

EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DO REVESTIMENTO GALVANNEALED (GA) DURANTE O PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE*

Henrique Lacerda Eleutério¹
Aldo Henrique de Almeida Barbosa²
Vicente Tadeu Lopes Buono³

Resumo

A demanda por aços 22MnB5-GA destinados à conformação a quente para a indústria automobilística vem crescendo continuamente em função da sua qualidade superficial ao final do processo, da proteção galvânica que proporciona às peças, da boa soldabilidade e da boa aderência da camada de pintura em relação a outros revestimentos para essa aplicação. Para o desenvolvimento desse novo produto na Usiminas, um dos principais desafios foi garantir, após o processo de conformação a quente, a integridade estrutural tanto do revestimento, uma vez que as temperaturas envolvidas são superiores à de fusão do Zn, quanto do aço. Nesse estudo foi possível quantificar as transformações das fases Fe-Zn e entender o efeito dessas transformações na qualidade do aço junto à interface com o revestimento. Os resultados permitiram estabelecer um ciclo térmico otimizado de estampagem a quente para o aço 22MnB5-GA, com excelente qualidade do revestimento e com o substrato isento de defeitos, além da possibilidade de aumentar a produtividade do processo de conformação.

Palavras-chave: Revestimento GA; Aços 22MnB5; Estampagem a quente.

MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF THE GALVANNEALED COATING (GA) DURING THE HOT STAMPING PROCESS

Abstract

The automotive industry demand for hot stamped 22MnB5-GA steels has been steadily increasing due to its excellent surface quality, galvanic protection it provides to the parts and good weldability at the end of the process. For the development of this new product at Usiminas, one of the main challenges was to ensure the structural integrity of the coating after the hot forming process, since the temperatures involved in the forming process are higher than the Zn melting temperature, and of the steel. In this study it was possible to quantify the Fe-Zn phase transformations and to understand the effect of these transformations on the quality at the interface steel/coating. The results allowed the establishment of an optimized hot stamping cycle to produce a 22MnB5-GA steel with excellent coating quality and without defect in the substrate.

Keywords: GA coating; 22MnB5 steel; Hot stamping.

¹ Engenheiro Metalurgista, Pesquisador Pleno da Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Gerente da Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Físico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca na indústria automobilística por maior competitividade de mercado tem promovido o desenvolvimento de novos aços que além de promover a desejada redução de peso, responsável pela maior economia de combustível e redução dos impactos ambientais, também são capazes de garantir a segurança do usuário, sem que se pressione o custo de produção. Os requisitos mais severos relacionados ao desempenho de um veículo em situação de colisão podem ser satisfeitos pela estampagem a frio de aço de maior espessura, o que acaba por aumentar o peso total do veículo. Além do que esses aços têm limitada conformabilidade, com limite de resistência (LR) de até 1200 MPa, e acentuado efeito mola (*springback*). Assim, para a produção de peças mais complexas (como a coluna “B”, por exemplo), são necessários processos, como a estampagem a quente, que permitem aumentar a capacidade de conformação do aço, produzir peças de maior complexidade geométrica e minimizar defeitos geométricos causados pelo efeito-mola.

Os aços 22MnB5 com revestimento galvanizado com tratamento térmico *galvannealed* (GA) estampados a quente ganham espaço a cada ano na indústria automotiva em função da sua qualidade superficial ao final do processo, da proteção galvânica proporcionada às peças, da boa soldabilidade e da boa aderência da camada de pintura em relação a outros revestimentos para essa aplicação [1]. Esses aços possuem uma elevada resistência mecânica no produto final do processo, conjugada com uma excelente ductilidade durante a conformação. Antes do processo de estampagem a quente, esses aços apresentam uma microestrutura ferrita-perlita recozida, com o LR em torno de 600 MPa, que tem boa ductilidade. Após o processo de estampagem a quente, a microestrutura passa a ser predominantemente martensítica, com um aumento considerável em seu LR, obtendo-se valores em torno de 1500 MPa.

Existe uma grande perspectiva de aumento de consumo dos aços 22MnB5-GA nos próximos anos, principalmente pela qualidade superficial e elevada resistência galvânica contra a corrosão oferecida em relação a outros tipos de revestimentos para estampagem a quente. Contudo, um dos grandes desafios para o desenvolvimento desse novo produto na Usiminas foi garantir, após o processo de conformação a quente, a integridade estrutural tanto do revestimento, uma vez que as temperaturas envolvidas são superiores à de fusão do Zn, quanto do aço.

Assim, era necessário entender e determinar o mecanismo de transformação do revestimento GA no processo de estampagem a quente do aço 22MnB5, visando à melhoria da qualidade das peças revestidas conformadas. Para tanto, nesse estudo foi avaliada, em escala de laboratório, a transformação do revestimento GA durante o tratamento térmico e a estampagem a quente, além da análise da integridade do substrato após a conformação.

A partir desses resultados, foram estabelecidas as melhores condições operacionais de tratamento térmico e conformação, que minimizem a ocorrência de defeitos superficiais no revestimento e no substrato.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

2.1.1 Material Utilizado

Para a realização dos testes experimentais foram utilizadas amostras do aço, com revestimento GA e espessura de 1,80 mm, com faixa de composição química típica mostrada na tabela 1. As amostras foram processadas na linha contínua de galvanização por imersão a quente (CGL), daUnigal Usiminas, utilizando ciclo de *galvannealing* com elevada temperatura de aquecimento indutivo (T_{Al}), entre 520°C e 600°C, e posterior encharque isotérmico, com tempo total de ciclo até 30 s.

A utilização de elevadas T_{Al} , assim como a utilização de encharque isotérmico após o aquecimento indutivo (AI), favorece a formação de um revestimento com teor de Fe mais elevado em relação aos utilizados para conformação a frio e, com isso, com maior formação de fases ricas em Fe (Γ e Γ_1), e menor de fase ζ , rica em Zn, nos instantes iniciais do tratamento térmico [2].

Tabela 1. Composição química típica do aço 22MnB5-GA utilizado no estudo

% em massa								
C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Ti
0,22 a 0,27	≤0,50	1,10 a 1,50	≤0,030	≤0,005	≥0,010	0,0005 a 0,004	≤0,35	0,020 a 0,055

2.1.2 Método Utilizado

Para a avaliação do tratamento térmico de austenitização durante o processo de conformação a quente e têmpera piloto, as amostras foram submetidas a um ciclo térmico, em um forno tipo mufla, controlando-se a taxa de aquecimento inicial, o tempo total e a temperatura final. O controle do ciclo térmico é de grande importância para a transformação do revestimento durante o processo de conformação a quente, pois afeta a eficiência do processo difusional de Fe do substrato para o revestimento e, conseqüentemente, a transformação das fases intermetálicas Fe-Zn.

Para determinar a evolução microestrutural do revestimento e entender a interação existente entre revestimento e o substrato, foram realizadas interrupções ao longo do tratamento térmico de austenitização, seguidas de resfriamento brusco das amostras até a temperatura ambiente em água. Essas interrupções foram realizadas a fim de se determinar a condição instantânea da microestrutura do revestimento. Para o controle do perfil térmico das amostras durante o tratamento térmico no forno e, posteriormente, durante o processo de conformação e têmpera foram utilizados termopares tipo K. O modelo de aquecimento utilizado no estudo é mostrado na figura 1.

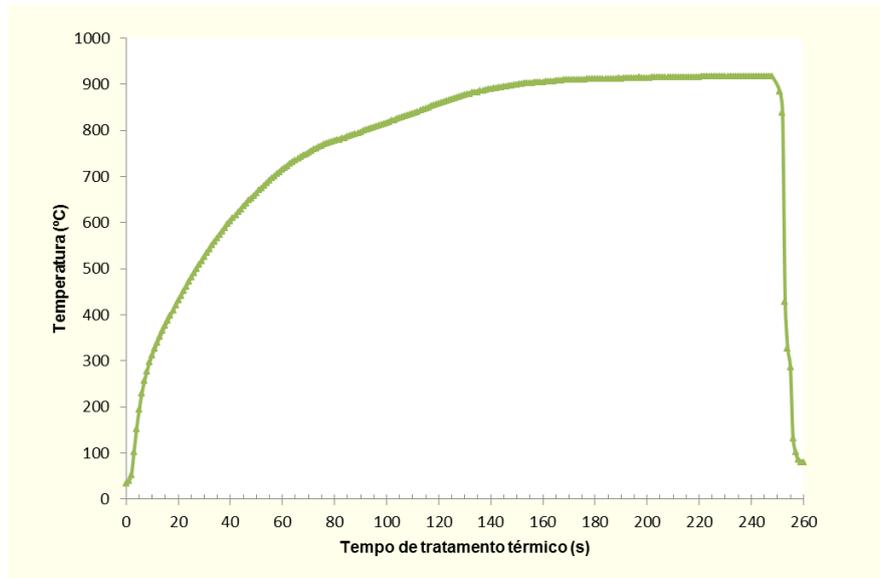


Figura 1. Ciclo de aquecimento utilizado no tratamento térmico durante o processo de conformação a quente.

Após a conclusão do tratamento de austenitização, as amostras foram conduzidas imediatamente para o processo de conformação a quente e têmpera piloto. Para a realização do processo foi utilizada uma prensa hidráulica de 40 t, com matriz e molde resfriados a água. O tempo e a temperatura de transferência da amostra para a prensa, realizada manualmente, foram controlados. A disposição dos equipamentos, mufla e prensa hidráulica, utilizados nos testes é mostrada na figura 2.



Figura 2. Prensa com matriz e molde refrigerados a água e forno tipo mufla utilizados para o processo de estampagem a quente piloto.

Para a caracterização das amostras antes e após o tratamento térmico, assim como após a conformação a quente e a têmpera, foram realizadas análises de qualidade superficial, integridade estrutural, microestrutura e composição química do revestimento. A análise de composição química e a determinação de fases do revestimento GA, antes do processo de conformação a quente, foram realizadas via espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e difratometria de raios X (DRX). A morfologia, composição química ao longo da seção transversal e microestrutura do revestimento, antes e após a conformação, foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro de raios X

por dispersão de energia acoplada (MEV/EDS/*Line scan*). Para análise da microestrutura do revestimento, os valores pontuais obtidos nos perfis de composição química foram interpolados no diagrama Fe-Zn para a verificação de quais fases foram formadas na região referente ao ponto. Inicialmente, foi levada em consideração que a interseção das curvas de Zn e Fe representa a interface revestimento/substrato. A determinação das fases foi realizada considerando que a fase ζ (zeta) contém de 5% a 6% de Fe; δ (delta), 7% a 12% de Fe; Γ_1 (gamma 1), 17% a 19% de Fe, e Γ (gamma), 23% a 28% de Fe [1-3].

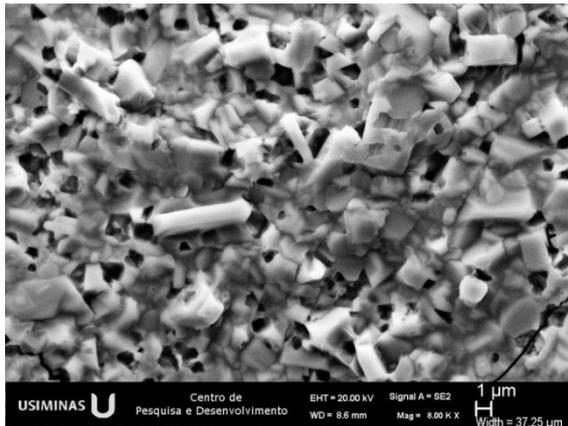
A microestrutura do substrato foi analisada após o processo de conformação a quente. Foram avaliadas, via microscopia ótica, as regiões de dobramento, por estarem submetidas a condições severas de conformação, e de estiramento das amostras, por estarem sujeitas ao atrito entre a peça e o ferramental. De acordo com Drillet *et al.* [4], as regiões de dobramento estão sujeitas a ocorrência de macrotrincas ($\geq 100 \mu\text{m}$), formadas pela fragilização dos contornos de grãos por penetração de Zn líquido (LME), e as regiões de estiramento estão sujeitas apenas ao surgimento de microtrincas, formadas pelo atrito entre a peça e o ferramental. As propriedades mecânicas do substrato foram obtidas por ensaio de tração uniaxial utilizando corpos de prova que atendem a norma ASTM-A370 [5].

2.2 Resultados e Discussão

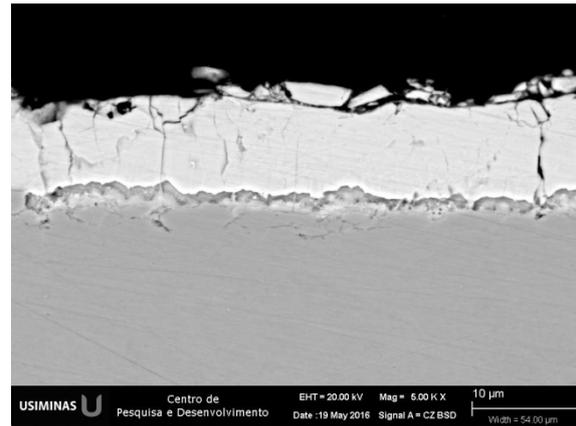
2.2.1 Caracterização do Revestimento *Galvannealed* (GA) Anterior ao Processo de Conformação a quente

Na figura 3 são mostrados aspectos morfológicos de superfície e seção do revestimento GA, antes do tratamento térmico, conformação a quente e têmpera. O revestimento GA produzido com o ciclo de *galvannealing* com temperaturas elevadas apresenta teor de Fe e espessura da camada de fases Γ e Γ_1 maiores que os encontrados em materiais tipicamente destinados a conformação a frio [2], conforme mostrado nas figuras 3b e 3c. Pela análise de composição química do revestimento, via ICP-OES, o teor de Fe obtido no revestimento foi de 14,3% (percentual em massa). Esse teor de Fe do revestimento encontra-se acima da faixa de tolerância normalmente empregada para aços destinados a estampagem a frio, entre 9% e 12% [2]. O teor de Fe mais elevado, assim como a espessura da camada de fases Γ e Γ_1 mais elevada, indicam que o revestimento apresenta características mais afeitas ao processo de conformação a quente que os revestimentos GA típicos, por ser menos susceptível a perda de massa, no início do tratamento térmico. Portanto, o emprego dessa metodologia surtiu o efeito desejado.

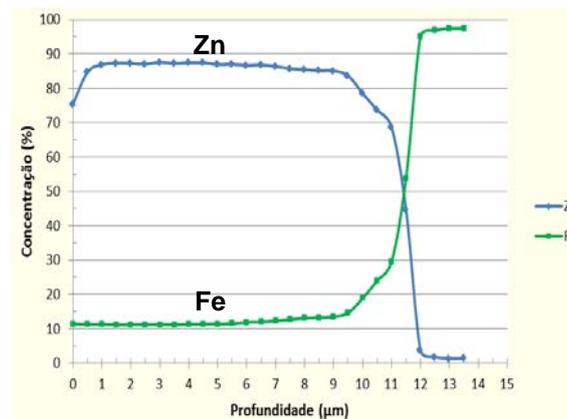
O maior teor de Fe no revestimento obtido refletiu a influência da etapa de encharque isotérmico após o aquecimento indutivo. A partir dos resultados de composição química ao longo da seção transversal da amostra, figura 3c, foi possível estimar que o revestimento é formado majoritariamente por camadas de fases δ , em maior proporção, e por Γ e Γ_1 .



a) AO: 8000X



b) AO: 5000X



c) Perfil de composição química ao longo da espessura do revestimento

Figura 3. Fotomicrografia do aspecto morfológico e composição química da superfície e seção do revestimento GA formado no aço 22MnB5, antes da conformação a quente, via MEV/EDS/*Line scan*. AO: Ampliação original.

A constituição estrutural do revestimento, formada por camadas de fases δ , em maior proporção, Γ e Γ_1 foi evidenciada também pela análise de DRX, apresentada na tabela 2, onde as fases Γ e Γ_1 foram quantificadas conjuntamente. Apesar de não ter sido observada pelas análises via MEV/EDS/*Line scan*, a presença de fase ζ na superfície do revestimento, mesmo em menor proporção, foi evidenciada nos resultados de DRX. Essa menor proporção sugere que, possivelmente, os cristais de ζ formaram-se isolados e, portanto, de difícil percepção pelas análises via MEV/EDS/*Linescan*.

Tabela 2. Contagem das fases na camada de revestimento GA, via difratometria de raios X

Fases	d (Å)	2 θ	Taxa de Contagem		
			Absoluta	Background	Líquida
Γ	1,222	78,15	12.736	11.187	1.549
δ	1,279	74,06	17.292	11.107	6.185
ζ	1,260	75,37	11.872	11.198	674

2.2.2 Evolução Microestrutural do Revestimento ao Longo do Processo de Conformação a quente

Nas figuras 4 a 6 são mostrados os resultados de caracterização do aço 22MnB5-GA ao longo tratamento térmico. De um modo geral, evidencia-se que a morfologia, microestrutura e composição química do revestimento se modificam completamente. Ao final do tratamento térmico o revestimento é formado por duas camadas distintas. A primeira é uma camada homogênea e compacta, constituída pela solução sólida Fe_{α} -Zn (70%Fe-Zn), aderida ao substrato e com espessura em torno de 16,0 μm . A segunda encontra-se acima da primeira, constituída pela fase intermetálica Γ (70%Zn-Fe). Além disso, observa-se a formação de uma camada de óxido na superfície do revestimento, com até 4,0 μm de espessura.

Próximo de 70 s de tratamento térmico observa-se a ocorrência do enriquecimento do revestimento em Fe, a partir de um processo difusional, conforme observado na figura 4.

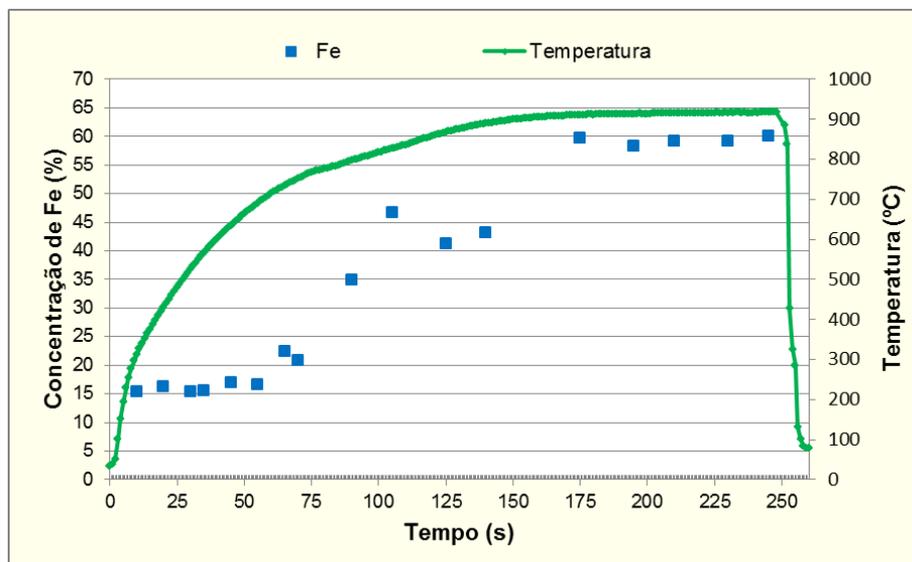


Figura 4. Variação da concentração de Fe no revestimento GA do aço 22MnB5 ao longo do tratamento térmico de austenitização, via MEV/EDS/LineScan.

Esse enriquecimento é observado pelo surgimento do patamar na curva de Fe, com teor acima de 20%, indicando a formação de uma espessa camada de fases Γ e Γ_1 , conforme observado nas figuras 5a e 6a. A camada constituída pelas fases Γ e Γ_1 , próxima à interface com o substrato, evoluiu até atingir a superfície, refletindo o enriquecimento contínuo do revestimento em Fe, figura 5a. A formação de cristais de fases Γ e Γ_1 no revestimento foi proporcionado a partir da transformação das fases ζ e δ , a partir de seu enriquecimento em Fe. Após esse período, o revestimento é constituído por uma camada de fases Γ e Γ_1 , em maior proporção, e por regiões de fase δ , conforme observado nas figuras 5a e 6a. Contudo, na interface revestimento/substrato é evidenciado, também, o início da formação da camada de solução sólida Fe_{α} -Zn.

Com o aumento do tempo e temperatura de tratamento térmico até 140 s e 890°C, a espessura da camada de solução sólida Fe_{α} -Zn aumenta, além de se observar a

presença de regiões globulares de solução sólida Fe_{α} -Zn por toda a camada de revestimento, figuras 5b e 6b. Evidencia-se que a formação da camada de solução sólida Fe_{α} -Zn ocorre a partir de uma camada contínua, originada na interface revestimento/substrato, e, também, de reações sólido-líquido, como observado por Fan e De Cooman [6], com o crescimento de regiões globulares de solução sólida Fe_{α} -Zn em meio a camada de fase Γ , observadas nas figuras 5b e 6b. A formação e crescimento dessa camada são de grande importância para o processo, pois ela age como barreira evitando a penetração de Zn líquido nos contornos de grãos e a propagação de trincas no substrato. Após esse período, até o tempo de 245 s, o revestimento constitui-se por duas camadas bastante distintas, figuras 5c, 5d, 6c e 6d. A primeira é a camada de solução sólida Fe_{α} -Zn e a segunda é a camada de fase intermetálica Γ , formada próxima à superfície do revestimento. Além disso, na superfície é evidenciada a formação de uma camada espessa de óxidos, constituídos por Mn, Si, Al e Zn. A formação e crescimento dessa camada de óxido protege o revestimento, principalmente, contra a perda de massa, garantido a sua integridade ao ser submetido a temperaturas elevadas.

A partir das características do revestimento obtidas ao longo do ciclo de tratamento térmico aplicado ao aço 22MnB5-GA, evidencia-se que as condições aplicadas, temperatura e tempo, produziu um revestimento com características adequadas para o processo de conformação a quente, originando amostras com excelentes qualidade superficial e integridade estrutural, além de uma melhora na resistência à corrosão.

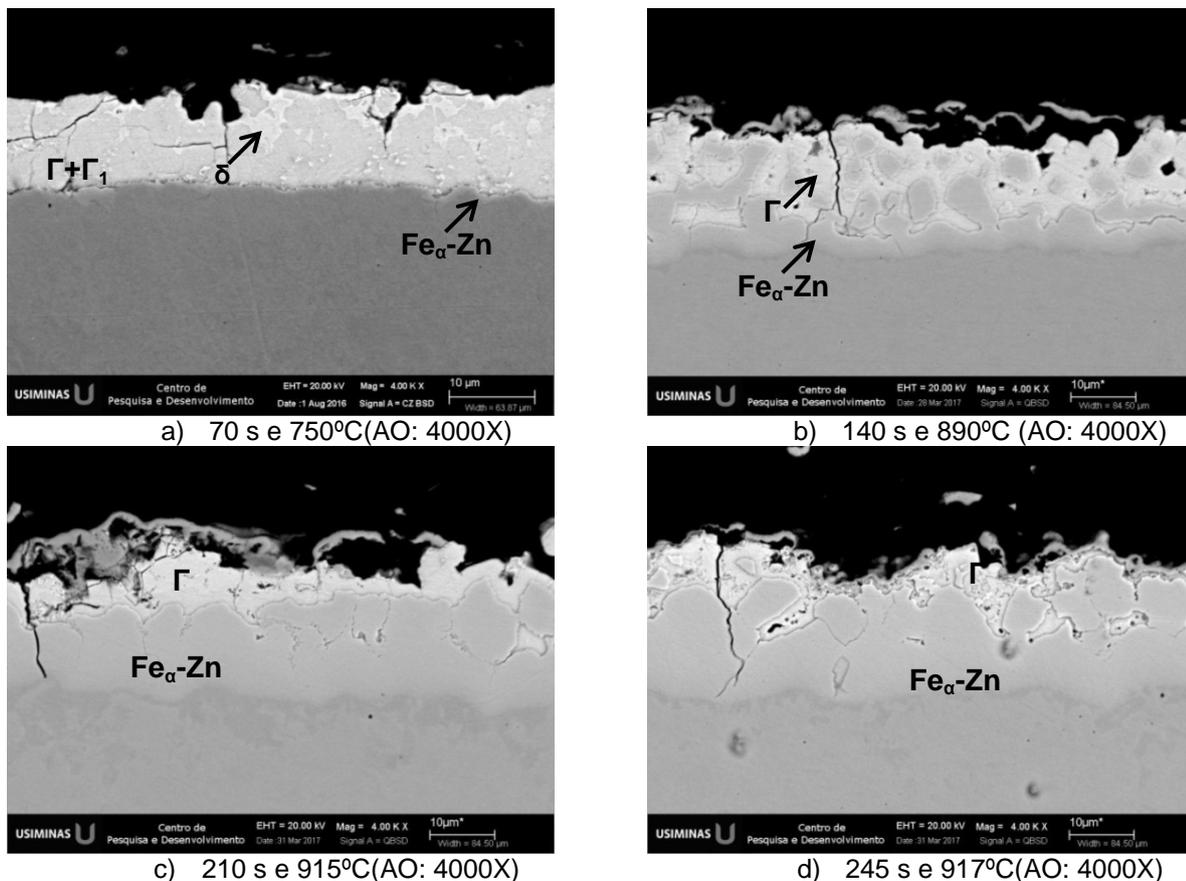


Figura 5. Fotomicrografia do revestimento do aço 22MnB5 ao longo do tratamento térmico de austenitização, via MEV.

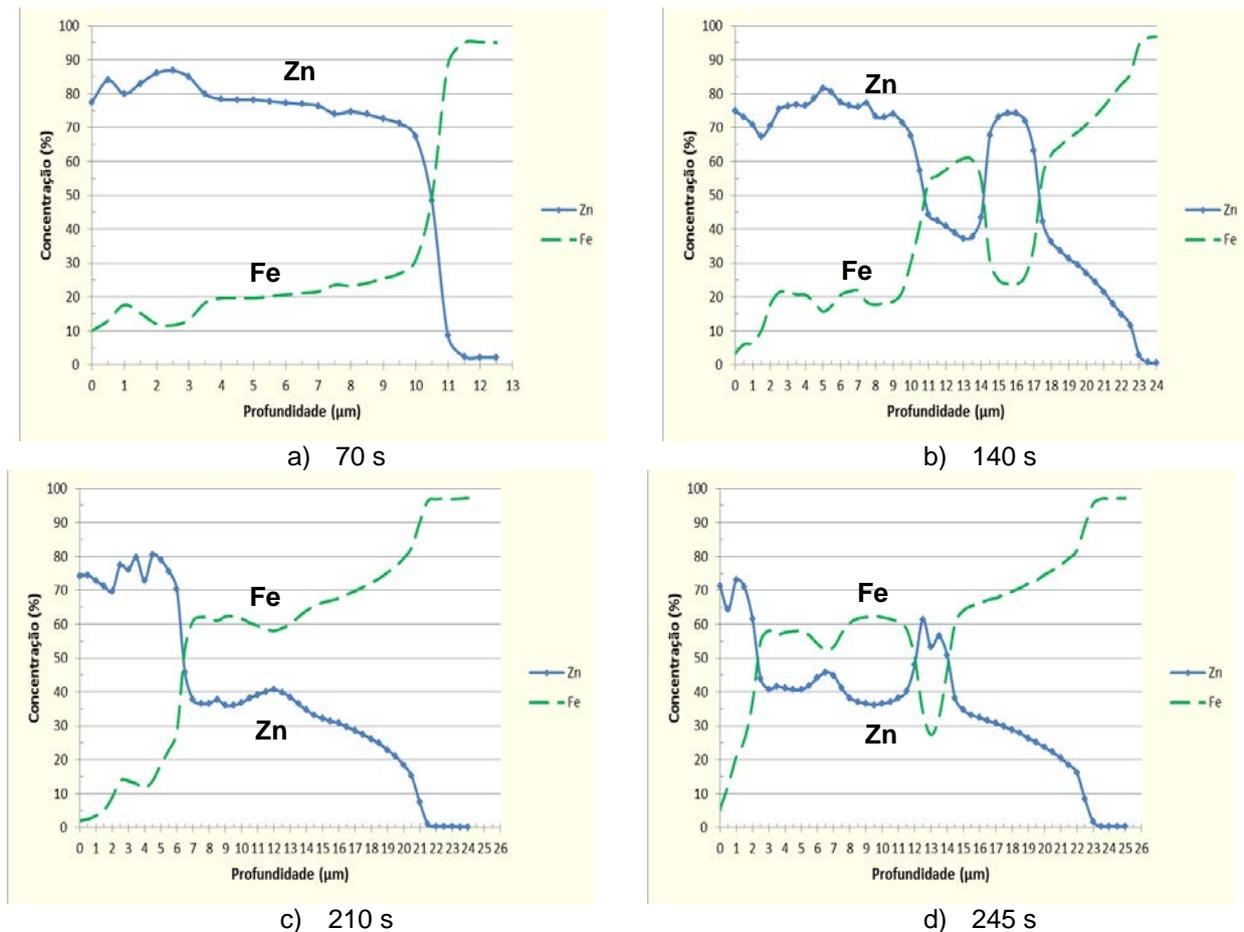


Figura 6. Composição química ao longo da seção transversal do revestimento, durante o tratamento térmico de austenitização, via MEV/EDS/Linescan.

3.2 Caracterização do Material Após o Processo de Conformação a Quente

Os resultados das análises da microestrutura do substrato obtida após a conformação a quente, via microscopia ótica, são mostrados na figura 7. A microestrutura do substrato é composta predominantemente pelo constituinte martensita, evidenciando a efetividade do tratamento térmico utilizado nas simulações e a representatividade da simulação em relação ao processo industrial [1]. O aspecto das amostras após o processo de conformação a quente e têmpera é mostrado na figura 8.

As propriedades mecânicas em tração (LE, LR e alongamento) das peças conformadas a quente atendem aos requisitos visados para aplicação do produto [1], conforme mostrado na tabela 3.

Evidencia-se que as peças produzidas com o tratamento térmico proposto, conformadas a quente e temperadas estão isentas de trincas no substrato, independente da região analisada, ou seja, ao longo de todo o perfil da peça, figura 7.

Pelos resultados obtidos, as condições utilizadas no estudo para a simulação do processo de conformação a quente, em escala piloto, produziram revestimentos com boa qualidade superficial e integridade estrutural.

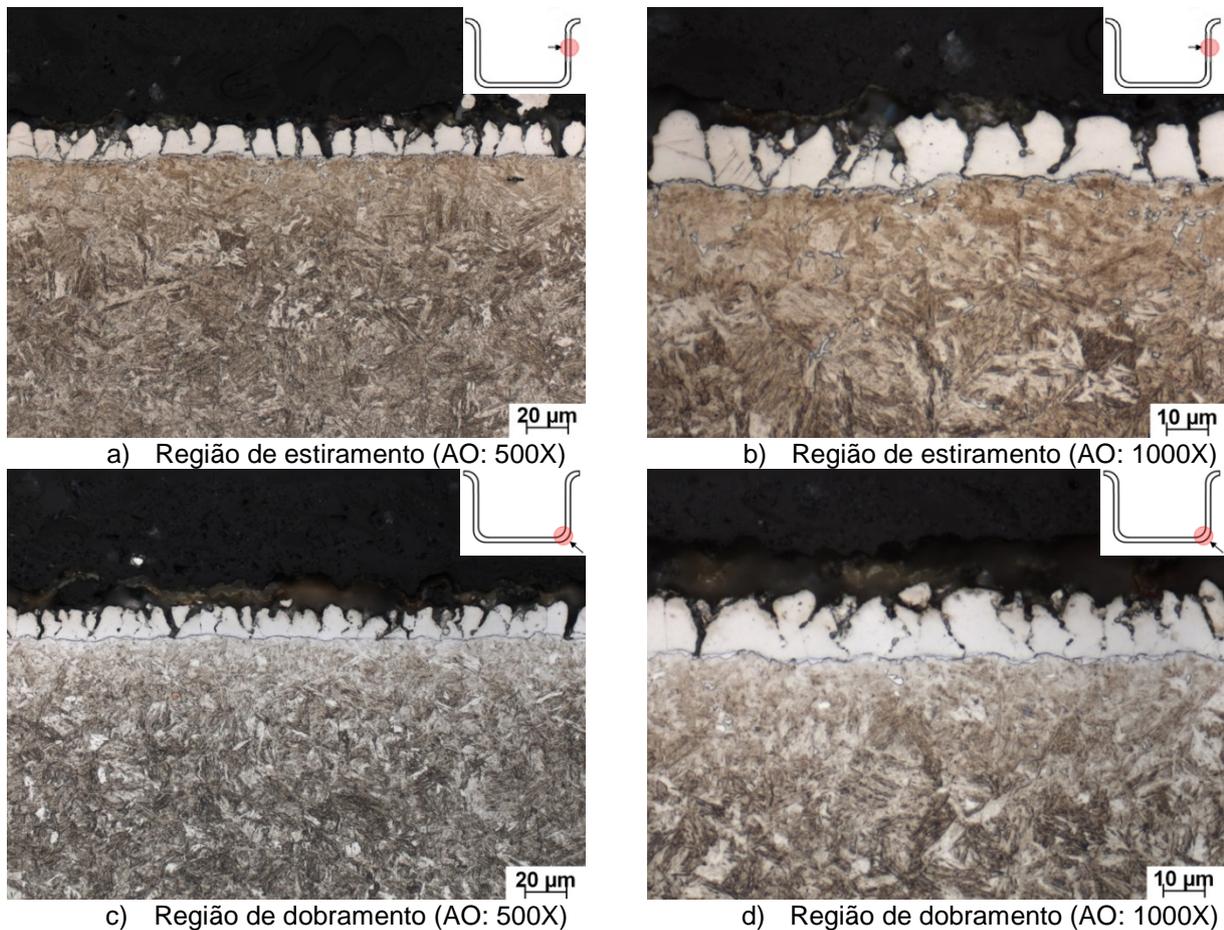


Figura 7. Fotomicrografia da microestrutura de regiões de estiramento e dobramento do aço revestido 22MnB5 após a conformação a quente, via MEV.



Figura 8. Aspecto da amostra após o processo de conformação a quente em escala piloto.

Tabela 3. Propriedades mecânicas das amostras de aço 22MnB5-GA após a conformação a quente e têmpera simultâneas

LE (MPa)	LR (MPa)	Along. Uniforme (%)	Along. total (%) BM*=25 mm
1395	1759	3,6	7,7

*BM=Base de medida

3 CONCLUSÃO

A simulação do tratamento térmico de austenitização, em escala piloto, produziu um revestimento adequado para suportar a aplicação no processo de conformação a quente, com a obtenção de peças com excelente qualidade superficial e integridade estrutural do revestimento. O substrato obteve microestrutura predominantemente martensítica e propriedades mecânicas (LE e LR) conforme desejadas para a sua aplicação.

O revestimento obtido após o tratamento térmico foi constituído, basicamente, por duas camadas distintas. A primeira é uma camada homogênea e compacta, constituída pela solução sólida Fe_{α} -Zn (70%Fe-Zn), aderida ao substrato e com espessura em torno de 16,0 μ m. A segunda encontra-se acima da primeira, constituída pela fase intermetálica Γ (70%Zn-Fe). A presença da camada de fase Γ , mais rica em Zn, na superfície, melhora a resistência à corrosão do produto, por promover proteção galvânica. Além disso, observa-se a formação de uma camada de óxido, constituídos por Mn, Al, Zn e Si, na superfície do revestimento, com até 4,0 μ m de espessura. Essa camada de óxido oferece uma proteção por barreira, protegendo o revestimento da perda de massa ao ser submetido a temperaturas elevadas.

A camada de solução sólida Fe_{α} -Zn surgiu com 70 s de tratamento térmico e temperatura de 750°C, e seu crescimento ocorreu em duas frentes distintas. A primeira a se formar é a camada contínua, a partir da interface revestimento/substrato. A segunda é constituída por ilhas globulares que se formam no interior das fases ricas em Zn, como a Γ . A camada de solução sólida Fe_{α} -Zn é de grande importância para o processo, pois ela age como barreira protegendo o substrato contra a penetração de Zn líquido nos contornos de grãos e a propagação de trincas. Os substratos de aço das amostras estampadas a quente, com o tratamento térmico utilizado no estudo, estavam isentos de trincas, tanto nas regiões de dobramento quanto nas de estiramento.

REFERÊNCIAS

- 1 Barbosa AHA, Eleuterio HL, Pereira JFB, Carvalho JLC. Desenvolvimento de metodologia para caracterização do aço 22MnB5galvannealed destinado a conformação a quente. 53ºRolling Seminar. ABM Proceedings. 2016; 72-81.
- 2 Barbosa AHA. Efeito das condições de *galvannealing* na qualidade do revestimento galvanizado a quente GA formado sobre aços de alta resistência contendo P e B. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.
- 3 Guttmann M. Diffusive phase transformation in hot dip galvanizing. Materials Science Forum. 1994; 155-156: 527-548.
- 4 Drillet P, Grigorieva R, Leuillier G, Vietoris T. Study of cracks propagation inside the steel on press hardened steel zinc based coating. La Metallurgia Italiana. 2012; 1.
- 5 American Society for Testing and Materials. ASTM A370-17: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. United States of America:ASTM International; 2017.
- 6 Fan DW, DeCooman BC. State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts. Steel Research International. 2012; 83(5): 412-433.