

AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE DO AÇO TRIP780 ELETROGALVANIZADO E DP780 GALVANIZADO POR IMERSÃO A QUENTE *

Rodrigo Alves Caetano¹

José Osvaldo Amaral Tepedino²

Jetson Lemos Ferreira³

Geralda Cristina Durães de Godoy⁴

Resumo

A Usiminas, maior siderúrgica latino-americana fornecedora de aços planos, tem dedicado grandes esforços para oferecer materiais mais adequados para as diferentes demandas do mercado, desenvolvendo novos tipos de aços para utilização em carrocerias veiculares. O objetivo deste estudo foi caracterizar o comportamento de dois produtos Usiminas, o aço DP780 galvanizado por imersão a quente e o aço TRIP780 eletrogalvanizado, ambos com espessura de 1,50 mm, revestimento zinco puro e camada de 50 g/m² por face, com base em análises metalográficas, ensaios de tração, ensaios de estampagem e ensaios *Bake Hardening* (BH) e *Aging Index* (AI). Os resultados destas avaliações mostraram que os aços TRIP780 e DP780 tiveram performances excelentes em todos os modos de estampagem avaliados, além de boa capacidade de endurecimento após pintura (efeito BH). Tratam-se, portanto, de boas opções para aplicação em peças da carroceria, principalmente em componentes que requeiram elevada resistência mecânica.

Palavras-chave: DP780; TRIP780; Caracterização metalúrgica; Ensaios de estampagem.

FORMABILITY CHARACTERIZATION OF AN ELECTROGALVANIZED TRIP780 AND A HOT DIP GALVANIZED DP780 STEELS

Abstract

The Usiminas, largest Latin American steel supplier of flat steel, has dedicated great efforts for different demands of the market, investing in production facilities and developing new steels for use in vehicle's body. The present study has the objective to evaluate the metallurgical behavior of high-strength steels, DP780 hot dip galvanized and TRIP780 electrogalvanized, based on their mechanical properties, metallographic constitution, formability, hole expansion, bake hardening and aging index. The tests results showed that TRIP780 and DP780 steels have positive performances in all stamping modes evaluated, and good bake hardening effect, which can provide a higher mechanical property of the final manufactured components.

Keywords: Dual phase; TRIP; Metallurgical characterization; Stamping tests.

¹ Engenheiro de Produção, mestrando em Engenharia Metalúrgica, Gerência Geral de Produto, Garantia da Qualidade e Atendimento a Cliente - Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento – Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento – Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Professora, Dr^a., Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A classe de aços denominada Aços Avançados de Alta Resistência (*Advanced High Strength Steel – AHSS*) é formada por materiais cujos arranjos microestruturais conferem elevada resistência mecânica aliada a uma adequada conformabilidade quando comparados aos aços convencionais. Os aços *Transformation Induced Plasticity* (TRIP) e *Dual Phase* (DP) são exemplos de AHSS, que por possuírem uma microestrutura complexa formada por diversos constituintes, permitem uma excelente estampabilidade e a possibilidade de utilização em peças de maior complexidade geométrica. O presente estudo tem por objetivo caracterizar a conformabilidade dos aços DP780, revestido por imersão a quente, e TRIP780, revestido por eletro galvanização, ambos produzidos pela Usiminas. Esta caracterização foi realizada por meio de análise metalográfica, ensaios de tração, ensaios de estampagem, ensaios *Bake Hardening* (BH) e *Aging Index* (AI). A influência do revestimento não foi abordada nesse estudo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste estudo, as amostras foram retiradas de produtos acabados diretamente das linhas de produção da USIMINAS. A espessura nominal dos aços é de 1,50 mm, revestimento zinco puro e massa de camada nominal de 50 g/m² por face.

A classificação das inclusões dos produtos foi realizada segundo a carta padrão I da norma ASTM E45-05/09 [1].

A microestrutura foi avaliada via microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram atacadas com o reagente Nital a 2%.

A determinação da fração volumétrica das fases presentes foi efetuada via análise de imagens geradas a partir de microscopia óptica, seguida de quantificação via *software Axiovision*.

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados em uma máquina universal Instron modelo 5882. Os corpos de prova foram retirados a 0º, 45º e 90º com relação ao sentido de laminação, conforme indicado na figura 1(a). Os resultados foram obtidos após aplicação de força axial nos corpos de prova, com deformação até a ruptura.

No ensaio de expansão de furo ECF, três corpos de prova de cada aço foram cortados com formato quadrado de 150 mm de lado e furos confeccionados usando um punção de 10 mm de diâmetro na parte central do corpo de prova, figura 1(b). O ensaio foi realizado em uma prensa Erichsen 145-60, com acionamento eletro-hidráulico com capacidade de até 600 kN. Na confecção dos furos por puncionamento, as dimensões das folgas de corte avaliadas foram de 25% e 12% da espessura do material. A avaliação de uma folga de corte mais elevada (25%) teve o intuito de representar condições atípicas de corte, originadas, por exemplo, da afiação ruim da lâmina cortante. A folga de 12% foi dimensionada conforme recomendação da norma ISO TS 16630 [2], aplicada a ensaios do tipo ECF. O furo usinado teve como objetivo avaliar o comportamento exclusivo do material, sem o efeito da deterioração na borda normalmente provocada pelo processo de corte por puncionamento.

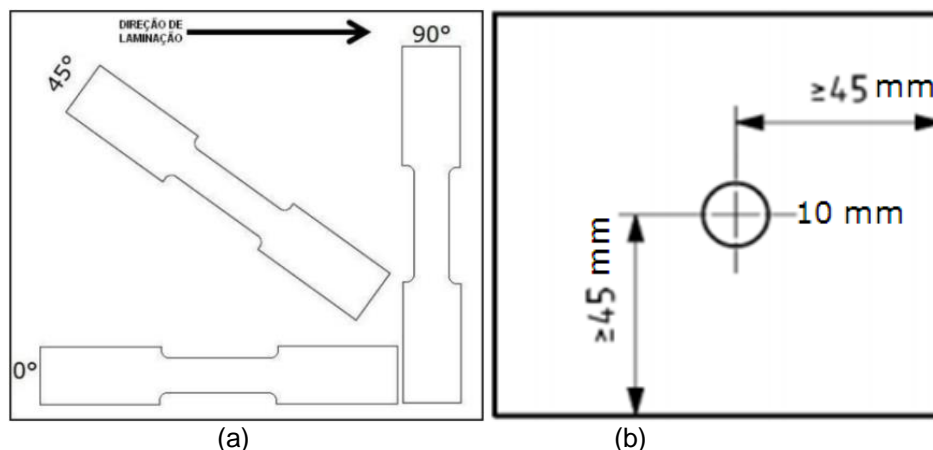


Figura 1. (a) Plano de corte dos corpos de prova de tração nas três direções. (b) Corpos de prova de ensaio ECF com furo a 45 mm da borda.

Para o levantamento das Curvas Limite de Conformação, os corpos de prova foram marcados com uma malha composta por quadrados na dimensão de 2,5 x 2,5 mm. Os ensaios de estampagem foram realizados na prensa Erichsen e as deformações avaliadas com o auxílio do *software Autogrid*.

Os ensaios BH e AI foram realizados na mesma máquina Instron usada no ensaio de tração. Os corpos de prova foram pré-deformados a 2% para o ensaio BH e a 8% para o ensaio AI. Após a pré-deformação efetuou-se o tratamento térmico nos corpos de prova a uma temperatura de 170°C x 20 min no caso do ensaio BH e 100°C x 1 h para o AI. O tratamento foi feito com banho de óleo aquecido. Após o tratamento, os corpos de prova foram imersos em água para resfriamento. Posteriormente, os corpos de prova foram colocados novamente na máquina de tração e tracionados até a ruptura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Metalográfica

A classificação de inclusões das amostras, realizada de acordo com a carta padrão I da norma ASTM E45-05/09[1], segue mostrada na tabela 1. Ambas as amostras apresentaram boa limpidez.

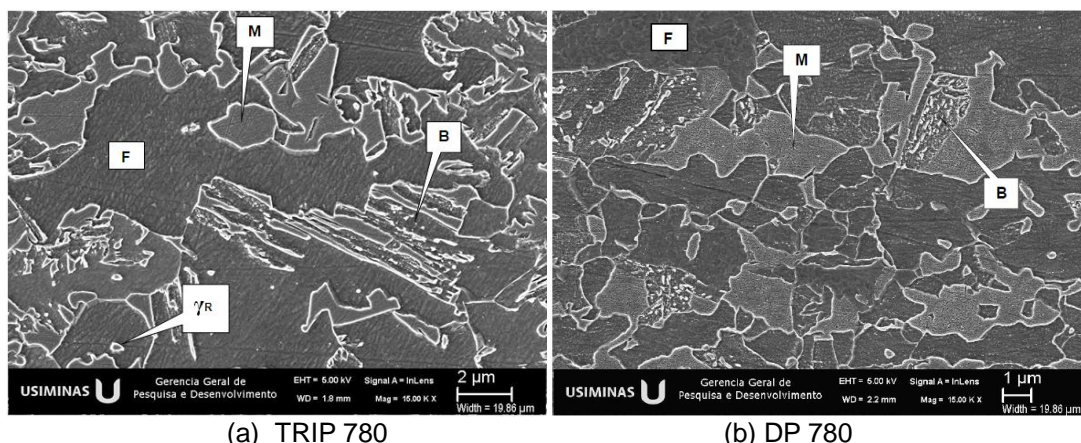
Tabela 1. Classificação das inclusões

Aço	Sulfeto	Silicato	Alumina	Óxido Globular
TRIP780	0,5 F	Não observado	1,0 F	1,0 F
DP780	Não observado	Não observado	1,5 F	1,0 F

Na avaliação microestrutural do aço TRIP780 observa-se uma microestrutura composta por quatro constituintes: ferrita (F), bainita (B), austenita retida (γ_R), e martensita (M), figura 2(a). A austenita retida é o constituinte mais importante desse aço e se transforma em martensita com o aumento da tensão, permitindo uma taxa

de encruamento mais elevada que a apresentada no aço DP780 em elevados níveis de deformação.

Na microestrutura do aço DP780 observam-se três principais constituintes: ferrita (F), bainita (B) e martensita (M), figura 2(b). A martensita apresenta-se na forma de ilhas dispersas na matriz ferrítica. A presença do constituinte bainita em conjunto com a martensita como segundos constituintes visa melhorar a ductilidade do aço quando comparado com uma microestrutura que apresenta somente a martensita como segundo constituinte. Uma característica apresentada é a presença do constituinte ferrita de forma contínua com ilhas de martensita e glóbulos de bainita dispersos na ferrita, fornecendo ao aço certo nível de ductilidade e resistência.



(a) TRIP 780

(b) DP 780

Figura 2. Aspecto típico das microestruturas dos aços (a) TRIP780 e (b) DP780, observadas via MEV, em seção ao longo da espessura e longitudinal ao sentido de laminação. Ataque Nital 2%. Ampliação original: 15000X.

Os resultados de caracterização quantitativa dos constituintes do aço DP780 e TRIP780 são apresentados na tabela 2. Observa-se que o aço DP780 apresentou 100% de ferrita a mais que o aço TRIP780 em sua microestrutura e aproximadamente 65% a mais de martensita. Por outro lado, o aço TRIP780 possui uma quantidade muito superior de outros constituintes (com bainita em maior quantidade) e apresenta o constituinte austenita retida (cerca de 14%) em sua microestrutura.

Tabela 2. Fração volumétrica dos constituintes (% em peso)

Aço	Ferrita	Martensita	Austenita	Outros ⁽¹⁾
TRIP780	27,0	5,7	13,9 ⁽²⁾	53,4
DP780	55,3	9,4	-	35,3

(1) Bainita, carbonitreto, perlita.

(2) Teor de carbono = 1,295%

3.2 Propriedades Mecânicas em Tração

Os resultados dos ensaios de tração, realizados em corpos de prova cujo eixo de maior comprimento estava a 0°, 45° e a 90° em relação ao sentido de laminação, são mostrados na tabela 3. Os resultados correspondem a uma média de três corpos de prova ensaiados.

Tabela 3. Propriedades mecânicas em tração

Aço	Direção	LE (MPa)	LR (MPa)	AIU(%)	AIT(%)	n(10%-AIU)	r15%	\bar{r}	Δr
TRIP 780	0°	504	780	29,5	35,5	0,249	0,918	0,948	0,185
	45°	516	784	28,6	34,3	0,242	0,856		
	90°	517	780	27,3	34,4	0,237	1,163		
DP 780	0°	450	780	14,6	21,5	0,149	0,978	0,730	0,298
	45°	458	784	13,1	19,2	0,134	0,581		
	90°	484	809	12,5	17,9	0,130	0,780		

Comparando o aço TRIP780 com o DP780, observa-se que as variações microestruturais mencionadas têm influência nas propriedades mecânicas. O maior valor das deformações uniforme e total do aço TRIP780 ocorre devido à formação da austenita retida. Quando deformada plasticamente, a austenita retida transforma-se gradualmente em martensita, resultando em uma maior deformação e evitando a estricção. A deformação do aço DP780 foi inferior ao aço TRIP780 em todas as direções, o que pode ser atribuído à maior fração volumétrica do constituinte martensita na microestrutura do DP780.

O coeficiente de anisotropia normal dos aços é considerado baixo (próximo de 1,0), apesar do aço TRIP780 apresentar um valor superior ao apresentado pelo aço DP780. Esse parâmetro indica a habilidade de uma chapa metálica resistir ao afinamento quando submetida a esforços de tração e/ou de compressão no plano. Desse modo, os valores encontrados devem refletir em dificuldades na fabricação de peças cuja estampagem requer mais elevada profundidade de penetração do punção.

A variação do coeficiente de anisotropia r , calculado a 15% de deformação, para cada uma das três direções (r_0° , r_{45° e r_{90°) nos aços TRIP780 e DP780, classifica esses aços como anisotrópicos planares, uma vez que apresentaram valores diferentes para r_0° , r_{45° e r_{90° ($r_0^\circ \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ}$). Isto indica que esses aços apresentam diferentes reações conforme a direção de aplicação dos esforços no plano do material. No aço TRIP780, o maior valor de r foi encontrado na direção de 90° , indicando que esse aço apresenta uma tendência de resistir de forma mais eficiente aos esforços realizados nessa direção. No aço DP780, o maior valor de r foi encontrado na direção 0° , o que demonstra que esse aço apresenta melhor estampabilidade nessa direção.

O melhor valor do coeficiente de encruamento do aço DP780 foi de aproximadamente 0,15 e do aço TRIP780 foi de aproximadamente 0,25, calculado entre 10% de alongamento por deformação e o alongamento por deformação uniforme. Entretanto, o aço DP780 apresenta a sua maior capacidade de encruamento para baixas deformações (em torno de 5% de deformação), enquanto o aço TRIP780 apresenta um aumento gradual do encruamento, com valor máximo do coeficiente de encruamento obtido acima de 10% de alongamento por deformação. O aumento gradual do encruamento do aço TRIP780 deve ser atribuído ao efeito da transformação da austenita retida em martensita durante a deformação. Os resultados sugerem que a transformação martensítica do aço TRIP780 ocorreu até deformações próximas do alongamento por deformação uniforme. Assim, uma redução da quantidade de austenita retida resulta em uma menor extensão do efeito TRIP. Essa elevada capacidade de encruamento indica que este material tem bom desempenho quando exposto a esforços de estiramento biaxial durante

estampagem, pois quanto maior o valor do coeficiente de encruamento, melhor o grau de conformabilidade, isto é, o aço suporta maior quantidade de deformação em tração do que outro material com valor n inferior.

Na figura 3 são mostradas as curvas tensão vs. deformação de engenharia típicas dos aços TRIP780 e DP780.

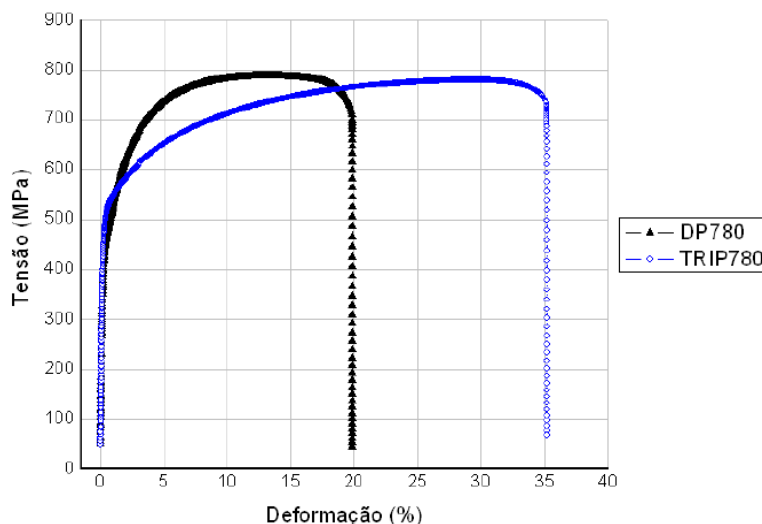


Figura 3. Curvas tensão vs. deformação de engenharia dos aços TRIP780 e DP780.

No aço DP780, a curva tensão de engenharia vs. deformação de engenharia apresenta uma transição contínua entre as deformações elásticas e plásticas. Isso ocorre devido à geração de largas quantidades de deslocamentos nas interfaces dos constituintes ferrita, bainita e martensita. Estas deslocamentos são provenientes da expansão do volume e da tensão de corte que ocorrem durante a transformação da austenita em bainita e em martensita no resfriamento do campo ferrita-austenita [3]. A interação das deslocamentos móveis entre si e com os finos grãos de martensita dispersos na matriz ferrítica promovem uma elevada taxa de encruamento instantâneo nesse aço.

Observa-se que o aço TRIP780 tem um comportamento similar ao apresentado pelo aço DP780 na transição da deformação elástica para a plástica, entretanto, o TRIP780, por possuir uma maior fração volumétrica de austenita retida, apresenta um limite de escoamento um pouco mais baixo e um aumento significativo da resistência mecânica durante a deformação quando comparado com o aço DP780, cuja microestrutura não apresenta esse constituinte.

3.3 Ensaio de Expansão de Furo

Os resultados dos ensaios de expansão de furo, representados por λ , são apresentados na figura 4.

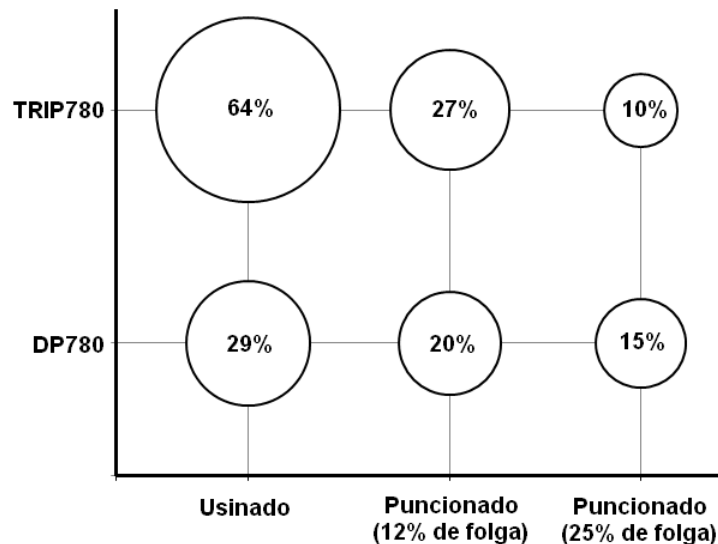


Figura 4. Resultados do ensaio ECF.

Os ensaios realizados em furos puncionados com folga de corte de 12%, que é a condição especificada em norma utilizada pelos clientes para avaliação de desempenho do aço neste modo de deformação, a capacidade de expansão de furo média do aço TRIP780 foi superior à do aço DP780, 27% contra 20%. Acredita-se que a maior fração volumétrica do constituinte martensita na microestrutura do aço DP780 e a presença da austenita retida na microestrutura do aço TRIP (aumenta a ductilidade do aço) resultou em uma menor capacidade de expansão de furo do aço DP780. Essa análise está em acordo com o publicado na literatura, em que o aumento da presença de um constituinte mais resistente como a martensita pode ter criado uma forte heterogeneidade na conformabilidade localizada, facilitando o desenvolvimento de trincas principalmente nas interfaces entre os constituintes, levando à ruptura do material [4].

No ensaio realizado na condição de furo com folga de corte de 25%, observa-se no aço TRIP780 uma variação maior nos três ensaios realizados, sendo também a única condição de furo que apresentou resultados inferiores ao DP780. Isto demonstra que o aço TRIP780 é mais sensível à qualidade da borda de corte por puncionamento do que o aço DP780, o que requer atenção às condições utilizadas na fabricação dos flanges em *blanks* com esse material.

3.4 Curvas Limite Conformação

As Curvas Limite de Conformação dos aços analisados, confeccionadas a partir da técnica de Nakazima [5] à estrição, são apresentadas na figura 5.

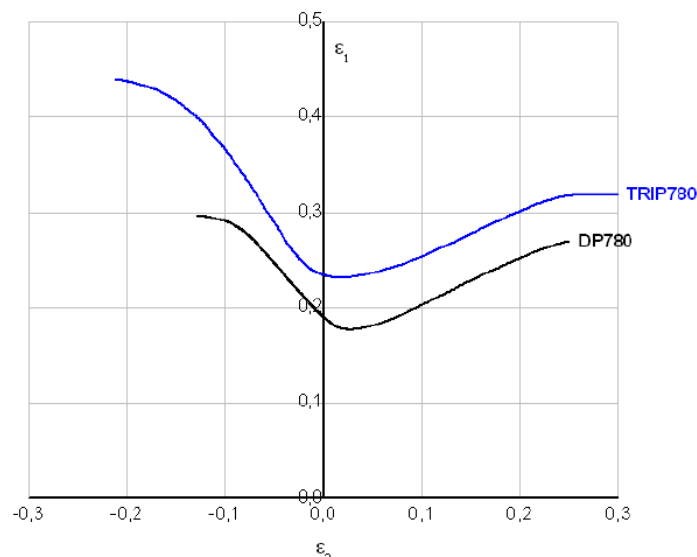


Figura 5. Curvas Limite de Conformação dos aços TRIP780 e DP780.

A Curva Limite Conformação do aço TRIP780 é mais alta que a Curva Limite Conformação do aço DP780, mostrando que o aço TRIP780 apresenta melhor conformabilidade por embutimento (lado esquerdo da curva), deformação plana e estiramento (lado direito da curva). O CLC₀ do aço TRIP780 foi de 0,33 e o CLC₀ do aço DP780 foi de 0,19. Desse modo, o aço TRIP780, comparado ao aço DP780, apresentou melhor desempenho em todos os modos de deformação cobertos pela CLC. Este resultado corrobora os obtidos nos demais ensaios, evidenciando a melhor estampabilidade desse aço em relação ao DP780.

3.5 Ensaios *Bake Hardening* (BH) e *Aging Index* (AI)

Os resultados obtidos nos ensaios BH e AI são apresentados na figura 6. O valor BH obtido no aço TRIP780 foi próximo de 60 MPa, sendo superior ao do aço DP780, próximo de 50 MPa. Ambos os aços apresentaram uma significativa capacidade de endurecimento após deformação e tratamento térmico, similar ao que ocorre durante a etapa de tratamento térmico no processo de pintura de peças automotivas.

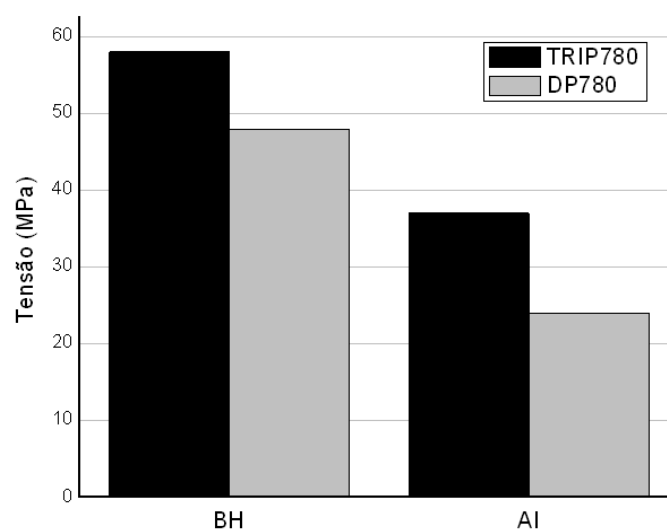


Figura 6. Índices BH e AI dos aços TRIP780 e DP780.

Com base na literatura [6], infere-se que no aço DP780 o principal fator que afetou o efeito BH foi a formação de deslocações móveis na ferrita, próximo da interface ferrita/martensita, como resultado da expansão de volume devido a transformação da austenita em martensita durante o resfriamento. Essas deslocações foram ancoradas pelo carbono. No aço TRIP780, o comportamento BH é principalmente definido pela formação de deslocações e elevado valor de carbono na ferrita. Isto pode ser associado com a transformação da austenita para martensita que aumenta a quantidade de deslocações na ferrita.

Os resultados dos ensaios AI, cujo índice representa a susceptibilidade ao envelhecimento à temperatura ambiente entre a sua produção e utilização, podendo ocasionar após a conformação um aumento da resistência do aço e linhas de distensão na superfície da peça, também estão representados na figura 6. No aço TRIP780 esse parâmetro foi de 40 MPa, e no aço DP780, o valor de AI foi de aproximadamente 25 MPa. Os resultados demonstram que o aço TRIP780 possui uma maior susceptibilidade ao envelhecimento à temperatura ambiente que o aço DP780.

4 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios realizados mostraram que o aço TRIP780, eletrolgalvanizado, apresentou desempenho superior ao do aço DP780, galvanizado por imersão a quente, nos modos de estampagem avaliados, além de um superior efeito BH. Assim como no DP780, a capacidade de expansão de furo do aço TRIP780 foi baixa (27% para o TRIP780 e 20% para o DP780), sendo observado também que o acabamento da borda do flange antes da conformação pode influenciar o desempenho desses materiais, exigindo uma atenção maior na utilização em peças cuja estampagem envolve esforços de estiramento de borda e às condições das ferramentas e folga de cortes utilizadas. Com relação ao envelhecimento natural, observou-se que o aço TRIP780 avaliado apresentou susceptibilidade superior ao aço DP780, o que pode implicar em perda da ductilidade de chapas estocadas por tempo prolongado, aumentando o risco de ocorrência de rupturas durante estampagem. De uma forma geral, conclui-se que o aço TRIP780 e o DP780 são opções interessantes para aplicação em peças da carroceria, principalmente em componentes que requeiram elevada resistência mecânica e boa conformabilidade para a sua fabricação.

Agradecimentos

À USIMINAS pela disponibilização de todos os recursos necessários para a realização deste trabalho.

À UFMG, PROEX/CAPES, CNPq e Fapemig.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTME45-05/09, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- 2 ISO/TS 16630 – Metallic materials – Method oh hole expanding test. First Edition 2003.
- 3 Queiroz, R.R.U., Cunha, F.G.G., Gonsalez, B.M., Study of dynamic strain aging in dual phase steel. Materials Science and Engineering A 543, 84– 87, Brazil, 2012.

- 4 Martins, C. H., Efeitos das Adições de Mo+V e Ti+Nb na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço C-Mn-Cr Multifásico Submetido a Processamento Termomecânico. Tese de Doutorado. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Novembro de 2013.
- 5 Nakazima K. et al. Study on the formability of Steel Sheets, Technical Reports nº 264, 1968.
- 6 Timokhina, I.B., Pereloma, E.V., Ringer, S.P., Zheng, R.K., Hodgson, P.D. Characterization of the Bake-hardening Behavior of Transformation Induced Plasticity and Dual-phase Steels Using Advanced Analytical Techniques. Volume 50, 574-582, Australia, February 6, 2010.