

EFEITO DOS CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA FORMAÇÃO DE TRINCAS NO REVESTIMENTO Zn-Fe APLICADOS EM AÇOS BIFÁSICOS*

Claudeir Carvalho Silveira¹
Carlos Augusto Silva de Oliveira²
Jose Francisco da Silva Filho³
Eder Serafim⁴
Bruno Kneipel⁵

Resumo

Para produzir os aços bifásicos galvanizados com revestimento de Zn-Fe as tecnologias de galvanização foram adaptadas visando à produção de aços com alta resistência, resistentes à corrosão e boa conformabilidade. Desta forma, e considerando as deformações obtidas na estampagem tornou importante a caracterização em laboratório da influência do nível e do caminho de deformação na geração de trincas do revestimento com Zn-Fe aplicado a um aço bifásico. O presente trabalho avaliou o efeito dos caminhos de Deformação Uniaxial, Deformação Plana e Estiramento Biaxial Simétrico na evolução das trincas do revestimento Zinco-Ferro (Galvannealed-GA) e sua conectividade considerando o aço base Dual Phase 600. Foi observado que aumento da área composta por trincas ocorre com o aumento do nível de deformação para todos os caminhos avaliados. O Estiramento Biaxial Simétrico foi o caminho de deformação que mais influenciou no aumento da área com trincas na superfície do revestimento e na conexão destas trincas com o aço base. Isso ocorreu em função do estado de tensão (tração-tração) imposta à superfície e à seção dos revestimentos. Mesmo sendo observada a conectividade das trincas com o aço base não foi verificado visualmente defeitos de deslocamento do revestimento tais como Powdering e Flaking.

Palavras-chave: Aços bifásicos; Galvanized (GI); Galvannealed (GA); Caminhos de deformação.

EFFECT OF DEFORMATION PATHS IN THE FORMATION OF CRACK IN ZN-Fe COATED APPLIED AT DUAL PHASE STEEL

Abstract

To produce the dual phase steels with Zn-Fe coating the hot dip process technologies were adapted aiming the production of steels with high strength, corrosion resistant and good formability. Thus, considering the deformations obtained from on the stamping process grew important the characterization of influence of the level and the deformation path on the generation of cracks at Zn-Fe coating. The present work evaluated the effect of the deformation paths "Uniaxial Deformation Plane Strain and Symmetrical Biaxial Stretching" in the evolution of cracks at Zn-Fe coating and the connectivity this cracks with substrate. Was observed that area whit cracks of coating increasing with the strain level for all deformation paths. The Symmetrical Biaxial Stretching was deformation paths that most influenced the increase of the area with cracks in the surface of the coating and the connection of these cracks with the substrate. This occurred due to state of stress imposed at surface and the cross section of the coating. Even being observed the connectivity of the cracks of coating with the substrate, was not visually observed the adherence defects such as Powdering and Flaking.

Keywords: Dual phase steel; Galvanized (GI); Galvannealed (GA); Deformation paths.

¹ Eng. Produção Mecânica, Mestre em Ciências e Engenharia dos Materiais, Especialista em Engenharia de Produtos, Gerência de Metalurgia, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, DSc., professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

³ Eng. Químico, M.Sc, Gerência de Área de Laboratório Metalúrgico e de Processos, Gerência de Metalurgia, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico; Especialista do Laboratório Metalúrgico e de Processos, Gerência de Metalurgia, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

⁵ Téc. Mecânica, Técnico em Metalografia do Laboratório Metalúrgico e de Processos, Gerência de Metalurgia, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O processo de estampagem de aços bifásicos galvanizados com Zn-Fe tem sido exaustivamente estudado nos últimos anos em função da necessidade de produção de veículos mais leves que resultem na redução do consumo de combustível e em maior resistência a corrosão. Na estampagem, o comportamento do material depende de fatores tais como pressão de contato, velocidade de estampagem, aço base, material da ferramenta, lubrificante e revestimento do aço base. O dimensional do blank também pode influenciar no fluxo do material na estampagem e na distribuição final de tensões [1-6].

O revestimento com Zn-Fe é produzido a partir da exposição do revestimento zinco puro a um tratamento térmico após o banho de zinco formando microestrutura constituída pelas fases gama (Γ), delta (δ) e zeta (ζ). Dessa forma, o controle dessas fases duras e frágeis torna-se essencial para manutenção da aderência do revestimento e sucesso do processo estampagem dos aços de alta resistência [7-8].

Além dos aspectos relacionados à formação do revestimento, outro aspecto bastante discutido é a formação e a conectividade de trincas de revestimento com o aço base durante o processo de estampagem e qual o impacto na aderência do revestimento. As trincas nos revestimentos são formadas inicialmente na solidificação do revestimento após o processo de galvanização e aumentam com o aumento da tensão e das deformações geradas por estas tensões durante o processo de estampagem. Podem ocorrer de forma intergranular e intragranular afetando o comportamento do material nos processos de estampagem.

Como benefício, às trincas de revestimento podem aliviar tensões compressivas evitando o deslocamento do revestimento e diminuindo defeitos tais como Powdering e Flaking pela inibição da propagação de novas trincas ao longo da interface entre o aço base e a fase Γ . Como ponto negativo, pode ocorrer a redução da resistência à corrosão com o deslocamento parcial ou total do revestimento [9]. Geralmente a formação de trincas de revestimento é avaliada para o caminho deformação uniaxial pela facilidade da utilização do ensaio de tração uniaxial para obtenção do material deformado. Porém, para os caminhos de Deformação Plana e Estiramento Biaxial Simétrico ainda existe pouca literatura. [10-11].

O presente trabalho, portanto avaliou o efeito dos caminhos de Deformação Uniaxial, Deformação Plana e Estiramento Biaxial Simétrico na evolução das trincas de revestimento com Zinco-Ferro (Galvannealed-GA) e sua conectividade com o aço base em um aço bifásico DP600. O aço bifásico com Zn-Fe utilizado neste trabalho será denominado de DPGA.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço DPGA foi produzido com redução de 68% na laminação a frio com espessura final de 1,50mm para a bobina sem recozimento ou Full Hard. Na linha de galvanização o material foi processado obtendo gramatura de revestimento de zinco de 50g/m².

As Tabelas 1 e 2 mostram a composição química e as propriedades mecânicas do material utilizado no experimento.

Tabela 1 - Composição Química do material utilizado

Material	(%)						
	C	Mn	Cr	Si	S	P	Mo
DPGA	0,12	1,83	0,34	0,22	0,0035	0,016	0,001

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas

Amostra	Direção do Ensaio	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (80) %	Valor "r"	Valor "n"
DPGA	Transversal	398	631	24	1,01	0,146
	Diagonal	400	630	23	0,82	0,147
	Longitudinal	392	626	26	0,84	0,147
Norma ASTM A1079 – 12 Garantia no sentido Longitudinal		> 340	> 590	> 21	-	> 0,14

2.1 Caracterização Microestrutural

Foram analisadas as microestruturas do aço base e do revestimento utilizando microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). A microestrutura do aço base e dos revestimentos como recebido foi analisada na seção transversal. A superfície do revestimento como recebido e sem preparação foi avaliada utilizando o MEV, não sendo realizado embutimento, polimento ou ataque. Para o DPGA também foi feita a quantificação da fase zeta (ζ) na superfície do revestimento utilizando método interno ArcelorMittal de comparação de imagens.

Para a identificação das fases presentes no aço base inicialmente as amostras foram cortadas no sentido de laminação, embutidas, lixadas utilizando lixa de granulometria 120 a 1200 e polidas com pastas de diamante de $\frac{1}{2}$, e 2 Micra. Posteriormente, estas amostras foram atacadas com solução de Lepera (Picral (4%) + Metabisulfito de Sódio (1%)). A análise metalográfica foi realizada em um Microscópio Ótico (Zeiss-A1m) com software analisador de imagens (Axio Vision).

Para quantificação da martensita presente no aço base as amostras foram atacadas com solução de Nital 4% e obtidas imagens com Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL, Modelo JSM 6360). A quantificação da martensita foi realizada com a utilização de uma grade contendo 1488 pontos (48x31) sobreposta nas imagens obtidas no MEV. A análise foi realizada utilizando-se um software analisador de imagens (Axio Vision). Para esta determinação foram utilizados quatro campos a $\frac{1}{4}$ da espessura. Os resultados obtidos são uma média das quatro medidas. A fração volumétrica foi calculada como sendo a razão entre o número de pontos sobrepostos às ilhas de martensita e o número total de pontos da grade.

Para análise da seção dos revestimentos as amostras foram lixadas (lixas de 120, 320 e 1200 microns), polidas utilizando pasta de diamante ($\frac{1}{2}$ e 2 Micra) e atacadas quimicamente com solução de Nital a 1%. Para medição da espessura da fase gama (Γ), foi avaliado um campo da seção do revestimento, obtido por MEV (JEOL-JSM 6360) utilizando um software Axio Vision Rel 4.6. A espessura da camada da fase gama (Γ) foi medida em 10 pontos ao longo da seção transversal sendo que o valor final apresentado é a média destas dez medições.

O aumento da área com trincas na superfície do revestimento e a conectividade da trinca do revestimento com o aço base foi avaliada com amostras obtidas após a simulação dos caminhos de deformação para o DPGA considerando 0%, 50% e 100% de deformação. Para avaliação do nível de deformação de 0% foi utilizada amostra como recebida.

Amostras da superfície do revestimento de tamanho 10x10mm foram avaliadas no MEV sem ataque químico ou polimento. A medição da área com trincas foi realizada utilizando software analisador de imagens (Axio Vision) e dois campos para cada nível e caminho de deformação estudado. A área total com trincas e o seu percentual com relação à área total do revestimento foi analisada considerando o somatório dos dois campos avaliados.

Para avaliação da conectividade das trincas de revestimento com o aço base foi utilizado seis campos obtidos na seção do revestimento por MEV. As amostras foram preparadas conforme procedimento de avaliação de seção de revestimento sem deformação já apresentado. A identificação e medição das áreas das trincas com e sem conexão com o aço base foi feita utilizando o software analisador de imagens (Axio Vision). Foi identificada a área total do revestimento avaliada (μm^2), área total do revestimento com trincas (μm^2), a quantidade de trincas com e sem conexão ao aço base e sua percentagem com relação à área total de revestimento estudada.

2.2 Simulação dos Caminhos de Deformação

Para a simulação dos caminhos de deformação foi utilizado o ferramental Nakajima. Foram preparadas duas amostras por caminho de deformação, sendo uma ensaiada com 50% de deformação e a outra até a ruptura, ou seja, com 100% de deformação. As dimensões dos corpos de prova utilizadas para simulação dos caminhos Deformação Uniaxial, Deformação Plana, e Estiramento Biaxial Simétrico estão conforme recomendado pela norma ISO-FDIS 12004-1 e ISO-FDIS 12004-2 (2008) [12-13]. Na sequência foi realizada a gravação de uma malha quadrada de 2mm de aresta na superfície da chapa por processo eletroquímico. Após marcação eletroquímica os corpos de prova foram lubrificados e estampados em uma máquina Zwick / Roell BUP 600.

Após a estampagem, os corpos-de-prova foram avaliados com relação ao posicionamento da estrição e então realizadas as medidas das deformações. Foi realizada a medição de deformação de um quadrado impresso adjacente à estrição para cada caminho de deformação estudado. A partir das medidas dos quadrados deformados, foram calculadas as deformações principais, ε_1 e ε_2 . Assim foi possível identificar as deformações máximas antes na estrição. A medição das deformações principais foi realizada automaticamente pelo software ASAME Target v4.1 acoplado a uma máquina de ensaios Zwick / Roell BUP 600 e utilizando Câmera Nikon D40. Na sequência foi realizada nova conformação para os materiais objetivando 50% de deformação e a identificação das deformações principais.

Após as medições das deformações ε_1 e ε_2 , foi utilizado um modelo de predição de Curva Limite Conformação desenvolvido pela ArcelorMittal Maizières para identificar a curva limite de conformação teórica para o material estudado. A predição da Curva Limite Conformação foi obtida com base nas propriedades mecânicas de alongamento uniforme (A_u), limite de resistência (LR), espessura real e valor de anisotropia obtida na direção transversal ao sentido de laminação (r_{90}).

2.3 Perda de Massa do Revestimento

O ensaio de perda de massa foi realizado para avaliar a capacidade de aderência do revestimento GA quando submetido a solicitações de tração e compressão durante o ensaio de Embutimento. Foram retiradas cinco amostras circulares com 60 mm de

diâmetro para cada material. Antes do processo de Embutimento as amostras foram limpas por ultrassom, modelo VR Ultrasonics, durante 10 minutos com solução de acetona. Na sequência as amostras foram lavadas em álcool sendo posteriormente secas e pesadas em uma balança de precisão Ohaus Adventurer. A conformação foi realizada em uma Máquina de Embutimento Erichsen, modelo 102 utilizando força de punção de 90kN (+/- 2kN) obtendo no final geometria de “copo” com 30mm de diâmetro de aresta. Para lubrificação na conformação foi utilizado filme plástico. Após a conformação as amostras foram novamente limpas por ultrassom, secas e pesadas. A perda de massa foi considerada como a diferença entre o peso da amostra inicial e a final. Cada valor apresentado foi resultado da média de cinco ensaios.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microestrutura do Aço Base

Na Figura 1 são apresentadas as microestruturas do aço base onde em (a) obtidas por microscopia ótica (MO) em (b) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nas microestruturas obtidas por MO observa-se a matriz constituída de ferrita (cor cinza) e a presença de martensita, em branco. Nas microestruturas obtidas por MEV a matriz constituída de ferrita é observada na cor cinza escura e a presença de martensita na cor cinza clara. A porcentagem de martensita obtida foi de 10 (+/-2%). No caso do DPGA, em particular, deve ocorrer a formação da bainita com a utilização do tratamento térmico do revestimento. Apesar de não ter sido observada a bainita neste trabalho, pode-se dizer que devido à utilização da temperatura de tratamento térmico do revestimento superiores a >500°C para a produção DPGA, a bainita pode ter sido formada. A temperatura do pote de zinco, neste caso de 460°C (+/-20°C), não influencia na formação de bainita devido a estar geralmente abaixo da temperatura de formação da bainita para os aços bifásicos.

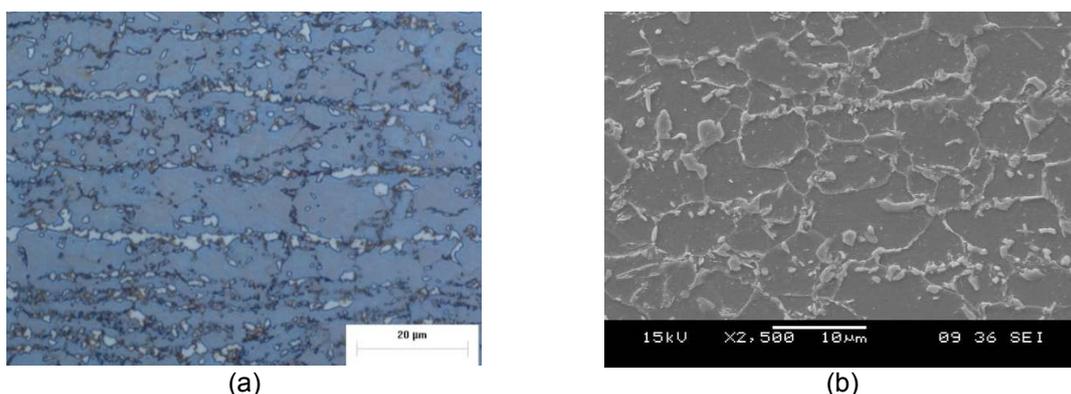


Figura 1 - Microestruturas superficiais do DPGA

3.2 Microestrutura do Revestimento – Sem Deformação

Na Figura são apresentadas em (a) a microestrutura de superfície e em (b) da seção do revestimento avaliada por MEV. Observa-se boa formação do revestimento e da fase Gama (Γ) não sendo observadas grandes trincas ou fissuras no material como recebido. Pequenas trincas observadas na superfície do revestimento são em decorrência da solicitação do revestimento. A espessura média da fase Gama (Γ) na

face superior foi de $0,81\mu\text{m}$ e na inferior de $0,92\mu\text{m}$. O revestimento possuía quantidades de fase zeta (ζ) inferiores a 1,0%.

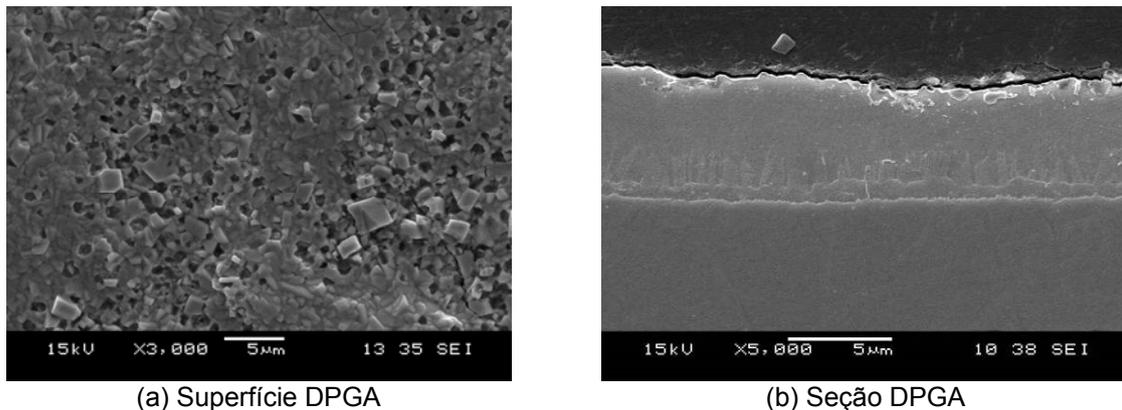
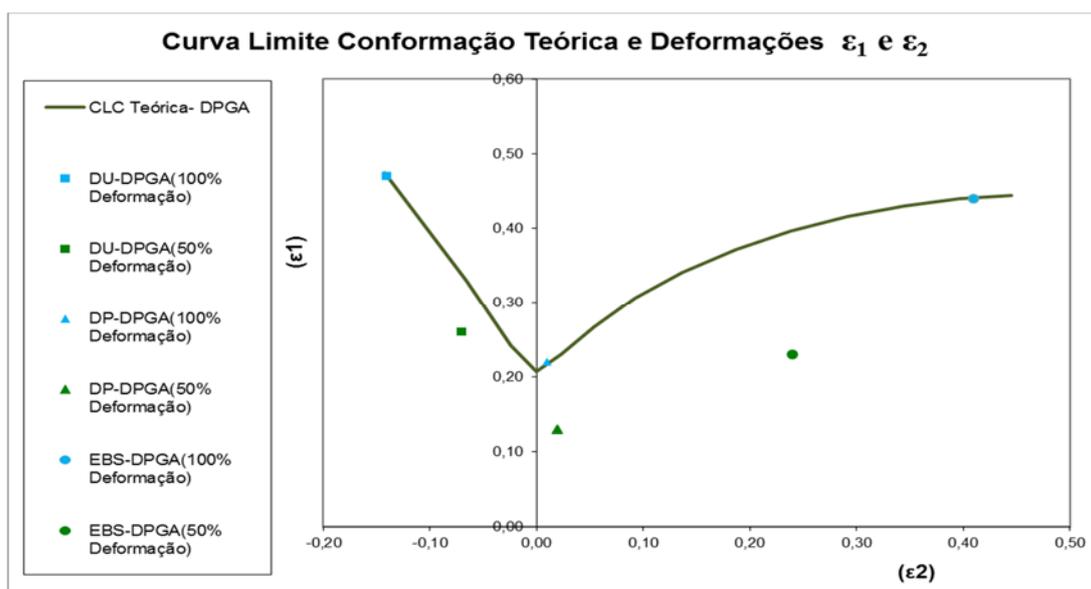


Figura 2 – (a) Microestrutura da superfície e em (b) de seção obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.3 Simulação dos Caminhos de Deformação

A avaliação da evolução das trincas do revestimento do DPGA foi realizada em amostras obtidas após simulação dos caminhos Deformação Uniaxial, Deformação Plana e Estiramento Biaxial Simétrico utilizando ferramental Nakajima [12-13]. Foi utilizada amostras sem deformação (0%), com deformações intermediárias (50%) e até a estrição (100%). A Figura mostra o diagrama de limite conformação com as deformações maiores (ϵ_1) e menores (ϵ_2) medidas experimentalmente e a curva limite conformação teórica em verde para o DPGA obtidas com o modelo de previsão de Curva Limite Conformação desenvolvida pela ArcelorMittal Maizières. Com relação aos limites de estampabilidade do material quando submetido a 100% de deformação, observou-se que os pontos experimentais obtidos se encontram na curva teórica obtida pelo modelo matemático da ArcelorMittal Maizières indicando boa relação entre os resultados teóricos e experimentais.



DU-Deformação Uniaxial / DP-Deformação Plana / EBS – Estiramento Biaxial Simétrico
Figura 3 – Diagrama Limite de Conformação para os aços DPGI e DPGA

3.4 Evolução das Trincas do Revestimento – Após Deformação

A Figura mostra em (a) a variação de área com trincas de revestimento na superfície do DPGA e em (b) as microestruturas da superfície do revestimento do DPGA para as deformações de 0%, 50% e 100%. Foi observado que ocorre o aumento da área de trincas com o aumento do nível de deformação para todos os caminhos de deformação estudados. O estiramento biaxial simétrico foi o caminho de deformação que mais influenciou no aumento do tamanho da área com trincas seguido da Deformação Plana e Deformação Uniaxial. O Estiramento Biaxial Simétrico promoveu aumento de área com trincas de 39,4% ($1306\mu\text{m}^2$) com níveis de deformação de 100%, enquanto na deformação plana a área trincada foi de 24% ($797\mu\text{m}^2$) e na deformação uniaxial de 19,7% ($651\mu\text{m}^2$).

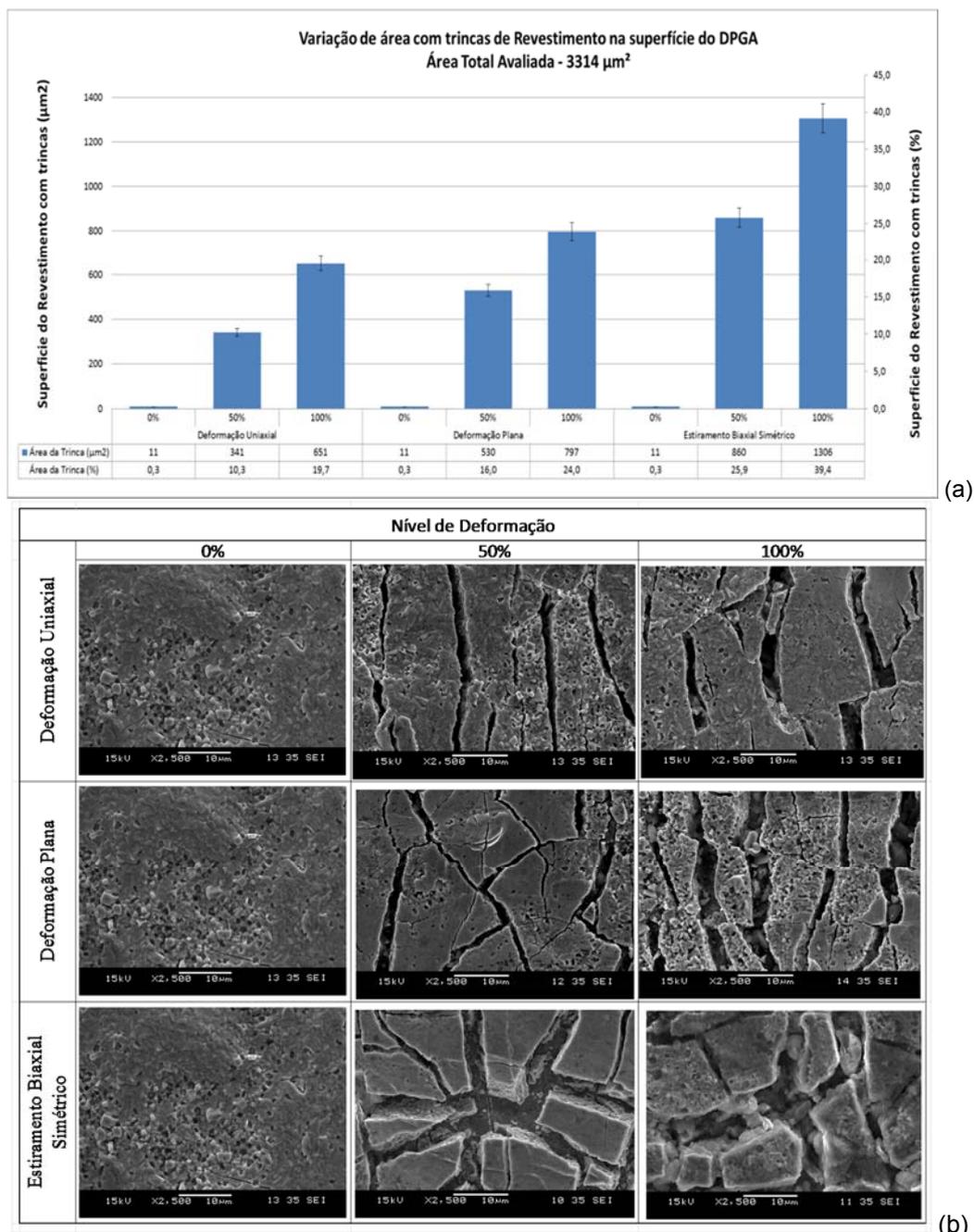


Figura 4 – (a) Variação de área com trincas no revestimento na superfície e em (b) microestruturas da superfície do revestimento do DPGA para os níveis de deformação de 0%, 50% e 100%.

O estiramento biaxial simétrico foi o que apresentou o maior aumento da área com trincas se comparado aos demais caminhos de deformação devido à direção das tensões exercidas sobre a superfície do revestimento e as deformações resultantes destas tensões. O estiramento biaxial simétrico promoveu tensões de tração/tração ($\sigma_1=\sigma_2$) em todo o plano da superfície do revestimento e em todas as direções resultando em deformações $\varepsilon_1=\varepsilon_2$. A deformação plana promoveu tensões de tração em uma direção e nula ($\sigma_2=0$) na outra direção. Assim, possivelmente não existe crescimento da trinca em uma direção obtendo $\varepsilon_2=0$. No caso da deformação uniaxial observou-se tensões de tração e compressão de $\sigma_1=-2\sigma_2$, ocasionando deformações $\varepsilon_1=-2\varepsilon_2$.

3.5 Conectividade das Trincas do Revestimento com o Aço Base e Perda de Massa

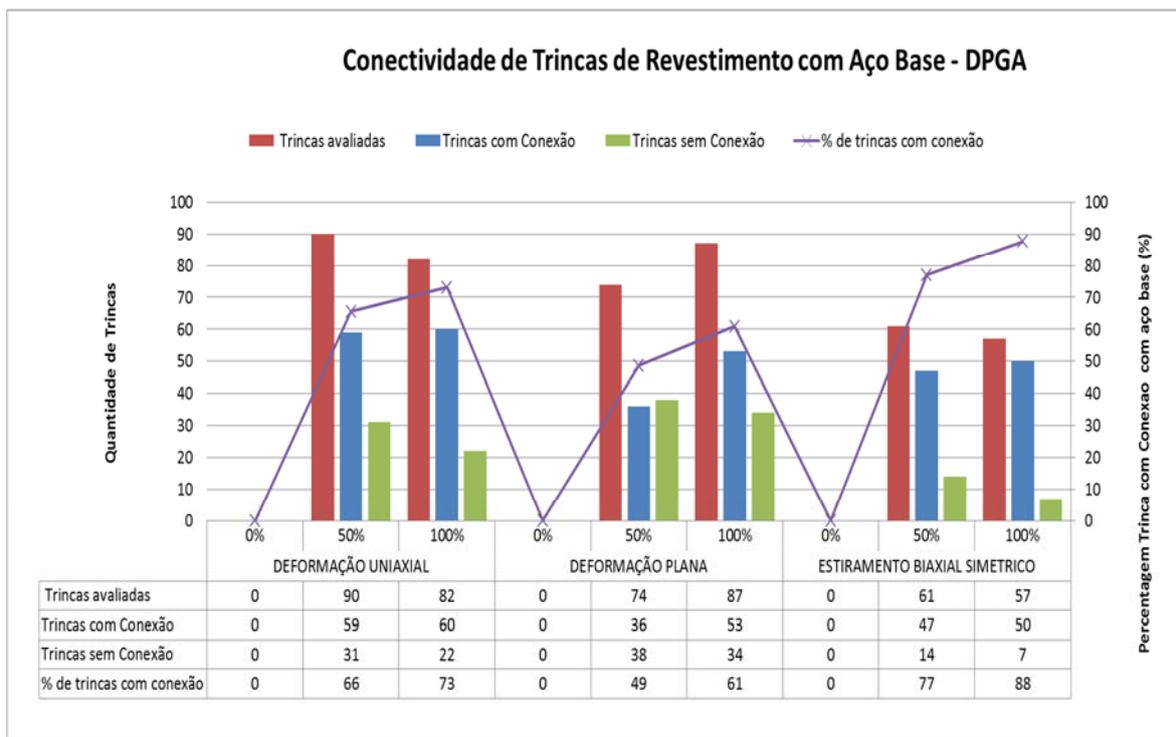
A Figura mostra em (a) a avaliação da quantidade e do percentual de trincas da seção do revestimento do DPGA que se conectam ao aço base para deformações de 0%, 50% e 100%, e em (b) as microestruturas da seção do revestimento avaliadas.

Como observado para as trincas na superfície, Figura , o aumento da quantidade de trincas com conexão com o aço base ocorre com o aumento da deformação para todos os caminhos de deformação estudados, sendo em menor proporção com 0% de deformação e em maior proporção com 100% de deformação. O estiramento biaxial simétrico também foi o caminho de deformação que mais influenciou no aumento da conectividade das trincas da seção do revestimento com o aço base com 88% das trincas avaliadas com conexão. O segundo foi a Deformação Uniaxial com 73% e o terceiro foi a Deformação Plana com 61%.

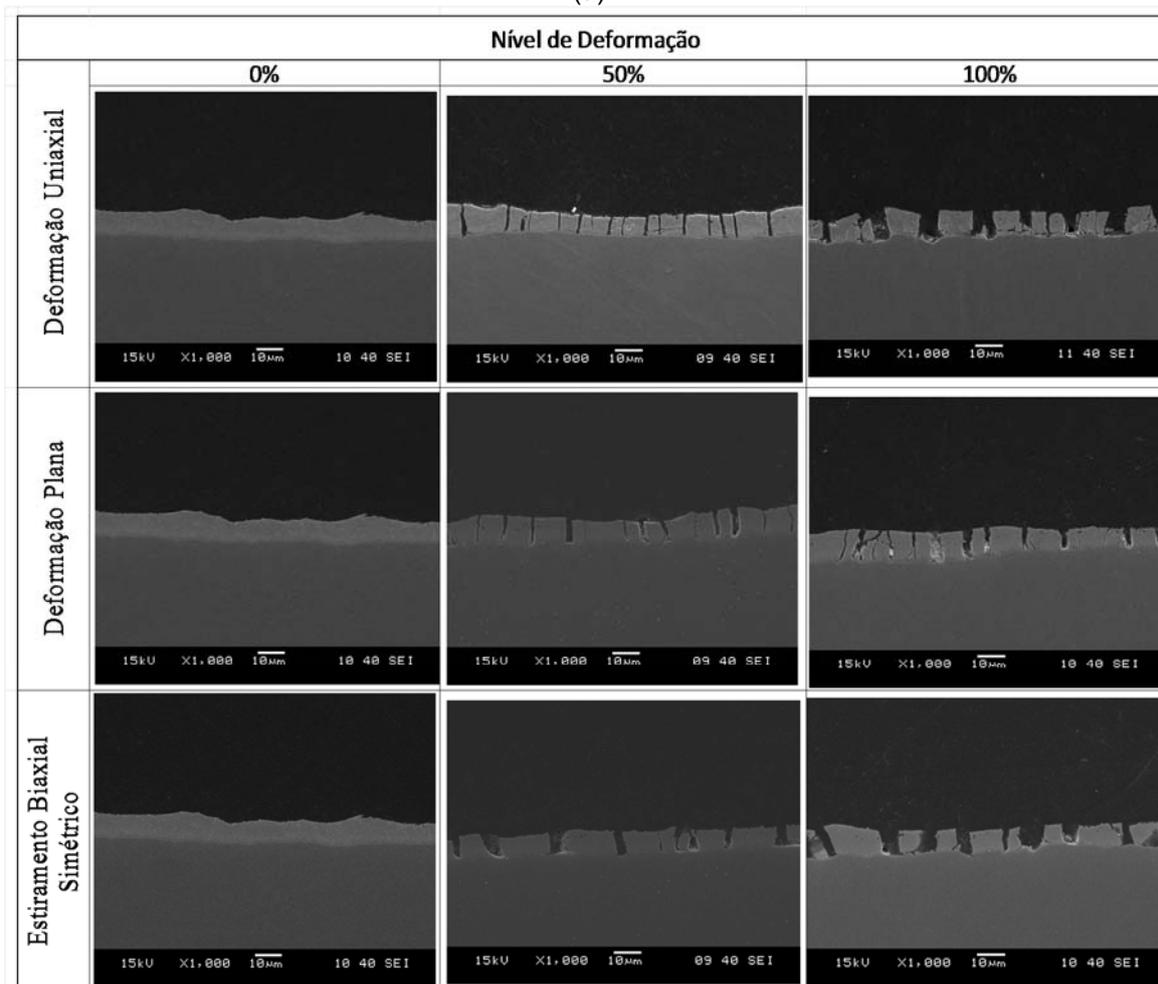
Diferentemente do observado na avaliação do aumento das trincas de superfície do revestimento, onde a deformação plana foi mais severa quando comparada à deformação uniaxial, foi observado que no caso da conectividade da trinca de revestimento ocorre o inverso. Para este caso existem dois aspectos a serem considerados na análise da diferença de comportamento com relação à superfície.

O primeiro são as tensões de compressão e tração ocasionadas pela Deformação Uniaxial ($\sigma_1=-2\sigma_2$) na seção do revestimento DPGA que podem promover a falha do revestimento [16]. O segundo aspecto são as energias denominadas de Força Motriz Crítica ou *Critical Driving Force* (σ_c) e Forças de Adesão ou *Work of Adhesion* (W_{Ad}), que atuam no revestimento e nas fases intermetálicas do revestimento (ζ , δ e Γ). Visto também que, como na superfície do revestimento observa-se apenas menos de 1% de fase zeta (ζ) esta é formada basicamente de pela fase delta (δ) não se observando diferentes forças de interface na superfície. Porém na medida em que a trinca percorre a seção transversal do revestimento até o aço base é possível constatar que em função da existência das interfaces δ/Γ e $\Gamma/\text{aço-base}$ ocorre diferença de comportamento. [10-11, 14-15].

Desta forma observa-se que as tensões compressivas e tratativas dos caminhos de deformação estudados afetam de forma diferente a superfície e a seção do revestimento com relação ao aumento de trincas e a sua conectividade com o aço base.



(a)



(b)

Figura 5 – (a) Avaliação de conectividade de trincas do revestimento com aço base – DPGA e em (b) Microestruturas de seção do revestimento do DPGA para as deformações de 0%, 50% e 100%.

Foi observado também, que o DPGA apresentou 7,7g/m² de perda média de massa, não sendo constatado visualmente, deslocamento do revestimento.

4 CONCLUSÃO

- O DPGA apresentou microestrutura do aço base constituída de uma matriz ferrítica com aproximadamente 10% de martensita sendo o restante composto de ferrita e bainita e formação do revestimento apto para as operações de estampagem.
- O estiramento biaxial simétrico foi o caminho de deformação que mais aumentou a área com trincas na superfície e que apresentou maiores conexões das trincas de seção do revestimento com o aço base. Isso ocorreu em função do estado de tensão e das deformações impostas à superfície e seção dos revestimentos por este caminho de deformação.
- Apesar da perda de massa média ser igual a 7,7g/m² não foram observados os defeitos de deslocamento do revestimento como Powdering ou Flaking na amostra conformada e após o ensaio de perda de massa realizado.

REFERÊNCIAS

- 1 Bhattacharya, D., Developments in Advanced High Strength Steels, Inner conference. Research and Development Center, Mittal Steel, East Chicago, Indiana, U.S.A, 2006.
- 2 Speich, G. R. Physical Metallurgy of Dual Phase steels, United states steel corporation, Monroeville, PA. 1981
- 3 Matuszak, Andrzej. Factors influencing friction in steel sheet forming. Journal of Materials Processing Technology 106 (2000) 250-253.
- 4 Damoulis, G.; Gomes E.; Batalha, G.; Análise de processos de conformação de chapas metálicas usando o diagrama limite de conformação (FLD) através de simulação computacional integrada no desenvolvimento de carrocerias automotivas. COBEF 2003.
- 5 Goncalves, J. Limit Drawing Ratio of DP600 for automotive industry, Global Research & Development Maizières Automotive Products - França, 2010.
- 6 Marciniack, Z., Duncan, J. L., Hu, S. J. Mechanics of sheet metal forming. Butherwort Heinemann, Elsevier Science, 2 Ed. 2002.
- 7 Marder, A. R.; Matlock D.; Krauss G. Microstructural Characterization of Zinc Coatings", Zinc Based Steel Coating Systems. TMS, 1990.
- 8 Maigne. J.M. Key mechanisms in galvanization of steel sheets . Galvatech'07, p. 333-338, 2007.
- 9 Nakamori T., Adachi Y., Arai M., Shibuya A.: Coating adhesion and interface structure of galvanized steel; ISIJ International, Vol. 35, No. 12; 1995; S. 1494–1501
- 10 Song G. M.; Sloof, W.G; Characterization of the failure behavior of zinc coating on dual phase steel under tensile deformation. Materials Science and Engineering A 528 - 6432–643, 2011.
- 11 Song G.M. et al - Relation Between Microstructure and Adhesion of Hot Dip Galvanized Zinc Coatings on Dual Phase Steel. Acta Materialia, 2973–2981, 2012
- 12 ISO/FDIS 12004-1 - Metallic materials — Sheet and strip - Part 1: Measurement and application of forming limit diagrams in the press shop. International
- 13 Standard. 2008 ISO/FDIS 12004-2 - Metallic materials — Sheet and strip - Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory. International Standard. 2008
- 14 O'dell, S. P., Charles J.: The Formation of Craters Within the Galvanneal Coating and their Effects on Processing Properties; 44th MWSP Conference Proceedings, Vol. XL; 2002; S. 1299–1307.
- 15 Inagaki J., Alpas A.T.; Effect of microstructure on Fracture Mechanisms in Galvanneal Coatings; ISIJ International, Vol 40 (2000), No 2; 2000; S 172-181.