

Materiais

Novos aços ferríticos garantem alta resistência e conformabilidade a chapas finas laminadas a frio

Demandas técnicas, comerciais, políticas e ambientais têm impulsionado o desenvolvimento das chapas de aço ao longo dos últimos 40 anos, especialmente no caso dos produtos destinados à área automotiva. Novos conceitos de microestrutura têm proporcionado características inéditas de resistência mecânica e conformabilidade a esses materiais, mas em muitos casos não é preciso desistir da convencional microestrutura ferrítica para obter chapas com essas propriedades. Este artigo apresenta os principais novos tipos de chapas finas laminadas a frio com microestrutura ferrítica que apresentam características diferenciadas em relação ao aço doce. São eles os aços refosforados, de alta resistência e baixa liga (ARBL), com características de *bake hardening*, isentos de intersticiais (IF) e isotrópicos.

A. A. Gorni

A crise energética da década de 1970 deslanchou o desenvolvimento de novos tipos de chapas de aço com maior resistência mecânica e a menor perda possível de conformabilidade a frio. Uma série de outros fatores, como demandas ecológicas e a competição com outros materiais, tem mantido as atividades nesse campo desde então. A busca por maior resistência visa

permitir a redução da espessura dos componentes automotivos sem sacrifício de sua resistência mecânica, enquanto a manutenção da estampabilidade objetiva a preservação de seu formato original e das ferramentas já usadas nas estamparias.

Os primeiros desenvolvimentos nesse sentido se concentraram em modificações relativamente fáceis do ponto de vista prático, ou seja, pequenos ajustes de composição química ou de processo, de forma que esses novos tipos de chapas pudessem ser feitos com o uso da

mesma infraestrutura industrial, apenas com algumas pequenas alterações em seus equipamentos. Surgiram, então, novos tipos de aço, mantendo basicamente a mesma microestrutura ferrítica dos produtos convencionais, mas com alterações sutis que lhes proporcionam características mais favoráveis para a aplicação automotiva, em virtude da ativação de mecanismos de endurecimento específicos⁽³⁾. As principais variantes desses novos aços ferríticos são os refosforados, os microligados (ARBL, de alta

Antonio Augusto Gorni é editor técnico da revista Corte e Conformação de Metais. Este artigo foi apresentado como palestra no Congresso Corte e Conformação de Metais 2009, realizado entre os dias 5 e 7 de outubro de 2009 em São Paulo, SP. Reprodução autorizada.

resistência e baixa liga), endurecíveis por *bake hardening* (endurecimento “por cozimento”), livres de intersticiais (IF, do inglês *interstitial free*) e isotrópicos.

Mais recentemente surgiram os chamados aços AHSS (*Advanced High Strength Steels*, ou aços avançados de alta resistência mecânica), com microestruturas mais complexas, em que a ferrita coexiste com outros microconstituintes⁽⁴⁾. Contudo, a produção desses novos materiais geralmente requer vultosos investimentos em novas linhas de laminação e recozimento contínuo, além da execução de tratamentos térmicos e termomecânicos complexos. Isso tem garantido a sobrevivência das chapas de aços ferríticos, cujo processo de fabricação é relativamente simples.

Aço refosforado

Uma forma barata de aumentar a resistência mecânica do aço sem grande perda de estampabilidade consiste em acrescentar a ele elementos de liga que promovam endurecimento por solução sólida⁽³⁾, o que leva a um aumento dos limites de escoamento e resistência, ainda que com alguma redução da sua ductilidade⁽⁶⁾. A figura 1 mostra esses efeitos, proporcionados por elementos de liga comumente incorporados ao aço, tais como C, Si, Mn, P e Cr. Pode-se observar que a perda de ductilidade aumenta, na sequência, Si, P, Mn e C. Os aumentos observados nos limites de escoamento e de resistência para cada elemento são praticamente iguais, o que faz com que a razão elástica da chapa permaneça relativamente constante.

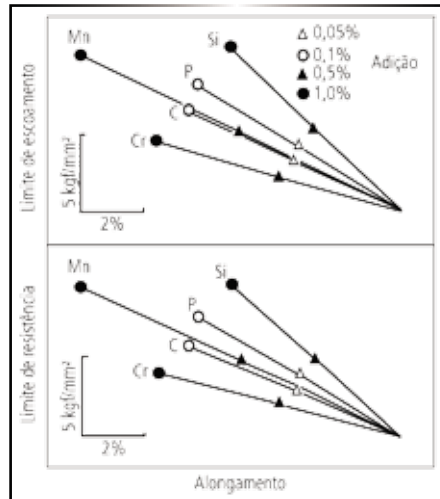


Fig. 1 – Efeito do endurecimento por solução sólida proporcionado por vários elementos de liga comumente incorporados ao aço. Resultados obtidos a partir de chapas de aço laminadas a frio com 0,8 mm de espessura, recozidas em caixa a 670°C durante 10 horas⁽⁶⁾.

Geralmente, o P é considerado uma impureza no aço, tanto que se objetiva reduzir seu teor ao mínimo possível. Curiosamente, esse elemento, além de possuir efeito significativo no aumento da resistência mecânica com pouca perda de ductilidade, promove a formação de textura cristalográfica favorável à estampabilidade do material, que, dessa forma, apresenta altos valores do coeficiente médio de anisotropia \bar{r} , entre 1,5 e 1,8. Esse fato levou ao desenvolvimento dos chamados aços refosforados, nos quais a presença desse elemento é desejável dentro de certos teores. Do ponto de vista prático, esse teor é limitado a 0,1%, uma vez que o esperado efeito deletério do P se apresenta acima desse valor, na forma de fragilização das

chapas de aço e deterioração de sua soldabilidade por pontos.

Caso esse teor de P não seja suficiente para que sejam atingidos os níveis de resistência mecânica desejados, usam-se então teores mais elevados de Mn, o terceiro elemento com maior eficácia no endurecimento por solução sólida. Apesar do efeito mais intenso do Si nesse sentido, ele é preterido em razão da formação de carepa aderente que ele promove na laminação a quente e do eventual surgimento de cores de revenimento durante o recozimento em caixa das bobinas laminadas a frio devido à sua oxidação. O C é o elemento de liga mais econômico entre o P, Si e Mn, mas sua presença nos teores necessários degrada a soldabilidade do aço⁽⁶⁾.

A tabela 1 permite uma comparação entre um aço ao C acalmado ao alumínio e outro refosforado. Note-se que a elevação dos teores de P, de 0,012% para 0,084%, e do Mn, de 0,30% para 0,50%, levou a uma elevação de 26% no limite de escoamento e 24% no de resistência, praticamente mantendo constante a razão elástica. O alongamento total caiu um pouco, 15%, mas o coeficiente de encruamento manteve-se constante, e o de anisotropia elevou-se em 5%. Ou seja, obteve-se um produto com maior resistência mecânica e perda relativamente pequena de ductilidade.

Tab. 1 – Comparação entre as composições químicas (expressas em porcentagem de peso) e propriedades mecânicas de chapas de aço de baixo C acalmado ao alumínio e refosforado, recozidas em caixa⁽⁶⁾

Aço	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	RE (%)	AT (%)	n	\bar{r}
Al	0,047	0,30	0,012	0,012	0,069	179	316	57	46	0,24	1,70
P	0,051	0,50	0,084	0,009	0,049	225	393	58	39	0,24	1,78

Materiais

Esse tipo de chapa é bastante usado em painéis para portas de automóveis, uma vez que sua maior resistência mecânica aumenta a resistência ao vinco ou endentação, ou seja, à ocorrência daquelas marcas que se formam na porta em função de pequenos choques que acontecem quando alguém abre descuidadamente a porta de um veículo vizinho.

Aço microligado

Outra possibilidade de obtenção de aços laminados a frio com maior resistência mecânica está no uso de elementos de microliga, como Nb, Ti e/ou V. Os estudos sobre o desenvolvimento de aços microligados comerciais começaram na década de 1960, tendo-se acelerado a partir da década seguinte e mantendo-se ativos até hoje.

Da mesma forma como ocorre nos produtos laminados a quen-

te, os elementos de microliga podem promover endurecimento por refino de grão e precipitação⁽³⁾. Eles também fixam os átomos intersticiais solubilizados em precipitados, aumentando a estampabilidade do material. Aliás, ao fixar os átomos de N, os elementos de microliga podem exercer efeitos microestruturais por meio da ação dos nitretos ou reduzir o endurecimento por

solução sólida decorrente da presença de N solúvel⁽¹⁾.

Além disso, os elementos de liga e microliga atrasam consideravelmente a cinética da recristalização da ferrita durante o recozimento em caixa ou contínuo das bobinas após sua laminação a frio, uma vez que seus átomos dispersos em solução sólida dificultam o avanço das frentes de recristalização. Esse efeito pode ser

observado pela comparação dos resultados mostrados na figura 2, na qual se pode observar que o retardamento da recristalização ferrítica depende dos tipos de elementos de liga presentes em cada aço – cuja composição química pode ser vista na tabela 2 (pág. 32). De fato, o tempo necessário para a recristalização plena da ferrita a 700°C (valor de temperatura bastante usado

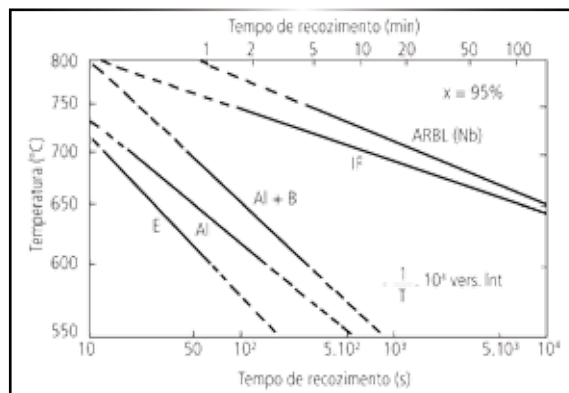


Fig. 2 – Cinética de recristalização de diversos aços laminados a frio determinada a partir de tratamentos de recozimento isotérmico realizados em banhos de sal a 700°C. E: aço efervescente; Al: aço acalmado ao Al; Al+B: aço acalmado ao Al + B; IF: aço IF; ARBL (Nb): aço microligado ao Nb⁽¹⁾.



PLASMA E OXICORTE

Máquina de Corte CNC

Velocidade máxima 20m/mim
Largura útil padrão de 1500, 2500, 3000mm
Até 12.000 mm de comprimento útil
Oxicorte com operação automática
Sensor de altura com dispositivo anti-colisão

TEL: 27.2127-9999 – FAX: 27.2127-9955
Veja máquina em operação em nosso site

www.automatica.com.br




FACAS INDUSTRIAIS, PUNÇÕES E MATRIZES PARA DOBRAS

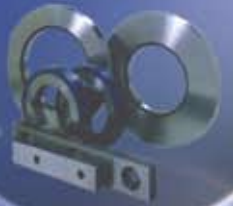
Punções e Matrizes para Dobras



Ferramentas de Dobra
para Máq. CNC e Convencionais



Facas Retas, Circulares e Slitters



Anéis Revestidos em Poliuretano
Anéis Espaçadores



PRESTAMOS SERVIÇOS DE REAFIAÇÃO, RETIFICA DE
FACAS E DE FERRAMENTAS DE DOBRA.

Consulte nossos serviços de coleta e entrega.

- Precisão absoluta
- Qualidade comprovada
- Matéria-prima selecionada criteriosamente
- Tratamento térmico qualificado
- 100% de rastreabilidade conforme ISO 9001/2000

ELEITA EM PRIMEIRO LUGAR, HÁ 4 ANOS
CONSECUTIVOS, PELO PRÓPRIO MERCADO!



11 3226-8181 - vendas@afigraf.com.br
www.afigraf.com.br

Materiais

Tab. 2 – Composição química dos aços estudados por Bleck⁽¹⁾

Aço	C	Mn	P	S	N	Al	Ti	Nb	B
Efervescente	0,04	0,25	0,008	0,010	0,002	–	–	–	–
Al	0,04	0,25	0,008	0,010	0,004	0,045	–	–	–
Al-B	0,04	0,25	0,008	0,010	0,004	0,045	–	–	0,003
Al-Ti	0,04	0,25	0,008	0,010	0,004	0,045	0,015	–	–
IF	0,005 ~ 0,018	0,25	0,008	0,010	0,004	0,020	0,067 ~ 0,160	–	–
ARBL-Nb	0,06	0,30	0,008	0,006	0,006	0,045	–	0,040	–
ARBL-Ti	0,06	0,80	0,012	0,006	0,006	0,045	0,080	0,020	–

na prática) eleva-se na seguinte ordem, atribuindo-se o valor unitário para o aço efervescente: acalmado ao Al (1,5), acalmado com Al + B (3,5), aço IF ao Ti (60) e ARBL ao Nb (125).

Essa alteração na cinética provocada pelos elementos de microliga leva à redução do tamanho de grão obtido em relação aos aços ao Al; a figura 3 comprova o efeito do Ti e, especialmente, do Nb nesse sentido. Já a figura 4 (pág. 34) permite constatar os diferentes efeitos dos mecanismos de endurecimento na definição do limite de escoamento de aços laminados a frio acalmados ao Al, microligados ao Nb e microligados ao Nb-Ti. O endurecimento extra proporcionado pela adição de elementos de microliga decorreu, em ordem decrescente de importância, do refino de tamanho de grão, solução sólida e precipitação⁽¹⁾.

Chapas finas a frio de aço microligado ao Nb, cuja composição química é 0,05% C, 0,30% Mn, 0,010% P, 0,050% Al, 0,005% N e 0,040% Nb, apresentam as seguintes propriedades mecânicas após recozimento em

limite de resistência de 440 MPa, razão elástica de 73%, alongamento total de 28%, coeficiente de encruamento de 0,17 e de anisotropia de 1,30⁽²⁾. Em comparação com os valores correspondentes de aços ao C e refosforados, mostrados na tabela 1, nota-se que este material apresenta resistência mecânica muito maior, mas com conformabilidade prejudicada em razão dos menores valores de alongamento e coeficientes de encruamento e anisotropia. Sua maior razão elástica também sinaliza a ocorrência mais intensa do chamado efeito mola (*springback*) durante a estampagem.

Os maiores níveis de resistência mecânica e razão de escoamento, e o menor coeficiente de encruamento, decorrem dos mecanismos de endurecimento

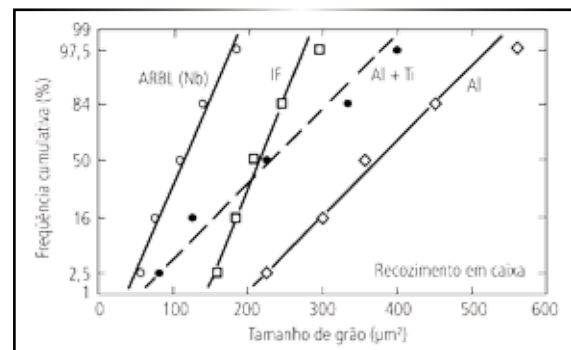


Fig. 3 – Distribuição do tamanho de grão médio após recozimento em caixa para diversos aços laminados a frio⁽¹⁾

Materiais

envolvidos nos aços microligados, em especial do refino do tamanho de grão. Já o baixo coeficiente de anisotropia decorre do grande número de precipitados que se formam nesses aços, os quais retardam a cinética da recristalização da ferrita durante o recozimento e levam à formação de uma textura cristalográfica desfavorável para a estampabilidade do material.

Aço com efeito de *bake hardening*

Uma das possibilidades existentes para elevar a resistência mecânica das chapas laminadas a frio sem afetar demasiadamente sua ductilidade no momento da estampagem consiste em aproveitar o endurecimento por precipitação que ocorre nos aços de baixo C quando deformados e posteriormente expostos a um período de aquecimento sob temperaturas relativamente baixas, da ordem de 170°C, conforme mostra a

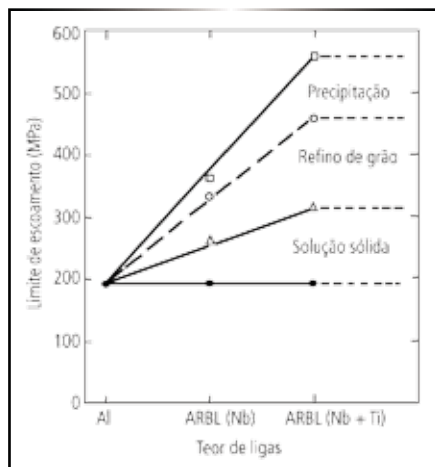


Fig. 4 – Endurecimento proporcionado pela adição de elementos de microliga a um aço básico acalmado ao alumínio laminado a frio e recozido a 700°C⁽¹⁾

figura 5 (pág. 35). Surgiram assim os aços com efeito de *bake hardening* (literalmente, “endurecimento por cozimento”) acalmados ao Al, que apresentam originalmente baixos valores de limite de escoamento, da ordem de 200 MPa. A peça conformada deve ser envelhecida a 170°C durante 20 a 30 minutos para que apresente um aumento de 40 MPa em sua resistência mecânica. Caso a peça venha a ser pintada,

nem será necessário aplicar um tratamento específico nesse sentido, pois o envelhecimento ocorrerá naturalmente na estufa onde a pintura é seca.

Dessa forma, a peça conformada atinge resistência a vinco e rigidez mecânica equivalentes às dos aços microligados de alta resistência. A ductilidade do material somente é afetada após a conformação da peça e o tratamento de envelhecimento. Esse tipo de aço é usado em componentes automotivos que comumente sofrem pequenos amassos em razão de seu uso rotineiro ou mesmo em virtude de pequenos acidentes, como painéis externos de capôs, portas, tampas de porta-malas, etc. As propriedades típicas desse aço com boa estampabilidade são: limite de escoamento de 230 MPa, limite de resistência de 365 MPa, alongamento total de 39%, coeficiente de anisotropia r igual a 1,8 e coeficiente de encruamento n igual a 0,20. Após

CorDob
Máquinas Hidráulicas e Excêntricas
www.cordobmaq.com.br

AS MELHORES MÁQUINAS PARA A SUA EMPRESA.



Guilhotina hidráulica
LINHA GHP 2.5/3.5/5.0/6.5



Viradeira Hidráulica
LINHA VHDR/VHDS

**VIRADEIRA HIDRÁULICA DEDO
EXTENSOR COM 36 FERRAMENTAS
NA LINHA DE 2 METROS E 54
FERRAMENTAS NA LINHA
DE 3 METROS**

Possui CLP + IHM Touch Screen programável para atender vários ângulos de dobra em uma só peça proporcionando uma alta produção e versatilidade.

COR DOB IND. E COM. DE MÁQUINAS LTDA - AV. JACOB JORGE ABI RACHED, Nº 291 - III DISTRITO INDUSTRIAL
ARARAQUARA - SP - FONE/FAX: (16) 3324 - 3326 / 3324 - 2908



o tratamento de envelhecimento, sua resistência aumenta em 38 MPa⁽⁸⁾.

Para que um aço apresente efeito consistente de *bake hardening* é necessário que ele tenha teor de C solúvel de, no mínimo, 0,0005%, para que o aumento de resistência mecânica após o envelhecimento seja igual ou superior a 30 MPa. Por outro lado, teores excessivos de C solúvel são inconvenientes: acima de 0,0015% o efeito de *bake hardening* torna-se mais intenso, ultrapassando 60 MPa, mas também aumenta o risco de ocorrer envelhecimento excessivo do material sob temperatura ambiente antes do prazo especificado para a sua utilização. Isso

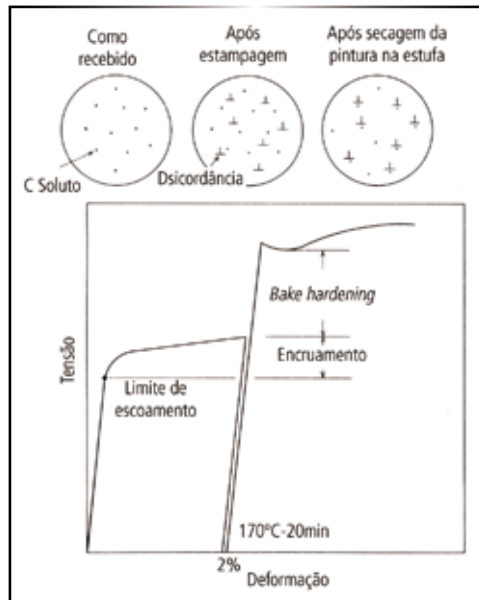


Fig. 5 – Efeito decorrente do *bake hardening* ("endurecimento por cozimento"): a resistência mecânica do aço se eleva de 30 a 40 MPa em função de seu envelhecimento a 170°C, feito após a conformação mecânica da chapa⁽⁸⁾

promove a ocorrência das chamadas *linhas de distensão* quando da estampagem da chapa, o que

pode vir a degradar ou mesmo inutilizar a peça.

Chapas finas de aço com efeito de *bake hardening* e valores de *r* inferiores a 2,0 podem ser produzidas de duas formas. Na primeira delas um aço com baixo C (0,02 a 0,06%), acalmado ao Al, é processado numa linha de recozimento contínuo. Esse material é submetido a altas temperaturas de bobinamento no laminador de tiras a quente, o que coalesce os carbonetos e estabiliza o N na forma de AlN. A laminação a frio e o recozimento contínuo subsequentes resultam na formação de uma intensa textura cristalográfica [111], resultando em produtos com valores de coeficiente de

CORTES PRECISOS.

DOBRAS PERFEITAS.

ImpactoItu.com.br

Líder no mercado e única na atuação em todos os segmentos, somente a AçoKorte garante sempre as melhores soluções!



Telefone: 11 4013 8080
Site: www.acokorte.com.br

AÇOKORTE
FACAS E FERRAMENTAS INDUSTRIAIS

Materiais

anisotropia r da ordem de 1,5 a 1,7. Parte de seus carbonetos se dissolve durante as fases de aquecimento e encharque no recozimento, obtendo-se assim altos teores de C em solução. A etapa de super-envelhecimento durante o resfriamento tende a estabilizar parte do C dissolvido na forma de Fe_3C . Logo, é possível controlar as condições dessa última fase do processo de forma que o teor de C em solução torne-se igual a aproximadamente 0,0010%, proporcionando, assim, níveis adequados de *bake hardening*.

O processo de recozimento contínuo é mais adequado para a fabricação desse tipo de laminado, mas o investimento necessário para a instalação dessa linha é enorme. Este produto também pode ser produzido por meio do recozimento em caixa, que é muito mais lento do que o processo contínuo. Nesse caso, é usado um aço com teor de C extra baixo (entre 0,005 e 0,010%), o qual é submetido a baixas temperaturas de bobinamento no laminador de tiras a quente. O recozimento em caixa após a laminação a frio é caracterizado por um lento aquecimento, proporcionando, assim, valores de coeficiente de anisotropia r entre 1,7 e 1,9 ao produto final. Um teor adequado de C dissolvido pode ser conseguido após esse tipo de recozimento, já que a precipitação de cementita é retardada durante o resfriamento devido à baixa saturação de C.

Contudo, essa abordagem não permite a fabricação de chapas com efeito de *bake hardening* e coeficientes de anisotropia r superiores a 2,0.

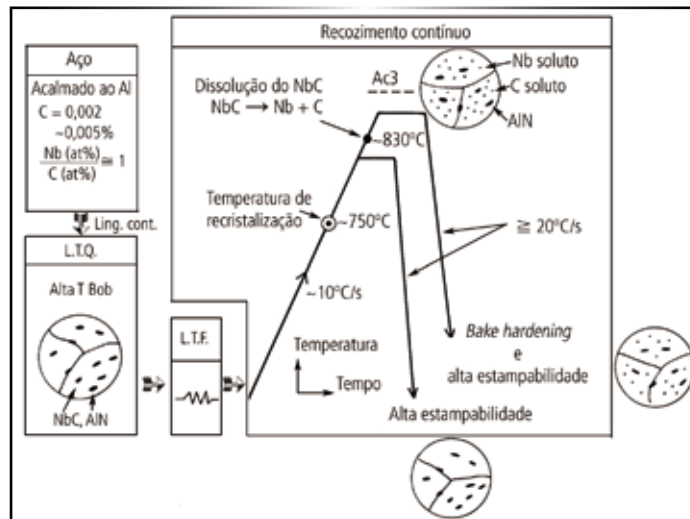


Fig. 6 – Princípio de processamento de chapas finas para estampagem extra-profunda e endurecimento por *bake hardening*⁽⁶⁾

Os aços com efeito de *bake hardening* produzidos por recozimento contínuo não podem ser processados em linhas de galvanização, uma vez que estas não dispõem de uma seção de super-envelhecimento.

Uma solução para esse impasse consiste na estabilização do C por meio de elementos de microliga, formando-se assim precipitados como TiC ou NbC . É possível obter um forte efeito de *bake hardening* (elevação de aproximadamente 60 MPa após o envelhecimento) desde que a razão entre os teores atômicos de Nb/C e Ti_{sol}/C seja menor do que 0,4 para materiais processados em recozimento contínuo sob temperaturas de encharque da ordem de 750°C. Porém, nesse caso o valor de r será muito baixo, devido à presença de altos teores de C solubilizado no início da recristalização. Contudo, se a temperatura de encharque for elevada para valores iguais ou superiores a 850°C, obtém-se um produto que simultaneamente apresenta altos valores de r e

significativo efeito de *bake hardening*, desde que as razões NbC e Ti_{sol}/C estejam próximas da unidade. A explicação para esse fenômeno pode ser vista na figura 6, em que se considera como material-base um aço acalmado ao Al. No início da recristalização o C está estabilizado na forma de carbonetos de microliga, permitindo que o aço desenvolva textura cristalográfica que favoreça o surgimento de altos valores de r . Porém, acima de 850°C os carbonetos de microliga se solubilizam, elevando o teor de C solúvel no material, o qual não se precipita subsequentemente devido às altas taxas de resfriamento aplicadas na linha de recozimento contínuo, da ordem de 20°C/s. Geralmente se usa Nb para estabilizar o C solúvel, pois esse elemento permite que a razão entre os teores atômicos do elemento de microliga e do C seja controlada de forma precisa. Com o Ti isso não é possível, pois ele tende a se combinar com o N e o S presentes no aço, o que altera o teor desse elemento

Materiais

efetivamente em solução. Além disso, o Ti dificulta o processo de galvanização a quente, não sendo recomendado para uso em produtos que devem ser revestidos⁽⁸⁾.

A aplicação dessa abordagem foi feita em aço contendo 0,002% C, 0,10-0,20% Mn, 0,020 P máx., 0,010% S máx., 0,003% N máx e 0,040% Al máx. A razão entre teores atômicos $Nb_{at\%}/C_{at\%}$ pode variar entre 0,5 e 1,2. As placas de material foram processadas no laminador de tiras a quente, sendo bobinadas a 680°C. Após 75% de redução a frio e recozimento contínuo sob temperatura de encharque a 880°C, seguido de resfriamento a 40°C/s, foram obtidos materiais com características mecânicas satisfatórias, ou seja: limite de escoamento de 170 MPa, limite de resistência de 305 MPa, alongamento total de 51%, coeficiente de anisotropia r igual a 2,2 e endurecimento após envelhecimento de 43 MPa⁽⁸⁾.

Aço livre de intersticiais (*interstitial free, IF*)

Os chamados aços IF (do inglês *interstitial free*, ou livres de intersticiais) têm sido adotados com sucesso nos últimos anos na fabricação de painéis para a carroceria de automóveis. Eles apresentam níveis muito altos de estampabilidade em função de seus ultra-baixos teores de átomos intersticiais, como C e N, menores que 0,003 e 0,004%, respectivamente. Essa condição lhes proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio. Os aços IF também não sofrem envelhecimento, uma vez que o carbono e nitrogênio ainda presentes estão totalmente combinados na forma de precipitados. As principais aplicações automotivas que tomam partido da alta estampabilidade das chapas de aço IF são cavidades no piso traseiro, alojamento do estepe e a

parte interior das portas frontal e traseira⁽⁵⁾.

Como se sabe, um aspecto metalúrgico que afeta de forma vital o valor do coeficiente de anisotropia r – e, portanto, a estampabilidade da chapa – é a orientação dos planos cristalográficos do material, ou seja, sua textura cristalográfica. A predominância dos planos cristalinos {111} após o recozimento da bobina laminada a frio eleva o valor de r . Ela é diretamente proporcional à taxa de intensidade entre as texturas (111)/(001). Logo, todo o processo metalúrgico dos aços IF deve priorizar as condições que levem a essa situação. Um dos requisitos mais decisivos nesse sentido é a manutenção de teores ultra-baixos de elementos intersticiais como C e N. A presença desses elementos promove a formação de planos {110} e {100}, que são desfavoráveis para o aumento do valor de r .

Portanto, pode-se agora definir uma composição básica típica para

Agregar valor ao aço está no nosso DNA

Labatut
Comercial de Ferro e Aço Ltda



Não importa a complexidade
ou o tamanho de sua necessidade,
o parceiro de negócio que
você procura está aqui!

- Perfis
- Trefilados
- Alta Liga
- Ferro Fundido
- Aços Retificados
- Construção Mecânica
- Aços Planos
- Oxicorte
- Jato d' água



Rua Guamaranga, 1462 - Vila Carioca
CEP 04220-020 - São Paulo - SP
Tel.: 11 2915 7088 - Fax 11 2591 1568
www.labatut.com.br

aços IF: 0,003% C máx, 0,15% Mn, 0,017% P máx, 0,012% S máx e 0,0030% N máx. Os teores mínimos de C e N dependem das condições de refino na aciaria (especialmente da disponibilidade de desgaseificação) e do custo associado à remoção desses elementos. Devem ser incorporados a essa liga-base elementos de microliga para que se combinem com o C e o N ainda em solução na microestrutura, garantindo assim a estampabilidade da chapa. Suas propriedades mecânicas objetivadas são: limite de escoamento máximo de 170 MPa, limite de resistência máximo de 320 MPa, alongamento total mínimo de 38%, coeficiente de anisotropia r mínimo de 1,70 e coeficiente de encruamento n mínimo de 0,22.

Os teores mínimos de elementos de microliga que se fazem necessários para eliminar completamente o C e o N solúveis na microestrutura dependem da concepção da liga e podem ser calculados a partir das relações abaixo:

- Aços IF ao Ti:
 $\%Ti_{\min} = 4 \% C + 3,42 \% N + 1,5 \% S$
- Aços IF ao Nb:
 $\%Nb_{\min} = 7,75 \% C - 6,65 (\%N - Al_{\text{acid sol}}/1,93)$
- Aços IF ao Ti-Nb:
 $\%Nb_{\min} = 7,75 \% C; \%Ti_{\min} = 3,42 \% N + 1,5 \% S$

Caso necessário, é possível elevar a resistência mecânica dos aços IF com a adição de elementos de liga como P, Si e

Mn, que atuam por meio de endurecimento por solução sólida. Muitas vezes também se incorpora B à liga para evitar a chamada fragilização por trabalho a frio, que decorre do enfraquecimento dos contornos de grão em função dos baixos teores de C inerentes a esse material. Essa adição torna-se imprescindível nos aços IF refosforados, pois o P contribui para aumentar a fragilidade dos contornos de grão⁽⁵⁾.

Também é possível aumentar a resistência mecânica dos aços IF pela incorporação de quantidades de Nb e Ti superiores aos teores mínimos necessários para combinar com o C e N solúveis do aço. Dessa forma a liga é reforçada pelos elementos de microliga de forma análoga à que ocorre com

LINHA DE ALIMENTAÇÃO PARA PRENSAS



Desbobinadores



Endireitadores de Chapa



Alimentadores Eletrônicos



Endireitadores-Alimentadores Eletrônicos Conjugados



Empresa certificada ISO 9001:2008



REG Nº 416217 QM



Prensas Excêntricas Rápidas Tipo "H" e "C"



Linhas de Corte Transversal e Empilhamento de Chapas

- Desbobinadores Duplos
- Alimentadores Mecânicos
- Alimentadores Pneumáticos
- Lubrificadores de Chapas
- Monitores para Proteção de Ferramentas

Setrema®

Ferramentas progressivas para estampagem e empacotamento de lâminas "STACKS" para motores elétricos.



Com precisão e qualidade, a Giacomini produz ferramentas de corte, dobra, repuxo, progressiva e moldes de injeção e sopro, conforme especificações solicitadas pelo cliente.

A qualidade dos produtos produzidos pela Giacomini é garantida pelo Sistema de Gestão da Qualidade, conforme norma ISO 9001/2000



Giacomini Indústria e Comércio Ltda.

Av. Portugal, 956 (Via Expressa)
CEP 86046-010
Londrina - Paraná

FONE/FAX: (43) 3341-6315

giacomini@giacomini.ind.br
www.giacomini.ind.br

Materiais

os aços ARBL com baixo C laminados a frio, ou seja, por meio de refino de grão, precipitação e solução sólida. Neste caso é possível dispensar a adição de Si ao aço, o que deteriora a estampabilidade e afeta a qualidade superficial do material devido à formação de carepa aderente durante a laminação a quente. Um exemplo de aço IF com alta resistência mecânica apresenta a seguinte composição química: 0,005% C, 0,62% Mn, 0,040% P, 0,068% Nb e 0,0032% N. Suas propriedades mecânicas após laminação a quente e recozimento contínuo são: limite de escoamento de 290 MPa, limite de resistência de 446 MPa, alongamento total de 37% e coeficiente de anisotropia médio r igual a 1,9⁽⁹⁾.

Aço isotrópico

Chapas finas laminadas a frio de aços com maiores níveis de resistência mecânica tendem a apresentar graus mais acentuados de anisotropia – ou seja, sua ductilidade é maior em determinadas direções da chapa. Isso leva a consequências práticas importantes; por exemplo, na estampagem de uma peça com simetria axial – um copo – a partir de um blanque circular de aço convencional com alta resistência mecânica: a figura 7 deixa claro que esse copo apresentará diferentes alturas ao longo de sua circunferência, apesar de a tensão aplicada durante a conformação ter sido uniforme em todos os pontos do blanque. A diferença entre a altura máxima e mínima observadas no copo estampado é o chamado "orelhamento" da chapa. Obviamente, a

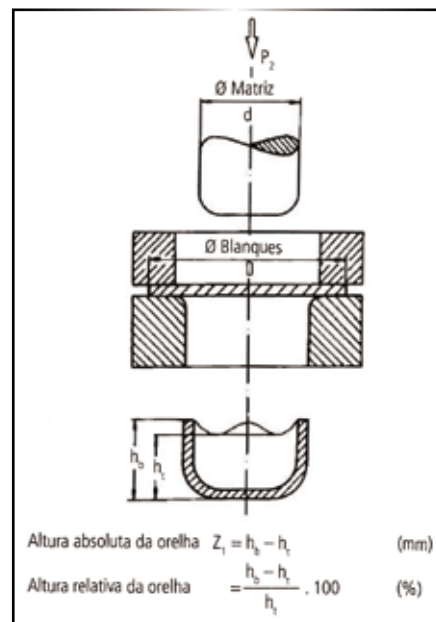


Fig. 7 – Definição de altura do orelhamento para chapas estampáveis⁽¹⁰⁾

essas diferenças de comprimento correspondem alterações de espessura através do copo. Elas seriam nulas caso o material fosse perfeitamente isotrópico⁽¹⁰⁾.

Investigações sobre esse problema revelaram os diversos parâmetros de processo que favorecem a obtenção de chapas finas a frio com ductilidade constante ao longo dos ângulos em relação à direção de laminação. Com essas características, o material pode ser estampado sem a ocorrência de orelhamento.

Chamado de aço isotrópico, esse material pode ser obtido para combinações bastante específicas em termos de:

- Temperaturas de acabamento na laminação de tiras a quente e graus de deformação no laminador de tiras a frio;
- Graus de deformação a frio e temperatura de recristalização ferrítica (recozimento);
- Aplicação de tratamento térmico de normalização.

Materiais

Contudo, essas combinações geralmente são inviáveis do ponto de vista industrial. Por outro lado, verificou-se que microadições de Ti permitem alcançar altos graus de isotropia nas chapas finas laminadas a frio cujo material de partida tenha sido submetido a baixas temperaturas de acabamento e bobinamento no laminador de tiras a quente (respectivamente, 880°C e 500°C), graus totais de deformação a frio entre 50 e 80% e recozimento em caixa. A figura 8 mostra que há uma relação entre a deformação aplicada no laminador de tiras a frio e o teor de Ti do aço no desenvolvimento do comportamento isotrópico⁽¹⁰⁾. Sob tais condições, o aço desenvolve uma textura cristalográfica específica após a recristalização da ferrita, o que lhe garante alto grau de isotropia – ou seja, alto grau de uniformidade nas propriedades mecânicas independentemente da direção considerada na chapa⁽¹⁰⁾.

Neste caso, também é necessário manter a relação Ti/N dentro

de valores restritos. Por um lado, é necessário que essa relação seja superior a 3,4 para garantir que todo o N solúvel se combine com o Ti durante a solidificação do aço, evitando a precipitação de AlN nos contornos de grão durante a recristalização, o que levaria a altos graus de anisotropia na chapa. Por outro lado, uma relação Ti/N muito alta leva à precipitação de partículas coerentes de TiC que retardam a recristalização da ferrita e levam à formação de uma textura cristalográfica no material que igualmente promove anisotropia. Logo, para compensar o retardamento na ci-

nética de recristalização decorrente da precipitação do TiC é necessário aumentar o potencial termodinâmico da recristalização – ou seja, elevar o grau de encruamento ou de deformação aplicada durante a laminação a frio do material. Conforme mostra a figura 9 (pág. 44), o ideal é que a relação Ti/N se mantenha em torno de 5,0⁽¹⁰⁾.

Aços isotrópicos típicos, como os produzidos pela siderúrgica austríaca Voestalpine, apresentam limite de escoamento variando entre 220 e 270 MPa, limite de resistência entre 300 e 380 MPa, alongamento total de 34%, coefi-

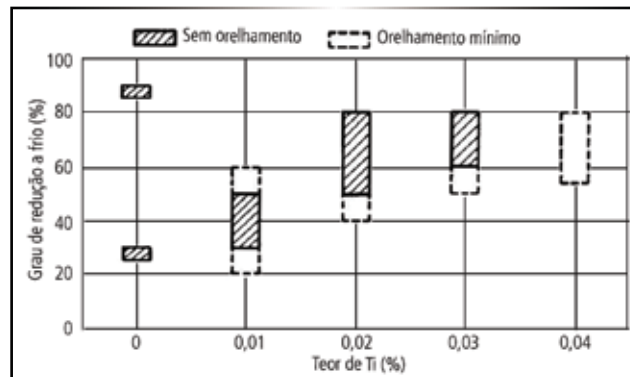


Fig. 8 – Relação entre o teor de Ti e o grau de deformação aplicado durante a laminação a frio para a obtenção de chapas finas a frio isotrópicas⁽¹⁰⁾

ESTRUTEZZA
Qualidade e Tecnologia no Desenvolvimento de Soluções

Corte a Laser

Tubos e Perfis

A Estrutezza apresenta à você uma grande oportunidade para a **redução de custo**, aumento de **produtividade** e **garantia de qualidade** no seu produto.



(19) 3589-3400

www.estrutezza.com.br
estrutezza@estrutezza.com.br



Lixadeira Angular para Tubos:
para executar “boca-de-bolo”
em tubos de até Ø 3”

Chanfradeira:
Construção robusta
chapas até 50mm

Calandra para chapas
totalmente hidráulica
3 e 4 rolos

Curvadora de tubos
para Ø16 até Ø130mm

Distribuidor exclusivo no Brasil !

BALTEC
Máquinas e Equipamentos

Fone: 11 2591-3881
vendas@baltecmaq.com.br
www.baltecmaq.com.br

Materiais

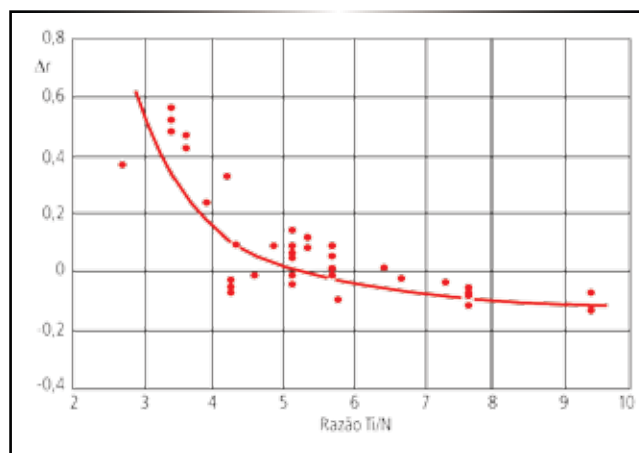


Fig. 9 – Influência da relação Ti/N na anisotropia planar. O valor ideal de Δr para o aço isotrópico é zero. Esses resultados foram determinados para um grau total de deformação a frio entre 60 e 70% e temperatura de bobinamento de 500°C⁽¹⁰⁾.

ciente de encruamento n igual a 0,18, coeficiente de anisotropia r igual a 1,0 e coeficiente de anisotropia planar Δr igual a zero. Uma versão com maior resistência mecânica apresenta limite de escoamento entre 260 e 310 MPa, limite de resistência entre 320 e 400 MPa e alongamento total de 32%. Uma composição típica para o aço com limite de escoamento de 260 MPa é de 0,05% C, 0,19% Mn, 0,028% Al, 0,026% Ti e 0,0048% N.

Já foram desenvolvidos aços isotrópicos com características de *bake hardening*. Neste caso, é necessário aumentar o C até teores próximos de seu valor de solubilidade na ferrita, da ordem de 0,024%, durante o recozimento efetuado a 720°C. Conseguem-se assim as características de *bake hardenability* (aumento de 30 MPa no limite de escoamento após a secagem da pintura) e de isotropia ($\Delta r = \pm 0,15$) desejadas⁽⁷⁾. Há também outras abordagens, ainda não muito comuns, de aços isotrópicos envolvendo o uso de microadições de Nb e/ou B, além do Ti.

Conclusões

A evolução metalúrgica ocorrida no campo das chapas finas laminadas a frio com microestrutura ferrítica revela a aplicação de diversos conceitos metalúrgicos com o objetivo de melhorar sua adequação ao cliente. Nos aços refosforados optou-se pelo endurecimento por solução sólida com perda minimizada de conformabilidade, en-

Precisando reduzir custos de suas prensas?

Somente quem é especialista no assunto tem a **Solução**

Sistemas de Alimentadores Automáticos



Um investimento muito menor do que você imagina

TecnoPress
Automação Industrial
ALIMENTADORES PARA PRENSAS



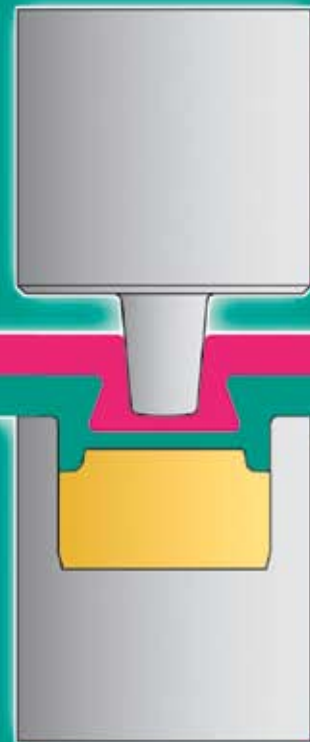
(11) 3646 0300 - tecnopress@tecnopress.com.br

www.tecnopress.com.br

quanto nos microligados a ênfase está declaradamente no aumento de resistência mecânica. Já nos aços com *bake hardening*, o endurecimento é conseguido após a estampagem da peça, durante a secagem da pintura que é normalmente aplicada a ela. Note-se que é um conceito muito inteligente, pois a chapa só endurece depois da etapa crítica de estampagem, garantindo a ductilidade do material e reduzindo as solicitações impostas ao ferramental e prensas. No caso dos aços IF, a prioridade é a conformabilidade a frio, já que a redução no teor de elementos intersticiais reduz sua resistência mecânica; contudo, é possível melhorar a resistência mecânica usando variantes refosforadas ou com características de *bake hardening*. Finalmente, a ênfase nos aços isotrópicos é garantir conformabilidade homogênea em todas as direções de deformação da chapa, podendo sua resistência mecânica ser aumentada também pelo efeito de *bake hardening*.

Referências

- 1) BLECK, W.; MÜSCHENBORN, W.; MEYER, L. Recrystallization and Mechanical Properties of Microalloyed Cold Rolled Steel. *Steel Research*, 59:8, ago. 1988, p. 344-351.
- 2) BLECK, W. Cold-Rolled, High Strength Sheet Steels for Auto Applications. *J.O.M.*, 48:7, jul. 1996, p. 26-30.
- 3) GORNI, A. A. Estudo Traça Relações entre Microestrutura e Propriedades Mecânicas em Aços Estruturais. *Corte e Conformação de Metais*, 3:35, mar. 2008, p. 100-110.
- 4) GORNI, A. A. Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas. *Corte e Conformação de Metais*, 4:44, dez. 2008, p. 26-57.
- 5) HOILE, S. Processing and Properties of Mild Interstitial Free Steels. *Materials Science and Technology*, out. 2000, p. 1079-1093.
- 6) IRIE, T.; SATOH, S.; HASHIGUCHI, K.; TAKAHASHI, I.; HASHIMOTO, O. Characteristics of Formable Cold Rolled High Strength Steels Sheets for Automotive Use. *Kawasaki Steel Technical Report*, 2, mar. 1981, p. 14-22.
- 7) PEREIRA, J. F. B.; ROCHA, R. O. Desenvolvimento de Aços Isotrópicos com Características de Bake Hardenability. In: 42º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. *Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*; Santos, out. 2005.
- 8) SATOH, S.; OKADA, S.; KATO, T.; HASHIMOTO, O.; HANAZAWA, T.; TSUNEKAWA, H. Development of Bake-Hardening High-Strength Cold-Rolled Sheet Steels for Automobile Exposed Panels. *Kawasaki Steel Technical Report*, 27, nov. 1992, p. 31-38.
- 9) TANAKA, Y.; URABE, T.; NAGATAKI, Y. A New Type of High Strength Steel for Exposed Panels – High Strength Steel with Excellent Formability, Superior Surface Precision after Press Forming, and Uniform Surface Appearance. *JFE Technical Report*, 4, nov. 2004, p. 17-24.
- 10) ZIMNIK, W.; FREIER, K.; HUSSY, S.; BUNGE, H. J. Factors Influencing Planar Anisotropy of Batch-Annealed Cold Strip. *Steel Research*, 64:8-9, ago.-set.1993, p. 420-424.



UNIÃO DE CHAPAS A FRIO

Tecnologia de união de chapas

- Mais econômico que o ponto de solda tradicional

- Diversas combinações de materiais possíveis

Qualidade comprovada

- Milhares de aplicações nas indústrias automobilísticas e de linha branca

- Presença mundial

TOX® PRESSOTECHNIK DO BRASIL

Comércio de Equipamentos Ltda.
Rua Bento Gonçalves, 74 - Galpão 1
Glória - Joinville - SC - 89216-110
Tel. (47) 3419-9000
E-Mail: tox@tox-br.com

www.tox-br.com