669.15 - 194.55/.57 - 413 : 669.147 : 629.113

A produção de chapas de aço bifásico

IBS

A necessidade da redução de peso dos veículos automotivos levou ao desenvolvimento de chapas de aço com maior resistência mecânica, particularmente os microligados, as quais frequentemente apresentam problemas na conformação de peças de formato complicado. Os aços bifásicos conseguem conciliar alta resistência mecânica com boa conformabilidade, graças à sua microestrutura peculiar.

* Antonio Augusto Gorni e Osvaldo L. G. Branchini

A grande elevação verificada nos preços internacionais do petróleo durante a década de setenta levou a indústria automobilística mundial a aperfeiçoar o projeto de seus veículos, no sentido de reduzir o consumo de combustível dos automóveis, tornando-os, assim, mais econômicos e também menos poluentes.

Uma das abordagens adotada para se aumentar o rendimento energético dos automóveis sem comprometer seu desempenho foi a redução de seu peso. E isto motivou a utilização de materiais novos e mais leves do que o aço para a construção de veículos. Materiais como os polímeros de engenharia e o alumínio, por exemplo, passaram a ser empregados. A utilização desses materiais tem sido crescente, a despeito de suas desvantagens, entre as quais estão a difícil reciclagem dos plásticos e o alto preço do alumínio.

Ao mesmo tempo, novos tipos de aço foram desenvolvidos em resposta ao desafio da economia de energia e aos novos materiais. Surgiu assim uma nova geração de aços com maior resistência mecânica, que permitem redução no tamanho dos componentes sem prejuízo de seu desempenho.

No caso específico das chapas de aço para veículos automotivos, foram desenvolvidos os aços microligados de grão fino (com pequenas adições de nióbio, vanádio ou titânio) e refosforados, os quais têm maior resistência mecânica e permitem reduzir a espessura da chapa sem afetar suas características mecânicas.

Por outro lado, devido à sua maior resistência mecânica, essas novas chapas não oferecem o mesmo grau de conformabilidade inerente às chapas de aço doce. Sua aplicação em peça de formato complexo fica, portanto, limitada.

A produção de chapas de aço de alta resistência e boa conformabilidade tornou-se possível a partir de meados da década passada. Isto foi conseguido com aços cuja microestrutura era constituída de matriz de ferrita poligonal com 15% a 20% de martensita, dispersa uniformemente na forma de ilhotas, como pode ser observado na figura 1. Essa microestrutura propicia um comportamento mecânico peculiar, cujas características principais são:

- ausência de ponto de escoamento,
- limite de escoamento a 0,2% entre 400 e 500 MPa,
- alta taxa de encruamento (n = 0,2 a 0,3),

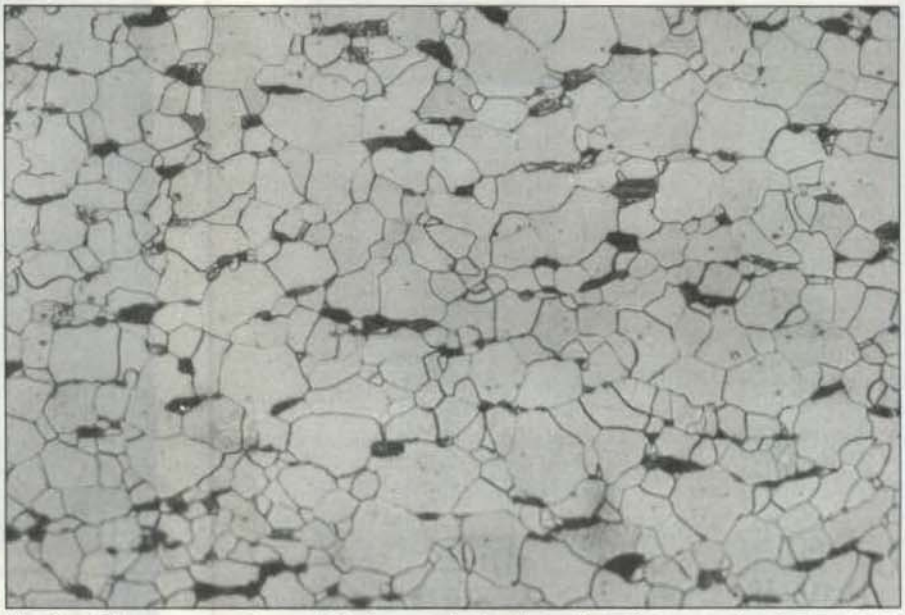

Fig. 1 — Microestrutura do aço bifásico: matriz ferrítica e ilhas de martensita. Ataque: Nital 5%. Aumento: 500 x

(*) Os autores são da Cosipa - Companhia Siderúrgica Paulista. Antonio Augusto Gorni é engenheiro de pesquisa no Núcleo de Pesquisas Tecnológicas e Osvaldo L. G. Branchini é engenheiro de desenvolvimento da Gerência de Laminação.

T00 16983

• limite de resistência entre 600 e 800 MPa,

• baixa relação limite de escoamento/limite de resistência (0,5 a 0,6),

• alongamento total igual ou superior a 25%.

Devido à sua microestrutura peculiar, esse aço foi denominado de bifásico *(dual phase)*.

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento havido nos últimos anos com os aços bifásicos quanto aos métodos de produção e suas propriedades, bem como sua aplicação em peças automotivas e os resultados obtidos.

ROTAS DE FABRICAÇÃO

Laminação de tiras a quente - Em princípio, é a espessura da chapa de aço bifásico que define sua rota de fabricação. Para espessuras entre 2,0 e 5,0 mm, as chapas podem ser produzidas diretamente da saída do laminador de tiras a quente. Nesse processo placas de aço com espessura entre 150 mm e 200 mm são aquecidas a 1250°C e laminadas a quente, até a espessura desejada, produzindo-se uma tira que, a seguir, é resfriada rapidamente através de jatos de água (50-60°C/s) até uma temperatura entre 200°C e 600°C, que é função da composição química do aço. A seguir a tira é bobinada e resfriada lentamente ao ar (aproximadamente 30°C/h).

Já em 1977, as empresas Climax Molybdenum e a DOFASCO desenvolveram conjuntamente o primeiro aço bifásico, obtido diretamente de um laminador de tiras a quente. Sua composição química era: 0,065% C, 1,20% Mn, 0,90% Si, 0,40% Mo e 0,60% Cr. O baixo teor de C, o alto teor de Si e a deformação a quente aceleram a reação ferrítica, permitindo a obtenção de 80% de ferrita no final do resfriamento acelerado. O Mn, o Cr e o Mo evitam a formação de perlita, aumentando a estabilidade da austenita na faixa de temperatura em que ocorre o bobinamento, ou seja, entre 510°C e 620°C, garantindo a presença de ilhas de austenita metaestável que se transformarão em martensita durante o resfriamento lento da bobina, graças à temperabilidade proporcionada por esses elementos. A figura 2 mostra o diagrama TRC típico desse material, juntamente com a evolução da temperatura da tira após sair do laminador de tiras a quente.

Esse tipo de liga pertence à primeira geração dos aços bifásicos laminados a quente. O seu teor de elementos de liga é bem maior que o utilizado em chapas de aço convencionais. No entanto, ele é necessário para se garantir a formação da martensita durante o resfriamento lento da bobina a partir de uma temperatura de bobinamento relativamente alta. Tal limitação decorria da baixa potência das bobinadoras dos laminadores de tiras a quente norte-americanos, onde esse aço era produzido.

Pesquisas posteriores procuraram reduzir o teor dos elementos de liga, particularmente do Mo, que é caro e de disponibilidade restrita. Por isso, tornou-se necessário controlar mais rigidamente o resfriamento acelerado, minimizando as flutuações operacionais e reduzindo a temperatura de bobinamento para 400-500°C.

Isso requer maior sofisticação na instrumentação e controle da mesa de resfriamento, bem como bobinadoras mais potentes. Surgiu assim a segunda geração dos aços bifásicos laminados a quente, desenvolvida pela empresa italiana Finsider. Uma composição química típica dessa série é: 0,04% C, 1,55% Mn, 1,00% Si e 1,00% Cr.

Podem-se utilizar ligas ainda mais simples, desde que se aplique resfriamento escalonado na tira, ou seja:

• resfriamento rápido até cerca de 750°C, onde a reação ferrítica alcança velocidade máxima,

• resfriamento ao ar até que se forme 80% de ferrita,

• têmpera até 200°C, levemente abaixo do ponto Ms, onde se inicia a formação de martensita.

Apesar de simples, esse processo exige uma mesa de saída capaz de aplicar consistentemente um ciclo de resfriamento complexo e bobinadoras de alta potência. Surgiu assim a terceira geração dos aços bifásicos laminados a quente, dessa vez desenvolvida pela empresa japonesa Sumitomo. Uma composição química típica dessa família é: 0,06% C, 0,15% Si e 1,50% Mn.

A evolução do processo de laminação de tiras a quente dos aços bifásicos é um bom exemplo de como se podem melhorar as características de um produto e reduzir seu custo através da utilização de água como "elemento de liga".

Recozimento intercrítico - Outra possibilidade de se produzir chapas de aço bifásico com 2,0 a 5,0 mm de espessura está no recozimento posterior da tira a quente numa linha adaptada de galvanização. A temperatura utilizada nesse processo é função da composição química do aço e deve estar dentro da região intercrítica do diagrama de equilíbrio Fe-C, ou seja, na região de coexistência de ferrita e austenita, entre 700°C e 835°C. Ela deve ser escolhida de forma que se tenha de 15% a 20% de austenita na microestrutura durante o recozimento, a qual se enriquecerá de C durante o tratamento, adquirindo, assim, temperabilidade suficiente para que se transforme em martensita durante o resfriamento acelerado posterior.

A vantagem desta alternativa, em relação à produção saída diretamente do laminador de tiras a quente, está no fato de permitir a utilização de ligas com menores teores ▷

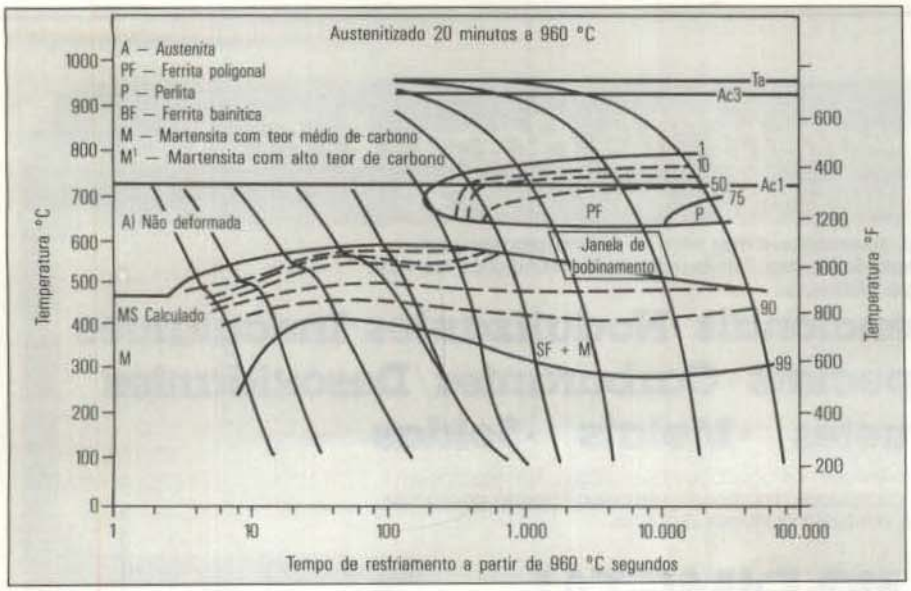

Fig. 2 — Diagrama TRC para aço bifásico com 0,065% C; 1,20% Mn; 0,87% Si; 0,38% Mo; 0,61% Cr

de elementos de liga, como, por exemplo: 0,12% C, 1,60% Mn, 0,60% Si. Esse tratamento, no entanto, implica um custo adicional ao produto.

De forma geral, os elementos de liga mais empregados nesta abordagem são o Mn, o Cr, o V e, particularmente, Mo, para retardar a formação de perlita.

A velocidade de resfriamento requerida ao final do recozimento, para que ocorra a transformação da austenita remanescente em martensita, deve obedecer à seguinte relação:

$$2{,}5 > \log(\text{velocidade de resfriamento}) > -1{,}5\ MN_{eq} + 2{,}8$$

onde:

$$Mn_{eq} = Mn + 124\ B + 3\ Mo + 1{,}5\ Cr + 0{,}333\ (Ni + Si) + 0{,}5\ Cu$$

Chapas de aço com espessura menor que 2,0 mm têm que ser, obrigatoriamente, laminadas a frio para que possam atingir essa espessura. Logo, a única forma de se produzir microestrutura bifásica nessas condições é através do recozimento intercrítico, após a laminação a frio. Ele pode ser feito em fornos contínuos ou então bobinando-se as tiras após a laminação a frio e promovendo o seu recozimento em caixa.

O recozimento em caixa de tiras de aço bifásico na forma de bobinas é um processo longo, com duração aproximada de 30 horas, onde as bobinas são aquecidas a 710°C, com velocidade de aquecimento de 40°C/h, encharcadas durante quatro horas e posteriormente resfriadas a cerca de 80°C/h. Isso exi-

Tab. 1 — Propriedades de chapas de aço bifásico produzidas diretamente da laminação de tiras a quente

Produtor	Composição química (% peso)	L.E. MPa	L.R. MPa	Alongam. %	r	n
Dofasco 1ª Ger. 2,8 Canadá	C = 0,06 Mn = Si = 1,35 Cr = Mo = 0,40	385	695	26	0,70	0,31
Finsider 1ª Ger. 2,5 — 3,5 mm Itália	C = 0,06 Mn = 1,00 Si = 0,90 Cr = 0,50 Mo = 0,35	425	585	34	0,80	0,20
Kawasaki 2ª Ger. 2,5 mm Japão	C = 0,17 Mn = 1,40 Si = Cr = 1,00	370	655	32	0,80	0,20
Thyssen 2ª Ger. 2,5 — 5,0 mm RFA	C = 0,15 Mn = 0,50 Si = Cr = 1,00	340	550	21	—	—
Nippon KK 3ª Ger. 2,0 — 3,0 mm Japão	C = 0,05 Mn = 1,35 Si = 0,68	385	610	31	—	—
Sumitomo 3ª Ger. 2,5 mm Japão	C = 0,06 Mn = 1,51 Si = 0,13	365	562	34	—	—

Tab. 2 — Propriedades de chapas de aço bifásico produzidas por recozimento contínuo

Produtor	Composição química (% peso)	L.E. MPa	L.R. MPa	Alongam. %	r	n
LTV Steel Rec. Galv. 1 a 13 mm EUA	C - 0,15 Mn - 1,60 Si - 0,60	310	518	32	—	—
Sumitomo Rec. caixa 0,7 mm Japão	C - 0,05 Mn - 2,40 Si - 0,11	237	438	35	1,31	0,23
Nippon St C.A.P.L. 0,8 mm Japão	C - 0,10 Mn - 1,30 Si - 1,15 Cr - 0,35	330	510	34	1,14	—
Nippon KK C.A.L. 0,8 mm Japão	C - 0,06 Mn - 0,50 Si - 0,50	275	535	26	1,15	0,16

ge que os aços com microestrutura bifásica produzidos por essa rota tenham um teor de elementos de liga muito alto — 0,05% C, 0,10% Si e 2,45% Mn — para que os 20% de austenita presentes durante o recozimento adquiram temperabilidade suficiente através da concentração de C e Mn que lá ocorre durante o longo tratamento. Esse processo não foi amplamente aceito, devido a problemas como as condições de recozimento não homogêneas e a difícil soldabilidade das chapas assim produzidas, pelo alto teor de Mn.

Assim, o recozimento contínuo tornou-se o processo consagrado para a produção de chapas finas de aço bifásico. Foram desenvolvidos diversos equipamentos desse tipo no Japão, os quais diferem entre si quanto às velocidades de resfriamento que são capazes de aplicar à tira. São utilizados como meio de resfriamento o gás (15°C/s, fornos CAPL, KM-CAL), uma mistura de água e ar (100°C/s, forno CAPL-ACC), a água (1 000°C/s, forno CAL) e água fervente (forno HO-

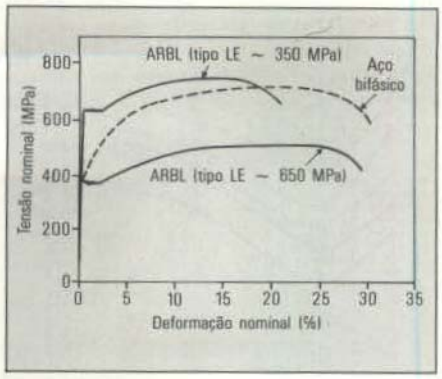

Fig. 3 — Curvas tensão-deformação convencionais de um aço bifásico e dois aços microligados (ARBL)

WAQ). Nesse equipamento o aquecimento e encharque são muito rápidos, da ordem de minutos. Isso, aliado à alta velocidade de resfriamento, assegura alta produtividade.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

As tabelas 1 e 2 mostram as propriedades mecânicas de diversos tipos de chapas de aço bifásico produzidas por vários processos de fabricação. Em todos os casos verificam-se características peculiares aos aços bifásicos, como a ausência de ponto de escoamento, baixa relação entre o limite de escoamento e o de resistência (0,45 - 0,65), alto coeficiente de encruamento (aproximadamente 0,30) e maior relação alongamento uniforme/total em relação aos aços microligados. Essas características podem ser visualizadas através da curva tensão-deformação genérica obtida a partir do ensaio de tração, mostrado na figura 3. Elas são fruto da microestrutura peculiar do aço bifásico: 80% de ferrita e 20% de martensita.

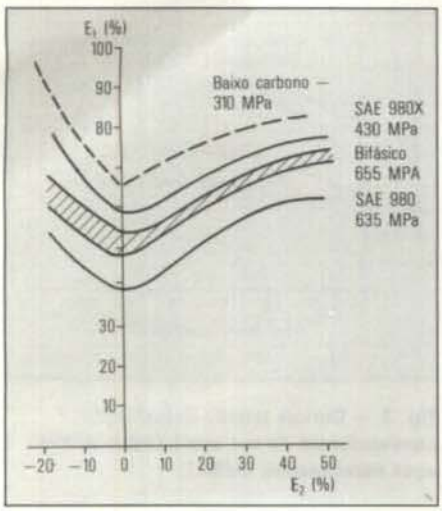

Fig. 4 — Curvas limites de conformação para aço bifásico (com 655 MPa de limite de resistência) comparado com aços SAE 950X, SAE 980X e de baixo carbono

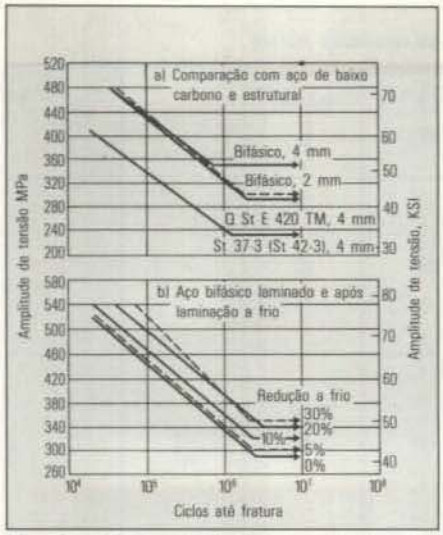

Fig. 5 — Comparação das propriedades de fadiga entre aços convencionais e bifásicos

A ausência de ponto de escoamento pode ser atribuída à deformação introduzida na matriz devido à expansão volumétrica que ocorre durante a reação austenita → martensita. Tal expansão leva à formação de discordâncias livres e tensões internas no material, as quais favorecem o processo de escoamento.

O alto coeficiente de encruamento "n" é explicado pela interação das discordâncias móveis da matriz ferrítica com a "floresta" com alta densidade de discordâncias que se forma na matriz deformada plasticamente em torno das partículas duras de martensita. Logo, quanto maior for a fração em volume e menor o diâmetro das ilhotas de martensita, maior será o coeficiente de encruamento "n". Isso torna mais uniforme a distribuição da deformação sobre a microestrutura durante a conformação da peça, o que leva a um maior alongamento uniforme. Em termos práticos, isso corresponde a um aumento na conformabilidade do material, facilitando a estampagem de peças com formato complexo. Além disso, o baixo limite de escoamento desse material evita a ocorrência do chamado efeito mola *(spring-back)* durante a estampagem da chapa, uma vez que o aumento de sua resistência mecânica se dará nos últimos estágios da conformação.

A melhor conformabilidade das chapas de aço bifásico pode ser comprovada através da comparação das curvas limites de conformação da figura 4. Observa-se que o aço bifásico apresenta melhor resultado, considerando-se sua maior resistência mecânica. Em termos de conformabilidade o aço bifásico com resistência mecânica de 655 MPa possui conformabilidade intermediária aos aços de alta resistência com 430 e 635 MPa.

O alto coeficiente de encruamento "n" também aumenta a resistência à fadiga, não só devido à melhor distribuição da deformação durante a conformação, como também devido ao grande aumento da resistência mecânica que ocorre na chapa durante sua conformação. Isso pode ser visto na figura 5, onde se verifica que quanto maior for o grau de deformação a frio, maior será a resistência à fadiga.

APLICAÇÕES

A substituição de chapas de aço doce por bifásico é justificada pela possibilidade de uma redução de 15% a 20% na espessura da peça em função da maior resistência mecânica desse último material. De fato, chapas de aço bifásico têm um grande potencial de aplicação em autopeças, como se pode observar na figura 6.

Diversos fatores determinam a viabilidade da aplicação de aços bifásicos em componentes automotivos. A redução na espessura das peças permite diminuir o peso dos veículos, mas pode levar à distorção elástica excessiva em pára-choques ou a fenômenos de ressonância acústica em peças estruturais, o que exige otimização no projeto do componente.

Em termos de segurança, o uso de aço com maior resistência mecânica em componentes estruturais é recomendável para se aumentar a segurança do veículo em caso de colisão.

A aplicação do aço bifásico leva à minimização de custos através da redução da espessura da chapa que dará origem à peça e da eliminação de estágios de deformação redundantes durante a conformação. E este último aspecto, infelizmente, não é normalmente avaliado em caráter experimental, devido ao custo probitivo de confecção das matrizes de estampagem.

O custo do material em si é um fator crítico nas chapas de aço bifásico laminado a quente, devido ao teor de elementos de liga característico desse aço, o qual pode ser minimizado através da alteração nos processos de laminação, como já foi visto anteriormente. No caso de aços bifásicos laminados a frio, o processo de recozimento intercrítico contínuo é mais econômico do que o recozimento subcrítico em caixa, normalmente efetuado para os aços convencionais, o que vem estimulando a utilização de chapas finas de aço bifásico.

A soldabilidade dos aços bifásicos é perfeitamente viável, mas torna-se necessária a adoção de parâmetros especiais, de acordo com sua composição química.

A aplicação de aços bifásicos laminados a quente em rodas automo-

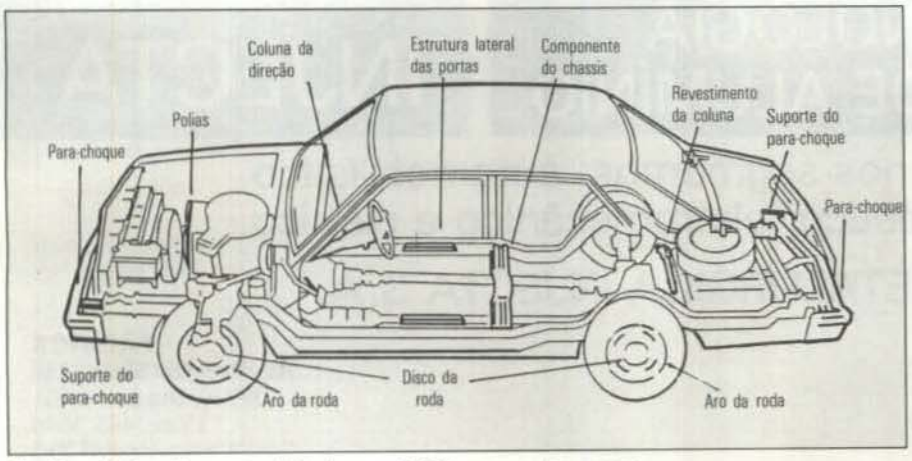

Fig. 6 — Aplicações potenciais do aço bifásico em auto-peças

tivas tem sido exaustivamente estudada, pois a economia de peso nas cinco rodas fornecidas com o veículo é considerável. Além disso, rodas com menor peso permitem redimensionamento na suspensão, no chassi, etc., levando a uma redução de peso adicional. Os resultados mostraram-se favoráveis desde que se limite a porcentagem máxima de martensita a 20% e se evite a formação de microestrutura bandeada, o que estimula ainda mais a economia de elementos de liga. Ensaios de fadiga efetuados em rodas feitas com aço bifásico apresentaram bons resultados devido à alta resistência mecânica do material.

CONCLUSÕES

A necessidade de redução no peso dos veículos automotivos e a crescente competição entre materiais alternativos tem levado ao desenvolvimento de novos tipos de chapas de aço com maior resistência mecânica, as quais, no entanto, apresentam menor conformabilidade do que os aços convencionais. Aços com microestrutura bifásica — 80% de ferrita poligonal e 20% de martensita dispersa na forma de ilhotas — permitem conciliar alta resistência mecânica com maior conformabilidade.

Em função da espessura, chapas desse novo tipo de aço podem ser produzidas através de diferentes processos de laminação e tratamento térmico. Tais processos foram aperfeiçoados nos últimos quinze anos no sentido de se minimizar o custo do produto e garantir uma produção consistente.

A maior resistência mecânica dos aços bifásicos tem permitido o redimensionamento de diversos componentes automotivos, tais como rodas, pára-choques e componentes estruturais, os quais tiveram sua espessura reduzida, contribuindo para a redução do peso do veículo. No entanto, diversos fatores têm de ser considerados para que as vantagens dessa substituição sejam plenamente aproveitadas.

BIBLIOGRAFIA

Anon — Iron and Steel International, april 1981, 89-99.

Brueckner, F. G. e outros — Bollettino Tecnico Finsider, genaio-aprile 1982, 50-54.

Coldren, A. P. e outros — Climax Molybdenum Company, Report L-176-181, 1978.

Cornford, A. E. e outros — SAE Technical Paper 79007, 1979.

Vito, A. e outros — La Metalurgia Italiana, 1987, 303-310.

Drewes, E. J. e outros — In: Alloys for the Eighties. Climax Molybdenum Company, Ann Arbor, 1980, 37-57.

Furukawa, T. e outros — Transactions of the ISIJ, 1984, 113-121.

Goldman, T. In: Advances in the physical metallurgy and applications of steels. The Metals Society, 1983, 65-72.

Guimarães, J. R. C. e outros — Metalurgia ABM, 1981, 617-622.

Hansen, S. S. Journal of Applied Metalworking, january 1982, 107-118.

Hayami, J. e outros — In: Microalloying'75, Union Carbide Corp., New York, 1978, 311-321.

Kaspar, R. e outros — Zeitung fuer Metallkunde, mai 1985, 348-352.

Kato, T. e outros — In: Fundamentals of dual phase steels. AIME, Warrendale, 1981, 199-220.

Kunishige, K. e outros — The Sumitomo Search, november 1985, 53-63.

Lang, C. e outros — Thyssen Technische Berichte, 2/1988, 389-397.

Maid, O. e outros — Stahl und Eisen, 18 april 1988, 365-370.

Okamoto, A. e outros — In: Fundamentals of dual phase steels, AIME, Warrendale, 1981, 427-446.

Okita, T. e outros — Nippon Kokan Technical Report, april 1985, 25-32.

Rashid, M. S. e outros — In: Formability topics - Metallic materials, ASTM, New York, 1978, 174-190.

Simon, A. e outros — Revue de Metallurgie-CIT, Juillet 1984, 593-606.

Takahashi, I. e outros — Kawasaki Steel Technical Report, March 1981, 23-30.

Takechi, H. e outros — Nippon Steel Technical Report, july 1986, 1-7.

Vlad, C. M. Stahl und Eisen, 1 november 1982, 1101-1106.

Waddington, E. e outros — Journal of Applied Metalworking, april 1980, 35-47. □