

# AÇO ULTRA BAIXO CARBONO AO TITÂNIO – AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO GALVANNEALED OBTIDO POR SIMULAÇÃO EM GLEELE<sup>1</sup>

Fabiano Augusto Vallim Fonseca<sup>2</sup>

Vicente Tadeu Lopes Buono<sup>3</sup>

José Geraldo de Sousa<sup>4</sup>

Rogério Augusto Carneiro<sup>5</sup>

## Resumo

O revestimento *galvannealed* é o resultado de um tratamento térmico do revestimento galvanizado, em temperaturas suficientes para causar a interdifusão dos átomos de Zn e Fe. No processo de formação das fases Zn-Fe há uma competição para nucleação e crescimento das fases mais ricas de ferro que consomem as mais ricas em Zn. Neste trabalho o estudo do processo de *galvannealing* em substrato de aço ultra baixo carbono estabilizado ao titânio foi realizado através de tratamento isotérmico simulado no equipamento Gleeble. A faixa dos tratamentos de *galvannealing* foi de 470°C a 570°C, com intervalos de 50°C. As amostras submetidas à simulação em Gleeble foram obtidas industrialmente em um banho de galvanização na temperatura de 470°C que continha cerca de 0,12% (em massa) de alumínio. As técnicas experimentais empregadas foram microscopia eletrônica de varredura, difração de raio-X e determinação da massa de ferro no revestimento. A discussão dos resultados considerou vários aspectos relacionados ao processo de *galvannealing* e janela de processamento para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na formação de ligas Zn-Fe. Como conclusão verificou-se que o efeito dos parâmetros de tratamento térmico empregados sobre a cinética de enriquecimento de ferro foi significativo.

## Palavras-chave:

### TITANIUM ULTRA LOW CARBON STEEL - EVALUATION OF GALVANNEALED COATING OBTAINED BY SIMULATION WITH GLEELE

## Abstract

The galvannealed coating is the result of an additional annealing of the galvanized coating, in temperatures enough to provide zinc and iron interdiffusion. In the beginning of the process of formation of the Fe-Zn phases it has a competition for nucleation and growth of the richest iron phases that consume richest Zn phases. In this paper, the study of the process of galvannealing, in substrate of ultra low carbon steel stabilized to titanium, was carried through isothermal treatment in the pilot simulator Gleeble. The range of the treatments of galvannealing was of 470°C to 570°C, with intervals of 50°C. The treated samples had been gotten industrially in a bath of galvanization in the temperature of 470°C that it contained about 0,12% (in mass) of aluminum. The used experimental techniques had been scanning electron microscopy, X-ray diffraction and determination of the mass of iron in the coating. The discussion of the results considered some aspects related to the process of galvannealing and window process for one better understanding of the involved phenomena in the formation of Zn-Fe layer. As conclusion, it was verified that, the effect of the parameters of thermal treatment used, on the kinetic one of iron enrichment was significant.

**Key-words:** Steel; Galvannealed; Phase transformation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., CQE/ASQ, Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Físico, Dr., Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia da UFMG; Belo Horizonte, MG.

<sup>4</sup> Membro da ABM; Engenheiro Químico, M.Sc., Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>5</sup> Membro da ABM; Engenheiro Químico, M.Sc., Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

## 1 INTRODUÇÃO

O aço na forma de chapas tem sido, ao longo dos anos, o principal material utilizado pela indústria automobilística para fabricação de carrocerias. Além do aço ser um material facilmente reciclável, ele apresenta elevada conformabilidade, boa resistência estrutural e custo razoável. Entre os tratamentos superficiais para chapas de aço visando a prevenção contra corrosão destacam-se os processos de galvanização, que podem ser realizados por imersão a quente ou por eletrodeposição. O uso de chapas de aço com revestimento de zinco (Zn) no setor automotivo brasileiro aumentou nos últimos anos, passando de cerca de 20% em 1996 para 65% em 2006, devido à necessidade de aumentar a durabilidade destes produtos, tornando-os ainda mais resistentes à corrosão.<sup>(1)</sup>

Uma das principais restrições ao emprego de aços revestidos com Zn ou ligas de Zn em substituição ao aço não revestido é a maior dificuldade nos processos de conformação, bem como soldagem.

Ao se comparar as propriedades dos revestimentos de Zn puro com os revestimentos com liga Zn-Fe, constata-se a superioridade deste último revestimento em termos de resistência à corrosão após pintura, soldabilidade a ponto e adesão do revestimento orgânico. Com o desenvolvimento tecnológico dos processos e a evolução das linhas de galvanização, houve uma melhoria considerável da qualidade dos produtos revestidos com liga Zn-Fe, aumentando sua utilização em peças que sofrem maior conformação e/ou painéis expostos. Normalmente utilizam-se aços *Interstitial Free* (IF) para estas aplicações.

O processo de *galvannealing* consiste no tratamento térmico do revestimento de Zn, promovendo a interdifusão do Zn do revestimento com o Fe do substrato, formando diferentes fases intermetálicas Zn-Fe. Para o controle de formação dessas fases é fundamental o conhecimento sobre a cinética de enriquecimento de Fe e das transformações de fases que ocorrem no processo de *galvannealing*. O produto resultante é chamado de *galvannealed* ou, simplesmente, GA.

Além das variáveis do processo de *galvannealing*, a composição química do substrato também pode interferir diretamente sobre a cinética de transformação de fases Zn-Fe. Desta forma o projeto de liga utilizado tem interações com o revestimento e suas características. Estudar o efeito de substratos com diferentes elementos de liga é particularmente interessante e não é uma tarefa trivial devido às reações muito complexas do sistema Fe-Zn.

Neste trabalho foi abordado o efeito da composição química do substrato sobre o processo de *galvannealing* no qual se estudou o substrato de aço IF estabilizado com adição de titânio (IF-Ti), de concepção clássica, muito utilizado pelas usinas siderúrgicas em geral. A simulação do processo de *galvannealing* no referido substrato foi realizada através de tratamento isotérmico no equipamento Gleeble. A faixa dos tratamentos de *galvannealing* foi de 470°C a 570°C, com intervalos de 50°C. As amostras submetidas à simulação no equipamento Gleeble foram obtidas industrialmente em um banho de galvanização na temperatura de 470°C que continha cerca de 0,12% (em massa) de alumínio. Também foi avaliado a formação das fases e a microestrutura resultante das simulações de tratamento isotérmico em Gleeble.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo do revestimento *galvannealed* foi realizado a partir do aço IF-Ti, com composição química conforme a Tabela 1, em um produto com espessura de 0,70 mm e massa de revestimento de 45 g/m<sup>2</sup> em cada face. As amostras foram produzidas em escala industrial com alumínio do pote de zinco de 0,12%, típico de processamento de material *galvannealed*. Foram escolhidas 3 temperaturas de simulação isotérmica do processo de *galvannealing* (470°C, 520°C e 570°C) e 5 tempos de encharque (5 s, 10 s, 20 s, 40 s, 80 s). As taxas de aquecimento e resfriamento foram de 50°C/s. As amostras foram tratadas no simulador termo-mecânico Gleeble.

**Tabela 1** – Composição química do substrato (% em massa)

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	N
IF-Ti	<0,005	<0,20	<0,05	<0,02	<0,02	<0,08	<0,08	<0,005	<0,005

Para determinação da massa de revestimento (g/m<sup>2</sup>) os corpos de prova (CP) foram imersos em solução de ácido clorídrico 1:1, com inibidor de hexametilenotetramina para evitar a reação da solução ácida com o substrato. A massa de revestimento foi determinada pela diferença de massa da amostra antes e após a remoção do revestimento em relação a área do corpo de prova.

Observações microestruturais da seção transversal, do revestimento, foram realizadas com uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizando análise por *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) das fases intermetálicas Zn-Fe.

As amostras em estudo foram analisadas por difratometria de raio-X de ângulo rasante utilizando uma fonte de cobre K $\alpha$ , operando a 40kV e 20mA, ângulo de incidência de 2° e faixa de varredura de 2 $\theta$  variando entre 10 e 80°. Através da análise do espectro, pelos dados dos cartões JCPDS, foram identificados os principais planos de difração das fases intermetálicas Zn-Fe presentes. As contagens foram realizadas nas posições angulares de 74,06° para a fase delta ( $\delta$ ), 75,37° para a fase zeta ( $\zeta$ ) e 78,15° para a fase gama ( $\Gamma$ ), com distância interplanar (d) de 1,279 Å para a fase  $\delta$ , 1,260 Å para a fase  $\zeta$  e 1,222 Å para a fase  $\Gamma$ .

A aderência de revestimento foi avaliada através do ensaio *V-Bend Test*. Empregou-se um CP com diâmetro de 64,5 mm que foi conformado em uma prensa, utilizando o conjunto de punção e matriz em “V” com ângulo de 60°. Posteriormente, o corpo de prova foi desempenado em prensa com conjunto punção e matriz planas, até retornarem a posição original e avaliou-se o arrancamento do revestimento pelo uso de fita adesiva incolor, através da comparação da massa das partículas aderidas em relação a uma carta de referência.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização do Revestimento Após o Tratamento de *Galvannealing*

#### 3.1.1 Massa do revestimento de Zn-Fe

Os resultados da determinação da massa do revestimento na face superior da amostra são apresentados na Tabela 2. Pode-se observar que a massa de

revestimento em todos os aços aumenta com o incremento da temperatura e do tempo de tratamento.

**Tabela 2** – Massa de revestimento (g/m<sup>2</sup>) em função do tempo e temperatura

Aço	Temperatura de Tratamento (°C)	Tempo de Tratamento (s)				
		5	10	20	40	80
IF-Ti	470	46,5	49,2	51,8	52,6	54,2
	520	49,8	50,1	52,4	53,9	54,7
	570	51,5	52,0	54,3	56,9	57,5

### 3.1.2 Teor de ferro no revestimento de Zn-Fe

O teor de Fe do revestimento aumenta tanto com a temperatura quanto com o tempo de tratamento, conforme observado na Tabela 3. Os resultados da determinação do teor de Fe são também apresentados na Figura 1(a).

**Tabela 3** – Teor de ferro (%) em função dos tempos e temperaturas

Aço	Temperatura de Tratamento (°C)	Tempo de Tratamento (s)				
		5	10	20	40	80
IF-Ti	470	4,6	8,4	10,8	12,4	13,7
	520	9,8	11,9	13,5	14,5	16,1
	570	11,2	12,9	14,1	15,4	17,1

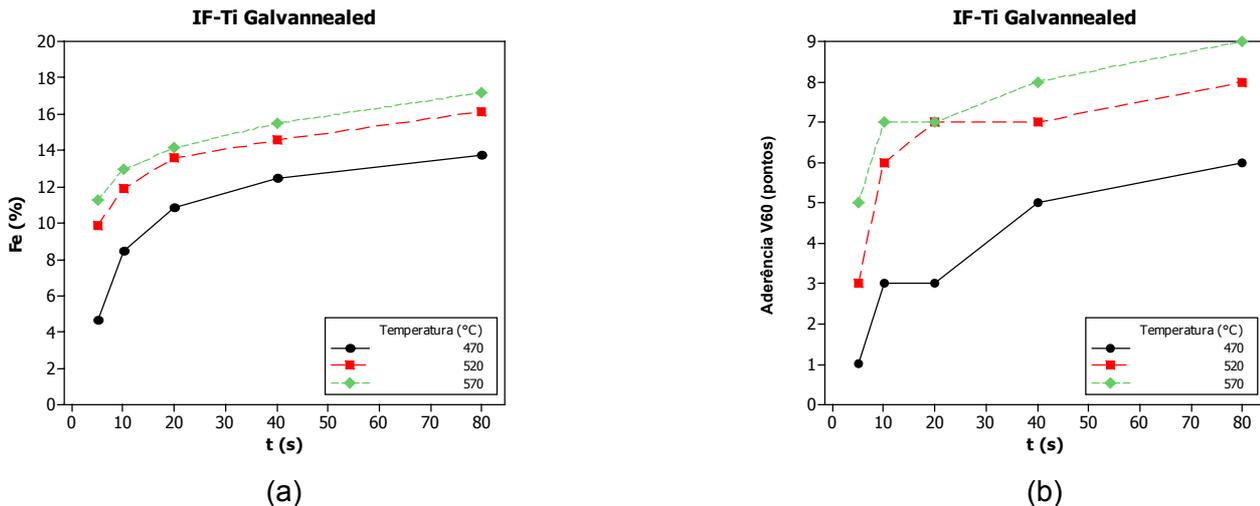
### 3.1.3 Aderência do revestimento

Através do dobramento a 60°, ensaio *V-Bend* 60°, das amostras tratadas isotermicamente, foram obtidos os resultados de aderência do revestimento da face superior da amostra, que variou de 1 ponto para o revestimento que apresentou as melhores propriedades de conformação até 9 pontos para o revestimento com as piores propriedades. A aderência do revestimento decresceu com a temperatura e o tempo de tratamento (Tabela 4).

**Tabela 4** – Aderência do revestimento em função dos tempos e temperaturas

Aço	Temperatura de Tratamento (°C)	Tempo de Tratamento (s)				
		5	10	20	40	80
IF-Ti	470	1	3	3	5	6
	520	3	6	7	7	8
	570	5	7	7	8	9

A influência do tempo de tratamento térmico sobre a aderência do revestimento pode ser observada na Figura 1(b). Verifica-se que para as temperaturas de tratamento mais elevadas o revestimento tem sua aderência deteriorada em curtos tempos de tratamento.



**Figura 1** - Teor de ferro (a) e a aderência do revestimento (b)

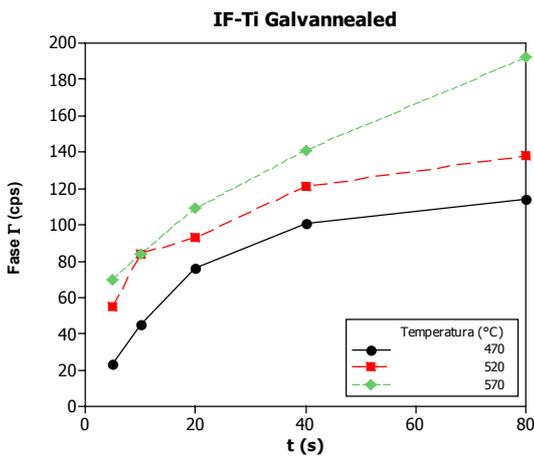
Na Figura 3(a) são apresentados os resultados de aderência em função dos teores de Fe. Pode ser observado que a aderência deteriorou-se rapidamente quando o teor de Fe dos revestimentos atingiu níveis acima de 12%, provavelmente devido a saturação de Fe na fase  $\delta$ . Os resultados são semelhantes aos observados na literatura: O efeito do teor de Fe no revestimento sobre a conformabilidade foi investigado por Zhang e Strayer<sup>2</sup>, sendo que os resultados indicaram uma deterioração da conformabilidade com o aumento do teor de Fe do revestimento acima de 12%. Xavier,<sup>(3)</sup> Bae,<sup>(4)</sup> Lin e Meshi,<sup>(5)</sup> Jordan e Marder<sup>(6)</sup> constataram que a resistência ao *powdering* do revestimento também deteriora rapidamente quando o teor de ferro no mesmo atinge níveis acima de 11%.

### 3.1.4 Determinação das fases por difração de raio-X de baixo ângulo

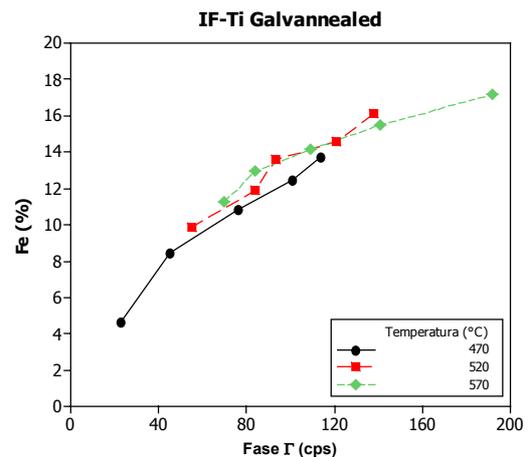
Foi observado nos difratogramas de raio-X que os picos de identificação das fases  $\delta$  e  $\Gamma$  sofreram deslocamentos das posições com o tempo de tratamento, enquanto a fase  $\zeta$  manteve-se mais constante. No caso da fase  $\delta$ , que tem estrutura hexagonal, o deslocamento pode ser explicado por distorções na rede causada pela variação do teor de ferro nessa fase, que fica entre 7% e 12%. A posição da fase  $\zeta$ , de estrutura monoclinica, é mais constante pois o teor de ferro situa-se numa faixa mais estreita, de 5% a 6%. Já a fase identificada como  $\Gamma$ , na realidade, é constituída de duas fases distintas. Uma delas é a fase  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_{11}\text{Zn}_{40}$ ) propriamente dita, de estrutura CCC e teor de ferro entre 23% e 28%. A outra é a  $\Gamma_1$  ( $\text{FeZn}_4$ ), de estrutura CFC e teor de ferro entre 17% e 19%. A contagem para essa fase foi feita na posição angular de  $78,15^\circ$ , que é a da fase  $\Gamma$ . No presente estudo não foi feita contagem específica para a fase  $\Gamma_1$ , por não ter sido encontrada a posição angular adequada. Como os picos estão deslocados, nem sempre a contagem é feita na posição de máximo, de modo que os valores daí derivados são aproximações.

#### 3.1.4.1 Quantidade relativa de fase $\Gamma$

Os resultados da contagem líquida da fase  $\Gamma$  por difração de raio-X da face superior da amostra são apresentados na Figura 2(a). Pode-se observar que a quantidade relativa da fase  $\Gamma$  no revestimento está aumentando com o aumento de temperatura e tempo de tratamento. Observa-se também na Figura 2(b) que o teor de ferro do revestimento tem grande correlação com a fase  $\Gamma$ .



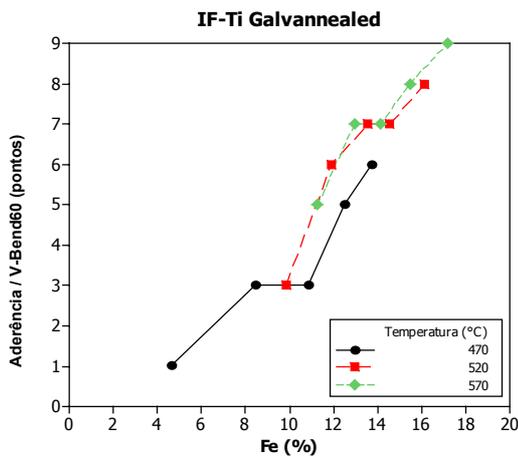
(a)



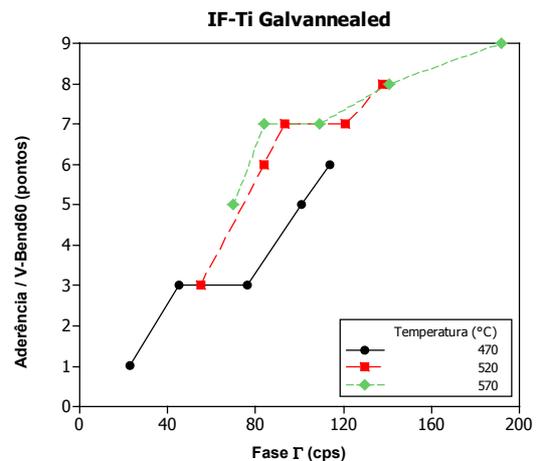
(b)

**Figura 2** - Resultado da contagem líquida da fase  $\Gamma$  por difração de raio-X (a) e o teor de Fe correlacionado com a contagem de fase  $\Gamma$

Na Figura 3(a) verifica-se uma boa correlação entre a aderência e o teor de ferro do revestimento. Observa-se também na Figura 3(b) que a aderência deteriorou-se rapidamente com o aumento da fase  $\Gamma$ .



(a)



(b)

**Figura 3** - Resultado da aderência em função do teor de Fe (a) e da contagem líquida da fase  $\Gamma$  (b)

### 3.1.4.2 Quantidade relativa de fase $\delta$

Os resultados da contagem líquida da fase  $\delta$  por difração de raio-X da face superior da amostra são apresentados na Figura 4(a). Observa-se que a quantidade relativa da fase  $\delta$  no revestimento aumenta até um máximo entre 220 cps a 240 cps e posteriormente ocorre o decréscimo dos valores de contagem, provavelmente devido a saturação de Fe na fase  $\delta$ . Esta saturação de Fe na fase  $\delta$  propicia o rápido crescimento da fase  $\Gamma$  no revestimento, através do consumo simultâneo da fase  $\delta$  e do Fe presente no substrato. Pode-se também observar na Figura 4(b) que a contagem de fase  $\delta$  chega a um máximo entre 220 cps a 240 cps e essa contagem líquida corresponde aproximadamente ao teor de 12% de Fe no revestimento.

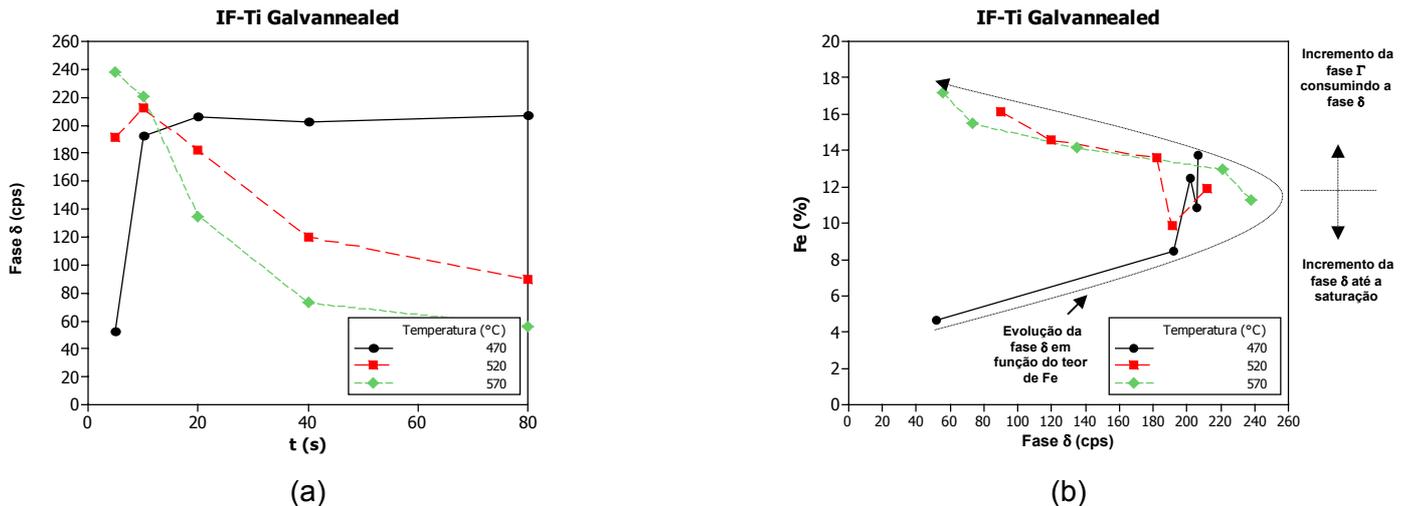


Figura 4 - Contagem líquida da fase  $\delta$  (a) e resultado do teor de ferro, correlacionado a respectiva fase  $\delta$  (b)

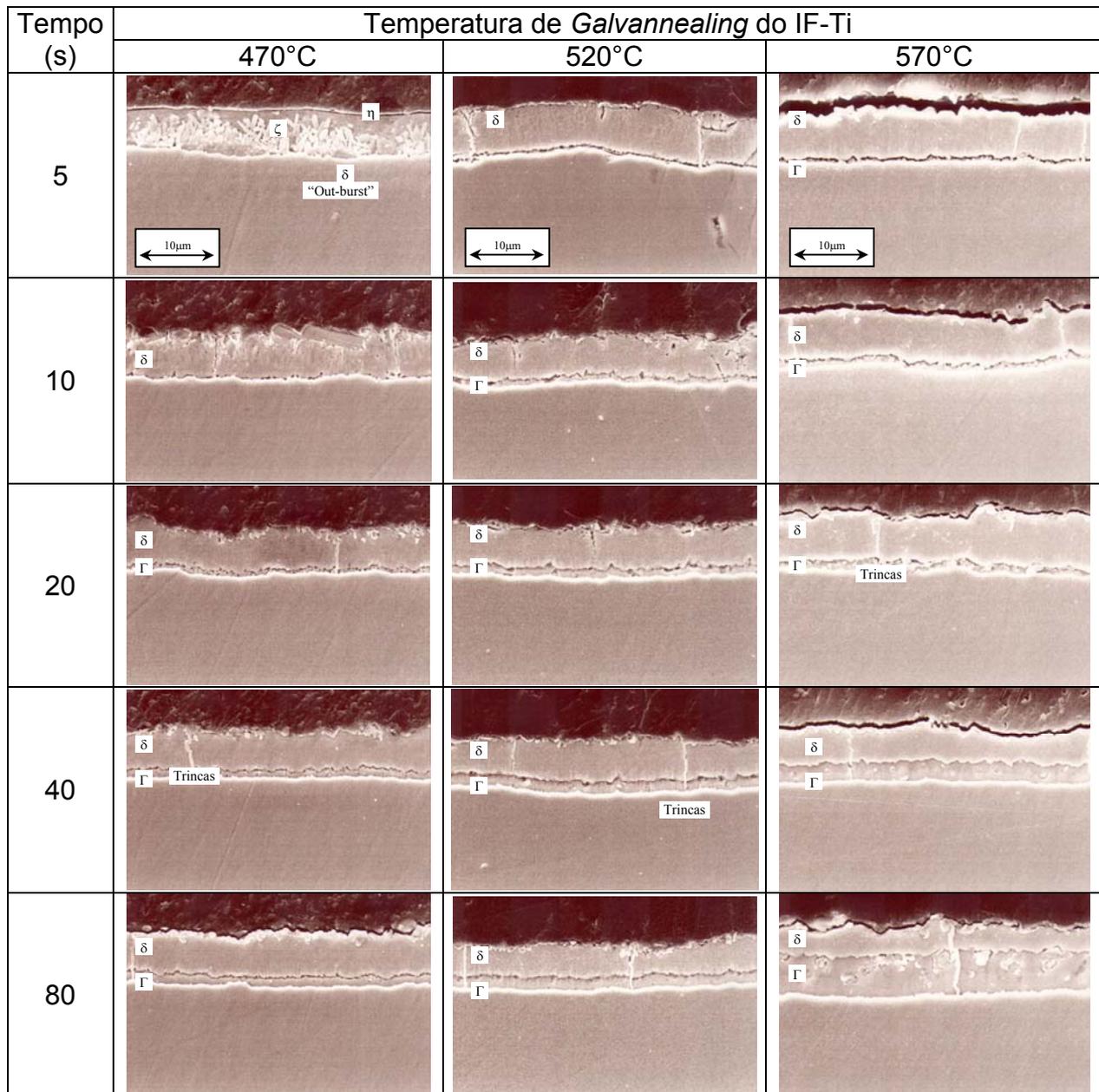
### 3.2 Evolução Microestrutural do Revestimento Galvannealed

As amostras tratadas termicamente foram observadas quanto ao aspecto morfológico (seção transversal) por microscopia eletrônica de varredura (Figura 5). Pela seqüência é possível observar a variação da microestrutura do revestimento a partir da interface com o substrato em função do tempo e temperatura. As transformações das fases do sistema Fe-Zn ocorreram concomitante ao enriquecimento de Fe do revestimento. Os revestimentos obtidos por simulação apresentaram uma evolução microestrutural que pode ser dividida em três etapas:<sup>(1)</sup>

1. Aparecimento dos primeiros cristais da fase  $\zeta$  que se apresentaram no revestimento em forma de estruturas colunares com a fase eta ( $\eta$ ) ocupando a porção superior do mesmo.
2. Início da reação de *outburst* (erupção ou afloramento), com formação principalmente de fase  $\delta$ . Esta reação propiciou o rápido crescimento da fase  $\delta$  para a superfície do revestimento, através do consumo simultâneo das fases  $\zeta$  e  $\eta$  que ainda estavam presentes no revestimento.
3. Formação da camada de fase  $\Gamma$  situada na interface aço/revestimento, através do consumo da fase  $\delta$  que está presente na maior parte do revestimento. Esta morfologia contém ainda trincas perpendiculares ao substrato do aço, resultado de mudanças de volume associadas as transformações de fases que ocorrem dentro do revestimento.

Na temperatura de 470°C, no tempo de 5s, observou-se que o revestimento está parcialmente transformado, com a fase  $\eta$  ocupando grande porção do revestimento e com o aparecimento de cristais alongados, colunares e prismáticos de fase  $\zeta$ , diretamente da interface com o substrato. Os cristais  $\zeta$  nucleiam e crescem epitaxialmente aos planos da superfície do ferro  $\alpha^6$ . Observou-se, também, a reação de *outburst*, gerando cristais de fase  $\delta$ . A reação de *outburst* cresce lateralmente e para a superfície do revestimento consumindo as fases  $\eta$  e  $\zeta$ . Observou-se que a fase  $\zeta$  possui uma baixa taxa de crescimento em relação às reações de *outburst*. Nos tempos de encharque de 10, 20, 40 e 80s, observa-se nas temperaturas de 470°C, 520°C e 570°C as presenças das fases  $\delta$  e  $\Gamma$  no aço IF-Ti. Pela seqüência é possível observar o aumento da espessura da fase  $\Gamma$  em função

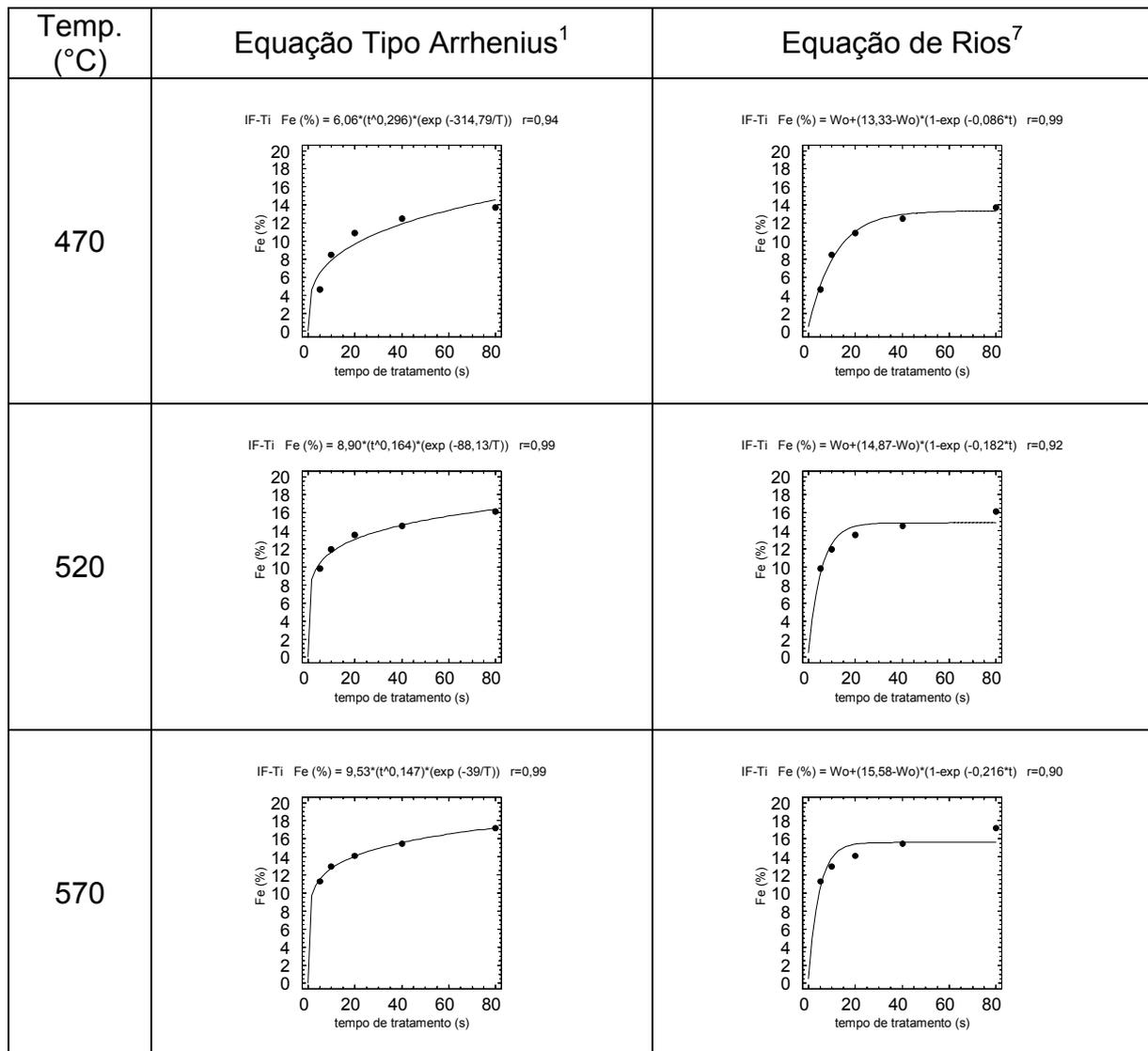
do tempo e temperatura. Pelas micrografias pode-se confirmar que a deterioração da aderência é fruto da fase  $\Gamma$  mais espessa, isto é, as amostras que apresentaram piores valores no ensaio de aderência são aquelas com maior espessura de fase  $\Gamma$ .



**Figura 5** - Aspecto morfológico (via MEV) das amostras tratadas termicamente

### 3.3 Cinética Isotérmica de Enriquecimento de Ferro no Revestimento

Para o revestimento *galvannealed*, a temperatura de recozimento é um parâmetro que influencia diretamente na cinética de reação de formação das ligas do sistema Fe-Zn, uma vez que a taxa de crescimento das fases é controlada por difusão, que por sua vez é um fenômeno termicamente ativado. Podem ser observados na Figura 6, os resultados do enriquecimento de ferro no revestimento durante o seu tratamento térmico isotérmico na Gleeble.



**Figura 6** - Ajuste das equações 1 e 2 aos resultados do teor de ferro do revestimento para o aço IF-Ti

As curvas representam o ajuste da equação do tipo Arrhenius (equação 1) e da equação de Rios<sup>(7)</sup> do tipo cinética irreversível de primeira ordem (equação 2), aos resultados experimentais (Figura 6).

$$Z = A \cdot t^n \cdot \exp(-B/T) \quad (1)$$

Onde o Z é o parâmetro de quantidade (%), A, B e n são parâmetros de regressão, T a temperatura de *galvannealing* em K e t o tempo de tratamento em s.

$$W = W_0 + (W_s - W_0) (1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (2)$$

Onde o W é o teor de Fe do revestimento (%),  $W_0$  é o teor inicial de Fe no revestimento,  $W_s$  é o teor de Fe de saturação do revestimento, t é o tempo em s e k é o parâmetro cinético em função da temperatura.

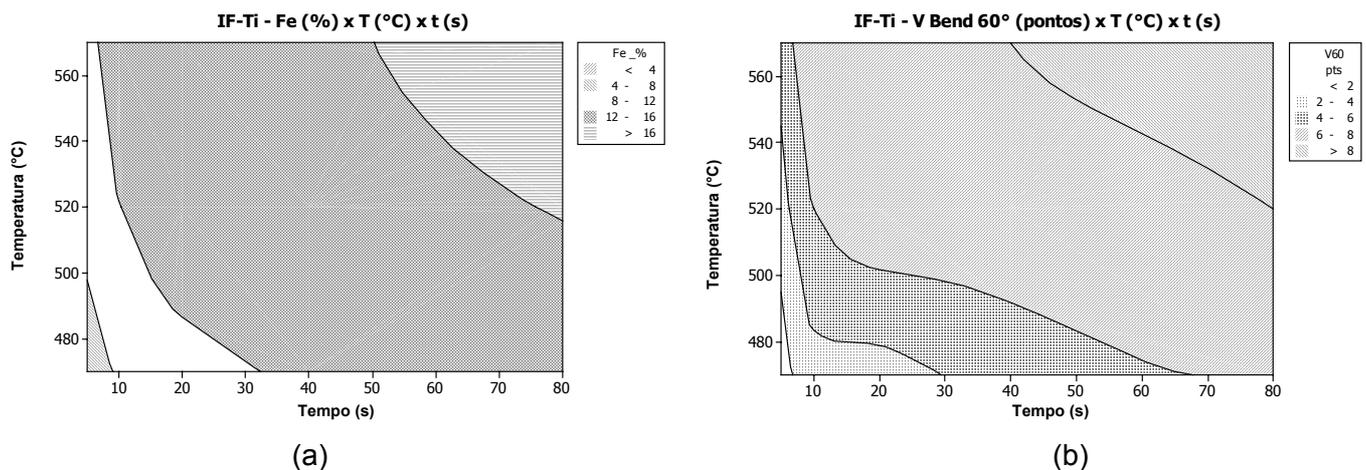
Observa-se que a taxa de enriquecimento de ferro no revestimento aumentou rapidamente até 30s, após a qual esta taxa começou a diminuir. O modelo proposto pela equação tipo Arrhenius ajusta-se muito bem na temperatura de 520°C e 570°C,

onde visualmente pode ser visto o menor espalhamento dos pontos em relação a curva ajustada. O modelo proposto pela equação de Rios ajusta-se muito bem nas temperaturas de 470°C, onde visualmente pode ser verificado um menor espalhamento dos pontos em relação a curva ajustada.

### 3.4 Determinação das Condições Adequadas de Tratamento Térmico para Obtenção do Revestimento *Galvannealed* (Janela de Processamento)

Os dados referentes aos teores de Fe e aderência obtidos pelo tratamento térmico, em cada temperatura e tempo, foram ajustados pelo método de regressão não linear dos mínimos quadrados de maneira a se obter os parâmetros necessários para construção de um programa desenvolvido para descrever a cinética de enriquecimento de ferro no revestimento *galvannealed*, visando a criação das janelas de processamento para o aço IF-Ti, em função da temperatura e tempo de tratamento.

Estas janelas, mostradas na Figura 7, são domínios fechados, dentro dos quais apresenta-se uma condição semelhante, no gráfico temperatura em função do tempo de tratamento térmico. O tempo de tratamento é função da velocidade da tira e da espessura da chapa. Ao se representar graficamente o comportamento do aço submetido a simulação do tratamento isotérmico de *galvannealing*, pode-se ter uma visão das tendências.



**Figura 7** - Janela de processamento temperatura (T) em função do tempo (t), com domínio de resposta ao teor de ferro (a) e a aderência (b)

As janelas referentes ao aço IF-Ti são muito estreitas, isto é possuem um domínio mais fechado, em todas as situações simuladas, exigindo assim um rígido controle de temperatura e tempo de tratamento térmico.

## 4 CONCLUSÕES

A partir da aplicação da metodologia de simulação do tratamento isotérmico de *galvannealing* de aços IF em Gleeble, pode-se concluir que:

1. O teor de ferro do revestimento aumenta tanto com a temperatura quanto com o tempo de tratamento térmico.
2. O modelo proposto por Rios para cinética isotérmica de enriquecimento de ferro, teve um melhor ajuste aos resultados nas temperaturas de 470°C. O modelo de equação tipo Arrhenius teve um melhor ajuste aos resultados

nas temperaturas de 520°C e 570°C. Os modelos demonstraram que a taxa de enriquecimento de ferro no revestimento foi rápida para todas as temperaturas até 20s, a partir deste tempo começou a diminuir.

3. A microestrutura do revestimento com melhores propriedades de conformabilidade seria composta principalmente de fase  $\delta$ .
4. O estudo confirmou que o aumento no teor de ferro do revestimento, acima de 12%, conduz uma drástica redução na sua conformabilidade, tendo como efeito baixo índices aderência do revestimento. Pode-se dizer que a aderência do revestimento foi função do teor de ferro do revestimento e da espessura da fase  $\Gamma$ , enquanto outros fatores como temperatura e tempo tiveram um efeito indireto, já que eles afetaram a cinética da reação.

## REFERÊNCIAS

- 1 FONSECA, F. A. V. *Efeito do Substrato dos Aços IF nas Propriedades do Revestimento Galvannealed*. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Metalúrgica e Minas da UFMG, 2006.
- 2 ZHANG, L., STRAYER, M. *Coating Formability of Hot Dip Galvannealed Steel in Press- Forming*. Technical Research Center, National Steel Corporation, U.S. Highway 12 Portage, Indiana 46368.
- 3 XAVIER, C. R., SEIXAS, U.R., RIOS, P.R. *Further Experimental Evidence to Support a Simple Model for Iron Enrichment in Hot-Dip Galvanneal Coatings on IF Steel Sheets*. ISIJ International, vol. 36, 1996, p. 1316-1317.
- 4 BAE, D., CHOI, Y., CHANG, S., SHIN, J. *Improved Powdering Resistance of Hot-Dip Galvannealed Steel Sheets*. 2<sup>th</sup> International Conference on Zinc And Zinc Alloy Coated Steel Sheet, Amsterdam, 1992, p.132-142.
- 5 LIN, C., MESHII, M. *Effect of Steel Chemistry on The Microstructure and Mechanical Properties of The Commercial Galvanneal Coating*. International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet, Chicago, 1995, p.477-484.
- 6 JORDAN, C., MARDER, A. *A Model for Galvanneal Morphology Development*. The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel. The Minerals, Metals & Materials Society. Colorado: 1993, p.197-219.
- 7 RIOS, P. *Modeling Iron Enrichment in Hot-Dip Galvanneal Coatings on Interstitial-Free Steels*. Metallurgical and Materials Transactions. 1996, p. 1132-1134.