646 dólares por tonelada. Com o principal objetivo de aumentar a vida útil do arame de aço, o zinco agrega valor ao produto como metal de sacrifício, protegendo o aço contra processos corrosivos em função da quantidade por unidade de área superficial de arame, g/m^2 . O desperdício desse metal, por perdas no processo ou por *overquality*, torna-se um fator significativo na redução da competitividade, o que eleva o custo do produto, reduzindo, assim, a rentabilidade do negócio.

O processo de galvanização de arames é contínuo e, como um dos processos de zincagem, permite a produção simultânea de mais de um arame, onde os fios de aço atravessam etapas de preparação das superfícies a serem galvanizadas que antecedem a zincagem – quando o zinco entra em contato com a superfície do arame e gera a liga metálica FeZn, dando início à formação da camada protetiva. Mantido a temperaturas controladas em cubas cerâmicas ou metálicas, o zinco reage com o ferro do arame, formando a liga intermetálica e o arame, por sua vez, ao sair da cuba, por arraste hidrodinâmico, adere zinco puro sobre a camada de FeZn. Assim, a raspagem de parte desse zinco puro na saída da cuba é que definirá a espessura da camada final do arame.

De acordo com a norma ASTM A641, os arames galvanizados são divididos em classes de acordo com a quantidade de zinco que possuem e diâmetro, ou seja, quanto à resistência à corrosão. Ressalta-se que as camadas exigidas não possuem limite superior, sendo a exigência voltada para o atendimento do limite inferior. Dessa forma, a quantidade zinco acima do limite mínimo caracteriza-se como desperdício.

Para os arames com camada acima de 190 g/m^2 , há tecnologia para medição de camada, sem que haja a necessidade da realização de ensaios destrutivos, sendo assim possível exercer

um controle *online* na linha de produção e, conseqüentemente, atuar em eventuais desvios. Porém, camadas de zinco abaixo de 190 g/m², as de Classe 1, também chamadas de camadas leves, são medidas através de ensaios destrutivos, impossibilitando a atuação rápida nos desvios.

Portanto, para que se evitem desperdícios e seja possível elevar a rentabilidade do negócio, faz-se necessário o conhecimento do processo bem como dos fatores que afetam a formação da camada de zinco e sua variabilidade.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é reduzir a camada de zinco que excede a especificação da norma ASTM A123/A123M (Padrão para especificação para coberturas de zinco em produtos de ferro e aço) e reduzir sua variabilidade para os arames galvanizados de 1,60 mm de aço SAE 1406.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os principais fatores na obtenção da camada de zinco e na sua variabilidade com o uso de experimento fatorial completo.
- Definir a configuração de processo mais adequada para obtenção de menores camadas de zinco atendendo à especificação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

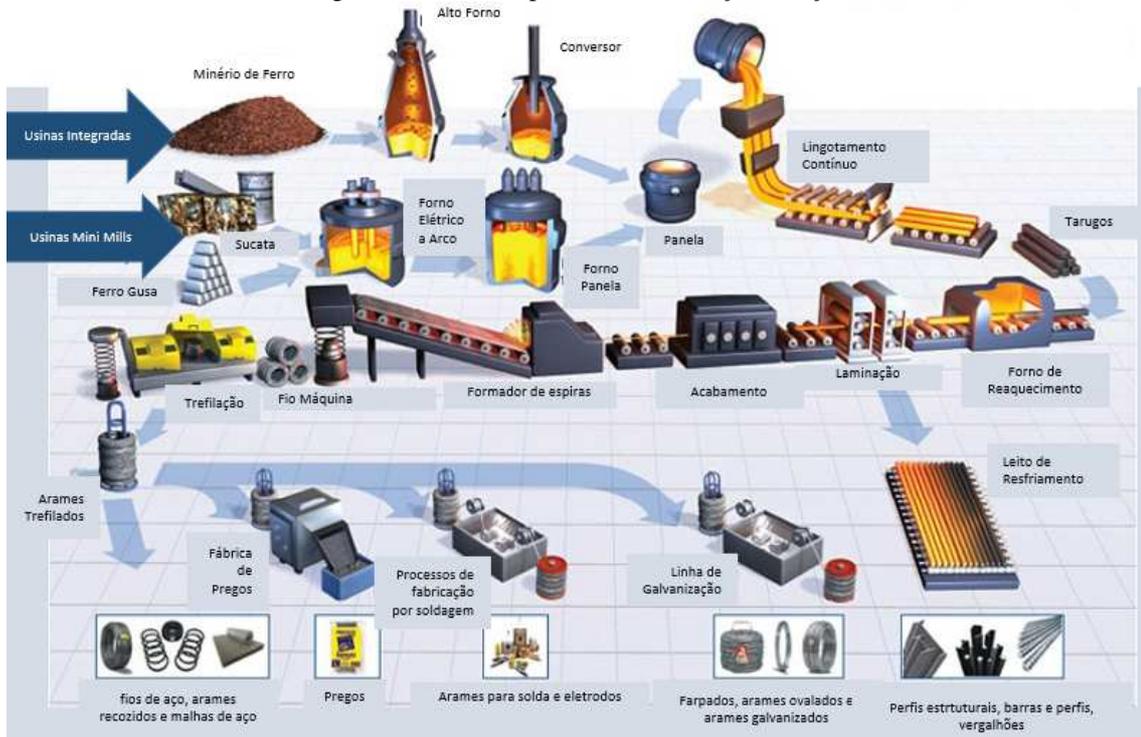
Na Revisão Bibliográfica, será abordado o processo de obtenção do arame galvanizado classe I desde a aciaria, laminação a quente, trefilação, retrefilação e galvanização. Serão apresentadas também as principais etapas do processo de zincagem em linha contínua de arames e as principais propriedades do arame galvanizado bem como seus possíveis defeitos.

3.1 O PROCESSO SIDERÚRGICO

As usinas siderúrgicas são divididas em integradas e semi-integradas ou “mini mills”. Por integrar todas as etapas desde a redução, refino e conformação mecânica, as usinas integradas são responsáveis por grandes volumes de produção e partem da produção do ferro primário, conhecido como ferro gusa, obtido a partir do minério de ferro. Pela denominação, as usinas “mini mills” não possuem a etapa de redução e o refino é feito substancialmente a partir de sucata metálica, podendo operar integralmente como grande recicladoras caso não operem com nenhum percentual de ferro gusa. Como a etapa de redução depende de equipamentos de grandes dimensões e por consequência requerem uma localização geográfica adequada para reduzir impactos à vida urbana, as usinas *mini mills* têm importante vantagem estratégica por poderem ser instaladas em zonas mais próximas a grandes centros, perto de fornecedores de sucata sejam eles indústrias mecânicas, metal mecânicas, etc.

De acordo com a Figura 1, o processo de produção do ferro gusa se inicia no alto-forno, onde a principal matéria prima é o minério de ferro. O produto da redução, o ferro gusa sólido, é também utilizado como uma das matérias primas de aciarias de uma usina *mini mill*, bem como a sucata metálica.

Figura 1 – Fluxo do processo de obtenção do aço.



Fonte: (Gerdau S.A., 2016)

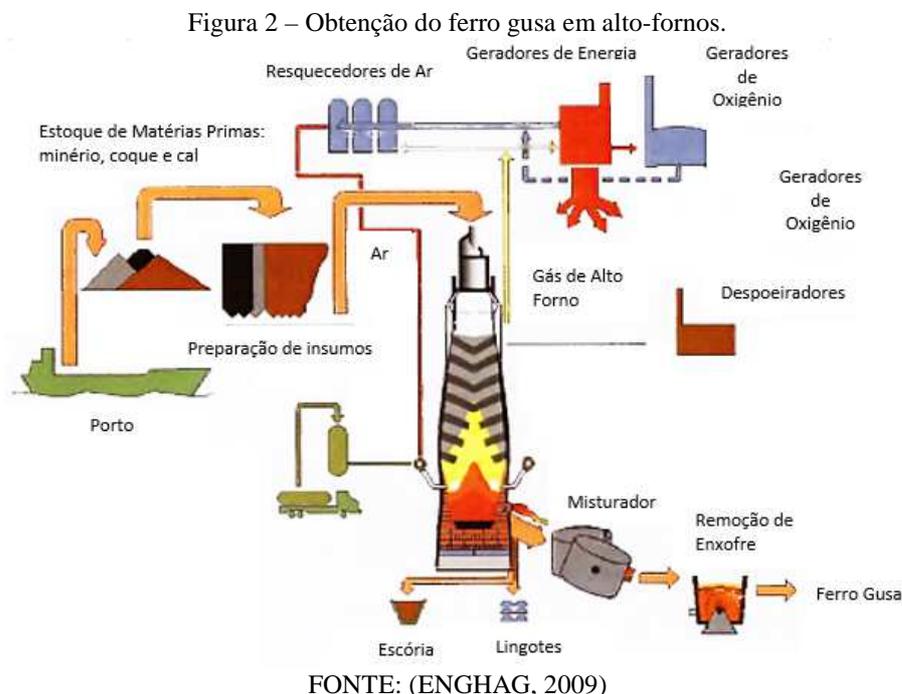
O lingotamento representa o último processo das aciarias de qualquer usina, onde ocorre o processo de solidificação do aço em forma de tarugos. Os tarugos, por sua vez, são aquecidos em fornos de reaquecimento até uma temperatura determinada para laminação, processo que transforma a seção transversal através de reduções em série e realiza o primeiro acabamento no processo siderúrgico. Tanto fio máquina quanto barras e perfis são produtos da laminação e passam por processos de resfriamento em leitos para controle da formação da microestrutura desejada. Os produtos laminados são utilizados em grande escala na construção civil. A próxima etapa do processo é a trefilação, onde a matéria prima oriunda da laminação, o fio máquina, também sofre reduções de seção transversal, porém a transformação é a frio. O produto gerado, o arame trefilado, também pode ser matéria prima para processos subsequentes, como: galvanização, fábrica de pregos, farparias, fábrica de telas eletrosoldadas, etc. Neste trabalho, será focado o processo de obtenção do arame galvanizado.

3.1.1 Processo de Redução nos Alto-Fornos

Toda a cadeia produtiva desde a extração até os processos de acabamento é norteadada por exigências legais, normas técnicas e por requerimentos de usuários na aplicação dos produtos de aço e de aço contido.

A extração do minério de ferro é a primeira etapa do processo siderúrgico e matéria prima para o produto dos alto-fornos, o ferro gusa. Pela alta concentração de oxigênio contido no minério, a função dessa etapa é de redução, utilizando o carbono como principal agente redutor. As principais fontes de ferro para a indústria siderúrgica são: magnetita (Fe_3O_4) – o tipo de minério mais rico em ferro; e hematita (Fe_2O_3) – minério de maior emprego na indústria do aço (SILVA *et al.*, 2010).

Os insumos básicos e necessários para o processo de redução em alto-forno, a partir da Figura 2.2, são tanto o ferro gusa, principal matéria prima, quanto o coque (carvão) e cal. Penetrando pela parte inferior do forno, pelas ventaneiras, o ar altamente aquecido fornece energia para a combustão do carbono para então ocorrer as reações de redução do óxido de ferro em ferro metálico, através do monóxido de carbono. O metal líquido goteja e é coletado em um cadinho localizado no fundo do forno. Todos os outros equipamentos mostrados na Figura 2 são fundamentais para a viabilidade técnica e ambiental de um alto-forno, como por exemplo o despoeiramento – que combate o impacto ambiental causando pelos resíduos gerados no processo.



Pela evolução na legislação ambiental e também pela corrida a maiores rentabilidades, começou a ser utilizado carvão pulverizado (PCI) para aumento da eficiência energética nos alto-fornos (SILVA *et al.*, 2010). O ferro gusa obtido possui concentração de carbono alta, 4,0 a 4,5%, inviabilizando os processos subsequentes de laminação ou trefilação e também possui

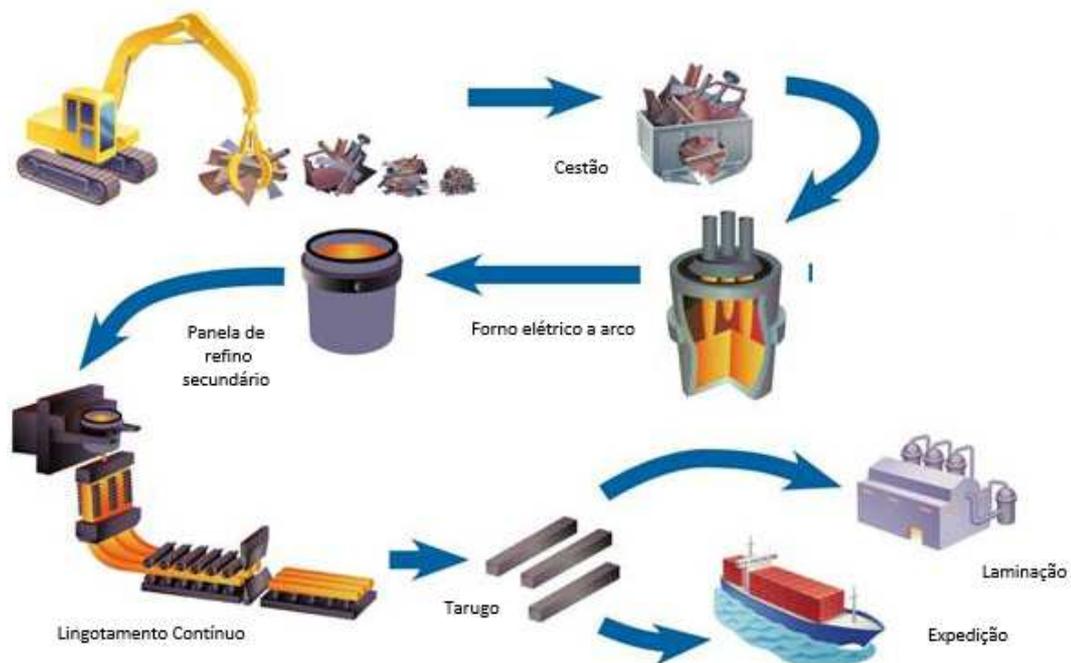
teores deletérios de silício, manganês, fósforo e enxofre (ENGHAG, 2009). Portanto, um macroprocesso intermediário, não menos importante, torna-se necessário para reduzir o conteúdo de carbono contido no ferro gusa, o refino do aço.

3.1.2 Refino do aço

A etapa posterior à redução do minério de ferro na cadeia produtiva siderúrgica é o refino, que é processado nas aciarias. O processo é dividido em refino primário e secundário, finalizando-se com o lingotamento contínuo.

A preparação da matéria prima das aciarias é feita no pátio de sucata, onde é separada e condicionada conforme ordenação necessária para as receitas dos aços a serem produzidos. Pela Figura 3, a receita é armazenada no cestão, onde ferro gusa e sucata metálica podem coexistir, dependendo da estratégia local de negócio e do tipo de forno para o refino primário.

Figura 3 – Fluxograma esquemático do processo de refino



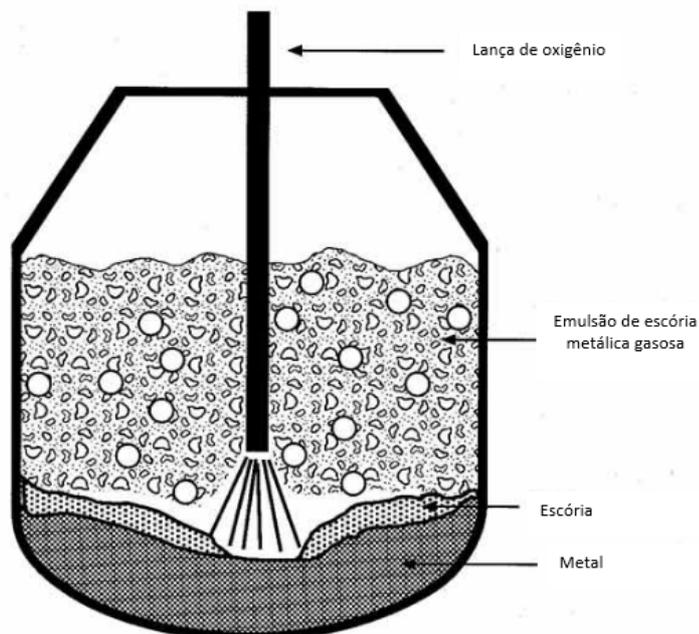
FONTE: (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).

No forno panela, representado na Figura 3 como forno elétrico a arco, a matéria prima é fundida via energia elétrica através de eletrodos de alta potência. O arco voltaico gerado entre os eletrodos e a sucata metálica gera o calor para a fusão transmitido por radiação, atingindo aproximadamente 4000°C (GHOSH e CHATTERJEE, 2010). Nos fornos elétricos a arco

também pode ser usado ferro gusa como matéria prima junto com a sucata metálica, sendo uma decisão técnica com base em performance técnica e financeira do negócio.

A Figura 4 mostra uma outra alternativa ao forno elétrico a arco que é o forno básico a oxigênio, mais conhecido como conversor LD (Lins Donawitz), sendo que a matéria prima já deve estar fundida no interior do forno – o que é viável para usinas integradas. Nesse processo, uma lança vertical sopra oxigênio de alta pureza à velocidade supersônica ocorrendo reação química com o carbono contido no banho líquido, formando monóxido e dióxido de carbono (CO e CO₂). Essa reação é de extrema importância, pois o ferro gusa é composto de 4 a 4,5% de carbono, o que de fato impossibilita a produção de fio máquina a partir dele (MILLER *et al.*, 1998). Pela Figura 4, analogamente ao forno elétrico a arco, os fornos básicos a oxigênio também podem receber sucata metálica como meio de conter superaquecimentos (ENGHAG, 2009). A terceira alternativa ao processo de refino primário em relação a equipamento é o forno otimizador de energia (EOF), onde os gases de exaustão do processo são usados para aquecer a sucata metálica que vai sendo inserida no forno. Esse processo pode ser usado somente em usinas integradas, pois o forno é abastecido substancialmente com ferro gusa líquido.

Figura 4 – Esquema de um forno básico a oxigênio.



FONTE: (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2017).

Após a fundição da sucata metálica nos fornos elétricos a arco e da descarburização do ferro gusa nos conversores LD, faz-se o ajuste de composição química do aço e a preparação da temperatura para o lingotamento.

3.1.3 Lingotamento

O lingotamento é o processo das aciarias onde o aço líquido é transformado em aço sólido. Há dois tipos: lingotamento convencional e o contínuo.

O processo mais antigo é o convencional, onde o aço líquido é despejado dentro de moldes onde serão resfriados até a solidificação completa. Já o lingotamento contínuo é mais atual e mais produtivo (ENGHAG, 2009). O aço líquido é despejado em moldes que canalizam o fluxo de material, permitindo que o processo não tenha descontinuidades.

A temperatura na panela é normalmente controlada com o abafamento do banho com casca de arroz ou escória sintética sobre a escória, com função de isolantes térmicos. O distribuidor tem função de dividir o fluxo de aço líquido para os diferentes veios de lingotamento, onde ocorre a solidificação em forma de tarugo. Nessa etapa, o aço fatalmente tem contato com o oxigênio causando a reoxidação, formando óxidos chamados de macroinclusões com indesejável composição de escória. Esses defeitos são extremamente danosos para o processo posterior de trefilação devido a suas altas durezas, causando desgaste prematuro nos componentes mecânicos das máquinas (ENGHAG, 2009).

Após o aço líquido ser distribuído, é vazado para os moldes ou lingoteiras de seção quadrada, que são tubos de cobre acoplados a caixas de refrigeração com alta vazão de água. Nessa etapa, inicia-se o processo de solidificação do tarugo de aço.

A última etapa do lingotamento contínuo, onde já houve a total solidificação do aço, é o corte do tarugo, que poder ser por oxicorte ou por tesoura mecânica. O comprimento do tarugo é função de algumas variáveis subsequentes à aciaria, sendo as mais importantes: tamanho do forno de reaquecimento da laminação e peso objetivado da bobina de fio máquina.

3.1.4 Laminação

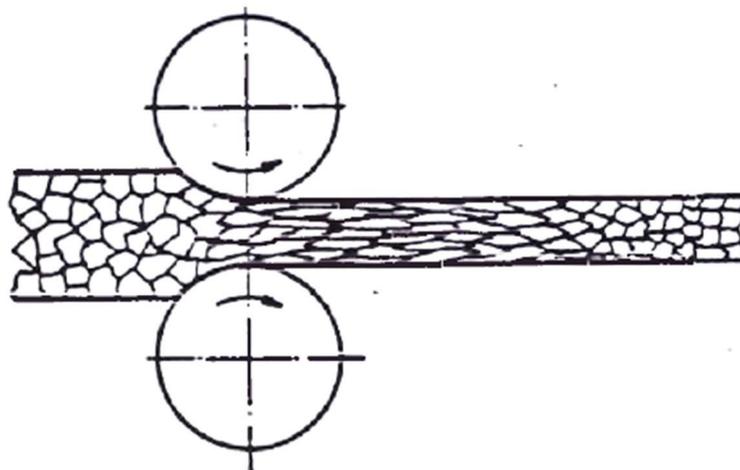
As dimensões e propriedades mecânico-metalúrgicas dos tarugos fornecidos pelas aciarias são completamente impeditivas como matéria prima para o processo de trefilação. Portanto, o processo de laminação torna-se extremamente importante na cadeia siderúrgica por agregar valor ao aço, definindo propriedades e gerando o primeiro produto acabado de uma usina. Os produtos laminados têm uma vasta aplicação na indústria. Dependendo do tipo de

aciaria e lingotamento, pode-se laminar chapas, perfis estruturais, barras, vergalhões e, como será melhor detalhado, fio máquina. O processo consiste em reduzir a seção quadrada do tarugo para seções redondas com áreas menores a fim de definir a microestrutura ideal para o processo de trefilação. A retirada sistemática dos óxidos formados durante a laminação à quente torna-se importante para evitar inclusões no fio máquina e também problemas posteriores no processo de trefilação. Normalmente, usam-se descarepadores após o tarugo sair do forno de reaquecimento com o uso de ar comprimido e/ou água pressurizada.

Iniciando no forno de reaquecimento, o tarugo atinge temperaturas por volta de 1250°C para um melhor aproveitamento do laminador, que consiste em maiores reduções por passe e conseqüentemente maior produtividade. Os fornos são projetados para homogeneização da temperatura de laminação nos tarugos e para manter a integridade da superfície dos tarugos durante o aquecimento, sem a ocorrência de superaquecimento, descarbonetação, pontos queimados, etc., minimizando também perdas por oxidação.

A primeira etapa do processo de laminação depois do forno de reaquecimento é chamada de operação de desbaste, onde ocorrem as principais reduções de seção do tarugo. Esse processo é conduzido pelos rolos laminadores que tracionam o tarugo ao mesmo tempo que o comprimem reduzindo a área da seção. Nessa etapa, o tarugo passa a ser chamado de barra. Por ser um processo a quente, o efeito da deformação plástica causada pela operação de desbaste é recuperado devido à temperatura de processo, havendo recuperação da microestrutura, o que é visto na Figura 5.

Figura 5 – Redução de seção do tarugo no processo de laminação a quente



FONTE: (ENGHAG, 2009).

Um conceito importante relacionado a deformações plásticas no processo de obtenção do arame trefilado é o de discordâncias. Através da aplicação de tensões maiores que a tensão de escoamento do material há deslizamento de planos cristalinos criando distâncias entre a parte do cristal que escorregou e a parte que ainda não escorregou (PADILHA, 2000). A recuperação microestrutural que há entre passes de laminação torna-se fundamental para a continuidade do processo, pois permite grandes reduções de seção sem possibilidade de rupturas por tração. Após a operação de desbaste, a barra ainda permanece com a configuração de seção do tarugo e é na etapa posterior que podem ser inseridas outras geometrias – no processo de laminação intermediária.

O formato da geometria da barra será dado dependendo do tipo de produto que está sendo laminado. No caso de fio máquina, a seção objetivada é redonda com diâmetros definidos pela área cliente, a trefilação. O tipo de seção da barra de saída dos trens intermediários é a entrada do conjunto de acabadores, ou trens acabadores. Após serem executados os passes dessa última sequência de laminação do processo, o material adquire a forma e a dimensão final do produto acabado.

Os formadores de espira são a última etapa de alteração direta no fio máquina, pois formatam a barra redonda em forma de anel cilíndrico – bobina. Atualmente, as velocidades atingem por volta de 40 metros por segundo e o processo permite cada vez maiores bobinas mantendo uma boa uniformidade de estrutura metalúrgica e propriedades mecânicas. Para tal garantia de propriedades, o resfriamento das espiras deve ser feito de maneira controlada. Os aços destinados à trefilação são tratados a fim de se obter uma estrutura de granulação fina, com alta resistência mecânica, de modo que possam sofrer altas reduções de seção sem necessidade prévia de tratamento térmico. A técnica mais conhecida para esse controle é o Stelmor (processo desenvolvido pela canadense Stelco e pela americana Morgan) que é representado pela Figura 6.

Figura 6 – Resfriamento do fio máquina com o método Stelmor



FONTE: (ENGHAG, 2009).

O método consiste basicamente no resfriamento controlado do fio máquina com uso de ventiladores ao longo do leito, podendo ajustar-se a velocidade de resfriamento de acordo com o tipo de aço e com a bitola do produto, objetivando a propriedade final. O material à temperatura de 950°C é resfriado com água após o último passe acabador até temperaturas entre 750 a 875°C, então o fio máquina é formatado em espiras pelo formador e, já no leito, são resfriados controladamente a ar (ENGHAG, 2009).

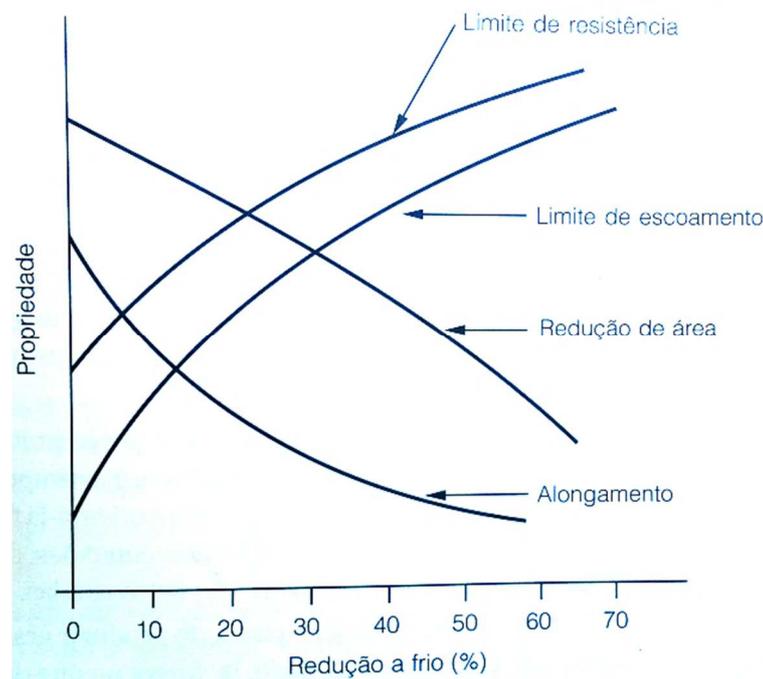
A microestrutura desejada para a boa performance do processo de trefilação é viabilizada pelo Stelmor, sendo que antes de existir esse método usava-se o tratamento de patenteamento do fio máquina. Desse modo, concede-se uma microestrutura perlítica lamelar fina ao material, garantindo a boa continuidade do processo subsequente.

As próximas etapas ainda do processo de laminação são de embalagens finais e logística do fio máquina. O transporte e armazenamento de fato não são objetivo de muitos trabalhos de pesquisa, porém, falta de cuidados nessa etapa podem gerar sérios danos ao processo de trefilação, como arranhões superficiais, emaranhamentos (uma espira dentro de outra), etc. Esses defeitos podem às vezes serem encobertos ao longo dos passes de redução de área e virem a causar danos nos processos posteriores ao da trefilação, como por exemplo galvanização, farparia, pregos (MAGALHAES, 2012)

3.1.5 Trefilação

O processo de obtenção de arames por redução de área, conhecido como trefilação, tem seus primeiros registros em 3000 anos antes de Cristo quando, no Egito, os faraós utilizavam trefilados como adornos de ouro e prata. As etapas de obtenção eram integralmente manuais até 1500 anos depois de Cristo, quando ainda se utilizavam placas de pedras ou de ferro como matriz. Até o século XIV, o esforço do processo era feito pelo homem, por tração animal ou por uso de rodas de água. Somente a partir de 1920 que os motores elétricos substituíram esses meios até então utilizados e predominaram, sendo um marco importante na evolução do processo de obtenção de arames trefilados. Por ser um processo a frio, permite a obtenção de produtos com maior precisão dimensional e melhor acabamento superficial. O encruamento através da redução de área transversal aumenta significativamente a resistência ao escoamento e à ruptura e reduz a ductilidade, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Variação das propriedades mecânicas pelo processo de trefilação



FONTE: (SILVA, *et al.*, 2010)

Existem dois grandes tipos de trefilação: de rolos e de barras. Como as transformações metalúrgicas e dimensionais são semelhantes em ambos processos e o de rolos refere-se a fio máquina como matéria prima, o presente trabalho se aterá no processo de obtenção de arames rolo a rolo.

As etapas da trefilação são: desbobinamento do fio máquina, decapagem do fio máquina, trefilação e bobinamento do arame trefilado.

3.1.6 Desbobinamento do Fio Máquina

Os equipamentos utilizados para essa etapa são chamados de desbobinadores, podendo ser verticais ou horizontais. Os desbobinadores verticais são utilizados com os rolos de fio máquina na posição vertical e, no sentido de baixo para cima, o fio é desbobinado do rolo. As bases que recebem os rolos são articuladas para o equipamento ser abastecido na posição horizontal, facilitando a operacionalização do sistema. Já nos desbobinadores horizontais, tanto o abastecimento quanto o sentido de desbobinamento é horizontal. A escolha entre esses dois tipos depende das características do fio máquina a desbobinar, como: diâmetro do fio, diâmetro a espora e tamanho do rolo. Para diâmetros de fio maiores, pode-se utilizar o tipo horizontal, mas para diâmetros de fio menores recomenda-se o uso do tipo vertical para facilitar o desbobinamento do rolo. Outros fatores também são considerados nessa comparação como dimensão do pé direito do galpão da fábrica e tipo de decapagem – etapa posterior ao desbobinamento.

Cuidados no transporte e movimentação do fio máquina devem ser tomados para evitar paradas indesejadas no processo e defeitos tanto na trefilação quanto no produto final. Marcas superficiais, arranhões, etc., podem às vezes não serem percebidos pelas inspeções de qualidade operacionais e, portanto, não são tomadas medidas preventivas como segregação do rolo não conforme. Falhas superficiais em fio máquina podem ser encobertas durante o processo de trefilação e causarem rupturas durante os processos subsequentes como galvanização, fabricação de pregos ou de arames farpados (MAGALHAES *et al.*, 2011).

3.1.7 Decapagem do Fio Máquina

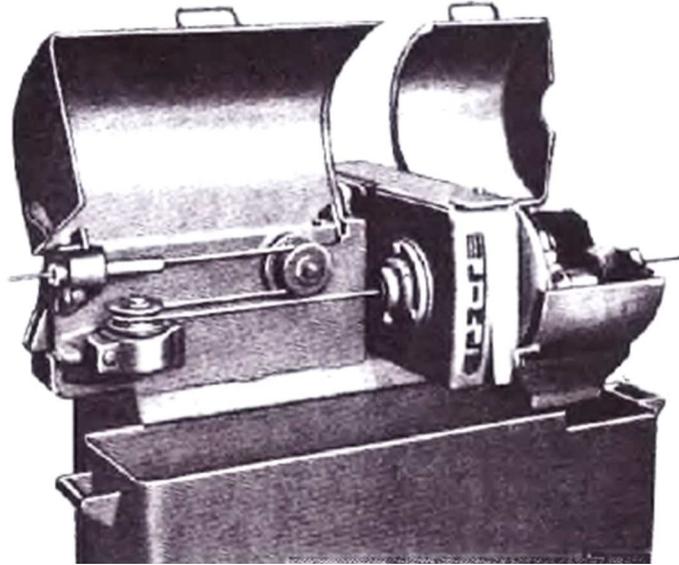
A presença de óxidos na superfície do fio máquina impede o mesmo de ser processado diretamente nas máquinas de trefilação, e por isso há necessidade da etapa de decapagem como preparação para o início das reduções de área. Caso a preparação não aconteça, haverá problemas como desgaste prematuro de fieiras, cassetes, blocos de máquina e defeitos superficiais nos arames.

Há três tipos de óxidos que são formados após o processo de laminação a quente: wustita (FeO), magnetita (Fe₃O₄) e hematita (Fe₂O₃). Todos os tipos são quebradiços e obviamente mais duros que o aço e a suas formações estão ligadas significativamente à temperatura de acabamento na laminação, bem como: temperatura de reaquecimento do tarugo, velocidade de laminação, tipo de resfriamento e diâmetro do fio máquina. A wustita é o óxido mais fácil de ser retirado do fio máquina por decapagem química pela sua alta solubilidade em ácido clorídrico ou sulfúrico e, por ter dureza mais parecida com o aço, é preferida para decapagens mecânicas por gerarem menor desgaste nas matrizes de trefilação (ENGHAG, 2009).

Existem dois tipos de decapagem: mecânica (por flexão, jateamento de granalha, lixas rotativas e escovas rotativas) e química (utilização de soluções ácidas). A decapagem química tem sido cada vez menos utilizada devido às pressões das legislações ambientais e também pelo alto custo do tratamento dos efluentes gerados nas plantas de trefilação. O ácido sulfúrico ou ácido clorídrico utilizados para dissolverem os óxidos de ferro presentes no fio máquina precisam ser neutralizados antes do descarte e também o próprio ferro dissolvido precisa ser removido via tratamento de floculação. Estações de tratamento físico-químicas são necessárias para o correto tratamento desse efluente e elas acarretam em maiores custos operacionais com materiais específicos, equipamentos, manutenção e pessoal especializado.

A decapagem mecânica mais utilizada é a de flexão, onde o óxido de ferro é quebrado por ser mais duro que o aço - não resiste à deformação plástica. Para ocorrer a quebra do óxido na superfície do fio máquina, utilizam-se roldanas e roletes para flexionar todas as fibras da seção transversal, organizados em blocos ou caixas como mostra a Figura 8 para acumular os resíduos que vão sendo retirados. A escolha do diâmetro das roldanas e roletes é importante para garantir que haja deformação plástica nas fibras superficiais do fio e depende do diâmetro do fio máquina.

Figura 8 – Decapador mecânico de fio máquina por flexões



(ENGHAG, 2009).

A decapagem por escovas ou lixas rotativas é um processo abrasivo e deve ser utilizada após o decapador por flexões (GILLSTRÖM *et al.*, 2006). O pó de óxido que é gerado no decapador por flexão pode continuar aderente ao fio máquina mesmo com o uso de ventiladores de sucção. Portanto, escovas ou lixas rotativas expulsam as partículas de óxido que permaneceram no fio após as flexões e, conseqüentemente, as transformam em particulado menor, até mesmo pó.

Por jateamento de granalhas entende-se o processo de quebra da camada de óxidos pelo impacto de partículas esféricas de metal duro, as granalhas, que são dirigidas à alta velocidade contra o fio máquina. A carepa, óxido de ferro, menos resistente que o aço para absorção da energia de impacto, quebra-se com o impacto das granalhas de alta dureza (entre 60 e 65 HRC) e se solta da superfície do fio máquina (ENGHAG, 2009). O equipamento onde ocorre esse processo é fisicamente separado da máquina de trefilação devido aos requisitos do jateamento. O processo de jateamento com granalhas pode ser em linha com a máquina de trefila ou não, a depender do grau de limpeza requerido para o produto.

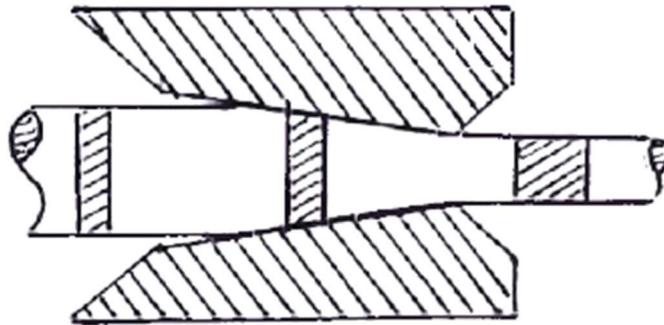
Após a decapagem mecânica, banhos de carreadores salinos são muito utilizados para garantir o arraste de lubrificante pelo arame. A superfície do fio máquina decapado mecanicamente é menos que rugosa que o fio máquina decapado quimicamente, portanto tem menor potencial de arraste do sabão. Banhos com fosfato de zinco são utilizados pela maioria das fábricas de arame onde a camada de sabão residual requerida no arame é significativa.

3.1.8 Trefilação Propriamente Dita

A redução de área do fio máquina é a primeira etapa de transformação e de alteração de propriedades mecânica do processo de trefilação e a matriz onde isso ocorre é chamada de fieira ou também de cassete - tecnologia mais atual.

Dependendo da especificação do arame e para qual processo quente será submetido, o diâmetro do fio máquina será reduzido acarretando em aumento de resistência ao escoamento, à ruptura e na redução do alongamento, redução de ductilidade. A Figura 9 mostra o processo de redução de área através de uma fieira. Para tal processo ocorrer, deve haver o tracionamento do arame capaz de puxá-lo através da fieira onde ocorrem os esforços de tração e compressão que, por conservação de massa, aumentam o comprimento linear do fio.

Figura 9 – Redução de área transversal através de fieira

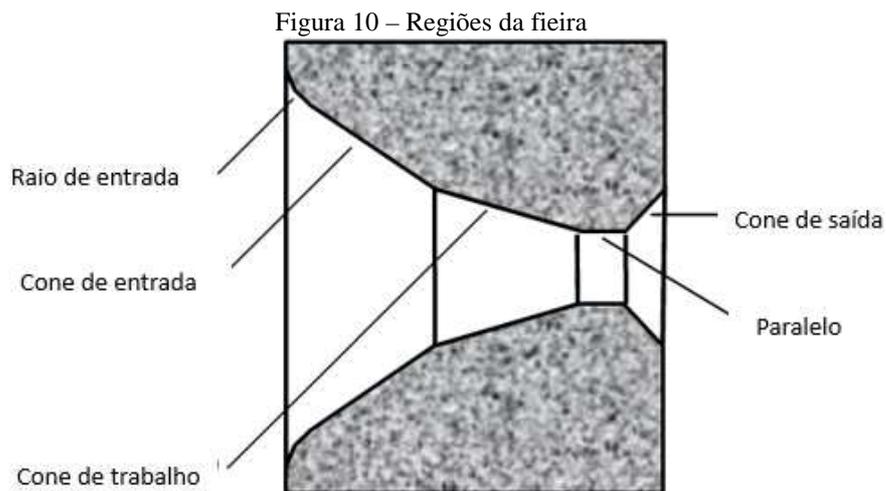


FONTE: (ENGHAG, 2009).

Desde as placas de trefilação feitas de pedra e ferro nos primeiros registros históricos do processo, as fieiras passaram por importantes evoluções. A dureza da matriz tornou-se cada vez mais importante para permitir altas velocidades de trefilação, baixo desgaste e o consequente aumento de produtividade do negócio. A partir de 1920, as fieiras começaram a ser confeccionadas com dois tipos de material, um para formar o núcleo e o outro para a carcaça. Como o núcleo sofre o atrito com o arame e necessita manter sua precisão dimensional, comumente é fabricado com carboneto de tungstênio numa matriz de cobalto (wídia) adquirindo alta dureza. A carcaça, menos nobre, é fabricada com aço de médio teor de carbono, e é acoplada nas caixas de fieira onde recebem refrigeração e lubrificação para o processo. Mais recentemente, foram desenvolvidas fieiras com núcleo de diamante sintético ou natural, permitindo maiores velocidades de trefilação e maior vida útil das matrizes.

A geometria das fieiras é de extrema importância e tem alta correlação com a eficiência do processo (SAS-BOCA, *et al.*, 2017). Há cinco regiões importantes: o raio de entrada, o cone

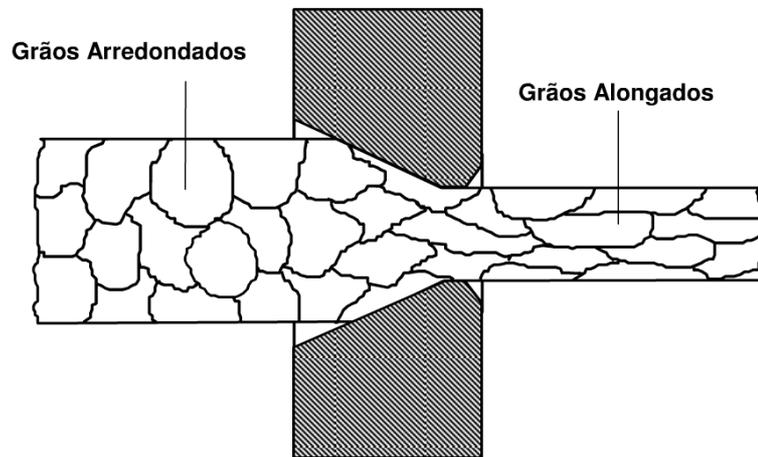
de entrada, o cone de trabalho, o paralelo e o cone de saída. O raio de entrada serve para eliminar o canto vivo do cone de entrada e também minimiza os efeitos de chicoteamento do fio máquina na entrada do primeiro passe. O cone de entrada auxilia a entrada do lubrificante que é arrastado pelo arame. Já o cone de trabalho é onde ocorre a redução de área da seção transversal do arame e necessita de bom polimento para reduzir o coeficiente de atrito. A dimensão do ângulo do cone de trabalho é essencial para o processo e depende da sequência de passes de trefilação e da necessidade e mais ou menos lubrificação no restante do processo. Normalmente, se utilizam ângulos maiores para o primeiro passe e ângulos menores para os demais passes de trefilação. O paralelo tem o objetivo de reduzir o desgaste da saída da fieira e assim manter o diâmetro de saída do arame por mais tempo. O cone de saída, por sua vez, serve para proteger o final do paralelo contra desalinhamentos e vibrações do arame na saída da fieira. Essas cinco regiões estão representadas na Figura 10.



FONTE: (CETLIN, 1982)

Pela compressão e tração que ocorre no interior do arame, há deformação plástica no aço, causando alteração na microestrutura permitindo também o aumento da resistência à tração. A Figura 11 mostra o efeito microestrutural em termos do formato dos grãos no arame onde o aumento da densidade de discordâncias no material aumenta o número de bloqueios para o deslizamento dos planos cristalinos (DIETER, 1988).

Figura 11 – Alteração da configuração dos grãos na redução de área do arame



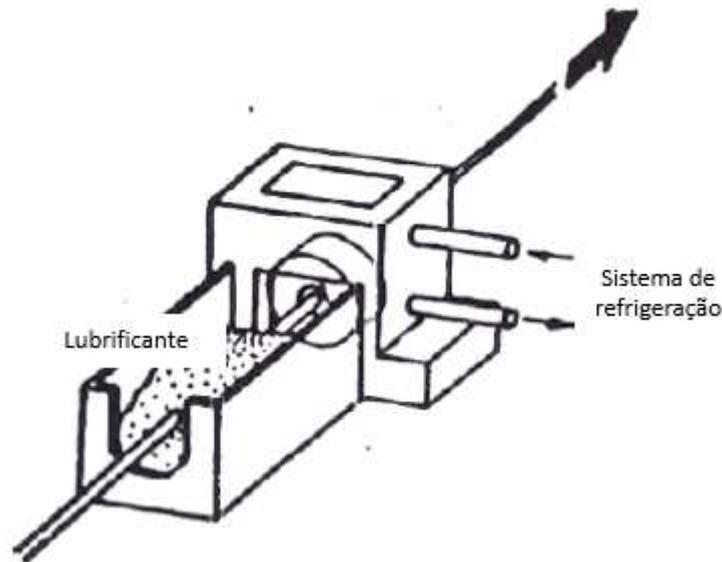
FONTE: (CETLIN, 1982)

O atrito causado pela velocidade relativa entre a fieira e o arame e pelo escorregamento dos planos cristalinos gera calor e acarretam no desgaste das superfícies das fieiras, podendo também reduzir o limite de escoamento e de ruptura do arame até o patamar da força de tração necessária para o processo, rompendo o arame. Portanto, deve haver um sistema de refrigeração capaz de extrair o calor excedente do processo e um sistema de lubrificação que reduza o coeficiente de atrito entre as superfícies da fieira e do arame.

Os lubrificantes no processo de trefilação podem ser líquidos ou sólidos. Os líquidos são óleos ou misturas de óleos com água. Os sólidos, por sua vez, são sabões em pó. Com o aquecimento gerado pelos atritos interno e externo no processo de redução de área, o sabão se torna pastoso na região de entrada do material e, com isso, forma-se uma camada fina de lubrificante entre a superfície do arame e a superfície da fieira. Nas caixas de fieira, local onde o sabão é armazenado, pode haver formação de túneis de sabão e o arame não arrastar lubrificante. Para que isso não ocorra, usam-se dispositivos conhecido como alicates para agitar o sabão e evitar a solidificação do lubrificante pastoso ao redor do arame. O uso de alicates é de extrema importância principalmente para o primeiro passe de trefilação, onde o material de entrada é o fio máquina decapado que possui superfície irregular, com mais defeitos superficiais.

A granulometria do sabão também é significativa para a eficiência de lubrificação. Quanto mais fina, mais fácil de arrastar o sabão para a camada entre o material e a fieira. Por outro lado, quanto mais fina for a granulometria, mais fácil a formação de túneis, o que pode ser evitado com o uso de alicates. A Figura 12 mostra, esquematicamente, uma caixa de fieira, o lubrificante armazenado e o sentido de trefilação.

Figura 12 – Caixa de fieira convencional com refrigeração da fieira



FONTE: (ENGHAG, 2009)

O efeito dos atritos internos e externos se não controlados podem gerar defeitos na superfície do arame acarretando em falhas nos processos subsequentes. As falhas superficiais como arranhões, frisos e marcas são as mais prejudiciais para o processo de galvanização, por exemplo, onde o contato do arame com banhos químicos de limpeza e demais preparações para a zincagem são afetadas negativamente devido às irregularidades das fibras exteriores dos arames. A principal falha oriunda de trefilação é causada pela falta de lubrificação, onde a fina camada de interface do arame com a fieira é descontinuada e o arame sofre deformações plásticas e microrupturas na superfície. As quebras iniciadas na superfície são chamadas de pés de corvo, onde uma pequena fratura ocorre, permitindo a entrada do lubrificante no espaço gerado. Durante o alongamento do material, a fratura também se alonga aumentando de tamanho. O arame pode romper se a fratura atingir um tamanho crítico, porém, se não houver a ruptura total do arame, o material carregará a falha nos processos subsequentes. Os pés de corvo são mostrados na Figura 13 e têm como principais causas: defeitos já existentes no tarugo antes da laminação, defeitos no fio máquina causados pela laminação, falhas de lubrificação durante a trefilação e defeitos no fio máquina causados pela movimentação logística. Não é somente no processo de trefilação que podem ocorrer falhas superficiais no material. Roldanas e roletes que guiam o arame durante o processo também podem imprimir na superfície do arame suas falhas de desgaste, deslocamento, arranhões, etc.

Figura 13 – Defeito tipo pé de corvo na superfície do arame



FONTE: (ENGHAG, 2009)

Com o intuito de reduzir as chances de falha de lubrificação, foram desenvolvidas fieiras de pressão, onde o lubrificante é pressurizado no estado pastoso pelo arraste do arame na fieira. Dessa forma, a pressão interna do lubrificante força a entrada do mesmo no cone de trabalho, garantindo a camada de lubrificação e permitindo maiores velocidades no processo.

A força de tração necessária para a redução de seção transversal do arame e para vencer os atritos do processo é realizada pelos blocos de trefilação e irá depender da magnitude da redução no passe, do diâmetro de saída do material, do limite de resistência do arame antes do passe, da lubrificação entre o material e a fieira, do semi-ângulo da fieira e do comprimento do paralelo (CETLIN, 1982). Além de tracionarem os arames vencendo as forças de reação, os blocos também têm função importante para refrigeração do arame, dissipando o calor gerado pelos atritos do processo. A parte interna dos blocos é refrigerada com água e quanto maior o número de espiras do arame em contato com o bloco melhor será a troca térmica. A Figura 14 mostra, esquematicamente, como se dá o processo de tracionamento dos arames pelos blocos.

Figura 14 – Máquina de trefila cumulativa de 2 passes de redução



FONTE: (ENGHAG, 2009).

O arame tracionado pelo bloco é acumulado no mesmo em forma de espiras. A medida que o bloco gira, as espiras deslizam sobre o bloco até a saída do arame para a próxima feira. Para que isso ocorra, a geometria da superfície externa do bloco é feita sob ângulos bem projetados, permitindo a entrada e saída do arame bem como o seu deslizamento.

O controle da velocidade do bloco é em função da velocidade do bloco anterior ou da velocidade de desbobinamento do fio máquina (caso for o primeiro passe) e também da redução de diâmetro do passe. Por conservação de massa, há alongamento do material ao longo do cone de trabalho da feira aumentando a velocidade do arame em relação à velocidade de entrada. Caso o bloco de saída esteja mais rápido que o de entrada, haverá tracionamento em demasia, podendo romper o arame. Caso o bloco de saída esteja mais lento que o de entrada, haverá acúmulo de material entre os dois blocos afetando também a continuidade do processo. O desgaste das feiras ao longo do tempo, altera essa relação e, se não controlada, impede a continuidade do processo se não houverem substituições. Para controlar a relação de velocidades, foram desenvolvidas máquinas cumulativas onde o aumento ou redução do número de espiras nos blocos sinaliza ao operador a alteração de velocidade dos blocos. Mais recentemente, e em pleno uso nos dias atuais, foram desenvolvidas máquinas não cumulativas com braços de controle entre blocos. O sentido do arame nessas máquinas durante o processo de redução de seção é sempre horizontal e o controle de velocidade dos blocos é feito pelo sensoriamento através de braços articulados que controlam o tracionamento do material, o que pode ser visto através da Figura 15.

Figura 15 – Máquina de trefila multipasses com braços de controle

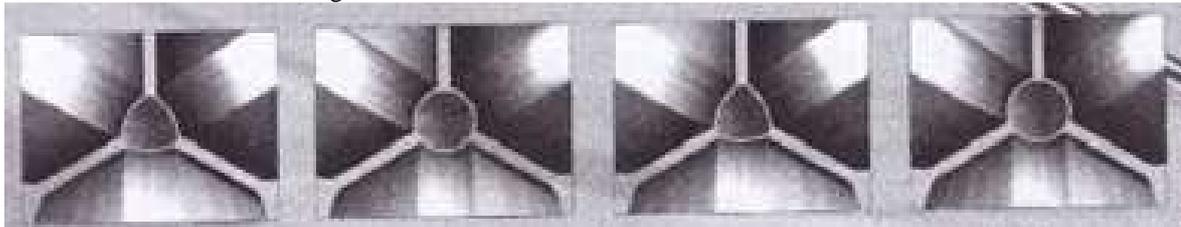


FONTE: (ENGHAG, 2009)

Muitos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de possibilitar maiores velocidades de trefilação (GOKYO *et al.*, 1964). A grande barreira a ser vencida sempre foi a questão do atrito causado pela velocidade relativa entre o arame e a fieira, gerando calor e travando as possibilidades de maiores produtividades. Em 1964, no Japão, foi apresentada uma tecnologia alternativa a fieiras de trefilação, assemelhando-se com o processo de laminação. O processo consiste em rolos laminadores que giram livremente com o arame, reduzindo drasticamente a velocidade relativa (GOKYO *et al.*, 1964). Pela impossibilidade de se laminar uma barra redonda através de um canal redondo e se obter uma barra laminada redonda, foi criado um passe adicional com seção oval e outro com seção redonda (ENGHAG, 2009). Ou seja, para 1 de passe de redução são necessários 2 passes: ovalizador e acabador.

Para efeitos de maior precisão dimensional, foi desenvolvida tecnologia com 3 rolos laminadores por passe, ou seja, 3 rolos ovalizadores de redução e mais 3 rolos acabadores redondos para acabamento, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Trios de rolos ovalizadores e acabadores.



FONTE:O Autor

Os rolos laminadores são feitos de uma carcaça de aço bipartida para possibilitar o encaixe do anel de carboneto de tungstênio, elemento que de fato entra em contato com o arame. Devido à redução da velocidade relativa nesse processo, apenas uma pequena quantidade de sabão é requerida pelo processo e usualmente é feita somente no primeiro passe (ENGHAG, 2009). Outro efeito positivo quanto à alternativa de rolos laminadores, é a redução da potência necessária nos blocos das máquinas devido ao menor atrito envolvido (BITKOV, Part1, 2008). Como há redução da velocidade relativa e por consequência há queda do atrito no processo, a potência requerida é reduzida em até 34,5% (BITKOV, Part2, 2008).

O conjunto de trios ovalizadores e acabadores que compõem o primeiro passe de trefilação (ou de microlaminação) é chamado de cassete ou microcassete. Os cassetes são mais robustos que os microcassetes e são utilizados na fabricação de arame para fins estruturais devido a maiores esforços no processo. Já os microcassetes são utilizados para arames industriais que podem passar por processos subsequentes como galvanização, recozimento,

pregos, etc. O microcassete é composto por uma carcaça de aço bipartida onde em cada parte são montados os 3 rolos em mancais. Cada rolo possui canais de refrigeração no seu eixo e também a carcaça é refrigerada. A Figura 17 representa um microcassete montado numa máquina multipasses de trefilação.

Figura 17– Microcassete em máquina multipasse de trefilação.



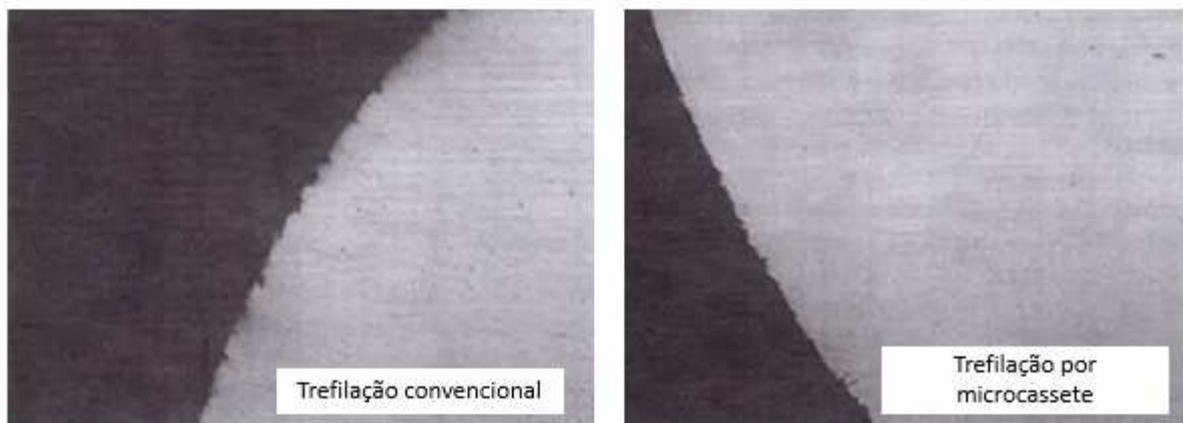
FONTE:O Autor

Por ser um equipamento com maior tecnologia embarcada e pela precisão dimensional requerida pelas especificações dos arames, o uso de microcassetes requer oficina especializada para a montagem, regulagem e ajustes dimensionais (DAVID, *et al.*, 2013). Cada rolo tem que ser montado separadamente para ser fixado no mancal e o ajuste da luz entre os rolos é essencial para evitar a ocorrência de frisos ao longo do arame. O microcassete em operação aquece da temperatura ambiente até no máximo 150°C para manter as propriedades do lubrificante dos rolamentos e evitar trincas indesejadas no anel de carboneto de tungstênio. Mesmo na rampa de aquecimento normal do processo, há dilatação dos rolos e conseqüentemente implicações no arame. Quando o aquecimento é ultrapassa os limites recomendados ou há falhas de ajuste do microcassete, os rolos podem se tocar em alta rotação devido à dilatação, causando falhas superficiais no arame e quebras prematuras dos anéis de metal duro. Quando dilatados, os rolos se aproximam do centro do arame e geram implicações na redução do diâmetro do arame em relação à especificação do respectivo passe. Como dito anteriormente, se houver qualquer falha na montagem dos rolamentos, falha no sistema de refrigeração dos cassetes ou no sistema de lubrificação, a área restante para comportar o fluxo de massa do arame torna-se insuficiente e o aço extravasa criando frisos longitudinais. Tais frisos são falhas graves para o aspecto superficial de arames industriais bem como são impeditivos para os processos subsequentes à trefilação (galvanização, farparia, pregos, etc.) (DAVID, *et al.*, 2013). Para cassetes utilizados na fabricação de fios de aço para fins estruturais, o efeito da variação de diâmetro em função

da variação da temperatura torna-se perigoso se não controlado. Comparando-se o processo de trefilação convencional com feiras e o processo mais atual com microcassetes, o atrito existente ao longo da redução do diâmetro do arame é drasticamente diferente. No processo de microlaminação, há menos esforços cisalhantes devido à redução significativa de velocidade relativa entre o elemento redutor de seção e o arame, havendo redução da deformação não homogênea na seção do material (ENGHAG, 2009). A dureza superficial do arame microlaminado é menor do que no arame trefilado com feiras, o que implica numa superfície com menor rugosidade devido a menor incidência de micro trincas (ENGHAG, 2009).

A Figura 18 compara a superfície de um arame microlaminado e um arame trefilado com feira. Para processos posteriores à trefilação, o fato da superfície do microlaminado ter menor dureza reduz a incidência de quebras em processos de dobra alternada, como por exemplo na fabricação de cordoalhas, arames farpados, etc.

Figura 18 – Rugosidade superficial de arame trefilado com feiras e arame trefilado com microcassete



FONTE: (ENGHAH, 2009)

A escolha pelo processo de Trefilação com microcassetes tem sido uma alternativa interessante para o aumento de produtividade, aumentando as velocidades de produção e reduzindo custos fixos dos processos industriais.

Após a trefilação, os arames são bobinados na saída das máquinas e podem ser armazenados em carretel ou em estocador, como mostra a Figura 19. O bobinamento em estocador é feito de maneira indireta, ou seja, o arame é despejado por cima e não enrolado. Assim, a velocidade do processo é limitada, já que o arame precisa ser formatado e despejado em formato de espiras no estocador. Carreteis começaram a ser utilizados para possibilitar o aumento de velocidades das máquinas, já que o arame é enrolado na mesma velocidade tangencial (ENGHAG, 2009). Outra vantagem importante do carretel em relação ao estocador

é a capacidade de armazenamento, 2 vezes maior aproximadamente. Arames trefilados por feiras ou por microcassetes em seus variados diâmetros, tipos de aço, lubrificantes residuais, etc., são o principal emprego do processo de galvanização.

Figura 19 – Arames trefilados armazenados em estocador (esquerda), em bobinas (centro) e em carreteis (direita).



FONTE: (ENGHAH, 2009)

3.2 GALVANIZAÇÃO

Galvanização, basicamente, é um processo onde o substrato é imerso em banho de zinco fundido a temperaturas entre 440° e 550°C. O revestimento se caracteriza por proporcionar boa adesão, conformabilidade e soldabilidade, sendo assim, o mais utilizado no mundo. O fato de ser um processo contínuo ou descontínuo deve-se à forma do substrato: peças são descontínuas e arames têm certa continuidade (a soldagem de arames torna o processo contínuo).

O maior consumo mundial de zinco é como protetivo do aço e esse revestimento pode ser obtido de diferentes modos: imersão a quente, eletro galvanização e aspersão térmica. O maior consumidor de zinco é o processo de imersão a quente – e será o foco principal deste trabalho. Pode-se dividir em dois segmentos: linha de galvanização contínua e galvanização de perfis estruturais e de produtos após fabricação (BARBOSA, 2014). A eletrodeposição de zinco torna o revestimento protetivo mais uniforme, mais liso e mais fino do que os obtidos por imersão a quente e é conhecida como eletro galvanização e é muito utilizada em produtos automobilísticos. A metalização, ou aspersão térmica, é aplicada onde é necessária maior quantidade de zinco na camada protetora formada. O zinco é fornecido na forma de pó e é aspergido em alta velocidade na peça após ser atomizado. Como para a obtenção de arames

galvanizados o processo de imersão a quente por linha de galvanização contínua é o mais utilizado e recomendado, será aprofundado com maior detalhamento.

A proteção do aço pelo zinco que o reveste é dada por dois métodos: barreira de proteção e proteção galvânica (MARDER, 2000). A barreira de proteção forma-se na superfície externa do material revestido e limita o acesso do oxigênio ao substrato e ao próprio zinco. O fenômeno que explica a barreira física é o de passivação e torna o zinco menos ativo e o processo corrosivo torna-se mais lento. A camada que se forma na superfície do arame galvanizado é o carbonato básico de zinco. Essa camada de carbonato afeta o brilho do arame – que é uma característica estética, porém muito importante em algumas aplicações dos produtos galvanizados. A proteção galvânica dá-se pelo fato de o zinco ser menos nobre que o aço, mais ativo quimicamente. Na série eletroquímica, o zinco tem um potencial de oxidação maior que o ferro, ou seja, numa associação entre os dois metais o zinco sempre será o ânodo enquanto que o ferro sempre será o cátodo. Portanto, mesmo havendo falhas no revestimento e parte do aço sendo exposta, o zinco manterá a proteção do substrato através do fenômeno galvânico (LORENO *et al.*, 1993).

Para ocorrer a reação química necessária para o zinco aderir ao substrato, há etapas importantes e essenciais para isso e que serão abordadas adiante.

3.2.1 Limpeza Superficial dos Arames

Somente superfícies perfeitamente limpas permitem uma formação normal e adequada das fases da liga FeZn (LORENO *et al.*, 1993). Na etapa de limpeza de uma linha da galvanização contínua de arames, os materiais são submetidos a métodos de extração de lubrificante residual (sabão de trefilação) e de óxidos. A remoção de lubrificantes é feita basicamente por meio de desengraxantes e a remoção de óxidos é feita por meio de banhos ácidos. Há variados métodos de limpeza dessas sujidades, tais como: limpeza por ultrassom, limpeza eletrolítica e limpeza por ácidos (decapagem química). A tecnologia de limpeza por ultrassom consiste na imersão do arame em um tanque preenchido com solução líquida, onde uma corrente alternada é aplicada em transdutores que oscilam em mesma frequência criando ondas ultrassônicas que expandem e comprimem o fluido. Na fase de expansão, são criadas bolhas que colapsam na fase de compressão, ocorrendo uma implosão que lança partículas aleatórias sobre a camada de lubrificante do arame. Essas bolhas se formam e desaparecem e servem como pequenas escovas erosivas que removem o lubrificante (ENGHAG, 2009). O processo de limpeza por ultrassom

pode servir também para remoção leve de óxidos. A limpeza eletrolítica consiste num processo eletroquímico onde o arame é polarizado alternadamente por eletrodos inertes gerando, também alternadamente, hidrogênio e oxigênio gasoso. As bolhas gasosas geradas funcionam como escovas erosivas (analogamente ao processo de ultrassom) e removem o lubrificante da superfície do arame. O processo de limpeza eletrolítica é usado tanto para limpeza desengraxante como para remoção de óxidos.

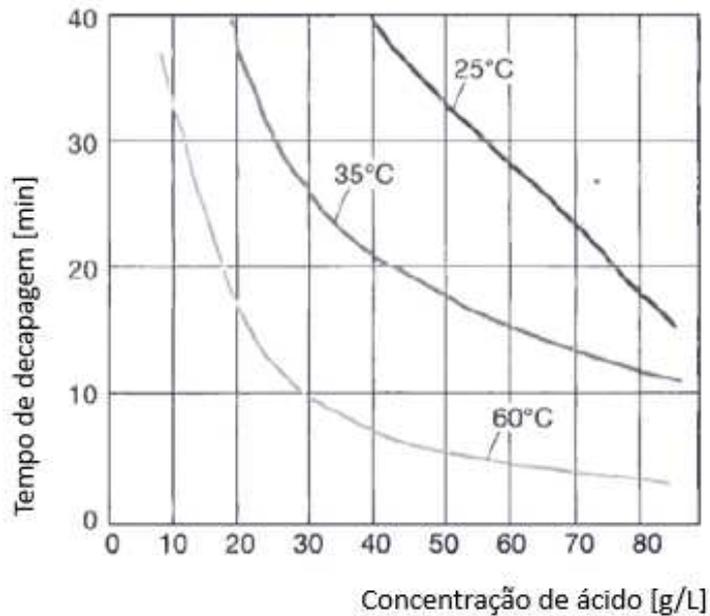
Além dos métodos desengraxantes citados, tem sido cada vez mais comum o desenvolvimento de técnicas de remoção de sabões lubrificantes com o uso de feltros e água pressurizada.

Dependendo da aplicação do arame galvanizado, deve-se recozê-lo com o intuito de aliviar as tensões residuais do processo de trefilação. Como o processo de encruamento aumenta consideravelmente a densidade de discordâncias na microestrutura do arame, na maioria das linhas contínuas de galvanização há a etapa de recozimento. Os métodos de alívio de tensão consistem em aquecer o arame até a temperaturas de aproximadamente 700°C em fornos elétricos, fornos contendo chumbo fundido ou fornos de indução. Independentemente do método utilizado, o ferro a essa temperatura se torna extremamente ativo e ocorre a oxidação da superfície do arame. A menos que haja uma atmosfera inerte, os óxidos formados precisam ser removidos e, dessa forma, banhos ácidos são necessários para tal limpeza. Em processos de galvanização mais atuais onde há câmaras inertes pós recozimento, o banho desengraxante é suficiente para remoção das sujidades. Para todos os outros casos, a decapagem química é fundamental.

Para remoção de óxidos, os arames são imersos em banhos de soluções ácidas, podendo ser utilizados ácido clorídrico ou ácido sulfúrico. Tanto para ácidos clorídricos como para ácidos sulfúricos, é obrigatório o resfriamento dos arames antes da entrada no tanque de decapagem química, pois a geração de hidrogênio livre pode acarretar em explosões. O arame em contato com o oxigênio sofre oxidação logo após sua saída do recozimento e, no tanque de resfriamento à água, forma também hidróxido de ferro. O ácido clorídrico, no entanto, tem sido largamente utilizado em linhas de galvanização, pois dissolve melhor os óxidos, não ataca necessariamente o metal base, não exige aquecimento, os resíduos formados são fáceis de lavar e dissolve também óxidos de chumbo que ocasionalmente vêm aderidos no arame (LORENO *et al.*, 1993).

O fenômeno de remoção de óxidos em ácido clorídrico depende do tempo de reação, concentração do ácido, teor de ferro no banho (quantidade de ferro dissolvido pelo processo de decapagem), temperatura do ácido e quantidade e tipos de óxido no arame. A Figura 20 mostra o gráfico do tempo de decapagem em função da concentração e temperatura do ácido.

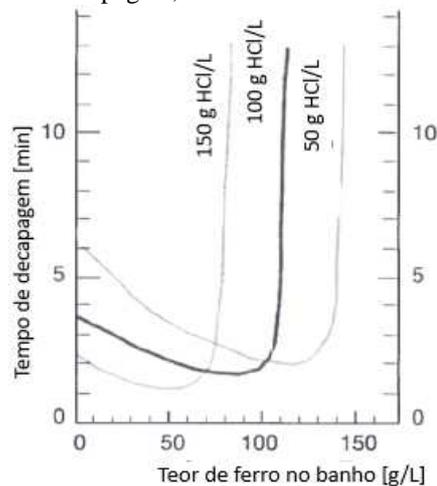
Figura 20 – Gráfico do tempo de decapagem em função da temperatura e concentração do ácido clorídrico



FONTE: (ENGHAG, 2009).

Num primeiro momento, o teor de ferro no banho auxilia a decapagem e funciona como um catalisador da reação, mas a partir de um limite há inversão dessa função e começa a retardar o tempo de remoção dos óxidos. A temperatura do ácido, quanto maior, permite maiores teores de ferro no banho (LORENO, *et al.*, 1993). Enghag (2009) mostra o tempo de decapagem em função da concentração de ácido e o teor de ferro no banho na Figura 21.

Figura 21– Relação entre tempo de decapagem, teor de ferro no banho de ácido e concentração do ácido



FONTE: (ENGHAG, 2009).

Para aumentar a eficiência do processo de decapagem química dos arames em linha de galvanização contínua, tem-se usado vibradores e agitadores com o intuito de expor a superfície do arame à solução ácida. O equipamento instalado em série com a linha de galvanização contínua para a remoção de óxidos é exemplificado na Figura 22. Em função da reação do ácido clorídrico com o óxido de ferro, há liberação de hidrogênio e, pela temperatura da solução, vapores ácidos. Portanto, o tanque deve ser selado na entrada e saída dos arames com uma cortina d'água para impedir a saída dos gases

Figura 22 – Tanque de decapagem química em linha de galvanização contínua de arames



FONTE:O Autor

O arraste da água de refrigeração pelo arame reduz a concentração de ácido tornando obrigatório o monitoramento periódico da solução e, conseqüentemente, correção do banho.

Para a remoção dos resíduos da decapagem e do próprio ácido que é arrastado no processo, há necessidade de se lavar o arame após o tanque de ácido clorídrico. Nessa etapa, o arame é imerso em água corrente que remove os resíduos de sua superfície. A água deve ser renovada pois com o tempo vai se tornando ácida e, segundo LORENO *et al.*, 1993, pode trabalhar aquecida pois quanto maior a temperatura, melhor a lavagem.

O tanque de lavagem pode funcionar de modos diferentes: por jatos de água, por transbordamento ou por cortinas d'água. Similar ao processo de cortinas, a lavagem por jatos de água funciona como chuveiro, à medida em que o arame passa pelo tanque água renovada atinge sua superfície e remove os resíduos remanescentes. Os tanques por transbordamento são abastecidos com bombeamento de água que extravasam em relação ao nível dos arames na

linha. Normalmente, funcionam com 3 tanques em série vaso conectados que permitem a renovação de água do último tanque até o primeiro. O processo de lavagem por cortinas d'água é basicamente o mesmo que há na entrada e saída dos tanques de decapagem química mostrado na Figura 23, onde os arames atravessam a cortina e suas sujidades remanescentes são removidas.

Figura 23 – Lavagem de arames em linha de galvanização contínua pelo processo de transbordamento.



FONTE:O Autor

3.2.2 Fluxagem

Como a superfície do arame pós lavagem está limpa, isenta de óxidos e sujidades, o aço volta a reagir com o oxigênio formando hidróxido de ferro na sua superfície. Então, aliado ao fato de que o zinco também se oxida facilmente à temperatura de galvanização, torna-se impossível a formação de uma camada aderente e uniforme sobre o arame, já que o contato seria entre óxidos. Para possibilitar a reação do ferro com o zinco, a fluxagem tem papel fundamental para a formação da camada zincada.

A fluxagem dos arames consiste em mergulhá-los em uma solução de cloretos formando um fino filme sobre a superfície que deve permanecer até a entrada do arame no banho de zinco. Comumente, é utilizada a solução de cloreto duplo de amônia e zinco ($ZnCl_2 \cdot 2NH_4Cl$) com 56% de zinco e 44% de amônia (CAMPANHER, 2009) que finaliza o processo de limpeza superficial do arame ao entrar em contato com o zinco a $450^\circ C$, onde é sublimada levando consigo os resíduos de óxido de ferro e sais.

Como o fluxo é utilizado em solução, há necessidade de secagem do arame antes do contato com o zinco para evitar a quase instantânea mudança de fase da água, gerando respingos de metal líquido ao redor da cuba. Portanto, a etapa de fluxagem finda com uma estufa de secagem, onde a temperatura máxima de operação é 150°C para não haver degradação do fluxo e, dessa forma, prejudicar a limpeza superficial final (LORENO, *et al.*, 1993).

A fluxagem pode ser executada de dois modos: a seco ou processo úmido. No processo úmido, o arame é imerso em uma solução de cloretos e posteriormente passa por uma estufa para evaporação da água da solução, permanecendo sobre a superfície do arame uma fina película do fluxo. Dessa forma, momentos antes do contato entre o arame e o zinco, a temperatura da atmosfera da cuba propicia a decomposição do fluxo que reage com as sujidades restantes no arame, permitindo a limpeza final do material (CAMPANHER, 2009). No local de entrada do arame no banho de zinco, forma-se um círculo de metal líquido e, mais adiante, formam-se resíduos escuros que são o produto da limpeza final. No processo seco, não há um tanque exclusivo para o fluxo que é adicionado na forma sólida à superfície do banho de zinco. Esse modo de fluxagem é mais utilizado para galvanização de chapas com o intuito de se evitar o empenamento do material com as dilatações no processo de secagem. Em suma, os dois tipos de processo de fluxagem tem o mesmo objetivo: proteger a superfície dos materiais contra corrosão e realizar a última limpeza antes da reação do ferro com o zinco (MARDER, 2000).

3.2.3 Zincagem

A reação do ferro com o zinco para formação da camada protetiva sobre o arame inicia-se exatamente no momento em que o arame atinge o banho fundido. Nesse momento, a superfície do aço isenta de sujidades (sais, óxidos, hidróxidos, etc.) e o zinco fundido iniciam a formação da liga FeZn que é formada por camadas, chamadas intermetálicas, e que serão descritas mais profundamente adiante. Normalmente, o zinco é aquecido até uma temperatura entre 440°C e 460°C que é uma faixa onde a reatividade entre o zinco e o ferro é mais adequada aos parâmetros do processo de galvanização contínua de arames (SHIBLI *et al.*, 2015).

O processo de zincagem ocorre em uma cuba que é aquecida para a manutenção da temperatura de galvanização, que é um dos fatores mais importantes para a formação da camada de zinco. O aporte energético pode ser por energia elétrica (resistências elétricas ao redor da cuba) ou por gás natural (queimadores por sobre o banho metálico). A forma como o banho é

aquecido impacta fundamentalmente na formação de óxidos no banho, o que será comentado adiante. A quantidade de zinco presente em uma cuba deve ser a mais adequada para manter a temperatura do banho o mais constante possível, em função da massa fria de arame que entra no banho – inércia térmica.

Para a imersão total do arame no banho de zinco fundido são utilizadas pedras cerâmicas como guias que ficam submersas na cuba e permitem o curso do material adequando o tempo de reação em função da velocidade da linha. Sobre o banho de zinco, adiciona-se um isolante térmico para reduzir a perda de calor por convecção. Os isolantes mais utilizados são vermiculita e perlita expandida.

Além da formação da camada intermetálica, há também o arraste hidrodinâmico no arame onde o zinco fundido é arrastado com o material, formando uma camada de zinco puro na superfície mais externa. O material já galvanizado sai da cuba com cobertura grosseira de zinco, justamente devido ao arraste recém mencionado. O arame precisa, então, de um processo de raspagem do excedente que é arrastado para reduzir o desperdício de zinco e imprimir no material o aspecto especular, que é um fator importante na venda do produto. Os tipos de raspagem serão discutidos mais profundamente adiante, bem como o processo de refrigeração do arame galvanizado para bloquear a continuação da formação da camada intermetálica.

Antes da última etapa de transformação na linha de galvanização, o arame é resfriado logo após a raspagem do excesso de zinco por imersão em água corrente ou por jatos d'água. A refrigeração é necessária para reduzir a temperatura do material afim de estancar a reação do ferro com o zinco, evitando o afloramento da camada intermetálica à superfície do arame.

3.2.4 Passivação

Como um recurso para inserir no arame galvanizado um aspecto brilhoso, é utilizada a etapa de passivação que é normalmente à base de uma solução de ácido crômico onde o arame é submerso logo após o processo de zincagem. O efeito do cromatizante é de retardar a formação do carbonato básico de zinco na superfície do arame, mantendo o brilho do arame recém zincado. Essa etapa não altera de maneira significativa o poder anticorrosão dos arames galvanizados devido ao tempo de imersão ser muito curto – em linha de galvanização contínua (DA ROSA, 2009). Estudos têm sido feitos nessa área para melhor explorar os benefícios da cromatização em superfícies metálicas galvanizadas.

3.3 A CAMADA DE ZINCO

A proteção à corrosão que o zinco confere ao aço dá-se basicamente por dois modos: proteção catódica e por autoproteção. A exposição do aço a um eletrólito forma uma pilha galvânica onde o zinco atua como ânodo e o ferro como cátodo. Sendo assim, o zinco se corrói preferencialmente em relação ao aço, mantendo por mais tempo as propriedades físicas do produto. Pelo zinco ser um metal mais caro que o aço, não se justificaria o fato de proteger o metal mais barato com outro mais caro, já que esse último se corroeria. Portanto, o segundo modo de proteção, o de autoproteção, torna essa equação positiva, pois o zinco é preservado por mais tempo. A camada de autoproteção é formada pelo contato do zinco, da cobertura do arame, com o ar atmosférico, especificamente o oxigênio (DA ROSA, 2009).

Após a formação e estabilização da camada de zinco sobre o arame, inicia-se o processo de oxidação, onde o oxigênio do ar atmosférico irá formar uma película de hidróxido de zinco (Zn(OH)_2). Essa primeira reação é sucedida por outra mais estável e, conseqüentemente, mais duradoura, que se forma pela conversão do hidróxido de zinco em carbonato básico de zinco ($\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn(OH)}_2$) devido a presença de água e dióxido de carbono no ar atmosférico. Essa última reação é chamada de passivação do zinco. O carbonato de zinco tem função fundamental na proteção do arame e do próprio zinco, pois reduz a velocidade de corrosão do zinco metálico por sua boa estabilidade e por ser uma camada aderente e não porosa (LORENO *et al*, 1993).

A quantidade de zinco existente na camada galvanizada é um dos fatores mais importantes no que se refere à proteção do aço, bem como a uniformidade da camada e sua aderência no arame. Portanto, há especificações de arame por diâmetro e por quantidade de zinco, sendo a camada de zinco dividida em classes de acordo com a NBR 6331 (Arame de aço de baixo teor de carbono, zincado, para uso geral – Especificações). Não há norma que especifique os tipos de camadas intermetálicas nos arames galvanizados, porém há outros aspectos de qualidade que também são exigidos e serão comentados adiante.

A reação entre o ferro e o zinco, que se inicia logo no contato entre os dois metais devidamente condicionados em termos de limpeza superficial do arame e da temperatura do zinco, gera diferentes ligas intermetálicas ao longo da imersão do arame na cuba até a estabilização das fases formadas. Na temperatura de galvanização, há a interdifusão do zinco e do ferro, portanto, as camadas mais internas são ricas em ferro e as mais externas são ricas em zinco (LORENO *et al*, 1993). As fases da liga intermética FeZn são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Fases da liga FeZn

Fases	Fórmula
αFe	$\text{Fe}(\text{Zn})$
γ	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$
γ_1	$\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$
δ	FeZn_{10}
ζ	FeZn_{13}
ηZn	$\text{Zn}(\text{Fe})$
Fases	Fórmula

FONTE: (MARDER, 2000).

Pela Tabela 1, tem-se que as fases intermetálicas formadas são: gama (γ), delta (δ) e zeta (ζ). Não representada na Tabela 1, há outra camada chamada eta (η), que é mais exterior e contém quase na sua totalidade zinco puro. A não representação dessa última camada deve-se ao fato de não ser uma liga intermetálica (MARDER, 2000). As características e propriedades de cada fase serão abordadas a seguir.

3.3.1 Fase Zeta (ζ)

A fase zeta (ζ), FeZn_{13} , é formada através de uma reação peritética entre a fase delta (δ) e zinco líquido a temperaturas na faixa de 520 e 540°C contendo de 5 a 6% de ferro (MARDER, 2000). É uma fase isomórfica com estrutura atômica contendo um átomo de ferro e um átomo de zinco rodeados por 12 átomos de zinco. Apresenta-se no formato de lamelas finas no sentido perpendicular à superfície do substrato (LORENO *et al.*, 1993).

3.3.2 Fase Delta (δ)

A fase delta (δ), FeZn_{10} , contém aproximadamente entre 7 e 11% de ferro sendo formada por reação peritética entre a fase gama (γ) e zinco líquido, a uma temperatura de 665°C. Sua célula unitária é hexagonal e por muito tempo essa fase foi subdividida em outras duas fases, porém, atualmente, é chamada apenas de fase delta (δ) já que as estruturas cristalinas são as mesmas (MARDER, 2000).

3.3.3 Fase Gama (γ)

A fase gama (γ) é subdividida em gama (γ_1) e gama (γ). Gama (γ_1), $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$, tem estrutura cristalina cúbica de face centrada com composição de ferro entre 17 e 19,5% à 450°C. É formada pelo resultado da reação peritética entre a fase delta (δ) e a fase gama (γ) a temperaturas entre 540 e 560°C e aparece sob forma de camada contínua. É a fase que apresenta maior dureza (MARDER, 2000).

A fase gama (γ), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ tem estrutura cúbica de corpo centrado e composição entre 23,5 a 28% de ferro à 450°C. A formação dessa fase deve-se à reação peritética entre o ferro do substrato e o zinco líquido.

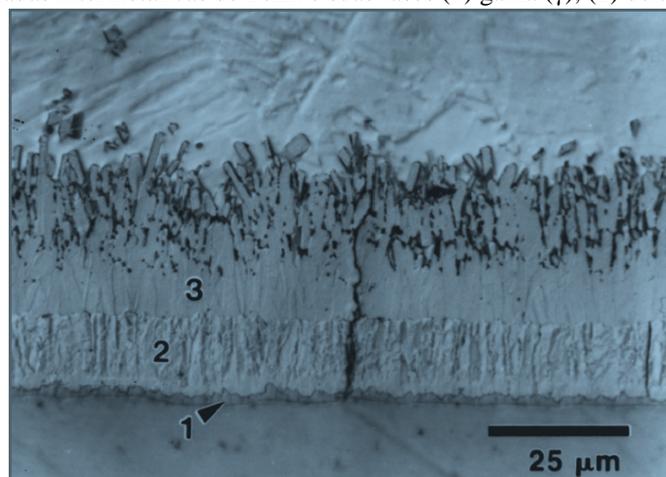
São fases difíceis de serem vistas no microscópio, a não ser com grandes ampliações, pois são bem aderentes e muito finas (LORENO *et al*, 1993).

3.3.4 Fase Eta (η)

A fase eta (η) é constituída praticamente por zinco puro, com boa tenacidade e ductilidade. O ponto de fusão é aproximadamente 419,5°C e sua estrutura atômica é hexagonal.

A Figura 24 mostra diferentes fases formadas pela reação entre o ferro e o zinco conforme descrito nos tópicos acima. A única fase não representada é a fase eta (η), pois é uma fase que não depende diretamente do substrato, mas sim do método de extração do banho de zinco fundido.

Figura 24 – Camadas intermetálicas de FeZn e suas fases (1) gama (γ), (2) delta (δ) e (3) zeta (ζ)



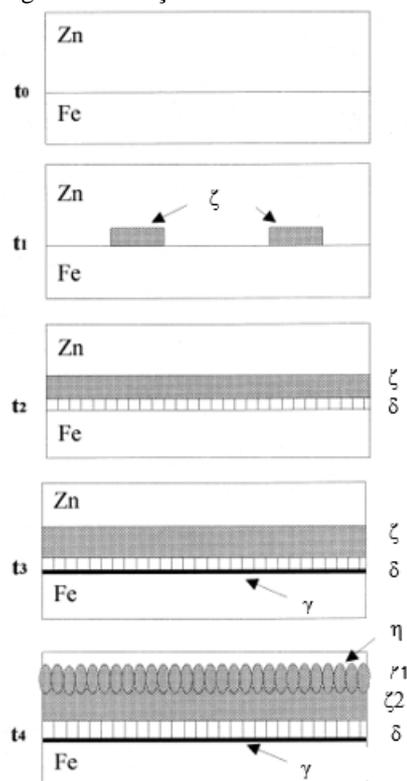
FONTE: (MARDER, 2000).

3.4 FORMAÇÃO DA CAMADA DE ZINCO

A formação de cada camada intermetálica e suas fases tem velocidades distintas, pois são compostos diferentes. Basicamente, o fenômeno de interdifusão entre o zinco e o ferro depende mais significativamente de dois fatores: diferença de concentração entre uma fase e outra e da temperatura. Como cada fase tem composição de ferro e de zinco diferentes, a velocidade da difusão também é diferente entre elas e é influenciada diretamente pela temperatura, pois altera o espaço interatômico (LORENO *et al*, 1993).

A sequência de formação das camadas se inicia na interface com a fase zeta (ζ) seguida da fase delta (δ) e, depois de certo tempo de incubação, a fase gama (γ) (HORSTMANN, 1986). A nucleação das fases zeta (ζ) e delta (δ) se iniciam imediatamente após o arame entrar em contato com o zinco e a fase gama (γ) se forma aproximadamente após 30 segundos de imersão. Estudos de difusão com experimentos realizados em zinco líquido e em estado sólido comprovam que todas essas transformações são governadas pela própria difusão do zinco em direção ao substrato de aço (ONISHI, *et al*, 1974). A Figura 25 mostra a cronologia da formação das camadas intermetálicas onde separa-se a camada zeta (ζ) em duas diferentes morfologias devido ao seu crescimento.

Figura 25 – Cronologia da formação das camadas intermetálicas em 4 tempos



FONTE: (MARDER, 2000).

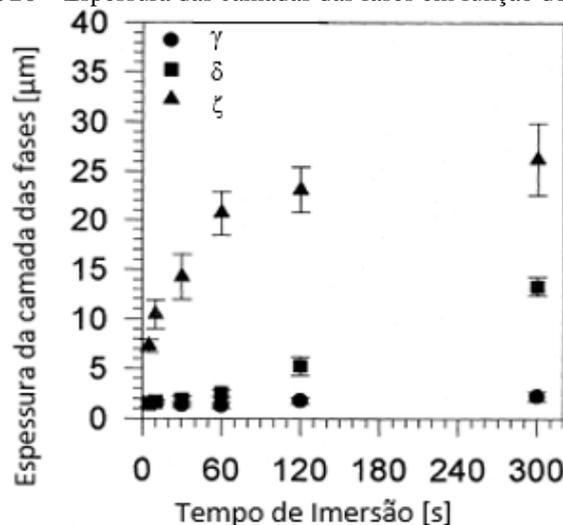
A cinética de formação de cada fase depende substancialmente da temperatura e do tempo de imersão do substrato. Para tempos curtos de imersão, tem-se um crescimento rápido da camada zeta (ζ) e, logo após, um crescimento mais lento, enquanto que a fase delta (δ) é o oposto (JORDAN *et al*, 1997). Nos primeiros instantes do contato entre o substrato e o zinco, ocorrem muitas reações quase que simultâneas, como as transformações de fase das camadas intermetálicas, as difusões interatômicas no estado sólido e o processo de solidificação do zinco puro arrastado pelo arame (MARDER, 2000).

Em função do tempo e da temperatura do banho de zinco, a equação (1) correlaciona constantes e variáveis para o cálculo da espessura de camada formada, onde Y é a espessura da camada, K é uma constante de crescimento, t é o tempo de reação e n é uma constante da taxa de crescimento (HORSTMANN, 1978).

$$Y = Kt^n \quad (1)$$

A equação (1) tem como resposta a espessura total da camada de zinco, não subdividindo as fases formadas entre o zinco puro e o substrato de aço. Jordan *et al* (1997) traz na Figura 26 o gráfico de espessura das camadas intermetálicas no tempo, onde se evidencia a curvatura da equação proposta por Horstmann (1978), porém com maior detalhamento das fases.

Figura 26 – Espessura das camadas das fases em função do tempo



FONTE: (JORDAN *et al*, 1997).

Todas as etapas do processo siderúrgico que foram mencionadas até aqui têm sua respectiva influência na formação da camada de zinco no processo de galvanização de arames em linha contínua. Como a camada galvanizada não se dá puramente por reação química, as

condições físicas da matéria prima como rugosidade superficial, frisos e marcas são também fatores importantes para se obter a camada protetiva. Logo, cada fator e seus efeitos serão discutidos separadamente.

3.4.1 Fatores Importantes na Formação da Camada de Zinco

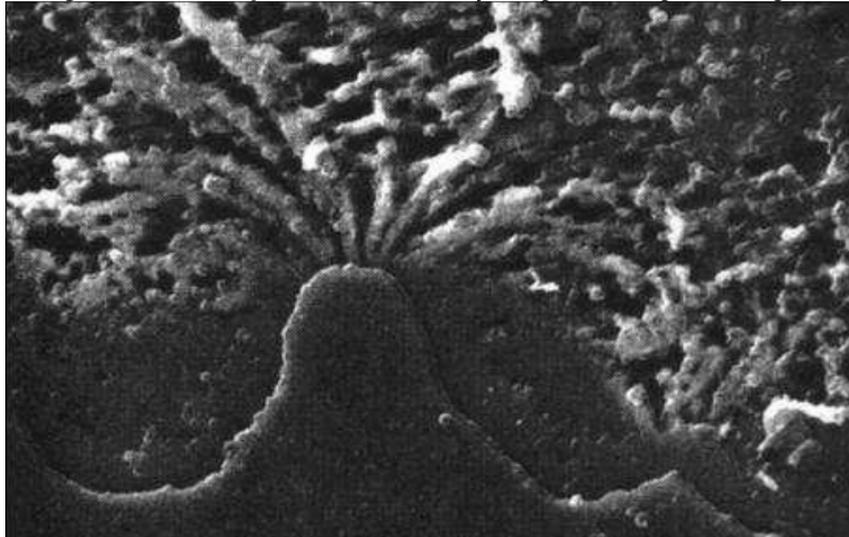
A cinética que rege o crescimento da liga de ferro e zinco que se forma logo no contato de ambos metais à 450°C depende de variáveis dos próprios materiais e também do processo de galvanização. Todas as etapas, desde o início do desbobinamento do arame até a refrigeração final, têm influência na obtenção do produto galvanizado. Os efeitos de cada processo são diferentes entre si e podem ou não ser dependentes, ou seja, variáveis podem ou não influenciar outras variáveis. Dentre todas as etapas e seus fatores, os mais relevantes na literatura serão abordados a seguir.

3.4.1.1 Características da Superfície do Arame

Ao longo da superfície externa do arame residem heranças dos processos anteriores, os quais foram necessários para a obtenção do produto. Essas heranças podem ser positivas ou negativas, dependendo das particularidades de aplicação produto. Para o processo de galvanização de arames em linha contínua, é fundamental a regularidade da superfície do material, com isenção de marcas, arranhões, frisos e poros excessivos. Tais defeitos não podem ser revertidos ou recuperados nas etapas que antecedem o banho de zinco, portanto são deletérios para a qualidade da camada de zinco formada.

O efeito da rugosidade, mesmo se for estável ao longo do arame, pode também acarretar em danos à camada de zinco, pois há crescimento desfavorável da camada zeta (ζ) nos picos devido à nucleação e maior crescimento da camada delta (δ) nos vales. A Figura 27 mostra a morfologia da camada intermetálica que é conhecida como delta spray, por razão do modo de seu crescimento (LORENO *et al*, 1993).

Figura 27 – Nucleação da camada zeta (ζ) nos picos da superfície rugosa



FONTE: (LORENO *et al*, 1993)

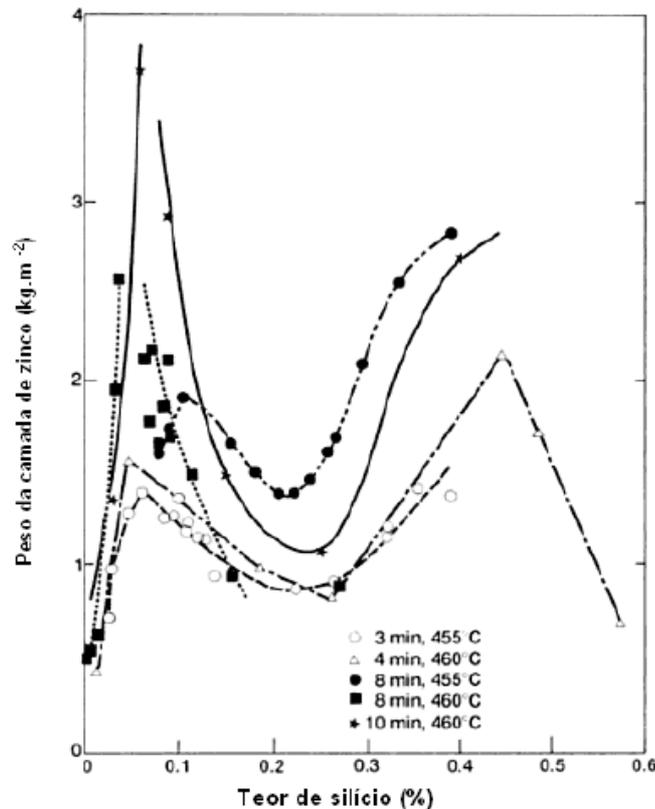
A estrutura externa formada pela nucleação da fase zeta (ζ) aumenta a área de contato do arame com o zinco, acarretando num maior arraste de zinco puro na saída da cuba. Nos casos onde não há falha pontual e aparente na superfície do fio, as causas de rugosidade mais grosseira podem ter sua raiz residindo no tipo de decapagem do fio máquina, tipo de máquina de trefila (fieiras ou microcassetes) e nos parâmetros de decapagem na linha de galvanização.

3.4.1.2 Composição Química do Aço

Vários são os aços utilizados no processo de galvanização de arames, pois dependem das especificações do produto final que são regidas pelos clientes e normas técnicas. Dentre os elementos de adição utilizados no processo de produção do aço para fio máquina, os mais importantes no que diz respeito à formação da camada de zinco são carbono e silício (LORENO *et al*, 1993).

O teor de silício no aço para galvanização tem o maior efeito no crescimento da camada de zinco e pode ser, algumas vezes, catastrófico. A Figura 28 mostra a relação entre a camada de zinco e o teor de silício em vários tempos e temperaturas. A faixa de silício entre 0,03 a 0,12% causa um crescimento extremamente acelerado da camada em um fenômeno que é chamado Sandelin (MARDER, 2000). O crescimento desordenado das ligas de ferro e zinco causam fragilidade na aderência da camada devido à morfologia da camada obtida, com espaços vazios que acabam sendo preenchidos pelo zinco puro.

Figura 28 – Crescimento da camada de zinco em função do teor de silício no aço



FONTE: (CAMPANHER, 2009)

A cinética da formação de camada de zinco em aços com teor de silício na faixa do efeito Sandelin não é representada pela equação (1). O crescimento das camadas, ao invés de ser parabólico, é linear, e prejudica a aderência das fases no substrato e entre si. A fase delta (δ) é quase suprimida e a fase zeta (ζ) cresce na forma de finos cristais embebidos em zinco, tornando-se instável e acelerando o seu processo de crescimento. Pelo fato de as fases não terem suas formações estáveis, respeitando a sequência mostrada na Figura 25, perde-se aderência entre elas e também com o substrato, uma vez que a fase delta (δ) é quase anulada (LORENO *et al*, 1993).

Pela falta de previsibilidade do crescimento de camada quando se adiciona silício ao aço na faixa que corresponde ao efeito Sandelin, deve ser evitado, portanto, o uso de aços desse tipo para processos de galvanização.

O efeito do carbono contido no aço em relação à formação da camada de zinco é mais direto e estável do que em comparação ao efeito do silício. Quanto maior o teor de carbono, maior a reatividade do aço com o zinco (LORENO *et al*, 1993). A Tabela 2 relaciona o teor de carbono com o respectivo efeito na reação do ferro com o zinco.

Tabela 2 – Efeito do teor de carbono na reação do ferro com o zinco.

Teor de Carbono [%]	Efeito na formação da camada de zinco
Abaixo de 0,2%	Sem efeito sobre o revestimento em temperaturas normais de galvanização.
Entre 0,2 e 0,3%	As camadas de FeZn tornam-se mais espessas.
Acima de 0,3%	Ocorre um aumento adicional na velocidade de reação entre o ferro e o zinco.

FONTE: (CAMPANHER, 2009)

Portanto, pela Tabela 2, o efeito do carbono só se torna importante a partir de 0,3% de teor no aço.

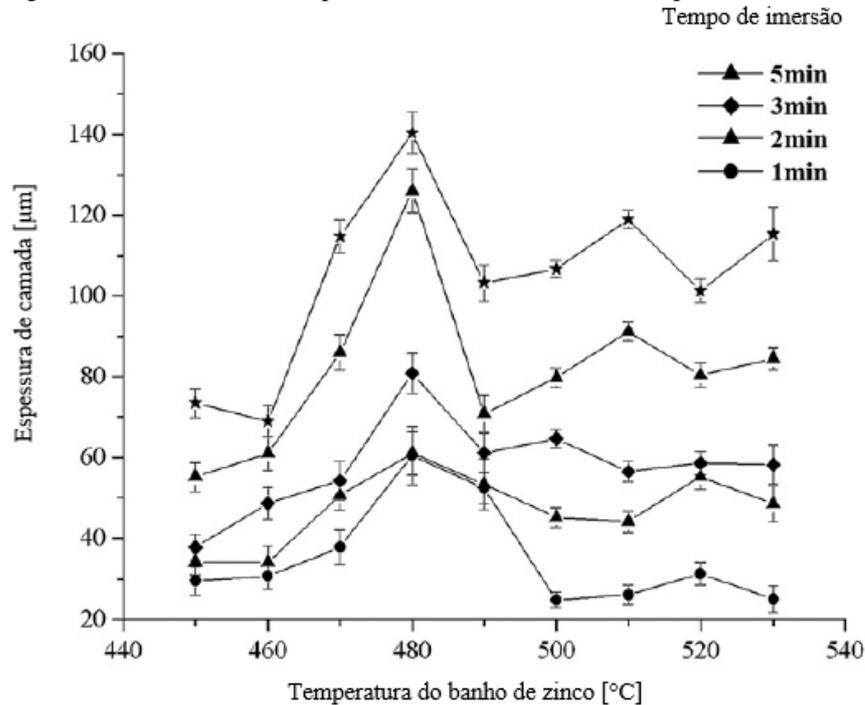
Outros elementos que também têm influência na formação da camada de zinco são: fósforo, manganês e enxofre. Como o fósforo e enxofre se apresentam em pequenas quantidades nos aços, os seus efeitos podem ser desconsiderados. Já o manganês, necessita de observação se caso ultrapassar o teor de 1,35%, pois pode ter ação conjunta com o silício e passa a ter impacto deletério na camada de zinco (LORENO *et al*, 1993).

3.4.1.3 Temperatura do Banho de Zinco

A camada de zinco é fortemente impactada pela temperatura do banho de zinco e, portanto, a escolha do nível desse fator deve ser bem fundamentada. Não somente em relação à taxa de crescimento das ligas intermetálicas, mas também quanto à vida útil da cuba de zinco – quando esta for de aço.

Em temperaturas muito baixas, perto do ponto de fusão do zinco à 419,5°C, o banho torna-se muito viscoso, o que eleva consideravelmente o arraste hidrodinâmico no arame para patamares não desejáveis de acordo com a equação (1). Para se trabalhar com faixas de temperatura mais distantes do ponto de fusão, depara-se com a curva de reatividade de zinco que também traz alertas a partir de 475°C. A Figura 29 mostra a influência da temperatura do banho na velocidade de crescimento de camada.

Figura 29 – Influência da temperatura do banho de zinco na espessura de camada.



FONTES: (BICAO *et al*, 2008)

A partir dos 475°C , se inicia um pico na reação do ferro com o zinco que se estabiliza novamente a partir dos 500°C . Nessa faixa de temperatura, a fase zeta (ζ) se altera significativamente, gerando espaços vazios que são preenchidos por zinco líquido, prejudicando a aderência da camada (BICAO *et al*, 2008). Com isso, a área de reação da fase zeta (ζ) cresce e acelera a taxa de crescimento do processo.

O aumento de reatividade não ocorre somente entre o arame e o zinco, mas também entre o zinco e o aço da cuba, podendo reduzir em até 3 vezes a vida útil do equipamento (BICAO *et al*, 2008). Logo, as faixas mais utilizadas para linhas de galvanização contínua de arames são entre 440°C e 470°C , o que permite reduzir a geração de óxidos na superfície do banho e aumenta da vida útil da cuba metálica (LORENO *et al*, 1993).

3.4.1.4 Tempo de Imersão

Analogamente à temperatura do banho de zinco, o tempo de imersão também afeta significativamente a reação do ferro com o zinco, pois o crescimento da camada é função do tempo como mostrado anteriormente na equação (1). A partir de 400 segundos de imersão, para um banho de zinco à 450°C , se inicia o período de menor curvatura, ou seja, menor variação de

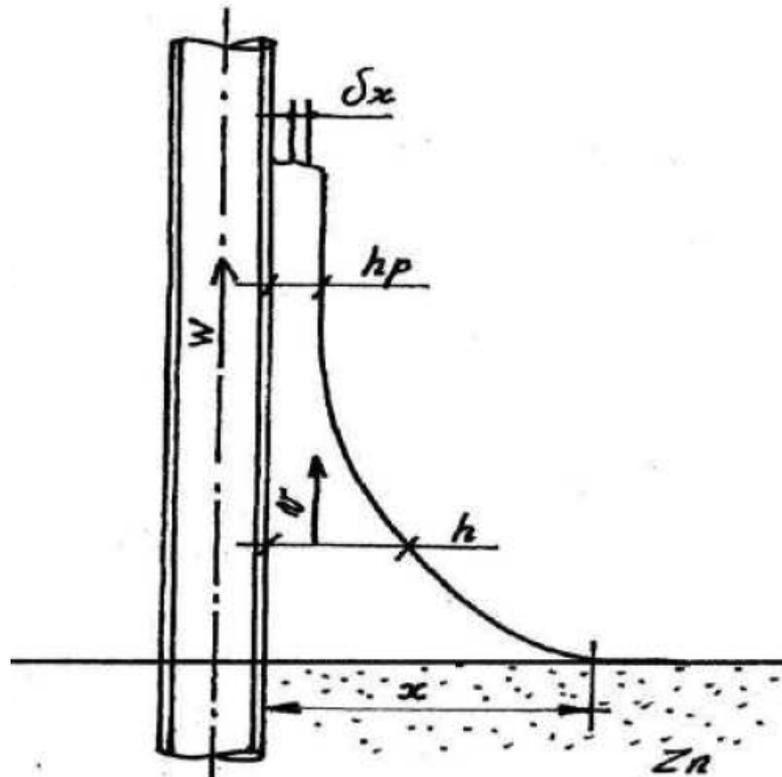
espessura de camada em função do tempo. Antes dos 400 segundos, a variação é vertiginosa (SHIBLI *et al*, 2015).

3.4.1.5 Velocidade de Linha

O fator velocidade de linha para galvanização contínua de arames pode ser confundido com o fator tempo de imersão. Quanto maior a velocidade de linha, menor o tempo de imersão e vice-versa, porém pode-se aumentar a velocidade sem aumentar o tempo de imersão, alterando o curso de imersão do arame dentro da cuba. Esse detalhe torna os dois fatores independentes nesse caso, pois o tempo de residência do fio no zinco líquido afeta a taxa de formação da camada intermetálica e a velocidade afeta o arraste hidrodinâmico na saída da cuba.

A Figura 30 mostra a configuração de arraste hidrodinâmico pelo arame na saída da cuba de zinco, onde w é a velocidade do arame, v é a velocidade do zinco líquido na camada limite, h_p é a espessura de zinco arrastado, h é a espessura de zinco no ponto de inflexão do cone de arrasto e x é a espessura de zinco afetado pelo arraste do arame.

Figura 30 – Arraste hidrodinâmico do arame na saída do banho de zinco.



FONTE: (LORENO *et al*, 1993)

As variáveis apresentadas na Figura 30 são correlacionadas na equação (2) que indica um crescimento da espessura do zinco arrastado diretamente proporcional à velocidade do arame, onde U ($U = \frac{\rho g}{\mu}$) é função da densidade do fluido arrastado ρ , da gravidade g e da viscosidade cinemática do fluido μ .

$$hp = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{w}{U}} \quad (2)$$

Portanto, tem-se maior camada arrastada quanto maior a velocidade de linha, sendo que o que é arrastado é o zinco líquido puro, ainda não transformado.

3.4.1.6 Composição Química do Banho

O único elemento que realmente influencia a formação da camada zincada é o alumínio. Alguns outros elementos poderiam ser citados, porém os lingotes de zinco fornecidos para as galvanizações têm teores residuais extremamente baixos.

O alumínio em teores de até 0,01% aumenta a fluidez do banho, reduzindo o arraste hidrodinâmico do zinco puro, e aumenta o brilho do revestimento (LORENO *et al*, 1993). Para teores mais elevados, inicia-se o efeito da redução da reação entre o ferro e o zinco até a anulação das camadas intermetálicas. Ou seja, a composição química do banho de zinco deve ser estabelecida em função da vocação da linha: geometria das peças a serem galvanizadas, linha contínua ou descontínua, tipo de camada, etc. Para aplicações de arames em linha contínua, se usa normalmente teor de alumínio abaixo de 0,005% (LORENO *et al*, 1993).

3.4.1.7 Método de Extração

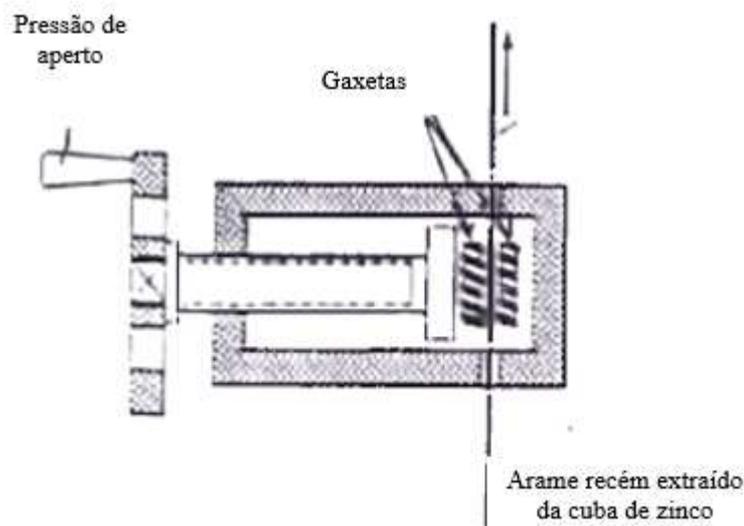
Após formadas as fases intermetálicas, o arame arrasta o zinco líquido na saída do banho formando a última camada, eta (η). Nessa etapa, a aparência externa do arame é irregular, não há uniformidade no diâmetro pois a quantidade arrastada não é controlada e pode ser afetada também pela vibração da linha. Somado a isso, a quantidade de zinco total na superfície do arame é maior do que a especificada, tornando-se necessária uma raspagem do excesso.

Os métodos de extração conhecidos são: raspadores, prensa-gaxeta (inclinada e vertical), raspagem gasosa (por ar comprimido ou nitrogênio) e vermiculita oleada. Dentre eles,

os mais produtivos e utilizados atualmente são os métodos de prensa-gaxeta e raspagem gasosa por nitrogênio para linhas de arame contínuas.

O processo de raspagem com prensa gaxeta é puramente do contato entre duas gaxetas e o arame galvanizado recém extraído do banho de zinco. A Figura 31 mostra esquematicamente o meio de retenção do zinco puro, camada η (η), que retorna ao banho assim que é retido nas gaxetas. A dureza das gaxetas bem como a força de compressão que tende a unir as duas gaxetas são fatores importantes para a remoção do excesso de zinco.

Figura 31 – Esquemática da raspagem do excesso de zinco pelo sistema de prensa-gaxeta



FONTE: (ENGHAG, 2009).

O processo de raspagem por gaxetas é muito sensível quanto a falhas e irregularidades na superfície do arame. Quando isso ocorre, as fibras da gaxeta são rasgadas e com isso há maior passagem de zinco nesses locais, gerando um aspecto rugoso e com excesso de zinco na camada final.

Um outro fator que surge do meio de extração é o tempo de vida das gaxetas. Ao se colocar gaxetas novas no processo, os instantes iniciais são os que há maior raspagem do zinco puro arrastado pelo arame. Ao passar do tempo, a gaxeta inicia um processo de desgaste pelo atrito com o arame agravado pela sua temperatura. Portanto, a capacidade de raspagem reduz com o tempo de uso da gaxeta e, então, ela deve ser substituída quando o aspecto superficial do arame indicar excesso de zinco ou o ensaio de camada acusar o excesso.

O método de extração por meio gasoso permite camadas com maior quantidade de zinco, chamadas de camada pesada, pois tem menos eficiência de raspagem que o sistema de prensa-

gaxeta mas permite um controle estável da espessura da cobertura no arame. Ao invés do contato físico das gaxetas com o arame, a raspagem por nitrogênio se dá pela pressão do gás contra o arame formando uma barreira para o excesso de zinco líquido que está sendo arrastado pelo arame e, no lugar da pressão de aperto das gaxetas, há o controle da vazão de nitrogênio.

A Figura 32 mostra um tipo de par de bicos por onde o nitrogênio preenche a câmara de raspagem do sistema que, como vantagem, não necessita a parada da linha para troca de componentes como a gaxeta, que se desgasta com o tempo. A única obrigatoriedade do sistema de raspagem gasosa é a limpeza dos bicos por onde circula o nitrogênio, pois há risco de entupimento por zinco e pode acarretar em falhas e irregularidades na camada final.

Figura 32 – Dispositivos que compõem o sistema de raspagem por nitrogênio



FONTE: (CAMPANHER, 2009).

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL

Experimentos são realizados na indústria para se aumentar o conhecimento e o entendimento dos processos de fabricação. Eles são conduzidos, de forma geral, através de uma série de testes ou tratamentos para se gerar respostas quantificáveis. Para um processo de melhoria contínua de processos e produtos, é fundamental conhecer o comportamento do processo, a forma como varia e o impacto da variabilidade. Na engenharia, experimentos são usados para explorar, estimar e confirmar. Exploração significa entender os dados que vêm dos processos. Estimação significa entender os efeitos das variáveis nos processos e suas interações. Confirmar significa validar os resultados preditos pelo experimento (ANTONY, 2003).

Na maioria dos processos de fabricação, não há apenas uma única variável que é responsável por toda a variação em uma resposta. Por exemplo, numa fabricação de pães a temperatura do forno, o tempo de fermentação e a quantidade de água são fatores fundamentais para se atingir um dado requisito na qualidade do produto final. A mais comum abordagem empregada por muitos engenheiros na maioria das companhias é a que relaciona apenas 1 variáveis por vez enquanto as outras são fixadas de alguma maneira. Infelizmente, a eficácia desse tipo de método depende unicamente da sorte, experiência, intuição. Ainda, essa abordagem requer maiores recursos para se extrair informações verdadeiras dos processos e muitas vezes conduz a conclusões falsas, principalmente por não permitir a análise das interações entre os fatores (ANTONY, 2003). Bhote (*et al*, 2000) escreveu que 90% das empresas americanas não sabem como resolver problemas crônicos de qualidade. Isso significa que os engenheiros desconhecem ou não utilizam ferramentas de solução de problemas repetitivos, que se repetem e oneram os resultados de maneira quase constante.

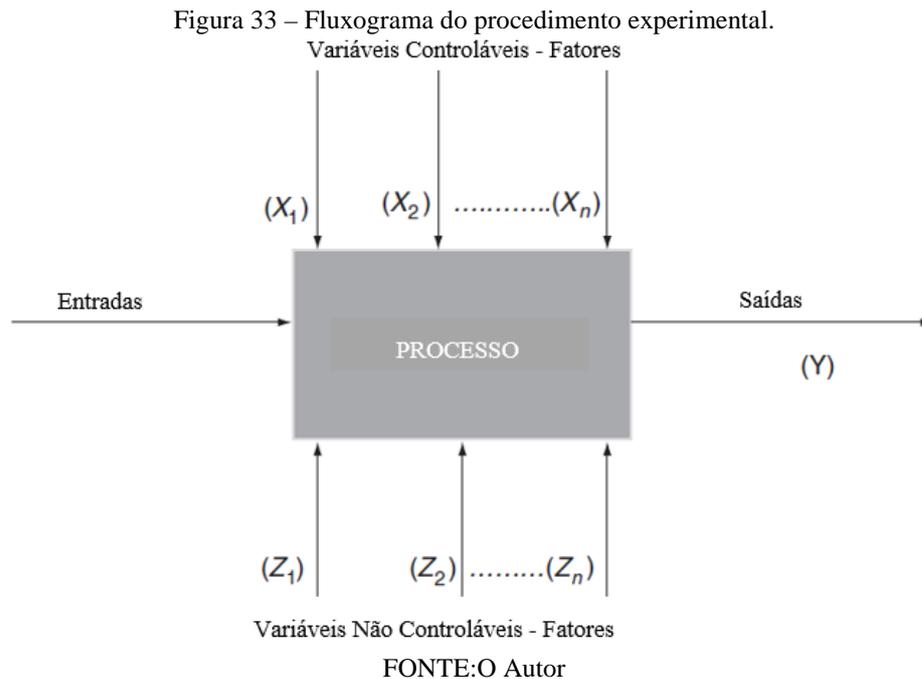
O planejamento de experimentos é uma ferramenta poderosa capaz de permitir o entendimento e o conhecimento das principais variáveis de um processo, a significância de cada uma delas, a forma como impactam na resposta e o seu efeito na variabilidade do processo (BHOTE *et al*, 2000). É uma ferramenta estatística capaz de gerar dados sobre a interação entre os fatores/variáveis de um processo/produto de maneira a clarear os dados de forma a conduzir o engenheiro para conclusões coerentes e eficazes.

O método mais clássico de planejamento experimento é o fatorial. Criado pelo engenheiro Ronald Fischer na década de 20 onde utilizou o método para aumentar a produtividade das fazendas britânicas, os testes fatoriais se tornaram os patronos do controle de qualidade moderno (BHOTE *et al*, 2000). Fatores como tipo de solo, misturas contidas no solo, quantidade de água de irrigação, etc., foram alguns dos quais Fisher se deparou ao ter que explorar os meios de aumentar a capacidade produtiva da agricultura inglesa. Desde então, segundo Antony (2003), o uso dos experimentos fatoriais e outros que surgiram (somente o método fatorial completo será abordado neste trabalho) tem consolidado os seguintes benefícios aos processos e produtos:

- Melhoria dos processos de produção e estabilidade;
- Melhoria nos lucros e retornos sobre investimentos;
- Melhoria na capacidade dos processos;
- Redução da variabilidade dos processos e consolidação de produtos;

- Redução de custos de produção;
- Redução de tempo de testes e de desenvolvimento de produtos;

A Figura 33 mostra o fluxo de um processo genérico onde há entradas e saídas num contexto de transformação. Os fatores (ou variáveis) podem ser controlados ou não controlados e possuem um efeito característico na resposta (saída).



Os fatores que são controláveis são aqueles cujos níveis podem ser alterados e fixados em certo valor escolhido. Já os fatores não controláveis são os que não há como voluntariamente alterar e fixar em nenhum valor, ou seja, sua variação é involuntária. Esse cenário está presente na maioria dos processos de fabricação, pois mesmo querendo-se controlar todas as variáveis que influenciam de certa forma na resposta (propriedades mecânicas, dimensionais, características de produtos, etc.), há algumas delas que, com pouca ou forte influência, não são controláveis e que se não contempladas adequadamente no experimento podem acarretar em conclusões equivocadas (BHOTE *et al*, 2000).

O número de corridas que um experimento fatorial requer depende do número de fatores que são considerados e o número de níveis dos fatores. Ou seja, para cada variável que se quer avaliar o efeito na resposta precisa-se escolher valores quantitativos ou qualitativos para estimar seus efeitos. O mais comum em experimentos fatoriais são 2 níveis por fator (mínimo e máximo), pois já são suficientes para uma boa avaliação dos efeitos e interações, sendo que em alguns casos (a depender do experimentador/processo) acrescentam-se pontos centrais (um

terceiro nível). Portanto, o número de testes em um experimento fatorial com 2 níveis é na ordem de 2^k , onde k é o número de fatores.

Há 3 princípios importantes no planejamento experimental que são úteis para melhorar a eficácia dos experimentos: aleatorização, replicação e blocagem (ANTONY, 2003). A aleatorização é uma ferramenta que permite com que todos os níveis de todos os fatores possam ser influenciados pelos ruídos do processo/sistema. Nas etapas de fabricação de um produto, há parâmetros estabelecidos nos padrões de operação que são controlados diariamente, mas também há variáveis incontroláveis como pequenos erros operacionais, flutuações de temperatura ambiente, humidade, variação de propriedades da matéria prima, etc., que podem influenciar a resposta. Um experimento não aleatorizado carrega consigo o erro da tendência dos fatores de ruído e pode acarretar em problemas futuros na avaliação dos dados. O conceito de replicação é bastante importante para permitir estimar o erro experimental. Consiste em se repetir a condição de um teste mais de uma vez, repetir a corrida mais de uma vez. É fundamental, o entendimento da diferença entre o conceito de replicação e o conceito de repetição – onde se retira mais de uma amostra em 1 réplica. Para um experimento com 2 réplicas, há 1 grau de liberdade para estimativa do erro experimental. E, por último, a ferramenta de blocagem serve para segregar os efeitos dos fatores de ruído e aumentar a eficiência do experimento. Geralmente, os blocos são formados por condições mais seguras em termos de ruído, variações, etc. Observações coletadas sob as mesmas condições experimentais (mesmo dia, mesmo lote, etc.) são ditas do mesmo bloco (ANTONY, 2003).

As corridas, ou os tratamentos, de um experimento fatorial são formadas pela combinação dos fatores e seus níveis escolhidos, de forma a se experimentar a resposta para cada combinação. A Tabela 3 mostra uma sequência (não aleatória) de um experimento fatorial com 2 fatores e 2 níveis, num total de 4 corridas, onde todas as combinações dos níveis dos fatores são contempladas, ou seja, um fatorial completo. O sinal positivo indica o nível máximo do fator e o sinal negativo o nível mínimo.

Tabela 3 – Sequência não aleatória de um experimento fatorial completo com 2 fatores e 2 níveis

Corrida	Fator A (Nível)	Fator B (Nível)	Resposta
1	(-)	(-)	y (1)
2	(-)	(+)	y (2)
3	(+)	(+)	y (3)
4	(+)	(-)	y (4)

FONTE:O Autor

Uma vez montado o plano experimental com todas as premissas atendidas e controles monitorados, as respostas dos testes podem ser então analisadas. Como já mencionado no tópico anterior, há alguns objetivos comuns nos testes experimentais (independentemente do método que é utilizado) que são: conhecer os efeitos dos fatores na resposta, conhecer a significância de cada fator na resposta, criar um modelo matemático para predição da resposta e conhecer os principais fatores que causam a variabilidade da resposta. Para isso, são utilizadas ferramentas estatísticas e métodos matemático que serão descritos a seguir – com a premissa de que os dados são obtidos a partir de um processo que tenha distribuição normal.

3.5.1 Análise de Variância

A Análise de Variância, ou ANOVA, é a ferramenta mais importante dentro da estatística inferencial (MONTGOMERY, 2001). Como a maioria dos experimentos tem como objetivos análise dos efeitos de variáveis em respostas (processos, produtos, etc.), a ANOVA tem função importante para mensurar a significância estatística entre uma variável e seu efeito na resposta, ou seja, pode-se concluir pelo cálculo da análise de variância se um fator tem ou não tem efeito significativo em uma resposta.

Supondo um experimento com a tratamentos, ou diferentes níveis, de um único fator e que se queira comparar os efeitos causados por cada nível – se de fato possuem significância estatística. A Tabela 4 mostra de forma ordenada a sequência do experimento, onde a representa o número de níveis do fator e n o número de réplicas ou repetições de cada tratamento. Observe a coluna dos totais como sendo a soma de todas as respostas de cada nível e a colunas das médias representando a média das respostas de cada nível.

Tabela 4 – Dados típicos de um experimento com um único fator.

Tratamento (nível)	Observações (respostas)				Totais	Médias
1	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	...	$y_{1,n}$	$y_{1.}$	\bar{y}_1
2	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	...	$y_{2,n}$	$y_{2.}$	\bar{y}_2
⋮	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\bar{y}_3
a	$y_{a,1}$	$y_{a,2}$	...	$y_{a,n}$	$y_{a.}$	\bar{y}_4
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

FONTE:O Autor

Um modo de se escrever as observações de um experimento é criando-se um modelo matemático. O exemplo da Tabela 4 pode ser descrito como a equação (2), onde i representa os

níveis dos fatores até a , j representa os fatores até n , y_{ij} representa a observação/resposta de ij , μ representa a média das respostas das observações/tratamentos, τ_i representa um parâmetro único para o efeito de cada tratamento (fator/nível) e ϵ_{ij} é o erro aleatório de cada observação/tratamento.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad (3)$$

Se for considerado que todos os efeitos dos níveis não têm significância estatística na resposta, é o mesmo que afirmar que τ_i é igual para toda observação/tratamento (ou seja $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_a = 0$). Essa é a hipótese nula utilizada na análise de variância, como se todos os fatores e seus níveis não possuem efeito significativo na resposta (MONTGOMERY, 2001). Logo, a análise de variância é um teste dos efeitos dos níveis e/ou dos fatores (a depender do número de fatores).

A Tabela 5 resume o cálculo da análise de variância para o caso de um único fator, onde $SS_{Tratamentos}$ representa a soma dos quadrados das somas de cada tratamento (cada nível), SS_T representa a soma dos quadrados de cada observação, em todos os níveis, SS_E é a soma dos quadrados do erro, $MS_{Tratamentos}$ é a média da soma dos quadrados das somas de cada tratamento (cada nível), MS_E é a média do erro e uma estimativa da variância e F_0 é o teste estatístico da hipótese nula.

Tabela 5 – A Análise de Variância para um fator único.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F_0
Entre tratamentos	$SS_{Tratamentos} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{1.} - \bar{y}_{..})^2$	$a - 1$	$MS_{Tratamentos} = \frac{SS_{Tratamentos}}{(a - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{Tratamentos}}{MS_E}$
Erro (nos tratamentos)	$SS_E = SS_T - SS_{Tratamentos}$	$N - a$	$MS_E = \frac{SS_E}{(N - a)}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N - 1$		

FONTE: O Autor

Como MS_E pode representar uma boa estimativa da variância, a probabilidade da hipótese nula ser rejeitada aumenta se $MS_{Tratamentos}$ for um valor alto. Em contrapartida, quanto mais próximo $MS_{Tratamentos}$ for de MS_E maior a probabilidade de se admitir a hipótese nula (MONTGOMERY, 2001). A equação (4) mostra a comparação entre F_0 calculado com o F_α que é função dos graus de liberdade do experimento, ou seja, se a equação for satisfeita, a hipótese nula é rejeitada.

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (4)$$

3.5.2 Análise dos Efeitos e Interações dos Fatores

O efeito de cada fator na resposta é um dos principais objetivos do experimento fatorial. Como visto no tópico anterior, a Análise de Variância já permite uma boa indicação aos principais fatores em função de cada valor de F_0 , pois quanto maior for a diferença com o F_α maior será a significância do fator. Porém, há outros meios para se calcular e visualizar graficamente os efeitos e suas interações (ANTONY, 2003)

Supondo um experimento fatorial de 2 fatores (A e B) e 2 níveis (+ e -). A Tabela 6 resume o planejamento experimental para exemplificar o cálculo do efeito de cada fator e suas interações.

Tabela 6 – Exemplo de experimento fatorial 2^2 para cálculo dos efeitos e interações.

Corrida	Fator/ Nível		Resposta
1	A/+	B/+	$Y_{A+,B+}$
2	A/+	B/-	$Y_{A+,B-}$
3	A/-	B/-	$Y_{A-,B-}$
4	A/-	B/+	$Y_{A-,B+}$

FONTE:O Autor

O principal efeito do fator A pode ser calculado pela diferença entre a resposta média no menor nível de A e a resposta média no maior nível de A, o que é representado pela equação (5), onde E_A é o efeito do fator A e y representa a resposta em função dos níveis de A e B.

$$E_A = \frac{y_{A+,B+} + y_{A+,B-}}{2} + \frac{y_{A-,B+} + y_{A-,B-}}{2} \quad (5)$$

Para a avaliação da interação entre fatores, se considera o efeito de um fator nos dois níveis de outro fator, o qual se quer investigar (MONTGOMERY, 2001). Por exemplo, considerando o exemplo da Tabela 6, a diferença do efeito de A nos dois níveis de B e vice-versa irão

representar graficamente se há ou não interação entre os fatores A e B. Considerando a Tabela 7 com números fictícios para exemplificar as respostas, pode-se calcular as interações e representá-las graficamente.

Tabela 7 – Exemplo de experimento fatorial 2^2 para cálculo dos efeitos e interações com respostas fictícias.

Corrida	Fator/ Nível		Resposta
1	A/+	B/+	12
2	A/+	B/-	50
3	A/-	B/-	20
4	A/-	B/+	40

FONTE:O Autor

Logo, o efeito de A para o menor nível de B é dado por:

$$E_{(A,B^-)} = 50 - 20 = 30$$

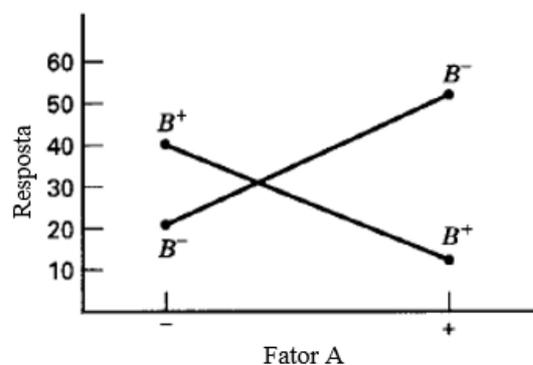
E, o efeito de A para o maior nível de B é dado por:

$$E_{(A,B^+)} = 12 - 40 = -28$$

Nesse exemplo, como o efeito de A depende do nível do fator B, observa-se uma interação entre os dois fatores. A magnitude da interação é obtida pela média da diferença entre $E_{(A,B^-)}$ e $E_{(A,B^+)}$.

Graficamente, quando as linhas se cruzam como mostra a Figura 34, há interação entre os fatores, o que quer dizer que um fator interfere na resposta do outro.

Figura 34 – Fluxograma do procedimento experimental.

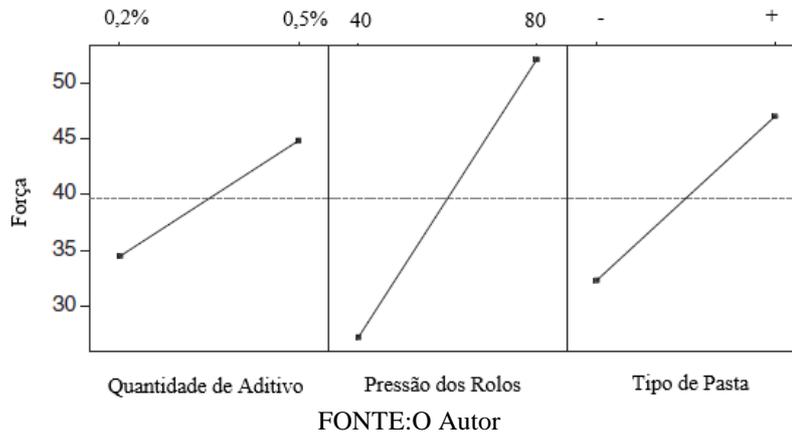


FONTE:O Autor

Da mesma forma como a representação gráfica auxilia a interpretação das interações entre os fatores, ela pode ajudar também na visualização do efeito de cada fator. A equação (5) aplicada a cada fator, gera uma intensidade do efeito que, por sua vez, pode ser graficado. A

Figura 35 traz um exemplo de gráfico de efeitos de fator em um experimento fatorial qualquer. Com o uso da ferramenta gráfica, a comparação entre fatores em relação a maior significância no efeito da resposta se torna mais compreensível.

Figura 35 – Exemplo de gráfico de efeitos para um experimento fatorial com 2 fatores quantitativos e 1 fator qualitativo.



3.5.3 Predição dos Efeitos

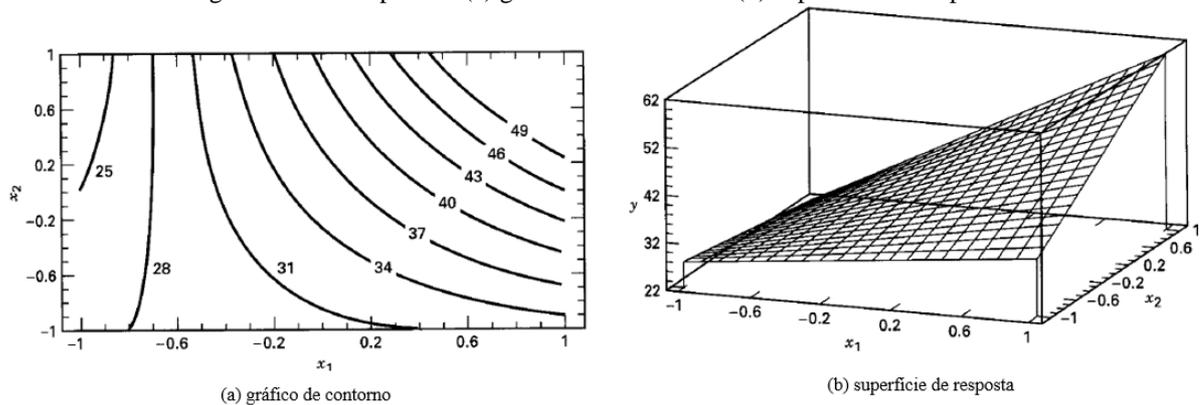
Um dos benefícios de um experimento fatorial é de permitir a criação de um modelo matemático que possa prever respostas em função dos níveis dos fatores relacionados. Isso proporciona simulações de cenários de processos e produtos sem necessidade de se experimentar, evitando, assim, perdas no processo, indisponibilidade de produção, etc. A equação (6) traz uma representação de um modelo de regressão de um experimento com 2 fatores, onde y é a resposta, β são os parâmetros cujos valores são calculados, x_1 é a variável que representa o fator A, x_2 é a variável que representa o fator B e ϵ é o erro aleatório. Os valores de β são exatamente a metade dos efeitos de cada fator e das interações.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (6)$$

A representatividade do modelo e suas predições com a realidade do processo vai depender da aderência dos seus resultados aos resultados reais obtidos e medidos. Essa aderência é chamada de teste de correlação R^2 e deve ser de no mínimo 0,80 para ser utilizada como ferramenta de predição do processo (SHAHABADI *et al*, 2014).

A partir da regressão dos dados obtidos pelo experimento, é possível representar a resposta em gráficos que contemplam os níveis dos fatores. Os mais utilizados são: o gráfico de contorno e o de superfície de resposta que estão representados na Figura 36.

Figura 36 – Exemplos de (a) gráfico de contorno e (b) superfície de resposta.



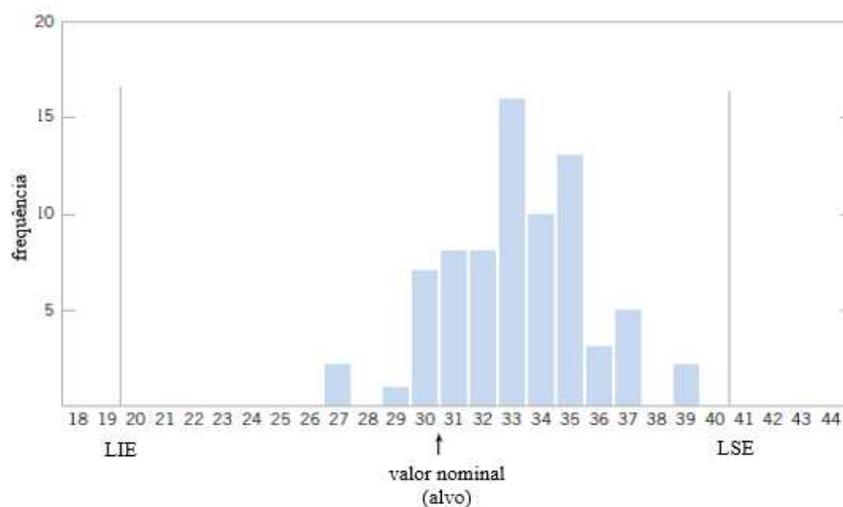
FONTE:O Autor

3.5.4 Capabilidade de Processos

O objetivo da análise da capacidade é de avaliar se os processos são suficientes para atender os requerimentos dos clientes e normas. Considera-se para a análise, a variabilidade do processo influenciado somente por causas comuns de variação, ou seja, de fato o que se mede é a capacidade do processo em atender exigências de qualidade e não a sua performance.

A Figura 37 exemplifica o histograma de um processo qualquer onde contém os limites inferiores e superiores de especificação do produto/processo (LIE e LSE) com indicação do valor nominal (alvo) e, na distribuição de frequências, a variabilidade de tal produto/processo.

Figura 37 – Distribuição de frequência de um processo com valor nominal e limites de especificação.



FONTE:O Autor

Portanto, a relação de capacidade do processo, representado pela Figura 36, é dada pela equação (7) onde C_p é a capacidade, LSE é o limite superior da especificação, LIE é o limite inferior da especificação e σ é o desvio padrão do processo.

$$C_p = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \quad (7)$$

Quanto maior o valor de C_p , maior é a relação entre os limites de especificação e a variabilidade do processo, ou seja, menor a probabilidade de produção de peças defeituosas. Um C_p de valor 1 representa um processo no qual sua variabilidade é igual à tolerância da especificação, sendo que se a média estiver deslocada do alvo, há probabilidade de produzir peças defeituosas.

Portanto, uma outra equação relaciona o C_p com a centralização do processo em função da tolerância da especificação. Então, para processos não centrados, a equação (8) mostra o C_{pk} como a capacidade, onde μ é a média do processo.

$$C_{pk} = \min \left[\frac{LSE-\mu}{3\sigma}, \frac{\mu-LIE}{3\sigma} \right] \quad (8)$$

Montgomery (2001) afirma que para a maioria dos processos de fabricação das empresas americanas o C_p alvo é 1,33.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção, são apresentados o arame de aço SAE 1406, de diâmetro 1,60mm, e suas propriedades. Em seguida, é apresentado o método de análise do sistema de medição da camada de zinco como preparação para os testes em linha e o método estatístico para aplicação do experimento. Por fim, é realizada a validação das respostas do experimento para obtenção dos parâmetros adequados na linha de galvanização em uma siderúrgica do Nordeste.

4.1 MATERIAIS

A norma ASTM A123/A123M (Padrão para especificação para coberturas de zinco em produtos de ferro e aço) estabelece camadas mínimas de zinco em função do diâmetro de arames. Portanto, o produto com diâmetro de 1,60mm deve conter no mínimo 50 g/m² de zinco em sua superfície e é considerado como CLASSE I, ou chamado de produto com camada leve.

Já para as propriedades mecânicas como tensão máxima de ruptura e alongamento, a especificação fica a cargo do cliente, em função da aplicação do produto. O arame utilizado nos testes utiliza o aço equivalente ao SAE 1406 e é microlaminado em duas máquinas distintas a partir de fio máquina de 5,50mm. A primeira máquina tem função de reduzir a seção do material até 2,80mm e, em seguida, há um novo processo de microlaminação com passes de redução para até 1,60mm. Somente na primeira redução de seção se utiliza fieira e tem função importante para agregar lubrificante para o resto dos passes a fim de evitar falhas superficiais e superaquecimento.

A forma de acondicionamento do material é em carretéis, o que possibilita maior armazenamento e menos discontinuidades no processo de testes. A rastreabilidade dos carretéis é mantida através dos lotes de produção contidos nas etiquetas identificadoras de cada produto, onde é possível avaliar histórico de produção bem como problemas mecânicos, elétricos ou de qualidade que tenham afetado o produto.

Os parâmetros de processo para a produção das amostras trefiladas foram mantidos para todo o lote de testes e, como principais fatores, foram observados: lote do fio máquina, grau de oxidação do fio máquina, plano de passes das máquinas de trefila, lubrificantes e temperatura da água de refrigeração dos microcassetes. Contudo, o lote do arame trefilado para testes foi

inspecionado antes de entrar no processo de galvanização com o intuito de assegurar as características superficiais do material, como: arranhões, frisos, marcas e ovalização.

4.2 MÉTODO

Antes da aplicação do método estatístico para a experimentação, foi realizada a análise do sistema de medição de camada de zinco para a garantia da confiabilidade dos resultados. Para a parametrização dos fatores e seus níveis que influenciam mais significativamente a formação da camada de zinco, com o intuito de se reduzir o excesso em relação ao mínimo estipulado pela norma ASTM A123/A123M (Padrão para especificação para coberturas de zinco em produtos de ferro e aço), o método utilizado foi o teste fatorial completo em linha contínua de galvanização de arames. As etapas do método são descritas a seguir.

4.2.1 Análise do Sistema de Medição de Camada de Zinco

A norma ASTM A90/A90M (Método de teste padrão para peso [massa] de coberturas sobre produtos de ferro e aço com zinco ou liga de zinco) determina o método que deve ser utilizado para medição da camada de zinco de arames. Basicamente, a equação (1) relaciona as variáveis do processo de teste de camada para a resposta em gramas de zinco por metro quadrado de superfície. C_{Zn} é a camada de zinco dada em g/m^2 , m_i é a massa inicial da amostra de arame galvanizado em g, m_f é a massa final do arame decapado em g, ϕ é o diâmetro do arame decapado em m e l é o comprimento da amostra em m.

$$C_{Zn} = \frac{m_i - m_f}{\phi \pi l} \quad (9)$$

Ainda pela norma ASTM A90/A90M (Método de teste padrão para peso [massa] de coberturas sobre produtos de ferro e aço com zinco ou liga de zinco), as amostras devem ter no mínimo 300 milímetros de comprimento. Para a obtenção da massa inicial da amostra, deve-se utilizar uma balança com resolução mínima de 0,01g e para obtenção da massa final, antes da pesagem, deve-se utilizar imersão em banho ácido contendo ácido clorídrico, água destilada e cloreto de antimônio como inibidor. As outras variáveis da equação (1) devem ser obtidas com o uso de micrômetro para diâmetro θ e régua para o comprimento l da amostra.

Como as variáveis da equação (10) são independentes e compõem um sistema de medição indireto, com relações matemáticas para a obtenção do resultado de medição, se utilizou a expressão genérica representada pela equação (10) onde $u(C_{Zn})$ é a incerteza combinada de medição da camada de zinco em g/m^2 , $u(m_{Zn})$ é a incerteza padrão de medição da massa de zinco formada no processo em g, $u(\phi)$ é a incerteza padrão de medição do diâmetro do arame em mm e $u(l)$ é a incerteza padrão de medição do comprimento da amostra em mm.

$$u(C_{Zn})^2 = \left(\left| \frac{\partial C_{Zn}}{\partial m_{Zn}} \right| u(m_{Zn}) \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial C_{Zn}}{\partial \phi} \right| u(\phi) \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial C_{Zn}}{\partial l} \right| u(l) \right)^2 \quad (10)$$

Derivando os termos da equação (10) em função das expressões da equação (9), tem-se a equação (11) que calcula a incerteza padrão combinada do sistema indireto de medição.

$$u(C_{Zn}) = \sqrt{\left(\frac{1}{\pi \phi l} u(m_{Zn}) \right)^2 + \left(\frac{-m_{Zn}}{\pi \phi^2 l} u(\phi) \right)^2 + \left(\frac{m_{Zn}}{\pi l^2 \phi} u(l) \right)^2} \quad (11)$$

As incertezas de cada fator da equação (11) são obtidas através da avaliação das informações de calibração de cada instrumento utilizado (micrômetro, régua e balança) para identificação das fontes de incerteza e também de repetidas medições diretas de cada mensurando para cálculo do desvio padrão amostral. Foram tomadas 12 repetições de medição em cada variável.

A Tabela 8 traz de forma resumida o balanço de incertezas de medição que é aplicado a cada fator da equação (10) para se obter a respectiva incerteza padrão que é usada no cálculo da equação (11). As fontes de incerteza do tipo A são obtidas por meios estatísticos, a partir de várias observações repetidas do mensurando. Já as fontes de incerteza do tipo B são obtidas por meio de certificados de calibração, especificações do instrumento, manuais técnicos, etc. O número de graus de liberdade ν é referente à fonte de incerteza que, no caso da repetitividade, é em função do número de amostras utilizadas e, no caso da incerteza combinada, é em função do número de graus de liberdade efetivo. A incerteza expandida é a incerteza combinada com nível de confiança de 95%, portanto se utiliza o coeficiente de *student* como fator de abrangência.

Tabela 8 – Exemplo de balanço de incertezas de sistema direto de medição.

Fontes de Incerteza (Tipo A/B)	Valor	Distribuição	Divisor	Incerteza Padrão	Nº Graus de Liberdade ν
Repetitividade (A)		Normal	2		n-1
Resolução (B)		Uniforme	$\sqrt{3}$		∞
Efeitos Térmicos (B)		Uniforme	$\sqrt{3}$		∞
Incerteza Combinada		Normal			$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{\nu_i}}$

FONTE:O Autor

Dependendo do resultado da equação (11), é realizada uma avaliação de cada fator que compõe o cálculo da camada de zinco em função de sua incerteza padrão e seu impacto na incerteza combinada, com o objetivo de reduzir o erro do sistema e gerar maior confiabilidade nos experimentos.

A Tabela 9 mostra as especificações dos instrumentos utilizados para medição da camada de zinco.

Tabela 9 – Instrumentos de medição utilizados no experimento e suas especificações.

Instrumento	Especificação	Identificação do Instrumento	Instrumento	Especificação	Identificação do Instrumento
Balança de Precisão	Uhaus Adventurer Max Cap 310g Readability 0,001g	BL G01 06	Balança de Precisão	Uhaus Adventurer Max Cap 310g Readability 0,001g	BL G01 06
Micrômetro	Mitutoyo 103-137 0- 25mm Graduação 0,01mm	TL 02 08	Micrômetro	Mitutoyo 103- 137 0-25mm Graduação 0,01mm	TL 02 08
Régua	Mitutoyo Série 182 - Escala Rígida - Cap 600mm Graduação 1;0,05mm	T0 76 0	Régua	Mitutoyo Série 182 - Escala Rígida - Cap 600mm Graduação 1;0,05mm	T0 76 0

FONTE:O Autor

4.2.2 Definição dos Fatores

Ao todo, são 12 fatores referentes ao processo de galvanização e à matéria prima que influenciam na formação da camada de zinco. Para uma prévia seleção de quais fatores considerar no experimento, além da revisão bibliográfica, foram feitas reuniões de discussão com operadores experientes no processo em seções de *brainstorming* avaliando mapa do processo e registros de tratamento de falhas. A Tabela 10 consolida todos os fatores discutidos e avaliados para a seleção dos principais a serem considerados no experimento.

Tabela 10 –Lista de fatores e seus respectivos impactos no processo

Fatores	Unidade	Observações	Impacto do Fator no Processo
Características Superficiais do Arame	N/A	Frisos, arranhões, marcas, ondulações	Falha de zincagem devido ao arraste de chumbo Maior arraste de zinco puro Danos à gaxeta
Composição Química do Aço	[%]	Carbono Equivalente e Silício	Limite de Resistência à tração e Alongamento
Composição Química do Banho de Zinco	[ppm]	Teor de Alumínio na Liga	Fluidez do banho e brilho da superfície
Temperatura do Banho de Zinco	[°C]	Tolerância de +/- 5°C	Reatividade do zinco Tempo de vida útil da cuba metálica
Tempo de Imersão	[s]	Curso de imersão do arame dentro da cuba de zinco	Camada de liga intermetálica
Velocidade da linha	[m/min]	Tempo mínimo para decapagem química do arame	Arraste de zinco puro e camada de liga intermetálica
Método de Extração	[N/A]	Tipo de raspagem / Tipo de gaxeta	Residual de zinco puro e brilho
Tempo de Vida da Gaxeta	[min]	Tempo para aperto e troca da gaxeta	Arraste de zinco puro
Concentração do Banho de Ácido Clorídrico	[g/L]	Tolerância de +/- 40 g/L	Falha de zincagem Manchas escuras na superfície do arame
Teor de Ferro no Banho de Ácido Clorídrico	[g/L]	Máximo de 5 g/L	Falha de zincagem Manchas escuras na superfície do arame
Densidade do Banho de Fluxo	[°Be]	Tolerância de +/- 4 °Be	Falha de zincagem
Teor de Ferro no Banho de Fluxo	[g/L]	Máximo de 5 g/L	Formação de borra de FeZn no fundo da cuba metálica

FONTE:O Autor

A partir da Tabela 10, foram analisados os impactos de cada fator no processo e de que forma se poderia controlar a variação dos seus níveis para de medir o efeito na camada de zinco. Logo, dos 12 fatores iniciais, 4 foram escolhidos como principais pelos seus efeitos e pelo modo de controle.

Para a variação do tempo de imersão do arame sem necessidade de aumento ou redução de velocidade para tal, foi projetado um dispositivo para tornar variável a imersão dos arames ao longo da cuba de zinco sem riscos de segurança. Dessa forma, tornou-se possível a escolha desse fator como um dos principais para ser considerado no experimento.

A gaxeta mais utilizada em linhas de galvanização para camadas leve é à base de aramida e grafite, pois também tem função de vedar a água de refrigeração dos arames. De forma a se considerar o tipo de gaxeta como fator importante no processo de raspagem do excesso de zinco, foi desenvolvida uma alternativa à base de aramida e fibra de vidro, sendo essa mais dura e mais resistente à temperatura. Então, se compôs, para o fator tempo de vida da gaxeta, dois níveis categóricos: uma gaxeta mais macia com maior potencial de abraçar o arame e outra mais dura, mais resistente a temperatura e com maior poder de raspagem.

A Tabela 11 traz a consolidação da escolha dos fatores e o intervalo limite para alteração dos seus níveis em termos de segurança, qualidade e limitações físicas dos equipamentos.

Tabela 11 – Fatores definidos para o experimento e seus níveis com suas limitações.

Fatores	Intervalo dos Níveis	Limitação	Fatores	Intervalo dos Níveis	Limitação
Velocidade da Linha [m/min]	40 e 80	Segurança: velocidade de bobinamento do fio	Velocidade da Linha [m/min]	40 e 80	Segurança: velocidade de bobinamento do fio
Curso de Imersão [mm]	3220 e 6440	Equipamento: espaço físico para alteração do curso	Curso de Imersão [mm]	3220 e 6440	Equipamento: espaço físico para alteração do curso
Tipo de Gaxeta	Grafite e Fibra de Vidro	Qualidade: desenvolvimento de nova gaxeta	Tipo de Gaxeta	Grafite e Fibra de Vidro	Qualidade: desenvolvimento de nova gaxeta

FONTE:O Autor

Tempo de imersão e velocidade são fatores com o maior potencial de dependência, pois ao reduzir a velocidade do arame, se aumenta o tempo de imersão e vice-versa. Portanto, ao definir o curso de imersão com unidade de comprimento, se eliminou por completo a

dependência das variáveis, podendo-se, então, alterar o tempo de imersão sem alterar a velocidade do fio. Logo, o experimento é composto por 4 fatores independentes entre si.

4.2.3 Fatores Ruído

Algumas das variáveis que influenciam direta ou indiretamente a formação da camada de zinco são difíceis de pilotar, ou seja, variar os seus níveis de forma controlada e adequada para medir o seu efeito. Porém, elas não perdem a importância de sua influência na resposta. Da Tabela 10, foram retirados alguns fatores para compor a Tabela 11, mesmo não se desejando perder o controle do efeito de cada um deles no experimento. Então, todas as variáveis que possuem efeito na resposta e que não serão consideradas no experimento são chamadas de ruído e estão listadas na Tabela 12 com o seu modo de variação e a alternativa existente para bloqueio, ou seja, para não confundir os seus efeitos com outros fatores considerados.

Tabela 12 – Listagem dos fatores ruído a serem controlados no experimento.

Fatores Ruído	Modo de Variação	Alternativa de bloqueio
Características Superficiais do Arame	Variável aleatória entre lotes de produção de arame (microcassete, fieira, bloco, etc.)	Utilizar somente 1 lote de arame
Composição Química do Aço	Variável aleatória entre lotes de produção de fio máquina	Utilizar somente 1 lote de fio máquina
Composição Química do Banho de Zinco	Variável aleatório entre lotes de zinco	Utilizar mesmo lote de zinco para abastecimento
Temperatura do Banho de Zinco	Variável flutuante entre temperatura mínima e máxima	Parar se alarme de temperatura soar
Concentração do Banho de Ácido Clorídrico	Variável flutuante entre dias de produção	Preparar mesma concentração no primeiro turno de produção
Teor de Ferro no Banho de Ácido Clorídrico	Variável flutuante entre dias de produção	Ajustar, caso necessário, no primeiro turno de produção
Densidade do Banho de Fluxo	Variável flutuante entre dias de produção	Ajustar, caso necessário, no primeiro turno de produção
Teor de Ferro no Banho de Fluxo	Variável flutuante entre dias de produção	Ajustar, caso necessário, no primeiro turno de produção

FONTE:O Autor

4.2.4 Blocagem, Resolução, Aleatorização e Replicação

O menor intervalo de tempo para não haver variação nos níveis da maioria dos fatores de ruído é a soma de 3 turnos de produção, 24 horas. Esses são os fatores que correspondem ao tratamento químico do arame antes da entrada no zinco. Por sua vez, os demais fatores de ruído (características superficiais do arame, composição química do aço e composição química do banho) são atrelados à variação entre lotes de arame, fio máquina e zinco, respectivamente.

Portanto, foi considerada a premissa de que durante em 1 dia de produção não há variação significativa dos fatores de ruído referentes ao tratamento químico do arame, e que nos lotes de produção dos arames, lotes de zinco e de fio máquina também não há variação significativa. Logo, pode-se considerar que a cada 24 horas tem-se um bloco contendo flutuações menos danosas dos fatores de ruído do tratamento químico e que dentro dos lotes de arame, zinco e fio máquina não há variação significativa quanto a características superficiais do arame, composição química do aço e composição química do banho de zinco. A Tabela 13 consolida os blocos criados para controlar os fatores de ruído, com o intuito de reduzir o erro do experimento. Então, os únicos blocos utilizados são referentes ao intervalo de tempo de 24 horas e, para os demais fatores de ruído, é utilizado meio de controle por lote.

Tabela 13 – Controles dos fatores de ruído e definição do bloco.

Fator de Ruído	Possível Blocagem	Definição do Bloco
Características Superficiais do Arame	Lote do Arame	Utilizar somente 1 lote no experimento
Composição Química do Aço	Lote do Fio Máquina	Utilizar somente 1 lote do Fio Máquina
Composição Química do Banho de Zinco	Lote do Zinco	Utilizar somente 1 lote do Zinco
Temperatura do Banho de Zinco	Dia - 24 horas	Bloco - Dia
Concentração do Banho de Ácido Clorídrico		
Teor de Ferro no Banho de Ácido Clorídrico		
Densidade do Banho de Fluxo		
Teor de Ferro no Banho de Fluxo		

FONTE:O Autor

Em experimentos fatoriais do tipo 2^k , a resolução da resposta é função do número de combinações que serão utilizadas. O total de combinações, considerando todas as interações possíveis, compõe o experimento fatorial completo, ao passo que o experimento fatorial

fracionado considera menos combinações, reduzindo o número de tratamentos e, conseqüentemente, o tempo total do teste. Para o experimento com a camada de zinco considerando os 4 fatores já mencionados, se utilizou o método fatorial completo, com resolução máxima – resolução V. No total, são 16 tratamentos que compõe o total de interações possíveis entre os fatores.

Com o objetivo de garantir que todos os fatores em seus níveis tiveram a mesma chance de serem afetados pelos fatores de ruído, os 16 tratamentos foram realizados de forma aleatória e, para obter a estimativa do erro do experimento e aumentar a precisão das estimativas dos efeitos de cada fator, cada tratamento foi replicado por 3 vezes, num total de 48 testes com 3 repetições para garantir a resposta do sistema de medição. A Tabela 14 traz de maneira resumida as condições de cada tratamento do experimento.

Tabela 14 – Tabela do experimento aleatorizado com os 4 fatores e seus níveis.

Velocidade da Linha [m/min]	Tempo de Vida da Gaxeta [min]	Curso de Imersão [mm]	Tipo de Gaxeta
40	5	3220	grafite
40	5	3220	fibra de vidro
40	5	6440	grafite
Velocidade da Linha [m/min]	Tempo de Vida da Gaxeta [min]	Curso de Imersão [mm]	Tipo de Gaxeta
40	5	6440	fibra de vidro
40	60	3220	grafite
40	60	3220	fibra de vidro
40	60	6440	grafite
40	60	6440	fibra de vidro
80	5	3220	grafite
80	5	3220	fibra de vidro
80	5	3220	grafite
80	5	6440	fibra de vidro
80	60	3220	grafite
80	60	3220	fibra de vidro
80	60	6440	grafite
80	60	6440	fibra de vidro

O Autor

Cada linha da Tabela 14 é um tratamento do experimento que foi repetido 3 vezes – 3 réplicas aleatórias. A resposta na coluna da camada de zinco é uma média aritmética das 3 repetições em cada tratamento, para controle do erro de medição.

O tempo total requerido pelo teste foi calculado em função dos câmbios a serem feitos na linha de produção para configurar os parâmetros de cada tratamento em função do número de combinações e de réplicas utilizadas. A Tabela 15 mostra os tempos calculados para as 3 réplicas para todo o experimento e a programação de cada atividade externa ao experimento para garantir o cumprimento de todos os tópicos descritos nesse capítulo. O tempo para retirada das amostras também foi considerado para se programar o número de tratamentos por dia de teste, sendo uma réplica por dia em função da variação dos fatores de ruído. Portanto, cada réplica foi realizada em aproximadamente 5 horas por 3 dias consecutivos.

Tabela 15 – Tempo total requerido pelo teste – câmbios e tempo para coleta de amostras.

Velocidade da Linha [m/min]	Tempo de Vida da Gaxeta [min]	Curso de Imersão [mm]	Tipo de Gaxeta	Tempo de Câmbio + Tempo para Coleta da Amostra [min]	Tempo Total do Teste [h]
40	5	3220	grafite	20	15,17
40	5	3220	fibra de vidro	20	
40	5	6440	grafite	60	
40	5	6440	fibra de vidro	20	
40	60	3220	grafite	120	
40	60	3220	fibra de vidro	90	
40	60	6440	grafite	120	
40	60	6440	fibra de vidro	20	
80	5	3220	grafite	60	
80	5	3220	fibra de vidro	20	
80	5	6440	grafite	60	
80	5	6440	fibra de vidro	20	
80	60	3220	grafite	120	
80	60	3220	fibra de vidro	20	
80	60	6440	grafite	120	
80	60	6440	fibra de vidro	20	

FONTE:O Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão exibidos de acordo com o método descrito anteriormente em sua respectiva ordem, contemplando sistema de medição, experimento fatorial completo, validação da parametrização e análise estatística comparativa.

5.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição de camada de zinco foi avaliado para o cálculo da incerteza da resposta, sendo cada fator da equação (9) analisado separadamente. O resultado da incerteza do sistema de medição é mostrado através da Tabela 16.

Tabela 16 – Incerteza padrão, combinada e expandida dos instrumentos de medição.

Instrumento	Fontes de Incerteza (Tipo A/B)	Valor	Distribuição Assumida	Divisor	Incerteza Padrão	Nº Graus de Liberdade
Micrômetro	Incerteza de Medição (B)	0,02	normal	2,00	0,01	∞
	Resolução (B)	0,01	uniforme	$\sqrt{3}$	0,01	∞
	Incerteza Padrão (A)		normal		0,00	11
	Incerteza combinada (A)		normal		0,01	11
Régua - Escala Rígida	Resolução (B)	0,05	uniforme	$\sqrt{3}$	0,03	∞
	Incerteza Padrão (A)		normal		0,13	11
	Incerteza combinada (A)		normal		0,13	11
Balança de Precisão	Resolução (B)	0,001	uniforme	$\sqrt{3}$	0,01	∞
	Incerteza Padrão (A)		normal		0,018	11
	Incerteza combinada (A)		normal		0,019	11

FONTE:O Autor

Com as incertezas de cada medição (diâmetro, comprimento e massa), utilizando a equação (11), é calculada a incerteza do sistema de medição indireto. A Tabela 17 traz o resultado geral do sistema, onde cada derivada parcial foi representada pelos índices A, B e C conforme à medição referente à massa, diâmetro e comprimento, respectivamente.

Tabela 17 – Incertezas relacionadas às medições diretas e incerteza do sistema indireto de medição.

Medições Diretas da amostra		Parcelas (Equação 3.5)	
Massa [g]	0,14	A - Massa	13
Diâmetro [mm]	1,55	B - Diâmetro	0,6
Comprimento [m]	0,3	C - Comprimento	0,041
Camada de Zinco [g/m²]	96	Incerteza do Sistema de Medição [g/m²]	13,02

FONTE:O Autor

O cálculo da incerteza do sistema de medição resulta que a camada de zinco da amostra testada é de $96 \pm 13,02$ g/m². Segundo a norma ASTM A90/A90M (Método de teste padrão para peso [massa] de coberturas sobre produtos de ferro e aço com zinco ou liga de zinco), a incerteza prevista para um teste de camada de zinco obtido com o mesmo operador, mesmos equipamentos de medição e mesmo laboratório, não são equivalentes se for maior que 12,20 g/m². Portanto, devido à incerteza da massa é o maior fator de variabilidade (parcela A da Tabela 15) foi realizado um ajuste na solução ácida de decapagem, adicionando-se um inibidor, para padronizar o tempo de imersão das amostras em função do borbulhamento causado pelo hidrogênio. A Tabela 18 mostra o mesmo cálculo da incerteza do sistema após as mudanças devidas no procedimento de ensaio e retreinamento dos operadores.

Tabela 18 – Incerteza do sistema de medição após ajustes na solução ácida e retreinamento.

Medições Diretas da amostra		Parcelas (Equação 13)	
Massa [g]	0,12	A - Massa	5,47
Diâmetro [mm]	1,55	B - Diâmetro	0,6
Comprimento [m]	0,3	C - Comprimento	0,041
Camada de Zinco [g/m²]	82	Incerteza do Sistema de Medição [g/m²]	5,51

O Autor

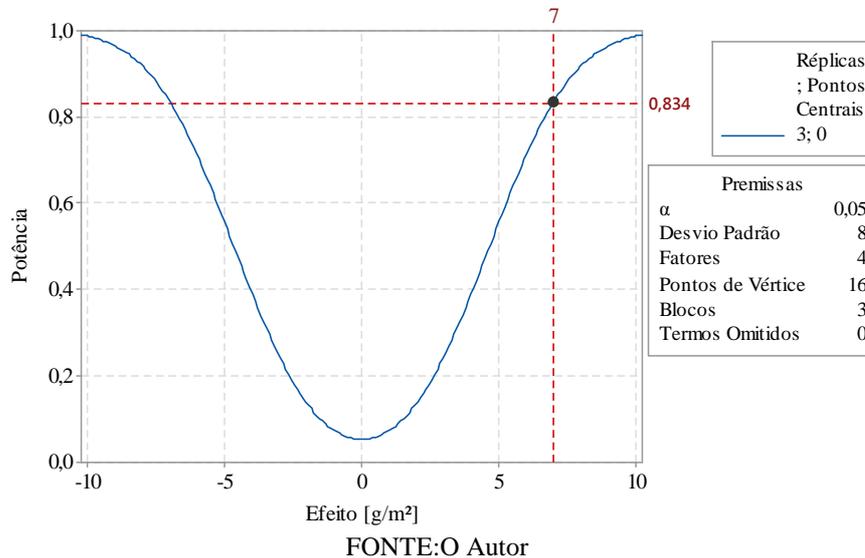
Portanto, a incerteza do sistema indireto de medição de camada de zinco é de 5,51 g/m² atendendo à norma ASTM A90/A90M (Método de teste padrão para peso [massa] de coberturas sobre produtos de ferro e aço com zinco ou liga de zinco).

5.2 EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

A análise dos dados obtidos no experimento, foi realizada com o uso do programa Minitab®, onde foram inseridas todas as condições de aleatorização, replicação e blocagem. Na Figura 38, tem-se o resultado da potência estatística do teste em função do número de réplicas considerado e da variação mínima da resposta a ser percebida pelo teste (menor

diferença entre tratamentos). Esta análise é um meio bastante efetivo para medir a sensibilidade do experimento e sua eficácia (MONTGOMERY, 2001).

Figura 38 – Potência estatística e sensibilidade do experimento para o número de réplicas considerado.



Pela Figura 38, utilizando-se 3 réplicas, tem-se 83,4% de probabilidade de o experimento conseguir identificar uma variação de 7 unidades na camada de zinco, em g/m². Portanto, o planejamento do experimento é capaz de gerar dados com boa significância estatística com o número de réplicas escolhido (MONTGOMERY, 2001). A Tabela 19 consolida o resultado de todos os testes.

Tabela 19 – Respostas da camada de zinco em função dos tratamentos do experimento.

Corrida	Ponto Central	Bloco	Velocidade [m/min]	Curso de Imersão [mm]	Tempo de Gaxeta [min]	Tipo de Gaxeta	Camada de Zinco [g/m ²]
1	1	1	40	3220	5	Grafite	54,05
2	1	1	80	3220	5	Grafite	56,81
3	1	1	40	6440	5	Grafite	85,84
4	1	1	80	6440	5	Grafite	88,53
5	1	1	40	3220	60	Grafite	82,65
6	1	1	80	3220	60	Grafite	116,24
7	1	1	40	6440	60	Grafite	132,69
8	1	1	80	6440	60	Grafite	180,29
9	1	1	40	3220	5	Fibra de Vidro	41,63
10	1	1	80	3220	5	Fibra de Vidro	30,52
11	1	1	40	6440	5	Fibra de Vidro	67,99

Ordem da Corrida	Ponto Central	Bloco	Velocidade	Curso de Imersão	Tempo de Gaxeta	Tipo de Gaxeta	Camada de Zinco [g/m²]
12	1	1	80	6440	5	Fibra de Vidro	48,01
13	1	1	40	3220	60	Fibra de Vidro	58,5
14	1	1	80	3220	60	Fibra de Vidro	77,33
15	1	1	40	6440	60	Fibra de Vidro	83,12
16	1	1	80	6440	60	Fibra de Vidro	55,14
17	1	2	40	3220	5	Grafite	59,34
18	1	2	80	3220	5	Grafite	54,56
19	1	2	40	6440	5	Grafite	87,34
20	1	2	80	6440	5	Grafite	87,03
21	1	2	40	3220	60	Grafite	79,12
22	1	2	80	3220	60	Grafite	113,81
23	1	2	40	6440	60	Grafite	136,14
24	1	2	80	6440	60	Grafite	179,32
25	1	2	40	3220	5	Fibra de Vidro	42,62
26	1	2	80	3220	5	Fibra de Vidro	32,56
27	1	2	40	6440	5	Fibra de Vidro	70,43
28	1	2	80	6440	5	Fibra de Vidro	50,21
29	1	2	40	3220	60	Fibra de Vidro	63,21
30	1	2	80	3220	60	Fibra de Vidro	76,02
31	1	2	40	6440	60	Fibra de Vidro	78,47
32	1	2	80	6440	60	Fibra de Vidro	54,83
33	1	3	40	3220	5	Grafite	56,44
34	1	3	80	3220	5	Grafite	52,63
35	1	3	40	6440	5	Grafite	83,26
36	1	3	80	6440	5	Grafite	89,94
37	1	3	40	3220	60	Grafite	75,65
38	1	3	80	3220	60	Grafite	114,55
39	1	3	40	6440	60	Grafite	128,91
40	1	3	80	6440	60	Grafite	178,81
41	1	3	40	3220	5	Fibra de Vidro	43,24
42	1	3	80	3220	5	Fibra de Vidro	32,01

Ordem da Corrida	Ponto Central	Bloco	Velocidade	Curso de Imersão	Tempo de Gaxeta	Tipo de Gaxeta	Camada de Zinco [g/m ²]
43	1	3	40	6440	5	Fibra de Vidro	71,13
44	1	3	80	6440	5	Fibra de Vidro	49,95
45	1	3	40	3220	60	Fibra de Vidro	61,32
46	1	3	80	3220	60	Fibra de Vidro	83,38
47	1	3	40	6440	60	Fibra de Vidro	81,83
48	1	3	80	6440	60	Fibra de Vidro	58,98

FONTE:O Autor

Em função da validação do planejamento do experimento, com a execução de todos os tratamentos das combinações entre os fatores escolhidos, a Tabela 20 é o primeiro resultado do processamento dos dados das respostas colhidas que direciona aos fatores que mais influenciam a resposta através da análise de variância. Essa ferramenta estatística consegue comparar os efeitos dos fatores e suas interações e concluir se há ou não significância estatística para cada fator em função do seu efeito na resposta (MONTGOMERY *et al*, 2003).

Tabela 20 – Análise de variância no experimento fatorial de 4 fatores e 2 níveis

Fonte	Graus de Liberdade	Estatística F	P Valor
Modelo	17	666,70	0
Blocos	2	0,5	0,824
Linear	4	2102,42	0
Velocidade	1	70,37	0
Curso de Imersão	1	1694,47	0
Tempo de Gaxeta	1	3155,04	0
Tipo de Gaxeta	1	3489,80	0
Interação 2 variáveis	6	369,52	0
Velocidade*Curso de Imersão	1	44,65	0
Velocidade*Tempo de Gaxeta	1	380,85	0
Velocidade*Tipo de Gaxeta	1	504,65	0
Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta	1	2,08	0,159
Curso de Imersão*Tipo de Gaxeta	1	648,53	0
Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	1	636,33	0
Interação 3 variáveis	4	163,64	0
Velocidade*Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta	1	24,51	0

Fonte	Graus de Liberdade	Estatística F	P Valor
Velocidade*Curso de Imersão*Tipo de Gaxeta	1	159,47	0
Velocidade*Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	1	111,18	0
Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	1	359,39	0
Interação 4 variáveis	1	52,38	0
Velocidade*Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	1	52,38	0
Erro	30		
Total	47		

FONTE:O Autor

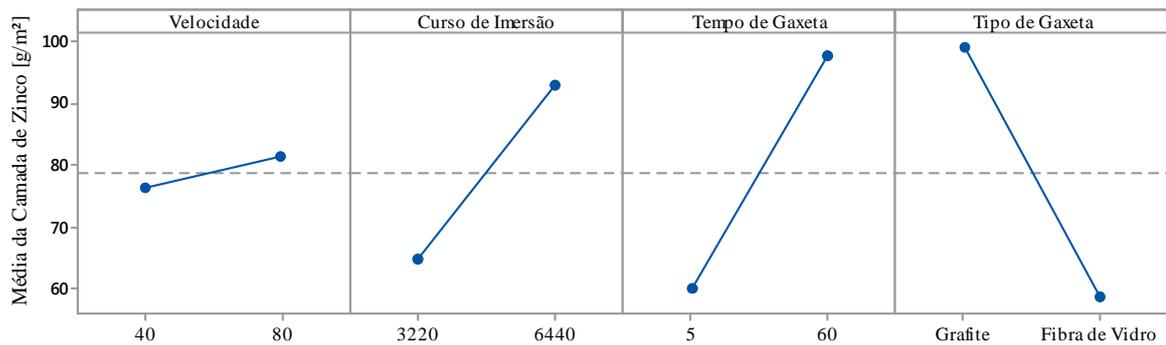
De acordo com a Tabela 20, a estatística F de maior significância, ou seja, maior rejeição da hipótese nula, é referente ao fator tipo de gaxeta. Em segundo lugar, o tempo de gaxeta e em terceiro lugar o curso de imersão. Portanto, esses três fatores representam os principais efeitos na camada de zinco.

As interações de maior efeito na resposta são tempo de gaxeta com tipo de gaxeta e curso de imersão com tipo de gaxeta, ou seja, de maneira geral, as interações com o fator tipo de gaxeta resultaram em valores de F interessantes.

A última coluna da Tabela 20 representa os valores de P onde somente 2 resultaram na admissão da hipótese nula – não há efeito significativo na camada de zinco. A interação do tempo de gaxeta e curso de imersão resultou em um valor de P maior que o nível de significância – o que não demonstra significância na resposta. Outro fator que também não representa efeito significativo é o da blocagem, ou seja, os fatores ruído não representam significância no teste – o que é favorável.

Para visualizar os resultados da Tabela 20 de maneira a direcionar ações e análises para alteração no processo, a Figura 39 mostra os efeitos dos principais fatores na resposta e evidenciam o que foi comentado

Figura 39 –Efeitos dos principais fatores para a camada de zinco.



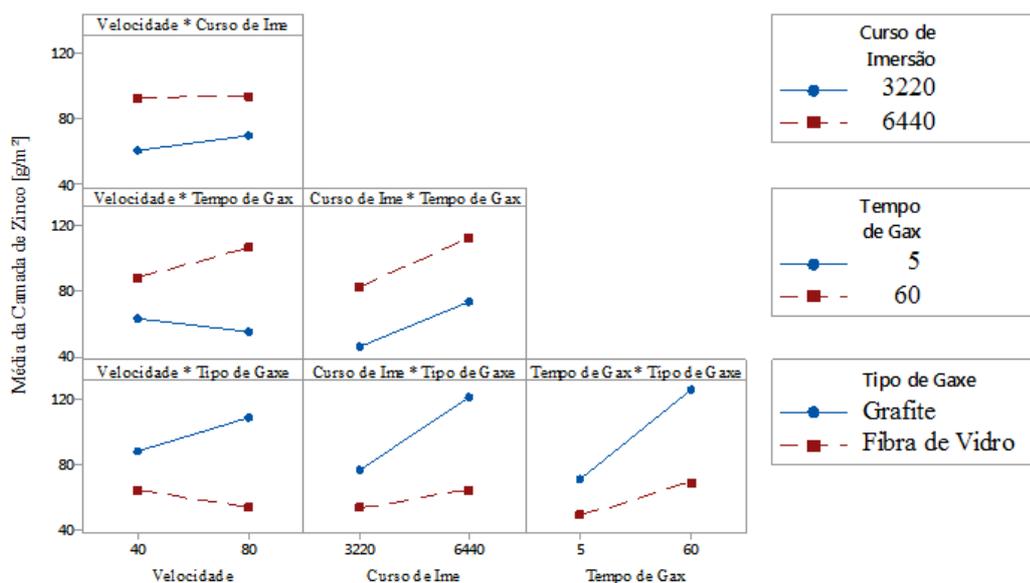
FONTE:O Autor

A inclinação das retas que unem o nível mínimo e máximo de cada fator representa o grau de efeito do fator na resposta (FUNKENBUSCH, 2005). Os fatores curso de imersão, tempo de gaxeta e tipo de gaxeta representam as maiores inclinações de acordo com a Figura 39 e conferem os resultados das Tabela 19. O fator velocidade é representado pela menor inclinação das retas e também confirma o respectivo valor da estatística F e valor P.

A Figura 40 mostra o efeito das interações na camada de zinco, seguindo a mesma lógica da Figura 39.

Figura 40 –Efeitos das interações para a camada de zinco.

Gráfico dos Efeitos para Camada de Zinco
Médias Ajustadas



FONTE:O Autor

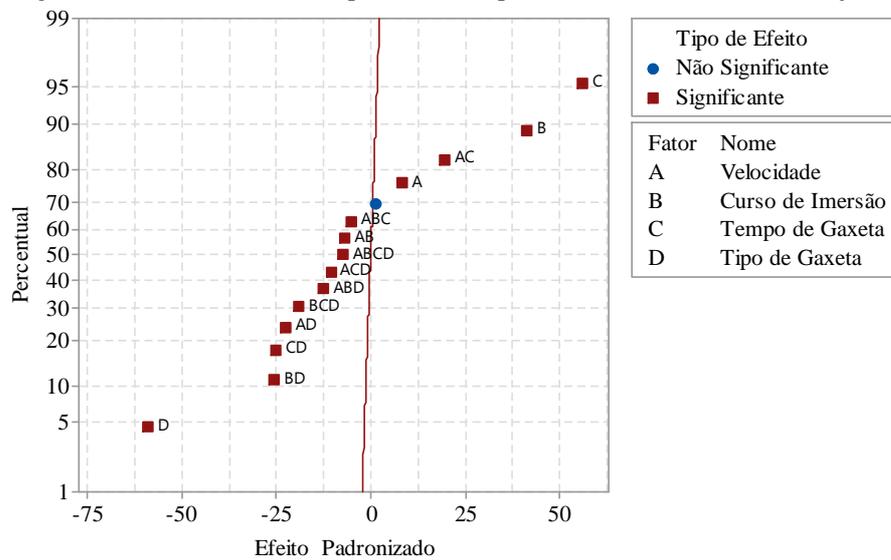
De acordo com a Tabela 19, as interações mais influentes na camada de zinco são curso de imersão com tipo de gaxeta e tempo de imersão com tipo de gaxeta e podem ser destacadas

na Figura 40. Para os menores níveis de curso de imersão tem-se as menores camadas de zinco independentemente do tipo de gaxeta e vice-versa, o mesmo para a interação entre tempo de gaxeta e tipo de gaxeta.

As interações em função da velocidade trazem maior potencial de discussão, pois também mostra tendência de cruzamento das retas em função dos níveis de velocidade e um comportamento inédito para camada de zinco a velocidades superiores. Quanto maior a velocidade do arame, menor o tempo de permanência com o zinco fundido e menor a camada intermetálica (oriunda da reação entre o ferro e o zinco), porém, quanto maior a velocidade, maior o arraste do metal líquido pelo efeito hidrodinâmico. O resultado desse fenômeno é que para maiores velocidades de linha tem-se menores camadas de zinco já que o que é arrastado é restringido na gaxeta (LORENO *et al*, 1993). Porém, não é o que mostra a interação entre velocidade e tipo de gaxeta, pois para a gaxeta de menor dureza, de grafite, a camada aumenta com o aumento da velocidade talvez pelo excesso de fluxo de zinco fundido, ultrapassando o limite de restrição da gaxeta.

Um resumo de fácil visualização das informações contidas nas Tabelas e Figuras sobre os efeitos dos fatores e suas interações é o gráfico mostrado na Figura 41.

Figura 41 –Gráfico dos efeitos padronizados para α de 0,50 – fatores e interações.



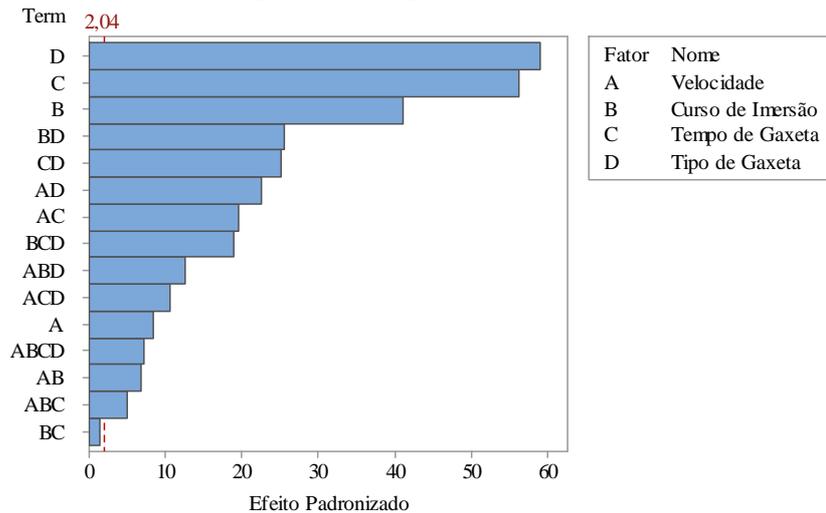
FONTE:O Autor

Na Figura 41, a reta que se aproxima do valor nulo do eixo das abcissas representa o efeito insignificante estatisticamente, ou seja, os fatores ou interações que são plotados sobre a reta ou da referência são considerados pouco significativos (ANTONY, 2003). Logo, seguindo

a legenda da figura em questão, os fatores D, C e B e as interações CD, BD e AD são os principais causadores de variação na camada de zinco.

Outra forma de se visualizar de forma geral a significância dos fatores e interações é mostrada na Figura 42, no gráfico de pareto dos efeitos.

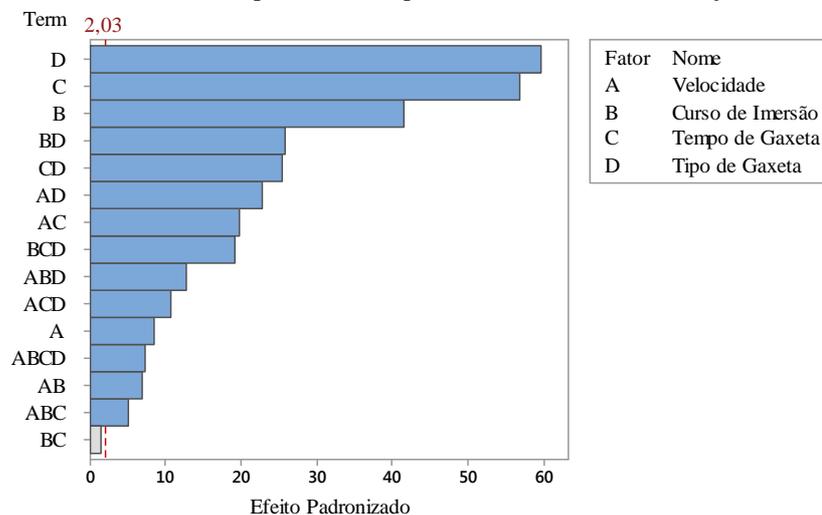
Figura 42 – Pareto dos efeitos padronizados para todos os fatores e interações considerados.



FONTE:O Autor

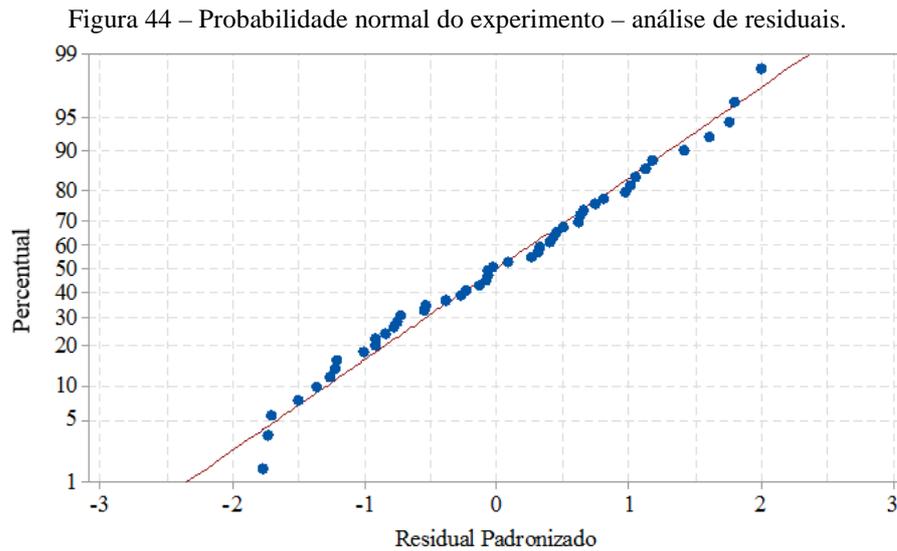
Novamente pela Figura 42, os fatores D, C e B e as interações BD, CD, AD e AC são responsáveis pelos efeitos mais significativos, mesmo que quase a totalidade dos termos considerados estejam acima da linha de referência – analogamente à Figura 40. Portanto, pode-se excluir da análise somente a interação BC, pois está abaixo da referência (MONTGOMERY, 2001). Logo, tem-se a Figura 43 com o pareto dos efeitos padronizados com nova linha de referência após a limpeza dos termos.

Figura 43 – Pareto dos efeitos padronizados para todos os fatores e interações considerados.



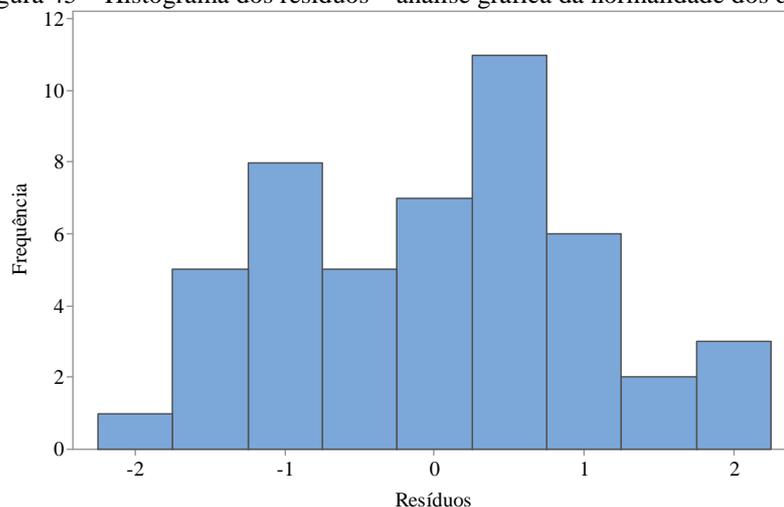
FONTE:O Autor

Conhecidos os fatores e interações mais importantes do processo de formação da camada de zinco contemplando a raspagem pelas gaxetas, torna-se necessária a validação dos resultados com base na análise da normalidade dos dados, pois todas as ferramentas estatísticas utilizadas partem da premissa de que o processo em questão é normal (MONTGOMERY, 2001). A Figura 44 traz o primeiro resultado da análise da normalidade do processo.



A Figura 44 traz o gráfico dos resíduos em relação aos valores esperados quando a distribuição é normal. Portanto, se os valores observados formam uma reta se aproximando da reta de referência, pode-se dizer que o processo é normal (MONTGOMERY, 2001). Para o experimento realizado, não há evidências de não normalidade nem de valores que fogem à linha grosseiramente. Outra forma de se avaliar a normalidade dos dados é mostrada pela Figura 45, através do histograma de resíduos – o que é menos recomendado (ANTONY, 2003).

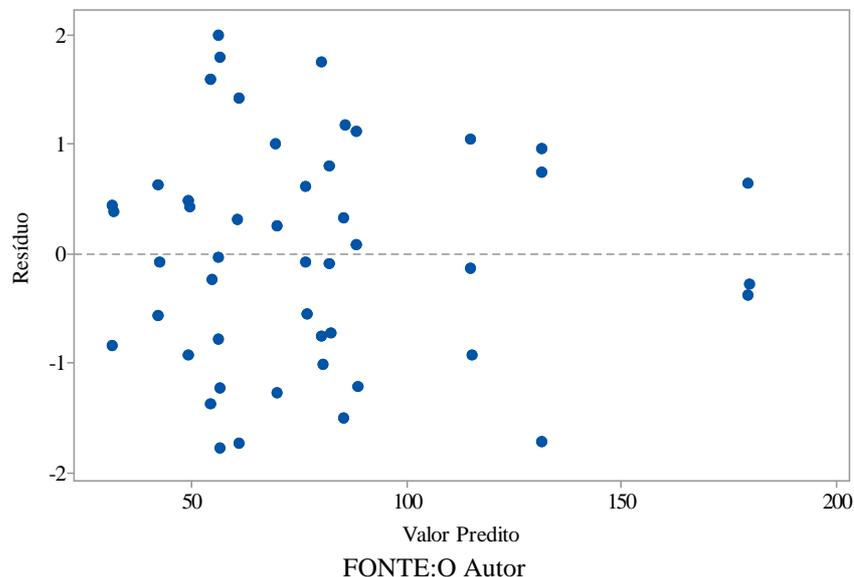
Figura 45 – Histograma dos resíduos – análise gráfica da normalidade dos dados.



Em experimentos fatoriais, o histograma de residuais é usado para a verificação de simetrias e valores não usuais – blocos separados uns dos outros (MONTGOMERY, 2001). A Figura 45 não evidencia assimetrias graves nem residuais que causem transtorno à forma da curva.

Utilizando os valores preditos pelo modelo de regressão do experimento, o gráfico dos resíduos pelos valores preditos pelo modelo também é uma ferramenta de análise da normalidade dos dados. A Figura 46 mostra o gráfico onde se verifica a constância da variância, termos faltantes e valores atípicos.

Figura 46 – Gráfico dos resíduos versus valores preditos pelo modelo de regressão do experimento.



Nota-se, na Figura 46, uma dispersão homogênea sobre a linha de referência, sem evidências de que haja algum padrão se repetindo. Entretanto, os valores acima de 150 g/m² apresentam distinção da maioria. Esses três resultados de camada de zinco representam a condição de velocidade 80 m/min, curso de imersão total (6440 mm), gaxeta de grafite e 60 minutos de tempo de gaxeta. Como trata-se de um tratamento único com as 3 réplicas indicando esses valores, não se faz necessária nenhuma outra ação de limpeza de dados.

Portanto, como os dados se comportam de maneira normal, uma avaliação do conjunto de parâmetros e seus níveis pode ser realizada para validar as condições adequadas e suficientes para se atingir o objetivo do projeto – redução da camada de zinco e de sua variabilidade. Para isso, o modelo de regressão será usado para se traçar curvas de respostas em função da variação dos níveis dos fatores, o que, por conta disso, faz-se necessária a análise dos coeficientes de

correlação. A Tabela 21 traz o modelo de regressão contemplando-se todos os fatores e interações do experimento.

Tabela 21 – Coeficientes do modelo de regressão e correlação com o fenômeno real.

Efeito Padrão	R ²	R ² (ajust)	R ² (pred)
2,32305	0,9972	0,9960	0,9940
Termo	Efeito	Coef.	EP Coef.
Constante		78,883	0,335
Velocidade	5,689	2,845	0,335
Curso de Imersão	27,917	13,959	0,335
Tempo de Gaxeta	38,093	19,047	0,335
Tipo de Gaxeta	-40,063	-20,032	0,335
Velocidade*Curso de Imersão	-4,532	-2,266	0,335
Velocidade*Tempo de Gaxeta	13,235	6,618	0,335
Velocidade*Tipo de Gaxeta	-15,235	-7,618	0,335
Curso de Imersão*Tipo de Gaxeta	-17,271	-8,636	0,335
Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	-17,108	-8,554	0,335
Velocidade*Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta	-3,358	-1,679	0,335
Velocidade*Curso de Imersão*Tipo de Gaxeta	-8,564	-4,282	0,335
Velocidade*Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	-7,151	-3,576	0,335
Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	-12,857	-6,429	0,335
Velocidade*Curso de Imersão*Tempo de Gaxeta*Tipo de Gaxeta	-4,908	-2,454	0,335

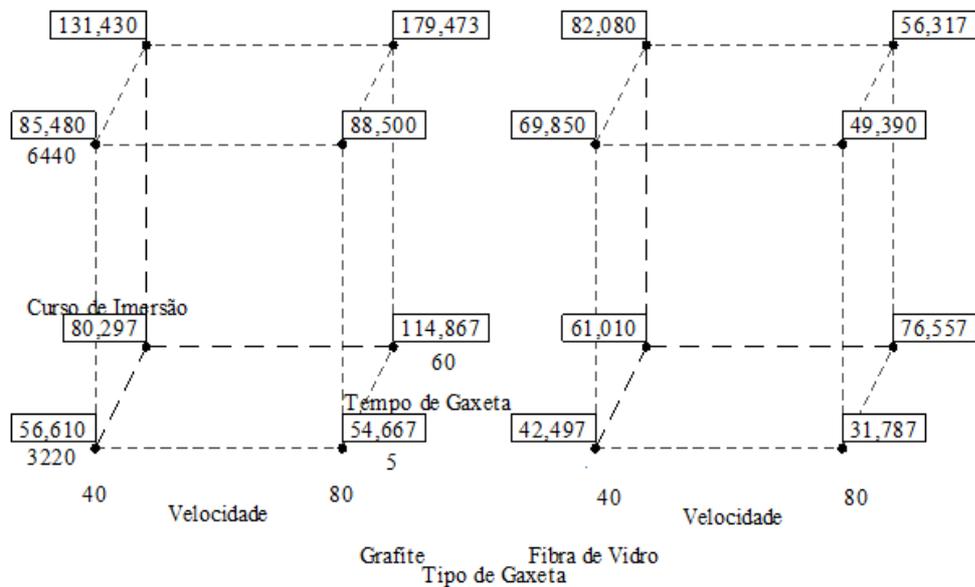
FONTE:O Autor

Pela Tabela 21, no topo, há importantes indicadores do modelo de regressão. O efeito padrão representa a distância padrão dos resultados dos experimentos aos resultados preditos pelo modelo e é medido na mesma unidade da resposta, g/m². Logo, quanto menor é o valor do efeito padrão, melhor é a correção entre o modelo e a realidade (MONTGOMERY, 2001). Destaca-se que o valor do efeito padrão de 2,32 g/m² apresentado na tabela acima é menor que o erro do sistema de medição (5,51 g/m²). O R² corresponde ao percentual dos valores observados que são preditos pelo modelo, ou seja, 99,72% das amostras referentes a cada tratamento do experimento são respondidas pelo modelo de regressão criado. Já o R² (ajust) é o R² ajustado e se utiliza quando se usam termos desnecessários na regressão e que podem confundir o R². E, por fim, o R² (pred) é a capacidade do modelo de prever tratamentos que não foram contemplados no experimento inicial. A diferença entre o R² e os demais indicadores de correlação é insignificante, e os 99,72% representam uma forte correlação, assegurando o potencial do experimento. A coluna dos efeitos, mais uma vez, evidencia a ordenação dos principais efeitos e interações na camada de zinco. As colunas Coef e EP Coef representam

respectivamente o coeficiente do termo na equação que é a metade do seu efeito e o erro padrão calculado para cada termo. A equação gerada pelo experimento a partir dos dados da Tabela 4.6 é utilizada, então, para predição de tratamentos que representam o menor consumo de zinco possível respeitando as normas vigentes.

Há outro gráfico típico de experimentos fatoriais que direciona de forma simples os tratamentos que geram os diferentes patamares na resposta (MONTGOMERY *et al*, 2003). A Figura 47 mostra o gráfico de cubo para o experimento da camada de zinco, onde o fator tipo de gaxeta é representado em dois cubos por se tratar de um parâmetro categórico, não quantitativo.

Figura 47 – Gráfico de cubo para a média da variável resposta do experimento fatorial para a camada de zinco.

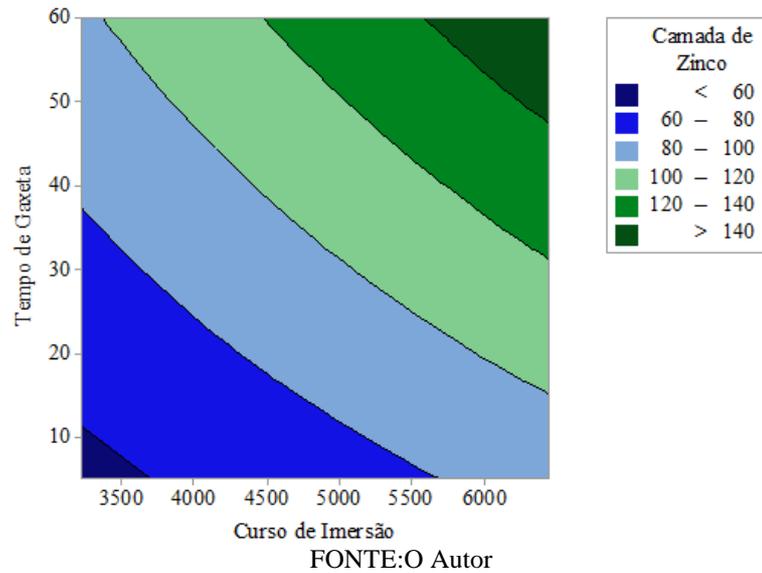


FONTE:O Autor

Como o gráfico de cubo traz a média das respostas da variável camada de zinco, o menor valor de cada cubo representa a condição onde tem-se a menor camada de zinco. Na figura 47, vê-se que, ao utilizar gaxeta de grafite, a menor camada de zinco tem-se com velocidade de 80 m/min, curso de imersão de 3220 mm e tempo de gaxeta de 5 minutos. Com a gaxeta de fibra de vidro, a menor camada de zinco também é atingida com os mesmos parâmetros de velocidade, curso de imersão e tempo de gaxeta.

Outra ferramenta para se avaliar as condições de processo em função da resposta alvo é o gráfico de contornos que mostra a variável resposta em áreas definidas pelos fatores e seus níveis. Uma avaliação equivalente ao gráfico de cubos pode ser realizada também pelo gráfico de contornos como mostra a Figura 48.

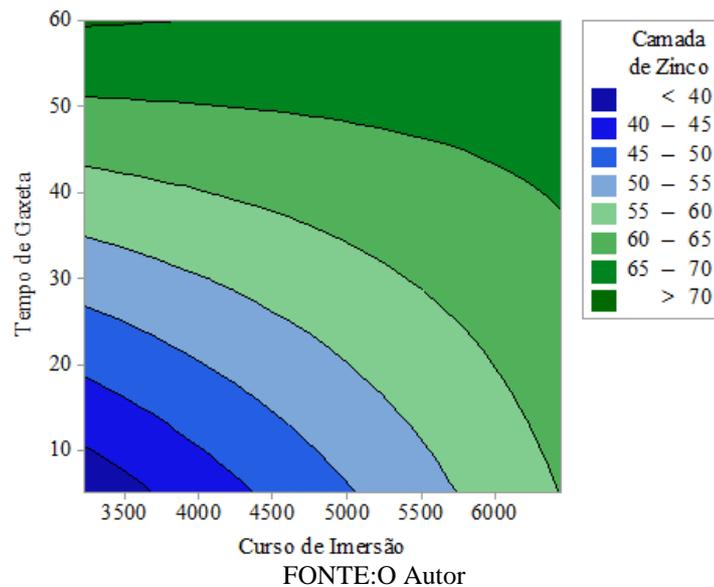
Figura 48 – Gráfico de contornos para o tipo de gaxeta de grafite.



O gráfico da Figura 48 sugere que os maiores cursos de imersão com os maiores tempos de gaxeta geram os maiores valores de camada de zinco, pois quanto maior o tempo de vida da gaxeta, maior o seu desgaste e, conseqüentemente, maior o arraste do zinco fundido.

A Figura 49 traz o gráfico de contornos para a gaxeta de fibra de vidro. Nesse caso, a resposta varia diferentemente da gaxeta de grafite. Ou seja, para mesmos níveis de curso de imersão e tempo de gaxeta (com gaxeta de fibra de vidro) obtém-se menores camadas de zinco.

Figura 49 – Gráfico de contornos para o tipo de gaxeta de fibra de vidro.



As informações contidas nos gráficos de contorno conduzem para a mesma análise do gráfico de cubos, porém esse último não permite observações entre os níveis dos fatores.

Pela análise dos dados e gráficos gerados pelo modelo, há uma indicação clara de que para se reduzir a camada de zinco deve-se reduzir o curso de imersão, reduzir o tempo de gaxeta independentemente do tipo de gaxeta – a depender do alvo de redução da camada.

Através do otimizador do modelo, pode-se obter a condição da linha de galvanização em função dos 4 fatores e seus níveis para obtenção da mínima camada de zinco acima de 50 g/m² (mínimo de camada de zinco de acordo com a norma ASTM A123/123). Considerando o erro do sistema de medição de 5,51 g/m², a faixa alvo de camada de zinco como dado de entrada do otimizador é de 55,51 a 56 g/m² para o mínimo valor do intervalo de confiança e os níveis dos fatores que correspondem a essa faixa de resposta são apresentados abaixo na Tabela 22. O tempo de gaxeta foi fixado em 5 minutos pois é a condição do processo logo que uma gaxeta é trocada, e a partir daí se inicia o desgaste do dispositivo aumentando a camada de zinco.

Tabela 22 – Níveis dos fatores para alvo mínimo de 55,51 a 56 g/m².

Velocidade da Linha [m/min]	Tempo de Vida da Gaxeta [min]	Curso de Imersão [mm]	Tipo de Gaxeta	Camada de Zinco [g/m ²]	Intervalo de Confiança – 95% [g/m ²]
80	5	3700	Grafite	58,29	55,91 – 60,66
65	5	6440	Fibra de Vidro	57,55	55,68 – 59,42

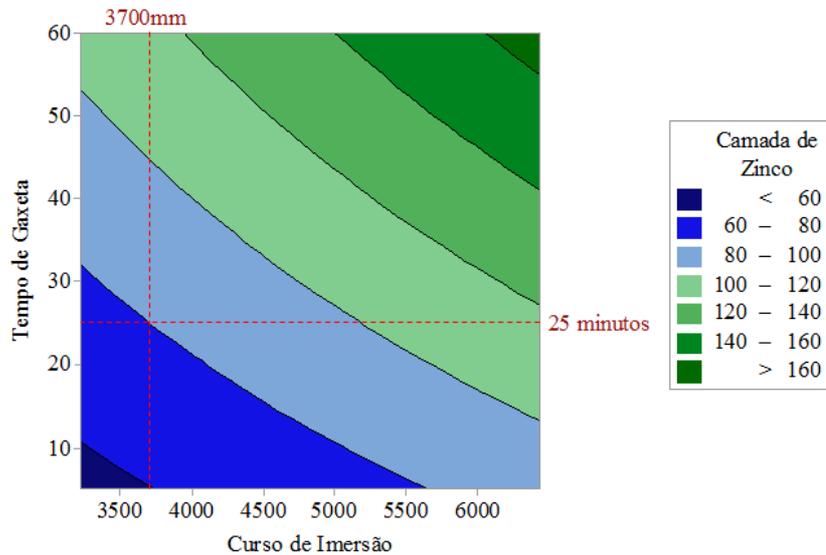
FONTE:O Autor

De acordo com a Tabela 22, se o processo de galvanização garantir velocidade, curso de imersão e tipo de gaxeta conforme os seus níveis calculados pelo otimizador, a camada de zinco inicial será algum valor entre o intervalo de confiança $\pm 5,51$ g/m² e gradualmente irá aumentar em função do tempo de gaxeta. O único fator que não pode ser fixado é o tempo de gaxeta que, como já visto nas figuras anteriores, quanto maior o tempo, maior a camada de zinco devido ao desgaste do dispositivo de raspagem. Porém, quando se utiliza a gaxeta de fibra de vidro, a camada de zinco mínima só é atingida com velocidade de linha de 65 m/min, o que representa uma perda considerável de capacidade produtiva de mais de 18%.

Portanto, com os valores da Tabela 22 e com o gráfico de contorno utilizando gaxeta de grafite com imersão de 3700 mm, avalia-se o tempo máximo de gaxeta antes de uma intervenção de reaperto ou troca. A importância desse intervalo entre apertos ou troca de gaxeta deve-se ao limite aceitável do excesso de camada de zinco que irá se estabelecer, ou seja, o nível máximo da resposta em função do fator tempo de gaxeta. Logo, para efeitos de uma redução de 75% do excesso de camada do arame 1,60mm, o nível máximo da resposta será de 80 g/m².

Pela Figura 50, considerando curso de imersão de 3700 mm e a faixa de resposta até 80 g/m², o tempo de gaxeta máximo é de 25 minutos para a gaxeta de grafite. Com isso, a cada 25 minutos deve haver o reaperto do sistema de raspagem.

Figura 50 – Gráfico de contorno para avaliação do tempo mínimo de intervalo entre intervenções operacionais na gaxeta para gaxeta de grafite e velocidade de 80 m/min.



FONTE:O Autor

A predição através do otimizador também calcula a camada de zinco para os 25 minutos do tempo de gaxeta e é o que mostra a Tabela 23, confirmando a conclusão vinculada à Figura 50.

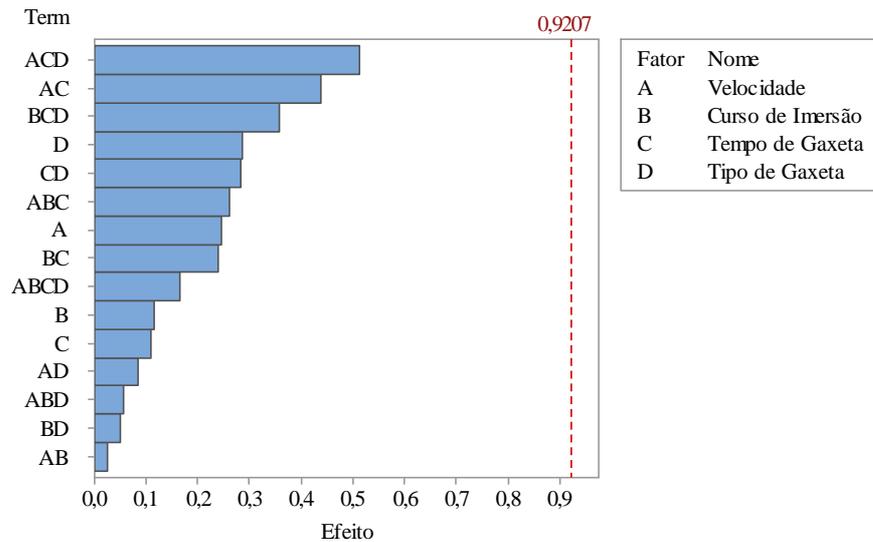
Tabela 23 – Predição do otimizador para tempo máximo de gaxeta sem necessidade de intervenções.

Velocidade da Linha [m/min]	Tempo de Vida da Gaxeta [min]	Curso de Imersão [mm]	Tipo de Gaxeta	Camada de Zinco [g/m ²]	IC 95% Camada de Zinco [g/m ²]
80	25	3700	Grafite	81,57	80,05 - 83,09

FONTE:O Autor

Além dos efeitos de cada fator em seus níveis, há também o efeito da variabilidade causada por cada fator. Essa variabilidade pode causar erros de interpretação dos experimentos fatoriais e pode ser também calculada (ANTONY, 2003). Calculando-se o logaritmo do desvio padrão para cada tratamento nas 3 réplicas, ou seja, com 2 graus de liberdade, a Figura 51 mostra o gráfico da intensidade dos efeitos de cada fator na variabilidade do processo.

Figura 51 – Gráfico do pareto dos efeitos dos fatores na variabilidade do processo de obtenção da camada de zinco



FONTE:O Autor

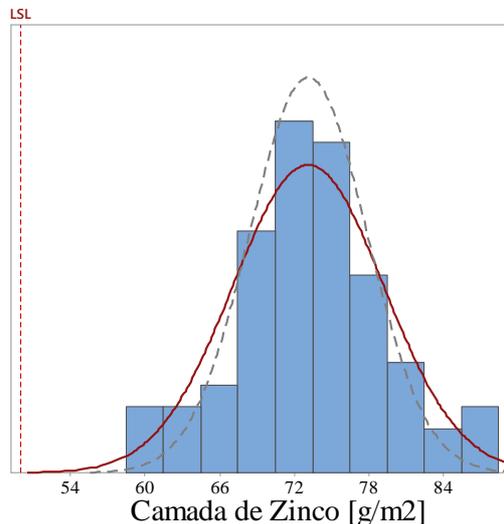
Pela Figura 51, há interações mais importantes para a variabilidade do que fatores e o primeiro fator na ordem de significância é o tipo de gaxeta, em 4º lugar. Entretanto, isso não representa uma necessidade de maiores análises e cuidados, pois há 3 interações que são mais impactantes na variabilidade do que o tipo de gaxeta. Independentemente do valor absoluto da resposta, a análise de variabilidade avalia os fatores que geram maiores variações no processo e não são necessariamente os mesmos fatores com os efeitos mais significativos na resposta – em valor absoluto (ANTONY, 2003).

5.3 VALIDAÇÃO DO EXPERIMENTO

Conhecidos os fatores mais significantes para a obtenção da camada de zinco e o impacto da variação de seus níveis, realizou-se o teste de validação da Tabela 22, onde constam os níveis de velocidade, curso de imersão, tempo de gaxeta e tipo de gaxeta com o tempo de tolerância de vida da gaxeta. Os parâmetros que foram considerados como ruídos no planejamento do experimento permaneceram nos mesmos patamares utilizados nos testes e a cada 25 minutos houve intervenção de reaperto nas gaxetas. A Figura 52 traz o resultado da capacidade do processo considerando que segue a distribuição normal como visto nas Figuras 44 e 45. A linha vermelha tracejada mostra o limite inferior da norma ASTM A123/A123M (Padrão para especificação para coberturas de zinco em produtos de ferro e aço), a linha normal tracejada mostra o potencial do processo se alguns desvios (falhas operacionais, reaperto de gaxeta fora do limite de tempo, etc.) forem eliminados do processo e a linha normal contínua representa a

probabilidade real do processo em termos da variabilidade. Nota-se que não houve nenhuma amostra abaixo do limite inferior de 50 g/m² nem do limite de 56 g/m² considerando a incerteza do sistema de medição.

Figura 52 – Histograma da capacidade do processo para validação do experimento.



FONTE:O Autor

A Tabela 24 resume os resultados da análise de capacidade onde foram coletados 71 amostras aleatórias e realizada supervisão no controle de reaperto da gaxeta, em que Ppk representa o índice de capacidade que relaciona a variabilidade do processo e a centralização da média com as tolerâncias das especificações. Portanto, quanto maior for o valor de Ppk, maior é a capacidade do processo. Cpk representa o índice potencial da capacidade do processo caso ajustados os desvios. O índice Pp, que não está representado na Tabela 24, é o Ppk sem considerar a centralização do processo, ou seja, Pp é sempre maior que o Ppk, podendo ser igual caso o processo esteja completamente centralizado. Muitas indústrias usam Pp mínimo de 1,33 como alvo mínimo aceitável (MONTGOMERY, 2003).

Tabela 24 – Capacidade do processo sob fatores com níveis ajustados conforme resultado do experimento.

Caracterização do Processo		Análise de Capacidade	
Tamanho Amostral	71	Ppk	1,27
Tamanho de Subgrupo	1	Cpk	1,63
Média [g/m ²]	73		
Desvio Padrão (real) [g/m ²]	6,07		
Desvio Padrão (potencial) [g/m ²]	4,72		

FONTE:O Autor

Com a coleta de mais de 300 amostras antes das alterações da linha de galvanização e das rotinas operacionais, a Tabela 25 traz a capacidade anterior real e potencial.

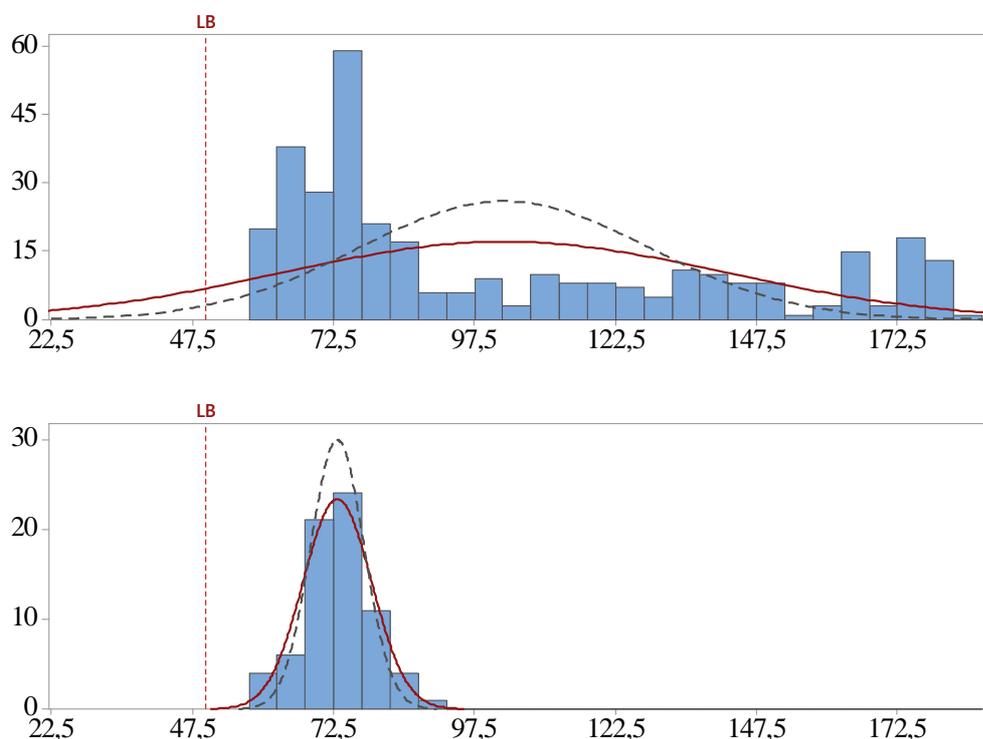
Tabela 25 – Capabilidade do processo antes das alterações na configuração dos fatores e rotinas operacionais.

Caracterização do Processo		Análise de Capabilidade	
Tamanho Amostral	366	Ppk	0,45
Tamanho de Subgrupo	1	Cpk	0,68
Média [g/m ²]	103		
Desvio Padrão (real) [g/m ²]	39,14		
Desvio Padrão (potencial) [g/m ²]	25,77		

FONTE:O Autor

A diferença entre o valor do Ppk de 1,27 e 0,45, do antes e depois do projeto evidencia a eficácia dos testes quanto aos fatores que de fato contribuem mais significativamente na formação da camada de zinco e na sua variabilidade. Por fim, a Figura 53 mostra os histogramas relacionados às Tabelas 23 e 24 de maneira comparativa.

Figura 53 – Histogramas de comparação do processo antes e depois das alterações em g/m².



FONTE:O Autor

A referência LB, na Figura 53, mostra o limite mínimo da especificação de camada de zinco e a mesma base é usada para as duas situações: antes e depois das alterações do processo. Nitidamente, há redução importante na variabilidade do processo com deslocamento significativo da média de $103 \pm 13,02$ g/m² para $73 \pm 5,51$ g/m².

6 CONCLUSÕES

Através do conhecimento técnico do processo de galvanização e das ferramentas estatísticas experimentais, é possível identificar os principais fatores de influência na obtenção da camada de zinco e em sua variabilidade, a fim de se reduzir o desperdício de zinco atendendo às especificações. A análise do sistema de medição é uma poderosa e importante ferramenta para se ter confiabilidade nos processos, no planejamento experimental e no controle de qualidade. A validação dos resultados permite afirmar que o experimento fatorial completo se mostrou eficaz na avaliação dos parâmetros mais influentes na camada de zinco, direcionando objetivamente para a melhor configuração do processo e das rotinas operacionais.

Os tipos de gaxeta têm diferentes desempenhos na raspagem do zinco devido ao material de fabricação que caracteriza a dureza superficial do material que está em contato com o arame galvanizado. A gaxeta de fibra de vidro, apesar de permitir a obtenção de camadas de zinco abaixo da norma nos instantes iniciais da sua aplicação, mostrou melhor desempenho ao longo do tempo devido a menor variação - menor desgaste. A gaxeta de grafite apresenta rápido desgaste ao longo do tempo de uso, obrigando a intervenção de reaperto em uma frequência maior. O fator ligado ao curso de imersão do arame trouxe uma quebra de paradigma para linhas de galvanização contínua, pois já são projetadas para imersões fixas, de mesmo comprimento.

A análise do sistema de medição junto com a análise dos resultados do experimento em função da variabilidade da camada de zinco se mostrou eficazes para redução da dispersão do processo e, conseqüentemente, possibilitou o deslocamento da média de camada de zinco reduzindo a incerteza dos ensaios.

Sistema de Medição Indireto – Teste de Camada de Zinco:

- A alteração do procedimento de ensaio de camada de zinco, adicionando-se um inibidor de corrosão para evitar o ataque ao substrato de aço, deixando mais evidente o momento da retirada da amostra do banho de decapagem, reduziu a incerteza de medição de 13,02 para 5,51 g/m², aumentando significativamente a confiabilidade dos resultados.

Parametrização do Processo:

- Os principais fatores na ordem de significância para a obtenção da camada de zinco foram: tipo de gaxeta, tempo de gaxeta e curso de imersão. A velocidade, que pela literatura

sempre foi considerada como um dos fatores mais importantes para a camada de zinco, ficou em 4º lugar na ordem de importância. Portanto, os níveis dos principais fatores que correspondem à camada de zinco de 56 a 80 g/m² são: velocidade de 80 m/min, gaxeta de grafite, tempo de gaxeta de até 25 minutos e curso de imersão de 3700 milímetros.

- Para a gaxeta de grafite, ao contrário do que traz a literatura, ao invés do aumento da velocidade reduzir a camada de zinco, se observou o contrário. Isso se deve ao fato de que até certa velocidade a gaxeta consegue raspar quase todo o zinco líquido que é arrastado pelo arame, porém, a capacidade de raspagem é limitada e, quando atinge o seu limite, já não raspa toda a quantidade de zinco arrastada. Portanto, para altas velocidades, com gaxeta de grafite, quanto maior a velocidade, maior a camada de zinco.
- Na condição apresentada através do otimizador, a gaxeta de fibra de vidro, para a condição de 5 minutos de gaxeta, somente pode ser usada para velocidades abaixo de 65 m/min para formar camadas de zinco atendendo à especificação. Operando em 80 m/min, ainda com gaxeta de fibra de vidro, a camada só atende à especificação depois de no mínimo 60 minutos de produção (nível máximo no teste do fator tempo de gaxeta), tornando necessária a desclassificação do material produzido durante esse tempo.

Portanto, velocidade de 80 m/min, gaxeta de grafite, tempo de gaxeta de até 25 minutos e curso de imersão de 3700 milímetros foram os níveis escolhidos dos principais fatores.

Validação dos Resultados:

- Houve, de fato, uma redução importante na variabilidade e também na média de camada de zinco, de $103 \pm 13,02\text{g/m}^2$ para $73 \pm 5,51\text{g/m}^2$.
- A redução do consumo de zinco representou um ganho financeiro de 2 milhões de reais ao ano, com queda de 40% do consumo de zinco na fábrica.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos e das observações realizadas ao longo desta pesquisa, são propostos novos trabalhos, os quais são apresentados a seguir:

- Desenvolver gaxetas para se obter camadas de zinco dentro de patamares aceitáveis por mais tempo, com menos desgaste e menor necessidade de intervenção operacional.
- Desenvolver sistema automático de reaperto de gaxetas para evitar a necessidade da intervenção operacional para cumprimento dos tempos de aperto e reaperto.
- Desenvolver método operacional para permitir o uso da gaxeta de fibra de vidro devido ao seu menor desgaste no tempo, reduzindo necessidades de intervenção no processo.
- Pesquisar o modo de influência do torque ou pressão de aperto das gaxetas para se utilizar em sistemas automáticos ou autônomos.

REFERÊNCIAS

- A, G.; CHATTERJEE, A. **Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice**. New Delhi: [s.n.], 2010. 472 p.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM A123/A123M: Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products**. West Conshohocken, p. 8. 2016.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM A90/A90M: Standard Test Method for Weight [Mass] of Coating on Iron and Steel Articles with Zinc or Zinc-Alloy Coatings**. West Conshohocken. 2018.
- ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia. Vol 2**. [S.l.]: Arte e Ciência, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6331: Arame de aço de baixo teor de carbono, zincado, para uso geral – Especificação**. Rio De Janeiro, p. 7. 2010.
- BARBOSA, C. **Metais não ferrosos e suas ligas – Microestrutura, propriedades e aplicações**. RIO DE JANEIRO: [s.n.], 2014.
- BHOTE, A. K.; BHOTE, K. R. **World Class Quality. Using design of experiments to make it happen**. 2^a. ed. [S.l.]: AMACOM, 2000.
- BICAO, P. et al. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. **Surface & Coatings Technology**, Xiangtan, v. 202, p. 1785 - 1789, 2008.
- BITKOV, V. V. Expediency of Roller Dies Application in Wire Drawing: Part 2. **Wire & Cable Technology International**, Ohio, v. 36, n. 2, Março 2008.
- BITKOV, V. V. Expediency of Roller Dies Application in Wire Drawing: Part 1. **Wire & Cable Technology International**, OHIO, v. 35, n. 1, Janeiro 2008.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma introdução**. 5. ed. [S.l.]: LTC, 2002.

CAMPANHER, C. G. **Otimização experimental em processo de galvanização de arames camada pesada**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009. (Dissertação).

CETLIN, P. R. **Tecnologia de Trefilação de Arames de Aço**. Universidade Federal De Minas Gerais. Minas Gerais. 1982. (Apostila).

DA ROSA, R. L. **Estudo do Processo de Cromatização de Arames Galvanizados e Propostas de Alternativas para Retardamento da Ocorrência Prematura de Oxidação Branca**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 54. 2009. (Dissertação).

DAVID, F. F.; ALMEIDA, P. F. F.; FERNANDES, L. S. **Análise da variabilidade da massa linear ao longo da produção de fios de CA-60 em laminadores a frio**. São Paulo, p. 9. 2013.

DAVID, F. F.; ALMEIDA, P. F. F.; FERNANDES, L. S. **Análise da variabilidade da massa linear ao longo da produção de fios de CA-60 em laminadores a frio**. 4º Seminário de Trefilação. São Paulo, p. 9. 2013.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. Londres: McGraw Hill, 1988.

ENGHAG, P. **Steel wire technology. Applied materials technology**. [S.l.]: Materialteknik HB, 2002.

FUNKENBUSCH, P. D. **Practical Guide to Designed Experiments. A Unified Modular Approach**. 1ª. ed. Nova York: Marcel Dekker, 2005. 197 p.

GILLSTRÖM, P.; JARL, M. Mechanical descaling of wire rod using reverse bending and brushing. **Journal of Materials Processing Technology**, Suécia , v. A172, p. 332-340, 20016.

GOKYO, J.; SAITO, Y. Studies on the roller-die. **Tetsu-to Hagane Overseas**, Tokyo, v. 4, p. 44 - 52, 1964.

HORSTMANN, D. Formation and growth of iron-zinc alloy layers. **Proceedings of 14th International Hot Dip Galvanization Conference**, Lonfres, 1986.

JIJU, A. **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. 1ª. ed. [S.l.]: Oxford: Butterworth and Heinemann, v. Unico, 2003.

JORDAN, C. E.; MARDER, A. R. Fe-Zn phase formation in interstitial free steels hot dip galvanized at 450°C, Part I 0.00 wt% Al-Zn Baths. **J Mater Sci**, v. 32, p. 5593, 1997.

KUBASCHEWSKI, O.; MASSALSKI, T. **Binary alloy phase diagrams**. [S.l.]: Metal Park, 1986.

L'HOCINE, L.; PITRE, M. Quantitative and qualitative optimization of allergen extraction from peanut and selected tree nuts. Part 2 Optimization of buffer and ionic strength using a full factorial design. **Food Chemistry**, v. 194, p. 820 - 827, 2016.

LORENO, G.; MALLET, A. **Curso de Galvanização do Grupo Gerdau**. Gerdau. São Paulo. 1993. (Apostila).

MAGALHAES, F. C. et al. Defects in axisymmetrically drawn bars caused by longitudinal superficial imperfections in the initial material. **Journal of Materials Processing Technology**, n. A212, p. 237 - 248, 2011.

MARDER, A. R. The metallurgy of zinc-coated steel. **Materials Science**, n. A45, p. 191-271, 2000.

MILLER, T. W. et al. Oxygen Steelmaking Processes the Making Shaping and Treating of Steel. **The AISE Steel Foundation**, Pittsburgh, p. 475 - 522, 1988.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5^a. ed. [S.l.]: Johan Wiley and Sons, 2001.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3^a. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2003.

ONISHI, M.; WAKAMATSU, Y.; MIURA, H. Formation and growth kinetics of intermediate phases in Fe-Zn diffusion couples. **Trans JIM**, n. 15, p. 311, 1974.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia - Microestrutura e Propriedades**. 1^a. ed. Curitiba: Hemus SA, 2000.

SANTAMARIA, A. et al. Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate. **Materials and Design**, n. 115, p. 179 - 193, 2017.

SAS-BOCA, I. M. et al. The wire drawing process simulation and the optimization of geometry dies. **Procedia Engineering**, v. 181, p. 187 - 192, 2017.

SHAHABADI, S. M. S.; REYHANI, A. Optimization of operating conditions in ultrafiltration process for produced water treatment via the full factorial methodology. **Separation and Purification Technology**, v. 132, p. 50 - 61, 2014.

SHIBLI, S. M. A.; MEENA, B. N.; REMYA, R. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. **Surface and Coatings Technology**, v. 262, p. 210 - 215, 2015.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3^a. ed. São Paulo: [s.n.], 2010.

VILELA, T. S. **Influência da velocidade de galvanização na morfologia das camadas de Zn e Fe-Zn**. 5^o Seminário de Trefilação. São Paulo. 2014.

XIAOCHUAN, L. et al. Estimation of heat transfer coefficients in continuous casting under large disturbance by Gaussian kernel particle swarm optimization method. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, p. 1087 - 1097, 2017.