

# INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE GALVANIZAÇÃO NA MORFOLOGIA DAS CAMADAS DE Zn E Fe-Zn \*

*Tiago Salzmann Vilela<sup>1</sup>*

## **Resumo**

No mercado de arames galvanizados destinados a indústria é exigida a uniformidade da camada de zinco sobre o arame. Neste trabalho, foram estudados os efeitos da velocidade de galvanização na uniformidade e espessura da camada de Zinco total, bem como a morfologia das fases de Zn e Ferro-Zinco sobre o substrato metálico. Verificou-se também o efeito do aquecimento após o processo de galvanização, observando o crescimento da camada intermetálica. Finalmente, serão mostradas as principais características de processo obtidas para garantir o atendimento aos ensaios de qualificação, em um estudo de caso de arames galvanizados produzidos em unidade industrial da Gerdau.

**Palavras-chave:** Velocidade de galvanização; Arames galvanizados; Zinco.

## **INFLUENCE OF GALVANIZED'S SPEED IN MORPHOLOGY OF LAYERS OF Zn AND Fe-Zn**

### **Abstract**

In the market of galvanized wire for industry, the uniformity of the zinc layer formed is required. In this work, the effects of speed of galvanization on uniformity and thickness of the total zinc layer as well as the morphology of phases Zn and Fe-Zn were studied. The heating effect was verified after galvanizing, observing the behavior of the intermetallic layer. Finally, we will show the main process characteristics obtained to ensure compliance with the qualification tests in a case study of galvanized wires produced in the industrial unit of Gerdau.

**Keywords:** Speed of galvanizing process; Galvanized wire; Zinc.

<sup>1</sup> *Engenheiro de Materiais, Assessor Técnico/Facilitador de Melhorias, Tecnologia de Processos, Gerdau Aços Brasil – Gerdau Cotia, SP, Brasil.*

*\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

No processo de galvanização a fogo, um arame de aço é imerso em um tanque contendo zinco puro a aproximadamente 450°C num processo contínuo. O contato do arame com o zinco nessa temperatura faz com que dois eventos aconteçam: Arraste de zinco puro sobre a superfície do arame e uma reação química entre o ferro do substrato com o zinco, formando uma camada intermetálica denominada ferro-zinco.

A uniformidade da camada total de zinco formada no arame galvanizado é constantemente requerida pela indústria, principalmente nos segmentos de distribuição de energia elétrica. De acordo com Campanher [1] alguns fatores podem influenciar a camada de zinco e a camada intermetálica:

- a. Características superficiais do metal base (rugosidade);
- b. Composição química do metal base;
- c. Composição química do banho de zinco;
- d. Temperatura do banho de zinco;
- e. Tempo de imersão do metal base;
- f. Velocidade do fio na galvanização;
- g. Método de raspagem do zinco;
- h. Resfriamento do arame galvanizado.

Alguns dos fatores citados acima, tais como velocidade da linha e tempo de imersão, foram estudados mais profundamente e ensaiados. Os demais fatores não foram detalhados nesse trabalho. Groesbeck e Walkup [2] avaliaram o efeito do tipo de camada de zinco na taxa de remoção do zinco da camada durante o ensaio de uniformidade de camada conforme Tabela 1.

Groesbeck e Walkup [2] comparam a perda de zinco em cinco diferentes tipos de material/recobrimento: Arame de zinco, *Eletrodeposição*, *Galvanizado à fogo*, *Galvanizado e recozido* e *Spray de zinco*. Em cada um dos recobrimentos foi encontrada uma taxa de perda de zinco diferente. No processo de eletrodeposição a camada é formada praticamente por zinco puro. A observação desse experimento mostrou que a taxa de perda de massa por imersão foi a segunda maior de todas, apresentando resultado 66,7 g/m<sup>2</sup>.

No processo de *Galvanização à fogo*, o zinco aquecido é arrastado pelo arame e também reage com o metal base formando uma camada intermetálica denominada Fe-Zn. Vemos que neste caso, a taxa de perda de massa por imersão foi de 49 g/m<sup>2</sup>, sendo menor que no processo de eletrodeposição. Já no processo com galvanização e Recozimento, após o zinco ser depositado na forma metálica sobre o metal base, o arame volta a ser aquecido (recozido). O zinco por aquecimento continua a se difundir e aumenta a camada de intermetálico ao ponto de termos apenas Fe-Zn. Como essa camada intermetálica tem maior resistência ao ataque do sulfato de cobre, a perda é de apenas 34 g/m<sup>2</sup>.

---

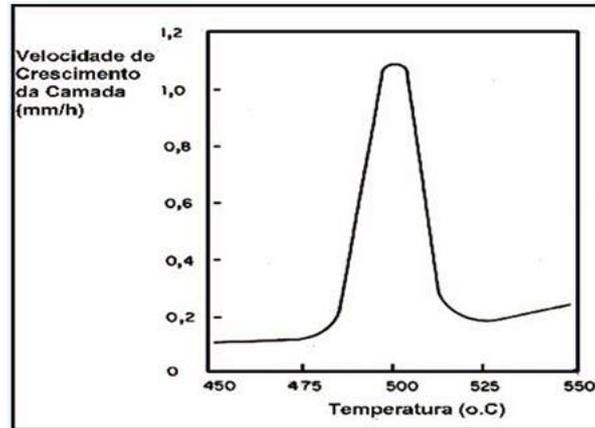
\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

**Tabela 1.** Perda de massa de Zn ( $\text{g/m}^2$ ) em diferentes tipos de revestimento [2].

Material/Processo de galvanização	Número de imersões	Perda de peso ( $\text{g/m}^2$ )	Média da perda de revestimento ( $\text{g/m}^2$ )
Arame de Zinco	1	51,9	NA
	2	56,1	
	3	56,8	
	4	58,9	
	5	49,7	
	<b>Total Média</b>	<b>273,4</b>	<b>54,7</b>
Eletrodeposição	1	47,3	402,78
	2	75,4	
	3	74,8	
	4	69,0	
	5	68,4	
	6	65,6	
<b>Total Média</b>	<b>400,3</b>	<b>66,7</b>	<b>NA</b>
Galvanização à fogo	1	41,8	241,05
	2	63,5	
	3	51,3	
	4	39,4	
<b>Total Média</b>	<b>195,9</b>	<b>49,0</b>	<b>NA</b>
Galvanizado e recozido	1	39,1	317,34
	2	32,3	
	3	31,7	
	4	33,6	
	5	36,6	
	6	34,2	
	7	31,7	
	8	33,0	
<b>Total Média</b>	<b>272,2</b>	<b>34,0</b>	<b>NA</b>
Spray de zinco	1	74,1	357
	2	76,6	
	3	74,1	
	4	67,1	
<b>Total Média</b>	<b>292,0</b>	<b>73,0</b>	<b>NA</b>

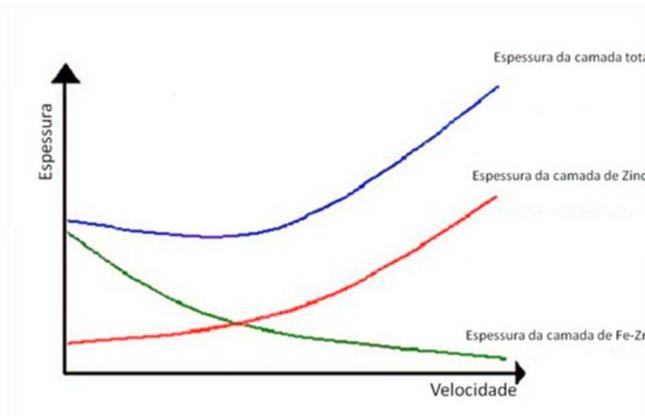
De acordo com Mallet [3] as maneiras possíveis para aumentar a camada de Fe-Zn do arame são: aumentar o tempo de exposição do arame ao zinco (tempo de imersão na cuba) ou aumentar a temperatura do banho de zinco. Como a temperatura do banho de zinco já trabalha com  $450^\circ\text{C}$ , aumentar a temperatura significa em deslocar a reatividade do zinco com o metal, podendo causar forte deposição de zinco nas bordas da cuba e danificar sua estrutura metálica. Na figura 1 é mostrado o pico de reatividade do zinco com o ferro.

\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 1.** Pico de reatividade do zinco entre 475°C e 525°C [3].

Uma alternativa razoável para aumentar a camada de Fe-Zn é aumentar o tempo de exposição do arame ao zinco. Isso pode ser feito de algumas maneiras, tais como: aumentando o tamanho da cuba, reduzindo a velocidade do fio ou realizando mais de uma passada do arame pela cuba. Na figura 2, é possível ver o comportamento das camadas de zinco e Fe-Zn em função da velocidade. Em resumo, aumentando-se a velocidade, têm-se camadas de zinco puro mais espessas, porém com redução de Fe-Zn.



**Figura 2.** Relação do aumento da velocidade com as espessuras das camadas de Zn e Fe-Zn [3].

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Perfil das Camadas de Zn e Fe-Zn com a Velocidade na Galvanização

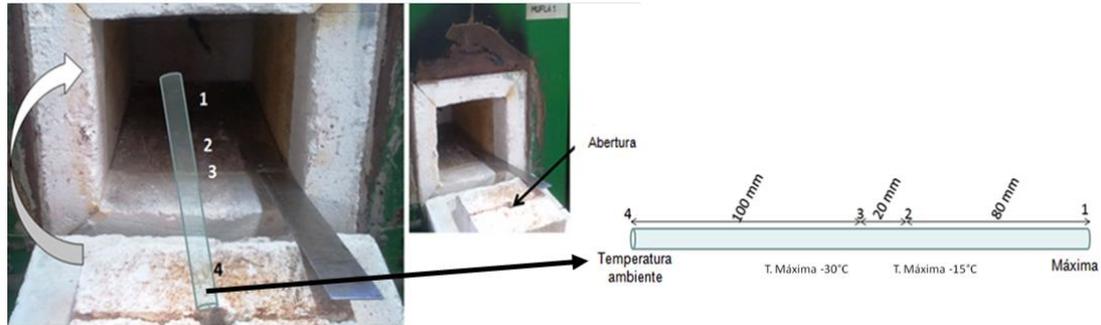
Para avaliar a influência da velocidade nas camadas de Zn e Fe-Zn foi proposto um DOE (*design of experiments*) utilizando MINITAB® onde três grupos de arames com diâmetro 3,05mm (SAE1072) foram submetidos a velocidades de galvanização diferentes. O experimento teve início com velocidade de X m/min, aumentando-se a velocidade até atingir 6\*X m/min. Para a raspagem do zinco foi utilizado o processo de raspagem mecânica utilizando vermiculita. Foi avaliada a gramatura dos arames produzidos (g/m<sup>2</sup>) bem como a espessura das camadas de Zn e Fe-Zn (µm) através de metalografia da secção transversal do arame. As amostras foram envolvidas no papel alumínio, embutidas no baquelite ou resina e após isso o processo

\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

preparação comum (lixamento e polimento utilizando pasta de diamante). No ataque químico, utilizou-se nital 1%, para revelar somente a estrutura da camada de zinco.

## 2.2 Crescimento da Camada de Fe-Zn com Aquecimento

Para avaliar o crescimento da camada de Fe-Zn após o processo de galvanização um conjunto de arames com diâmetro de 3,05mm foi submetido a aquecimento em mufla e mantido por aproximadamente 300 segundos. Após esse tempo foram realizadas metalografias para avaliar a relação das camadas de zinco e Fe-Zn antes e após o aquecimento. Na figura 3 pode ser visto a mufla e a posição dos arames.



**Figura 3.** Mufla utilizada no aquecimento dos arames e as medições de temperatura em cada ponto.

## 2.3 Estudo de caso: Velocidades de Galvanização e Qualificação de Uniformidade.

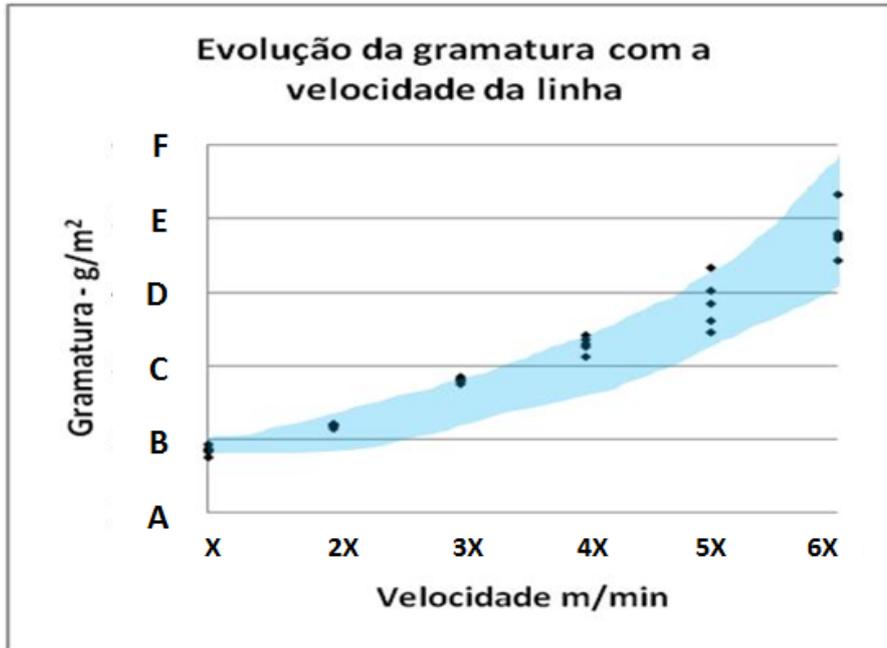
Nessa etapa do estudo foram produzidos arames galvanizados variando as velocidades da 1ª e da 2ª passada, avaliando a uniformidade em cada caso. O objetivo é obter os parâmetros de processo para garantir uniformidade nos arames galvanizados com diâmetro acima de 3,05mm como também a gramatura especificada. As velocidades variaram de  $Y$  a  $6 \cdot Y$  m/min e objetivaram formar quantidade de Fe-Zn adequada para garantir proteção e uniformidade do zinco no arame como também atender a especificação de gramatura de zinco, sem excesso de sobrecamada.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Perfil das Camadas de Zn e Fe-Zn com a Velocidade na Galvanização

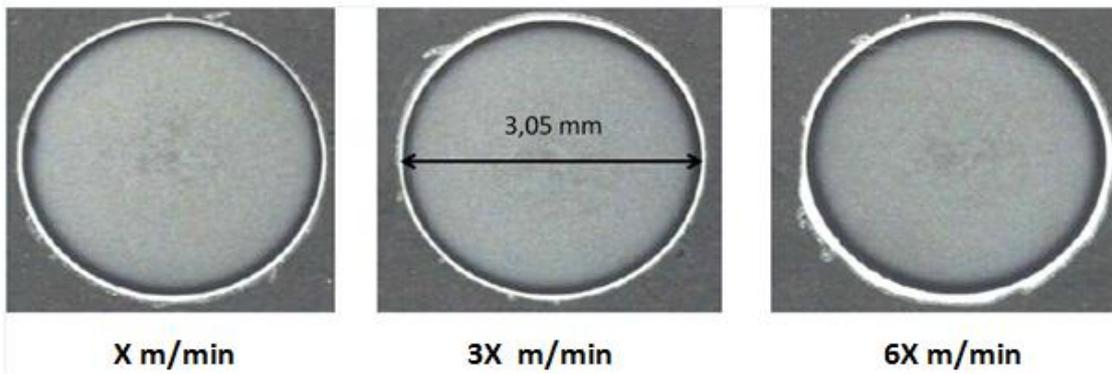
A figura 4 nos permite visualizar a relação da gramatura obtida com a velocidade do arame sendo elevada de  $X$  m/min a  $6 \cdot X$  m/min.

\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

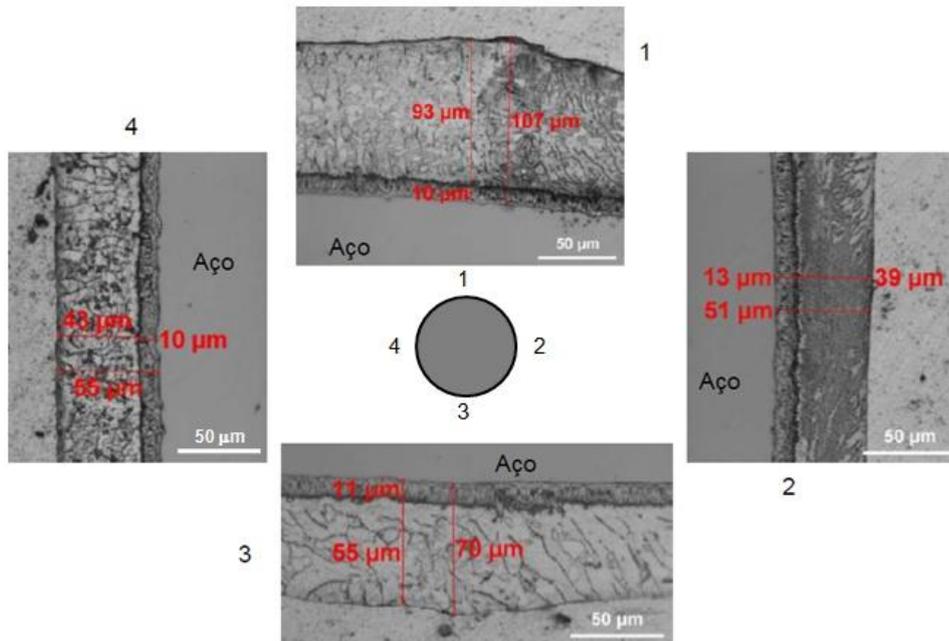


**Figura 4.** Aumento da gramatura em função da velocidade de galvanização.

Por meio da figura 5 pode-se observar que a camada de zinco perde uniformidade à medida que a velocidade aumenta. Nas metalografias abaixo os arames foram avaliados nas velocidades de X, 3\*X e 6\*X m/min. Na figura 6, a amostra produzida com 3\*X m/min foi avaliada com maior escala de ampliação, avaliando a uniformidade tanto da camada de zinco como de Fe-Zn.



**Figura 5.** Metalografia da seção transversal das amostras produzidas a X, 3\*X e 6\*X m/min.



**Figura 6.** Metalografia da secção transversal da amostra produzida com 3\*X m/min.

Na tabela 2 pode ser vista a espessura da camada de Zn e de Fe-Zn em cada uma das velocidades avaliadas. Observa-se que na medida em que a velocidade aumenta a camada de Fe-Zn reduz em função da redução do tempo de reação do zinco com o ferro no interior da cuba.

**Tabela 2.** Espessura das camadas de Zn e Fe-Zn com a velocidade. (\* Gramatura total baseada no gráfico da figura 4).

Velocidade m/min	Total (µm)	Fe-Zn (µm)	Zn (µm)	Fe-Zn %	Total (g/m <sup>2</sup> )*
X	52,25	17,5	33,5	33,5	B
3X	70,75	11	57,5	15,5	C
6X	96,75	8,5	87,5	8,8	E

É possível confirmar por meio desse experimento que a velocidade tem forte influência sobre a gramatura final do arame galvanizado e que ao aumentar a velocidade o desvio padrão da gramatura sobe de 8,2 g/m<sup>2</sup> (X m/min) para 34,3 g/m<sup>2</sup> (6\*X m/min). Outra constatação é que embora a quantidade de zinco cresça com a velocidade, a mesma perde a uniformidade.

### 3.2 Crescimento da Camada de Fe-Zn com Pós-aquecimento

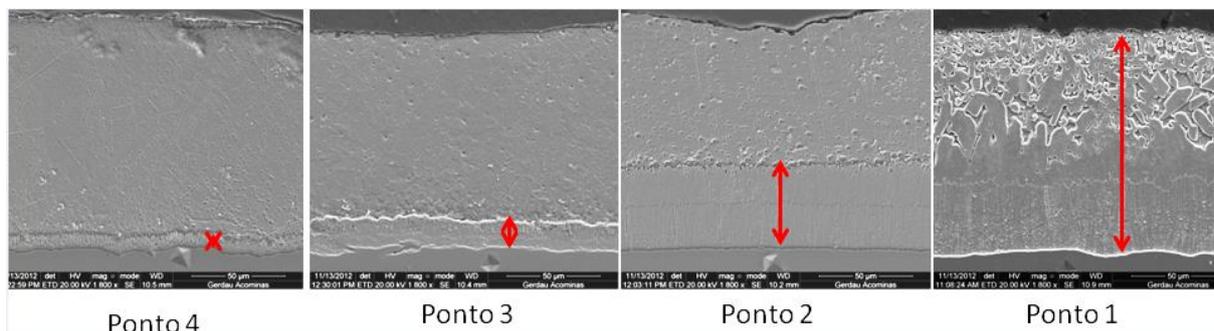
No experimento realizado as amostras submetidas a um aquecimento em mufla não tiveram temperatura constante ao longo de todo o comprimento da amostra. Dessa forma não foi possível determinar a temperatura exata em cada ponto do arame. Na tabela 3 pode ser visto a espessura da camada de Fe-Zn, bem como o % de Fe-Zn em cada posição.

\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

**Tabela 3.** Espessura das camadas de Zn e Fe-Zn após o aquecimento.

Espessura Fe-Zn	Posição	Ref (mm)	Temperatura (°C)	% Fe-Zn na camada
9,4	4	Fora	Ambiente	6%
13,5	3	0	max - 30°C	14%
43,1	2	20	max - 15°C	33%
126,5	1	100	Máxima	100%

Na figura 7 pode ser visto o comparativo metalográfico da secção longitudinal do arame em cada posição. Nesse caso, observa-se claramente o crescimento da camada de Fe-Zn (seta vermelha) com a temperatura, chegando ao ponto da camada de Zn puro ser totalmente transformada em Fe-Zn (Delta + Zeta).



**Figura 7.** Aumento da camada de Fe-Zn com aquecimento após galvanização.

A reação cinética de crescimento das camadas intermetálicas foi estudada por Marder [4]. Marder afirma que em curtos intervalos de tempo (cerca de 300s) a uma temperatura de 450°C a camada Zeta cresce rapidamente enquanto a camada Delta cresce lentamente até que toda camada Zeta seja transformada em Delta. Na figura 7 pode-se perceber que no ponto 1 existem duas camadas (Delta e Zeta), destacando dessa forma que não houve tempo suficiente para a completa transformação da fase Delta. Medindo a temperatura do arame no processo de galvanização foi observado que na roldana superior (ultimo ponto de contato do arame antes da cera) o mesmo apresenta temperatura da ordem de 180°C. Isso mostra que o processo de transformação da camada de Zn puro em Delta pode continuar, aumentando a espessura da camada de Fe-Zn no arame.

### 3.3 Estudo de Caso: Velocidades de Galvanização e Qualificação da Uniformidade.

Inicialmente 300 kg de arame galvanizado foram produzidos na velocidade de  $Y$ m/min e os outros 300 kg na velocidade de  $2*Y$ m/min. Foram coletadas amostras desse material de forma a não comprometer o restante do produto. Das amostras retiradas, foi realizado ensaio uniformidade e os resultados são mostrados na tabela 4.

\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

**Tabela 4.** Resultado de uniformidade e gramatura nas velocidades de Ym/min e 2\*Ym/min na 1ª passada

Amostra	Velocidade Ym/min		Velocidade 2*Ym/min	
	Uniformidade	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	Uniformidade	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )
1	A	294	A-1	443
2	A	313	A-1	303
3	A	311	A-1	309
4	A	300	A-1	291
5	A	307	A-1	298
6	A	330	A-2	289
7	A	298	A-1	307
Média	A	307,6	A-1	320,0

É possível constatar que os resultados de uniformidade obtidos na velocidade da 1ª passada nas amostras com velocidade de Ym/min foi superior ao obtido com 2\*Ym/min, não havendo diferença significativa na média das gramaturas de zinco. Posteriormente foi realizada a segunda etapa do teste, repassando o material com velocidade inicial de Ym/min a 2Y, 4Y e 6Ym/min. Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 5.

**Tabela 5.** Resultado de uniformidade e gramatura nas velocidades de 2Y, 4Y e 6Ym/min na 2ª passada

Velocidade 1º pass (m/min)	Velocidade 2º pass (m/min)	Uniformidade		Gramatura g/m <sup>2</sup>	
		Media	Desvio	Media	Desvio
Y	2Y	A+1	0,6	462,2	10,2
Y	4Y	A+2	0,7	608,8	11
Y	6Y	A+2	0,6	773,8	16,5

Como não houve diferença significativa entre o resultado de uniformidade das amostras produzidas com 4\*Ym/min e 6\*Ym/min (embora a variação de gramatura tenha sido da ordem de 165g/m<sup>2</sup>) optou-se por padronizar a produção do material na velocidade de 4\*Ym/min a fim de minimizar as perdas de zinco por sobrecamada, visto que o especificado para este material é de 520g/m<sup>2</sup>.

#### 4 CONCLUSÃO

A partir desse trabalho foi possível verificar que a velocidade da linha de galvanização tem forte influência sobre o arraste de zinco. Os estudos mostraram que com velocidade acima de 3\*X m/min tem-se arraste excessivo de zinco, com perda de uniformidade da camada e redução da espessura da camada de Fe-Zn. Também foi possível verificar que mantendo a temperatura do arame após a cuba o processo de crescimento da camada de Fe-Zn pode continuar, aumentando-se a qualificação do arame no ensaio de uniformidade.

\* Contribuição técnica ao 5º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, 24 e 25 de novembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Os testes no processo mostraram que é possível produzir o arame galvanizado com diâmetro de 3,05mm com processo de dupla passada pela cuba. Com esses parâmetros, obteve-se êxito no ensaio de uniformidade e com otimização da camada de zinco, evitando excesso de zinco no arame.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer aos consultores da Gerdau Jorge Adam Cleto Cohn e Marcos Alberto Moschen Pinto pela valorosa e imprescindível contribuição técnica no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos meus colegas de trabalho Cristiano Terres Monteiro, Luciana de Carvalho Affonso, Marcelo Giroto de Mattos e Tiago Nisio Gonçalves que contribuíram na revisão e execução deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Campanher CG. Otimização experimental em processo de galvanização de arames de camada pesada. UFRG. Porto Alegre, RS, 2009, p.1 – 97.
- 2 Groesbeck EEE, Walkup HH. Preece Test (cooper-sulphate dip) for Zinc Coatings. Part of Bureau of Standards Journal of Research, 1934; 12: 785 - 802E.
- 3 Gracia Jr. Lorenzo, Mallet, Ana. Curso de Galvanização do Grupo Gerdau. 1985, 1989, 1993.
- 4 Marder AR. The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science, p. 193 – 213, 2000. Progress in Materials Science 45 (2000) p. 191 - 271.