

AÇO BIFÁSICO PROCESSADO VIA LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA – REVISÃO E ESTÁGIO ATUAL DE PRODUÇÃO NA USIMINAS/UNIGAL ¹

*Fabiano Augusto Vallim Fonseca²
Fernando de Souza Costa³
Ed Juarez Mendes Taiss⁴
Heyne Rodrigues de Lima⁵*

Resumo

A Usiminas tem direcionado esforços na produção de aços de alta resistência para indústria automobilística, em busca da melhoria da competitividade do aço frente aos sucedâneos, permitindo atender a três das principais demandas desse setor: redução de peso, economia de combustível e aumento da segurança do usuário. Nesse contexto os aços bifásicos (*Dual Phase*) surgiram como uma solução alternativa com grandes vantagens aos aços convencionais. Esses aços apresentam uma microestrutura que consiste de uma segunda fase dura (normalmente martensita) dispersa em uma matriz macia de ferrita. Com o advento do projeto *Ultra Light Steel Autobody – Advanced Vehicle Concept* (ULSAB-AVC) a utilização de aços bifásicos têm-se ampliado, gerando também uma demanda desse aço galvanizado por imersão a quente que, além das características do substrato, alia a resistência à corrosão promovida pelo revestimento de zinco (Usigal-GI[®]) ou liga de zinco-ferro (Usigal-GA[®]). A Usiminas comercializa regularmente os aços bifásicos como laminados a quente e a frio (não revestido). O objetivo do presente trabalho é apresentar algumas das características e vantagens relatadas na literatura e os resultados do estágio atual de produção industrial do aço bifásico laminado a frio e galvanizado por imersão a quente, da classe de resistência de 600MPa, comercializado pela Usiminas e produzido na Usiminas/Unigal.

Palavras-chave: Aço bifásico; Galvanização a quente; Indústria automobilística.

¹ *Contribuição Técnica ao 42º Seminário de Laminação da ABM - Processos e Produtos Laminados e Revestidos; Santos, SP, 25 a 28 de outubro de 2005.*

² *Engenheiro Metalurgista, Gerência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM, Físico, M.Sc., Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Gerência de Marketing da Usiminas; Belo Horizonte, MG.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, Gerência Técnica da Unigal; Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

A implementação de legislações cada vez mais rigorosas lançou a indústria automobilística num esforço contínuo para desenvolver veículos mais leves, mais seguros e mais duráveis. A esse desafio juntou-se a indústria siderúrgica que, pressionada pela concorrência oferecida por sucedâneos, intensificou esforços na melhoria do desempenho dos aços destinados ao segmento, assim como na produção de novos aços, visando atender principalmente aos requisitos ligados à conformabilidade, à resistência mecânica e também na resistência à corrosão.

No caso da Usiminas, esse esforço traduziu-se principalmente na produção de aços de alta resistência para indústria automobilística. Nesse contexto os aços bifásicos (*Dual Phase* ou DP) surgiram como uma solução para aplicações que requeiram uma razoável utilidade (boa conformabilidade), aliada a uma considerável resistência (capacidade de suportar cargas elevadas) e boa soldabilidade. Esses aços apresentam uma microestrutura que consiste de uma segunda fase dura (normalmente martensita) dispersa em uma matriz macia de ferrita.

O aço plano 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 mecânica e custo competitivo. O uso de chapas de aço com revestimento de zinco aumentou nos últimos anos, devido à maior durabilidade destes produtos sob corrosão. A resistência à corrosão é um dos requisitos básicos dos automóveis, não sendo esse item considerado mais como um diferencial. Os projetos desenvolvidos pelas diferentes montadoras apresentam características especiais quanto ao tipo de revestimento a ser aplicado nas diferentes peças. Deste modo, as siderúrgicas vêm-se compelidas a oferecer produtos com diferentes tipos de revestimento. Com o advento do projeto ULSAB-AVC a utilização de aços bifásicos têm-se ampliado, gerando também uma demanda desse aço revestido, que alia a resistência mecânica promovida pelo substrato com a resistência à corrosão promovida pelo zinco (Usigal-GI[®]) ou liga de Zn-Fe (Usigal-GA[®]).

A Usiminas comercializa atualmente os aços bifásicos como laminados a quente e a frio. Na linha de laminação a frio, a rota de fabricação desses aços inclui o recozimento contínuo, cujas características operacionais possibilitam a obtenção das microestruturas desejadas com relativa facilidade. Entretanto a produção via galvanização contínua torna o controle da microestrutura muito mais crítico devido às baixas taxas de resfriamentos praticadas. Além disso, o próprio processo de imersão no pote de zinco e o posterior recozimento do revestimento ocorrem em temperaturas relativamente altas, não favorecendo a formação da martensita como segunda fase. Para contornar essas limitações são adotadas concepções de liga do aço que conferem maior temperabilidade, sem contudo afetar o processo de galvanização a quente e a soldabilidade ou onerar os custos de produção.

Com base no cenário proposto, o objetivo deste trabalho é apresentar o estágio atual de produção e algumas características do aço bifásico da classe de 600MPa de limite de resistência revestido por imersão a quente, com limite de escoamento mínimo de 340MPa (DP340/600), comparado também à um aço de limite de escoamento similar e concepção HSLA (HSLA340/450), isto é, microligado ou também conhecido como alta resistência e baixa liga - ARBL, hoje um dos aços de alta resistência mais utilizados pelo setor automobilístico.

2 REVISÃO DA LITERATURA E CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS BIFÁSICOS

Os aços bifásicos são caracterizados por uma microestrutura constituída de ilhas de martensita dispersas em uma matriz ferrítica, ilustrada na Figura 1(a). Pequenas quantidades de outras fases ou constituintes, tais como bainita, perlita e ou austenita retida, podem também estar presentes. A microestrutura bifásica pode ser obtida através da austenitização na zona intercrítica (região de estabilidade da ferrita e da austenita), seguida de resfriamento rápido para a transformação da austenita previamente formada em martensita. Os aços bifásicos apresentam escoamento contínuo (ausência de patamar), baixa razão elástica, elevada taxa de encruamento e altos níveis de alongamento. A ausência de patamar de escoamento explica-se pela grande quantidade de discordâncias móveis produzidas na interface ferrita/martensita, devido à expansão de volume e à deformação cisalhante que acontecem durante a transformação da austenita para martensita no resfriamento. Os baixos valores de razão elástica, em geral, anunciam uma maior capacidade de encruamento do material e uma maior ductilidade, fatores esses que irão contribuir para um melhor desempenho do material em operações de conformação, além de permitir aos aços bifásicos absorver grande quantidade de deformação sem risco de ruptura.⁽¹⁾ De um modo geral, quanto mais elevada for a capacidade de encruamento do material maior será a distribuição das deformações durante a conformação, retardando o aparecimento da estrição.

O rápido encruamento nos momentos iniciais de deformação é observado para o aço bifásico na Figura 1(b).

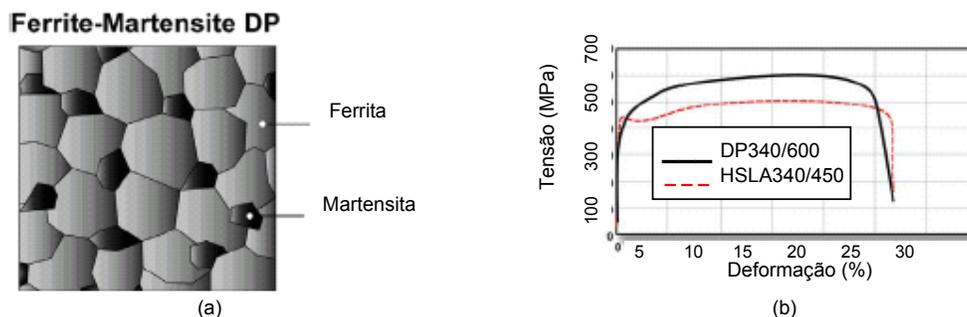


Figura 1. Característica microestrutural (a) e da curva tensão-deformação (b) dos aços bifásicos⁽¹⁾.

Uma importante característica dos aços bifásicos está relacionada ao aumento da resistência após conformação e cura da pintura (*Bake Hardenability*-BH). Ao contrário dos aços BH (BH180, por exemplo), onde o aumento de resistência pelo efeito da cura da pintura tende a diminuir com o aumento da deformação, nos aços bifásicos (DP600) essa propriedade aumenta, contribuindo para uma maior resistência da peça. Na Figura 2 é apresentada a influência da pré-deformação no aumento do limite de escoamento de amostras de aços bifásico e BH. Observa-se que o ganho de resistência mecânica devido ao envelhecimento por deformação, *bake hardenability*, tende a aumentar para o aço bifásico e diminuir para o aço BH com o aumento da pré-deformação⁽²⁾.

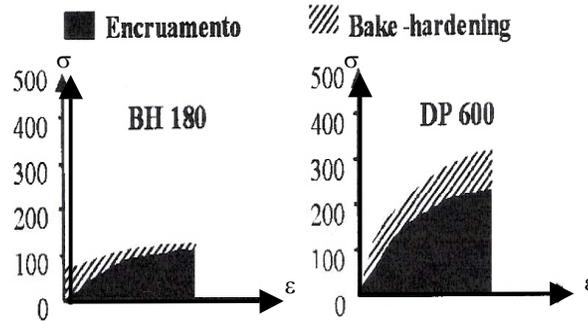


Figura 2. Aumento no limite de escoamento devido à pré-deformação e ao valor BH (amostras tratadas a 170° C por 20 minutos).

O aço bifásico também absorve mais energia (teste de impacto - *crash test*) comparado com os aços convencionais, apresentado na Figura 3 (a). Isto porque apresenta maior limite de resistência (maior área da curva tensão-deformação), alta taxa de encruamento (distribui melhor as tensões durante a deformação) e grande valor BH (aumenta a área sob a curva tensão-deformação na peça acabada após a cura da pintura)⁽¹⁾. A microestrutura bifásica também aumenta a vida em fadiga comparado com aços, de limite de escoamento similar, apresentado na Figura 3 (b). Um dos motivos deste aumento é porque as partículas de martensita retardam a propagação das trincas de fadiga⁽¹⁾.

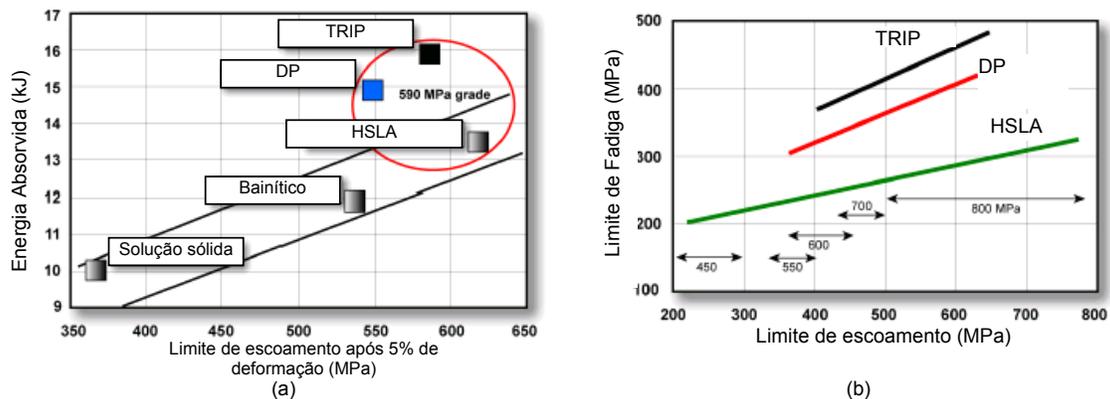


Figura 3. Energia absorvida em função do LE com 5% de deformação (a) e limite de fadiga dos aços bifásicos comparada a aços convencionais (b).

O aço bifásico apresenta grande utilidade para sua classe de resistência, permitindo assim o uso de aços de alta resistência, em peças de geometria complexa que não são conformáveis com aços convencionais. Além disso, devido aos altos valores de resistência e alongamento (maior área da curva tensão-deformação – LR x AL), este aço apresenta grande capacidade de absorção de energia. Desta forma é possível reduzir a espessura de uma peça, produzida por exemplo com o aço HSLA340/450, entre 10 a 20% com desempenho igual ou melhor, conforme apresentado no projeto ULSAB-AVC⁽³⁾, apresentado nas Figuras 4 (a) e 4 (b).

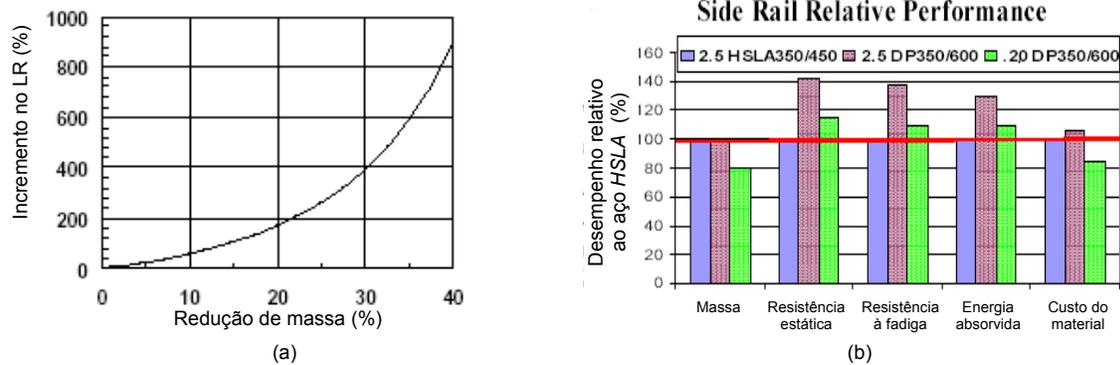


Figura 4. Redução de massa pela diminuição da espessura da peça provocada pelo aumento do limite de resistência (a). Redução de massa potencial utilizando DP350/600 em substituição ao HSLA350/450 (b).

No recozimento contínuo de aços bifásicos em linha de galvanização contínua, o encharque é realizado dentro do campo intercrítico o que resulta na formação de uma microestrutura constituída por grãos de ferrita antiga, formada após a laminação a quente e austenita. Durante o resfriamento subsequente, enquanto a temperatura permanece no campo bifásico, a região de ferrita cresce para o interior da região de austenita, e a nova região de ferrita formada é chamada de ferrita epitaxial. A microestrutura bifásica assim obtida é composta de ferrita antiga, ferrita epitaxial e martensita. Nesse caso, não existe contorno entre as duas ferritas, mas a ferrita antiga contém precipitados e a ferrita epitaxial não. Assim quanto maior é a fração de ferrita epitaxial formada, maior é o aumento na ductilidade do aço⁽⁴⁾.

A composição química afeta os aços bifásicos de várias formas. Uma delas é a temperabilidade. De um modo geral, um aço com alta temperabilidade é aquele no qual a austenita apresenta grande capacidade de transformar-se em martensita, mesmo quando a velocidade de resfriamento é relativamente baixa. Inversamente, em aços de baixa temperabilidade, a martensita somente poderá ser produzida se as transformações difusionais da austenita forem impedidas pela utilização de elevadas taxas de resfriamento. Dessa forma, qualquer variável que mova as curvas de início de transformação para a direita, em um diagrama de transformação no resfriamento contínuo (TRC), torna possível a obtenção de uma estrutura martensítica em velocidade de resfriamento mais baixa. Isso significa que os fatores que aumentam a temperabilidade de um aço são os mesmos que deslocam as curvas TRC para a direita⁽⁴⁾.

Nos aços bifásicos o teor de carbono na austenita não depende apenas do teor de carbono total do aço, mas também da temperatura de recozimento de modo que a temperabilidade varia com essa temperatura. Baixas temperaturas de recozimento intercrítico resultam em baixas quantidades de austenita. Porém, esta austenita apresenta um elevado teor de carbono, com grande temperabilidade. Por outro lado, quando o recozimento intercrítico é realizado em temperaturas elevadas, a quantidade de austenita é elevada, mas seu teor de carbono é baixo, comprometendo a temperabilidade. Com isto, após o resfriamento, obtém-se uma martensita em maior quantidade na microestrutura, contudo, mais pobre em carbono e, portanto, mais macia. A taxa de resfriamento utilizada é de fundamental importância na obtenção da microestrutura bifásica. Quando o resfriamento do aço, a partir do campo intercrítico, é realizado acima de uma determinada velocidade (taxa de resfriamento crítica) uma estrutura formada apenas por ferrita e martensita

pode ser obtida. Por outro lado, para velocidades ligeiramente mais baixas, obtêm-se estruturas que contêm certas quantidades de perlita e/ou bainita⁽³⁾.

A taxa de resfriamento crítica para a obtenção de uma microestrutura típica de aços bifásicos decresce com o teor de manganês. No entanto, é comum a adição de outros elementos tais como: silício, cromo, etc. que também afetam a taxa de resfriamento crítica⁽⁴⁾.

O limite de resistência dos aços bifásicos está relacionado com a fase martensítica e com o teor de carbono nela contido, ao passo que o limite de escoamento é influenciado pelas propriedades da ferrita⁽⁴⁾.

3 UTILIZAÇÃO DE AÇOS BIFÁSICOS NO PROGRAMA ULSAB – *ULTRA LIGHT STEEL AUTO BODY*

O programa ULSAB, considerado a maior iniciativa de pesquisa colaborativa dos últimos tempos no ramo metalúrgico, teve início em 1994 sob a liderança do IISI – *International Iron and Steel Institute*, em resposta a estudos que indicavam uma perda de posição significativa do aço na indústria automobilística, face à ação de produtos sucedâneos, como alumínio e polímeros. Na primeira fase do programa ULSAB reuniram-se 35 siderúrgicas de 18 países, além da *Porsche Engineering Services Inc.* e outras entidades de apoio. A continuidade do programa foi realizada com os projetos *Ultra Light Steel Auto Closures (ULSAC)*, *Ultra Light Steel Auto Suspension (ULSAS)* e ULSAB-AVC que contou com a participação de 33 siderúrgicas de 18 países, dentre as quais a USIMINAS, única empresa brasileira a participar de todas as fases do programa⁽⁵⁾. Na Figura 5 observam-se os tipos de aços utilizados no projeto ULSAB-AVC, destacando os aços bifásicos.

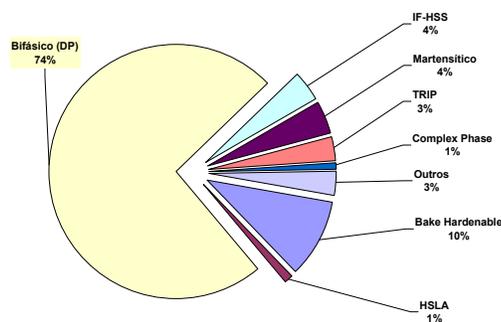


Figura 5. Estratificação dos tipos de aço utilizados no projeto ULSAB-AVC⁽¹⁾.

A nova arquitetura do carro conceitual proposto pelo programa ULSAB-AVC prevê que 100% dos aços utilizados sejam de alta resistência (limite de escoamento entre 210 e 550MPa), sendo que 80% são de aços de alta resistência considerados de última geração (bifásicos, TRIP, *Complex Phase* e martensíticos), denominados também como *Advanced High Strength Steels (AHSS)*, dentre os quais se destacam, no volume de utilização, os aços bifásicos⁽⁴⁾, conforme indicado na Figura 6.

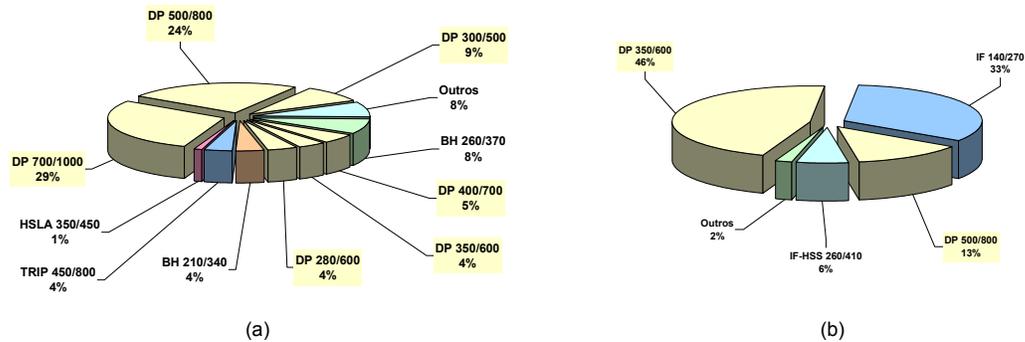


Figura 6. Participação dos graus de aço na estrutura (a) e painéis (b) utilizados no projeto ULSAB-AVC.

Observa-se o direcionamento de utilização de aços bifásicos no projeto ULSAB-AVC. Desta forma a Usiminas, em consonância com sua estratégia de atendimento diferenciado ao setor automotivo, tem atuado no sentido de posicionar-se no estado da arte tecnológico na produção de aços para este segmento. Assim a Usiminas/Unigal iniciou a produção e comercialização do aço bifásico da classe de limite de resistência de 600MPa galvanizado por imersão a quente (Usigal-GA[®] e Usigal-GI[®]), com a adição desse aço AHSS em seu portfólio e na manutenção da maior gama de produtos revestidos, para o setor automobilístico, no mercado brasileiro.

4 AÇO BIFÁSICO DP340/600 PRODUZIDO PELA USIMINAS/UNIGAL

O aço DP340/600 apresenta microestrutura típica de grãos ferríticos poligonais associados a segunda fase, entre 10 e 20%, formada principalmente de martensita, conforme ilustrada na Figura 7.

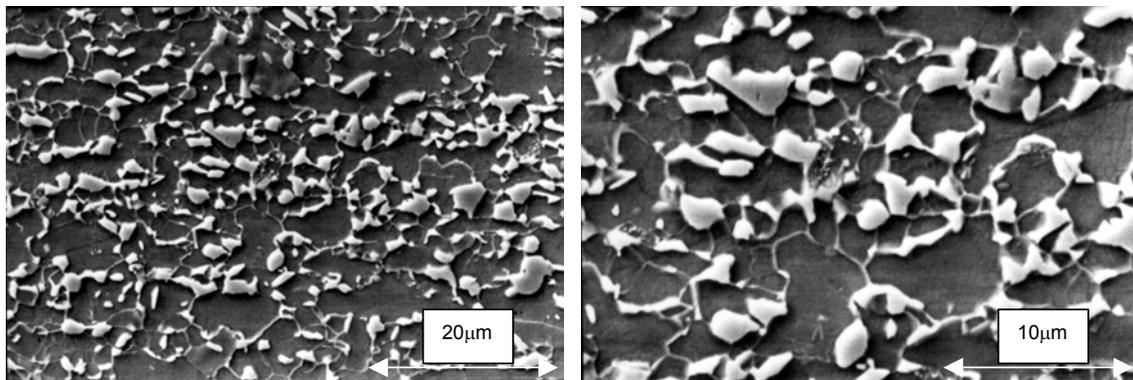


Figura 7. Microestrutura do aço Usigal-GI-DP590 (equivalente ao DP340/600).

A seguir serão apresentados os resultados típicos do aço bifásico DP340/600 (Usigal-GI-DP590 e Usigal-GA-DP590) produzido pela Usiminas/Unigal, comparado com um aço HSLA de limite de escoamento similar (HSLA340/450). Os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento total (AL), alongamento uniforme (Au), razão elástica (LE/LR) e produto entre limite de resistência e alongamento (LR x AL) são apresentados, na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas à tração*.

Aço	LE	LR	AL	Au	LE/LR	LR x AL
DP340/600	377MPa	658MPa	25%	18%	57%	16450
HSLA340/450	375MPa	477MPa	26%	17%	79%	12407

*Direção transversal ao sentido de laminação e base de medida = 80 mm

Observando as propriedades mecânicas obtidas e o gráfico de tração típico para os materiais testados, ilustrado na Figura 8, verifica-se que o aço bifásico (DP340/600) apresenta as propriedades mais favoráveis à absorção de impacto: alta taxa de encruamento inicial, alongamento total (AL), alongamento uniforme (Au) e limite de escoamento (LE) similares, maior limite de resistência, menor razão elástica (LE/LR) e maior área da curva tensão-deformação (LR x AL) que o aço convencional similar (HSLA340/450).

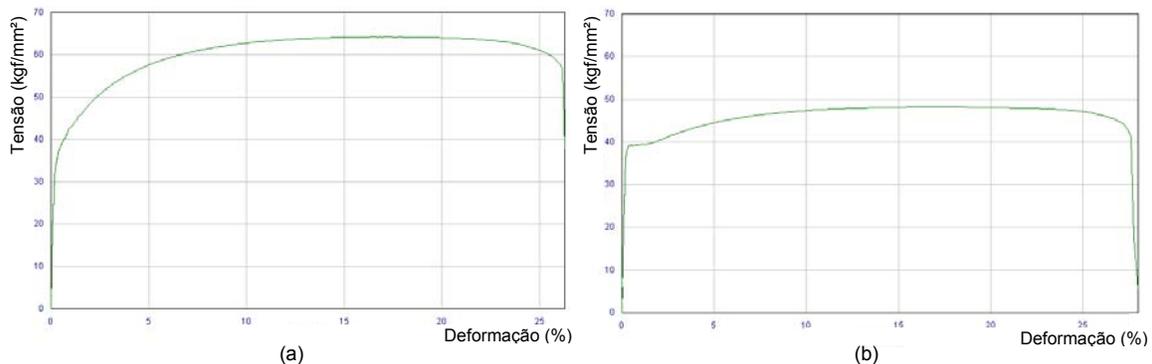


Figura 8. Característica da curva tensão-deformação do aço DP340/600 (a) comparada ao aço HSLA340/450 (b).

O aço bifásico apresenta ainda outro importante benefício, que é o aumento do efeito *bake hardening* (BH) e o efeito *work hardening* (WH), com os resultados típicos apresentados na Tabela 2.

O termo BH é empregado para designar o efeito de endurecimento proporcionado ao aço durante a etapa de cura, após o processo de pintura, da peça acabada. Nesta etapa, devido o aumento da temperatura (em torno de 170°C), o carbono presente no aço em solução sólida, difunde-se para as discordâncias e provocando assim o seu ancoramento⁽⁶⁾.

Esse efeito é traduzido pela elevação do limite de escoamento do aço e pode ser determinado deformando um corpo de prova no ensaio de tração até 2% de deformação e levado a uma estufa à temperatura de 170°C por um período de 20 minutos e posteriormente reensaiado em tração, a diferença entre o limite de escoamento em 2% de deformação no material sem tratamento térmico e o limite de escoamento em 0,2% no material tratado termicamente, representa o efeito BH⁽⁶⁾.

O termo WH é empregado para designar o efeito de endurecimento proporcionado ao aço durante a etapa de conformação, antes do processo de pintura e cura. Nesta etapa, o fenômeno de endurecimento por deformação plástica, denominado encruamento, pode ser representado numa curva tensão-deformação, onde observa-se o aumento da tensão com a deformação. A inclinação da curva define a taxa de encruamento, isto é, estabelece o aumento de tensão para uma dada variação de deformação. Esse efeito é traduzido pela elevação do limite de escoamento do aço e pode ser determinado deformando um corpo de prova no ensaio de tração até 2% de deformação, a diferença entre o limite de escoamento

em 2% de deformação e o limite de escoamento em 0,2% no material sem deformação, representa o efeito $WH^{(6)}$.

Tabela 2. Propriedades mecânicas no ensaio de *bake hardening* (BH).

Aço	LE _{0,2%} (inicial)	LE _{2%}	LE _{final} (LE+WH+BH)	WH	BH	PDE**	PDE** (Após 6 meses armazenado)
DP340/600	377MPa	529MPa	580MPa	152MPa	50MPa	0%	0%
HSLA340/450	375MPa	385MPa	415MPa	10MPa	30MPa	2,1%	4%

**Extensão do patamar definido de escoamento

Destaca-se o incremento final de limite de escoamento (WH+BH) no aço DP340/600, aumentando mais de 200MPa após a conformação e a cura da pintura, possibilitando assim maior resistência final e também redução de espessura comparando ao aço HSLA340/450. Observou-se também que o aço bifásico não envelheceu em temperatura ambiente, garantindo assim possibilidade de estocagem por pelo menos 6 meses sem afetar as propriedades mecânicas obtidas.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

A produção em escala industrial permitiu concluir que houve sucesso na produção e aplicação do aço bifásico revestido (GI/GA), da classe de limite de resistência de 600MPa e limite de escoamento mínimo de 340MPa (DP340/600).

A Usiminas homologou a produção industrialmente e também em vários clientes, do aço DP340/600 revestido (Usigal-GI-DP590 e Usigal-GA-DP590).

Desta forma ampliando a participação no segmento automobilístico, através da oferta de um novo produto de alta resistência mecânica revestido, com grande potencial de utilização, tendo em vista os resultados apresentados no projeto ULSAB-AVC, reforçando o portfólio da empresa como líder na disponibilização de aços com alto valor tecnológico agregado.

REFERÊNCIAS

- 1 IISI. *Advanced High Strength Steel (AHSS) – Application Guidelines*. AISI, Southfield, MI, March 2005.
- 2 Pereira, J. F. B. *Novos Aços de Ultra-Alta Resistência Otidos por Transformação de Fase*. Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2002, p. 149-152.
- 3 Barrado, F. S.; Melo, T. M. F.; Cândido, L.C.; Godefroid, L. B. *Efeito de Parâmetros do Recozimento Contínuo nas Propriedades Mecânicas em Tração de Aços Dual Phase*. In: 40° Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Vitória, 2003, p. 536-544.
- 4 ULSAB-AVC. *Technical Transfer Dispatch #6*. AISI, Southfield, MI, May 2001.
- 5 ULSAB-AVC. *Engenning Report*. AISI, Southfield, MI, October 2001.
- 6 Rabelo, G. B. C.; Cetlin, P. R.; Meyer, L.C. O. *Avaliação Comparativa de Aços Livres de Intersticiais e Aços Endurecíveis por Envelhecimento na Cura da Pintura da Classe de 220MPa de Limite de Escoamento*. In: 37° Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba, 2000, p. 135-144.

DUAL PHASE STEEL PROCESSED BY CONTINUOUS GALVANIZATION LINE - OVERVIEW AND CURRENT RESULTS OF PRODUCTION AT USIMINAS/UNIGAL¹

*Fabiano Augusto Vallim Fonseca²
Fernando de Souza Costa³
Ed Juarez Mendes Taiss⁴
Heyne Rodrigues de Lima⁵*

Abstract

Usiminas has directed its efforts for the production of high strength steels for the automobile industry aiming to improve competitiveness of the steel as related to succedaneous materials and allowing to fulfill the three main demands of the sector: reduction of weight, fuel economy and improvement of the safety of the user. In this context the dual phase steel had appeared as an alternative solution with great advantages as related to conventional steels. Such steels present a microstructure that consists of a hard second phase (usually martensite) dispersed in a soft ferrite matrix. With the advent of the project Ultra Light Steel Autobody - Advanced Vehicle Concept (ULSAB-AVC) the dual-phase steel use has been extended, also generating demand for hot-dip galvanized steels, that beyond the characteristics of the steel substrate, it includes also corrosion resistance provided by the zinc coating (Usigal-GI) or zinc-iron coating (Usigal-GA). Usiminas regularly commercializes dual-phase steel as hot rolled and as non coated cold rolled. The objective of the present study is to present some characteristics and advantages mentioned by the literature and the current results of industrial production of hot-dip galvanized dual-phase steel as cold rolled of the class of resistance of 600MPa, which is commercialized by Usiminas and produced at Usiminas/Unigal.

Key words: Dual phase; HDG; Automotive applications

¹ *Technical Contribution to the 42st Rolling Seminar – Processes, Rolled and Coated Products of Brazilian Society for Metallurgy and Materials (ABM) – Santos, SP Brazil, october 25-28, 2005.*

² *Metallurgical Engineer, Sheet and Coil Quality Assurance of Usiminas; Ipatinga, MG.*

³ *Physical, M.Sc., Reserarch and Development Center of Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁴ *Metallurgical Engineer, Marketing of Usiminas; Belo Horizonte, MG.*

⁵ *Metallurgical Engineer, Quality Assurance of Unigal; Ipatinga, MG.*