

# PEÇAS DE GRANDES DIMENSÕES

**ATUALMENTE É POSSÍVEL PRODUIR UMA BAINITA MUITO RESISTENTE E QUE PODE SER FACILMENTE PROCESSADA EM PEÇAS DE GRANDES DIMENSÕES**

**Harry K. D. H. Bhadeshia**  
 Professor of Physical Metallurgy  
 Department of Materials  
 Science and Metallurgy  
 University of Cambridge UK  
 hkdb@cus.cam.ac.uk

**ABSTRACT** *Steel with an ultimate tensile strength of 2500 MPa, a hardness at 600-670 HV and toughness in excess of 30-40 MPa m<sup>1/2</sup> is the result of exciting new developments with bainite. The simple process route avoids rapid cooling so that residual stresses are avoided even in large pieces.*

Resistência é um termo que tem sido usado e abusado em ciência dos materiais. É comum afirmar que um novo material é tão resistente quanto o aço, sem especificar a natureza do aço em relação ao qual a comparação é feita. Algumas afirmações decorrem do desconhecimento de que é possível produzir comercialmente ferro policristalino com uma resistência tão baixa quanto 50 MPa ou tão alta quanto 5,5 GPa. Num contexto acadêmico foram produzidos monocristais de ferro que se comportam elasticamente até uma tensão de 14 GPa, levando-os a uma faixa de deformação recuperável em que a lei de Hooke não se aplica.

Aços com resistência na faixa de giga-pascal têm sua resistência baseada em microestruturas martensíticas ou em perlita contendo lamelas de cementita finamente espaçadas. Essas microestruturas podem ainda ser deformadas para aumentar a resistência. Este artigo descreve uma microestrutura que não é nem martensita nem perlita, não contém carbonetos, é extremamente resistente no estado não-deformado, além de ter baixo custo, não requerer processamento termomecânico e poder ser produzida em grandes amostras. Antes de revelar seus mistérios, é oportuno colocar em contexto os aços martensíticos e perlíticos de alta resistência.

O crescimento da martensita ocorre sem difusão, logo a mudança na rede durante a transformação da austenita é obtida pela deformação da fase matriz. Os deslocamentos atômicos associados com a transformação são consideráveis, com uma componente de cisalhamento

próxima a 0,25. Para acomodar a deformação causada pela transformação, a martensita cresce na forma de finas placas, que minimizam a energia de deformação. Como a distância livre média de escorregamento em uma placa é cerca de duas vezes a espessura da placa, o tamanho de grão efetivo associado com uma microestrutura martensítica é menor que 0,5 µm.

Todo o esforço da indústria siderúrgica para produzir um tamanho de grão ferrítico nesta faixa não se compara à facilidade com que a martensita alcança esta estrutura. Certamente existem outros mecanismos de endurecimento associados com a martensita, mas o refinamento do tamanho de grão é único, no sentido de que também resulta num aumento da tenacidade.

A martensita é produzida em aços comerciais por um resfriamento relativamente rápido. Isso limita o tamanho das peças que podem ser temperadas para produzir uma microestrutura uniforme de martensita, um fato implícito no conceito de temperabilidade. O aumento da temperabilidade requer a adição de elementos de liga caros. Por outro lado, o resfriamento rápido também significa que tensões residuais indesejáveis são frequentemente induzidas em partes críticas e têm de ser consideradas na avaliação da vida dos componentes.

Uma colônia de perlita se forma pelo crescimento simultâneo de ferrita e cementita em forma lamelar numa frente comum com a austenita. Há um custo energético associado com as interfaces cementita/ferrita existentes na perlita: microestruturas mais finas são, portanto, obtidas promovendo-se a transformação em condições de maior sub-resfriamento. Por si só, isso não é suficiente para produzir aços resistentes, de modo que fios perlíticos são deformados por trefilação até alcançar resistência na faixa de 2-2,5 GPa. Tanto o sub-resfriamento quanto a deformação limitam a seção reta do fio produzido. O produto Scifer da Kobe Steel, com uma resistência de

5,5 GPa só pode ser produzido em fios cujos diâmetros são medidos em micrômetros.

Seria bastante interessante produzir um aço de alta resistência que pudesse ser usado na fabricação de peças grandes, sem requerer processamento mecânico ou resfriamento rápido para alcançar as propriedades desejadas. Perlita e martensita não se enquadram geralmente nesta categoria e a bainita comum não é suficientemente resistente, por conta do revenido que ocorre simultaneamente com a transformação.

### BAINITA EXTRAORDINÁRIA

Uma das características indesejáveis da bainita é a cementita, que no contexto dos aços de alta resistência ajudam a nuclear trincas e vazios. É de conhecimento geral, há muitos anos, que a cementita pode ser eliminada da microestrutura pela adição de cerca de 1,5% de silício. A microestrutura resultante consiste então numa mistura de apenas duas fases: ferrita bainítica e austenita retida enriquecida em carbono. A ausência de cementita, aliada a outros fatores aumenta a tenacidade. Desse modo, tem sido possível alcançar uma tenacidade acima de  $130 \text{ MPam}^{1/2}$  e um limite resistência de 1.600 MPa. Essa combinação de propriedades é comparável à de aços Maraging menos resistentes, a um preço cerca de noventa vezes menor (aços Maraging são ricos em níquel e molibdênio). Embora esses resultados sejam expressivos, uma resistência de 1.600 MPa ainda não é suficiente para o presente contexto.

Uma recente descoberta pode mudar radicalmente este cenário. Atualmente é possível produzir uma bainita muito resistente e que pode ser facilmente processada em peças de grandes dimensões.

Suponha que se tente calcular a temperatura mais baixa em que se pode induzir o crescimento de bainita. Existe hoje uma sólida teoria disponível para tratar este tipo de proposição. A **figura 1a** ilustra este cálculo para um aço, mostrando como as temperaturas de início de formação da bainita ( $B_S$ ) e início de formação da martensita ( $M_S$ ) variam em função da concentração de carbono.

Em princípio, não há um limite inferior para a temperatura na qual a bainita pode ser formada. Por outro lado, a velocidade de formação da bainita reduz-se drasticamente à medida que a temperatura de transformação diminui, como ilustrado na **figura 1b**. À temperatura ambiente, podem ser necessários centenas ou milhares de anos para produzir bainita. Em condições de interesse prático, um tempo de transformação de cerca de dez dias pode ser razoável. Mas por que se preocupar em produzir bainita a uma temperatura baixa?

É bem sabido que a escala da microestrutura, isto é, a espessura das placas de bainita, decresce à medida que a temperatura de transformação diminui. Isso ocorre porque o limite de escoamento da austenita torna-se maior a temperaturas mais baixas, afetando, portanto, a acomodação plástica da deformação que acompanha o crescimento da bainita, e presumivelmente porque a taxa de nucleação é mais rápida com maior sub-resfriamento.

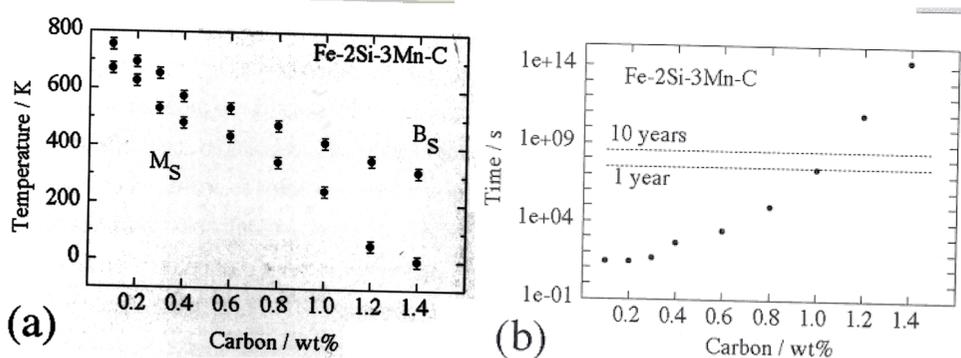
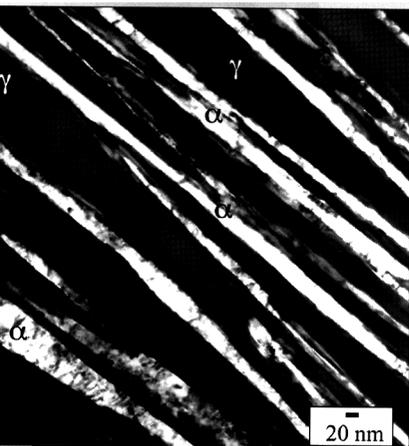
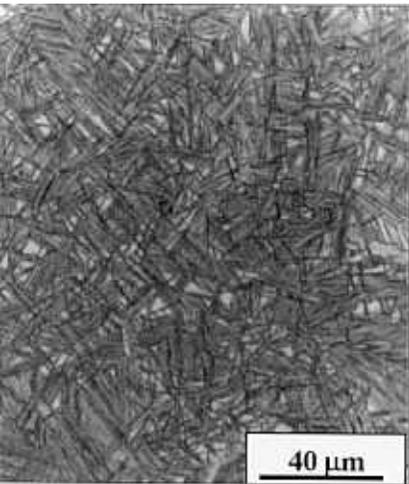


Figura 1

(a) Temperaturas de início de transformação (calculadas) para um aço Fe-2Si-3Mn em função da concentração de carbono.  
(b) Tempo necessário (calculado) para início da formação de bainita.

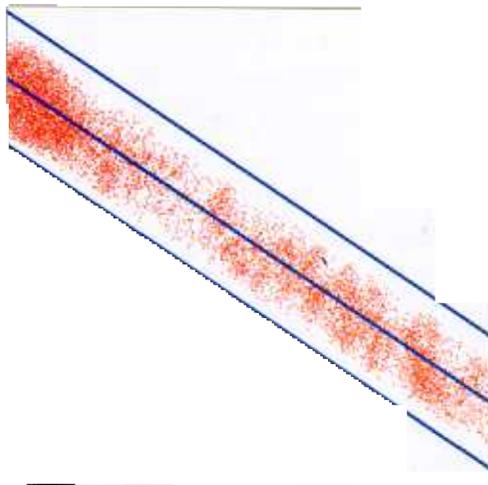


**Figura 2**  
Fe-0,98C-1,46Si-1,89Mn-0,26Mo-  
1,26Cr-0,09V %, transformado a  
200°C por 5 dias.  
(a) Micrografia Ótica



(b) Micrografia  
Eletrônica de  
Transmissão

A resistência da microestrutura aumenta com o inverso da espessura da placa, provendo uma ótima forma de se conseguir resistência sem comprometer tenacidade. Experimentos consistentes com os cálculos apresentados na figura 1 demonstraram que em um aço Fe-1,5Si-2Mn-1C%, a bainita pode ser produzida em uma temperatura tão baixa quanto 125° C, que é tão baixa que a distância de difusão de um átomo de ferro durante o tempo do experimento corresponde a inconcebíveis  $10^{-17}$  m. O que é ainda mais admirável é que as placas de bainita possuem apenas 20–40 nm de espessura. Essas finas placas de bainita ficam dispersas em uma austenita estabilizada pelo enriquecimento em carbono, a qual, com sua estrutura cúbica de face centrada, amortece a propagação de trincas. A microestrutura resultante, observada



**Figura 3**  
Elemento de volume tridimensional mostrando as posições dos átomos de carbono

por microscopias ótica e eletrônica de transmissão, é mostrada na **figura 2**; além da significância metalúrgica, por confirmar os cálculos teóricos, ela possui uma estética agradável, que é mantida em todos os níveis de resolução. A microestrutura foi caracterizada, tanto química quanto espacialmente, ao nível de resolução atômica, como ilustra a **figura 3**. Ela mostra um elemento de volume tridimensional indicando as posições de átomos de carbono. Cada ponto representa um átomo de carbono. As regiões ricas e pobres em carbono correspondem a austenita e

ferrita bainítica, respectivamente. Essa última fase possui uma concentração de carbono relativamente baixa, embora bem maior que a solubilidade de equilíbrio da ferrita. Voltando aos aspectos práticos, o que tem gerado grande interesse na indústria são as propriedades. Limites de resistência de 2.500 MPa em tração têm sido obtidos rotineiramente, com tenacidade acima de 30–40 MPa m<sup>1/2</sup>, em aços preparados por fusão ao ar, contendo, portanto, inclusões e poros. Todos usando um simples tratamento térmico, no qual uma grande peça de aço é removida do forno de austenitização (~ 950°C), transferida para um forno na temperatura de tratamento (por exemplo, 200 °C) e mantido nele por cerca de dez dias para gerar a microestrutura. Não há resfriamento rápido, de modo que as tensões residuais são evitadas e grandes peças podem ser produzidas.

O tamanho da amostra pode ser grande porque o tempo para atingir 200 °C a partir da temperatura de austenitização é muito menor do que aquele requerido para iniciar a formação de bainita. Esta é uma vantagem comercial significativa.

A reação inicial da indústria foi de que os tempos de transformação são muito longos. O que esta reação demonstra é que não foi dada a devida atenção ao fato de ser muito barato tratar termicamente peças em temperaturas normalmente usadas para assar pizzas, quando comparadas com os tratamentos térmicos comerciais comuns. Caso necessário, seria possível implantar-se uma linha de operação com fornos apropriados, de modo que a produção não seja limitada pelo tempo da transformação.

Supondo que haja realmente necessidade para um tratamento térmico mais rápido, a transformação pode ser acelerada para completar o processamento em horas (em vez de dias), pela adição controlada de pequenas quantidades de solutos ao aço, de modo a aumentar a variação de energia livre da transformação austenita/ferrita. Existem essencialmente duas opções: alumínio e cobalto, em concentrações menores que 2% podem acelerar a transformação na forma descrita. Ambos são efetivos, agindo isoladamente ou em conjunto.

A maior parte da resistência da microestrutura vem da espessura muito pequena das placas de bainita. Do total de 2.500 MPa, cerca de 1.600 MPa podem ser atribuídos à fina escala das placas. O restante decorre das florestas de discordâncias, da resistência mecânica da rede de ferro e da restrição ao movimento de discordâncias promovido pelos átomos de soluto. Esse último aspecto é muito interessante. Como há criação de muitos defeitos durante o crescimento da bainita, uma grande concentração de carbono permanece presa à ferrita bainítica. Usando técnicas com resolução atômica e de raios-X, esta concentração foi estimada em 0,3%, valor muitas ordens de grandeza maior que a solubilidade de equilíbrio do carbono em ferrita na temperatura de transformação. Adicionalmente, este carbono resiste à precipitação mesmo após um revenido prolongado, porque é mais favorável permanecer aprisionado em defeitos do que formar cementita.

Muito embora a ênfase deste artigo tenha sido dada à resistência do material, é oportuno registrar que a dureza da microestrutura é a maior já registrada para bainita, entre 600–670 HV. A dureza também é extremamente estável ao revenido em temperaturas tão altas quanto 500 °C por uma hora, apesar da decomposição da austenita retida de alto carbono em uma mistura de ferrita e cementita. Na verdade, a resistência ao revenido desta extraordinária bainita é um pouco melhor que aquela observada em aços comparáveis exibindo endurecimento secundário ou aços martensíticos com a mesma concentração de silício.

A **figura 4** compara a resistência ao revenido da liga acima mencionada com a de um aço martensítico Fe-0,5%C-1,3Si% temperado e revenido e um aço com endurecimento secundário (Fe-0,34C-5,08Cr-1,43Mo-0,92V-0,4Mn-1,07Si %). Para fins de comparação, a dureza em cada caso foi normalizada com relação à diferença entre os valores máximo e mínimo.

Esse comportamento nada usual é uma característica da resistência das finas placas de bainita ao coalescimento. De fato, a intensa precipitação de cementita nos contornos da placa, quando a austenita se decompõe, é um fator adicional que se contrapõe ao coalescimento das placas.

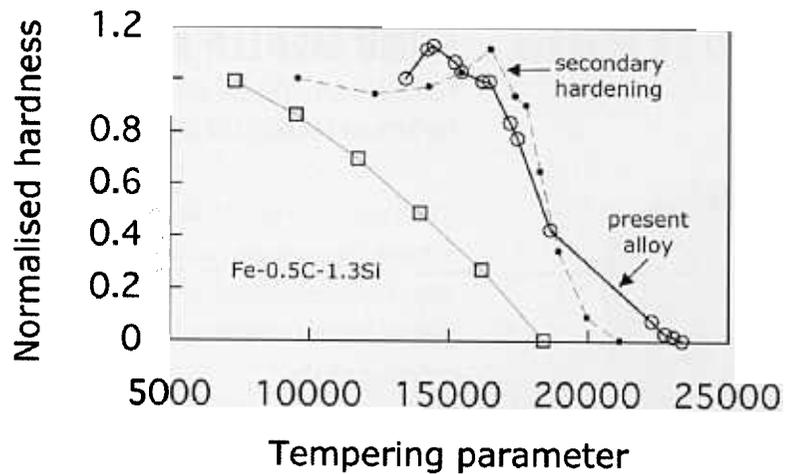


Figura 4

Comparação de resistência ao revenido

## CONCLUSÕES

Muitos adjetivos têm sido usados para se referir à microestrutura bainítica descrita acima:

Bainita Fria (*Cold-bainite*) por causa da baixa temperatura em que ela cresce;

Bainita Dura (*Hard-bainite*) porque a dureza da microestrutura (600-650 HV) quase alcança aquela das mais duras martensitas não-revenidas;

Bainita Resistente (*Strong-bainite*) por conta do limite de resistência observado (limite de resistência à compressão acima de 4,5 GPa);

Bainita Rápida (*Fast-bainite*) para as variantes contendo alumínio e cobalto que se transformam mais rápido; Super Bainita (*Super-bainite*), um termo não-apropriado cunhado na indústria.

Como sempre, existem muitos parâmetros que necessitam ser caracterizados, como por exemplo as propriedades de fadiga e corrosão sob tensão. Apesar disso, já existem aplicações para as quais este material vem sendo testado, mas que ainda permanecem confidenciais.

*O autor agradece à Millenium Steel pela autorização para publicar este artigo.*

## REFERÊNCIAS

1. F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia, K. J. A. Mawella, D. G. Jones and P. Brown, *Materials Science and Technology*, 18, 2002, 279-284.
2. C. Garcia-Mateo, F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia, *Journal de Physique Colloque*, 112, 2003, 285-288.
3. C. Garcia-Mateo, F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia, *ISIJ International*, 43, 2003, 1238-1243.
4. C. Garcia-Mateo, F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia, *ISIJ International*, 43, 2003, 1821-1825.
5. M. Peet, C. Garcia-Mateo, F. G. Caballero and H. K. D. H. Bhadeshia, *Materials Science and Technology*, 2004, in press.
6. M. Peet, S. S. Babu, M. K. Miller and H. K. D. H. Bhadeshia, *Scripta Materialia*, 50, 2004, 1277-1281.