



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**JOÃO VICTOR FERREIRA AZEVEDO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CHUMBO NA APARÊNCIA DE  
REVESTIMENTOS DA LINHA DE ZINCAGEM CONTÍNUA 2 DA CSN E  
OTIMIZAÇÃO NA ADEQUAÇÃO À DIRETIVA ROHS**

**FORTALEZA**

**2017**

JOÃO VICTOR FERREIRA AZEVEDO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CHUMBO NA APARÊNCIA DE  
REVESTIMENTOS DA LINHA DE ZINCAGEM CONTÍNUA 2 DA CSN E  
OTIMIZAÇÃO NA ADEQUAÇÃO À DIRETIVA ROHS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Da Universidade Federal do Ceará (UFC), Como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A987e Azevedo, João Victor Ferreira.

Estudo da influência do chumbo na aparência de revestimentos da linha de zincagem contínua 2 da CSN e otimização na adequação à diretiva RoHS / João Victor Ferreira Azevedo. – 2017.  
39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Zincagem. 2. Corrosão. 3. Chumbo. I. Título.

CDD 669

---

JOÃO VICTOR FERREIRA AZEVEDO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CHUMBO NA APARÊNCIA DE  
REVESTIMENTOS DA LINHA DE ZINCAGEM CONTÍNUA 2 DA CSN E  
OTIMIZAÇÃO NA ADEQUAÇÃO À DIRETIVA ROHS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Da Universidade Federal do Ceará (UFC), Como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Walney Silva Araújo  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pois sem Ele não somos nada. Sem Seu amor, Seu cuidado e Sua eterna misericórdia eu não teria chegado até aqui.

À minha esposa, companheira e melhor amiga, Kátia Silva Aragão Azevedo, pelo amor, apoio e compreensão durante todos anos de graduação.

Aos meus pais, Raimundo Valdir Lira Azevedo e Glaucia Ferreira Azevedo, por todo suporte e motivação durante toda minha vida.

À minha avó materna, Percília Pereira do Nascimento, por ter sido uma segunda mãe e ter estado comigo em muitos momentos difíceis. Sua vida é motivo de inspiração para mim.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais por todo conhecimento passado e experiências compartilhadas.

À Compassion Internacional, principalmente Wendell Miranda e Maurício Marques, por todo o suporte, por todos os ensinamentos e por toda motivação durante esses anos de graduação.

Ao casal João Bosco Almeida e Célia Almeida, diretores do Colégio Pleno do Ceará, que lá atrás acreditou que eu poderia ser diferente dos jovens daquela região e alcançar lugares altos.

Ao meu orientador profissional, o engenheiro Sênior da Linha de Zincagem Contínua 2/CSN Rafael Masulck Santos, por todo conhecimento e experiência compartilhados.

Aos meus amigos de graduação por todos os momentos de dificuldade superados em grupo.

Ao Programa de Aprendizagem Cooperativa por toda contribuição no meu crescimento como estudante e pessoa.

Ao Programa Ciências sem Fronteiras, pelo melhor ano da minha vida em todos os sentidos, por ter me feito uma nova pessoa.

“Porque sou Eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor planos de fazê-los prosperar e não de lhes causar dano, planos de dar-lhes esperança e um futuro”.

(Jeremias 29:11)

## RESUMO

O processo de zincagem contínua por imersão a quente é um dos mais efetivos e econômicos processos empregados para proteger o aço contra a corrosão. As características do produto zincado dependem principalmente da composição química do banho de zinco e do aço, tempo de imersão, taxa de resfriamento e rugosidade do substrato. A solidificação do revestimento de zinco é caracterizada pela cristalização de uma camada muito fina de metal. Os cristais formados são chamados de flor de zinco ou cristais de zinco, que se desenvolvem quando o zinco fundido adere à chapa de aço e é resfriado abaixo do seu ponto de fusão. Há outro processo de solidificação que leva ao padrão de flores de zinco no revestimento zincado, que é o crescimento dendrítico. A natureza e o índice de crescimento dendrítico durante o processo de solidificação é afetado pela presença de outros elementos, principalmente o chumbo. A adição do chumbo é de grande importância na zincagem contínua e traz muitos benefícios. Entretanto, o chumbo é considerado nocivo ao homem e ao meio ambiente. Principalmente devido a essa toxidez do chumbo e de outros elementos como cromo hexavalente e mercúrio, foi criada em 2006 a Diretiva RoHs. A Linha de Zincagem Contínua 2 da CSN, em 2011, se adequou à norma, diminuindo o teor de chumbo nos produtos zincados. Devido a essa diminuição surgiu um problema na aparência do revestimento, chamado “cristal miúdo” ou KM. Trata-se de uma diminuição visual dos cristais de zinco no produto final. Os cristais visíveis de forma clara é uma exigência da grande maioria dos clientes e esse problema gerou um desvio de carga, de 2011 a 2015, de mais de 500 toneladas de aço, causando prejuízos operacionais na linha. A partir do presente trabalho foi concluído que o problema de cristal miúdo surgiu após a diminuição do teor de chumbo no banho de zinco para adequação à diretiva RoHs, já que o teor de chumbo influencia diretamente no tamanho da flor de zinco. Foi concluído também que essa adequação pode ser otimizada pois os resultados indicaram uma diferença considerável de aproximadamente 20 % entre o teor de chumbo no banho de zinco e no produto final e que a rugosidade do substrato também influencia de forma relevante a qualidade do revestimento.

**Palavras-chave:** Zincagem Contínua, Diretiva RoHs, Cristais de Zinco, Chumbo.

## **ABSTRACT**

The continuous hot-dip galvanizing is one of the most effective and economical processes employed to protect steel against corrosion. The characteristics of the galvanized product depend mainly on the chemical composition of the zinc and the steel, immersion time, cooling rate and substrate roughness. Solidification of the zinc coating is characterized by the crystallization of a very thin layer of metal. The crystals formed are called a zinc flower, which develop when the molten zinc adheres to the steel plate and is cooled below its melting point. There is another solidification process that leads to the pattern of zinc flowers in the zinc coating, which is dendritic growth. The nature and rate of dendritic growth during the solidification process is affected by the presence of other elements, especially lead. The addition of lead is of great importance in continuous galvanizing and brings many benefits such as However, lead is considered to be harmful to man and the environment. The RoHs Directive was created in 2006 mainly because of this toxicity of lead and other elements like hexavalent chromium and mercury. In 2011, the LZC#2/CSN has adapted to the RoHs directive, reducing the lead content in galvanized products, but, because of this decrease, appeared a problem in the appearance of the coating, called "small crystal" or KM. This is a visual decrease of the zinc crystals in the final product. Clearly visible crystals are a requirement of the vast majority of customers and this problem has led to a shift of more than 500 tons of steel from 2011 to 2015, causing operating losses on the LZC#2/CSN. According to this project, it was concluded that the "small crystal" problem arose after the decrease in lead content in the zinc bath to suit the RoHs directive, since the lead content directly influences the size of the zinc flower. It has also been found that this suitability can be optimized since the results indicated a considerable difference (approximately 20%) between the lead content in the zinc bath and the final product and that the roughness of the substrate also significantly influences the quality of the coating.

**Key-Words:** Continuous hot-dip galvanizing, RoHs, Zinc Flowers, Lead.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Estimativa de vida útil de aços zincados em diferentes tipos de ambiente.....	14
Figura 2 - Camadas do revestimento.....	15
Figura 3 - Flor de zinco.....	16
Figura 4 - Representação esquemática da LZC#2.....	18
Figura 5 – Desenroladeiras.....	19
Figura 6 - Máquina de Solda.....	20
Figura 7 - Controle de Revestimento.....	21
Figura 8 - Tratamento químico: Cromatização.....	22
Figura 9 - Laminador de Encruamento.....	22
Figura 10 - Aparência superficial dos produtos Zincados.....	23
Figura 11 - Amostra banho de zinco.....	25
Figura 12 – Rugosímetro.....	26
Figura 13 - Fotografia amostra BZ, aumento de 12,5x.....	26
Figura 14 - Espectrômetro de Emissão Atômica.....	27
Figura 15 - Rugosidades x Aparência dos cristais.....	29

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Parâmetros de processo, rugosidades ( $\mu\text{m}$ ) e tipo de revestimento das bobinas analisadas.....	28
Tabela 2 - Teor de Chumbo no banho de zinco x Teor de Chumbo na bobina zincada..	30

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Pb no banho x Pb na bobina zincada (%).....	31
Gráfico 2 - Níveis de Chumbo no banho de zinco e na bobina zincada em (%).....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**CSN** – Companhia Siderúrgica Nacional

**LZC#2** – Linha de Zincagem Contínua número 2

**BZ** – Bobina Zincada

**RoHs** - *Restriction of Certain Hazardous Substances*

**Pb** – Chumbo

**Al** – Alumínio

**Fe** – Ferro

**m** – metro

**min** – minuto

**Zn** – Zinco

**Pol** – polegada

**nm** – nanômetro

**mm** – milímetro

**cm** - centímetro

**t** – tonelada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>A Corrosão e o Processo de Zincagem Contínua .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>A Linha de Zincagem Contínua 2 da CSN .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Dados Gerais.....</i></b>	<b>19</b>
<b>3.2.2</b>	<b><i>Seção de Entrada.....</i></b>	<b>19</b>
<b>3.2.3</b>	<b><i>Seção de Processo.....</i></b>	<b>20</b>
<b>3.2.4</b>	<b><i>Seção de Saída.....</i></b>	<b>21</b>
<b>3.2.5</b>	<b><i>Características das tiras zincadas .....</i></b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Diretiva RoHs .....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodologia de Amostragem.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Metodologia de Análise.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.1</b>	<b><i>Quanto às rugosidades.....</i></b>	<b>26</b>
<b>4.2.2</b>	<b><i>Quanto à relação do teor de chumbo no banho e na bobina zinchada.....</i></b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>34</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>35</b>
	<b>APÊNDICE A – IMAGENS DOS CRISTAIS DE ZINCO COM AUMENTO DE 12,5 X .....</b>	<b>37</b>
	<b>APÊNDICE B – FLUXO DE PRODUÇÃO DO AÇO ZINCADO .....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É do conhecimento de todos que o aço é um produto de fundamental importância para qualquer país. Algumas das razões que fazem o aço tão utilizado são sua versatilidade, seu relativo baixo custo de produção, sua conformabilidade e suas características mecânicas. Porém, o aço é propenso à corrosão, ou seja, com o passar do tempo sua superfície vai se tornando disforme, podendo gerar falhas no produto. O processo de zincação por imersão a quente já está em uso há muitos anos e é um dos mais efetivos e econômicos processos empregados para proteger o aço contra a corrosão.

A CSN possui duas linhas de zincação contínua na Usina Presidente Vargas em Volta Redonda – RJ. O presente trabalho foi realizado na Linha de Zincação Contínua 2. Tal linha iniciou a operar no ano de 1989. Sua capacidade de produção é 280.000 t/ano e sua velocidade máxima de operação é 122 m/min. O fluxograma de produção do aço zinçado é mostrado no apêndice B. Na LZC#2 da CSN esse processo é realizado de forma contínua, ou seja, envolve a aplicação de zinco sobre uma tira contínua de chapa de aço à medida que ela passa pelo banho de zinco fundido. Os principais revestimentos produzidos na linha são o Z100 e o Z275 (100 e 275 representam a espessura do revestimento), que são fabricados obedecendo a *Euronorm*.

As características do produto zinçado dependem principalmente da composição química do banho de zinco e do aço, tempo de imersão, taxa de resfriamento e rugosidade do substrato. Um dos pontos chaves desse trabalho é a presença do chumbo no processo e como ele influencia na qualidade e na aparência do revestimento. A adição do chumbo é de grande importância na zincação contínua e traz muitos benefícios, como aumentar a fluidez do banho, reduzir o ataque do zinco ao substrato de aço e proteger a cuba de desgaste prematuro, favorecer formação de espessuras de camadas menores, auxiliando o controle de crescimento dos compostos intermetálicos e reduzindo o consumo de zinco. Entretanto, o chumbo é considerado nocivo ao homem e ao meio ambiente. Principalmente devido a essa toxidez do chumbo e de outros elementos como cromo hexavalente e mercúrio, foi criada em 2006 a Diretiva RoHs. A LZC#2/CSN, em 2011, se adequou à norma, diminuindo o teor de chumbo nos produtos zinçados. Devido a essa diminuição surgiu um problema na aparência do revestimento, chamado “cristal

miúdo” ou KM. Trata-se de uma diminuição visual dos cristais de zinco no produto final. Os cristais visíveis de forma clara é uma exigência da grande maioria dos clientes e esse problema gerou um desvio de carga, de 2011 a 2015, de mais de 500 toneladas de aço, causando prejuízos operacionais na linha. Outro ponto importante é entender a relação entre a rugosidade do substrato e a aparência do revestimento.

Então, os objetivos centrais desse trabalho são estudar a influência do chumbo no tamanho dos cristais de zinco, propor uma otimização na adequação à diretiva RoHS e propor alternativas para diminuição do problema de “cristal miúdo”.

O presente trabalho foi apresentado para gerentes e engenheiros da CSN e obteve permissão para que fosse utilizado como trabalho de conclusão de curso e apresentado também a uma banca de professores na universidade.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

- Estudar a influência do chumbo no aspecto dos dois revestimentos produzidos com mais frequência na Linha de Zincagem Contínua 2 da CSN;
- Encontrar relação entre a rugosidade inicial, antes do processo de zincagem, e a aparência do revestimento, após o processo;

### 2.2 Objetivos Específicos

- Explorar, na LZC#2, as limitações na adequação à Diretiva *RoHs*, de forma a propor medidas para melhorar a qualidade do revestimento sem que a mesma seja desobedecida;
- Realização da coleta de amostras na LZC#2 durante 60 dias, seguindo os seguintes critérios: materiais semelhantes e revestimentos Z100 ou Z275 (grande maioria da produção);
- Comparação, do teor de chumbo, entre o pote de zinco e o produto zincado, através da realização de análises de composição química, buscando uma possibilidade de otimização na adequação da LZC#2 à diretiva RoHs;
- Realização de medições de rugosidades das amostras antes do processo, para que se permita fazer uma análise qualitativa da relação entre aparência do revestimento e rugosidade inicial;
- Propor alternativas para diminuição do defeito de “cristal miúdo”.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A Corrosão e o Processo de Zincagem Contínua

De acordo com Vicente Gentil (1996, p. 1),

Pode se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e seu meio operacional representa alterações indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para uso.

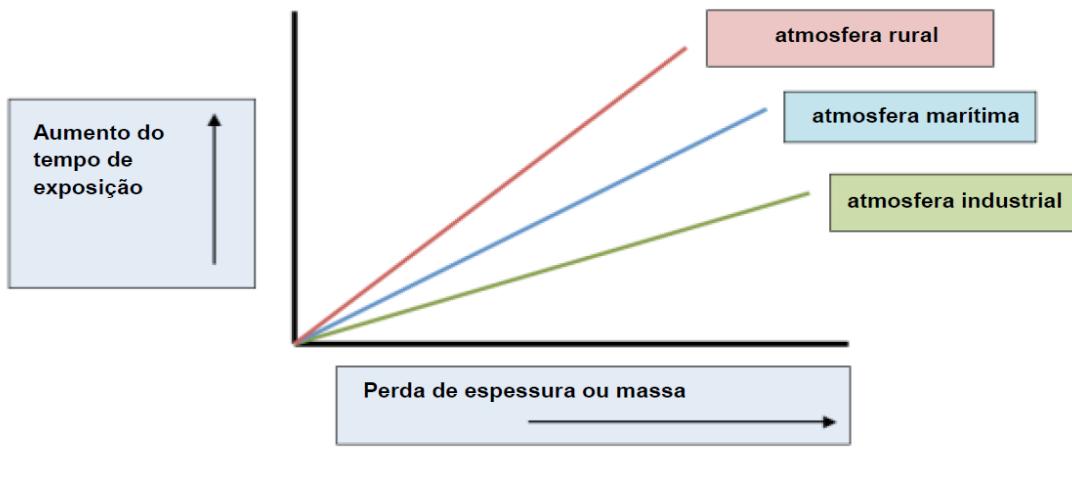
Ainda segundo Vicente Gentil (1996, p.1), “Sendo, a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam.”

É indiscutível que o aço é de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer país, por ser um material de diversa aplicação, ótima resistência, reciclável e relativamente barato. Porém ele é altamente susceptível a corrosão.

Felizmente, há muitos revestimentos que podem ser aplicados ao aço de maneira econômica para conferir ao aço proteção contra corrosão suficiente, de modo que ele possa ser utilizado para uma variedade de aplicações exigidas.

Para um revestimento galvanizado, por exemplo, o índice de corrosão é normalmente linear na maior parte dos ambientes, isto é, a espessura de revestimento aumentada em duas vezes significa o dobro do tempo de “vida”. Claro que alguns ambientes são mais ou menos corrosivos que outros; portanto, a “vida” do revestimento varia consideravelmente em diferentes “tipos de ambiente”. O seu comportamento é mostrado na figura 1:

Figura 1: Estimativa de vida útil de aços zinados em diferentes tipos de ambiente



A galvanização é um dos mais efetivos e econômicos processos empregados para proteger o aço contra a corrosão. A galvanização por imersão a quente envolve imergir o substrato com superfície limpa em um banho de zinco fundido, o qual reage com o ferro formando uma camada (GALVANIZING ASSOCIATION, 1965). O revestimento de zinco consiste de uma camada externa de zinco puro e de uma série de compostos intermetálicos zinco-ferro presentes entre a camada externa de zinco e o substrato de aço. Cada uma dessas regiões pode ser afetada pelo tempo de imersão e pela temperatura do banho, assim como pela composição química do banho e do substrato do aço (MARDER, 2000). A qualidade do revestimento é influenciada ainda pelas operações de preparação da peça, operações e tratamento após galvanização, e também pelo estado superficial da peça a ser galvanizada (MELHEM, 1979). A camada contínua de zinco na superfície do aço serve como uma barreira mecânica e separa o aço da atmosfera ou ambiente corrosivo. O zinco adere à superfície do aço através da formação de uma camada de liga Fe-Zn, sobre a qual deposita-se uma camada de zinco puro de espessura correspondente a agressividade do meio ao qual a peça será submetida. Esta espessura é determinada por um sistema de Navalhas de Ar controlando a camada de zinco desejada àquela aplicação ou norma. Com isso garante a peça uma maior durabilidade, já que a corrosão do zinco é de 10 a 50 vezes menor que no aço em áreas industriais e de 50 a 350 vezes em áreas marinhas.

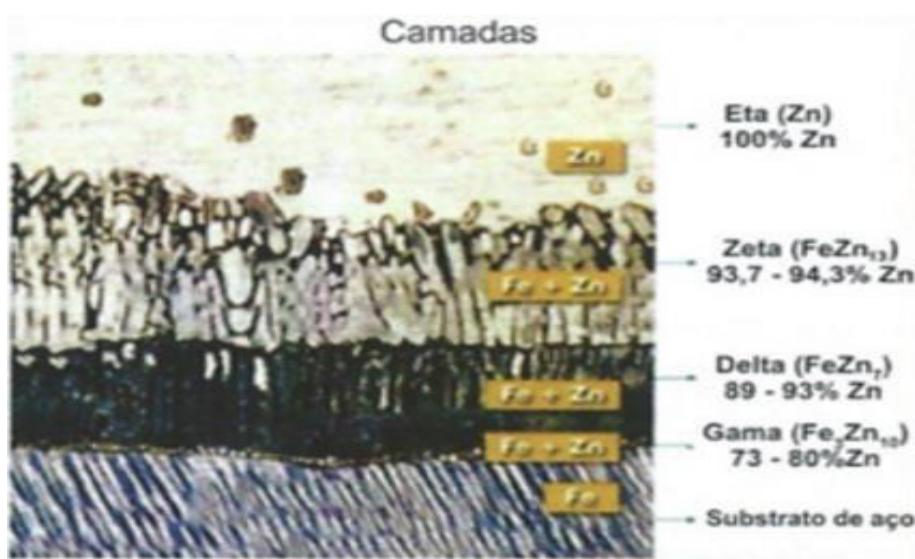
O zinco é o metal mais indicado e mais utilizado para a proteção de superfícies metálicas contra a corrosão, devido à sua facilidade de aplicação e seu baixo

custo. Através de cálculos termodinâmicos e de medidas de potencial de eletrodo, vemos que o zinco é um metal bastante reativo, portanto com uma tendência apreciável para se corroer. Na prática, o zinco sacrifica-se sofrendo corrosão, protegendo assim o metal-base. Os revestimentos galvanizados possuem uma camada externa de zinco puro e é esta camada que proporciona a longa vida de existência deste filme protetivo, sendo proporcional à espessura total da camada.

O revestimento de zinco consiste de uma camada externa de zinco puro e de uma série de compostos intermetálicos zinco-ferro presentes entre a camada externa de zinco e o substrato de aço. Cada uma dessas regiões pode ser afetada pelo tempo de imersão e pela temperatura do banho, assim como pela composição química do banho e do substrato do aço.

A formação do revestimento durante o processo de zincagem se dá de acordo com as reações: dissolução do ferro, combinação do zinco e ferro para formar compostos ferro-zinco e resfriamento e cristalização da camada de zinco puro. Essa camada forma-se no momento em que as peças são retiradas do banho de zinco. Portanto, o revestimento de zinco consiste essencialmente de duas partes: camada de liga de zinco e ferro (compostos intermetálicos) em contato com o metal-base e a camada externa pura (ver figura 2). Ambas contribuem para a resistência à corrosão e vida do revestimento.

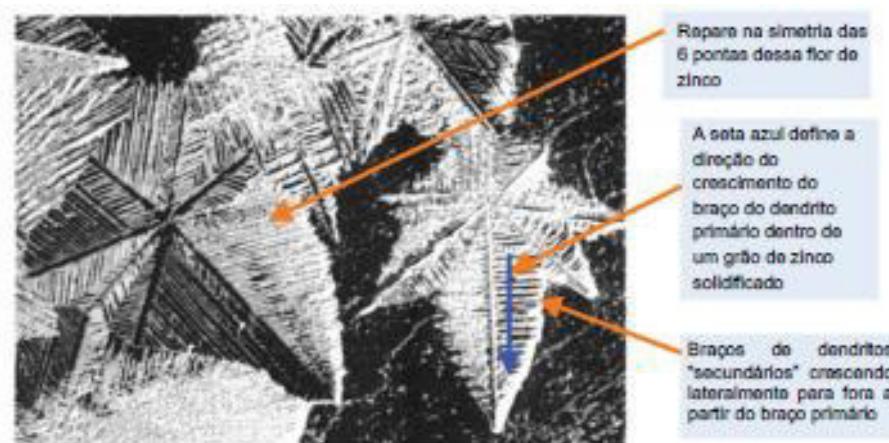
Figura 2: Camadas do revestimento



Fonte: ICZ (2014)

Como já informado anteriormente, as características do produto zinornado dependem da presença e distribuição dos compostos intermetálicos ferro/zinco no revestimento. O desenvolvimento e a espessura de cada um depende de fatores como composição química do banho e do aço, tempo de imersão, taxa de resfriamento e **rugasidade do substrato**. A solidificação do revestimento de zinco puro é caracterizada pela cristalização de uma camada muito fina do metal. Os cristais formados são chamados de flor de zinco ou cristais de zinco (ver figura 3).

Figura 3: Flor de zinco



Fonte: GalvInfoNote 2.6, página 1. 2011

O Instituto de Metais Não Ferrosos por meio do informe GalvInfoNote 2.6 (2011, p.1) traz um pouco da teoria das flores de zinco. De forma breve, as flores de zinco se desenvolvem quando o zinco fundido aderente à chapa de aço e é resfriado abaixo do ponto de fusão do zinco, que é aproximadamente 420°C. A essa temperatura, os átomos aleatoriamente organizados no zinco líquido começam a se posicionar em um alinhamento muito organizado. Isso acontece em muitos locais aleatórios no revestimento de zinco fundido. A transformação de um alinhamento desordenado de átomos (estado líquido) em um alinhamento ordenado é o processo de solidificação ou cristalização. À medida que átomos individuais no zinco fundido se ligam a um grão de solidificação (causando o crescimento do grão), eles o fazem de maneira organizada e formam uma ordem distinta, ou cristal. No caso do zinco, os cristais se formam com simetria hexagonal (seis pontas). À medida que os grãos de zinco sólidos aumentam, os átomos individuais de zinco se organizam em uma simetria hexagonal da flor de zinco final, muitas vezes visível. Quando o revestimento está completamente solidificado, as flores de zinco individuais definem grãos de zinco individuais. “Nucleação” é o termo utilizado para

definir o processo de transformação de átomos de metal fundido arranjados aleatoriamente numa pequena e organizada formação de átomos nos cristais de “semente” durante o estágio inicial de solidificação. Um alto índice de nucleação durante o processo de congelamento tende a causar a formação de um grande número de pequenos grãos na estrutura solidificada final, enquanto um baixo índice tende a favorecer o crescimento em grãos maiores.

Há outro aspecto do processo de solidificação que leva ao padrão de flores de zinco no revestimento zincado, que é o crescimento “dendrítico” (no sentido de “em forma de árvore”). O crescimento dendrítico faz com que os grãos individuais em crescimento (solidificantes) passem a crescer no material fundido (o revestimento de zinco) com uma borda arredondada distinta. Um braço “primário” do dendrito está identificado na figura 10. Há braços de dendritos secundários que crescem lateralmente, se afastando dos braços de dendritos “primários”. O crescimento dendrítico dos grãos durante a solidificação de metais é muito comum. A razão pela qual esses dendritos são prontamente visíveis em um revestimento galvanizado é que vemos, basicamente, uma versão bidimensional de uma estrutura de grão solidificada e dendrítica, conforme ela foi fundida. Lembre-se que o revestimento tem menos de 0,001 pol. (25 nm) de espessura, consideravelmente menor que o diâmetro de uma flor de zinco. Em outros metais (substrato de aço, por exemplo), a estrutura de grãos dendrítica tridimensional original é subsequentemente quebrada em grãos muitos menores, mais equiaxiais. Isto ocorre devido aos efeitos de laminação a quente, laminação a frio e recristalização durante o processo de recozimento da chapa. O índice de crescimento de braços de dendritos durante a solidificação de um revestimento galvanizado compete com o índice de nucleação de novos grãos no zinco fundido. Este processo determina o tamanho final da estrutura completamente solidificada. No caso da Figura 3, que é um revestimento galvanizado com um padrão de flor de zinco grande e definido, o índice de crescimento de dendritos dominou o processo de solidificação, levando a um pequeno número de grandes flores de zinco. Uma característica de tais flores de zinco é que elas são mais espessas no centro e mais finas nas bordas, ou no limite dos grãos.

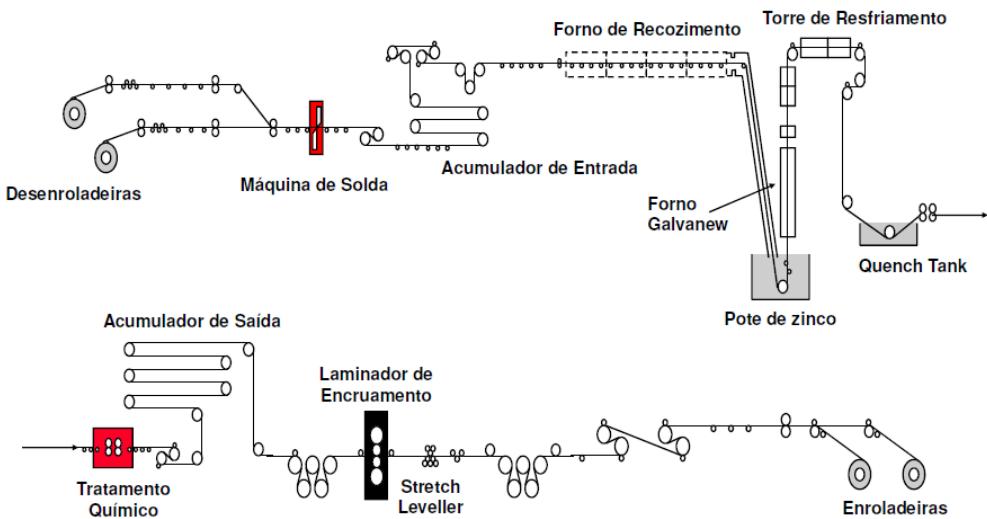
A natureza e o índice de crescimento dendrítico durante o processo de solidificação é afetado pela presença de outros elementos metálicos no metal fundido. Eles podem ser elementos de liga adicionados intencionalmente no banho de zinco. No

caso de revestimentos de galvanização em chapas de aço, a razão mais comum para o padrão de crescimento dendrítico bem definido é a **presença de chumbo no revestimento**. A sua adição é realizada para aumentar a fluidez do banho (devido à redução da tensão superficial), reduzir o ataque do zinco ao substrato de aço e proteger a cuba contra o ataque excessivo do zinco, impedindo o seu desgaste prematuro. O chumbo ainda favorece a formação de espessuras de camada menores, auxiliando no controle do crescimento dos compostos intermetálicos nos aços reativos e reduzindo o consumo de zinco, levando assim a benefícios financeiros importantes para a indústria de galvanização. Entretanto, o **chumbo é considerado nocivo ao meio ambiente**, sendo além disso um elemento acumulativo no organismo humano, aumentando sua concentração até alcançar níveis tóxicos.

### 3.2 A Linha de Zincagem Contínua 2 da CSN

A figura 4 mostra a representação esquemática da CSN. Trazer uma explicação básica do funcionamento da linha também é relevante para que o trabalho seja entendido de forma satisfatória.

Figura 4: Representação esquemática da LZC#2.



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

### 3.2.1 Dados Gerais

A LZC#2/CSN iniciou a operar no ano de 1989. Sua capacidade de produção é 280.000 t/ano e sua velocidade máxima de operação é 122 m/min. O Material Plano Zincado fabricado na linha tem larga aplicação onde características de resistência a corrosão, propriedades mecânicas e facilidade de pintura são exigidos. Desta forma, os equipamentos atendem os mercados mais diversos, desde fabricação de telhas e tubos até capôs de automóveis e peças estruturais das indústrias civil e automobilística. Os revestimentos que correspondem a maioria da produção da linha são o Z100 e o Z275, que tem grande aplicação na construção civil. Os revestimentos de zinco classificam-se em: zinco puro denominado cristal normal e cristais minimizados (GI) e liga zinco-ferro (GA).

### 3.2.2 Seção de Entrada

A desenroladeira é o lugar onde é posicionada a matéria-prima, geralmente bobinas vindas da laminação a frio, para o início do processo de zincagem contínua. A linha possui duas desenroladeiras para que o processo não seja interrompido ao fim de cada bobina de entrada, ou seja, ao terminar de desenrolar toda a bobina já tem outra preparada. A figura 5 mostra as desenroladeiras da LZC#2.

Figura 5: Desenroladeiras



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

A máquina de solda tem a função de soldar o fim de uma bobina em processo com o início de uma nova bobina. Tem grande importância para a continuidade da linha. A solda realizada é do tipo solda por resistência elétrica por costura. A figura 6 abaixo mostra a máquina da linha.

Figura 6: Máquina de Solda



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

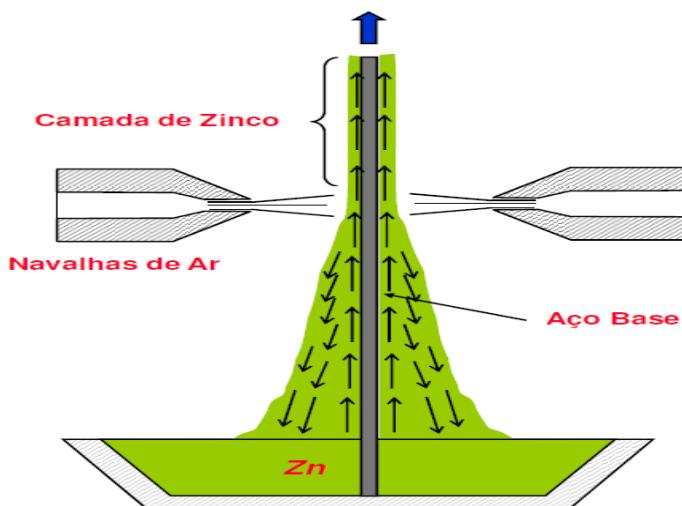
Já o acumulador de entrada (Loop Car) serve para acumular uma quantidade de material em processo para que não precise reduzir a velocidade de operação quando a velocidade na entrada precisar ser reduzida e zerada para a realização da solda, não comprometendo a continuidade do processo.

### 3.2.3. Seção de Processo

O Forno de Recozimento da LZC#2 é dividido em quatro etapas: aquecimento, encharque, resfriamento lento e resfriamento rápido. No aquecimento ocorre a limpeza (remoção de óleos e resíduos) da tira e preparação para o recozimento. No encharque ocorre o recozimento através de tubos radiantes (Temperatura e pressão bem controladas, além de uma atmosfera composta por Nitrogênio e Oxigênio), contribuindo para melhora das características mecânicas do material. As seções de resfriamento têm o objetivo de acertar a temperatura da tira para próxima a temperatura do banho.

O Pote de Zinco é o ponto crucial do processo, onde a tira vai imergir no zinco fundido a aproximadamente 460°C. O zinco adere à superfície do aço através da formação de uma camada de liga Fe-Zn, sobre a qual deposita-se uma camada de zinco puro de espessura de acordo com a necessidade do cliente, ou seja, da agressividade do meio a qual a peça será submetida. Essa espessura é determinada por um sistema de navalhas de ar que incide um fluido sobre a tira. O controle é feito ajustando pressão dos sopradores e distância entre as navalhas (ver figura 7).

Figura 7: Controle de Revestimento



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

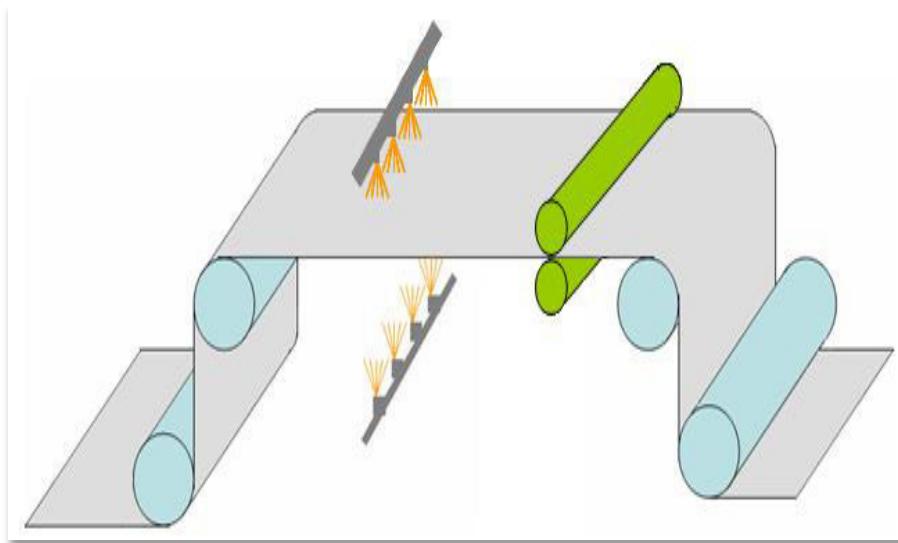
O Forno Galvanneal realiza o reaquecimento da tira já revestida com zinco. Tem o objetivo de promover a difusão do Fe do aço base no revestimento de zinco. O revestimento passa a ser uma liga Zn-Fe.

E a Torre de Resfriamento junta ao Quench Tank tem como função principal resfriar a tira para tratamento químico (cromatização) e finalização do processo.

### 3.2.4 Seção de Saída

Se inicia com tratamento Químico (Cromatização) que tem o objetivo de preservar temporariamente o aspecto superficial da tira, mantendo o brilho da superfície recém zincada durante o transporte e estocagem, além de evitar a corrosão branca. É aplicado em forma de spray (figura 8). Há formação de um filme de passivação na superfície da chapa zincada.

Figura 8: Tratamento químico: Cromatização



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

O Acumulador de Saída tem basicamente a mesma função do acumulador de entrada, garantir a continuidade do processo. A diferença é que esse acúmulo de material serve para manter a velocidade do processo quando é feito os procedimentos para bobinar a tira zincada.

Já o laminador de Encruamento é responsável por melhorias de propriedades mecânicas, de superfície (rugosidade), melhoria da forma e redução de defeitos. Além disso elimina o patamar de escoamento.

Figura 9: Laminador de Encruamento



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

E, para finalizar o processo, o material chega nas enroladeiras “bobinando” a tira zincada. Uma bobina na entrada (bobina mãe) pode se tornar duas ou três bobinas zincadas na saída, de acordo com o pedido do cliente.

### 3.2.5 Características das tiras zincadas

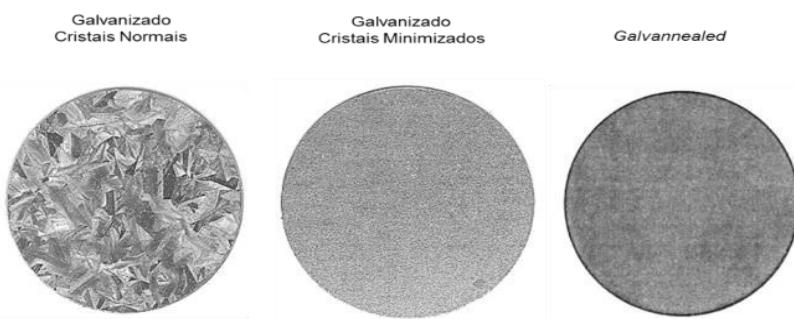
Os produtos zincados da LZC#2 podem ser divididos em 3 tipos, baseados na sua aparência superficial. A figura 10 mostra de forma clara a diferença entre eles.

a) Cristais Normais: Revestimento de Zinco puro obtidos por solidificação normal da camada depositada, resultando numa superfície com aparência de flores. Esse tipo de revestimento é mais indicado para usos gerais, principalmente aplicações no segmento da construção civil tais como coberturas, perfis estruturais, dentre outros.

b) Cristais Minimizados: Revestimento obtido por solidificação acelerada através do minimizador de cristais que realiza aplicação, na superfície recém zincada, de um fluido refrigerante (bifosfato de amônia). Esse tipo de revestimento é recomendado para aquelas aplicações onde os requisitos de superfície não são atendidos pelo revestimento com cristais normais, sendo destinados para usos onde é utilizado pintura, principalmente na indústria automobilística e utilidades domésticas (linha branca). A superfície apresenta excelente acabamento superficial e ausência dos cristais de zinco (figura 7).

c) Galvannealed: Revestimento formado através da transformação do revestimento de zinco puro em liga Zn-Fe por meio de tratamento térmico. É composto por camadas das fases do sistema Zn-Fe. O revestimento é processado no forno após a saída do pote de zinco para promover a difusão de Fe do aço base para o interior da camada de revestimento de zinco. Tem aparência de cinza fosco (ver figura 10).

Figura 10: Aparência superficial dos produtos Zincados



Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

### 3.3. Diretiva RoHS

RoHS (*Restriction of Certain Hazardous Substances*) é uma diretiva europeia que restringe o uso de certas substâncias perigosas em processos de fabricação de produtos. É também conhecida como “a lei do sem chumbo” (*lead-free*) porém esta diretiva também trata de outras substâncias, por exemplo: cadmio, mercúrio e cromo hexavalente. A Diretiva RoHS exige que não haja no **produto final** chumbo, mercúrio, cromo hexavalente, bifenóis polibromados e éter difenil-polibromado (retardante de chama) acima de 0,1% e cádmio acima de 0,01% de material homogêneo.

De acordo com Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Adequação à Diretiva RoHS, 2017), a metodologia utilizada para a certificação RoHS em produtos zincados é a realização de análises de química por meio de Espectrômetro de Emissão Atômica de plasma.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Metodologia de Amostragem

As amostras foram coletadas durante 60 dias e a escolha de quais materiais seriam analisados foi feita de acordo com os seguintes critérios: materiais semelhantes, revestimentos Z100 ou Z275 (pois correspondem a maioria da produção) e cristal normal. No total foi realizada a coleta de 40 amostras na entrada e 40 no final do processo.

O primeiro passo foi, junto com o engenheiro da área, selecionar quais bobinas seriam analisadas, seguindo os critérios já citados. Após essa fase de planejamento, as amostras da entrada foram cortadas para medições de rugosidades. Essas amostras foram cortadas após a bobina ser preparada (depois de descartada o início da tira fora de “bitola”) e identificadas.

Com as amostras das bobinas na entrada já coletadas e identificadas, o próximo passo foi avisar na saída (final do processo) para retirar as amostras das mesmas bobinas coletadas na entrada, mas agora já zincadas. Em seguida, na sala de controle do pote de zinco, o processo foi acompanhado (para verificar se não havia nenhuma anomalia) e os parâmetros foram registrados. Nesse momento também foram coletadas amostras do banho de zinco (figura 11) no momento em que a tira analisada estava passando pela seção do pote para que fosse determinada a composição química do banho. E, finalmente, com as amostras coletadas e os parâmetros anotados os próximos passos foram: levar as amostras da entrada para medir as rugosidades e levar as amostras do banho de zinco e das bobinas já zincadas para análises no Centro de Pesquisa da CSN.

Figura 11: Amostra banho de zinco



(Fonte: Autor)

## 4.2 Metodologia de Análise

### 4.2.1 Quanto às rugosidades

As medições das rugosidades ao longo de cada **amostra da entrada** foram feitas em três pontos (BORDA - CENTRO - BORDA), utilizando um Rugosímetro Mitutoyo SJ-301 (figura 12) com *cut-off* (minimiza o efeito do desvio de forma na avaliação da rugosidade) ajustado em  $0,8 \mu\text{m}$ . As medições foram realizadas na mesa de inspeção da LZC#2.

Em seguida, obedecendo às sugestões do engenheiro responsável, foi solicitado um corte  $5 \times 5 \text{ cm}$  de cada **amostra zincada** para registrar imagens no microscópio ótico da LZC#2 de cada uma dessas amostras seguindo um mesmo padrão e um aumento de 12,5x (figura 13).

Com as rugosidades e as imagens que mostram a aparência dos cristais de todas as amostras (ver apêndice A) em mãos, o objetivo foi fazer uma **análise (comparação) qualitativa da relação: tamanho do cristal x rugosidade.**

Figura 12: Rugosímetro



(Fonte: Autor)

Figura 13:Fotografia amostra BZ, aumento de 12,5x



(Fonte: Autor)

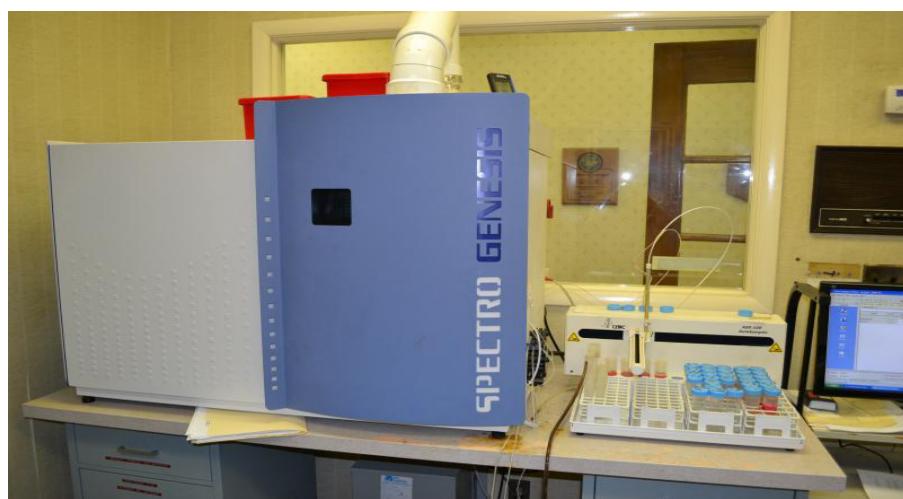
### 4.2.2 Quanto à relação do teor de chumbo no banho e na bobina zincada:

A primeira etapa dessa análise foi estudar e entender a norma RoHs. Principalmente, compreender que o limite máximo de chumbo é fiscalizado **no produto final e não no banho**, como é feito atualmente na linha. Daí vem a importância de verificar se há diferença na composição do banho e no produto zincado.

As análises de composição química das amostras das bobinas zincadas e do banho de zinco foram feitas no Centro de Pesquisa da CSN através de um Espectrômetro de Emissão Atômica com plasma acoplado (ver figura 14), o mesmo utilizado no procedimento padronizado de fiscalização indicado pela diretiva RoHs, dando maior credibilidade ao presente trabalho.

Após o recebimento dos resultados das análises de composição química, foi feito um estudo cuidadoso relacionando o teor de chumbo no banho de zinco e na bobina zincada.

Figura 14: Espectrômetro de Emissão Atômica



(Fonte: CSN)

## 5 RESULTADOS

A tabela 1, apresentada abaixo, traz a identificação das amostras, os parâmetros de processo, o tipo de revestimento e as rugosidades de todas as bobinas analisadas.

Tabela 1: Parâmetros de processo, rugosidades ( $\mu\text{m}$ ) e tipo de revestimento das bobinas analisadas

TIPO DE REVESTIMENTO	LOTE	PH	TR	T BANHO	RUGOSIDADE SUPERIOR borda/centro/borda	RUGOSIDADE INFERIOR borda / centro / borda
Z100	J259260100	687	775	466	1,15 / 1,02 / 1,13	1,13 / 1,03 / 0,96
	J259260200	700	776	461	1,10 / 1,01 / 1,04	1,20 / 0,99 / 0,96
	J259270100	724	778	462	0,93 / 0,96 / 1,03	1,08 / 0,88 / 0,96
	J259270200	704	773	461	0,99 / 0,89 / 1,10	1,11 / 0,95 / 1,00
	J259240100	700	776	462	1,06 / 1,04 / 1,10	1,07 / 1,01 / 1,01
	J259240200	701	777	463	1,40 / 0,97 / 1,53	1,54 / 1,25 / 1,26
	J259360200	703	774	462	1,10 / 1,20 / 1,30	1,05 / 1,15 / 1,23
Z100	J284180100	719	775	462	1,23 / 1,36 / 1,57	1,79 / 1,34 / 1,62
	J284130100	729	782	461	1,12 / 0,90 / 1,07	1,18 / 0,95 / 1,18
	J284180200	720	778	459	1,36 / 1,51 / 1,44	1,28 / 1,60 / 1,74
	J284130200	735	777	460	1,11 / 0,95 / 1,05	1,14 / 1,09 / 1,01
	J284180300	713	780	464	1,67 / 1,79 / 1,71	1,27 / 1,43 / 1,50
	J284130300	719	779	466	0,98 / 0,93 / 0,90	1,10 / 1,07 / 0,98
	J287580101	720	790	463	0,81 / 0,68 / 0,67	0,79 / 0,63 / 0,76
Z100	J307280600	738	830	460	1,04 / 0,96 / 0,85	0,96 / 0,74 / 0,78
	J284170201	742	849	469	1,17 / 1,16 / 1,14	1,13 / 1,06 / 1,10
	J315590201	724	825	463	1,27 / 1,05 / 1,03	1,18 / 1,29 / 1,01
	J307172001	761	849	466	1,03 / 0,87 / 0,93	0,72 / 0,77 / 0,87
	J307171801	735	793	465	1,05 / 0,93 / 1,17	1,28 / 1,07 / 1,06
	J307172101	760	848	465	0,80 / 0,80 / 0,85	0,80 / 0,75 / 0,82
	J307990101	740	843	465	1,15 / 0,95 / 0,86	1,10 / 1,02 / 1,08
Z275	J307180200	731	810	466	0,51 / 0,70 / 0,63	0,94 / 0,79 / 0,80
	J307180600	719	814	463	0,86 / 1,03 / 1,08	0,63 / 0,73 / 0,75
	J307180100	726	801	460	0,78 / 0,75 / 0,75	0,89 / 0,91 / 0,80
	J307180700	714	807	464	0,97 / 0,78 / 0,64	0,99 / 1,01 / 0,89
	J307180800	724	812	463	0,74 / 0,70 / 0,86	1,03 / 0,74 / 0,86
Z100	J192420700	738	850	464	0,96 / 0,91 / 1,57	1,18 / 1,23 / 1,81
	J192420800	750	837	464	1,10 / 0,88 / 1,48	1,35 / 1,53 / 1,40
	J192420900	750	839	465	1,13 / 1,02 / 1,08	1,17 / 0,87 / 1,83
	J192421100	731	835	466	1,16 / 0,88 / 1,57	1,99 / 1,62 / 1,89
	J192421200	735	836	465	1,12 / 0,90 / 1,03	1,21 / 1,15 / 1,35
Z275	J319290100	700	803	459	1,42 / 1,40 / 1,40	1,17 / 1,09 / 1,42
	J319790100	705	805	459	1,43 / 1,42 / 1,46	1,12 / 1,09 / 1,11
	J319250200	730	803	459	0,80 / 0,79 / 0,85	0,91 / 0,83 / 0,82
	J319140100	708	805	462	0,75 / 0,78 / 0,78	0,92 / 0,84 / 0,84
	J203890200	744	865	473	1,61 / 1,19 / 1,39	1,45 / 1,41 / 1,37
	J250930102	720	805	470	1,23 / 1,23 / 1,09	1,31 / 1,17 / 1,19
	J342650100	734	797	467	0,85 / 0,90 / 0,88	0,84 / 0,82 / 0,79
Z275	J342650200	733	798	465	0,87 / 0,83 / 0,74	0,83 / 0,66 / 0,66
	J350940100	728	803	465	1,23 / 1,23 / 1,09	1,30 / 1,17 / 1,19

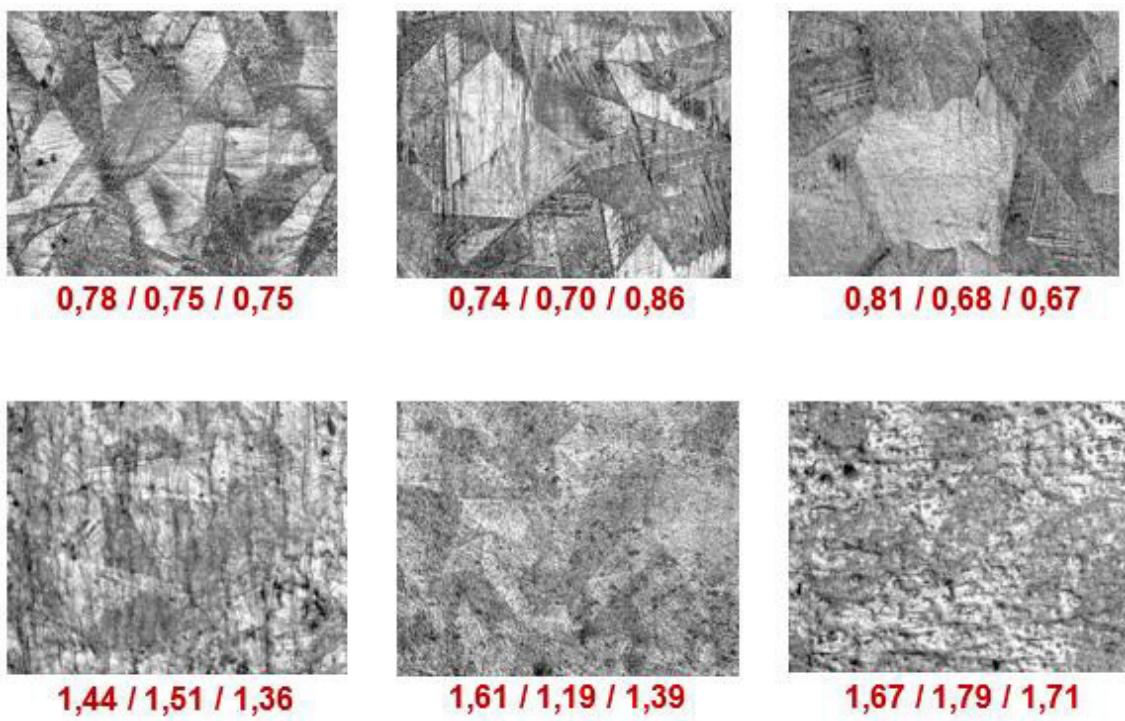
Fonte: Autor

Coletar todos os parâmetros tabelados acima foi de relevante importância pois, para que os resultados desse trabalho fossem confiáveis, o processo de zincação continua devia estar isento de qualquer tipo de anomalia.

A partir de um estudo empírico feito anteriormente por engenheiros responsáveis pela área, foi adotado como, aproximadamente, 0,8 ( $\mu\text{m}$ ) o valor ideal de rugosidade do substrato para os revestimentos Z100 e Z275.

O estudo sobre a relação entre a rugosidade do material na entrada e a aparência do cristal (flores de zinco) do material zincado mostrou que as bobinas que entraram no processo de zincagem contínua com rugosidades muito acima de 0,8  $\mu\text{m}$  apresentaram problemas com a aparência do cristal, as flores ou cristais de zinco se mostraram visivelmente menores do que o desejado pelos clientes. Já as bobinas que entraram no processo com rugosidades próximas a 0,8  $\mu\text{m}$  apresentaram melhores aparências das flores de zinco. Tal fato pode ser explicado considerando a hipótese de que os picos de rugosidade atrapalham o desenvolvimento ou crescimento dos dendritos, atuando como uma espécie de barreira, tornando assim os cristais menores. A figura 15 traz uma comparação qualitativa entre as bobinas, tomando como referência o valor de 0,8  $\mu\text{m}$ , com rugosidades altas e as com rugosidades próximas a ideal, mostrando a aparência dos cristais ou flores de zinco das mesmas. As imagens foram feitas no microscópio ótico com aumento de 12,5x, utilizando mesmo padrão de área e distância.

Figura 15: Rugosidades x Aparência dos cristais



Fonte: Autor

A tabela 2, apresentada abaixo, traz os resultados obtidos da análise comparativa entre o teor de chumbo no banho de zinco e no produto zincado. Os teores

de chumbo nas amostras foram encontradas utilizando o mesmo método indicado pela diretiva RoHs, ou seja, através de um Espectrômetro de Emissão Atômica com plasma acoplado.

Tabela 2: Teor de Chumbo no banho de zinco x Teor de Chumbo na bobina zincada

LOTE	TEOR DE PB NO BANHO DE ZINCO	TEOR DE PB NO ZINCADO
J259260100	0,098	0,0608
J259260200	0,098	0,0672
J259270100	0,11	0,067
J259270200	0,11	0,0675
J259240100	0,11	0,0626
J259240200	0,11	0,0707
J259360200	0,11	0,069
J284180100	0,1	0,0797
J284130100	0,1	0,0588
J284180200	0,1	0,0659
J284130200	0,1	0,0662
J284180300	0,1	0,0589
J284130300	0,1	0,0613
J287580101	0,102	0,0831
J307280600	0,102	0,0783
J284170201	0,1	0,0802
J315590201	0,1	0,08
J307172001	0,1	0,0836
J307171801	0,1	0,0735
J307172101	0,1	0,0835
J307990101	0,1	0,0792
J307180200	0,103	0,0822
J307180600	0,103	0,0831
J307180100	0,103	0,0812
J307180700	0,103	0,0784
J307180800	0,103	0,0834
J192420700	0,096	0,07
J192420800	0,096	0,0788
J192420900	0,096	0,0822
J192421100	0,096	0,0671
J192421200	0,096	0,0771
J319290100	0,097	0,0745
J319790100	0,097	0,0737
J319250200	0,097	0,0773
J319140100	0,097	0,0706
J203890200	0,093	0,0716
J250930102	0,099	0,0789
J342650100	0,099	0,0795
J342650200	0,099	0,0784
J350940100	0,099	0,0789

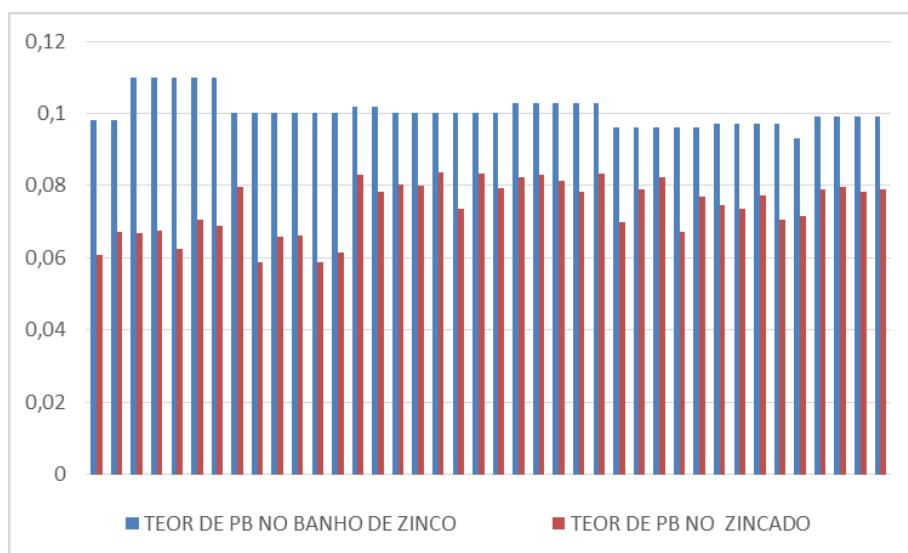
Fonte: Autor

O estudo sobre a relação entre o teor de chumbo no banho de zinco e no produto zincado mostrou resultados que poderão ser usados para melhoria da linha, diminuindo o problema de KM (cristal miúdo). Utilizando o mesmo método de controle de chumbo feito pela linha de zincagem 2 atualmente, a média do teor de chumbo no banho em porcentagem foi 0,100. No entanto, usando o método da Norma RoHs (análise

química no produto zincado) o teor médio de chumbo foi 0,072 (%) e o valor máximo de chumbo encontrado em relação a todas as amostras zincadas foi de 0,0836 (%). Isso prova que essa diferença se mantém constante e que o controle de chumbo feito pela LZC#2 para adequação a Norma pode ser otimizado, lembrando que uma maior quantidade de chumbo melhoraria de fato a aparência dos cristais de zinco, contribuindo para uma considerável diminuição do problema de cristais miúdos.

Essa diferença pode ser vista facilmente nos gráficos 1 e 2 abaixo:

Gráfico 1: Pb no banho x Pb na bobina zincada (%)



Analizando os gráficos 1 e 2, percebe-se uma diferença constante de aproximadamente 20% entre os teores de chumbo no banho de zinco e no produto zincado.

Com isso, surge a possibilidade de elevar os níveis de chumbo no banho de zinco até aproximadamente 0,120 (%). Assim, de acordo com os gráficos, os níveis de chumbo no produto zincado subiriam até aproximadamente 0,100 (%), melhorando a aparência dos cristais sem desobedecer ao limite máximo estabelecido pela diretiva RoHs.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nas pesquisas realizadas e nos resultados obtidos e apresentados no presente projeto foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- O teor de chumbo no banho de zinco influencia diretamente no aspecto do revestimento, ou seja, no tamanho do cristal. Conforme a literatura, isso se deve a presença do chumbo diminuir a energia interfacial sólido – líquido em revestimentos solidificantes, levando a um aumento na velocidade do crescimento de dendritos, resultando em cristais ou flores de zinco maiores. Tal fato foi provado quando o problema de “cristal miúdo” teve um grande crescimento no ano de 2011, após a redução do teor de chumbo no banho de zinco de 0,120% a 0,100%, como tentativa de adequação da linha à diretiva RoHs;

- O teor de chumbo no produto final foi em média 20% menor, comparado com o teor de chumbo no banho de zinco. Portanto, a metodologia de adequação à diretiva RoHs feita pela LZC#2/CSN pode ser melhorada já que atualmente o controle do teor máximo de chumbo é feito no banho de zinco, porém a diretiva leva em consideração o teor de chumbo no produto final;

- Os materiais que entraram no processo com rugosidades médias muito acima das demais analisadas apresentaram o defeito de “cristal miúdo”, ou seja, a rugosidade do substrato é um fator muito importante para que se obtenha o revestimento desejado.

- Como alternativas para diminuição do defeito de “cristal miúdo” pode-se aumentar com considerável margem de segurança, de 10 a 15% o teor de chumbo no banho de zinco, o que levaria a um aumento no tamanho do cristal de zinco, sem desobedecer o à diretiva RoHs. Bem como estabelecer uma padronização de rugosidade para os materiais que passarão pelo processo.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar os mesmos testes de composição química para diferentes tipos de materiais e de revestimentos, com o objetivo de descobrir se ocorre a mesma diferença no teor de chumbo entre banho de zinco e produto final;
  
- Encontrar possíveis substitutos para o chumbo no banho de zinco, por exemplo, o bismuto, que já vem sendo muito estudado e tem obtido bons resultados. Essa opção se mostra, em um futuro próximo, como tendência principalmente por questões ambientais.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.

GOES, R. S. Galvanização por imersão a quente. **ICZ**, São Paulo, v.1, n.1, 2014.  
Disponível em <<http://www.icz.org.br>>.  
Acesso em: 19 set. 2017.

ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Curso de zincagem por imersão a quente**. Serra Negra, SP, 1976.

GALVANIZING ASSOCIATION. **General galvanizing practice**. London: White Friars Press Ltda, 1965.

GALVINFO CENTER. Processos de Revestimento e Tratamentos de Superfície. **O Papel do Alumínio na Galvanização Contínua por imersão a quente**. São Paulo; v. 2.4, n. Rev 1.1, mar. 2009.

GALVINFO CENTER. Processos de Revestimento e Tratamentos de Superfície. **Flor de Zinco em Chapa de Aço Galvanizado por imersão a quente**. São Paulo; v. 2.6, 2011, n Rev 1.3, ago. 2011.

MARDER, A. R. **The Metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science**, v.45, p. 191-271, 2000.

MELHEM, D. **Manual de galvanização**. 1º ed., 1979.

ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão. **Corrosão**.  
Disponível em: <http://www.abraco.org.br>  
Acesso em 23 junho 2017.

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

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

Disponível em: <<http://www.galvanizeit.org>>.

Acesso em: 20 abril 2017.

ICZ – Instituto de Metais Não Ferrosos. **Portal da Galvanização**

Disponível em: <<http://www.icz.org.br/portaldagalvanizacao>>

Acesso em: 21 abril 2017

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. **A empresa**

Disponível em: <<http://www.csn.com.br>>

Acesso em: 03 maio 2017

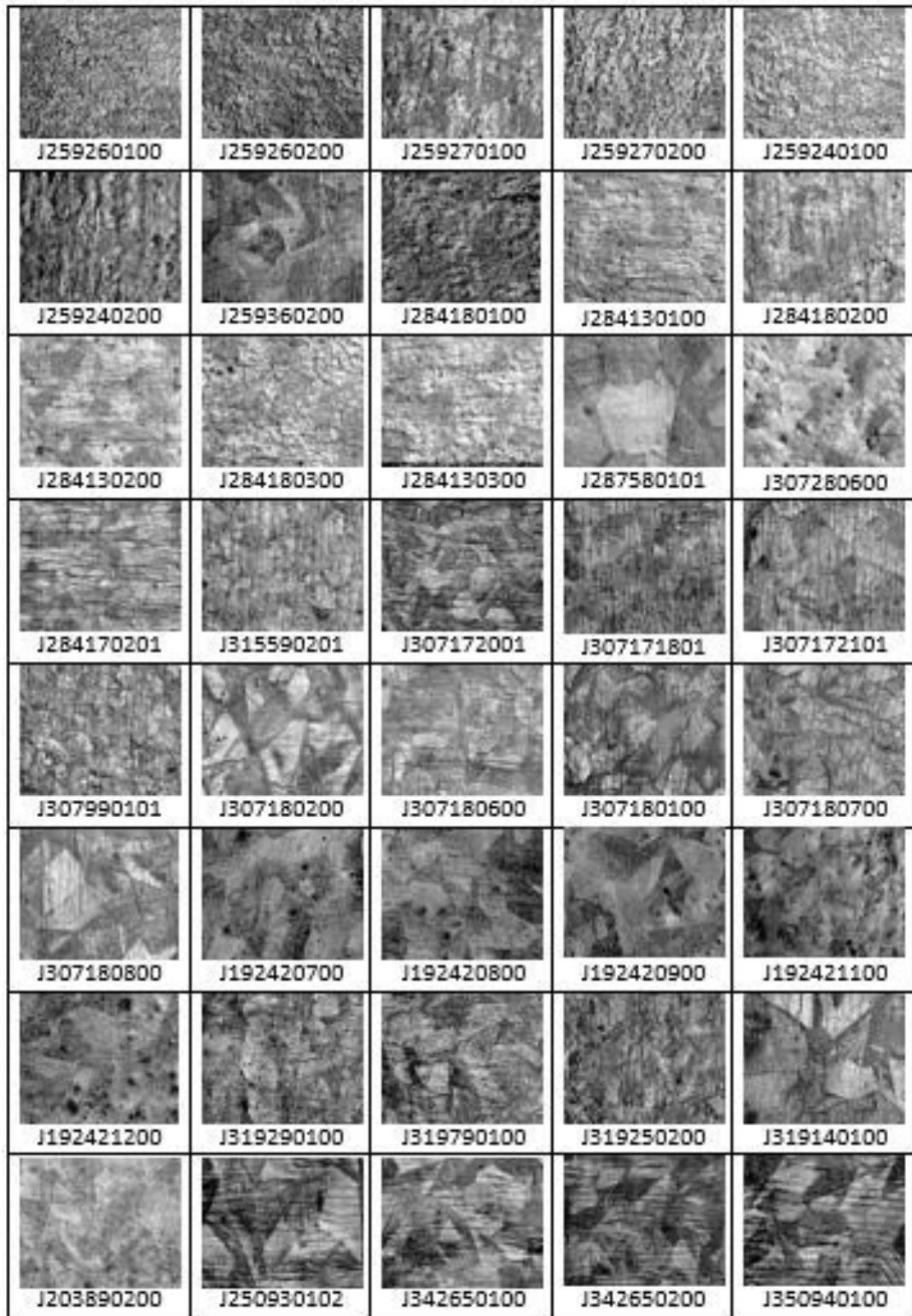
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Adequação à Diretiva RoHS**

Disponível em: <<http://www.itp.br/solucoes>>

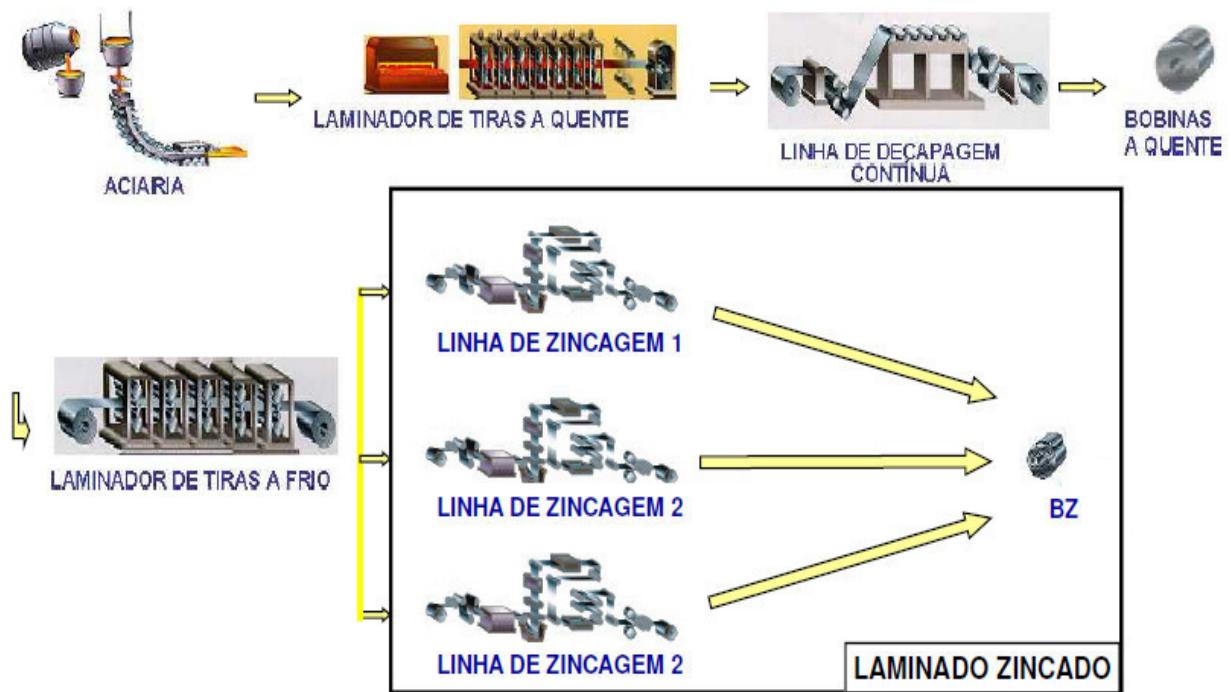
Acesso em: 07 junho 2017

## APÊNDICES

APENDICE A: IMAGENS DOS CRISTAIS DE ZINCO COM AUMENTO DE 12,5X



## APENDICE B – FLUXO DE PRODUÇÃO DO AÇO ZINCADO



Fonte: CSN