

1. Especificações e Produtos com Revestimento Metálico

GalvInfoNote

Aços utilizados em Chapas Revestidas

1.8

Rev 1.0 Jan 2011

Introdução

Chapas revestidas com zinco e liga de zinco são produzidas utilizando muitos tipos e classificações diferentes de aço. Esta GalvInfoNote descreve de forma breve estes aços e a metalurgia básica envolvida em sua produção e aplicação.

Substratos de Aço para Galvanização

Aços para galvanização contínua podem ser categorizados nos seguintes grupos principais (a maior parte da terminologia está de acordo com a especificação de produto ASTM descrita na GalvInfoNote 1.2):

Aço Comercial (CS) – níveis de carbono variam entre 0,04% e 0,10% e entre 0,2% e 0,6% para manganês, dependendo do produto que esteja sendo fabricado. O substrato é conformado a frio com 50 a 80% de redução antes de ser processado em uma linha de galvanização.

Aço para Conformação (FS) – níveis de carbono entre 0,04 e 0,08%, cerca de 0,25% para manganês. Este aço é reduzido a frio entre 60 a 80% e é utilizado para produzir um produto levemente mais macio do que o CS a fim de proporcionar uma conformação melhorada.

Aço Estrutural (SS) – níveis de carbono variam entre 0,04% e 0,20%, e entre 0,4% e 1,6% para manganês, dependendo do produto que esteja sendo fabricado. Esta chapa é laminada a frio com 50 a 70% de redução. Os níveis de SS devem atender às exigências mínimas de propriedade mecânica e ter um limite de elasticidade entre 33 e 80 ksi [230 e 550 MPa].

Aço de Estampagem Profunda (DDS) e Aço de Estampagem Profunda Extra (EDDS) – em geral feito a partir de aços estabilizados com teor ultra-baixo de carbono (10-15 ppm), ainda que alguns DDSs sejam feitos utilizando aço com teor extra-baixo de carbono (0,015-0,020%). O EDDS, e alguns DDSs, são completamente estabilizados (não envelhecem) depois de recozidos e revestidos em linha. Para maximizar a resposta ao recozimento, a redução a frio é geralmente de 75% no mínimo.

Aço Endurecido por Solução (SHS) e Aço Endurecível por Cozimento (BHS) – aço com teor ultrabaixo a baixo de carbono (0,12% máx.) com limite de elasticidade entre 26 e 44 ksi [180 a 300 MPa]. O SHS é reforçado com a utilização de elementos tais como M, P, ou Si, enquanto o BHS depende de envelhecimento após deformação para endurecimento.

Aço de Baixa Liga e Alta Resistência (HSLAS) – normalmente feito de aço de baixo carbono micro-ligado. O elemento primário de micro-ligação é o nióbio (Nb). A redução a frio raramente excede 60% devido à alta carga de conformação a frio necessária para reduzir a espessura desses aços. Eles possuem limites de elasticidade entre 40 e 80 ksi [275 para 550 MPa].

Aço de Baixa Liga e Alta Resistência Avançado (AHSS) – Produzido utilizando altos níveis de elementos de ligação e ciclos de resfriamento e recozimento cuidadosamente controlados. A redução a frio raramente excede 60% devido às altas cargas de conformação. O limite de elasticidade nestes aços é normalmente entre 50 e 80 ksi [340 e 545 MPa].

Efeitos da Adição de Liga nas Propriedades do Aço

- **Carbono**– é o elemento de ligação do aço mais importante, tendo grande efeito nas propriedades do aço. O carbono é parte das operações integradas de fabricação do aço, começando com o alto-forno. A Figura 1 mostra a influência que o carbono tem nas propriedades do aço.
- **Manganês**– foi inicialmente usado para controlar a “baixa ductilidade a quente”, um problema associado ao enxofre no aço. Agora ele é utilizado para fortalecimento e é adicionado intencionalmente.
- **Enxofre**– Indesejável em quase todos os aços. Vem do enxofre presente no carvão e/ou no minério. Na maioria dos casos, as práticas de processamento existem para minimizar a quantidade de enxofre.
- **Fósforo**– Comumente presente em níveis muito baixos, quantidades residuais – menos de 0,01%. Pode ser adicionado para aumentar a resistência.
- **Silício**– Geralmente apresenta-se somente como um elemento residual, normalmente menos de 0,01%. Pode ser adicionado como um fortalecedor para produção de aços de alta resistência. Pode causar problemas durante o revestimento por imersão a quente, uma vez que é difícil de “reduzir” óxidos de silício e em fornos de recozimento contínuo.
- **Alumínio**– adicionado para “matar” o aço durante a fundição, isto é, prevenir problemas de desgaseificação de oxigênio durante a solidificação. Além disso, ele pode reter nitrogênio para minimizar o “envelhecimento”. Utilizado para fazer aços de estampagem profunda.
- **Nitrogênio**– Presente como uma impureza; vindo do manejo com ar do aço fundido.
- **Nióbio, Titânio & Vanádio**– adicionados intencionalmente para fortalecer o aço. Nb e Ti são também utilizados como estabilizadores em aços IF.
- **Cobre, Níquel & Cromo**– normalmente presentes somente como impurezas. Quando adicionados, são utilizados para endurecimento e/ou fortalecimento.

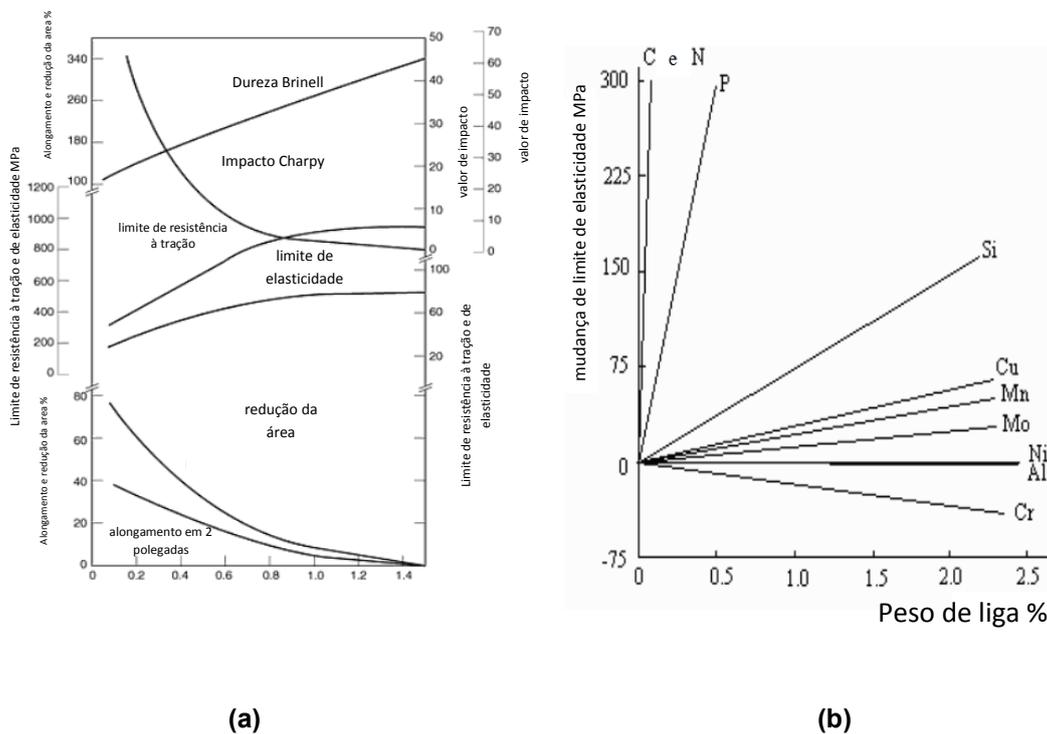


Figura 1 Efeitos de C nas propriedades mecânicas, (a); efeito dos elementos de ligação no limite de elasticidade, (b)

Aço Estabilizado com Teor Ultra-Baixo de Carbono

O carbono (C) e o nitrogênio (N) em chapas de aço resultam em propriedades mecânicas, de encruamento por envelhecimento e deterioração do valor r (medida de resistência a estiramento e estampabilidade) maiores.

O aço líquido é processado através de um desgaseificador para reduzir C e N a níveis baixos o bastante para que o resíduo possa ser “estabilizado” com uma pequena adição de titânio (Ti) e nióbio (Nb).

Ti e Nb são fortes formadores de carburetos/nitritos, removendo o C e N da solução em ferro líquido; após isso, esses dois últimos elementos não estarão mais disponíveis para residir nas frestas entre os átomos de ferro solidificados.

O termo aço “Livre de Interstício” ou “IF” se refere ao fato de que não há átomos solutos intersticiais para deformar a treliça de ferro sólido, resultando em um aço muito macio.

O aço IF não envelhecido tem baixo limite de escoamento e alto alongamento, o que significa que as caneluras e nervuras de distensão nunca são um problema.

O aço IF feito somente com Ti é muito comum e é utilizado para produzir as melhores propriedades mecânicas para estampagem profunda. É muito reativo em um banho de zinco e é normalmente revestido somente como galvanizado (GI).

Outro tipo de aço IF popular é estabilizado tanto com Ti quanto com Nb. A sinergia destes dois elementos permite estabilização completa a ser alcançada em níveis mais baixos de cada elemento. Dependendo de uma quantidade relativa de Ti e Nb, o aço precisa ser recozido em altas temperaturas durante a galvanização e tem propriedades mecânicas levemente menores que o tipo Ti. O tipo Ti-Nb é também pouco reativo em um banho de zinco e é normalmente empregado ao produzir galvanneal (GA).

Os aços IF são ideais para produzir diretamente produtos por imersão a quente DDS e EDDS pelo processo de recozimento contínuo. Durante o revestimento com zinco e os passos de galvanização, a faixa é reaquecida acima da temperatura de superenvelhecimento. Caso o aço com baixo teor de carbono tenha sido utilizado, o carbono se redissolverá, e poderá causar envelhecimento após deformação. Com aços IF, resfriamento e reaquecimento são irrelevantes, uma vez que o carbono (e o nitrogênio, se presente) não está disponível para ser redissolvido e causar envelhecimento.

Um tipo de EDDS feito utilizando aço estabilizado é na verdade um aço com uma maior resistência com um limite de elasticidade mínimo de 30 ksi [205 MPa]. Feito com adições de fósforo de até 0,06%, ele combina boa conformabilidade e grande resistência, produzindo uma boa resistência a amolgaduras em painéis externos.

O aço estabilizado, com teor ultra-baixo de carbono (ULC) e livre de interstício tem a habilidade, durante o recozimento contínuo, de formar orientações de cristal favoráveis à estampagem profunda. Isto não é possível com aço desestabilizado com teor baixo de carbono em linhas de recozimento contínuo. Os altos valores- r necessários para boa trefilação do aço exigem uma farta orientação de cristal “cube-on-corner” para conformação durante o recozimento. Isso se torna progressivamente possível à medida que os níveis de carbono estão abaixo de 0,01%, e otimizados em 0,001% (10 ppm).

Os aços de maior conformabilidade (tanto IF quanto com carbono) têm níveis de manganês abaixo de 0,20%, e a conformabilidade aumenta conforme os níveis de carbono vão diminuindo. O manganês se torna mais prejudicial aos valores- r à medida que os níveis de carbono são aumentados. O valor- r é maximizado quando aço ULC com 10 ppm de carbono e cerca de 0,15% de Mn é completamente estabilizado utilizando Ti.

Algumas vantagens do aço estabilizado ULC são: estampagem, conformação e desempenho de trefilação superiores; capacidade de fazer peças mais complexas, talvez utilizando um baixo número de estampagens; resistência ao encruamento por envelhecimento (tempo de vida útil longo para aço estocado); e aderência de revestimento melhorada para produtos galvanizados.

A principal desvantagem do aço estabilizado ULC é que ele pode ser muito macio, resultando em cisalhamento e dificuldade de puncionar, e sua utilização pode resultar em peças que não são tão ‘resistentes’, ex., resistente à pressão, comparado às peças feitas de aço carbono.

Aço Endurecível por Cozimento

Utilizando aço desgaseificado a vácuo com teor ultra-baixo de carbono e adições de ligas precisas, um aço parcialmente estabilizado pode ser produzido, no qual há uma baixa quantidade de carbono soluto disponível, após as reações de precipitação terem sido completadas na linha de galvanização.

O aço endurecível por cozimento (BHS) aproveita o baixo carbono soluto para produzir envelhecimento após deformação controlado de carbono para aumentar o limite de elasticidade de painéis automotivos conformados, assim aumentando a resistência a amolgaduras ou permitindo certa redução de espessura. A deformação vem da conformação à prensa e o envelhecimento é acelerado pelo tratamento de cozimento de tinta. Aços BH contêm carbono soluto supersaturado suficiente para que a reação de envelhecimento tipicamente adicione de 4 a 8 ksi [27 a 55 MPa] ao limite de elasticidade em painéis estampados.

Esta abordagem para proporcionar painéis de alta resistência tem a vantagem de apresentar material capaz de conformação de baixo limite de elasticidade para operações de trefilação, para evitar problemas na forma do painel devido à deflexão elástica associada ao limite de elasticidade inicial excedendo 35 ksi [240 MPa]. O BHS é a consequência prática das tecnologias de fabricação moderna, que permitem o controle do carbono soluto supersaturado a um nível que seja alto o suficiente para proporcionar uma quantidade útil de envelhecimento após deformação acelerado, sem envelhecimento durante o transporte/estocagem. O processo de BHS produz um produto revestido que estará livre de nervuras de deformação por pelo menos 2 ou 3 meses após sua produção, permitindo tempo para consumi-lo antes que suas propriedades mecânicas comecem a se deteriorar devido ao envelhecimento.

A Figura 2 ilustra o conceito de endurecimento por cozimento, com BH representando o aumento de deformação plástica no cozimento. Este quadro também representa a deformação típica e condições de cozimento para as áreas menos conformadas de painéis automotivos.

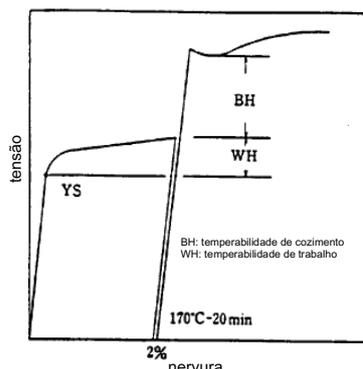


Figure 2 fenômeno de endurecimento por cozimento

Pode-se ver que, ao produzir BHS em um CGL por imersão a quente, as peças mais cruciais do processo envolvem retenção de carbono soluto por rápido resfriamento através do alcance de precipitação de carboneto, e evitando precipitação de cementita através de rápida passagem pela zona de superenvelhecimento para a temperatura de entrada do banho de zinco.

Aço de Alta Resistência

Há várias abordagens para produzir aços de alta resistência. Por muitos anos, galvanizados com limite de elasticidade de 80 ksi eram produzidos utilizando um método “extraduro” (não recozido ou com recozimento de recuperação) (ASTMA653/A653M, Classificação 80 [550 MPa]). Este produto é forte, mas possui ductilidade muito limitada. Eles são tipicamente utilizados em produtos como paredes exteriores de construções.

Chapas de aço com alta resistência podem ser produzidas utilizando fortalecimento de solução sólida ou endurecimento de precipitação.

O endurecimento de solução sólida é utilizado principalmente em aços com alta resistência estrutural e é realizado pela utilização de adições de ligas (soluto) que são intersticiais e/ou substitutas no metal solvente, conforme ilustrado na Figura 3. Ele alcança alta resistência com capacidade de conformação moderada. A abordagem intersticial utiliza elementos como carbono e nitrogênio, que esticam a treliça de ferrita. Este mecanismo é normalmente combinado com elementos substitutos tais como manganês, silício e fósforo, que substituem o ferro, também esticando a treliça de ferrita.

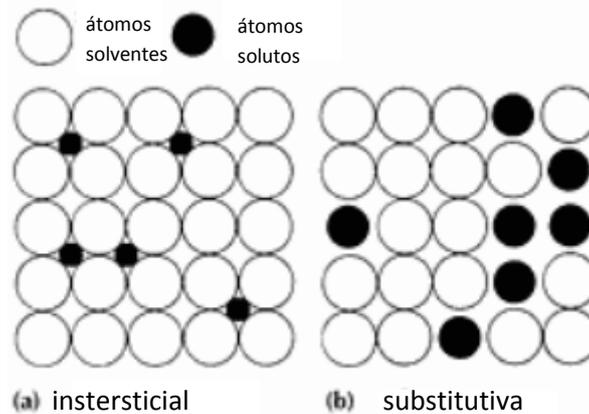


Figura 3 Fortalecimento de solução Intersticial (a) e substitucional (b)

Os 2 mecanismos acima são utilizados para produzir aços galvanizados com limite de elasticidade de até mais ou menos 65 ksi [450 MPa] e com capacidade de conformação razoável. Aços deste tipo têm uma razão de ruptura/tração (Y/T) caracteristicamente baixa (<0.75) e são muito utilizados em aplicações estruturais.

O endurecimento de precipitação e refinamento de grãos são utilizados na produção de aço de baixa liga com alta resistência, utilizando elementos de ligação, como V, Nb, e Ti, para combinar com C e/ou N para formar pequenos precipitados de carboneto/nitreto. Estes metais são mais conformáveis do que o aço com alta resistência estrutural e possuem uma razão Y/T alta (>0.80).

Aços de alta resistência avançados (AHSS) são uma classe relativamente nova de aços de alta resistência produzidos através da utilização de altos níveis de liga combinados com tratamento térmico em linha. Eles combinam resistência muito alta com boa ductilidade e possuem uma razão Y/T mais baixa do que HSLAS.

Aço de Baixa Liga e Alta Resistência (HSLAS)

Galvanizados de baixa liga de alta resistência são produzidos através de reações de endurecimento de precipitação durante o recozimento e utiliza elementos de ligação, tais como Nb, e Ti, combinados a C e/ou N para formar pequenos precipitados de carboneto/nitreto. Os resultados do endurecimento dos precipitados impedem ou modificam o movimento de deslocação (imperfeição de treliça) no aço. Os precipitados também agem como refinadores de grãos, fixando a recristalização de interfaces. Além disso, a recristalização é atrasada até que os carbonetos cresçam, resultando em um grão muito menor. O limite de elasticidade aumenta, já que ele é inversamente proporcional ao tamanho do grão de ferrita. O Nióbio, em níveis baixos, em torno de 0,005%, é eficaz devido ao seu alto peso atômico e os precipitados NbC não dissolvem a temperaturas de recozimento contínuo, deixando-os disponíveis tanto para endurecimento de precipitação quanto para refinamento de grãos. Estas técnicas são utilizadas para produzir HSLAS com limites de elasticidade entre 40 e 60 ksi [275 a 410 MPa].

O vanádio não é utilizado como elemento de microligação para galvanização, pois o precipitado VN se dissolve nas temperaturas de recozimento contínuas utilizadas; N combina com Al, e os precipitados se perdem. A

Figura 4 mostra uma trefilação da natureza da microestrutura do HSLAS.

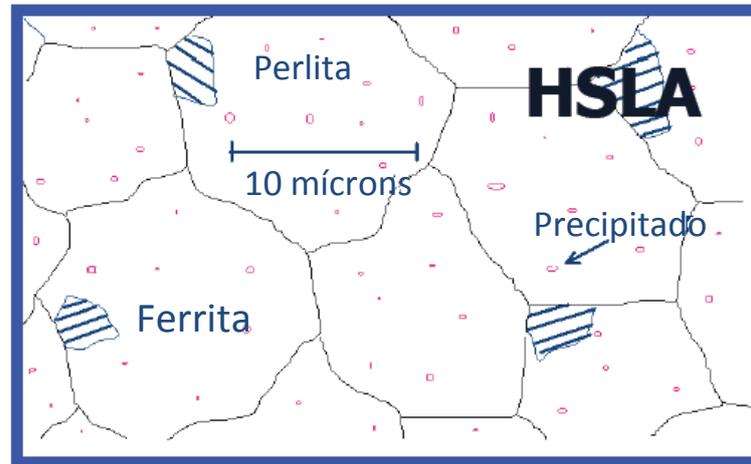


Figure 4 Microestrutura do aço HSLA

A típica curva tensão-deformação HSLA (curva mais baixa na Figura 5) apresenta pouca diferença entre o limite de elasticidade e o limite de resistência à tração (uma razão Y/T alta, ~0.80-0.84). É moderadamente conformável, porém irá apresentar fraturas em tensões próximas ao seu limite de elasticidade. Esta é a primeira razão por trás da perda de preferência do HSLAS para aplicações automotivas, já que ele não se iguala ao desempenho de aços da família AHSS, com resistência mais alta e maiores níveis de conformação.

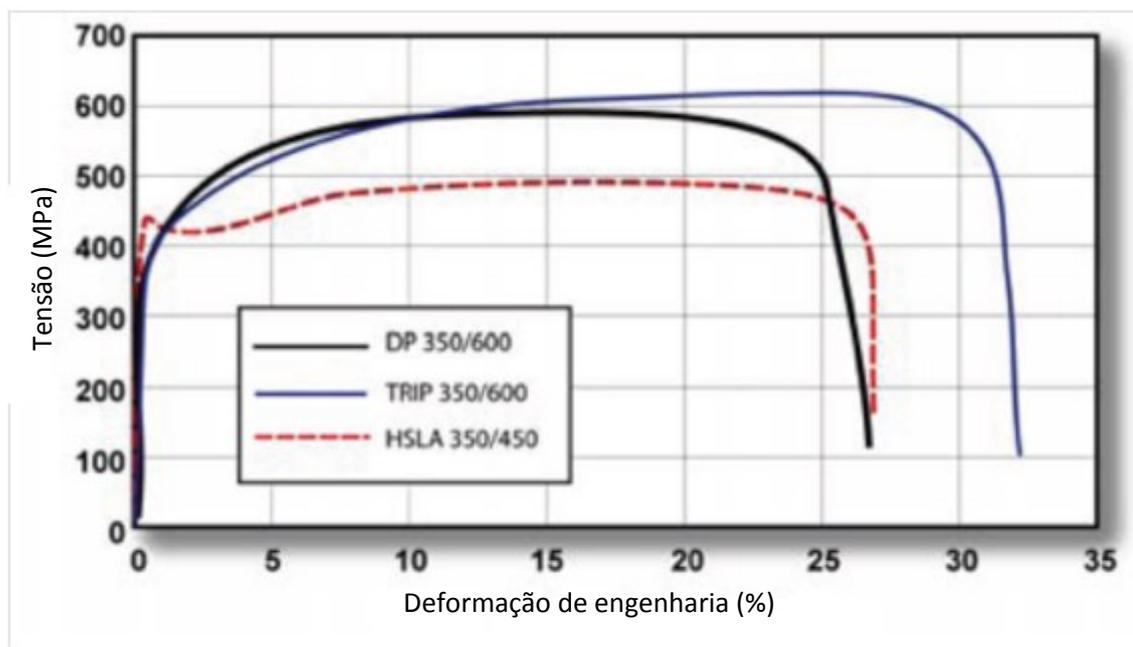


Figura 5 Comportamentos de tração do aço de alta resistência

Aço de Alta Resistência Avançado (AHSS)

Como as empresas automobilísticas estão comprometidas em diminuir a emissão de CO₂ em seus produtos, a redução de peso é uma parte importante para alcançar este objetivo, e a tecnologia AHSS oferece um ótimo meio de contribuição para este objetivo. Outro requisito importante para veículos é desempenhar bom papel em colisões. Isso requer aços com resistência à tração alta, mas ainda compatíveis com as demandas de conformação necessárias no processo de fabricação. Atualmente, AHSSs com cerca de 50 ksi [340 MPa] de YS e cerca de 85 ksi [600 MPa] de resistência à tração (TS) são os mais utilizados. O desenvolvimento tem prosseguido ativamente na Europa, Japão e América durante a última década e inclui aços de Fase Dupla (DP), Fase Múltipla (MP) ou Fase Complexa (CP) e aços de Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP).

A produção atual é, em sua maioria, de Fase Dupla (DP). O desenvolvimento ativo de chapas revestidas com Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP) está em andamento. Estratégias de ligação típicas envolvem a utilização de elementos tais como C, Si, Mn, P, Cr, Mo e Al. O resfriamento rápido e a manutenção isotérmica são necessários durante o recozimento contínuo para alcançar as propriedades mecânicas necessárias. O objetivo principal é uma melhor conformabilidade em um dado nível de resistência e, em alguns casos, fortalecimento pós-conformação. A Figura 5 ilustra as propriedades de tração deste aço, comparado ao HSLAS.

A microestrutura de aços DP e TRIP é mostrada na Figura 6. São os constituintes muito rígidos da martensita e bainita na matriz do ferrito macio que dão a estes aços suas combinações de alta resistência e boa conformabilidade. Aços TRIP também possuem austenita não transformada ao serem produzidos, que depois se transforma em constituintes mais rígidos como resultados de inserção de energia a partir das operações de conformação. Esta “reação retardada” produz peças finais mais fortes, permitindo maior redução na espessura do aço.

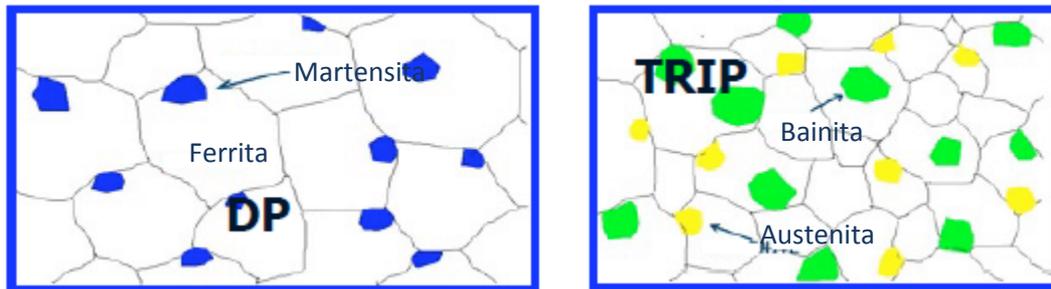


Figura 6 Microestrutura de aços de Fase Dupla (a) e TRIP (b)

Os aços DP e TRIP têm razões Y/T mais baixas (~0.60) quando comparados ao HSLAS, como mostrado nas duas curvas de tensão-deformação superiores na Figura 5. Após o escoamento, eles têm a capacidade de absorver consideravelmente mais deformação antes da quebra. Conseqüentemente, as partes finalizadas acabam com uma resistência muito maior do que se feitas com HSLA. Isso permite um aço mais fino a ser utilizado para produzir uma peça de resistência equivalente. Aços TRIP (curva de cima na Figura 5) têm uma razão Y/T semelhante aos aços DP, porém são mais fortes e podem endurecer mais, com uma capacidade de conformação equivalente, ou melhor. A baixa razão Y/T que é característica dos aços DP e TRIP está sendo utilizada em mais de uma forma por designers automotivos. Não há somente o benefício de economia de peso, mas estes aços também proporcionam ganhos no gerenciamento de energia de colisão, resultando em veículos seguros. A capacidade maior para endurecimento por trabalho a frio absorve mais energia durante uma colisão, energia essa que não é transferida para os ocupantes do veículo.

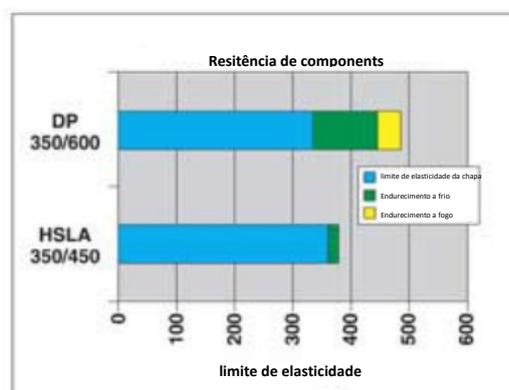


Figura 7 Benefícios de DP versus HSLAS na resistência final do material

A Figura 7 ilustra o benefício de utilizar aço de Fase Dupla em detrimento ao HSLA na fabricação de peças estruturais. A razão Y/T mais baixa de DP permite que um componente de endurecimento por trabalho a frio muito mais alto seja adicionado à resistência da peça. Um benefício adicional é que o aço DP também tem um componente de endurecimento por cozimento que adiciona resistência após a peça ter sido aquecida até temperaturas de cura de pintura.

Resumo

A relação entre resistência à tração e ductilidade da família de aços utilizados para chapas revestidas (exceto aço martensítico – MART) está ilustrada na Figura 8. É evidente que as vantagens do AHSS estão somente começando a ser exploradas, uma vez que há poucos níveis desenvolvidos com TS maior de 700 MPa. Enquanto a indústria de galvanização continua tem avançado significativamente nas duas últimas décadas ao desenvolver de uma série de tipos de aços para diferentes mercados, ainda há muito trabalho a ser feito na busca por produtos de chapa revestida mais resistentes e mais conformáveis.

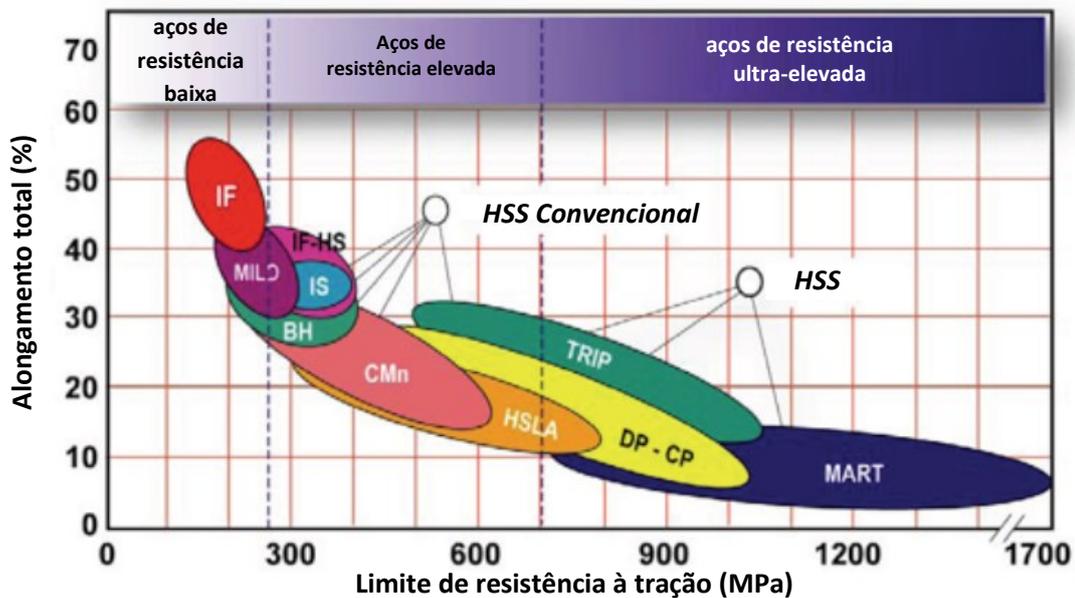


Figura 8 Tipos de aços utilizados em galvanização por imersão a quente

Copyright © 2011

Isenção de Responsabilidade:

Artigos, relatórios de pesquisas e dados técnicos são fornecidos apenas para fins informativos. Embora os editores esforcem-se para fornecer informações precisas e atuais, a Associação Internacional de Zinco não abona os resultados das pesquisas e informações relatadas neste comunicado e se isenta de toda e qualquer responsabilidade por danos resultantes da confiança nos resultados relatados ou outras informações contidas neste comunicado, incluindo, mas não limitando a, danos acidentais ou consequentes.