

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO EM
PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE**

GLAUDISTONI DA SILVA FELIX

JOINVILLE

2013

GLAUDISTONI DA SILVA FELIX

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO EM
PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, na Universidade da Região de Joinville.

Orientadora: Prof^a. Cintia Marangoni
Co-orientadora: Prof^a. Noeli Sellin

JOINVILLE

2013

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

F316i	<p>Felix, Claudistoni da Silva Implementação de um sistema de controle automático em processo de galvanização por imersão a quente. / Claudistoni da Silva Felix ; orientadora Dra Cintia Marangoni – Joinville : UNIVILLE, 2013.</p> <p>92 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1. Galvanização por imersão a quente - Aço. I. Marangoni, Cintia (orient.). II. Título.</p> <p>CDD 672.36</p>
-------	--

Termo de Aprovação

“Implementação de um sistema de controle automático em processo de galvanização por imersão a quente”


por

Glaudistoni da Silva Félix


Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Prof. Dra. Cintia Marangoni
Orientadora (UNIVILLE)

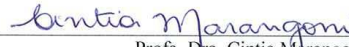


Prof. Dra. Noeli Sellin
Co-Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)


Banca Examinadora:



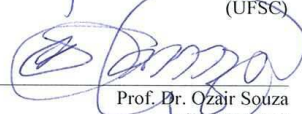
Prof. Dra. Cintia Marangoni
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Noeli Sellin
Co-Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Ricardo Antonio Francisco Machado
(UFSC)



Prof. Dr. Ozair Souza
(UNIVILLE)

Joinville, 05 de agosto de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os que sonham um dia ter um mundo melhor. Dedico também às mulheres, pois sem elas não haveria fonte de inspiração, não haveria o porto seguro, enfim não haveria o amor.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer e reconhecer as pessoas que estiveram do meu lado neste trabalho, sendo que agradeço inicialmente as Professoras Cintia Marangoni e Noeli Sellin que dedicaram seus tempos livres para corrigir o meu trabalho.

Agradeço ao Gerente de Laboratório/Metalurgia da ArcelorMittal Vega, Sr. Jose Francisco, que disponibilizou todos os recursos de equipamentos e também aos colaboradores que auxiliaram na realização da caracterização dos interferentes abordados, tendo paciência na realização.

Agradeço ao Mestrado de Engenharia de Processos e todo o seu corpo docente na minha formação acadêmica.

Agradeço à empresa ArcelorMittal Vega sendo administrada pelo Sr. Álvaro Jose Ferreira Ribeiro e aos Gerentes Lincoln Possada e Marcello Torturela por aprovarem e permitirem a aplicabilidade da minha linha de pesquisa no processo proposto.

Agradeço a minha esposa e filhos por apoiarem e torcerem na conclusão de mais esta etapa da minha vida.

E por fim, agradeço a Deus por mais esta oportunidade de vida.

RESUMO

O aço comercial é amplamente utilizado nos mais diferentes ramos da indústria metal mecânica por sua resistência a esforços mecânicos, ductibilidade, soldabilidade, adesão a pintura, fácil moldagem e reciclagem, baixo custo em relação a outros metais e mantendo suas propriedades ferromagnéticas após a galvanização. Contudo, com a sua exposição à umidade e elevadas temperaturas pode ocorrer o processo químico de oxidação na superfície do material, deteriorando-o com o tempo. Existem várias tecnologias utilizadas para proteção do aço contra a corrosão, dentre elas o processo de Galvanização por Imersão a Quente (HDG - *hot-dip galvanizing*), que consiste no aquecimento da peça de aço em forno a uma temperatura em torno de 600 °C com posterior imersão em banho de liga metálica composta por alumínio e zinco mantidas a 600 °C. Na transferência do material do forno para o banho existe uma estrutura metálica retangular denominada túnel de imersão eletromecânico (*snout*) cujo posicionamento é regulado de forma manual, gerando grande quantidade de refugos devido ao difícil ajuste do mesmo. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo a implementação de um modelo matemático para definição dos valores de *setpoint* para um controlador do tipo liga-desliga do cálculo do novo posicionamento angular e linear do *snout*. O modelo desenvolvido permitiu o posicionamento no modo de controle automático bem como de partida (zeragem automática). O modo de zeragem automática é acionado quando existe a troca de um rolo localizado no fundo do banho de zinco enquanto que o automático é executado sempre que ocorrem variações no nível do banho de zinco. Em ambos os casos, os resultados obtidos confirmaram a eficácia no posicionamento do equipamento promovendo minimizações de tempo de ajuste de cerca de 3 minutos. Foram observadas reduções de 24,57 % de ocorrências em perdas de qualidade nos materiais processados que apresentavam o interferente caracterizado por PGZN (Grão de Zinco) e 4,56 % no interferente PBOR (Borra), reduzindo assim os descartes em peso dos materiais processados em 27,54 % e 4,75 % para cada um dos casos respectivamente.

Palavras-chave: galvanização por imersão à quente, túnel de imersão, modelagem controle liga-desliga.

ABSTRACT

The commercial steel is widely used in many different branches of the metalworking industry for its resistance to mechanical stresses, ductility, weldability, paint adhesion, easy molding and recycling, low cost relative to other metals and ferromagnetic properties after galvanizing. However, with their exposure to moisture and high temperatures may cause the chemical process of oxidation on the surface of the material, deteriorating it with time. There are several technologies used for protection of steel against corrosion, among them the Plating Hot Dip process (HDG - hot-dip galvanizing), which consists of heating the metal sheet of steel in an oven at a temperature around 600 °C with subsequent immersion in a bath of metallic alloy comprising aluminum and zinc maintained at 600 °C. Upon transfer of the Steel metal sheet oven to immersion bath is a rectangular metal called electromechanical immersion tunnel (snout) whose position is adjusted manually, generating large amounts of waste due to its difficult adjustment. In this context, this work is aimed at the implementation of a mathematical model for defining the set point values to control the on-off positioning of linear and angular snout. The model enabled the position control mode and automatic start (auto-zeroing) at the level of the zinc bath in the bath, and the height of this layer overflow. The automatic reset mode is triggered when there is a change of roll background while automatically runs whenever changes occur at the level of the zinc bath. In both cases, the results obtained confirmed the effectiveness in the placement of equipment, promoting reductions in settling time of about 3 minutes. Reductions of 24.57 % of occurrences of loss of quality in the materials processed presenting the interferer characterized in PGZN (Zinc grain) and 4.56 % in interfering PBOR (sludge), thereby reducing disposal by weight of the processed materials at 27.54 % and 4.75 % for each case respectively.

Keywords: hot dip galvanizing the tunnel immersion, modeling on-off control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do processo de galvanização eletrolítica com pré-fosfatização.....	17
Figura 2 – Esquema da linha de galvanização por imersão a quente.....	18
Figura 3 – Ilustração da seção da entrada no processo de galvanização por imersão a quente.....	19
Figura 4 – Ilustração da seção de limpeza no processo de galvanização por imersão a quente	20
Figura 5 – Ilustração do forno (recozimento) no processo de galvanização por imersão a quente.....	22
Figura 6 – Ilustração da estrutura do banho de zinco no processo de galvanização por imersão a quente.....	22
Figura 7 – Detalhe da navalha de ar na saída do banho de zinco no processo de galvanização por imersão a quente.....	23
Figura 8 – Ilustração do laminador de encruamento (<i>skin pass</i>) no processo de galvanização por imersão a quente.....	24
Figura 9 – Ilustração do banho de zinco com formação borra e grão de zinco.....	28
Figura 10 – Ilustração do melhor ponto de operação em Doehlert.....	32
Figura 11 – Ilustração esquemática do PBCM.....	33
Figura 12 – Diagrama esquemático da linha de galvanização por imersão a quente.....	35
Figura 13 – Detalhamento do banho de zinco.....	36
Figura 14 – Ilustração do painel externo de acionamento do <i>snout</i>	38
Figura 15 – Ilustração dos equipamentos (a) foto WS10 – 1250, (b) foto WS10 – 100.....	39
Figura 16 – Fotografia do controlador de alta performance (HPC).....	41
Figura 17 – Supervisório protótipo da IHM do <i>snout</i> no ElipseScada	42
Figura 18 – a) aspecto superficial e b) seção transversal esquemática dos revestimentos zincados de cristais normais, minimizados e <i>galvanneal</i>	44
Figura 19 – Microestrutura de aço galvanizado <i>hot-dip</i> com o banho contendo <i>top dross</i> (Interferente Borra).....	45
Figura 20 – Microestrutura de aço galvanizado <i>hot-dip</i> com o banho contendo	

0,10 % Al-Zn.....	46
Figura 21 – Ilustração do equipamento SIAS VAE.....	46
Figura 22 – Ilustração dos equipamentos (a) foto MEV, (b) foto EDS.....	47
Figura 23 – Esquema de instalação dos sensores de posicionamento linear e angular no banho de zinco da linha de galvanização.....	48
Figura 24 – Diagrama esquemático do ângulo da tira em relação do rolo de fundo do banho de zinco.....	50
Figura 25 – Ilustração do posicionamento linear e angular do <i>snout</i> (a) foto esquemática, (b) variáveis do modelo matemático.....	50
Figura 26 – Perfil de deslocamento linear do <i>snout</i> sem definição da amplitude no controlador <i>liga-desliga</i>	55
Figura 27 – Perfil de deslocamento linear do <i>snout</i> com definição da amplitude de 1 mm no controlador <i>liga-desliga</i>	55
Figura 28 – Perfil de deslocamento angular do <i>snout</i> sem definição da amplitude no controlador <i>liga-desliga</i>	56
Figura 29 – Perfil de deslocamento angular do <i>snout</i> com definição da amplitude de 0,5 mm no controlador <i>liga-desliga</i>	56
Figura 30 – Ilustração da tela de operação do sistema supervisor desenvolvido para ajuste do <i>snout</i>	58
Figura 31 – Representação do diagrama de bloco do controle de posicionamento do <i>snout</i>	59
Figura 32 – Perfil do deslocamento linear (Hsensor) em relação ao <i>setpoint</i> para o teste de zeragem automática.....	60
Figura 33 – Perfil do erro gerado no posicionamento linear para o teste de zeragem automática.....	61
Figura 34 – Perfil do deslocamento angular (CCsensor) em relação ao <i>setpoint</i> para o teste de zeragem automática.....	61
Figura 35 – Perfil do erro gerado no posicionamento angular para o teste de zeragem automática.....	62
Figura 36 – Perfil da altura do banho de zinco (L) medida no processo de imersão lenta.....	64
Figura 37 – Perfil do deslocamento linear (Hsensor) em relação ao <i>setpoint</i> para o teste de imersão lenta.....	65

Figura 38 – Perfil do erro gerado no posicionamento linear para o teste de imersão lenta.....	66
Figura 39 – Perfil do deslocamento angular (CCsensor) em relação ao <i>setpoint</i> para o teste de imersão lenta.....	66
Figura 40 – Perfil do erro gerado no posicionamento angular para o teste de imersão lenta.....	67
Figura 41 – Perfil da altura do banho de zinco (L) medida no processo de imersão rápida.....	68
Figura 42 – Perfil do deslocamento linear (Hsensor) em relação ao <i>setpoint</i> para o teste de imersão rápida.....	69
Figura 43 – Perfil do erro gerado no posicionamento linear para o teste de imersão rápida.....	70
Figura 44 – Perfil do deslocamento angular (CCsensor) em relação ao <i>setpoint</i> para o teste de imersão rápida.....	71
Figura 45 – Perfil do erro gerado no posicionamento angular para o teste de imersão rápida.....	71
Figura 46 – Ilustração gráfica de capacidade do posicionamento linear.....	73
Figura 47 – Ilustração gráfica de capacidade do posicionamento angular.....	74
Figura 48 – Fotografia de superfície em MEV e composição química via EDS do PBOR.....	75
Figura 49 – Fotografia de superfície em MEV e composição química via EDS do (a) PGZN e (b) da partícula do PGZN.....	76
Figura 50 – Massa (e toneladas) de refugos geradas e número de ocorrências de PGZN em 2010.....	77
Figura 51 – Massa (em toneladas) de refugos geradas e número de ocorrências de PGZN em 2011.....	78
Figura 52 – Número de ocorrências de PGZN em 2010 e 2011.....	78
Figura 53 – Massa (em toneladas) de refugos geradas e número de ocorrências de PBOR em 2010.....	79
Figura 54 – Massa (em toneladas) de refugos geradas e número de ocorrências de PBOR em 2011.....	79
Figura 55 – Número de ocorrências de PBOR em 2010 e 2011.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos sensores de posicionamento utilizados (encoder).....	39
Tabela 2 – Exemplo de valores de referência (setpoint) calculados apartir dos dados do processo para o modo de controle denominado zeragem automática.....	53
Tabela 3 – Valores de desempenho no regime transitório e calculo dos índices ISE e ITAE.....	63
Tabela 4 – Valores de desempenho no regime transitório e calculo dos índices ISE e ITAE – Imersão lenta.....	67
Tabela 5 – Valores de desempenho no regime transitório e calculo dos índices ISE e ITAE – Imersão rápida.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cp	Capacidade potencial
Cp	Performance potencial
CpK	Capacidade real
CpK	Performance real
CpK	Capacidade real
CpK	Performance real
DFF	Forno com fogo direto
EDS	Espectrômetro de energia dispersiva
EG	Electro galvanização
HDG	Galvanização por imersão à quente
HPC	Controlador de alta performance
IHM	Interface homem máquina
LSL	Limite inferior
MAGG	Geração de multizonas com adaptação de grades
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
PBIR	Bobinamento irregular
PBOR	Borra
PHS	Seção de pré-aquecimento
PGZN	Grão de zinco
RDE	Eletrodo de disco rotativo
RTS	Seção de Tubos Radiantes
SEM	Microanálise
SGZU	Padronização na utilização de zinco bruto
USL	Limite superior

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivos Geral	14
1.1.2. Objetivo Específicos	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 GALVANIZAÇÃO DE PEÇAS EM AÇO	15
2.1.1. – Galvanização eletrolítica	16
2.1.2. – Galvanização por imersão à quente (HDG – <i>hot-dip galvanizing</i>)	18
2.1.2.1. – Seção de entrada (desenrolamento e soldagem)	19
2.1.2.2. – Seção de limpeza química	20
2.1.2.3. – Seção do Forno (recozimento)	21
2.1.2.4. – Seção de revestimento (banho de zinco)	22
2.1.2.5. – Controle de Revestimento	23
2.1.2.6. – Laminação de Encruamento (<i>Skin Pass</i>)	23
2.1.2.7. – Seção de Saída	24
2.1.3. – Tecnologias aplicadas na galvanização de peças de aço visando melhoria de processo	25
2.2 QUALIDADE DO PRODUTO GALVANIZADO	26
2.2.1. – Tecnologias aplicadas na galvanização de peças de aço visando qualidade da peça	28
2.3. – AUTOMAÇÃO E CONTROLE EM PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO	30
3 METODOLOGIA	35
3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO	35
3.2 MODELAGEM	37
3.3 SISTEMA DE CONTROLE DO POSICIONAMENTO DO SNOOT	37
3.3.1. – Sistema manual de posicionamento do <i>snout</i>	37
3.3.2. – Instrumentação	39
3.3.3. – Implementação do controle no CLP	40
3.3.4. – Ajuste dos controladores Liga-desliga	41
3.3.5 – Sistema supervisor	42

3.3.6. – Verificação do desempenho do controle do processo	43
3.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PEÇAS	44
3.4.1. – Ocorrência dos refugos como avaliação da proposta de controle	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 MODELAGEM	48
4.1.1. – Modelagem para zeragem automática	49
4.1.2. – Modelagem para modo automático	53
4.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	54
4.2.1. – Ajuste dos controladores On/Off	54
4.2.2. – Supervisório – Interface homem-máquina	57
4.3 TESTES COM O SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO	59
4.3.1. – Testes de controle realizados com modo de zeragem automática	59
4.3.2. – Testes de controle para modo automático	63
4.3.2.1 – Teste de imersão lenta do lingote	64
4.3.2.2 – Teste de imersão rápida do lingote	68
4.3.3 – Estudo de capacidade no modo automático	73
4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PEÇAS E GERAÇÃO DE REFUGO	74
4.4.1 – Avaliação da superfície das peças	75
4.4.2 – Quantificação do refugo	76
5. CONCLUSÃO	81
5.1 SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	82
REFERÊNCIAS	83
APENDICES	86

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico mundial cresce exponencialmente. Como consequência, ocorre um aumento do nível de exigência da qualidade do produto acabado por parte do consumidor. A disputa por mercado de indústrias como as automobilísticas e do segmento de linha branca (eletrodomésticos, compressores) torna-se acirrada, tendo como consequência o investimento em inovação e em tecnologia de ponta para os processos de fabricação de produtos mais duráveis e seguros com baixo custo de produção, aumento da qualidade e preocupação com meio ambiente (MIRANDA, 2007).

A peça de aço carbono comum é um material bastante utilizado em diversas aplicações industriais, como nas citadas anteriormente, devido principalmente ao seu baixo custo e boas propriedades mecânicas. Entretanto, possui baixa resistência à corrosão em vários meios, como a atmosfera. Para protegê-la contra a corrosão, normalmente, aplica-se sobre sua superfície revestimentos inorgânicos (revestimento metálico, nanocerâmica, silanização), metálicos (estanho, zinco, ligas de zinco/ferro, alumínio/zinco) ou orgânicos (vernizes e tintas). Quando se usa zinco para revestir a peça de aço, essa operação de revestimento é chamada de galvanização ou zincagem, obtendo-se um material com fácil moldagem, soldabilidade, adesão à pintura, além de excelente resistência à corrosão (FENOT *et al.*, 1993; DIAS, 1998; LE e CUI, 2008).

O zinco é o material mais empregado para proteger peça de aço contra a corrosão atmosférica. O sucesso de sua aplicação reside no fato desse metal promover uma proteção de maneira eficiente tanto por barreira como catodicamente, com baixo custo em relação a outros metais e com facilidade de aplicação. Para que seja eficiente, a camada de zinco deve ser espessa o suficiente para proteger o substrato metálico do ataque de agentes corrosivos presentes no meio ambiente. No entanto, peça de aço com camadas mais espessas apresentam soldabilidade limitada e dificuldades de acabamento após pintura. Essa condição torna necessário o desenvolvimento de revestimentos metálicos com espessuras menores, com melhores propriedades de dureza e boa resistência à corrosão (ORDIERES MERÉ *et al.*, 2004). Ao prolongar a vida útil dos produtos, o revestimento de zinco também contribui para a conservação de recursos naturais como minério de ferro, energia e água.

Uma das formas de galvanização consiste no processo de imersão a quente, no qual a peça de aço, aquecida em um forno, é imersa continuamente em um banho contendo zinco a partir de um túnel de imersão (*snout*). O controle do revestimento aplicado à peça de aço é de fundamental importância para a obtenção de um produto de qualidade que atenda ao mercado e que ao mesmo tempo seja competitivo (LINHARES *et al.*, 2008). Além disso, é importante evitar a ação de interferentes do banho decorrentes da formação da camada intermetálica do zinco-ferro, chamada de “*dross*”, que se formam em função do desprendimento de ferro (Fe) da peça de aço no banho e devido sua densidade podem se deslocar para a camada superficial ou inferior do banho de zinco. Este fenômeno causa um defeito de aspecto visível após estampagem e pintura na peça de aço e a geração de resíduo na peça da máquina no processo posterior à galvanização.

Para minimizar tal situação, nas indústrias que aplicam este tipo de galvanização é necessário ajustar o posicionamento do *snout* em relação à peça metálica, tanto de forma linear quanto angular. Quando realizado de forma manual, este posicionamento pode ser impreciso, pois normalmente são empregados recursos como uma câmera de vídeo instalada dentro do *snout* e uma janela de visita com marcações métricas para checagem do nível do equipamento em relação ao banho de zinco, que não permitem o ajuste rápido e preciso do posicionamento por parte do operador. Cabe salientar que a câmera de vídeo se encontra em um ambiente agressivo com temperaturas maiores que 400 °C e que, portanto, é de difícil visualização para o operador.

Assim, visando contribuir para a obtenção de peça de aço com maior qualidade na galvanização, este trabalho teve como objetivos implementar um sistema de controle automático para cálculo do novo *setpoint* após alteração da variável perturbada que neste estudo encontra-se na medição do nível do banho de zinco e zeragem automática após troca de componentes interno do banho, avaliando assim, sua contribuição na geração de refugos de peças processadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Implantar um sistema de controle automático para o posicionamento do túnel de imersão (*snout*) em um processo de galvanização por imersão a quente de peça de aço visando redução da perda de qualidade das peças.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Propor um modelo matemático para determinação dos novos valores de referência do posicionamento linear e angular do *snout* no modo de zeragem automática e automático;
- b) Desenvolver e implementar o sistema de controle para as configurações, modo de zeragem automática e automático;
- c) Testar o sistema proposto experimentalmente, avaliando a minimização do tempo necessário para o ajuste de posicionamento do equipamento;
- d) Avaliar a influência do controle do sistema de posicionamento a partir dos parâmetros formação de grão de zinco (PGZN) e borra (PBOR) do banho de zinco na perda de qualidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GALVANIZAÇÃO DE PEÇAS EM AÇO

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. O meio corrosivo pode ser classificado segundo seu estado físico, sua ocorrência (se natural ou artificial) ou usando ambos os critérios. Uma vez que a maioria das peças de aço está exposta ao ar atmosférico, entende-se que os prejuízos causados pela corrosão atmosférica sejam muito maiores do que os decorrentes de qualquer outro meio corrosivo, gasoso ou líquido. No ar, encontram-se vapor de água, oxigênio, gases que, dissolvidos em água (água de condensação, de chuva, orvalho, neblina), formam eletrólitos corrosivos, além de poeira, cinzas, e outros sólidos particulados que se depositam nas superfícies metálicas (GENTIL, 2003; PANOSSIAN, 1993).

Uma das formas de evitar a corrosão do metal base em peça de aço é realizar a sua galvanização, a qual consiste no revestimento com uma camada de zinco ou de suas ligas, principalmente de ferro e zinco ligado ao metal base (KOLLÁROVÁ *et al.*, 2007; VIEIRA, 2007). O recobrimento obtido por esse processo possui boa resistência à corrosão atmosférica e por isso é amplamente empregado no revestimento de aços (CARPIO *et al.*, 2008). Além desta característica, o produto galvanizado apresenta fácil moldagem, soldabilidade e adesão à pintura. Cabe ressaltar que tais propriedades variam de acordo com a composição química e a estrutura do revestimento de zinco (ORDIERES MERÉ *et al.*, 2004; FENOT *et al.*, 1993, LE e CUI, 2008).

Atualmente, em escala industrial são utilizados dois métodos contínuos de produção de peça de aço galvanizado: galvanização eletrolítica (EG - *electrogalvanizing*) e galvanização por imersão a quente (HDG - *hot-dip galvanizing*).

2.1.1 Galvanização eletrolítica

O processo de eletrogalvanização ocorre durante a deposição do zinco. A peça de aço após ter sido processada no processo de laminação a frio é submetida à temperatura de aproximadamente 50 °C, não alterando, portanto, as propriedades mecânicas do material base (ALVARENGA *et al.*, 1994).

Nas equações (1) a (4) é mostrada a sequência de reações que caracterizam a eletrogalvanização.

Eletrólito:



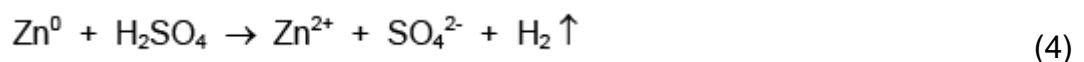
Cátodo:



Ânodo:



Reação de dissolução:



O zinco apresenta maior potencial de oxidação que o ferro, que é a principal matéria prima do produto galvanizado. Assim, se os dois forem colocados em contato em meio eletrolítico, o zinco atua como ânodo e o ferro como cátodo. Essa característica é usada para prevenir a corrosão dos aços e nela baseia-se o método de proteção pelo uso do mesmo. Se a camada deste mineral se mantiver contínua, sem qualquer danificação, a mesma atua como uma barreira evitando que o oxigênio e a água entrem em contato com o aço, inibindo, assim, a sua oxidação. Caso a camada tenha qualquer descontinuidade que permita a entrada do ar atmosférico com umidade, o ferro passa a atuar como ânodo, sofrendo corrosão (DATTILO *et al.*, 1984).

Os cristais de zinco que caracterizam o revestimento do aço eletrolgalvanizado são finos e uniformes, formando um revestimento bem compacto. Sua aparência pode variar de acordo com aditivos e tratamentos especiais quando um fino acabamento for necessário. Essas características são essenciais para se obter uma boa camada de fosfato no pré-tratamento que agirá como superfície de ancoragem para etapa de pintura. A falta de uniformidade na camada de zinco, principalmente em aplicações que demandam estampagem, prejudica o desempenho do material durante as etapas de produção de determinado produto (ALVARENGA *et al.*, 1994; PARANHOS, 2002).

Para produção da peça de aço pelo processo eletrolítico, o zinco é dissolvido dentro de um tanque ou célula em uma solução ácida de sulfato de zinco com pH de 1,7 a 2, onde são inseridos eletrodos com polarização positiva para criar um caminho do zinco presente na solução aderindo à peça com polarização negativa. A principal reação química observada é a de redução do Zn, gerando um revestimento praticamente puro. Com isso são formados compostos intermetálicos de Fe-Zn em contato com a superfície do metal base e a camada externa. Se esse material sofre um tratamento térmico, a camada de revestimento passa a apresentar apenas compostos intermetálicos Fe-Zn (KONIDARIS *et al.*, 2006).

A etapa de recobrimento se faz pelo escoamento do eletrólito sobre a peça por um determinado tempo que é definido pela velocidade do processo de tratamento. Os íons positivos de zinco presentes no eletrólito são reduzidos a zinco metálico, depositando-se sobre a superfície da peça como mostrado na Figura 1.

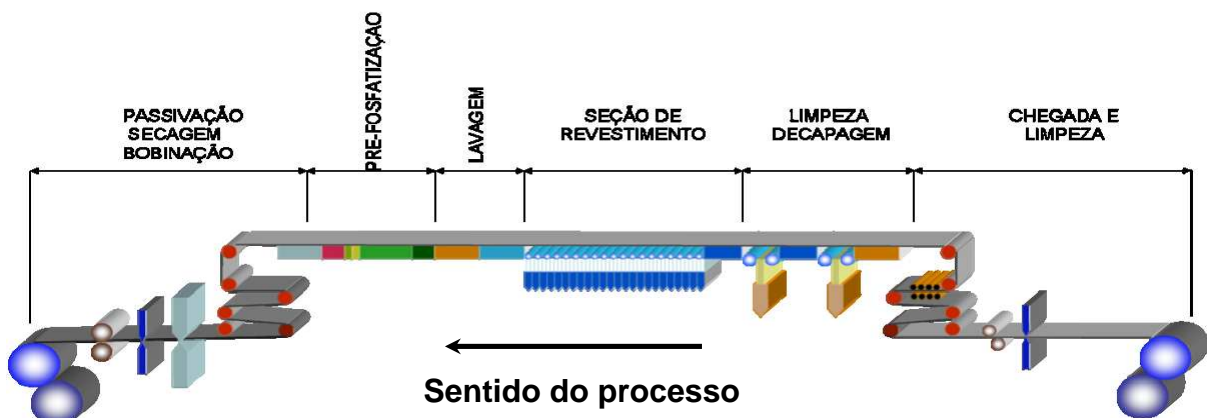


Figura 1 – Representação esquemática do processo de galvanização eletrolítica com pré-fosfatização.
(Fonte: MIRANDA, 2007)

O aço eletrogalvanizado apresenta bom desempenho durante as operações de estiramento, estampagem e processos mistos de conformação. Possui excelente desempenho com relação à proteção contra a corrosão do metal base em peça de aço galvanizado (PARANHOS, 2002; MIRANDA, 2007).

2.1.2 Galvanização por imersão a quente (HDG - *hot-dip galvanizing*).

A galvanização por imersão a quente é o processo de revestimento com zinco, realizado em torno de 450 °C, podendo ser aplicado em qualquer tipo de peças de aço. Possui vantagens em relação a outros revestimentos metálicos em termos de modo de aplicação, longa proteção e custo (SHIBLI e MANU, 2004). Apresenta também, o benefício de reunir em uma única linha industrial as etapas de recozimento (tratamento térmico do substrato metálico) e de revestimento da peça de aço (FERNANDES *et al.*, 2000; CATÁLOGO USIMINAS, 2000).

Na Figura 2 é mostrada a representação básica padrão de um processo contínuo de galvanização por imersão a quente, que é constituído por seções de entrada, limpeza, fornos de recozimento, revestimento de zinco, saída, resfriamento, pós-tratamento e acabamento. No quadrado tracejado é ilustrada a localização do banho (pote) de zinco, onde este estudo foi realizado.

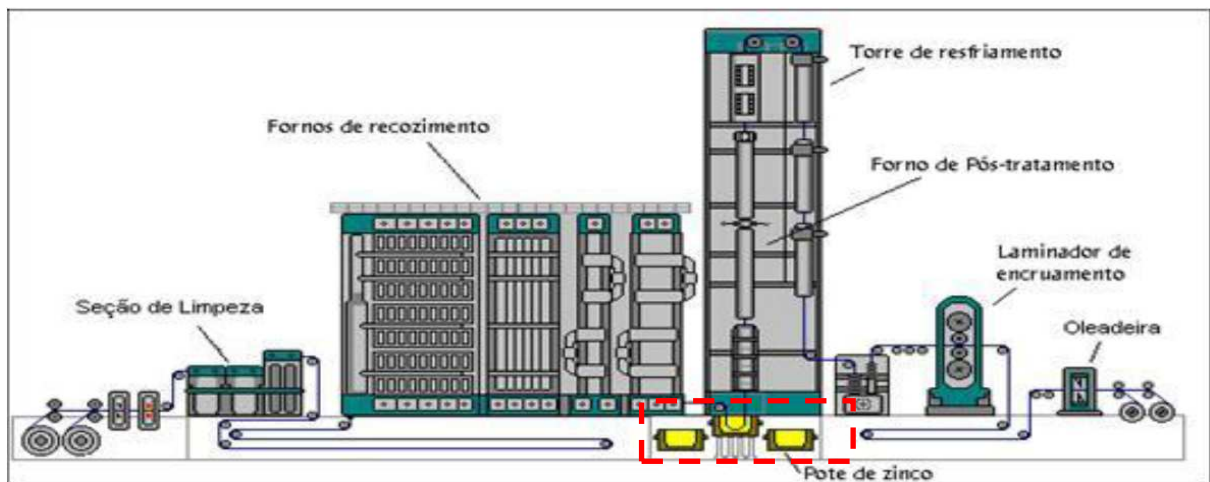


Figura 2– Esquema de uma linha de galvanização por imersão a quente.
(Fonte: Catálogo Usiminas – *Hot Dip Galvanized Steel*, 2000)

2.1.2.1 Seção de entrada (desenrolamento e soldagem)

Nesta seção, realiza-se o abastecimento da linha com bobinas laminadas a frio conforme mostrado na Figura 3. A bobina é inserida na desenroladeira e a peça é então desempenada para melhor qualidade de sua planicidade e medição da espessura (para servir de parâmetro ao ser soldada). Na seção de entrada, existem guilhotinas para efetuar descartes de possíveis defeitos originados no processo anterior, caso necessário. Após esta etapa, o material ao ser processado é direcionado pelo rolo defletor para máquina de solda (*flash butt*), na qual é efetuada a união das duas extremidades para permitir que processo seja contínuo e sem interrupções na produção. Os conjuntos tensores tem a função de manter tensão na peça evitando a criação de acúmulo de material em locais indesejáveis.

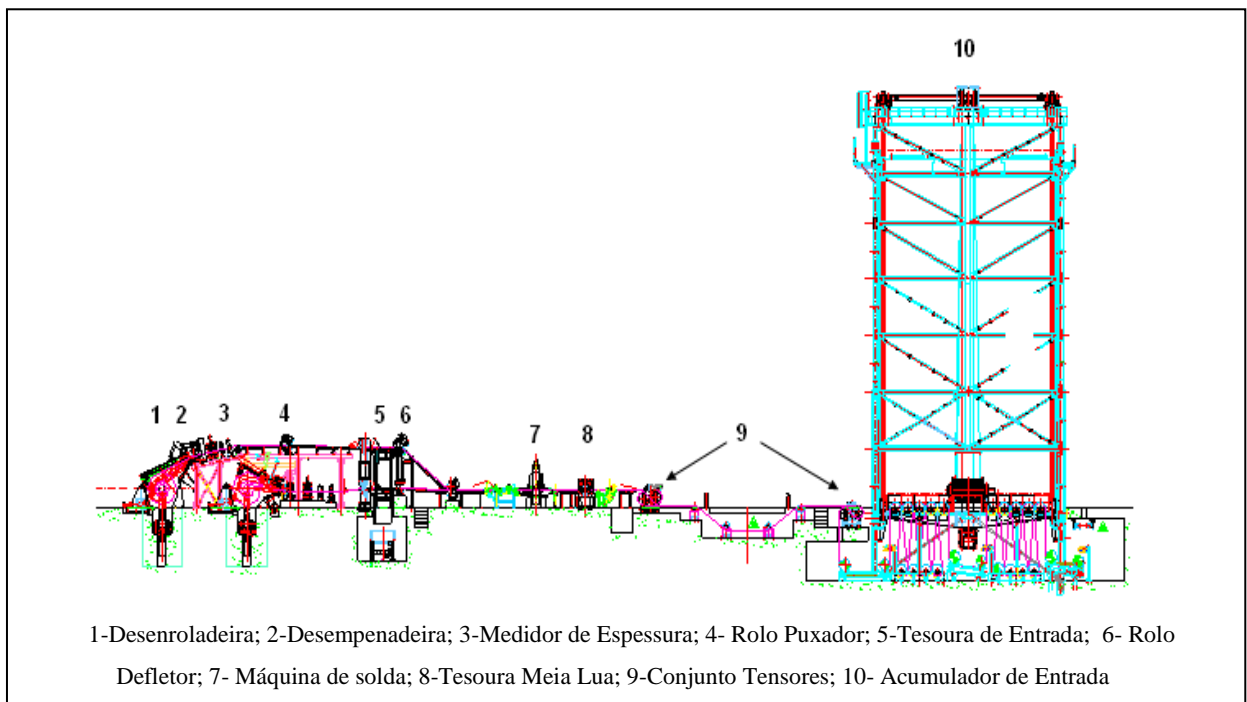


Figura 3 – Ilustração da seção de entrada no processo de galvanização por imersão a quente.
Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010

2.1.2.2 Seção de limpeza química

Na Figura 4 é mostrado um diagrama esquemático da seção de limpeza química, que é composta por três etapas: química, eletrolítica e por ação mecânica. A primeira consiste em uma seção de limpeza química antes da torre de acumulação, onde se processa a aspersion de um desengraxante alcalino (geralmente soda cáustica - NaOH) sobre a peça para reagir com os óleos (vegetal ou animal) presentes em sua superfície. Em seguida, é lavada e secada por sopro de ar a temperatura ambiente. Após esta fase, é submetida a uma limpeza eletrolítica, cuja ação ocorre por meio de reações eletroquímicas provocadas por eletrodos, promovendo a emulsificação dos resíduos oleosos em ambas as faces da peça. Ocorre também geração de gases, que por ação mecânica adicional, auxiliam na remoção dos resíduos mais aderentes à superfície. Após a limpeza eletrolítica, há uma limpeza por ação mecânica através da passagem por um conjunto de rolos escovadores. Por fim, é lavada e secada por sopro de ar aquecido, estando preparada para a seção seguinte.

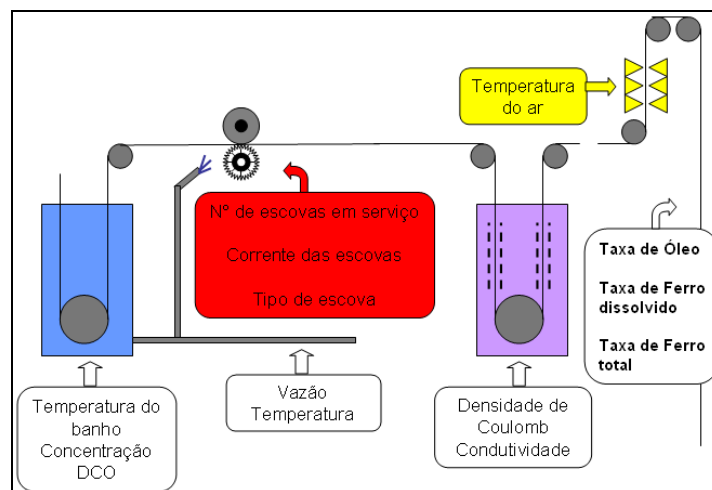


Figura 4 – Ilustração da seção de limpeza no processo de galvanização por imersão a quente. (Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

2.1.2.3 Seção do Forno (recozimento)

O recozimento da peça em um processo contínuo de galvanização por imersão a quente é realizado sob atmosfera redutora de H₂ ou HN (5 % H₂ e 95 % N₂) de modo a remover a camada de óxido de sua superfície. Dessa forma, mantém-se a superfície isenta de óxidos e de resíduos de carbono, ou seja, em seu estado metálico mais natural, garantindo a qualidade do revestimento entre a superfície da peça e o zinco fundente. Assim, promove-se uma melhor interação entre o ferro e o zinco e, conseqüentemente, melhor desempenho para o sistema substrato metálico/revestimento (FERNANDES *et al.*, 2000).

Os principais propósitos do forno de recozimento numa linha de galvanização contínua são a evaporação dos resíduos oleosos presentes na superfície da peça, a redução dos eventuais filmes de oxidação presentes em sua superfície e o tratamento térmico de recozimento, a fim de se obter propriedades mecânicas preestabelecidas e proporcionar uma temperatura adequada para imersão no banho de metal líquido (zinco).

O forno de recozimento da linha de galvanização por imersão a quente é vertical e projetado para a produção de grau comercial, estampagem média, profunda ou extra-profunda, além do grau estrutural (Figura 5). Está dividido nas seguintes zonas: pré-aquecimento (*Pre- Heater Section - PHS*), aquecimento (*Direct Fired Furnace - DFF*), encharque (*Soaking Radiant Tube Section - RTS*), resfriamento e igualação (*Slow and Jet Cooling Section – SCS / JCS*), no qual o ciclo térmico é definido em função do tipo de aço processado, visando obter as propriedades mecânicas requeridas pelo produto.

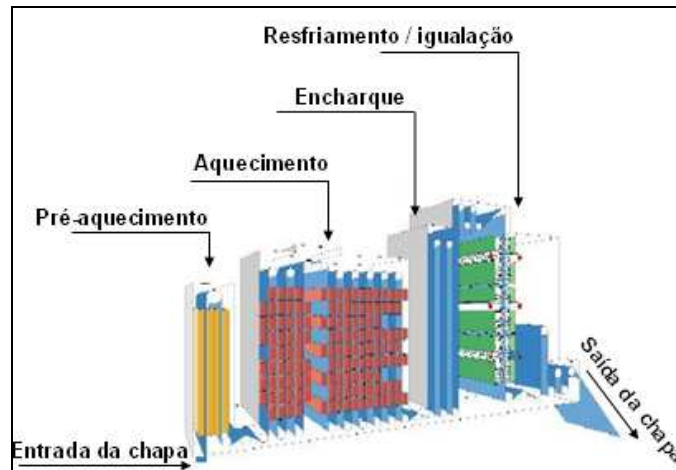


Figura 5 – Ilustração do forno (recozimento) no processo de galvanização por imersão a quente. (Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

2.1.2.4 Seção de revestimento (banho de zinco)

Após o recozimento, a peça de aço é imersa em um banho de zinco fundente (Figura 6), onde é adicionada uma pequena quantidade de alumínio (0,10 % m/m a 0,25 % m/m) cuja função é diminuir a formação de ligas Fe-Zn, melhorando a ductibilidade do material. Após alguns segundos de imersão, a peça recoberta passa por jatos de ar ou nitrogênio a alta pressão para remover o excesso de zinco e controlar a espessura da camada depositada sobre a superfície da peça. Durante a imersão, uma quantidade significativa de ferro é difundida para a camada de zinco fundente mais próxima à interface Fe-Zn, enquanto uma quantidade limitada de zinco difunde-se para o aço (FERNANDES *et al.*, 2000).

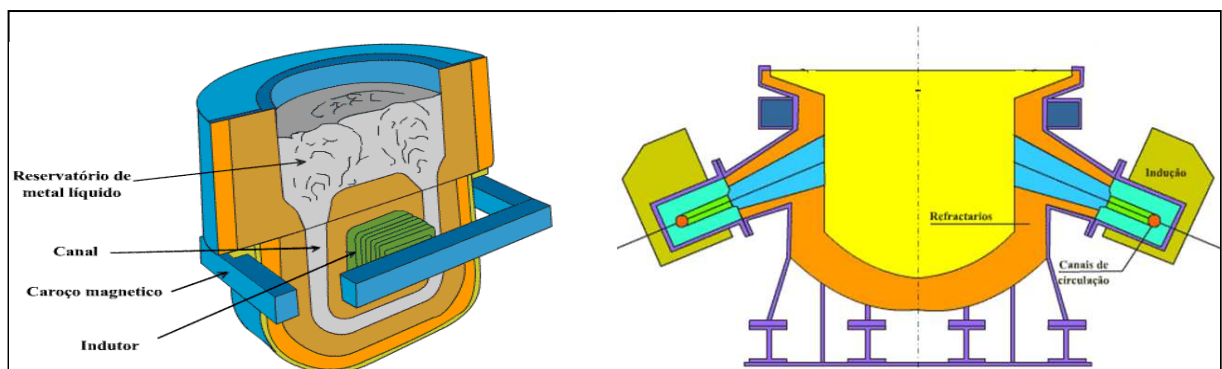


Figura 6 – Ilustração da estrutura do banho de zinco no processo de galvanização por imersão a quente. (Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

2.1.2.5 Controle de Revestimento

A espessura da camada de revestimento a ser depositada é avaliada utilizando-se um sistema de sopro de ar na temperatura ambiente, aplicado através de bocais de alta precisão (navalhas de ar) alimentados por dois sopradores, logo que a peça emerge do banho de zinco (Figura 7). A espessura do revestimento é função principalmente da velocidade da linha, da pressão do ar, da distância entre as navalhas e a peça bem como da distância das navalhas à superfície do banho. Como a viscosidade da liga 55%Al-Zn é cinco vezes inferior à do zinco, caso se mantenha todos os parâmetros constantes, a pressão de ar necessária na navalha de ar para retirar o excesso do revestimento 55%Al-Zn é aproximadamente 1/5 daquela necessária para a retirada do excesso de zinco durante produção do galvanizado (FERNANDES *et al.*, 2000).

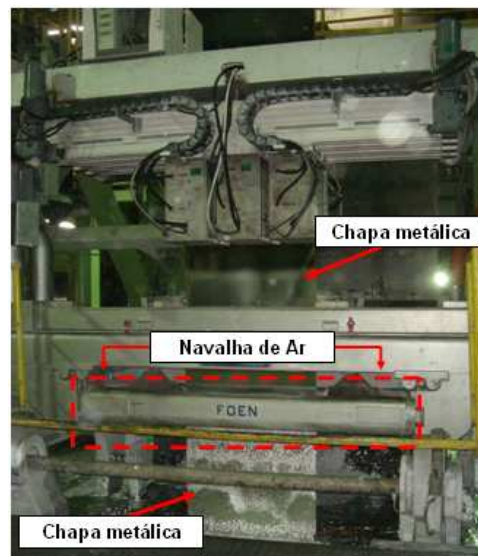


Figura 7 – Detalhe da navalha de ar na saída do banho de zinco no processo de galvanização por imersão a quente.

(Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

2.1.2.6 Laminação de Encruamento (*Skin Pass*)

Após o resfriamento, a peça é processada no laminador de encruamento e desempenadeira por tensão (Figura 8), com os seguintes propósitos:

- a) Aumento do índice de qualidade do produto no que se refere às propriedades mecânicas do material recozido, tendo como principal efeito a eliminação do patamar de escoamento, principalmente para os casos de aço zincado com baixo e extra-baixo carbono;
- b) Melhoria da rugosidade e brilho superficial, onde se deve controlar a rugosidade dos cilindros de trabalho e a força de laminação;
- c) Controle de planicidade mais efetivo (forma do material);
- d) Melhor aspecto superficial através da redução de interferentes (depressões, marcas de rolo e incrustações).

O laminador de encruamento é empregado basicamente durante a produção de produtos zincados de cristais minimizados e que será posteriormente submetido ao processo de pintura.

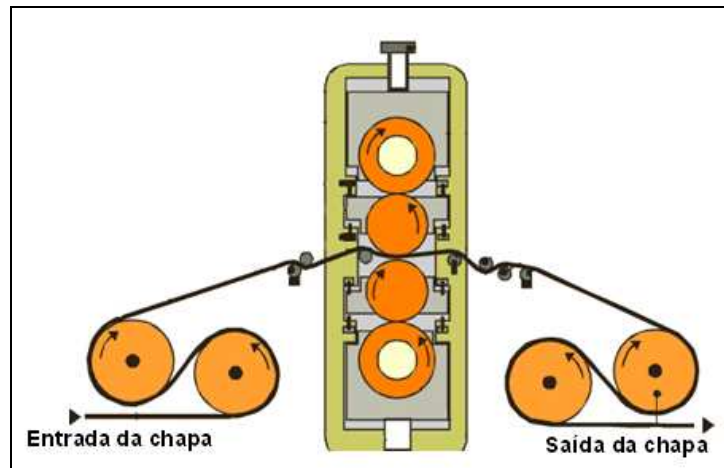


Figura 8 – Ilustração do laminador encruamento (*skin pass*) no processo de galvanização por imersão a quente.

(Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

2.1.2.7 Seção de Saída

Por fim, nesta seção, a peça passa por postos de inspeção em passe vertical e horizontal, e pode receber filme de óleo protetivo aplicado por uma oleadeira eletrostática, e é enrolada formando as bobinas que são pesadas e embaladas para serem enviadas aos clientes.

2.1.3 Tecnologias aplicadas na galvanização de peças de aço visando melhoria de processo.

De forma ampla, pode-se considerar que o tempo de vida do revestimento (eficiência de sua proteção) depende da espessura da camada aplicada (massa) variando sob a influência do ambiente de trabalho. Neste sentido, fatores como a composição e superfície do aço, a composição e a temperatura do banho e o tempo de imersão são variáveis que influenciam na espessura do revestimento. Assim, diversas propostas de estudos visando a otimização do emprego de matérias-primas, melhor eficiência do processo e minimização de resíduos em galvanização são empregadas.

Uma forma de buscar incrementos no processo de galvanização por imersão a quente consiste na variação da composição do banho, o que reflete diretamente na qualidade do revestimento. Seré *et al.* (1999), estudaram a influência do antimônio (Sb) no banho de zinco e concluíram que com o aumento da adição deste elemento não houve modificação na textura do revestimento, mas uma melhor orientação cristalográfica, permitindo assim maior resistência à corrosão no revestimento. Já Culcasi *et al.* (1999), investigaram a influência do tempo de imersão com uma pequena adição de titânio (Ti) no banho de zinco e caracterizaram o revestimento visando controle do crescimento da fase Fe-Zn, concluindo que a adição de titânio (Ti) pode ser um método efetivo para se evitar o desenvolvimento do composto intermetálico Fe-Zn. Shibli e Manu (2005) mostraram que a adição de níquel (Ni) no banho de zinco facilita a difusão do Zinco (Zn) na fase zeta (ζ) e delta (δ) no revestimento inferior da peça e observaram um aumento significativo da propriedade física, soldabilidade e dureza no revestimento. Ainda de acordo com os autores, um melhor revestimento na peça de aço por enriquecimento no interior da camada do substrato do aço com óxido de ferro (FeO) foi observado, promovendo a efetiva difusão do zinco no substrato do aço e ocasionando, em condições agressivas, maior resistência à corrosão do que somente o zinco puro no revestimento. Blumenau *et al.* (2012), estudaram a adição de magnésio (Mg) no banho de zinco, e verificaram o aumento da *wetting force* (F_w) que é determinada pelo equilíbrio entre as forças adesiva e coesiva. Como consequência, obtiveram a redução de tensão de oxidação do alumínio (AlO) na superfície do banho de zinco

contendo Zn-Al-Mg. Os autores, investigaram também o impacto da oxidação seletiva durante o processo em linha de recozimento sob aquecimento (700-1100 °C) na peça de aço (Fe-23 %Mn-0.6 %C-0.3 %Si) com o atraso do instante de formação da austenita na injeção de hidrogênio no banho de zinco líquido, observando menor oxidação e considerável influência no tratamento superficial com efeitos na composição química na superfície inferior da peça de aço galvanizado.

Ainda, o efeito da espessura e textura do revestimento na corrosão em três diferentes concentrações de composições químicas do banho de zinco contendo alumínio (Al), ferro (Fe) e chumbo (Pb) foi estudado por Asgari *et al.* (2009). De acordo com os autores, maior resistência à corrosão ocorreu ao aumentar a espessura do revestimento e reduzir a textura da peça de aço galvanizado, onde se concluiu que a espessura de revestimento é inversamente proporcional a textura da peça.

Em relação a propostas de minimização de resíduos, são exemplos os estudos como o de Kong e White (2010) onde foi observado a redução do consumo de zinco, de ácido e de energia elétrica assim como a redução de emissões de SO₂ e CO₂ por meio de um fluxo de processo em tecnologia limpa (P+L) ou o de Deniz *et al.* (2004) que investigaram a recuperação de zinco e chumbo em resíduos de uma planta industrial pelo processo de Waelz.

Conforme já citado, busca-se também a redução do consumo de matérias-primas, como apresentado por Cook (2000) que propôs uma fórmula para cálculo e determinação do balanço de zinco usado (%SGZU – *Standardized Gross Zinc Usage*) obtendo reduções de 4,48% deste material.

É importante ressaltar que todas as propostas aqui citadas implementam modificações no processo que geram ganhos, mas não abordam a qualidade da peça galvanizada em função de características operacionais da planta.

2.2. QUALIDADE DO PRODUTO GALVANIZADO

Uma das principais formas utilizadas para avaliação da qualidade de um produto galvanizado consiste na espessura do revestimento. Na saída do banho de zinco é utilizado um sistema de sopro de ar a temperatura ambiente (navalhas de ar)

para controlar a camada de revestimento depositada sobre a peça. Deformações como ondulações e empenamento são muitas vezes eliminadas a partir deste controle do revestimento (CAMPBELL *et al.*, 2005).

No entanto, um parâmetro de igual importância para determinação da qualidade de peças galvanizadas consiste na avaliação da aparência da peça. Em uma peça pode haver ocorrência de elevadas concentrações de diferentes tipos de metais e outros elementos (silício, fósforo, manganês, carbono) provocando “manchas” ou “enrugamento” (GUELTON E LEROUGE, 2010).

Também pode ser observada a aparência de “grumos”, mais conhecido como areião, quando impurezas ou interferentes do banho de zinco (borra, carvão, óxidos, chumbo) são fixadas na superfície da peça no momento da sua retirada do banho. A quantidade excessiva de grumos é normalmente motivo de rejeição, pois tendem a fragilizar o revestimento. Outro fator que leva a não aceitação consiste na deposição acumulada de zinco. A formação destes aspectos, caracterizados como defeitos e que geram refugo como consequência, muitas vezes é característica intrínseca ao processo. Por exemplo, a temperatura do processo de galvanização deve ser de aproximadamente 450 °C. Quando necessário operar com temperaturas acima de 470 °C observa-se o aumento do desgaste da cuba e a geração de resíduos, como a borra e a cinza de zinco. Estes devem ser minimizados para garantir a qualidade da peça final.

Dessa forma, os dois interferentes na qualidade da peça galvanizada (resíduos ou impurezas) que são considerados neste trabalho são a borra (PBOR) e o grão de zinco (PGZN). No banho metálico, o alumínio tipicamente entre 0,1 e 0,2 % é adicionado a fim de se prevenir a formação de camada intermetálica zinco-ferro espessa, a qual poderia resultar em má aderência do revestimento durante operações de conformação. O alumínio reage preferencialmente com o aço formando uma fina camada intermetálica ferro-alumínio que age como barreira e controla o crescimento da camada intermetálica zinco-ferro (TOWNSEND, 1993).

Quando a peça de aço imerge no banho de zinco fundido, parte do ferro presente na peça é dissolvida promovendo a formação, inicial, do composto FeZn_7 . Se a concentração de alumínio é alta, o composto FeZn_7 se converte em Fe_2Al_5 , segundo a equação 5 (TOWNSEND, 1993).



A densidade do zinco é 6700 kg/m^3 , do componente FeZn_7 é 7300 kg/m^3 e do FeAl_5 é 4200 kg/m^3 . Como resultado, o FeZn_7 (conhecido industrialmente como “*bottom dross* – grão de zinco”) com diâmetros variando de 0,5 mm a 1 mm precipita no fundo do banho. De forma contrária, o FeAl_5 (conhecido industrialmente como “*top dross* – borra”), com diâmetros menores que 5 mm, flutua no banho, sendo facilmente escumado juntamente com a nata (oxidação da camada superior do banho devido contato com o ar). No entanto, é importante ressaltar que devido a agitação provocada pelo deslocamento da peça ao passar pelo banho a borra suspensa também se desloca para baixo da nata (OTSUKA *et al.*, 1998). A representação de ambos é ilustrada na Figura 9.

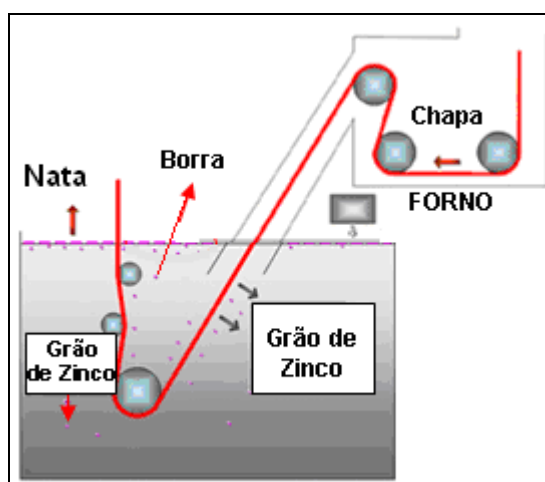


Figura 9 – Ilustração do banho de zinco com formação borra e grão de zinco.
(Fonte: ArcelorMittal Gent, 2012)

O resultado final é a visualização de defeitos na peça galvanizada, alterando sua aparência e não alcançando o controle de qualidade desejado.

2.2.1 Tecnologias aplicadas na galvanização de peças de aço visando qualidade da peça.

Propostas de estudos visando atender os padrões de qualidade da peça galvanizada e conseqüentemente a redução de refugo abordam, em geral, a análise da formação do revestimento, conforme apresentado a seguir.

Dafydd *et al.* (2005) propuseram a redução de O_2 com o uso de um eletrodo de disco rotativo (RDE) em banho de zinco (Zn-Al), minimizando assim a oxidação do alumínio em contato com o ar (chamada nata) na camada superior do banho de zinco. Zapponi *et al.* (1999), ao estudarem o aspecto superficial e granular do revestimento de zinco-alumínio (Zn-Al) com diferentes concentrações de antimônio (Sb) e alumínio (Al), perceberam mudanças na morfologia da solidificação do revestimento quando a concentração de antimônio era alterada, porém não verificaram o mesmo com alumínio.

Estudos foram realizados para caracterização do revestimento em linhas de galvanização a quente, por Chidambaram *et al.* (1996), que propuseram a identificação da fase intermetálica Fe-Zn com alta temperatura do banho de zinco (550 °C a 570 °C) em um tempo curto de imersão (3 a 8 minutos) para comparação de peças galvanizadas com e sem a utilização do forno de galvânico. A formação do composto primário das fases zeta (ζ) $FeZn_7$ e delta (δ) $FeZn_{13}$ e uma larga região com as duas fases somadas, fase gama (γ) Fe_3Zn_{10} presente no revestimento foram observadas, além de maior uniformidade da espessura e fases presentes no revestimento independente do tipo de peça de aço e do composto primário da fase intermetálica similar com ou sem a utilização do forno galvânico.

Verma e Van Ooij (1996) propuseram a análise da formação do revestimento do zinco com alta temperatura do banho de zinco (520 a 550 °C), e verificaram o aumento da ductibilidade e resistência à corrosão da peça de aço, melhorando assim a propriedade superficial para pintura e coeficiente de fricção do revestimento. Bicao *et al.* (2007) propuseram também este estudo, mas em temperaturas (480 a 500 °C) no revestimento da peça. Identificaram que acima de 500 °C ocorre a mudança da fase zeta (ζ) para a delta (δ) e que a espessura de revestimento está associada até a temperatura máxima de 480 °C na fase zeta (ζ). Na mesma linha de estudo, Wang *et al.* (2009) avaliaram o efeito da temperatura do banho de zinco em temperaturas de (450 a 530 °C) para peça de aço silício tipo (Fe-01.%Si), e observaram que a fase zeta (ζ) é formada em 470 °C e que acima de 490 °C ocorre a mudança para a fase delta (δ). Os autores concluíram que a temperatura do banho de zinco têm efeito direto na ductibilidade e resistência à corrosão da peça galvanizada.

Azimi *et al.* (2012) realizaram uma avaliação metalúrgica dos defeitos críticos na peça de aço galvanizado JIS G3302 da linha de galvanização à quente por

microanálise (SEM) e teste de corrosão, onde detectaram que os defeitos com menor resistência à corrosão foram: marca ou mancha (*Bare spot*), arranhão (*Scratch*), grão de zinco (*Dross*), mancha no formato espinha (*Pimple*). Também segundo esses autores, em outro trabalho foi realizada uma análise metalúrgica da influência da propriedade de peça de aço galvanizado com defeito mancha no formato espinha (*pimples*) e em teste de *salt spray* ocorrendo redução em 23 % da resistência à corrosão e da tensão de alongamento elástica e plástica.

Uma proposta que pode ser considerada uma modificação operacional consiste no trabalho de Sippola (1999). Neste, o método com bico de pulverização “*plurality of nozzles*” para redução da geração de borra e grão de zinco se mostrou eficiente na redução dos interferentes na peça. Esse método consiste na instalação de bicos nas duas extremidades do *snout* aplicando gás inerte para agitação do banho de zinco e conseqüente pluralização e melhor homogeneização na região de contato da peça.

Mesmo avaliando a formação dos interferentes buscando minimizá-los, ou propondo ações diretas na homogeneização o banho, a aplicação da maioria dessas metodologias necessita de um eficiente sistema de controle operacional para evitar a ocorrência de interferentes na qualidade da peça anteriormente citados. Neste sentido, a automação do processo pode contribuir significativamente visando minimizar o tempo de produção fora dos padrões em virtude da incidência de defeitos quando os mesmos não podem ser evitados.

2.3 AUTOMAÇÃO E CONTROLE EM PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO

A automatização de processos resulta em aumento de segurança, qualidade, produtividade e rendimento (CAMPBELL *et al.*, 2005). Logo, a aplicação de sistemas de controle nos processos de fabricação tornou-se altamente lucrativo e, por conseqüência, o setor de automação industrial vem se desenvolvendo cada vez mais. No processo de galvanização por imersão a quente, abordagens de controle são utilizadas para avaliação da qualidade da peça reprovada (refugo), aumento da produtividade e maior estabilidade e confiabilidade do processo de fabricação de peça de aço galvanizado.

Uma das principais objetivos nesta área consiste no controle da espessura de zinco, e para tanto, diversas propostas são apresentadas. Um controle efetivo da espessura do revestimento representa melhor homogeneidade na peça, redução do consumo de matéria prima e conseqüentemente, o atendimento a qualidade desejada.

Neste sentido, Campbell *et al.* (2005) propuseram a aplicação de um sistema de gestão do consumo de zinco utilizando um modelo matemático para controle da camada deste componente na navalha de ar após o banho, retirando assim o excesso ou *overcoating* que ocasiona a geração de interferente borra. Em conseqüência, observou-se a redução da borra, pois o sistema permitia um controle de 19 μm de revestimento em ambos os lados da peça .

McKerrow (1983) propôs o primeiro computador (*house computer Lysaghts*) baseado em um sistema para controle retroalimentado de massa de zinco para o revestimento de peça em linha de galvanização, obtendo uma redução de 13 % do consumo de zinco e uma eficiência significativa nos parâmetros de controle de processo.

Uma abordagem adaptativa para controle retroalimentado de deposição de zinco (50 a 350 g/m^2) em peça de aço em linha de galvanização à quente da SOLLAC em Florange (França) foi proposto por Fenot *et al.* (1993). Uma melhora na qualidade do produto final e redução do consumo de zinco médio em 3%.

De acordo com o manual da *American Society for Testing and Materials* (1993) e Corson (2002), um método eficiente para redução de borra na peça de aço zincada consiste no revestimento baseado pelo peso (quantidade de zinco usado na peça em relação à quantidade de abastecimento do mesmo no banho). Dentro deste escopo, Rodrigues (2007) descreveu uma proposta de um controlador robusto de pressão, que realiza o controle final do peso da camada de revestimento em uma linha de galvanização por imersão a quente. Também, Chen (1994) sugeriu a utilização de controle preditivo para ajustar a massa de zinco depositada na peça de aço pela navalha de ar, observando reduções do consumo de zinco na ordem de 40 toneladas por dia.

Zhang e Moallemi (1994) propuseram um modelo de simulação numérica para o controle de temperatura de solidificação do revestimento de zinco na peça de aço após ter passado no banho de zinco utilizando a tecnologia MAGG (*Multizone Adaptive Grid Generation*) de volume aproximado por curva linear finita, em função

da espessura de revestimento, velocidade da peça, vazão da navalha de ar, propriedade do zinco líquido contido no banho e tensão de superfície. Foi verificado pelos autores, que o fluxo e a espessura do revestimento na peça ao sair do banho são determinados pela interação entre navalha de ar e o processo de solidificação que ocorreu no revestimento entre o banho de zinco e a navalha de ar. O efeito da tensão de superfície na taxa de solidificação foi muito pequeno.

Jacobs (1995) empregou um controle automático retroalimentado de regulação de massa de zinco depositada na peça pela navalha de ar. A desempenho foi melhor do que para o controle adaptativo retroalimentado que trouxe uma redução de consumo de zinco na ordem de 1 milhão de dólares americanos por ano.

Um modelo polinomial para o controle de deposição de massa de zinco no revestimento de peça em função da temperatura do banho, tempo de imersão, velocidade da peça pelo desenvolvimento experimental de Doehlert foi implementado por Ben *et al.* (2008). Dentro das condições operacionais avaliadas, os autores identificaram os seguintes valores para atingir o ponto ótimo (Figura 10): temperatura do banho de zinco em 444 °C, velocidade da peça em 4 m/min e tempo de imersão de 1,5 min, correspondendo a 381 g/m² de zinco com espessura de revestimento de 53 μm.

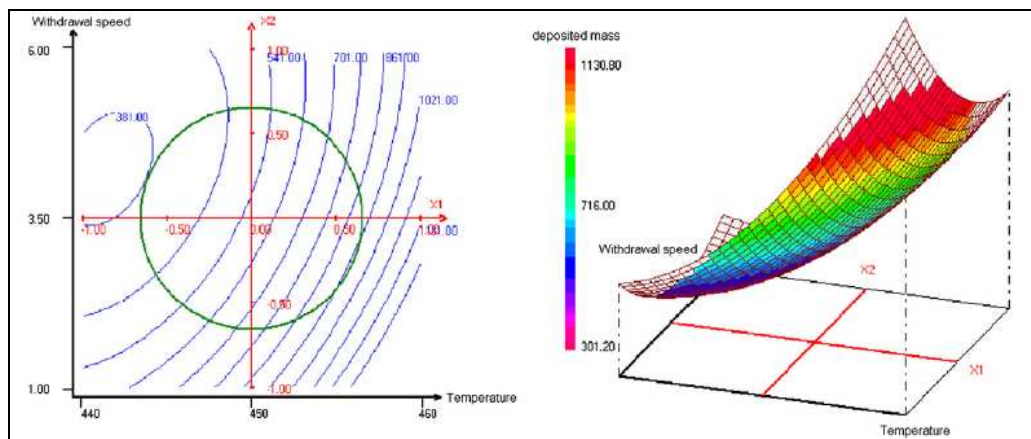


Figura 10 – Ilustração do melhor ponto de operação em Doehlert. (Fonte: Bem, 2008)

Guelton e Lerouge (2010) implementaram um sistema de controle da pressão e posição da navalha de ar usando um controlador antecipativo baseado em modelo e dois controladores retroalimentados. Estas propostas tiveram como objetivo o

controle da espessura do revestimento e por consequência foi observado também à redução dos interferentes borra e grão de zinco na peça.

Ainda, propuseram controle de peso de revestimento na linha de galvanização à quente da ArcelorMittal em Florange (França), utilizando um modelo e um sistema de controle antecipativo de pressão e posição da navalha de ar. Os resultados demonstraram maior uniformidade do revestimento de zinco devido à rápida resposta do posicionamento da navalha de ar na posição desejada (*setpoint*), redução significativa do consumo de zinco e redução de peso da refugo de revestimento “não conforme”.

Akamphon *et al.* (2011) propuseram PBCM (*Process-based cost modeling*), mostrado na Figura 11, utilizando o controle intermediário da camada de Zn-Ni na galvanização (ICG), para redução de consumo de zinco com aumento da proteção contra corrosão em revestimentos de peça em linha de galvanização à quente. O pré-revestimento de níquel (Ni), com espessura entre 2 a 3 μm , formou uma fase intermediária de Zn-Ni, reduzindo assim o consumo de zinco. Todavia, segundo os autores, o efeito do revestimento da camada intermediária com a espessura analisada deve ser melhor avaliado.

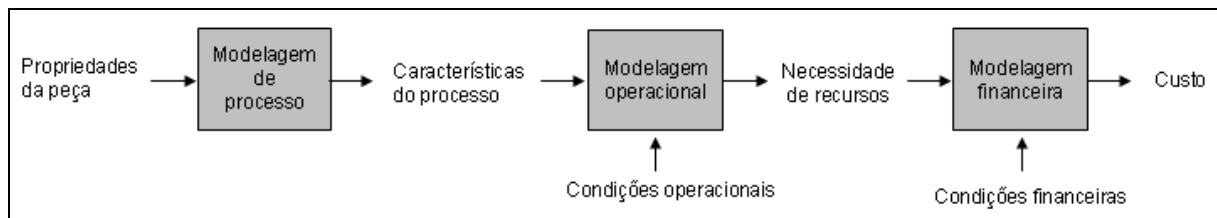


Figura 11 – Ilustração esquemática do PBCM
(Fonte: Akamphon, 2011)

Observa-se que as propostas de automação e controle do processo de galvanização a quente são focadas na atuação no banho de zinco, saída do banho e navalha do ar. Busca-se otimizar o processo e atender os padrões de qualidade com o menor consumo de zinco e com uma espessura de revestimento controlada. Porém, tais propostas em geral ignoram os interferentes (impurezas ou resíduos) decorrentes do contato do banho com o ar e consequente geração de borra (areião) e grão de zinco (acúmulo de zinco) na peça. A geração de refugo decorrente da ação destes interferentes ocorre independente do processo ser otimizado ou o controle de espessura do revestimento ser bem ajustado. Na prática, o que se faz

necessário é o ajuste da posição do túnel de imersão (*snout*) de forma a garantir os padrões de imersão da peça e assim, a qualidade da peça. No entanto, esta modificação é realizada normalmente de forma manual, o que demanda tempo e experiência por parte do operador. Neste momento, a ação demorada de forma manual permite a geração de elevada quantidade de refugo, gerando desclassificação da peça e aumentando o custo da não qualidade devido às perdas no processo de fabricação.

Assim, a proposta de modelagem e controle desenvolvida neste trabalho atua no *snout* que se localiza na entrada do banho, onde este equipamento corresponde a uma estrutura metálica retangular de condução da peça e isolamento da boca de saída do forno, instalada na transição do forno ao pote de zinco em linha de galvanização por imersão a quente. O modelo desenvolvido permite um posicionamento no modo de controle automático bem como de partida (zeragem automática) em função do nível do banho de zinco, da altura deste e da camada de transbordo para ajuste rápido e preciso, pois o modelo permite a geração de um novo *setpoint* em função da variável perturbada e por consequência redução do refugo gerado por estes interferentes na peça produzida.

3 METODOLOGIA

A seguir descreve-se os materiais e métodos adotados neste estudo.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Na Figura 12 é mostrado o processo contínuo de galvanização por imersão a quente, no qual o equipamento foco deste estudo foi o banho de zinco (11).

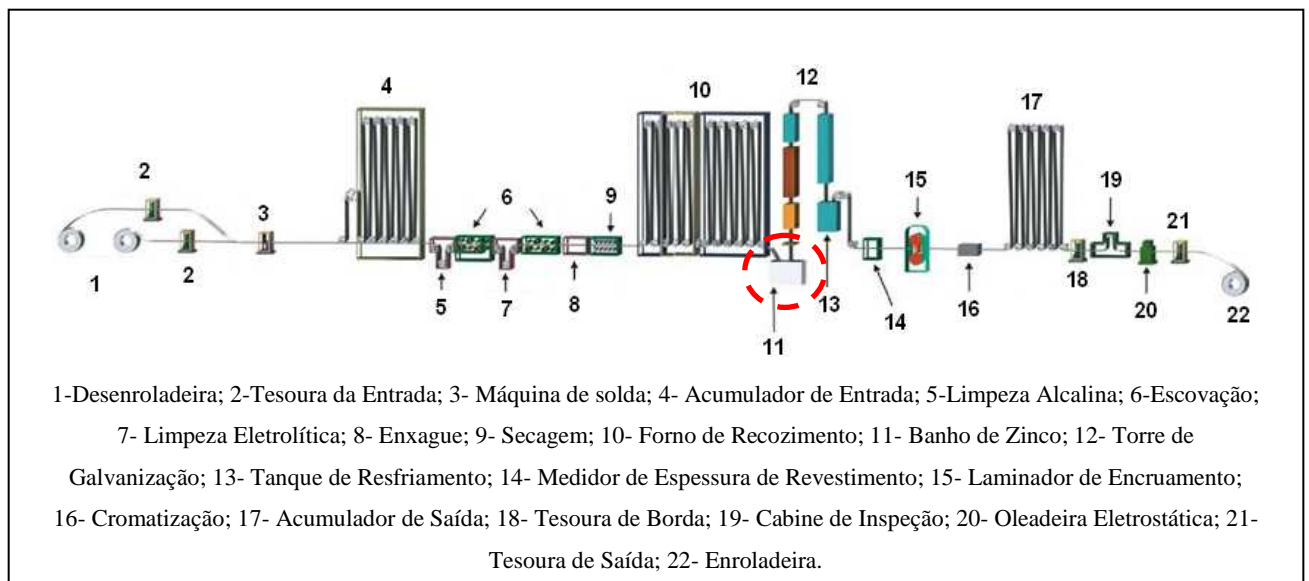


Figura 12 – Diagrama esquemático da linha de galvanização por imersão a quente

Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010

Após recozimento da peça no forno (item 10 na Figura 12), a temperatura é controlada para atingir um valor adequado para imersão no banho de zinco ou de liga 55%Al-Zn. Após este controle de temperatura, a peça é guiada através de um túnel de imersão eletromecânico (*snout*) para o banho de metal fundido, conforme mostrado na Figura 13, no qual a camada metálica é aplicada. A temperatura da liga 55%Al-Zn no banho é mantida de acordo com as normas operacionais da empresa. A viscosidade da liga 55%Al-Zn é sensivelmente menor que a do zinco, resultando em menores espessuras da camada primária de revestimento, logo após a imersão.

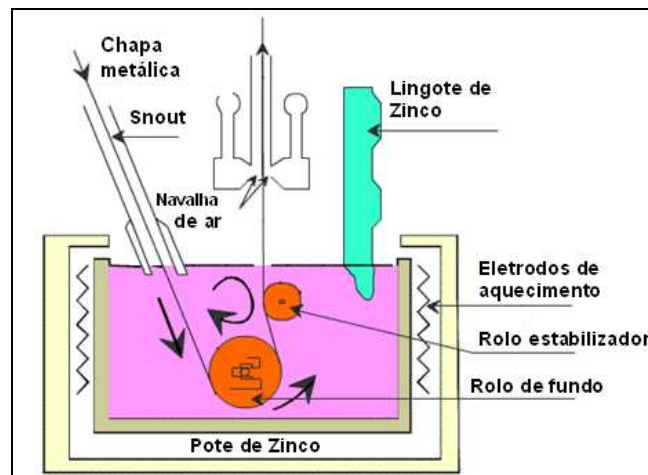


Figura 13 – Detalhamento do banho de zinco.
(Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

O banho de zinco é composto por uma parede de refratários com dois indutores com potência de 500 KW cada um, que mantém armazenado 290 t de zinco no estado líquido. Possui capacidade para conter todas as peças do equipamento (rolo de fundo, estabilizador e o *snout*) e imergir os lingotes de zinco para a formação da liga 55%Al - 43,5%Zn.

O rolo de fundo tem como função mudar a direção da peça para que a mesma saia do banho após o mergulho. Os rolos tensionadores garantem a tensão adequada desta após a saída do banho. O *snout* é uma tubulação mecânica retangular que está unida a boca de saída do forno através de um acoplamento e imersa no banho de zinco como mostrado na Figura 13. O posicionamento manual deste é definido conforme abordado no item 3.3.1.

A estrutura mecânica do *snout* é similar a um túnel onde a peça se desloca dentro, onde se forma uma distância entre esta e a parte inferior do equipamento e a mesma para evitar colisão entre ambas as partes. Para que tal situação seja evitada se faz necessário o ajuste do posicionamento angular.

No banho, a temperatura da liga 55%Al-Zn é mantida de acordo com as normas operacionais da empresa e a sua viscosidade é sensivelmente menor que a do zinco, resultando em menores espessuras da camada primária de revestimento, logo após a imersão.

3.2 MODELAGEM

Quando os interferentes avaliados neste trabalho (borra e grão de zinco) geram a rejeição de uma peça devido à má qualidade de deposição, um novo ajuste linear e angular do *snout* é necessário visando minimizar a ocorrência de defeitos na peça. Para a implementação desta proposta de controle automático de posicionamento foi necessário realizar a modelagem matemática para o cálculo dos novos valores de *setpoint* citados. Para tanto, utilizou-se equações específicas relativas às restrições do processo e relações baseadas em trigonometria. As equações obtidas (descritas no item 4.1) foram implementadas no controlador lógico programável HPC (*High Performance Controller*) conforme a arquitetura de programação deste.

3.3 SISTEMA DE CONTROLE DO POSICIONAMENTO DO SNOOT

Anteriormente à implementação desta proposta, o ajuste de posicionamento do *snout* era realizado manualmente. Para a concretização da mesma, foi necessário primeiramente realizar o levantamento da instrumentação necessária para readequação da planta. Em seguida, com o modelo matemático desenvolvido, foi realizada a implementação do controle e o desenvolvimento do supervisório. Por fim, a eficiência do sistema foi avaliada com base no número de apontamentos na geração de refugo e o peso em toneladas no volume total detectado. Material e metodologias envolvidos nestas etapas são apresentados a seguir.

3.3.1 Sistema manual de posicionamento do *snout*

Em duas situações faz-se necessário realizar o ajuste imediato de posicionamento do *snout*: (1) quando ocorre a troca do rolo de fundo – chamado de zeragem automática e (2) quando o nível do banho de zinco é alterado (devido inserção ou retirada do tarugo de zinco) e conseqüentemente ocorre o surgimento

do interferente borra (PBOR) e grão de zinco (PGZN), ocasionando defeitos na peça de aço galvanizado durante o processo de produção da mesma – chamado ajuste automático.

Nestes casos, era necessário efetuar o acionamento manual do movimento linear e angular do *snout*, no qual o operador utilizava o painel de comando (Figura 14) que se localizava próximo ao equipamento. A ação corretiva, realizada pelo acionamento de um motor que deslocava o *snout* linear (função retração) e angularmente, era acompanhada através de uma câmera de vídeo instalada dentro deste equipamento e sua visualização ficava na cabine de operação. Na lateral, utilizava-se de uma janela de visita para acompanhamento *in loco* da melhor posição para início da produção. Para não ocorrer colisão entre a estrutura do *snout* com a peça de aço, se faz necessário o movimento linear e angular para manter a distância de 1/3 da peça em relação a parte inferior do *snout*.

Tanto o movimento linear quanto o angular são motorizados: linear motoredutor SEW modelo – S57DT90S3 BMG2HR, potência 1,5 KW, velocidade 3240 min^{-1} para o motor e 270 min^{-1} no eixo de transmissão (reductor), angular motoredutor SEW modelo – S57DT90S4, potência 1,1 KW, velocidade 1680 min^{-1} para o motor e $57,93 \text{ min}^{-1}$ no eixo de transmissão (reductor). Estes equipamentos foram mantidos na proposta de automatização deste trabalho.

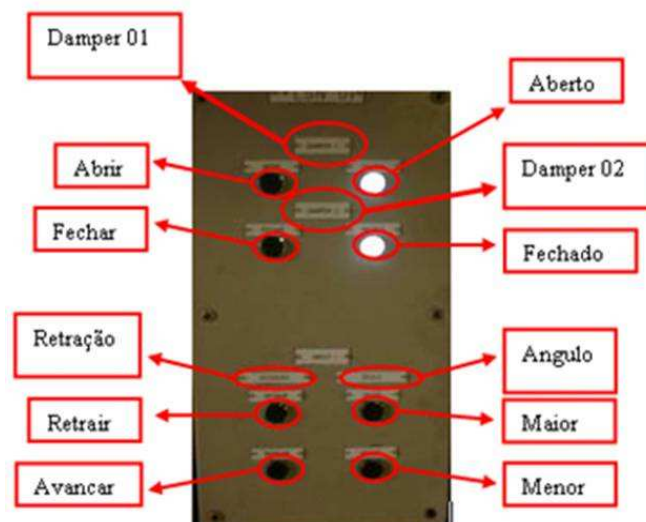


Figura 14 – Ilustração do painel externo de acionamento do *snout*.
(Fonte: Primária, 2011)

Conforme citado, quando necessário realizar algum ajuste do posicionamento linear e/ou angular com a linha de galvanização em funcionamento, utilizava-se

somente a visualização da câmera de vídeo com muita dificuldade de visualização (embaçamento da lente devido ao ambiente ter alta temperatura). Esta ação manual, da forma que é executada, contribuía com a obtenção de peças fora das especificações durante o tempo de ajuste e deve ser minimizada.

3.3.2 Instrumentação

Para implantação do sistema de controle proposto, alguns equipamentos foram adquiridos e utilizados. Uma vez que o nível de zinco passou a ser um parâmetro de entrada no modelo, e conseqüentemente no sistema de controle, foram necessárias a aquisição e instalação de um sensor para leitura desta variável. Para determinar o nível do banho no banho de zinco foi utilizado o sensor de nível IFM, modelo 01D100, sendo avaliada sua calibração mensalmente pelo setor de instrumentação da empresa.

A leitura dos sensores de posicionamento linear e angular foi realizada fazendo-se uso de dispositivos eletromecânicos do tipo *encoder* cujas características são apresentadas na Tabela 1 e fotografia são apresentadas na Figura 15.

Tabela 1: Características dos sensores de posicionamento utilizados (encoder)

Posicionamento	Tipo	Marca	Modelo	Faixa de leitura
Linear	Incremental	ASM	WS10-1250	0 a 1250 mm
Angular	Incremental	ASM	WS10-100	0 a 100 mm

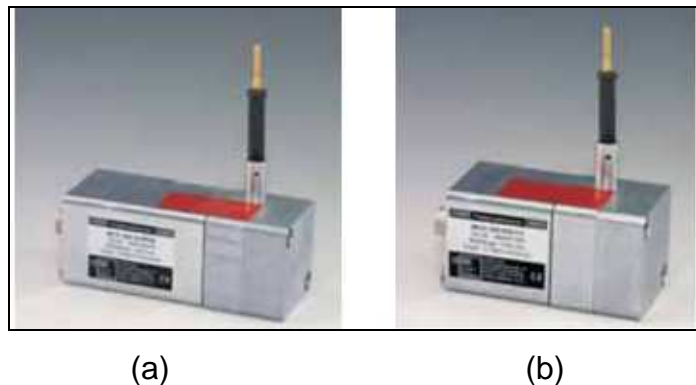


Figura 15 – Ilustração dos equipamentos (a) foto WS10 - 1250, (b) foto WS10 - 100. (Fonte: Primária, 2011)

Os atuadores, ou elementos finais de controle permaneceram os mesmos do controle manual (acionamento motorizado).

3.3.3 Implementação do controle no CLP

Conforme já citado, por meio da proposta de modelagem, novos ajustes são calculados pelo controlador para definição do ponto de operação (*setpoint*). Uma vez definido o novo valor de *setpoint*, dois controladores do tipo liga-desliga (On/Off) foram utilizados para implementar as ações corretivas necessárias.

O controlador compara o sinal de entrada (posicionamento linear e angular), que indica o valor atual da grandeza (PV – variável de processo), com o valor determinado como ponto de controle ou referência (SP - *setpoint*) determinado pela modelagem do processo. Se o valor atual supera a referência, o controlador indica o desligamento do atuador (motores para o ajuste linear e angular). Já se a referência supera o valor atual, o atuador é ligado. É importante ressaltar que para a realização do ajuste angular foi necessária uma linearização de modo a permitir a implementação do controle utilizando o motor para correção da posição.

O controlador lógico programável utilizado (Figura 16), onde o controle e a modelagem proposta foram implementados, foi o HPC (*High Performance Controller*) do fabricante Alstom. Trata-se de um controlador de alto desempenho que consiste em uma arquitetura Intel compilando tarefas em até 400 nanosegundos com multiprocessamento, com o *rack* possuindo 20 entradas para cartões com alimentação AC e DC e barramento VME. A sua CPU é Celeron 366Mhz, Ethernet 10BaseT/100BaseTX.

Basicamente, o HPC controla todos os equipamentos que processam a peça na linha de galvanização por imersão a quente. Suas principais características são:

- a) Multiprocessamento (até 4 CPU's);
- b) Multi-ciclos para as tarefas de mesma aplicação;
- c) *Hot swapping*;
- d) Uso definido de módulos;
- e) Base de dados centralizada;

- f) *Watchdog*;
- g) Sistema de diagnóstico (via internet explorer);
- h) Programação em bloco;
- i) Sistema Operacional *VxWorks*;

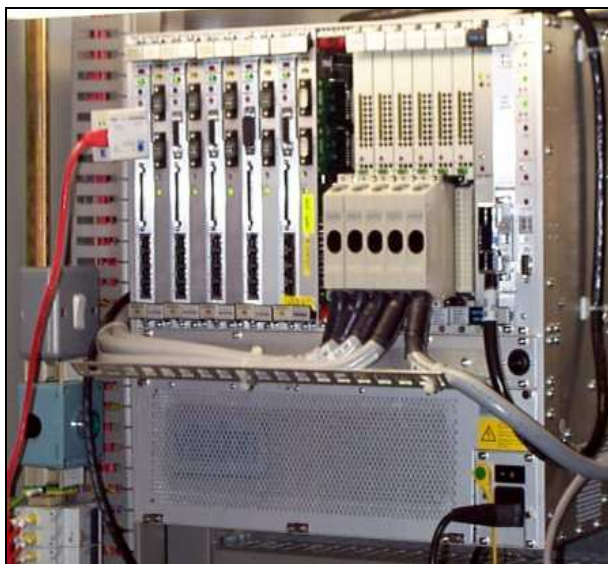


Figura 16 – Fotografia do controlador de alta performance (HPC).
(Fonte: Primária, 2011)

O *software* utilizado para programação em blocos lógicos e intertravamentos no HPC foi o P80C do fabricante Alstom. Sua arquitetura da rede de comunicação é o barramento de campo distribuído, a taxa de transmissão da rede de comunicação é de 100 MBps, com ciclo de atualização a cada 1 segundo, plataforma de programação em porta lógica. Uma página de programação pode ser visto na ilustração do apêndice 01.

3.3.4. Ajuste dos controladores Liga-desliga

Após o cálculo do valor de referência por meio da modelagem proposta, controladores do tipo (liga-desliga) foram implementados para o ajuste do posicionamento linear e angular do *snout*. A sintonia deste tipo de controlador exige apenas a definição da oscilação em torno do ponto de referência, também chamada de histerese ou amplitude.

Assim, o supervisor protótipo (Figura 17) foi desenvolvido para simulações das equações de posicionamento do equipamento utilizando o software ElipseScada na versão 2.29, visando-se a definição deste valor tanto para o posicionamento linear quanto para o angular.

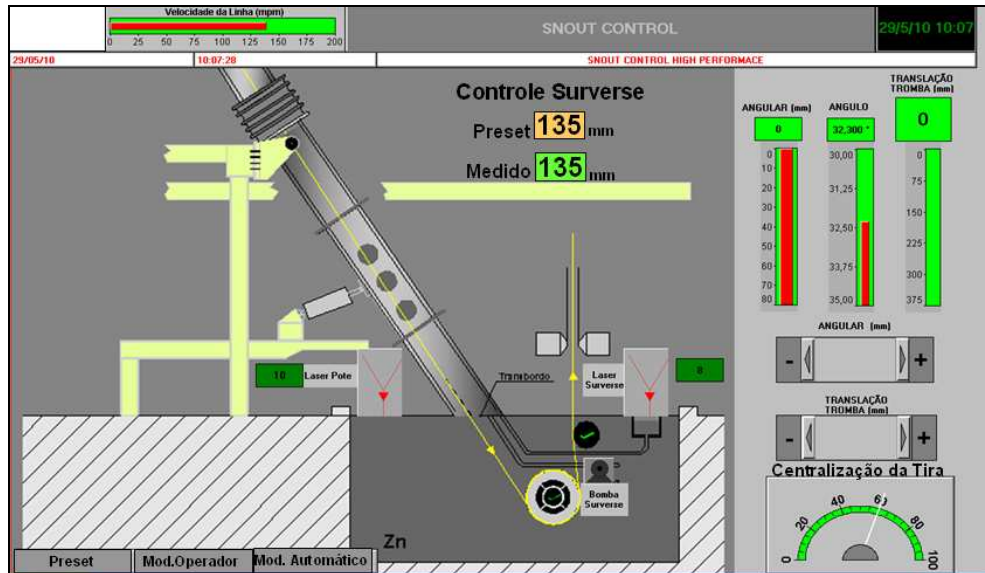


Figura 17 – Supervisor protótipo da IHM do *snout* no ElipseScada. (Fonte: Primária, 2011)

3.3.5 Sistema supervisor

Para finalizar a implementação da proposta, fez-se necessário o desenvolvimento de um sistema supervisor do processo. Para tanto, o software empregado para o desenvolvimento da interface foi o *Intouch* do fabricante *Wonderware Software*. É um componente da *FactorySuite* da *Wonderware*.

O *Intouch* consiste de três programas básicos: *Application Manager* que organiza as aplicações criadas, o *WindowMaker* é o ambiente de desenvolvimento e o *WindowViewer* versão 7.11, que é a interface homem máquina ou chamado de ambiente de operação do aplicativo.

No *Application Manager* foi criado a interface de comunicação chamada OPClink para tráfego de todas as variáveis de posicionamento e acionamento visualizadas no *WindowViewer*.

No *WindowMaker* foi desenvolvido a tela de operação (botões, variáveis de controle, alarmes de falha no equipamento) para ser ativada no *WindowViewre*.

O *WindowViewer* foi o programa utilizado onde a tela já desenvolvida foi ativada para sua operacionalidade (botões, variáveis de controle, alarmes de falha no equipamento) para melhor monitoramento e agilidade na correção de desvios no processo. O operador interage com as variáveis de monitoramento e acionamento quando necessário.

3.3.6 Verificação do desempenho do controle do processo

Para avaliação do desempenho do controlador foram realizados os testes de zeragem automática com diâmetro do rolo de fundo (D) 760 mm, e de controle automático com imersão lenta e rápida do lingote com as velocidades 0,64 mm/s e 1,05 mm/s. Em ambos os modos, a eficiência do sistema de controle foi verificada primeiramente analisando-se o tempo necessário para o processo estabilizar no novo valor de *setpoint*. Ainda, foi avaliado o erro gerado, conforme apresentado nas equações (6) e (7) tanto para o posicionamento linear e angular do *snout*.

$$Erro (Linear) = \|Hset - Hsensor\| \quad (6)$$

Onde: Hset = *setpoint* do posicionamento linear

Hsensor = posicionamento linear em mm

$$Erro (Angular) = \|CCset - CCsensor\| \quad (7)$$

Onde: CCset = *setpoint* do posicionamento angular

CCsensor = posicionamento angular em mm

Um índice de desempenho usado neste estudo foi o cálculo da integral do erro ao quadrado (ISE) e a integral do erro vezes o tempo (ITAE) conforme as equações (8) e (9).

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad (8)$$

$$ITAE = \int_0^t t |e(t)| dt \quad (9)$$

Também para análise dos resultados obtidos e a melhor faixa para controle do posicionamento angular e linear via modelamento matemático foi utilizado o aplicativo *Pertur* versão 3.2.1 com a ferramenta de coleta de dados do *software* P80C e o *software* Minitab v.15English visando a análise do índice capacidade (Cp, CpK, Pp e PpK). O *Pertur* monitora dados digitais e analógicos de entrada e saída de blocos de programação do *software* P80C efetuando registros de até 1ms.

3.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PEÇAS

O aspecto superficial esperado na condição ideal (cristais normais e minimizados) e a seção transversal esquemática do revestimento zincado estão mostrados, respectivamente, na Figura 18, no qual grande parte do revestimento é composto por zinco praticamente puro. Entre o substrato e o revestimento de zinco existe uma camada intermetálica contendo aproximadamente 6 % de ferro (TOWNSEND, 1993).

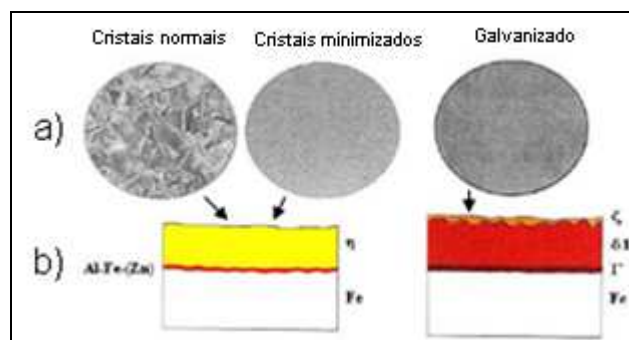
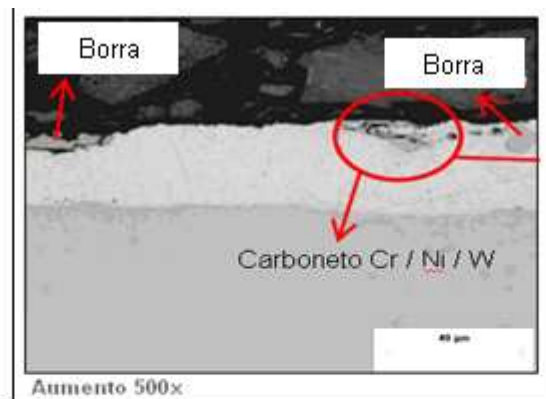


Figura 18 – a) aspecto superficial e b) seção transversal esquemática dos revestimentos zincados de cristais normais, minimizados e *galvanneal* (Fonte: ArcelorMittal Vega, 2010)

Neste trabalho, avaliaram-se os defeitos gerados pelos interferentes borra e grão de zinco, cuja presença nas peças contribui para a geração de refugos. Nas figuras 19 e 20 pode ser observada, respectivamente, a caracterização da peça quando ocorre a formação de borra e de grão de zinco no banho. Cabe ressaltar que o interferente borra pode ser identificado visualmente, ao contrário do grão de zinco que somente pode ser visualizado em laboratório. Quando ocorre a formação de borra geralmente tem-se associado o grão de zinco.

As causas de ocorrências destes interferentes mostrados são:

- a) Arraste de partículas da superfície do banho de zinco para o seu interior vindo a aderir na peça provocada pelo deslocamento da peça no banho;
- b) Alto teor de ferro no banho de zinco;
- c) Gradiente de temperatura do banho de zinco e a peça no momento da imersão;
- d) Desequilíbrio da concentração de alumínio no banho de zinco;
- e) Má regularem do nível do banho de zinco dentro do *snout*.



Resultado da análise de EDS sobre as partículas indicadas, (% em massa)								
Identificação	Al(%)	Fe(%)	Zn(%)	C(%)	Cr(%)	Ni(%)	Fe(%)	W(%)
Partículas de Borra	37,74	41,44	20,84	-	-	-	-	-
Carboneto	-	-	-	10,29	21,73	12,49	2,13	53,36

OBS: A análise de EDS - Aceleração: 15kV

Figura 19 – Microestrutura de aço galvanizado *hot-dip* com o banho contendo interferente Borra. (Fonte: ArcelorMittal Gent, 2012)

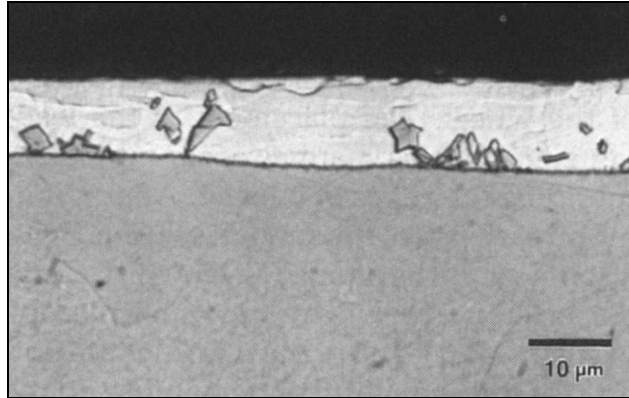


Figura 20 – Microestrutura de aço galvanizado *hot-dip* com o banho contendo 0,10 % Al-Zn. (Fonte: Marder, 2000)

3.4.1 Ocorrência dos refugos como avaliação da proposta de controle

A avaliação de desempenho do sistema de controle proposto foi realizada com base na geração de dados de ocorrência dos interferentes (Borra e Grão de Zinco). Para tanto, foi utilizado o equipamento de inspeção em linha de peça de aço galvanizada SIAS/VAE da Siemens que captura a imagem da peça por câmeras (Figura 21) e em um banco de dados de interferentes, o sistema compara qual tipo de interferente detectado e registra para checagem do operador de autocontrole (inspetor de qualidade do produto) e confecção do relatório de interferentes apontados no produto no período de funcionamento da linha de galvanização à quente.

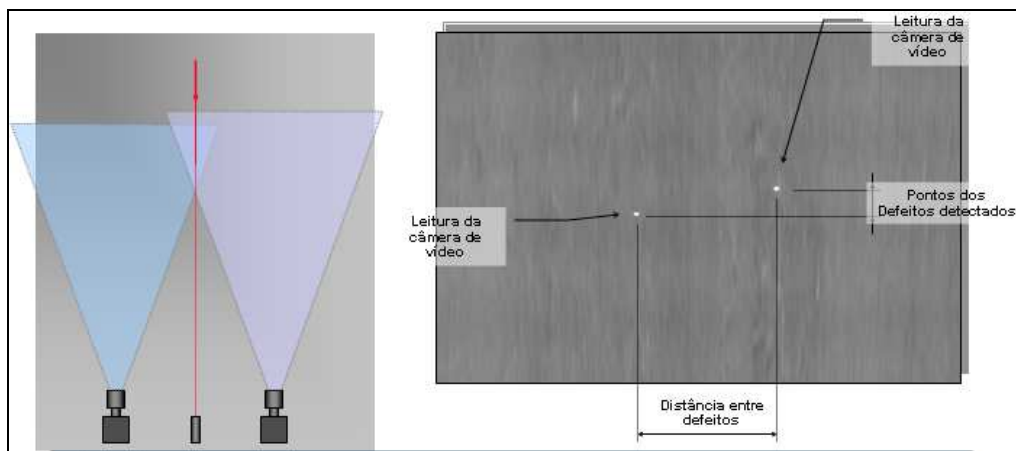


Figura 21 – Ilustração do equipamento SIAS VAE. (Fonte: Primária, 2011)

A primeira parte deste estudo consistiu na caracterização dos interferentes decorrentes do posicionamento incorreto do *snout*. Assim, para a caracterização dos interferentes PGZN (grão de zinco) e PBOR (borra) foram retiradas amostras de peças rejeitadas pela ação de cada interferente. Estas foram submetidas ao procedimento de preparação metalográfica padrão, que consiste em corte, embutimento em baquelite, lixamento e polimento na superfície. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca JEOL, modelo JSM 6360 e o espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da marca NORAN System, modelo SIX, versão 1.5. Na Figura 22 é apresentada uma ilustração de ambos os equipamentos.



Figura 22 – Ilustração dos equipamentos (a) foto MEV, (b) foto EDS.
(Fonte: Primária, 2011).

Os dados para avaliação foram levantados durante um ano e comparados com o mesmo período quando o controle era realizado de forma manual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELAGEM

O objetivo do desenvolvimento da modelagem matemática para a realização desta proposta foi a definição de novos valores de referência (*setpoint*) para o posicionamento do *snout*, necessários quando o nível do banho de zinco é alterado, ou outra variável é modificada, indicando que existirá a incidência dos interferentes já citados.

O *snout* assemelha-se a um pêndulo que rotaciona em torno de dois mancais deslizantes sustentados pela estrutura metálica do edifício. O equipamento realiza dois tipos de movimentação chamados de posicionamento linear e angular. O movimento de translação linear é caracterizado pelo avanço e recuo em uma direção radial à seção transversal retangular e o movimento de translação angular é caracterizado pelo avanço e recuo em uma direção angular em relação a peça de aço. Ambos são mostrados na Figura 23.

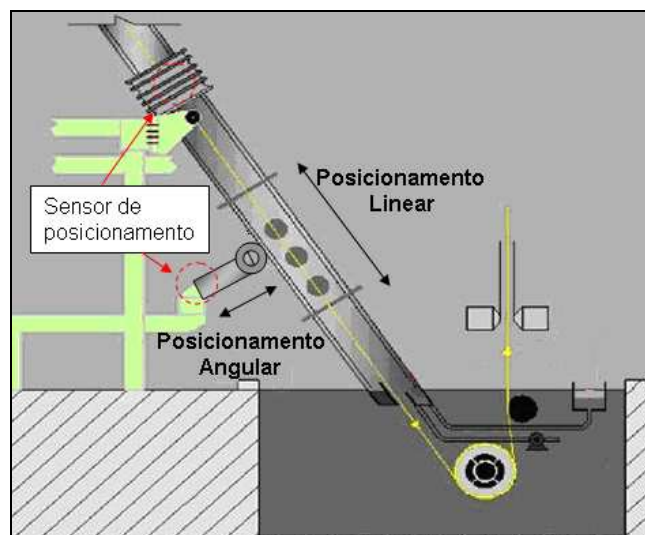


Figura 23 – Esquema de instalação dos sensores de posicionamento linear e angular no banho de zinco da linha de galvanização.
(Fonte: Primária, 2011).

Portanto, com esses dois movimentos é possível adequar a posição angular do *snout*, assim como a profundidade do mesmo em relação ao banho de zinco

quando ocorre uma ação necessária como após troca de rolo do banho (modo de zeragem automática) ou quando o nível do banho de zinco é alterado (modo automático).

4.1.1 Modelagem para zeragem automática

O modo de zeragem automática deve ser executado após troca de peça no banho (o que ocorre em média uma vez por mês). Neste caso, deve ser fornecido como dado de entrada o diâmetro do rolo de fundo (D) para com o auxílio do modelo, calcular o ângulo (β), o *snout* irá posicionar para posição zero (*home position*) que posteriormente retornará ao ponto de referência necessário para utilização no modo automático. A posição angular do *snout* está em função da posição angular da peça que por sua vez, está em função do diâmetro do rolo de fundo (D). O valor deste varia entre 760 mm e 800 mm e devido ao desgaste, o mesmo é trocado periodicamente, incorrendo no modo de zeragem automática.

Para encontrar o ângulo (β) da peça em função do rolo de fundo (D) conforme apresentado na Figura 24, foi utilizada a Equação 10. O diâmetro (D) do novo rolo fornecido pelo operador pode somente assumir valores dentro de uma faixa máxima (Dmax) e mínima (Dmin), cujos valores são fornecidos pelo fabricante. O ângulo mínimo (β_{min}) foi calculado em função do diâmetro mínimo (Dmin) permitido.

$$\beta = \left\{ \left[\frac{(D - D_{max})}{(D_{min} - D_{max})} \right] * (\beta_{min} - \beta_{max}) \right\} + \beta_{max} \quad (10)$$

Onde,

D	diâmetro do novo rolo
Dmax	diâmetro máximo permitido: 800 mm
Dmin	diâmetro mínimo permitido: 760 mm
β_{min}	ângulo mínimo permitido: 31,25 °
β_{max}	fator de correção do ângulo devido instalação dos sensores onde o valor máximo admitido é igual a 32,90 °
β	novo valor de ângulo

No *snout* o posicionamento linear movimenta no sentido avanço e recuo e o posicionamento angular movimenta no sentido ângulo maior e ângulo menor, conforme ilustrado na Figura 25a.

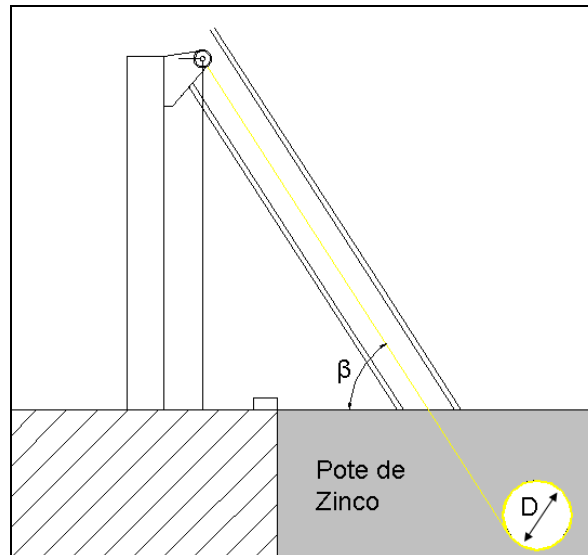


Figura 24 – Diagrama esquemático do ângulo da peça em relação do rolo de fundo do banho de zinco.

(Fonte: Primária, 2011).

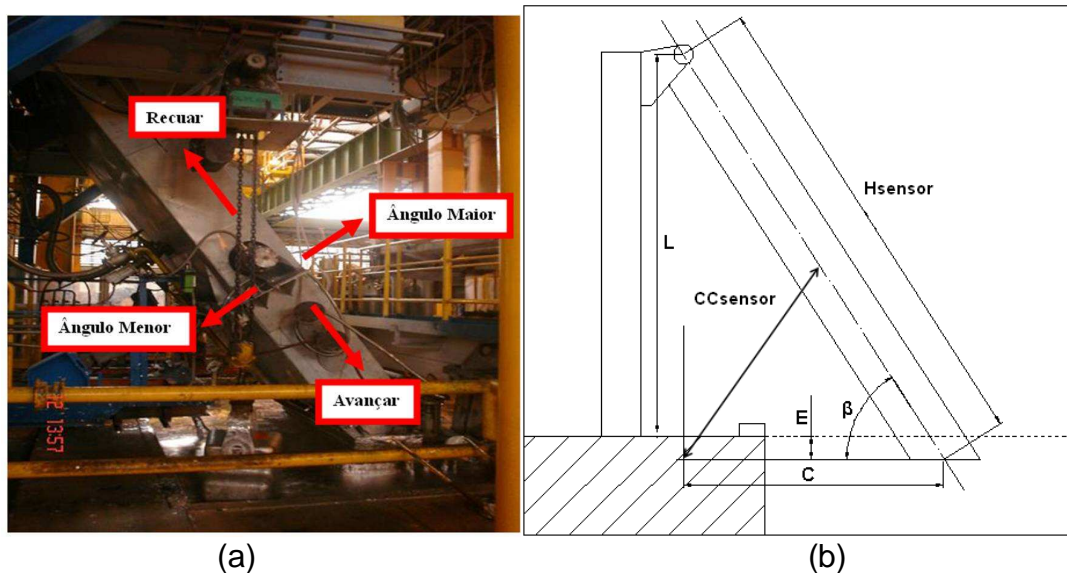


Figura 25 – Ilustração do posicionamento linear e angular do *snout* (a) foto esquemática, (b) variáveis do modelo matemático.

(Fonte: Primária, 2011).

Com o novo valor do ângulo (β) mostrado na Figura 25b, é calculado o *setpoint* do posicionamento linear (H_{set}) em função da altura do banho de zinco (L),

conforme Equação 11. Tendo o novo valor calculado do posicionamento linear (Hset) e sendo ligado via IHM o modo de zeragem automática, o equipamento se desloca para o novo valor de *setpoint*.

$$Hset = \frac{L}{\text{sen}\beta} \quad (11)$$

Onde,

Hset *setpoint* do posicionamento linear
 L Distância da superfície do banho de zinco até a articulação do *snout*
 sen β valor beta resultante em função do diâmetro do rolo de fundo

Durante o deslocamento do equipamento (Hsensor) para chegar no novo valor de *setpoint* do posicionamento linear (Hset), ocorre o movimento simultâneo do posicionamento angular em função do cálculo dinâmico da posição angular (CCset), para manter a posição da extremidade inferior do *snout* da peça em 1/3. Logo, se não tiver esta distância de segurança da parte inferior do *snout* com a peça durante o movimento linear, poderá ocorrer a colisão da parte inferior da estrutura do *snout* com a peça devido esta ser sempre fixa. Neste caso, primeiramente, se determina o comprimento angular (C) (Equação 12). Para então calcular o ângulo de posicionamento da peça de aço no *snout* (CCsensor) que é o valor de leitura da planta desejado (Equação 13).

$$C = \cos \beta(Hsensor) \quad (12)$$

Onde,

C comprimento angular
 cos β valor beta resultante em função do diâmetro do rolo de fundo
 Hsensor posicionamento linear em mm

$$CCsensor = \sqrt{(\text{tg}(\beta)*C)^2 + C^2} \quad (13)$$

Onde,

CCsensor	posicionamento angular em mm
β	novo valor de ângulo
C	comprimento angular

Após conversão do comprimento angular (C) para o posicionamento angular (CCsensor) é calculado o *setpoint* do posicionamento angular (CCset) em função da distância de segurança (ℓ) conforme Equação 14.

$$CCset = \left[\left(\int_{CC_{\min}}^{CC_{\max}} CCsensor \right) - (K + \ell) \right] \quad (14)$$

Onde,

CCset	<i>setpoint</i> do posicionamento angular
CCsensor	posicionamento angular em mm
K	constante 30 mm devido a questões físicas de instalação do equipamento
ℓ	18 mm (equivalente a 1/3 da distância da peça a extremidade inferior do <i>snout</i>)

Conforme já abordado, a zeragem automática é um recurso que ao ser acionado, posiciona o *snout* automaticamente em função do nível do banho de zinco, do diâmetro do rolo de fundo e também da distância horizontal da peça. Ocorre somente em ocasiões de partida do processo, quando existe a necessidade de troca do rolo de fundo. Em função das equações anteriormente descritas e de valores de variáveis obtidas da planta, as referências de um modo de zeragem automática realizado no comissionamento da implantação do modelo matemático são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Exemplo de valores de referência (setpoint) calculados apartir dos dados do processo para o modo de controle denominado zeragem automática.

Nome da variável	Unidade aplicada	Sigla	Valor de Referência
Diâmetro do rolo de fundo	Mm	D	760
Beta	°	β	31,45
Distância da superfície do banho de zinco até a articulação do snout	Mm	L	254,8
<i>Setpoint</i> em função da altura do banho	Mm	Hset	490
<i>Setpoint</i> em função de Hsensor alterado	Mm	CCset	55,79

4.1.2 Modelagem para modo automático

No modo de controle automático, o sistema executa a compensação de avanço e recuo do cilindro para a centralização da posição angular do *snout* em função do posicionamento da peça também conforme as equações citadas anteriormente. No entanto, este modo é acionado quando o nível do banho de zinco é alterado (variável perturbação no processo).

Para este processo, considerou-se que durante o processamento normal de imersão da peça no banho, as variáveis de entrada citadas anteriormente (Figura 24b), se alteram durante a troca do banho de zinco e também nos casos específicos, como a ondulação da peça ou falha no sistema de controle do nível de zinco.

Como o posicionamento da peça forma um triângulo retângulo (Figura 24b), as correções foram calculadas a partir dos catetos quando a distância medida entre a saída do forno (articulação do *snout*) e a altura do banho de zinco (L), onde podem ser observados modificações. Primeiramente, calcula-se o valor da compensação linear (Hset) em função do ângulo (β) através da equação 15. Este valor deve atender o ângulo β pré-definido de forma que parte do *snout* fique sempre imersa no banho de zinco, garantindo a distância (E) que é a distância de trabalho, valor constante durante o processamento do material, onde a parte inferior do *snout* fica mergulhado no banho de zinco.

$$H_{set} = \frac{(L + E)}{\text{sen}\beta} \quad (15)$$

Onde,

Hset	<i>setpoint</i> do posicionamento linear
L	Distância da superfície do banho de zinco até a articulação do <i>snout</i>
E	distância de trabalho (constante)
senβ	valor beta resultante em função do diâmetro do rolo de fundo

Para o posicionamento angular, o modelo utiliza as Equações 12, 13 e 14 do modo de zeragem automática.

4.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

4.2.1 Ajuste dos controladores On/Off

Anteriormente à implementação no processo de galvanização do modelo matemático e o sistema de controle proposto, testes foram realizados de forma simulada visando a sintonia dos controladores. Para tanto, primeiramente o sistema foi testado sem nenhum ajuste na faixa de operação do controlador.

Observou-se que para o posicionamento linear sem a definição da amplitude no controlador, o equipamento deslocava-se para o *setpoint* (definido em 57 mm para estes estudos) em um tempo de subida próximo de 8 segundos (necessário para alcançar a referência pela primeira vez). Neste momento, o controlador retirava o comando, mas devido à inércia (média de 0,8 mm) do equipamento, observou-se a ocorrência de uma oscilação indesejada no sentido avanço e reverso desviando-se da amplitude inicialmente definido, conforme apresentado na Figura 26.

Neste sentido, após testes com diferentes ajustes (32, 45 e 57 mm) foi utilizado a amplitude de 1 mm para os dois sentidos de movimento (avanço e reverso). Com isso, quando o equipamento alcançava o valor de *setpoint*, o controlador retirava o

comando e pela inércia o equipamento ficava em torno do valor proposto, conforme apresentado na Figura 27.

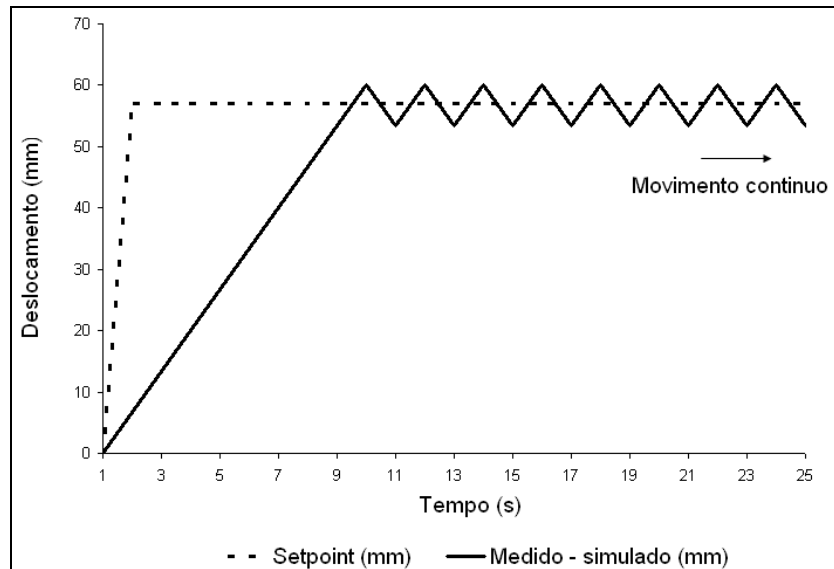


Figura 26 – Perfil de deslocamento linear do *snout* sem definição da amplitude no controlador liga-desliga .
(Fonte: Primária, 2011).

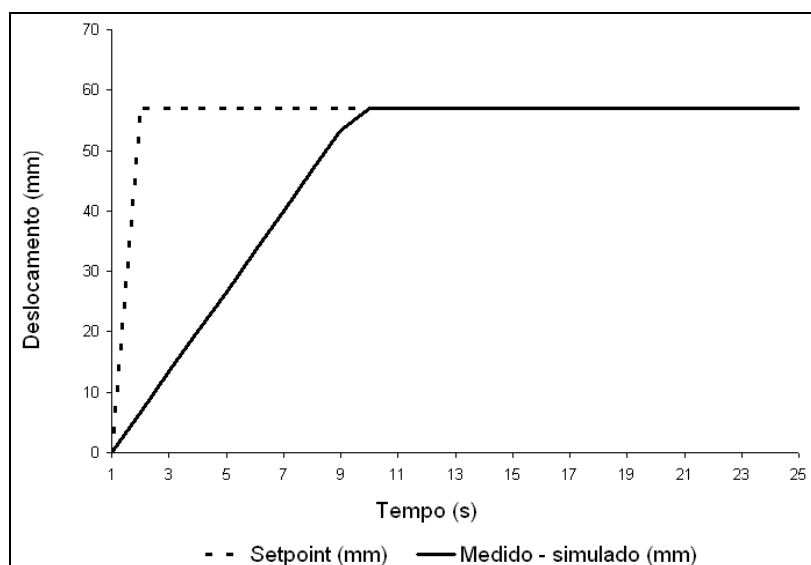


Figura 27 – Perfil de deslocamento linear do *snout* com definição da amplitude de 1 mm no controlador liga-desliga .
(Fonte: Primária, 2011).

Para o posicionamento angular em função do *setpoint* sem a definição da amplitude no controlador, o equipamento deslocava-se para o *setpoint* (25 mm) em um tempo de subida próximo de 25 segundos. Assim como ocorrido para o

posicionamento linear, o controlador retirava o comando, mas devido à inércia (média de 0,2 mm) do equipamento, observava-se uma oscilação maior do que a amplitude definida no sentido avanço e reverso, conforme ilustrado na Figura 28.

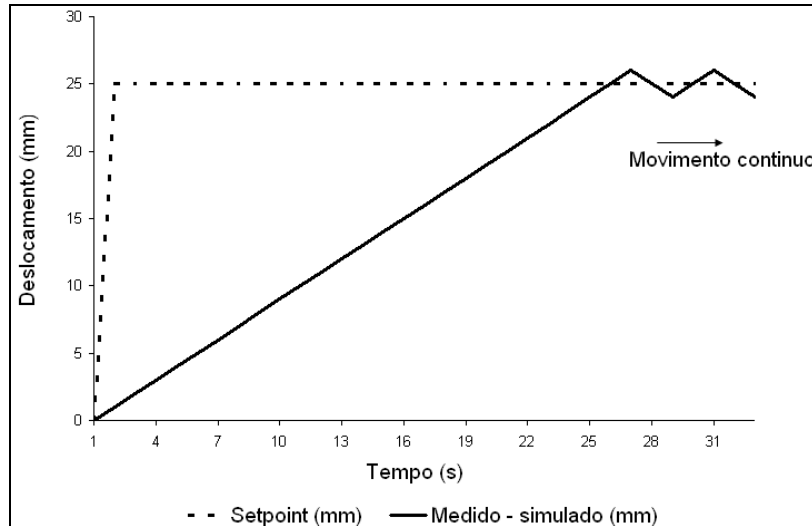


Figura 28 – Perfil de deslocamento angular do *snout* sem definição da amplitude no controlador liga-desliga .
(Fonte: Primária, 2011).

Neste sentido, foi utilizado a faixa de ajuste de 0,5 mm para os dois sentidos de movimento (avanço e reverso), e com este valor observou-se que quando o equipamento chegava no valor de *setpoint*, o controlador retirava o comando e pela inércia o equipamento ficava em torno do valor proposto (Figura 29).

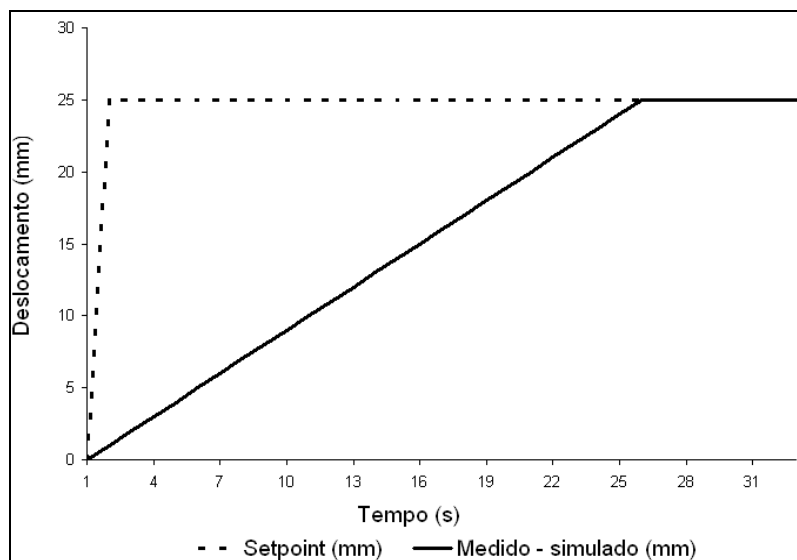


Figura 29 – Perfil de deslocamento angular do *snout* com definição da amplitude de 0,5 mm no controlador liga-desliga .
(Fonte: Primária, 2011).

Uma das desvantagens do controle (liga-desliga) consiste no fato deste não garantir precisão, apenas uma proximidade do valor do processo ao valor de referência, o que pode causar desgaste do atuador, devido aos acionamentos frequentes. No entanto, com as definições da amplitude geradas neste trabalho, o deslocamento mínimo dos motores utilizados como atuadores está acima da amplitude definido, permitindo que não ocorra o desgaste excessivo dos mesmos.

4.2.2 Supervisório – Interface homem-máquina

Para implantação do sistema de controle deste trabalho, foi desenvolvida uma interface homem-máquina (IHM) para acionamento via operador nos seguintes modos:

- a) Modo manual: possibilita o operador efetuar acionamentos dos movimentos angular e linear do *snout*.
- b) Modo controle automático: possibilita correções dos movimentos angular e linear do *snout* quando a variável perturbação (nível do banho de zinco no banho) for alterada.
- c) Modo zeragem automática: possibilita o posicionamento angular e linear do *snout* para posição de funcionamento normal inserindo o diâmetro do rolo de fundo (D), sempre após efetuar a troca de peça e ou troca do banho de zinco.

Uma ilustração da tela desde sistema é apresentada na Figura 30.

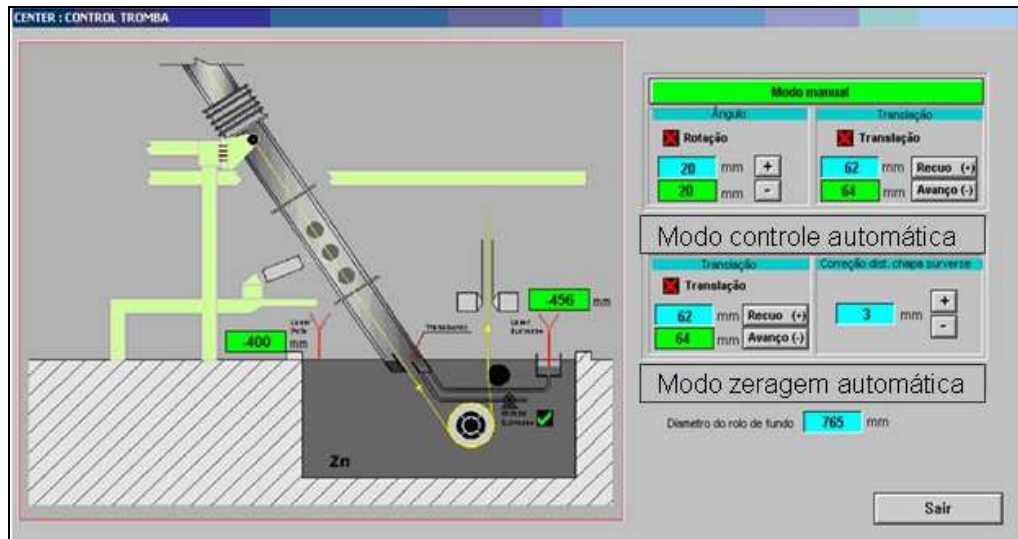


Figura 30 – Ilustração da tela de operação do sistema supervisor desenvolvido para ajuste do *snout* (Fonte: Primária, 2011).

Foram definidos os intertravamentos dos movimentos angular e linear para evitar colisão da peça de aço com a estrutura do *snout* em função das restrições físicas do processo (parte inferior consiste em uma abertura de 54 mm para passagem da peça com espessura máxima de 2 mm). Também foi desenvolvido o intertravamento na sequência de funcionamento de zeragem automática e controle automático para não permissão de dois ou mais acionamentos sequenciais simultâneos via IHM.

Por fim, foram definidos alarmes que são visualizados no IHM para falhas: nos *encoders* incrementais dos posicionamentos angular e linear, desarme dos motores elétricos dos posicionamentos linear e angular, perda de sinal do sensor de nível do banho de zinco.

4.3 TESTES COM O SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

A partir da análise do comportamento do equipamento e do modelo matemático proposto, implementou-se dois modos de controle no controlador lógico programável, conforme mostrado na Figura 31, zeragem automática de posicionamento após troca dos componentes do banho de zinco e controle automático em linha.

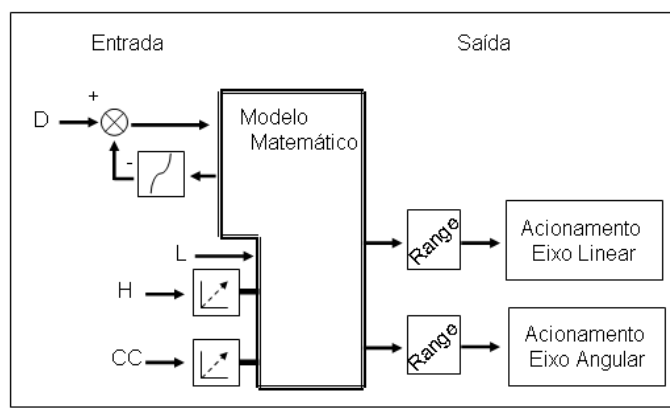


Figura 31 – Representação do diagrama de bloco do controle de posicionamento do *snout*. (Fonte: Primária, 2011).

4.3.1 Testes de controle realizados com o modo de zeragem automática

O desempenho do controlador para o modo de zeragem automática foi avaliado considerando-se a troca de rolo de fundo do banho de zinco. Após inserido o novo diâmetro do rolo de fundo ($D = 760$ mm) foi acionado o modo de zeragem automática via IHM. Usando o modelo calculou o novo valor de *setpoint* para o posicionamento linear que foi enviado para o controlador efetuar o deslocamento linear do *snout*. Este valor foi de 266,50 mm.

Na Figura 32 é mostrado o perfil do deslocamento linear medido do equipamento e o valor de referência em relação ao tempo. Observa-se que o processo alcança o valor de referência pela primeira vez próximo de 54 segundos e estabiliza a leitura de posicionamento real ($H_{\text{sensor}} = 267,43$ mm) próximo de 72 segundos (tempo de estabilização). Este valor, mesmo que superior ao valor de

referência estabelecido está dentro da amplitude definido visto que a faixa de trabalho do controlador foi configurada para ± 1 mm em relação ao valor de *setpoint*.

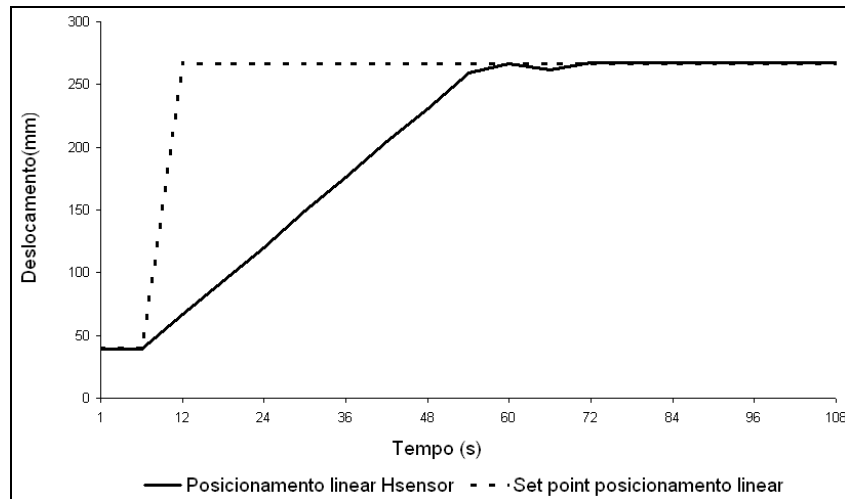


Figura 32 – Perfil do deslocamento linear (Hsensor) em relação ao *setpoint* para o teste de zeragem automática.

(Fonte: Primária, 2011).

Cabe salientar que o deslocamento linear foi de 4,62 mm/s, enquanto que o valor simulado (Figura 27) foi de 6,67 mm/s, sendo o deslocamento real mais lento do que o simulado que foi a base de cálculo utilizando dados da especificação do equipamento fornecido pelo fabricante, devido ao peso da estrutura e densidade do banho de zinco.

Na Figura 33 é mostrada a curva do erro (*Setpoint* – Hsensor) que por analogia representa o tempo fora das condições ideais. O valor máximo foi encontrado no tempo de 12 segundos foi de 199,05 mm e ao chegar próximo dos 72 segundos foi de (-) 0,93 mm. A partir deste momento o erro (desvio em relação ao *setpoint*) sempre se manteve inferior ao valor de 1 mm, definido para o controle cujo o acionamento de partida direta *on/off* não possibilita a redução do erro encontrado, devido os motores dos deslocamentos linear e angular serem de partida direta sem controle de velocidade.

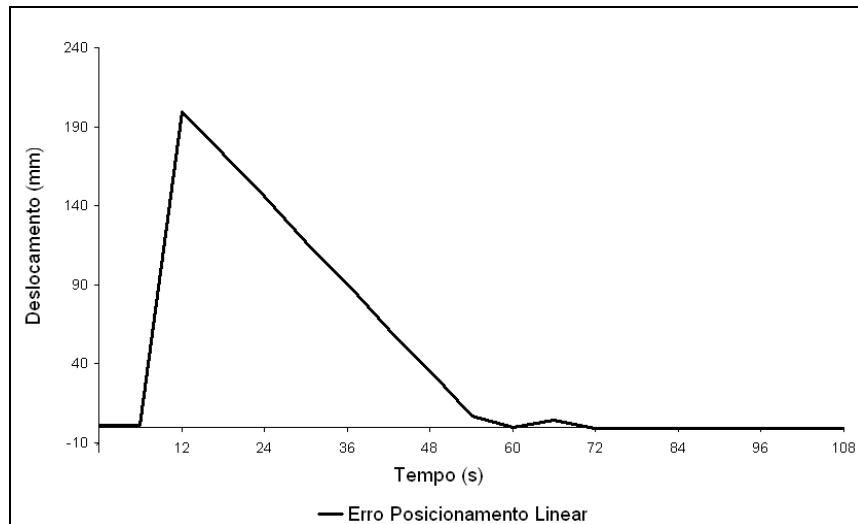


Figura 33 – Perfil do erro gerado no posicionamento linear para o teste de zeragem automática. (Fonte: Primária, 2011).

No instante que se inicia o deslocamento linear do *snout*, o modelo calcula dinamicamente o *setpoint* para o posicionamento angular. Na Figura 34 é mostrado o deslocamento angular do equipamento buscando o novo *setpoint* (neste caso 0,00 mm). A posição inicial angular era em torno de 22 mm e o novo valor de referência foi alcançado pela primeira vez no tempo indicado de 30 segundos e vindo a estabilizar a leitura de posicionamento real (CCsensor = (-) 0,07 mm) próximo de 66 segundos. A faixa de trabalho do controlador foi configurada para $\pm 0,50$ mm do valor de *setpoint*.

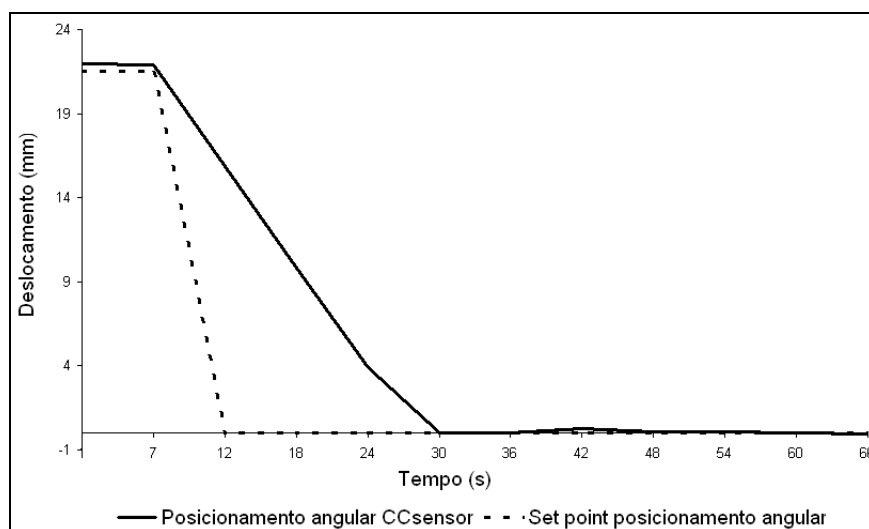


Figura 34 – Perfil do deslocamento angular (CCsensor) em relação ao *setpoint* para o teste de zeragem automática. (Fonte: Primária, 2011).

Na Figura 35 é mostrada a curva do erro (*Setpoint* – CCsensor) que no tempo de 12 segundos apresentou o valor máximo de (-) 15,87 mm e ao chegar próximo dos 66 segundos foi de 0,07 mm. A partir deste momento, o desvio em relação ao valor de referência sempre se apresentou abaixo da amplitude definido para o controle.

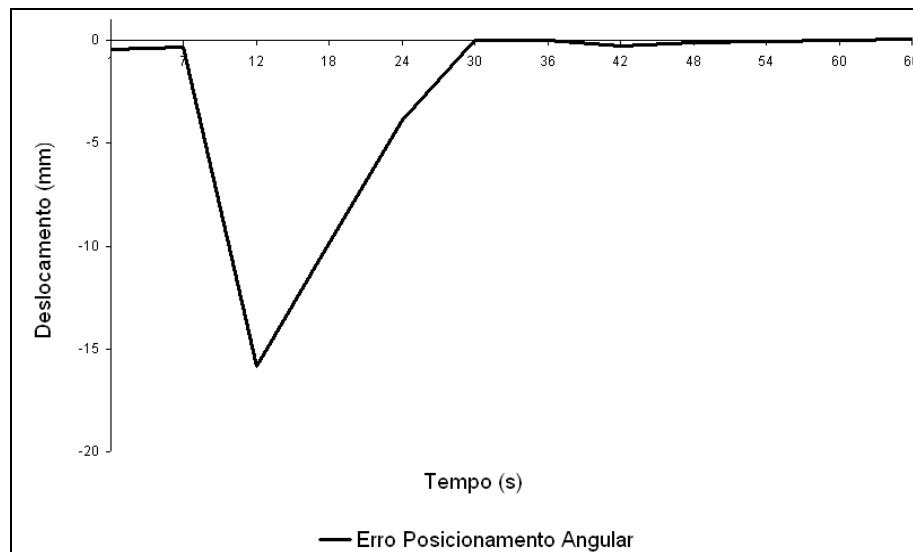


Figura 35 – Perfil do erro gerado no posicionamento angular para o teste de zeragem automática. (Fonte: Primária, 2011).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados, de forma resumida, para o tempo de subida, estabilização, atraso, e índices de desempenho para os ajustes de posicionamento linear e angular para o modo de zeragem automática. Ressalta-se que os valores de tempo estão indicados considerando que o cálculo do novo valor de *setpoint* foi realizado no tempo de 6 segundos indicados nos gráficos anteriormente apresentados.

Tabela 3: Valores de desempenho no regime transitório e calculo dos índices ISE e ITAE para o teste de zeragem automática.

Variável	Sigla	Unidade	Valor
Posicionamento Linear			
Máximo sobrepasso (overshoot) posicionamento linear		%	100,35
Tempo de subida posicionamento linear		s	48,00
Tempo de estabilização posicionamento linear		s	66,00
Integral do erro ao quadrado posicionamento linear	ISE		44908,78
Integral do erro vezes o tempo posicionamento linear	ITAE		5063,61
Posicionamento Angular			
Máximo sobrepasso (overshoot) posicionamento angular		%	101,95
Tempo de subida posicionamento angular		s	24,00
Tempo de estabilização posicionamento angular		s	60,00
Integral do erro ao quadrado posicionamento angular	ISE		327,99
Integral do erro vezes o tempo posicionamento angular	ITAE		185,58

Para o modo de zeragem automática do *snout*, observou-se que o tempo necessário para o posicionamento do equipamento é limitado pelo controlador do posicionamento linear que demorou cerca de 6 segundos a mais para estabilizar (66 frente aos 60 segundos com o posicionamento angular). De fato, observa-se que todos índices ISE e ITAE apresentados na Tabela 3 são melhores para o posicionamento angular.

É importante ressaltar que anteriormente, para tal zeragem do *snout* em modo manual era requerido um tempo próximo de 5 minutos com o processo parado. Assim, a implementação do controle permitiu uma redução de aproximadamente 3 minutos e 48 segundos, que são posteriormente refletidos no acréscimo da produção de 4,40 toneladas por *setup* de zeragem aplicado no equipamento.

4.3.2 Testes de controle para modo automático

No modo de controle automático do posicionamento linear e angular do *snout*, a variável perturbada é a altura em relação a articulação do *snout* (L) que ao ser alterada devido a necessidade de reposição de zinco no banho, impõe a necessidade de cálculo de novos valores de *setpoint* por parte do modelo. Para verificar a eficiência do controlador foram executados testes com dois modos de inserção do lingote de zinco: lenta (3,84 mm/s) e rápida (38,40 mm/s).

4.3.2.1 Teste de imersão lenta do lingote

Na Figura 36 é mostrada a inserção lenta do lingote de zinco e sua influência na distância da superfície do banho de zinco com a articulação do *snout*. Esta inserção foi realizada no tempo de 7 segundos com velocidade de 3,84 mm/s e então foram calculados novos posicionamentos do equipamento.

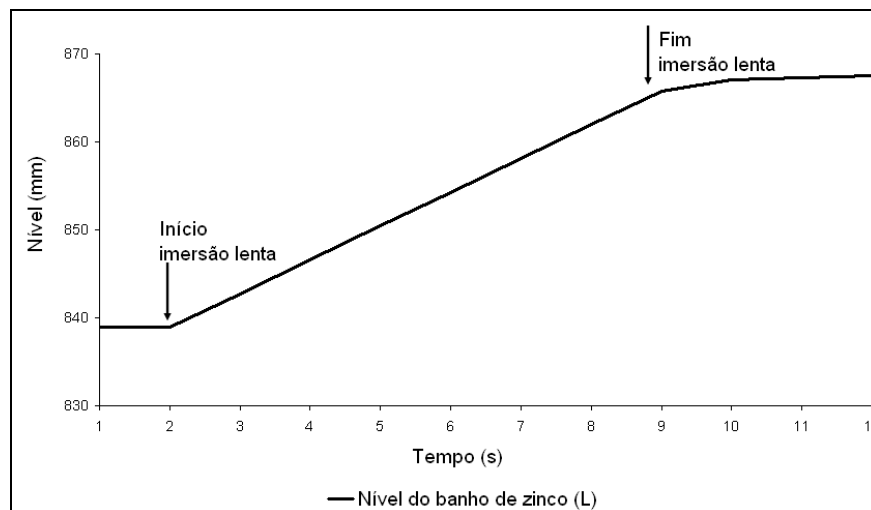


Figura 36 – Perfil da altura do banho de zinco (L) medida no processo de imersão lenta. (Fonte: Primária, 2011).

Com o início da alteração na altura do banho de zinco (variável perturbada) no tempo indicado de 2 segundos, um novo valor de *setpoint* é calculado. Porém, ressalta-se que o modelo matemático foi configurado com um atraso de 5 segundos para envio do novo valor calculado ao controle do movimento linear. Esta definição se fez necessária em virtude da histerese do nível do banho de zinco devido a retirada e inserção de lingotes para manter a qualidade do banho dentro dos parâmetros operacionais. O novo valor de *setpoint* do posicionamento linear foi recalculado para 44,45 mm. Na Figura 37 é mostrado o perfil do deslocamento linear do equipamento ao longo do tempo, a partir do tempo em que a imersão do lingote começou a ser realizada.

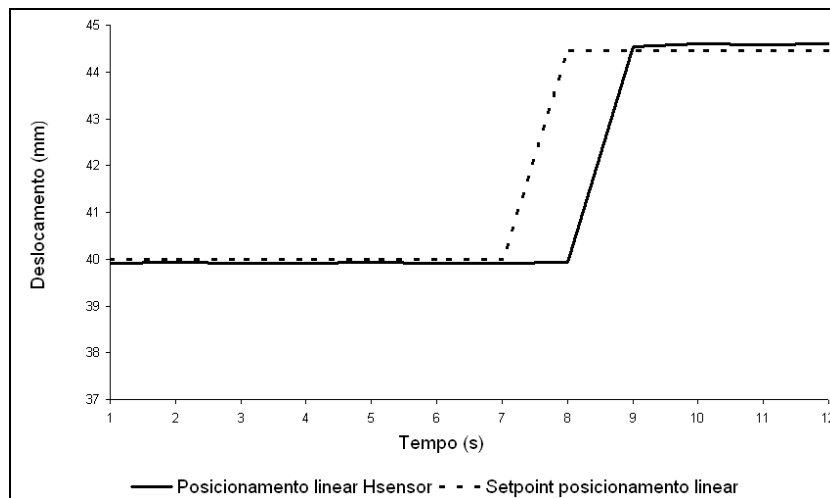


Figura 37 – Perfil do deslocamento linear (Hsensor) em relação ao *setpoint* para o teste de imersão lenta.
(Fonte: Primária, 2011).

Observa-se que a mudança do posicionamento linear Hsensor ocorre no tempo de 8 segundos, com apenas um segundo de atraso após o envio do novo valor de *setpoint* calculado pelo modelo matemático, sendo posicionado o equipamento no valor desejado em 9 segundos. Ou seja, foi necessário apenas 1 segundo para a realização do novo ajuste. O atraso observado é devido a configuração do controlador que foi programado para tal devido melhor ajuste do equipamento no comissionamento com o processo em funcionamento contínuo.

Quando se observa o perfil do erro em relação ao tempo ilustrado na Figura 38, onde a curva do erro (*Setpoint* – Hsensor) que no tempo de 8 segundos foi de 4,51 mm e ao chegar próximo dos 12 segundos foi de (-) 0,16 mm, verifica-se que o sistema apresentava oscilações anteriores ao momento da mudança de *setpoint*. Este comportamento é explicado pela oscilação no nível do banho, conforme visualizado na Figura 36. Ainda, o erro apresentado após o tempo de estabilização está dentro da faixa de ajuste do controlador, indicando que o sistema de controle apresenta bom desempenho.

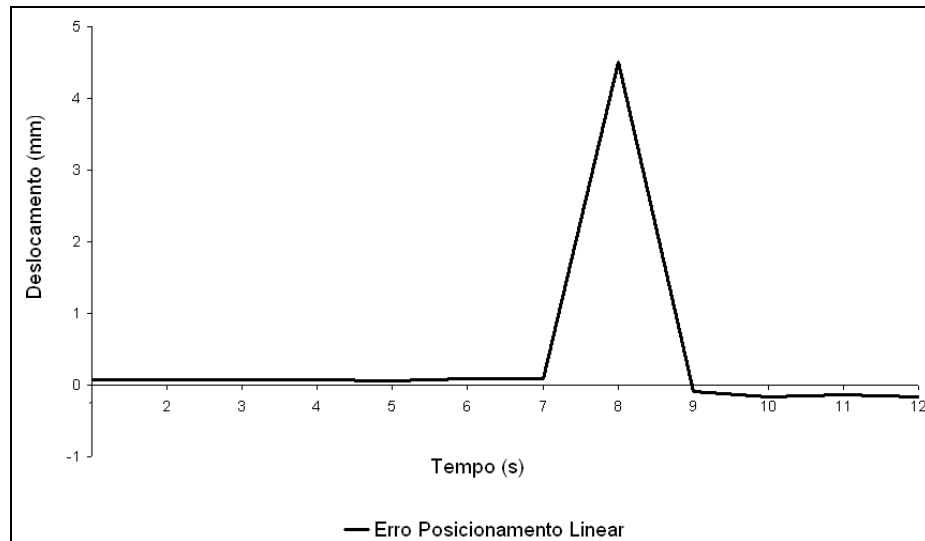


Figura 38 – Perfil do erro gerado no posicionamento linear para o teste de imersão lenta. (Fonte: Primária, 2011).

Com a alteração ocorrida no posicionamento linear (Figura 36), foi calculado o novo valor de referência (*setpoint*) para o posicionamento angular que foi de 22,50 mm para o momento de 8 segundos, mostrado na Figura 39.

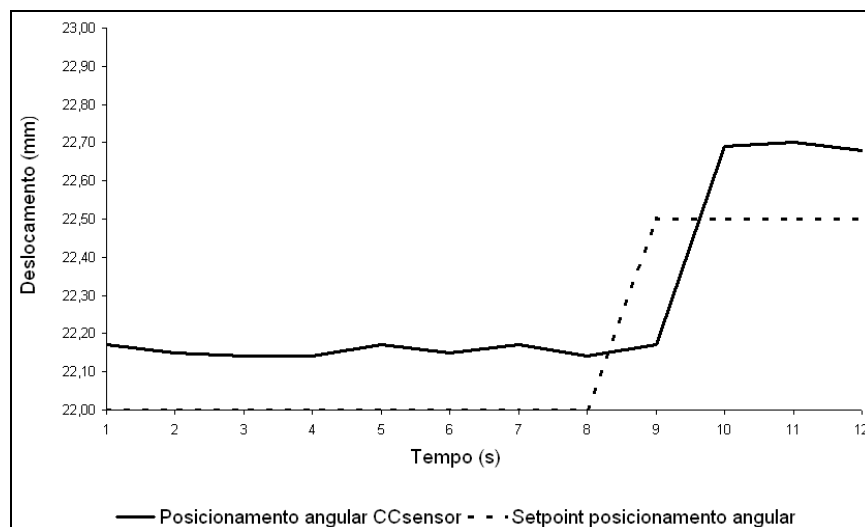


Figura 39 – Perfil do deslocamento angular (CCsensor) em relação ao *setpoint* para o teste de imersão lenta. (Fonte: Primária, 2011).

Observa-se que a mudança de referência ocorre no tempo de 9 segundos, também com apenas um segundo de atraso, sendo alcançada pelo valor medido pela primeira vez em 10 segundos.

Da mesma maneira que ocorrido no posicionamento linear, quando se observa o perfil do erro em relação ao tempo ilustrado na Figura 40, onde é mostrada a curva do erro (*Setpoint* – CCsensor), verifica-se que no tempo de 9

segundos o erro foi de 0,33 mm e ao chegar próximo dos 12 segundos foi de (-) 0,18 mm. Também visualiza que o sistema apresentava oscilações anteriores no momento da mudança de *setpoint*. Este comportamento é explicado pela própria oscilação do posicionamento linear, conforme já apresentado na Figura 37. Ainda, o erro apresentado está dentro da faixa de ajuste do controlador, indicando que o sistema de controle apresenta bom desempenho.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados, de forma resumida, para o tempo de subida, estabilização, atraso, e índices de desempenho para os ajustes de posicionamento linear e angular para o teste de imersão lenta.

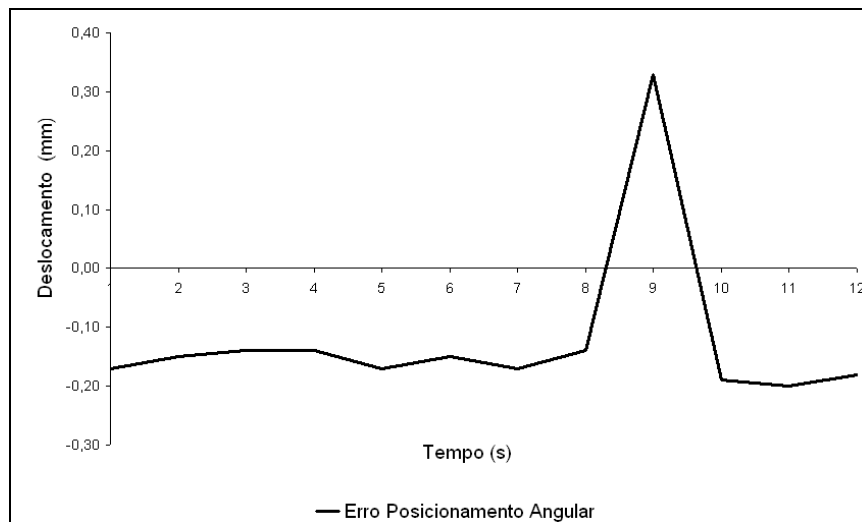


Figura 40 – Perfil do erro gerado no posicionamento angular para o teste de imersão lenta. (Fonte: Primária, 2011).

Tabela 4: Valores de desempenho no regime transitório e calculo dos índices ISE e ITAE – Imersão lenta.

Variável	Sigla	Unidade	Valor
Posicionamento Linear			
Máximo sobrepasso (overshoot) posicionamento linear		%	100,36
Tempo de subida posicionamento linear		s	1,00
Tempo de estabilização posicionamento linear		s	2,00
Integral do erro ao quadrado posicionamento linear	ISE		40,70
Integral do erro vezes o tempo posicionamento linear	ITAE		5,61
Posicionamento Angular			
Máximo sobrepasso (overshoot) posicionamento angular		%	100,89
Tempo de subida posicionamento angular		s	1,00
Tempo de estabilização posicionamento angular		s	1,00
Integral do erro ao quadrado posicionamento angular	ISE		0,49
Integral do erro vezes o tempo posicionamento angular	ITAE		2,13

Também para o modo de controle automático do *snout* com imersão lenta do lingote de zinco, observou-se que o tempo necessário para o posicionamento do equipamento é limitado pelo controlador do posicionamento linear. De fato, observa-se que os índices ISE e ITAE apresentados na Tabela 4 são melhores para o posicionamento angular.

É importante ressaltar que anteriormente, para tal controle do *snout* em modo manual era requerido um ajuste tendo com base a visualização da câmera de vídeo localizada no interior do equipamento.

4.3.2.2 Teste de imersão rápida do lingote

Na Figura 41 é mostrado o efeito na distância do nível do banho à articulação do *snout* em função da inserção rápida do lingote de zinco (2 segundos) na velocidade de 38,40 mm/s, em que foram calculados novos posicionamentos do equipamento.

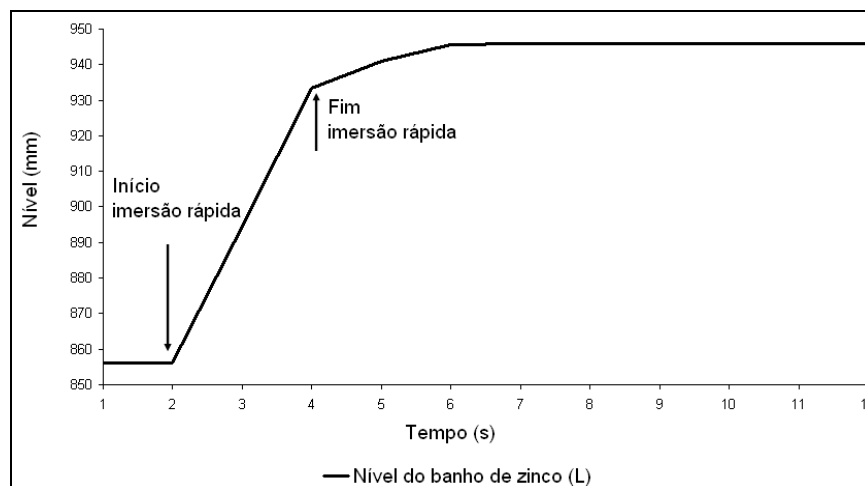


Figura 41 – Perfil da altura do banho de zinco (L) medida no processo de imersão rápida. (Fonte: Primária, 2011).

Com estas alterações a altura do banho de zinco, o valor de *setpoint* do posicionamento linear foi recalculado para 55,10 mm. Na Figura 42 é mostrado o perfil do deslocamento linear do equipamento ao longo do tempo, considerando desde a imersão do lingote.

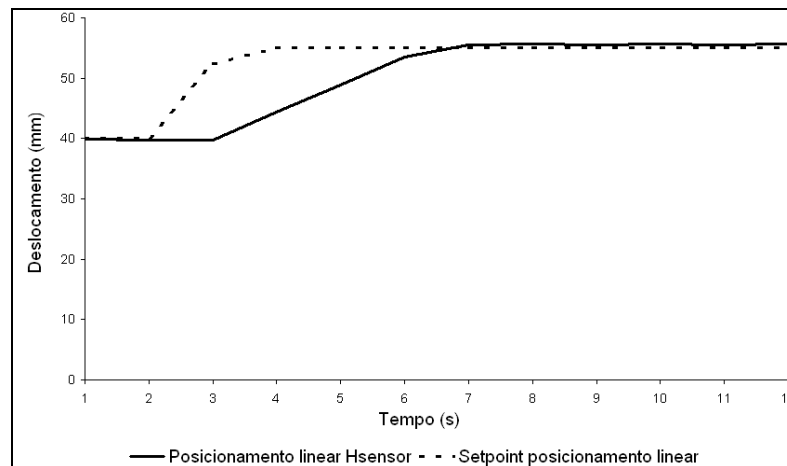


Figura 42 – Perfil do deslocamento linear (Hsensor) em relação ao *setpoint* para o teste de imersão rápida.
(Fonte: Primária, 2011).

Observa-se que a mudança de referência inicia-se no tempo de 3 segundos, com um segundo de atraso, sendo alcançada a estabilização em 7 segundos. Ou seja, foram necessários apenas 4 segundos para a realização do novo ajuste. O atraso observado é devido a configuração do controlador que foi programado para tal devido melhor ajuste do equipamento no comissionamento com o processo em funcionamento contínuo.

Quando se observa o perfil do erro em relação ao tempo, ilustrado na Figura 43, visualiza-se que no tempo de 3 segundos o erro apresenta seu valor máximo em 12,63 mm e ao chegar próximo dos 12 segundos é de (-) 0,52 mm. Observa-se que o sistema apresentava oscilações anteriores ao momento da mudança de *setpoint*. Este comportamento é explicado pela oscilação no nível do banho, conforme visualizado na Figura 40. Ainda, o erro apresentado está dentro da faixa de ajuste do controlador, indicando que o sistema de controle apresenta bom desempenho.

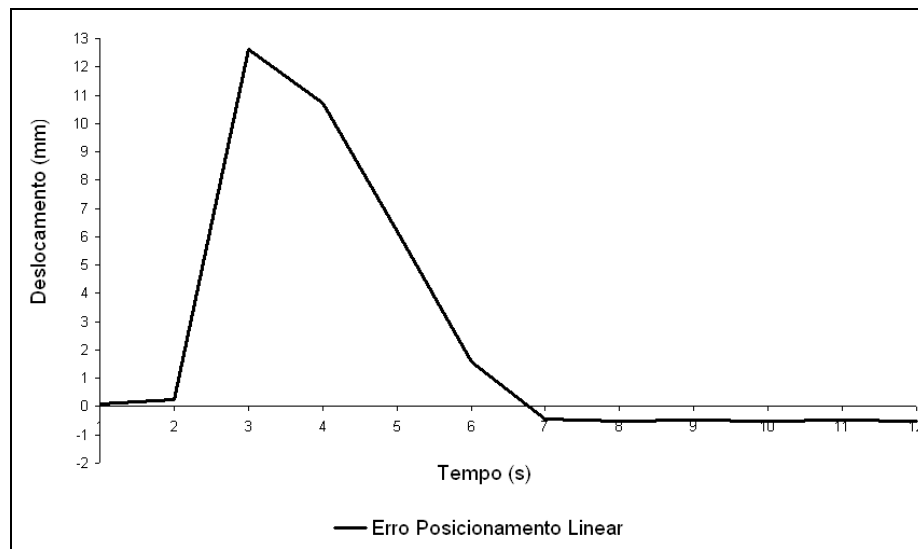


Figura 43 – Perfil do erro gerado no posicionamento linear para o teste de imersão rápida. (Fonte: Primária, 2011).

Com a alteração ocorrida no posicionamento linear (Figura 42), foi calculado o novo valor de referência (*setpoint*) para o posicionamento angular de 25,54 mm no momento de 5 segundos, conforme mostrado na Figura 44.

Observa-se que a mudança de referência inicia-se no tempo de 4 segundos, com apenas um segundo de atraso, sendo alcançada pelo valor medido em 8 segundos. Ou seja, neste caso também foram necessários apenas 4 segundos para a realização do novo ajuste.

Quando se observa o perfil do erro em relação ao tempo, ilustrado na Figura 45, percebe-se que no tempo de 5 segundos o valor do erro foi de 2,34 mm e ao chegar próximo dos 12 segundos foi de (-) 0,39 mm. Também para o posicionamento angular verifica-se que o sistema apresentava oscilações anteriores ao momento da mudança de *setpoint*. Este comportamento é explicado pela oscilação no posicionamento linear, conforme visualizado na Figura 42. Ainda, o erro apresentado está dentro da faixa de ajuste do controlador, indicando que o sistema de controle apresenta bom desempenho.

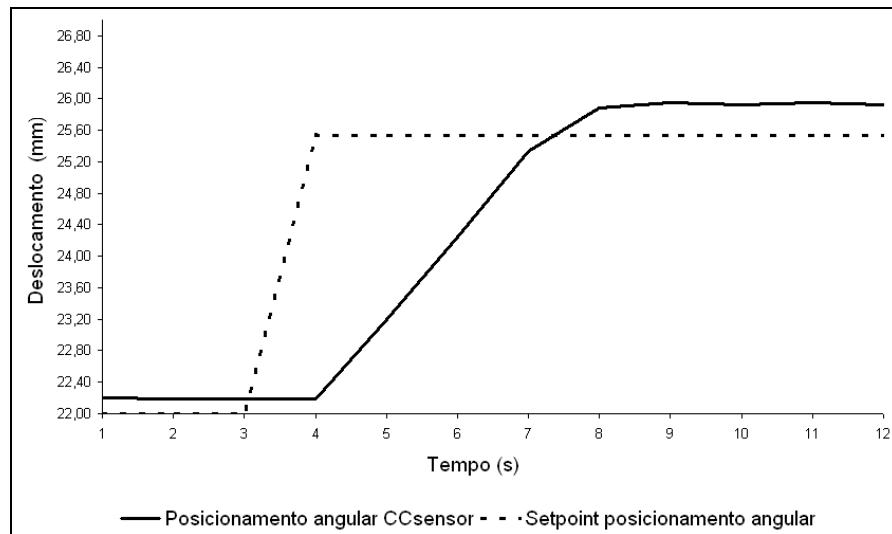


Figura 44 – Perfil do deslocamento angular (CCsensor) em relação ao *setpoint* para o teste de imersão rápida.
(Fonte: Primária, 2011).

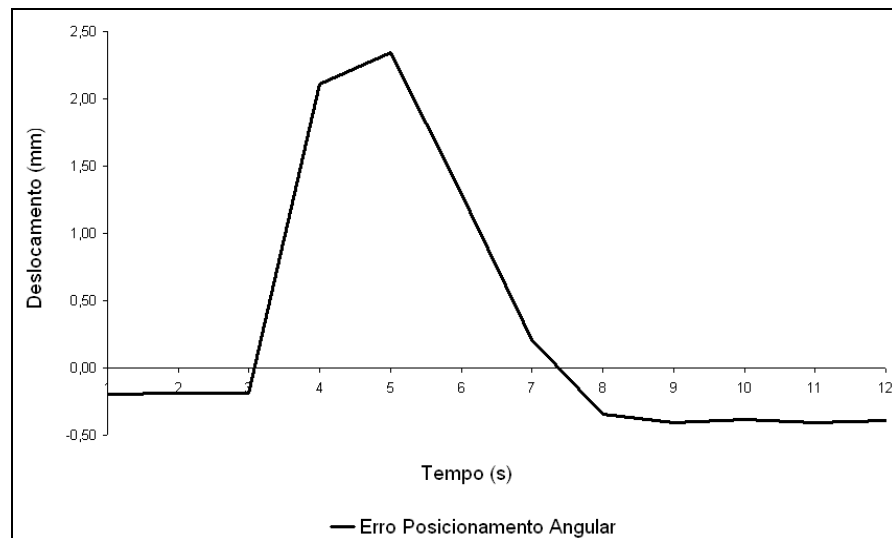


Figura 45 – Perfil do erro gerado no posicionamento angular para o teste de imersão rápida.
(Fonte: Primária, 2011).

A análise dos resultados apresentados para o modo de controle automático do *snout* demonstrou bons ajustes, assim como observado para o caso de zeragem automática.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados, de forma resumida, para o tempo de subida, estabilização, atraso, e índices de desempenho para os ajustes de posicionamento linear e angular para o teste de imersão rápida.

Tabela 5: Valores de desempenho no regime transitório e calculo dos índices ISE e ITAE – Imersão rápida.

Variável	Sigla	Unidade	Valor
Posicionamento Linear			
Máximo sobrepasso (overshoot) posicionamento linear		%	100,94
Tempo de subida posicionamento linear		S	3,50
Tempo de estabilização posicionamento linear		S	4,00
Integral do erro ao quadrado posicionamento linear	ISE		203,31
Integral do erro vezes o tempo posicionamento linear	ITAE		34,39
Posicionamento Angular			
Máximo sobrepasso (overshoot) posicionamento angular		%	101,61
Tempo de subida posicionamento angular		S	3,50
Tempo de estabilização posicionamento angular		S	4,00
Integral do erro ao quadrado posicionamento angular	ISE		16,13
Integral do erro vezes o tempo posicionamento angular	ITAE		9,69

Para o modo de controle automático do *snout* com imersão rápida do lingote, mais uma vez observou-se que o tempo necessário para o posicionamento do equipamento é limitado pelo controlador do posicionamento linear uma vez que visualiza-se que os índices ISE e ITAE apresentados na Tabela 5 são melhores para o posicionamento angular.

Analisando-se as diferenças entre o modo automático para imersão lenta e rápida, observa-se que os índices de desempenho dos controladores (ISE e ITAE) são menores tanto para o posicionamento angular quanto linear para quando a imersão do lingote é realizada de forma lenta. Da mesma forma, a resposta é mais rápida para este caso, conforme apresentado pelo tempo de subida e de estabilização, que apresentam valores quase 4 vezes maiores para a imersão rápida.

Outra diferença significativa foi os valores de atraso configurado no modelo matemático para envio do novo *setpoint* que para imersão lenta foi de 5 segundos enquanto para a imersão rápida foi de 1 segundo. Para identificação de qual configuração usar no momento da alteração da variável perturbada o modelo recebe um sinal do equipamento (*surverse*) que faz o controle da velocidade de imersão do lingote no banho de zinco.

4.3.3 Estudo de capacidade no modo automático

No estudo de capacidade para o posicionamento linear (Figura 46) realizado com diâmetro do rolo de fundo de 765 mm e avaliado em um período de 870 segundos tendo imersões rápidas e lentas do lingote, verificou-se capacidade potencial (C_p) de 8,06 do processo para o posicionamento linear do *snout*, e identificou-se que este posicionamento é capaz devido ao C_p ser maior que 1,33. Para a capacidade real (C_{pk}), de 5,67, pode-se identificar como os dados estão distribuídos em relação aos limites inferior ($LSL = 39$) e superior ($USL = 41$).

Para análise da efetividade do posicionamento linear para avaliação da *performance* do processo são comparadas a *performance* potencial ($P_p = 2,60$) e a *performance* real ($P_{pk} = 1,82$).

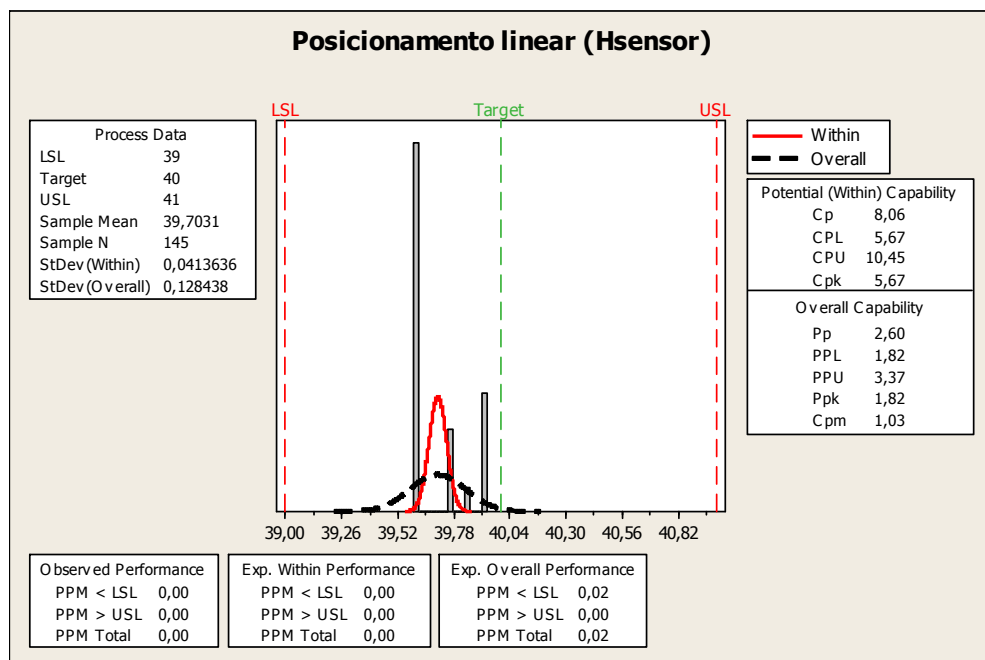


Figura 46 – Ilustração gráfica de capacidade do posicionamento linear. (Fonte: Primária, 2011).

Na Figura 47 é mostrada a avaliação da capacidade potencial ($C_p = 4,83$) do processo para o posicionamento angular do *snout*, na qual identificou-se que este posicionamento é capaz devido ao C_p ser maior que 1,33. A capacidade real (C_{pk}) de 3,27, permitiu identificar como os dados estão distribuídos em relação aos limites inferior ($LSL = 21,5$) e superior ($USL = 22,5$).

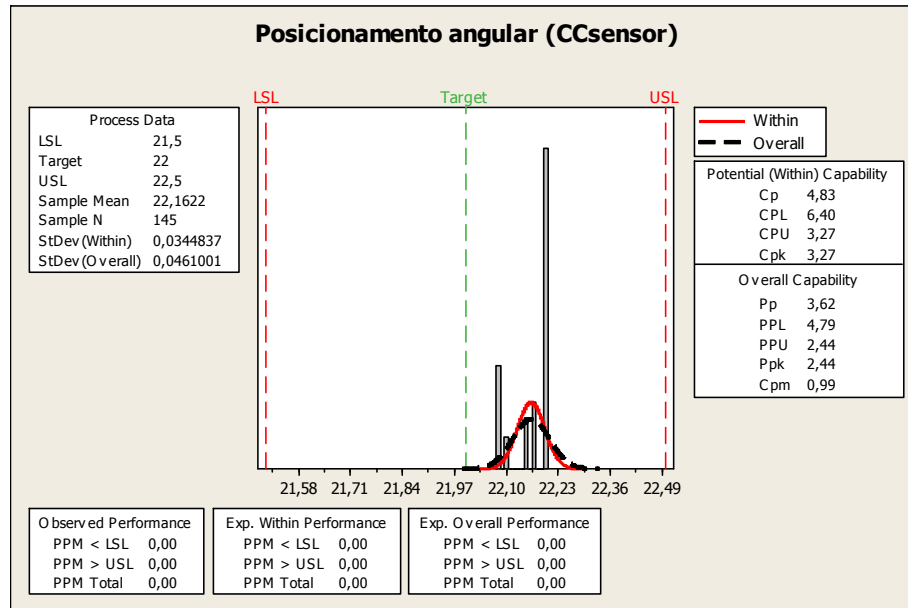


Figura 47 – Ilustração gráfica de capacidade do posicionamento angular.
(Fonte: Primária, 2011).

Para análise de normalidade do processo pelos valores (C_p – C_{pK}) para os dois posicionamentos, observa-se a normalização a longo prazo do processo.

Para a capacidade do processo (C_p – P_{pK}), observa-se que o funcionamento do *snout* nos dois posicionamentos angular e linear é considerado capaz pelo modelo matemático implementado.

4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PEÇAS E GERAÇÃO DE REFUGOS

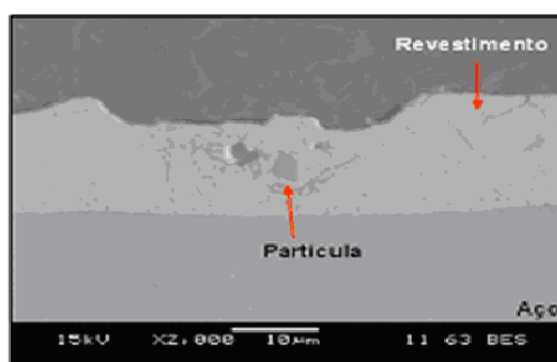
Inúmeros refugos podem promover a desclassificação de uma peça de aço no processo de galvanização conforme já citado neste trabalho. Dessa forma, um estudo preliminar foi realizado para avaliação de quais interferentes poderiam ser reduzidos gerando melhores resultados no processo produtivo, em relação à qualidade das peças produzidas.

Nos apêndices 02 e 03 são apresentados os gráficos onde, em um primeiro estudo, identificaram-se os interferentes da linha de galvanização a quente. Foram detectados os dois maiores apontamentos nos anos de 2009 e de 2010: PBIR – Bobinamento irregular e PGZN – Grão de Zinco. Para que o defeito PBIR seja mitigado, requer-se a instalação de um corretor de peça na bobinadeira que incorre

em investimentos elevados. Já para redução do interferente PGZN, seria necessário a implementação de um controle por modelagem de posicionamento linear e angular, conforme proposto neste trabalho, cujo o investimento previsto é cerca de 20 vezes inferior ao citado anteriormente.

4.4.1 Avaliação da superfície das peças

Uma vez que esta proposta concentrou-se na avaliação dos interferentes PBOR (Borra) e PGZN (Grão de Zinco), ambos foram identificados a partir da caracterização da superfície das peças por MEV e EDS quando foi observada a ocorrência dos mesmos no processo. Conforme descrito anteriormente, esses defeitos ocorrem devido à superfície do banho de zinco estar em contato com o ar atmosférico, favorecendo a oxidação e formação de borra na superfície do banho, e consequente deposição de grão de zinco na superfície das peças. Observa-se, na Figura 48, uma partícula impregnada no revestimento composta por alumínio (Al), ferro (Fe) e Zinco (Zn), característico de partícula de borra.



Resultado da análise de EDS, (% em massa)

0352906B	Al (%)	Fe (%)	Zn (%)
Partículas	30,33	45,50	24,17

Figura 48 – Fotografia de superfície em MEV e composição química via EDS do PBOR. (Fonte: Primária, 2011).

Na Figura 49, observa-se o interferente PGZN, que é formado por partículas claras, compactas, compostas por elevada concentração de alumínio, cromo, níquel, ferro e zinco, e residual de Si e S, sugerindo partículas anormais à composição do

banho zinco (GI), sendo que as mesmas também apresentam partículas escuras compostas por uma elevada concentração de Al, Fe e Zn, características de partículas de grão de zinco.

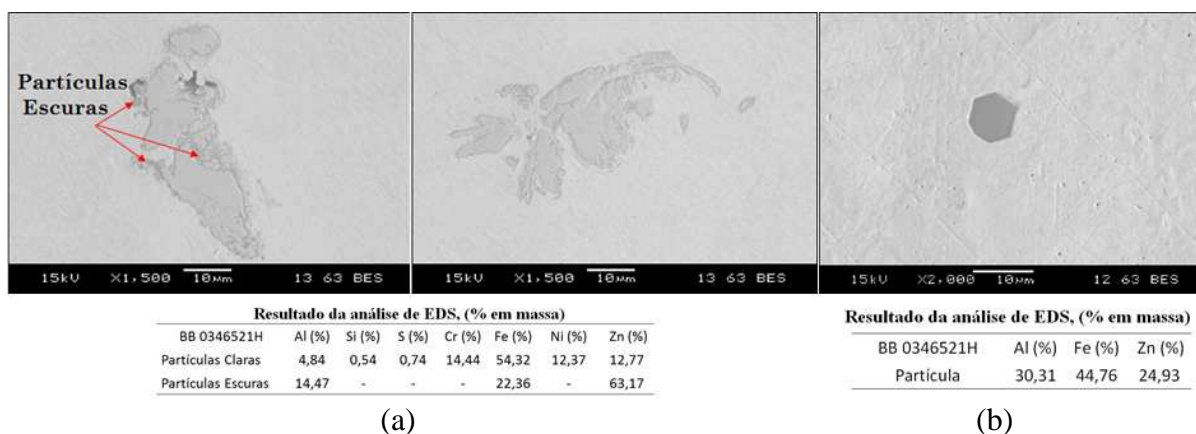


Figura 49 – Fotografia de superfície em MEV e composição química via EDS do (a) PGZN e (b) da partícula do PGZN. (Fonte: Primária, 2011).

4.4.2 – Quantificação da peça

Para confirmação da viabilidade do modelo matemático proposto e do controle implementado, a ocorrência dos interferentes PGZN (Grão de Zinco) e PBOR (Borra) foi quantificada com o controle implementado durante o acompanhamento da linha de galvanização a quente no período de 1 ano (2011), sendo registrados os interferentes e avaliados os resultados em número de ocorrências e peso em tonelada de refugo gerada no período.

Anteriormente, à implementação do projeto, foram registrados os principais interferentes encontrados na linha de produção por quantidade de bobina processada. Em 2009 (apêndice 02), o interferente PGZN (Grão de Zinco) ocupava a segunda colocação e o PBOR (Borra) ocupavam a nona colocação. No ano de 2010 (apêndice 03), o interferente PGZN (Grão de Zinco) ocupava a segunda colocação e o PBOR (Borra) ocupava a décima primeira posição. Em 2011, com o controlador implementado (apêndice 04), os interferentes PGZN (Grão de Zinco) ocupavam a sexta colocação e o PBOR (Borra) a décima primeira posição. Assim, conclui-se que o interferente grão de zinco foi reduzido em 24,57% e o interferente borra foi reduzido em 4,56%, em relação ao ano de 2010.

Nas Figuras 50 e 51 estão apresentadas a relação do número de ocorrências de massa de refugo (em toneladas) do interferente PGZN (Grão de Zinco) detectados nas peças processadas nos 12 meses de 2010 (anterior à implantação do projeto) e 2011 (após implantação do projeto), respectivamente, e na Figura 52, tem-se a comparação entre o número de ocorrências de PGZN, onde em Novembro dos dois anos de coleta de dados teve-se o menor valor registrado devido a parada anual da produção para reparos de manutenção programada, observadas nos dois anos.

No período de Janeiro/2011 a Junho/2011 ocorreu a adequação do sistema de controle às características do processo, o que incorreu na geração neste mês de valores maiores para geração de sucata quando comparado ao mesmo período de 2010. Também vale destacar que no mês de Maio/2011 ocorreu um problema na montagem e no ajuste do rolo de fundo, vindo a gerar um volume de interferente maior que o esperado. Observa-se que a tendência de redução dos refugos gerados a partir de Julho/2011 é significativa, vindo a contribuir para a qualidade da peça produzida. Com isso, ao se considerar o ano inteiro, obteve-se uma redução média de 24,57% nas ocorrências e conseqüente redução média de 27,54% do peso de refugo gerada.

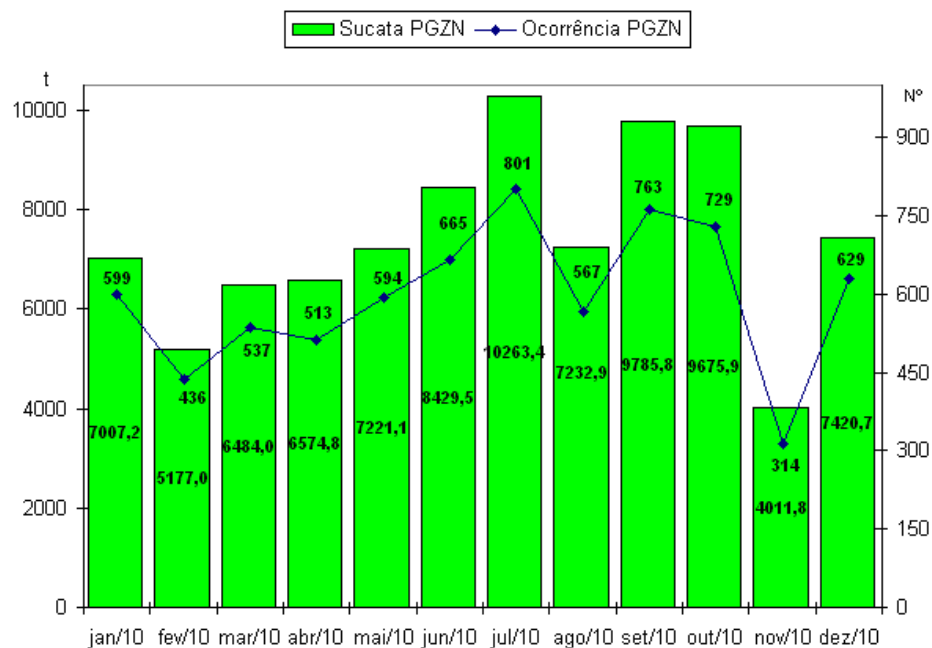


Figura 50 – Massa (em toneladas) de refugos gerados e número de ocorrências de PGZN em 2010. (Fonte: Primária, 2011).

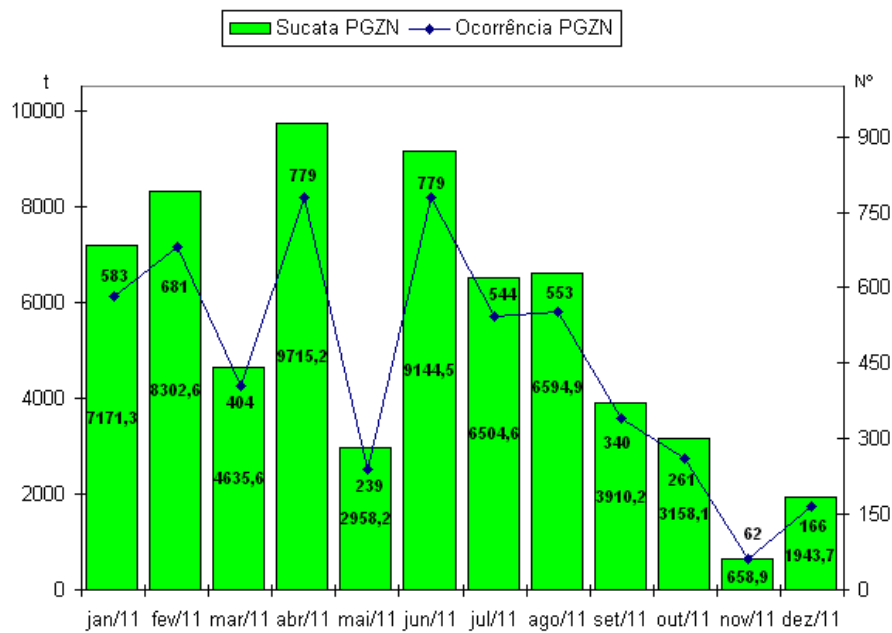


Figura 51 – Massa (em toneladas) de refugos gerados e número de ocorrências de PGZN em 2011. (Fonte: Primária, 2011).

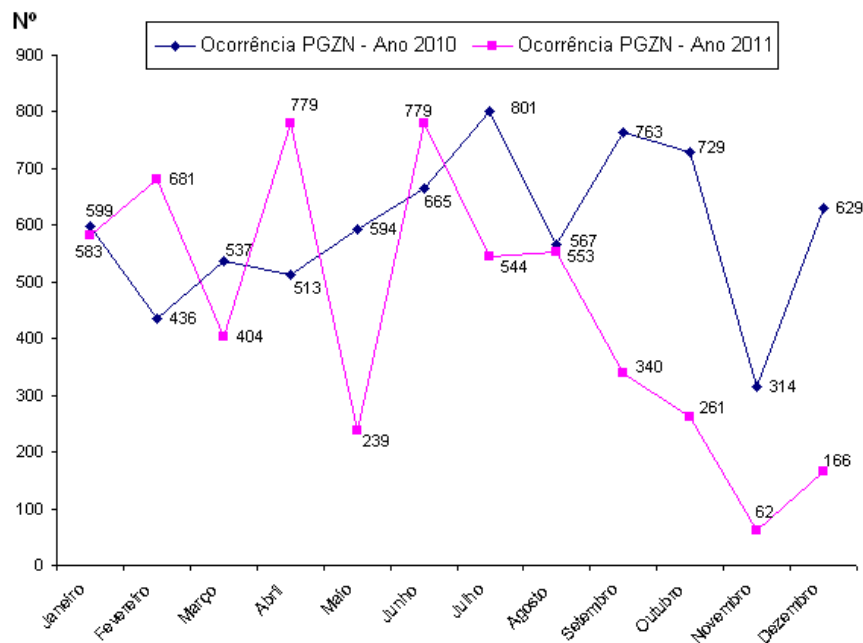


Figura 52 – Número de ocorrências de PGZN em 2010 e 2011. (Fonte: Primária, 2011).

Nas Figuras 53 e 54 estão apresentadas a relação do número de ocorrências e o peso de refugo do interferente PBOR (Borra), ambos detectados nas peças processadas nos 12 meses de 2010 (anterior a implantação do projeto) e 2011 (após implantação do projeto), respectivamente. Na Figura 55, tem-se a comparação entre o número de ocorrências de PBOR observadas nos dois anos. Destaca-se que a

variação nos valores quantificados pode ser observada no ano de 2010, fato este devido aos constantes ajustes manual do equipamento.

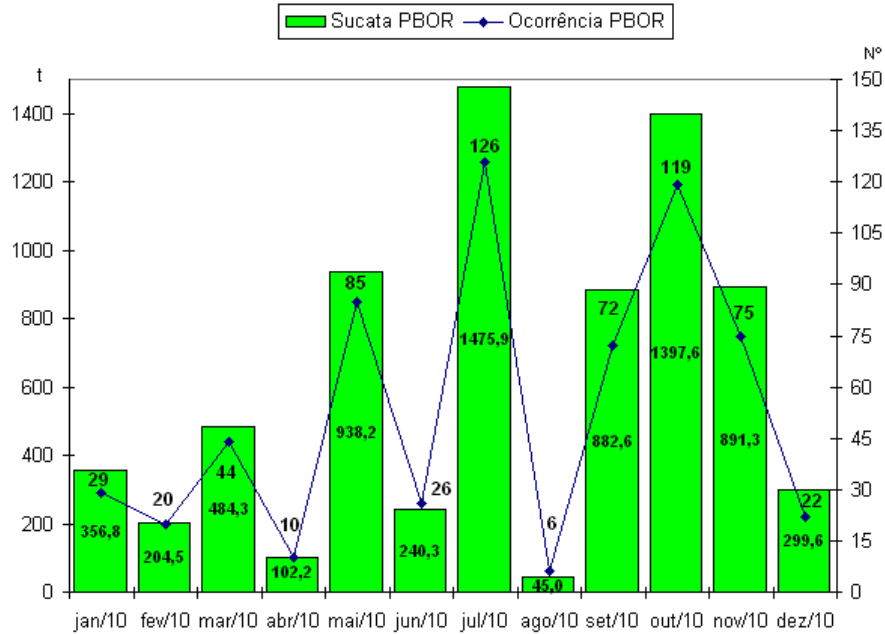


Figura 53 – Massa (em toneladas) de refugos gerados e número de ocorrências de PBOR em 2010. (Fonte: Primária, 2011).

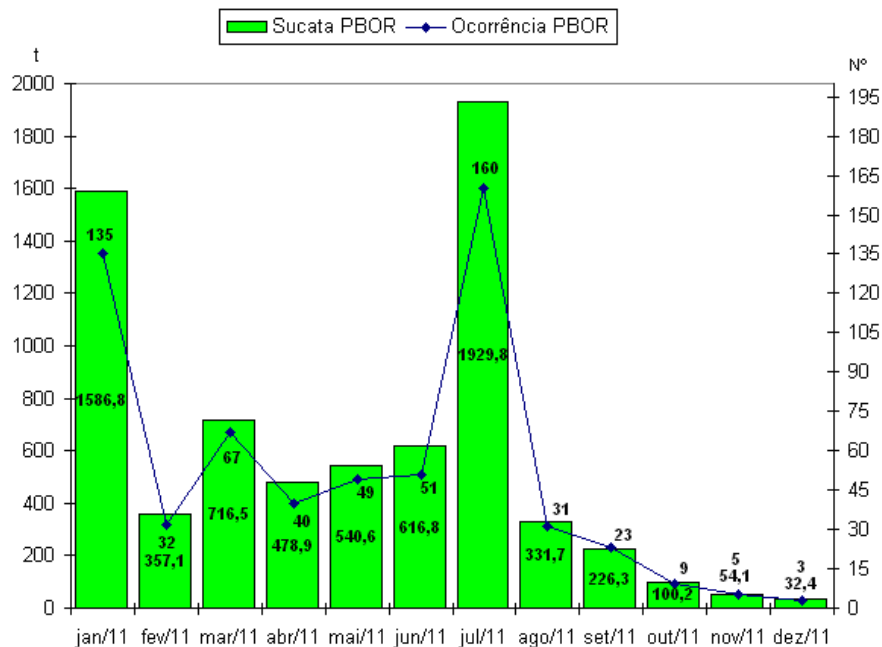


Figura 54 – Massa (em toneladas) de refugos gerados e número de ocorrências de PBOR em 2011. (Fonte: Primária, 2011).

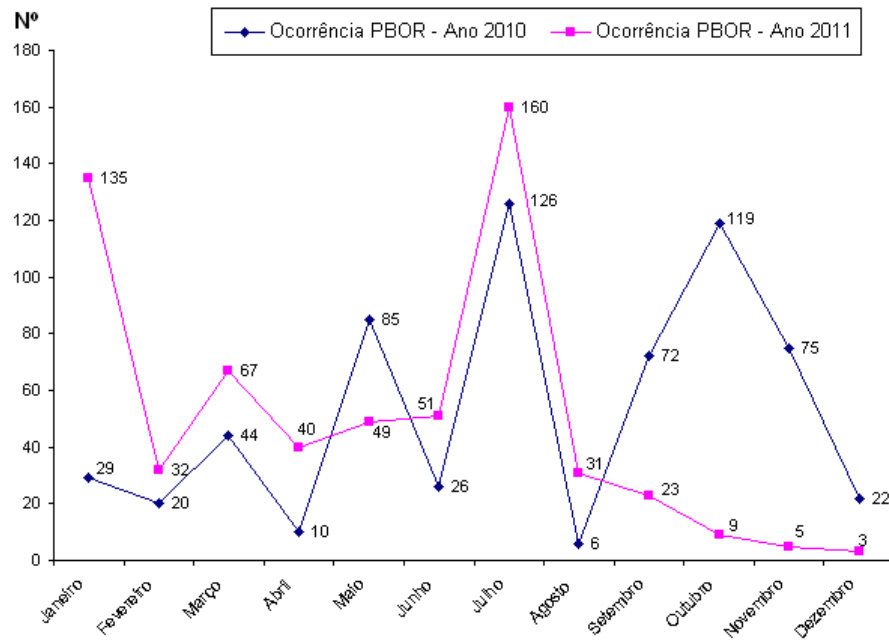


Figura 55 – Número de ocorrências de PBOR em 2010 e 2011.
(Fonte: Primária, 2011).

Com a implementação do sistema de controle, observa-se, uma redução média de 4,56% nas ocorrências e consequente redução média de 4,75% do peso de refugo gerada. Vale destacar que no mês de Julho/2011 ocorreu a manutenção preventiva da linha de galvanização, devido a quebra de um acoplamento do eixo do motor que possibilita o posicionamento angular do equipamento. Com isso, foi necessário desabilitar o controle até a compra e instalação de outro acoplamento, vindo a gerar um volume de interferente maior que o esperado, indicado pelo pico observado na Figura 54. A implementação do modelo proposto trouxe resultados significativos na redução de refugo gerado no processo, permitindo assim um processo produtivo mais eficiente devido à redução de custos com peças fabricadas com qualidade inferior ao esperado.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho propôs-se a utilização de um modelo matemático para o cálculo dos valores de referência para posicionamento angular e linear no *snout* em um banho de galvanização. Este modelo é bastante simples, e demonstrou-se eficiente desempenho nos cenários de zeragem automática bem como nos de imersão lenta e rápida no modo de controle automático. No modo de zeragem automática ocorreu uma redução de 3 minutos para cada necessidade de *setup* do processo, que média são 3 por mês, dando um acréscimo de produção de 4,40t por cada *setup* executado.

A automação desenvolvida utilizou de um bloco de modelagem matemática e acionamento dos posicionamentos linear e angular implementado em um controlador de alto desempenho (HPC), onde propiciou um controle mais rápido e eficiente nos novos valores de *setpoint* calculados para o *snout* sendo válido sua aplicabilidade em outras linhas de processamento similares. Com a introdução de um controle simples, do tipo *liga-desliga*, foi possível observar reduções no tempo de ajuste do novo posicionamento do equipamento, gerando ganhos de produtividade e qualidade das peças geradas.

Os resultados apresentados devido a implantação do modelador matemático para controle de posicionamento do *snout* demonstraram que o mesmo tem aplicação economicamente viável, trazendo reduções médias de 2048,85 t por mês para o interferente PGZN (grão de zinco) e 28,95 t por mês para o interferente PBOR (borra), devido aos produtos do segmento siderúrgico/metalúrgico serem *commodities* o ganho financeiro dos resultados obtidos justifica a aplicação do modelo desenvolvido em outras Galvanizações por imersão a quente (HDG - *hot-dip galvanizing*).

A proposta implementada trouxe ganhos de produção por meio do alcance de peças com qualidade definida, além de segurança nas manobras de deslocamento do equipamento necessárias devido ao novo posicionamento do *setpoint* que anteriormente se fazia de forma manual. Observou-se a melhora no ambiente de trabalho para o operador, onde a partir da implementação do sistema de controle o mesmo não necessita atuar neste ponto do processo de fabricação de peças galvanizadas, onde tanto a empresa que registrou um documento classificado de

conhecimento tácito (KO-PRO-GAL1-PR-0001), quanto a sociedade foram beneficiadas pela implementação do modelador.

É importante ressaltar que os resultados obtidos em um processo industrial não servem de garantia de resultado positivo para outros processos industriais, sendo recomendável a simulação de vários cenários para cada aplicação, permitindo assim avaliar a viabilidade da implementação no processo industrial estudado.

5.1 SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Em função destes resultados, é sugerido avaliar outras tecnologias para redução dos interferentes caracterizados como:

- a) O método com bico de pulverização “*plurality of nozzles*” para redução da geração de borra e grão de zinco e sua influência na redução dos interferentes na peça de aço;
- b) Controles de posicionamentos mais preciso com motor de passo utilizando-se de inversores de frequências.

Outro ponto importante é realizar experimentos em campo alterando as constantes comissionadas em outros posicionamentos lineares e angulares para identificação do ponto ótimo, reduzindo ainda mais os interferentes (borra e grão de zinco) decorrentes do processo de imersão a quente.

Outra proposta seria aplicar o modelo em diferentes linhas de galvanização por imersão a quente com diferentes banhos de zinco para confirmar a eficácia do modelo matemático abordado.

REFERÊNCIAS

Akamphon, S.; Sukkasi, S.; Boonyongmaneerat, Y.; *Reduction of zinc consumption with enhanced corrosion protection in hot-dip galvanized coatings*, A process-based cost analysis, Resources, Conservation and Recycling: p. 1-7 (2011).

Alvarenga, E.A.; *Implantação da linha de galvanização eletrolítica da Usiminas*, Metalurgia & Materiais: n. 2359 (1994).

ArcelorMittal Vega; *Ajuste de posicionamento da tromba – KO-PRO-GAL1-PR-0001*; (2010).

Asgari, H.; Toroghinejad, M.R.; Golozar, M. A.; *Effect of coating thickness on modifying the texture and corrosion performance of hot-dip galvanized coatings*, IUT (2009).

ASTM; *Standard Test Method for Weight of Coating on Zinc-Coated (Galvanized)*, Annual Book of American Society for Testing and Materials: (1993).

Azimi, A., Ashrafizadeh, F., Toroghinejad, M.R., Shahriari, F.; *Metallurgical assessment of critical defects in continuous hot dip galvanized steel sheets*, Surface and Coatings Technology: Vol. 206, p. 4376-4383 (2012).

Ben, Nasr.; Snoussi, A.; Bradai, C.; Halouani, F.; *Optimization of hot-dip galvanizing process of reactive steels: Minimizing zinc consumption without alloy additions*, Materials Letters: p. 3328-3330 (2008).

Bicao, P., Wang, J., SU, X., LI, Z., YIN, F.; *Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing*, Surface & Coatings Technology: p.1785-1788 (2007).

Blumenau, M., Norden, M., Schulz, J., Friedel, F., Peters, K.; *Wetting and reactive wetting during hot-dip galvanizing of high Mn alloyed steel with Zn-Al-Mg baths*, Surface & Coatings Technology: p. 4194-4201 (2012).

Campbell, C., Andrade, A.S., Linhares, N.J., Brasil R.G.; *Automatic control coating in continuous galvanizing lines by immersion*, Metalurgia and Materiais: p. 336-345 (2005).

Carpio, J., Casado, J.A., Alvarez, J.A., Méndez, D., Gutiérrez-solana, F.; *Stress corrosion cracking of structural steels immersed in hot-dip galvanizing baths*, Engineering Failure Analysis: p. 19-27 (2008).

Catálogo Usiminas – Hot-Dip Galvanized Steel, (2000).

Chen, D.; *Adaptive control of hot-dip galvanizing*, Automatica: Vol. 31, p. 715-733 (1995).

Chidambaram, P.R., Rangarajan, V., Van Ooij, W.J.; *Characterization of high temperature hot dip galvanized coatings*. Surface and Coatings Technology: p. 245-253 (1996).

Cook, T.; *Hot-Dip Galvanizing Technology*. Finishing Equipment Consultant Hot Springs S.D 57747: (2000).

Corson, R.; *Model-based coating weight control systems for galvanizing*. Corson Manufacturing Consulting: (2002).

Culcasi, J.D., Seré, P.R., Elsner, C.I., DI SARLI, A.R.; *Control of the growth of zinc-iron phases in the hot-dip galvanizing process*. Surface & Coatings Technology: p. 21-23 (1999).

Dafydd, H., Worsley, D.A., McMurray, H.N.; *The kinetics and mechanism of cathodic oxygen reduction on zinc and zinc-aluminium alloy galvanized coatings*, Corrosion Science: p. 3006-3018 (2005).

Dattilo, M., Cole, E.R., JR., O'keefe, T.J.; *Electro galvanizing using zinc recovered from nonferrous smelter dusts*, Conservation & Recycling: p. 55-66 (1984).

Deniz, T.M., Soner, A.H., Fikret T.; *Recovery of zinc and lead from zinc plant residue*. Hydrometallurgy, Hydrometallurgy: p. 169-176 (2004).

Dias, L.A.M.; *Estruturas de Aço – Conceitos, Técnicas e Linguagem*, Zigurate: (1998).

Fenot, C., Rolland, F., Vigneron, G., Landau, I.D.; *Open-loop adaptive feedback control of deposited zinc in hot-dip galvanizing*. Control Eng.Practice: p. 779-790 (1993).

Fernandes, J. N., Kobayashi, M., Reis, D. T.; *Linha de Galvanização por Imersão a Quente da Unigal*, Congresso anual ABM: p. 414-419 (2000).

Gentil, V.; *Corrosão*. Livros Técnicos e Científicos S. A: 4^o. Ed. (2003).

Guelton, N., Lerouge, A.; *Coating weight control on ArcelorMittal's galvanizing line at Florange Works*, Control Engineering Practice: Vol. 2, p. 1220-1229 (2010).

Jacobs, O.L.R.; *Designing feedback controllers to regulate deposited mass in hot-dip galvanizing*, Pergamon: p. 1529-1542 (1995).

Kollárová, M., Dzupon, M., Lesko, A., Parilak, L.; *Formation of outburst structure in hot dip galvanized coatings on if steels*, Institute of Materials Research Metalurgija: p. 9-14 (2007).

Kong, G. and White, R.; *Toward cleaner production of hot dip galvanizing industry in China*, Journal of Cleaner Production: Vol. 18, p. 1092-1099 (2010).

Konidaris, S., Pistofidis, N., Vourlias, G., Pavlidou, E., Stergioudis, G., Tsipas, D.; *Environmental and technical considerations of preflux bath composition on structure of hot zinc galvanized coatings*, Surface Engineering: p.455-461 (2006).

Le, Q.C. and Cui J.Z.; *Investigation on colourisation regularity of colouring hot dip galvanisation processing*, Surface Engineering: Vol. 24, p. 58-62 (2008).

Linhares, N.J., Campbell, C.H.G., Mello, A.S., Bohrer, R.B.; *Reduced overcoating galvanizing lines CSN– Usina Presidente Vargas*, Tecnologia em Metalurgia e Materiais: Vol. 5, p. 72-76 (2008).

Marder, A., R., *The metallurgy of zinc-coated steel*, Progress in Materials Science: Vol.45, p.191-271 (2000).

Mckerrow, P.; *Computer Controlled Galvanizing*, Computers in Industry: p.19-30 (1983).

Miranda, W.; *Avaliação da estampabilidade do aço livre de intersticial galvanizado a quente por imersão (GA, GI), eletrogalvanizado (EG), eletrogalvanizado e pré-fosfatizado (EGP)*, PUC-Minas: (2007).

Ordieres M.J.B., Gonzalez M.A., Gonzalez, J.A., Lobato R.V.; *Estimation of mechanical properties of steel strip in hot dip galvanizing lines*, Ironmaking and Steelmaking: p. 43-50 (2004).

Otsuka, K., Arai, M., Kasai, S.; *Development of Dross Control Methods in a Continuous Galvanizing Pot by Numerical Bath Flow Analyses*, Physical Metallurgy Principles: p. 230-233 (1998).

Panossian, Z.; *Corrosão e Proteção Contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas*. IPT: 1. ed., p. 1-12 (1993).

Paranhos, R.; *Avaliação da resistência à corrosão atmosférica de aços fosfatizados e pintados para aplicação na indústria da construção civil*, UFMG: (2002).

Rodrigues, C.; *Projeto de controladores robustos a partir de modelos identificados em malha fechada*, Unileste: (2007).

Shibli, S., Manu, R.; *Process and performance improvement of hot dip zinc coating by dispersed nickel in the under layer*, Surface & Coatings Technology: p.103-108 (2004).

Shibli, S., Manu, R.; *Improvement of hot-dip zinc coating by enriching the inner layers with iron oxide*, Applied Surface Science: p.3058-3064 (2005).

Séré, P.R., Culcasi, J.D., Elsner, C.I., DI S.A.R.; *Relationship between texture and corrosion resistance in hot-dip galvanized steel sheets*, Surface and Coatings Technology: p.143-149 (1999).

Sippola, P.; *Hot-dip zinc free of dross pick-up defects*. N. PI 5.958.518: (1999).

Townsend, H.; *Continuous Hot Dip Coatings*, ASM Handbook: Vol.5, p.339 – 348 (1993).

Verma, A., Van Ooij, W.; *High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part2. Comparison of coatings formed in the temperature range 520-555 °C*, Surface and Coatings Technology: p. 143-150 (1996).

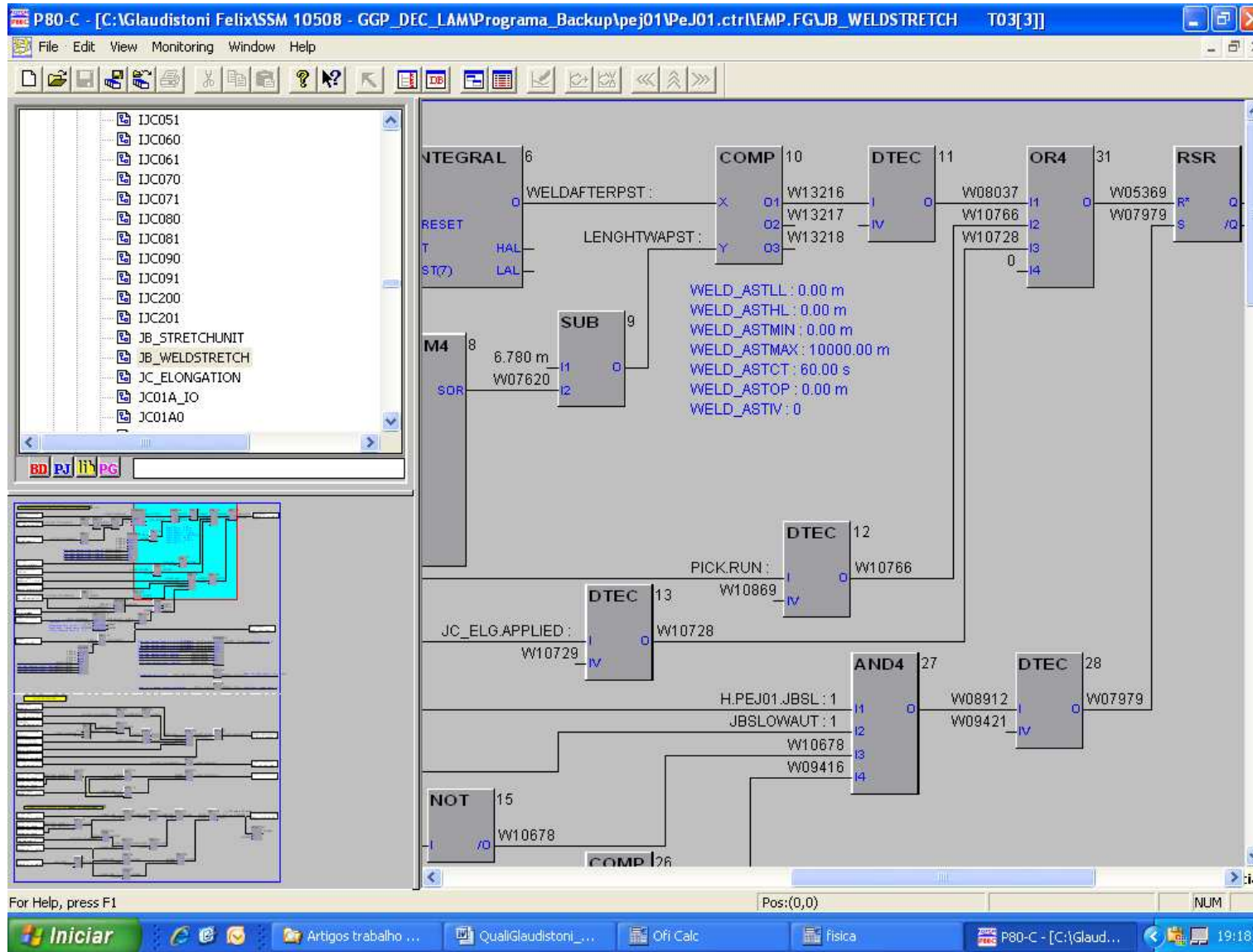
Vieira, R.; *Estudo sobre o desprendimento do revestimento de zinco em materiais galvanizados com liga de Fe-Zn*, UFOP (2007).

Wang, J., Hao, T., Bicao, P., Wang, X.; Yin, F., Su, X.; *The effects of zinc bath temperature on the coating growth behavior of reactive steel*, Materials Characterization: p. 1276-1279 (2009).

Zapponi, M., Quiroga, A., Perez, T.; *Segregation of alloying elements during the hot-dip coating solidification process*, Surface and Coatings Technology: p.18-20 (1999).

Zhang, H; Moallemi, K.; *Numerical simulation of hot-dip metallic coating process*, Pergamon: p. 241-257 (1994).

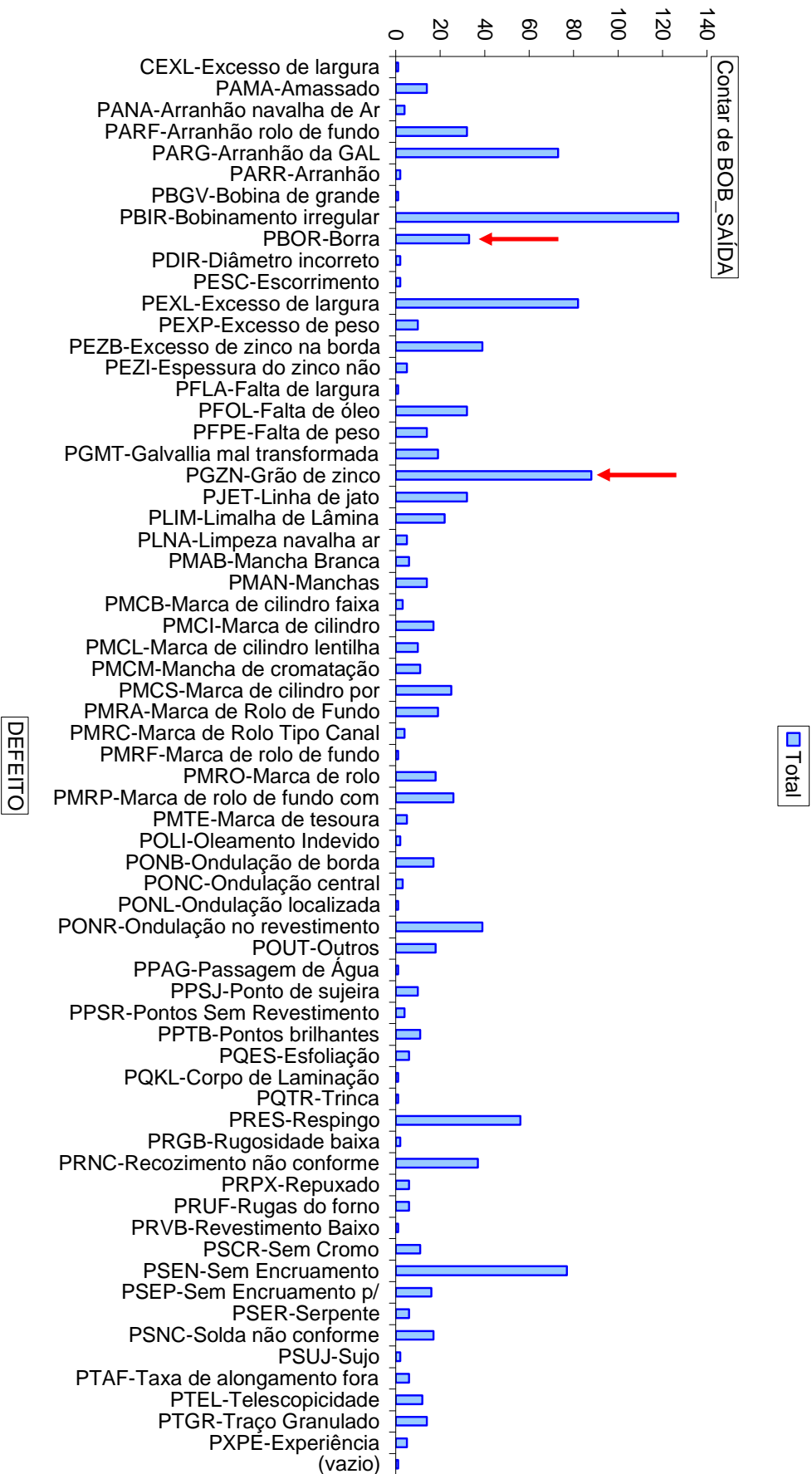
APÊNDICE 1



APÊNDICE 2

LINHA_ORIGEM 15 - Galvanização| DECISION 300-Bloqueio Bobina a disposição da MCQ para análise

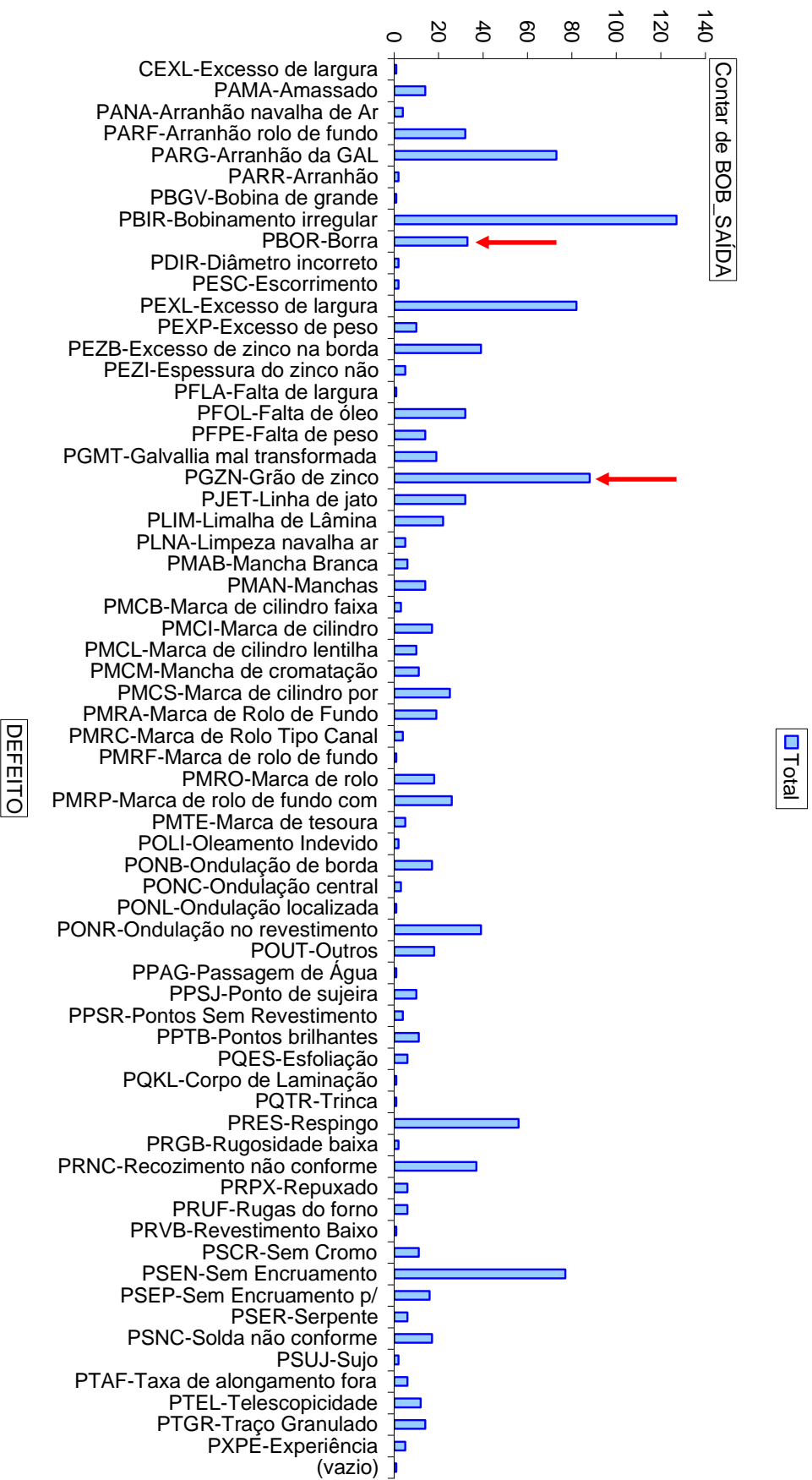
DEFEITOS NA LINHA DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE Nº1 EM 2009



APÊNDICE 3

LINHA_ORIGEM15 - Galvanização|DECISION|300-Bloqueio Bobina a disposição da MQQ para análise

DEFEITOS NA LINHA DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE Nº1 EM 2010



APÊNDICE 4

LINHA_ORIGEM15 - Galvanização| DECISION| 300-Bloqueio Bobina a disposição da MQC para análise

DEFEITOS NA LINHA DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE Nº1 EM 2011

