

572VOLUME 62NOV 2006

# METALURGIA & MATERIAIS 60 ANOS



**Salto da construção metálica**  
Reação do setor imobiliário estimula  
consumo de ferrosos e não-ferrosos

## Fundição

Novas tecnologias permitem  
a criação de produtos nobres

## Satisfação do cliente

Pesquisa de opinião confirma  
excelência dos serviços da ABM

[www.abmbrasil.com.br](http://www.abmbrasil.com.br)



ABM

Todos esses tópicos têm sido investigados no projeto "Novas ligas estruturais para a indústria automobilística". Por questões de espaço, neste caderno, serão apresentados resultados das rotas "a" e "b".

Os resultados da rota "c", obtidos em parceria com a Usiminas, podem ser encontrados na referência [Rios, P. R.; Bott, I. S.; Santos D. B.; T. M. F. de Melo e J. L. Ferreira, EFFECT OF NB ON THE DYNAMIC STRAIN INDUCED AUSTENITE TO FERRITE TRANSFORMATION, *Materials Science and Technology*, 2006 (a ser publicado)].

A rota "d" é objeto de tese de mestrado que ora se inicia [Silva Filho, M. C., CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO PROCESSADO VIA ARB]. A estampagem e soldagem ainda estão em processo de investigação [Svoboda, H. G.; Surian, E. S.; Scotti, A.; Bott, I. S. ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE CHAPAS FINAS DE ACEROS MICROALEADOS DE GRANO FINO CON GMAW (CC), XXXII CONSOLDA, Congresso Nacional de Soldagem, Belo Horizonte, MG, 2 a 5 de outubro de 2006].

## Grãos ultrafinos por laminação a morno e recozimento intercrítico<sup>1</sup>

O refinamento da microestrutura é uma forma de aumentar a resistência e a tenacidade dos aços sem alterar a composição química

**ABSTRACT** Grain refinement of low carbon steel via the warm deformation of martensite during torsion testing was investigated. At the beginning of straining, laths with high dislocation density were observed. After large deformations, a ferrite matrix with grain size close to 1  $\mu\text{m}$  and dispersed cementite particles were attained.

Uma forma promissora para aumentar significativamente a resistência e a tenacidade dos aços sem alterar a composição química é o refinamento da microestrutura, se o tamanho médio dos grãos ferríticos de aços comuns puder ser reduzido a tamanhos próximos a 1  $\mu\text{m}$ . Tomando como exemplo um aço baixa liga com tamanho médio de grão próximo a 100  $\mu\text{m}$  e tensão de escoamento plástico de 300 MPa, com o refino de grão de 100 para 10  $\mu\text{m}$ , a tensão de escoamento tem um aumento de 120 MPa. Se a redução for de 10 para 1  $\mu\text{m}$ , o ganho de resistência seria de 370 MPa<sup>[1]</sup>.

É bem conhecido que microestruturas com granulação fina podem ser obtidas por meio da transformação de fase da austenita em martensita, em aços baixo

carbono baixa liga. Nesses aços, a micro-estrutura martensítica tem a forma de ripas e a subestrutura é formada com alta densidade de discordâncias arranjadas na forma de células.

A densidade de discordâncias é similar à encontrada em amostras submetidas a deformações severas, à temperatura ambiente<sup>[2,3]</sup>. Durante o reaquecimento dentro do domínio ferrítico, a estrutura martensítica transforma-se em uma matriz ferrítica com partículas de cementita finamente dispersas. Essa transformação envolve a segregação de átomos de carbono em defeitos da rede cristalina, a precipitação de carbonetos, a recuperação e a recristalização da estrutura<sup>[4]</sup>. Se a martensita na forma de ripas for processada a morno, em temperaturas próximas a  $A_{E1}$ , pode-se esperar que a deformação acelere o processo de transformação de fase, recristalizando a estrutura deformada e, em consequência, refinando o tamanho dos grãos. A obtenção de microestruturas ultrafinas aumentaria significativamente a resistência mecânica dos aços baixo carbono baixa liga, expandindo seu campo de aplicações.

**Juno Gallego**

gallego@dem.feis.unesp.br  
Universidade Estadual Paulista  
(UNESP) – Ilha Solteira – SP

**Alberto Moreira Jorge Jr.**

moreira@power.ufscar.br  
Universidade Federal de São Carlos  
(UFSCar) – São Carlos – SP

**Oscar Balancin**

balancin@power.ufscar.br  
Universidade Federal de São Carlos  
(UFSCar) – São Carlos – SP

1) Projeto FVA/CNPq nº. 400609/2004-5  
"Novas Ligas Estruturais para a  
Indústria Automobilística".

Figuras 1, 2 e 3

Figura 1: Ripas, blocos e pacotes de martensita observados na amostra temperada



Figura 2: Ripas de martensita com elevada densidade de discordâncias em seu interior

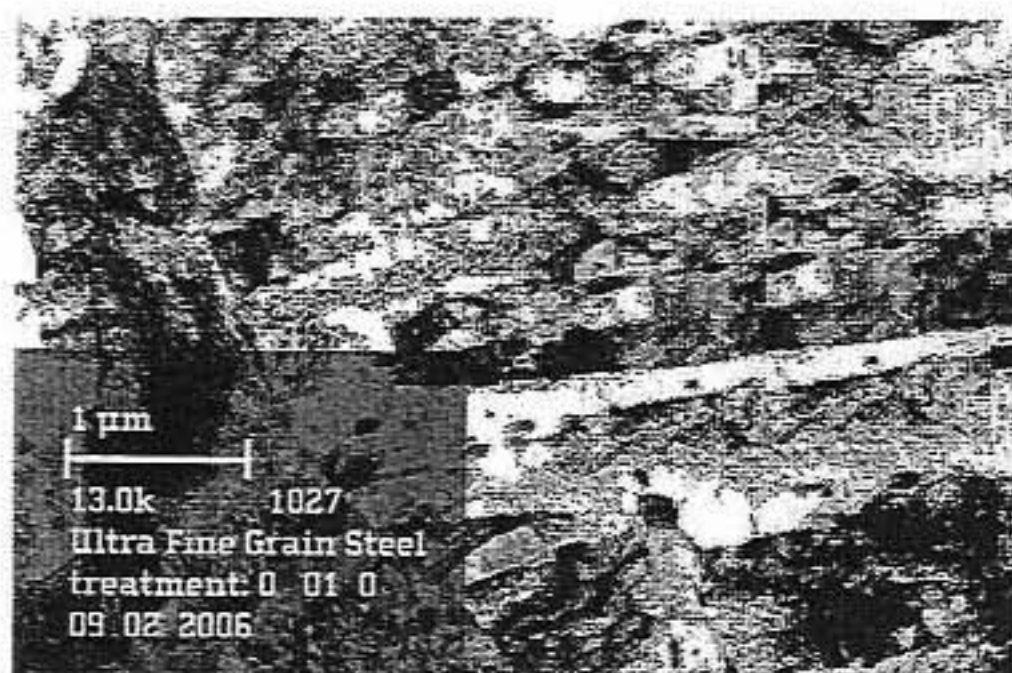


Figura 3: Contornos de altos ângulos (linhas escuras) e baixos ângulos (linhas claras) gerados pela técnica EBSD

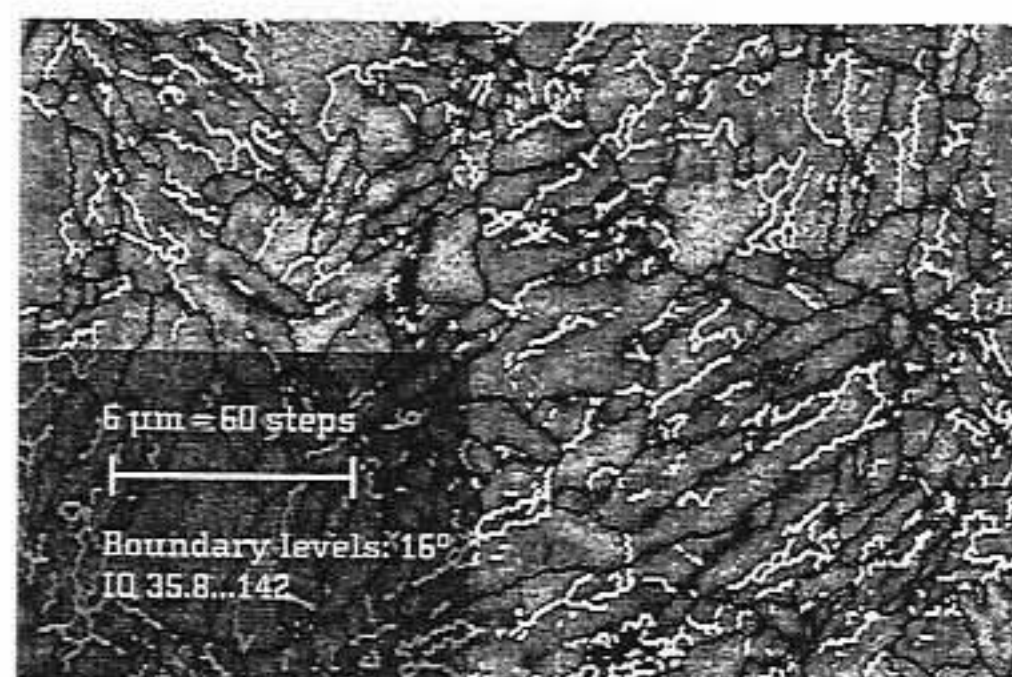
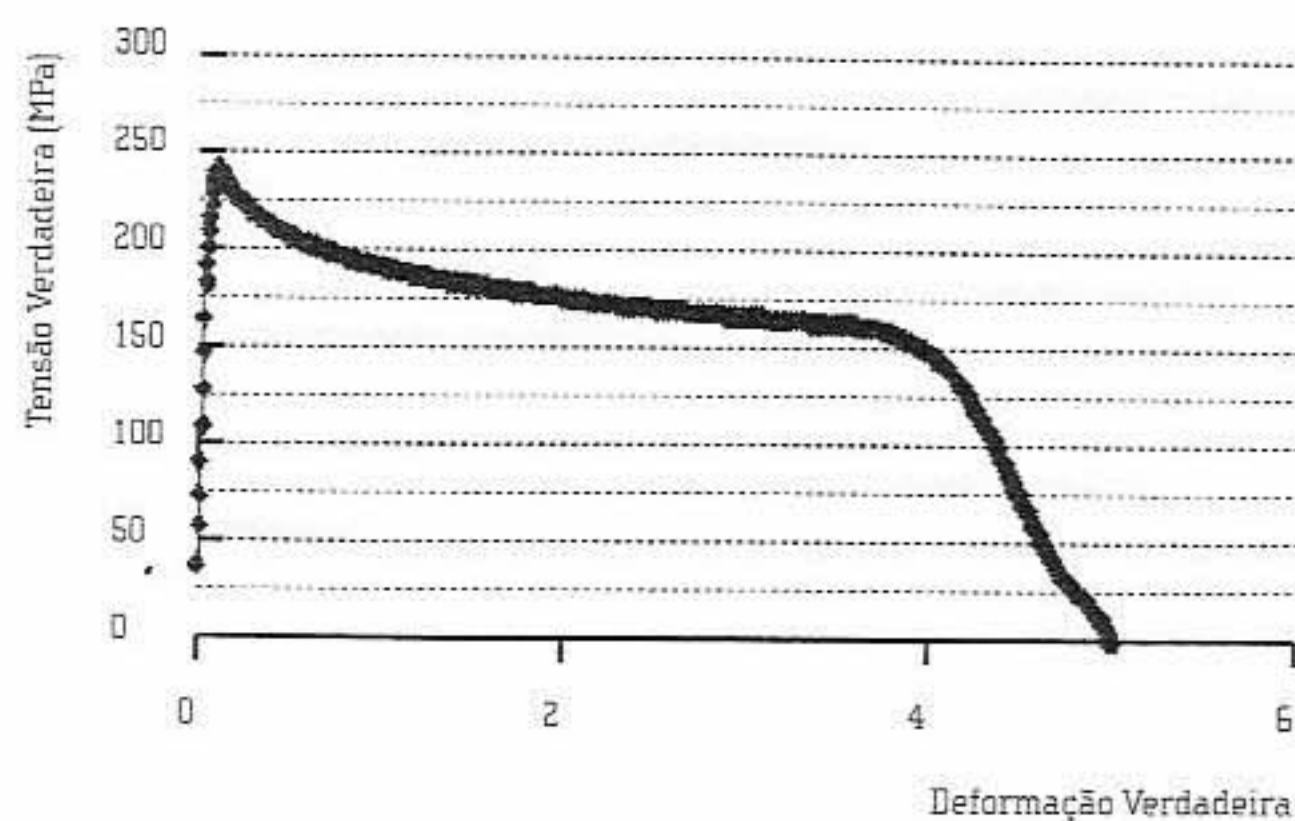


Figura 4 | Curva de escoamento plástico obtida em um ensaio de torção



## MATERIAL E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O material utilizado foi um aço baixo carbono baixa liga Fe—0,16C—1,34Mn—0,46Si—0,038Al—0,019P—0,0095. A microestrutura de partida, composta por uma matriz martensítica com partículas de cementita finamente dispersas, foi obtida por meio de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. As amostras foram austenitizadas a 900°C por 30 minutos e resfriadas bruscamente em água. O revenimento foi realizado com o reaquecimento das amostras a 685°C, temperatura logo abaixo de  $A_{E1}$ , por uma hora. Após esse tratamento térmico, as amostras foram submetidas a ensaios de torção a morno. As deformações foram realizadas utilizando-se a máquina de ensaios de torção a quente do departamento de engenharia de materiais da UFSCar. As amostras foram reaquecidas até 685°C, mantidas nessa temperatura por 15 minutos, deformadas continuamente até a fratura com taxa de deformação de  $0,1 \text{ s}^{-1}$  e em seguida resfriadas até a temperatura ambiente.

## RESULTADOS

A microestrutura observada por meio de microscopia ótica após a solubilização e têmpera é mostrada na **figura 1a**. Vê-se nessa figura que a microestrutura consiste de ripas de martensita formando blocos e pacotes. Ainda não é observada a presença de partículas de cementita. Partículas de cementita, decorando contornos e no interior de ripas de martensita, podem ser vistas na amostra temperada e revenida por 15 minutos, a 685°C, observada através de MET, como mostra a **figura 2**. Também, pode-se ver nessa foto que já iniciou um processo de subdivisão das ripas, formando contornos internamente nas mesmas.

A **figura 3** mostra contornos de alto e baixo ângulo, obtidos por EBSD, de uma amostra temperada e revenida por uma hora. Uma parte significativa dos contornos de ripas separa regiões com baixa desorientação. Pode ser visto, também, que houve a fragmentação de algumas ripas, gerando novos contornos, sendo que 60% dos observados são de alto ângulo.

A **figura 4** mostra a curva de escoamento plástico obtida em um ensaio de torção, realizado a 685°C, com deformação até a fratura. A curva tem uma forma peculiar: encruamento rápido até uma corcova, seguido por uma região de extenso amaciamento, sugerindo um estado estacionário após grandes deformações. Essa curva tem a forma característica das apresentadas por estruturas instáveis. Conforme a deformação prossegue a estrutura tende para o equilíbrio. A microestrutura observada por MET, após a deformação, está mostrada na **figura 5**. Vê-se que os grãos são equiaxiais e com tamanho médio próximo a 1 μm. Observa-se, também, a presença de um grande número de partículas finamente dispersas, distribuídas nos contornos e dentro dos grãos.

A **figura 5** mostra a presença de contornos separando pequenos volumes de ferrita. A questão imediata é determinar se os contornos são de alto ou baixo ângulo. A **figura 6** mostra os resultados obtidos com a técnica EBSD. Este diagrama indica que 73% dos contornos são de alto ângulo e 27% de baixo ângulo. Essa fração de contornos de alto ângulo é característica de materiais recristalizados dinamicamente.

## DISCUSSÃO

Com as observações microestruturais realizadas em amostras temperadas e revenidas pode-se afirmar que, antes do início da deformação, o processo de transformação da martensita já estava em andamento. A presença de partículas de cementita indica que houve difusão, segregando o carbono em defeitos da rede cristalina e formando precipitados. A presença de uma fração significativa de contornos de baixo ângulo é um indicativo de que o processo de rearranjo de discordâncias formando células e subgrãos já estava em andamento e que houve alguma subdivisão de ripas de martensita.

É bem conhecido e aceito universalmente que os mecanismos de recuperação dinâmica são suficientes para estabelecer o equilíbrio dinâmico entre as taxas de geração e aniquilação de discordâncias durante a deformação a quente da ferrita. Assim, o processo de recristalização dinâmica (descontínua) não deve ter ocorrido durante a deformação a morno. Todavia, após grandes deformações, observou-se que a fração de contornos de alto ângulo é significativa (73%), sugerindo que a ferrita estava recristalizada.

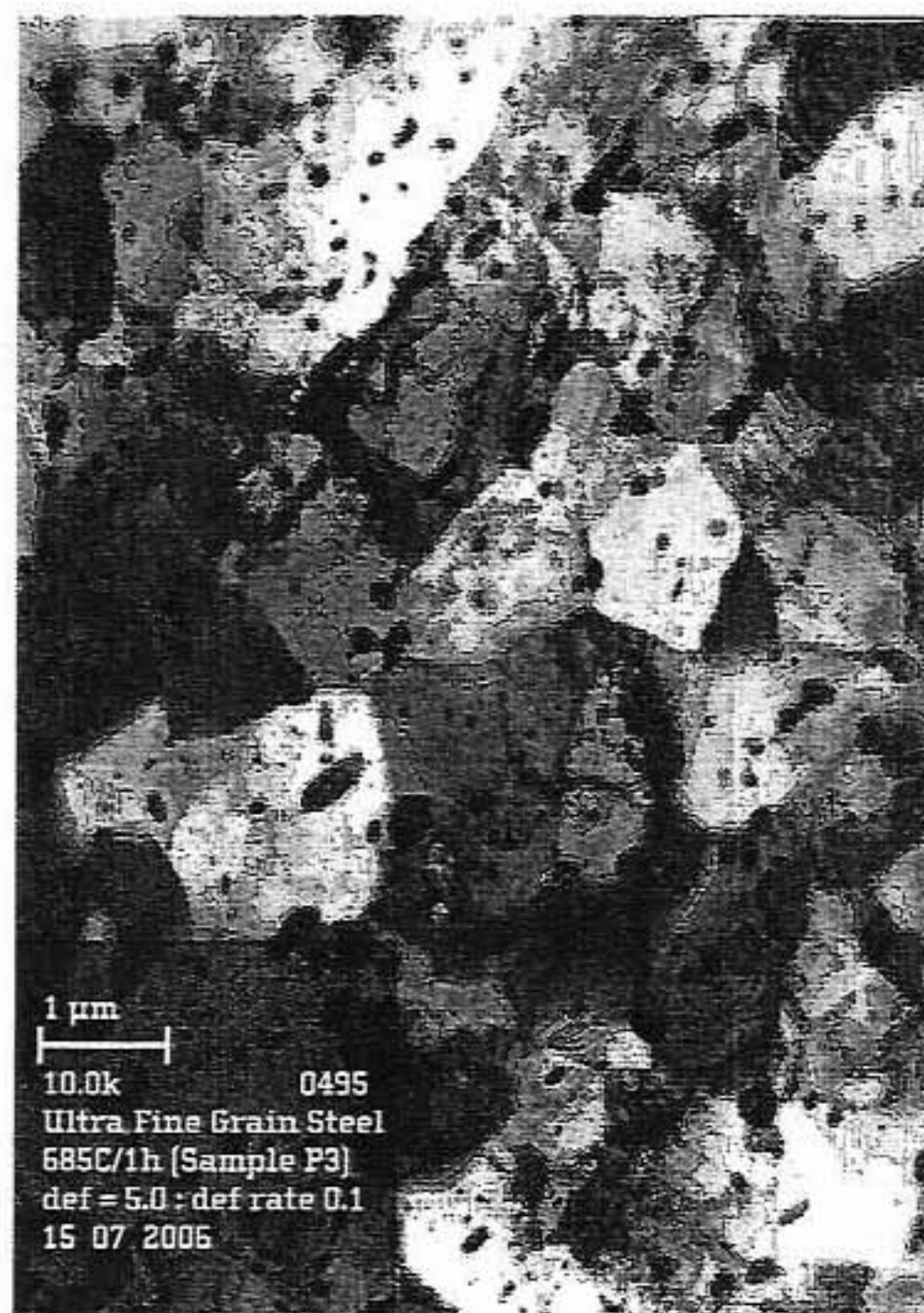
Tendo em mente que antes de iniciar a deformação tem-se um processo de subdivisão de grãos, pode-se esperar que esse processo continue durante a deformação. Assim, as células e subgrãos formados são transformados em grão com o prosseguimento da deformação, gerando uma microestrutura extremamente fina. Também, pode-se esperar que as partículas de cementita que se formam (i) devam facilitar o processo de rotação dos subgrãos, acelerando o processo de formação de novos grãos. E, uma vez completada a deformação plástica, (ii) as partículas presentes devem inibir o crescimento dos grãos formados.

A deformação realizada a morno da estrutura martensítica revenida iniciou com o processo de transformação da martensita em ferrita, em andamento.

O alto índice da fração de contornos de alto ângulo indica que, após grandes deformações, a ferrita está recristalizada.

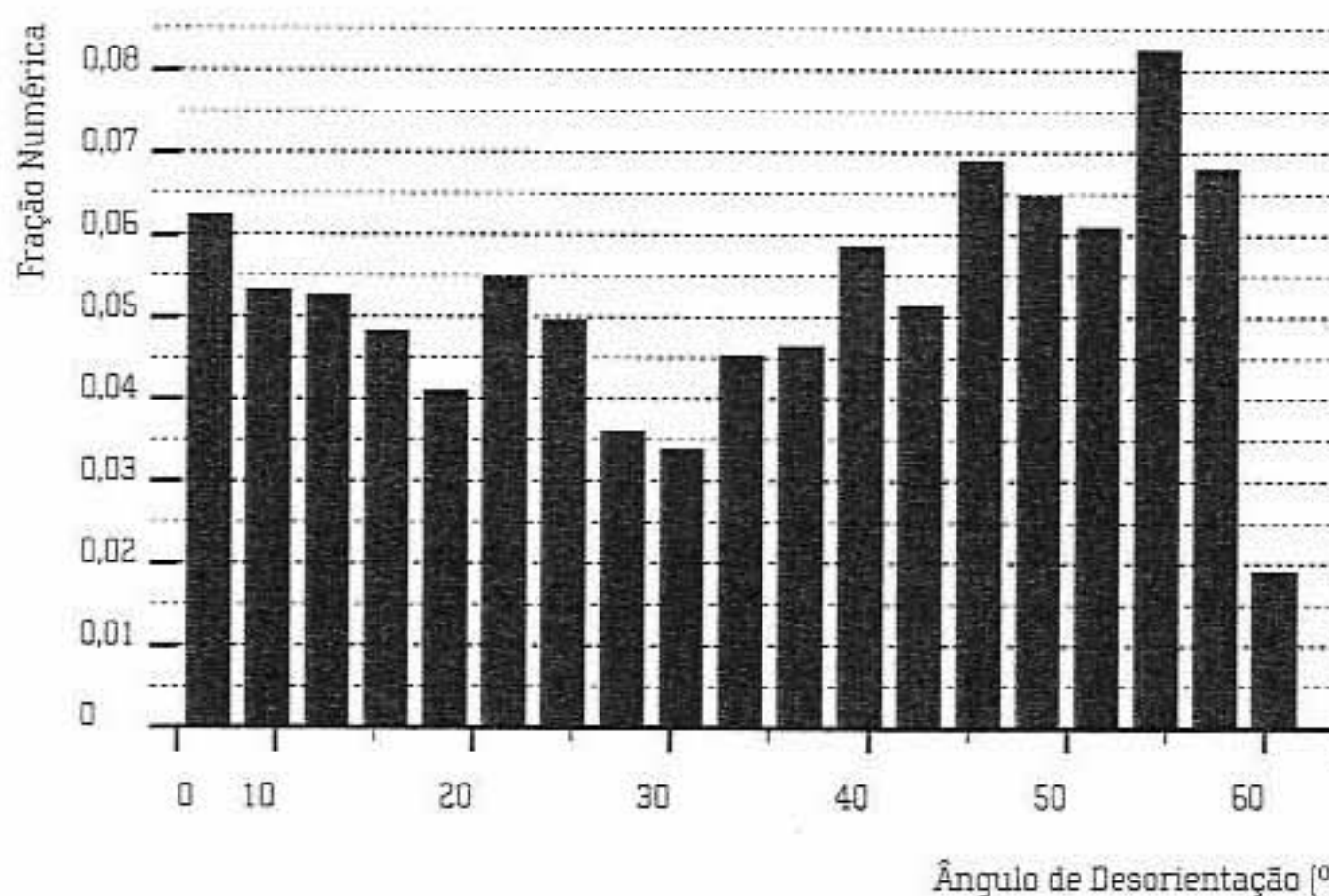
A obtenção de grãos ferríticos ultrafinos (tamanho médio próximo a 1 µm) pode ser associada à transformação dinâmica da martensita em ferrita induzida por deformação.

**Figura 5**



Aspecto típico da microestrutura constituída por grãos equiaxiais finos de ferrita e partículas de cementita

**Figura 6** | Frequência de distribuição de ângulos de desorientação



## REFERÊNCIAS

- [1] NAGAI, J. K., *Mater. Proc. Technol.*, vol. 117, pp. 329-332, 2001.
- [2] UEJI R.; TSUJI N.; MINAMINO Y.; HOIZUMI Y., *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 5, pp. 153-162, 2004.
- [3] TSUCHIYAMA T.; MIYAMOTO Y.; TAKAKI S., *ISIJ Inter.*, vol. 41, pp. 1047-1052, 2001.
- [4] SPEICH G. R., *Trans. Metall. Soc. AIME*, vol. 245, pp. 2553-2564, 1969.