

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE LAMINAÇÃO NA MICROESTRUTURA FINAL DO AÇO SAE 5140 VIA SIMULAÇÃO POR ENSAIO DE TORÇÃO A QUENTE¹

Luiz Roberto Moraes Junior²

Resumo

No presente trabalho, busca-se avaliar a influência da temperatura de laminação e da taxa de resfriamento na estrutura final de produtos longos para construção mecânica, simulando-se os passes de laminação em bloco laminador, por ensaio de torção a quente. São analisadas duas temperaturas de laminação, levando-se em consideração as maiores e menores temperaturas reais do processo. O aço SAE 5140 foi submetido a duas condições: ensaio em alta e baixa temperatura. Para tanto, consideraram-se os parâmetros do processo de laminação, tais como redução de área entre passes e taxa de deformação, transformando-os em parâmetros para ensaio de torção, a fim de chegar na condição mais próxima do comportamento real no laminador. São analisadas as diferenças nas microestruturas dos corpos de prova, objetivando-se uma microestrutura que possibilite a obtenção de um alto grau de esferoidização em tratamento térmico subsequente.

Palavras-chave: Laminação controlada; Ensaio de torção; Fio-máquina.

INFLUENCE OF ROLLING TEMPERATURE ON SAE 5140 STRUCTURE BY HOT TORSION TEST SIMULATION

Abstract

Wire rod products are used in a wide variety of components. Specific qualities can be obtained by combining controlled rolling and cooling. The direct industrial development of these processes is very difficult. Previous physical simulations are required to get a better understanding of the metallurgical processes involved. This work is carried out by the evaluation of rolling temperature and cooling rate influence in the as-rolled structure and spheroidizing annealing of wire rods, through passes simulation by hot torsion test. Two temperatures are investigated (1000°C and 890°C) according to the real processing condition of a AISI5140 steel. Thus, the structure obtained in each condition helps to choose a better spheroidization heat treatment

Key words: Wire rods; Controlled rolling; Recrystallization

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro de Processo e Desenvolvimento / Aços Villares – Sidenor

INTRODUÇÃO

A necessidade da otimização das condições de fabricação, associada à crescente demanda de aços especiais para construção mecânica na forma de fio-máquina, tem levado as siderúrgicas à pesquisa de novas ligas, bem como ao desenvolvimento de novos processos ligados a esta classe de material.

Esses produtos são utilizados em um grande campo de aplicações, abrangendo componentes sujeitos às mais diferentes solicitações mecânicas na indústria automobilística. O fio-máquina é um produto caracterizado por apresentar seção transversal constante e sofrer processo de trefilação, com ou sem tratamento térmico, após a laminação. Deve, portanto, apresentar alta conformabilidade, e elevados valores de resistência mecânica e tenacidade na peça final.

A etapa de conformação mecânica a quente (laminação) representa uma parcela significativa do trabalho realizado na fabricação de componentes e produtos metálicos semi-acabados. Esta rota de processamento é utilizada industrialmente devido à baixa resistência e alta ductilidade apresentada pela maioria dos materiais metálicos quando deformados em temperaturas elevadas.

Sob tais condições de processamento ocorrem não só as mudanças de forma desejadas, como também alterações significativas na microestrutura do material, cuja evolução depende das condições de deformação: grau de deformação total, evolução de temperatura ao longo do processo, número de passes aplicados, grau e velocidade de deformação para cada passe e intervalo de tempo entre passes sucessivos. Conseqüentemente, também ocorrem modificações nas propriedades finais dos materiais laminados. O controle na evolução da temperatura durante a laminação a quente e posterior resfriamento do laminado apresenta a vantagem econômica de evitar ou, pelo menos, facilitar os tratamentos térmicos subsequentes à laminação, os quais muitas vezes implicam em custos elevados.

Laminação com Temperatura Controlada

O processo de laminação, quando executado sob evolução controlada de temperatura, pode melhorar as propriedades finais do fio-máquina através da sincronização adequada entre diversos fenômenos metalúrgicos, tais como recristalização, crescimento de grão, precipitação e transformação de fases.

A diminuição da temperatura de laminação restringe a recristalização e o crescimento do grão austenítico, o qual se torna mais fino ou, eventualmente, até mesmo ficar encruado.

Esse refino ou encruamento do grão austenítico eleva a densidade de pontos propícios à nucleação de ferrita durante o resfriamento do material após o final da laminação, tais como contornos de grão e bandas de deformação. A Figura 1 mostra, de forma esquemática, como se comportam os grãos austeníticos quando laminados sob diferentes patamares de temperatura.

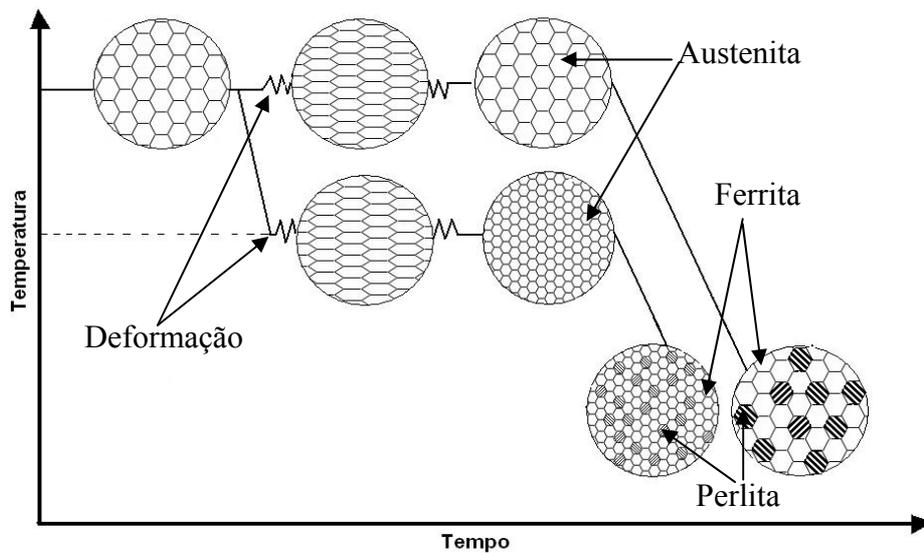


Figura 1. Influência da evolução da temperatura nas microestruturas obtidas após conformação a quente

O aumento na densidade de pontos propícios à nucleação da ferrita acelera sua transformação. Esse fenômeno pode ser claramente visto ao se analisar o diagrama de transformação sob resfriamento contínuo (TRC) correspondente a um aço com estrutura austenítica mais refinada, quando se verifica um deslocamento para a esquerda do “nariz” da curva associada à transformação ferrítica. Ou seja, ocorreu diminuição no tempo necessário para início e final da transformação.

Duas amostras, constituídas do mesmo tipo de aço, mas laminados sob diferentes condições de temperatura, podem apresentar diferentes microestruturas, mesmo se forem submetidos à mesma taxa de resfriamento subsequente. A amostra que sofreu laminação sob temperaturas menores apresenta ferrita e perlita finamente dispersas, enquanto a que foi processado sob maiores temperaturas apresenta microestrutura formada por uma mistura de ferrita e perlita mais constituintes aciculares, como bainita.

A Figura 2 mostra esquematicamente como a temperatura de laminação influencia o diagrama TRC de um aço e como uma mesma taxa de resfriamento pode gerar microestruturas diferentes em função das diferentes condições de temperatura aplicadas num mesmo esquema de passes de laminação.

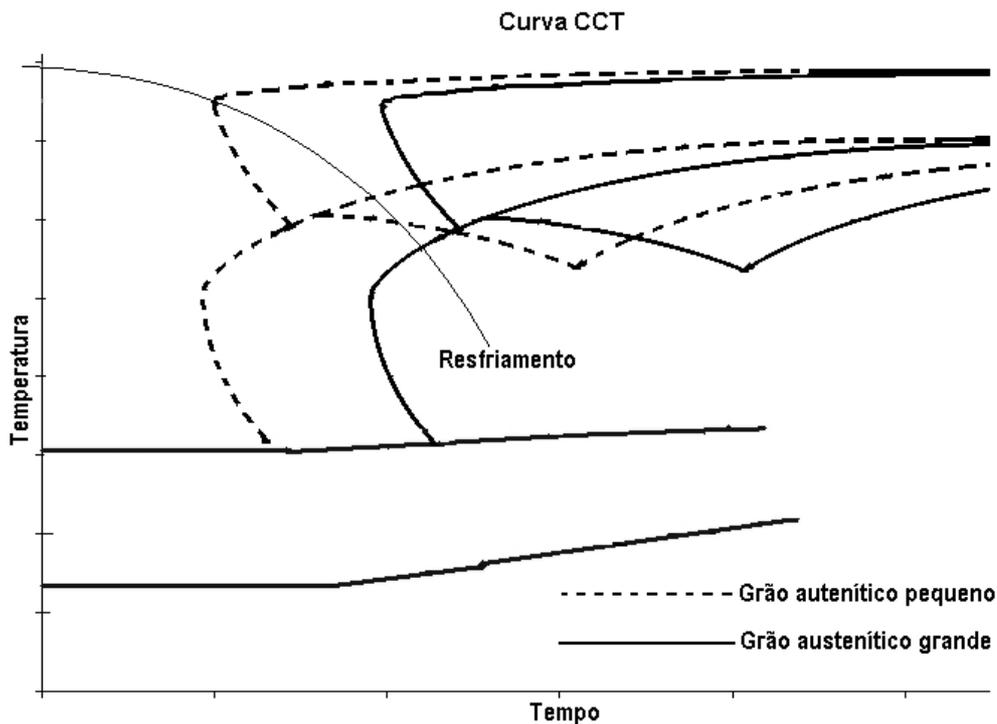


Figura 2. Influência da evolução de temperatura de laminação no diagrama TRC do aço

O tamanho de grão austenítico apresenta correlação com o chamado parâmetro Z de Zener-Hollomon, que depende das condições específicas de laminação no último passe:

$$Z = \dot{\epsilon} e^{\frac{Q}{RT}}$$

onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação (s^{-1}), T a temperatura em graus Kelvin, R a constante dos gases (J/mol.K) e Q a energia de ativação para a recristalização do material que, no caso do aço comum, é da ordem de 65800 J/mol. A partir desta equação constata-se que, quanto maior a temperatura de laminação, mais propícias estarão as condições para a ocorrência de crescimento o grão.^[1,2]

Nas empresas com equipamentos modernos de laminação, como blocos-laminadores, blocos-calibradores e caixas de resfriamento em linha com alta eficiência, além de esteiras de rolos capazes de controle de resfriamento, toda esta teoria sobre recristalização, crescimento de grão e controle de temperatura pode ser aplicada.

A Esferoidização

A esferoidização trata-se da globulização dos carbonetos (cementita) presentes no aço e é atingida através de processos de austenitização completa ou parcial, seguida de resfriamento lento e patamar sub-crítico (abaixo de Ar1), ou mesmo, através de ciclos sub-críticos (estes precisam de mais tempo, mas representam de forma mais clara a evolução do grau de esferoidização). A esferoidização de carbonetos é um dos mais importantes processos aplicados em fio-máquinas de aços ligados médio

carbono, quando se objetiva alta ductilidade e deformabilidade para posteriores processos de deformação a frio.

O processo de globulização dá-se por meio da desintegração das lamelas de cementita, iniciando-se em regiões que apresentam falhas na morfologia, tais como terminações, buracos e fissuras. Estudos^[3-6] mostram que além da temperatura, a estrutura de partida também exerce grande influência na obtenção de carbonetos esferoidizados em ciclos sub-críticos e intercríticos. Isto deve-se ao fato de que em materiais com estrutura mais fina, há maior quantidade de terminações e imperfeições das lamelas de cementita na perlita e ainda mais em estruturas aciculares, como bainita. Desta forma, descobriram-se que estruturas compostas de grãos estruturais mais finos e dispersas, apresentam maior facilidade em globulizar os carbonetos em um recozimento de esferoidização.

Na indústria, o processo de recozimento (esferoidização) é muito importante, pois garante no material alta capacidade em sofrer deformações a frio. Por outro lado, sabe-se que os ciclos utilizados para garantir estas estruturas e propriedades são longos e, desta forma, custosos.

O Mercado

O desenvolvimento de estruturas capazes de sofrerem deformações direto da laminação, ou mesmo de estruturas que facilitem a esferoidização são de extrema importância no cenário siderúrgico.

A execução de experiências em escala industrial, desde que viável, implica em custos significativos, além de perda de produtividade, sucata em linha e mesmo risco de danos graves ao equipamento. Essa conjuntura motivou o desenvolvimento de diversos métodos de simulação física da conformação a quente, que procuram se aproximar o máximo possível das condições operacionais do processo real de laminação, permitindo prever as condições do produto ao final do processo.

Uma vez conhecida a relação entre o estado metalúrgico durante o processamento e os esforços realizados pela máquina para deformar o material, pode-se controlar com maior precisão as dimensões dos produtos trabalhados, monitorar sua evolução microestrutural e, assim, prever as suas propriedades.^[7,8]

O Ensaio de Torção

Os processos de conformação mecânica podem ser simulados através de ensaios de laboratório, utilizando-se corpos de prova com dimensões reduzidas, sobre os quais se impõem ciclos térmicos, mecânicos ou termomecânicos reproduzindo, de forma bastante fiel, os parâmetros aplicados industrialmente.

O equipamento que realiza a simulação deve ser capaz de variar esses parâmetros de modo a abranger uma larga faixa de valores. Um aspecto importante da simulação é a capacidade de registro simultâneo da resposta do material e a associação desse comportamento aos parâmetros utilizados. Além disso, a microestrutura do material deve ser examinada após a simulação.^[7]

O ensaio de torção é uma das técnicas que mais têm sido utilizadas para a simulação física do processamento a quente, pois neste caso é possível impor grandes deformações sob altas velocidades. A instrumentação da máquina de torção, além do controle do ensaio, deve permitir medidas do torque (tensão de

escoamento plástico), do deslocamento angular (deformação e taxa de deformação) e da temperatura.

As curvas tensão equivalente vs. deformação equivalente para a superfície de amostras cilíndricas torcionadas são calculadas a partir do torque e ângulo de rotação medidos, utilizando as relações:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}M}{2\pi R^3} (3 + m + n) \quad e \quad \varepsilon_{eq} = \frac{R\theta}{\sqrt{3}L}$$

onde M é o torque aplicado, o θ ângulo de rotação, R e L são o raio e o comprimento útil do corpo de prova. Os coeficientes m e n representam a sensibilidade do material às mudanças na taxa de deformação e na deformação, respectivamente.

A necessidade de obter produtos com qualidade cada vez mais aprimorada, e com custos menores, associada à evolução da informática, tornam cada vez mais atrativa a modelagem dos processos de conformação plástica a quente, em especial a laminação de aços. Relacionar o estado metalúrgico durante o processamento com os esforços realizados pela máquina para deformar o material permite controlar melhor as dimensões dos produtos trabalhados e monitorar a evolução microestrutural e conseqüentemente as propriedades dos materiais.^[7]

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no laboratório de Tratamentos Termomecânicos da UFSCar, no aço SAE 5140 (aço ao cromo, médio carbono).

O equipamento realiza torção a quente aplicando esforços mecânicos às amostras por um servo motor elétrico de 6 KVA com velocidade variável de 1 a 2000 rpm. Os esforços são medidos por uma célula de carga com capacidade de 1000 kgf x cm. As amostras são aquecidas por um forno de radiação infravermelho de 6 KW acoplado à máquina. A deformação e a taxa de deformação são calculadas a partir de medidas do ângulo de rotação realizadas por um transdutor de rotação. A aquisição de dados é realizada por um computador interligado à máquina, que com um programa, controla os ensaios impondo a temperatura, a deformação, a taxa de deformação e o tempo de espera entre deformações.

A influência da temperatura de laminação na microestrutura final do fio-máquina pode ser estudada através deste tipo de simulação. Para tanto, duas amostras foram submetidas a ensaios de torção executados sob duas temperatura distintas: 1000 e 890°C [9], e posterior resfriamento em água, com a finalidade de se congelar a estrutura.

Outras duas amostras foram deformadas da mesma maneira, mas não foram temperadas, para que fosse possível avaliar o grão estrutural e posterior tratamento térmico.

As temperaturas acima citadas foram escolhidas com a intenção de mostrar que uma diferença relativamente pequena, da ordem de 110°C, provoca alterações bastante significativas nos resultados finais do produto, mesmo considerando-se as altas temperaturas de laminação normalmente empregadas. As taxas de resfriamento posterior foram escolhidas, tendo-se situado dentro dos limites e capacidade da esteira de rolos já existente após o bloco laminador. Foram extraídas amostras dos corpos de prova torcionados, que foram preparadas para metalografia e examinadas ao microscópio ótico com o objetivo de se revelar a microestrutural e o tamanho de grão austenítico.

Os tratamentos térmicos foram realizados em fornos do tipo mufla, no laboratório físico da Aços Villares S/A e o controle da temperatura através de termopares e sistemas controladores. As amostras foram tratadas em ciclos sub-críticos, conforme mostra o esquema na Figura 3, para melhor observar a influência da estrutura de partida no grau de esferoidização final do fio-máquina.

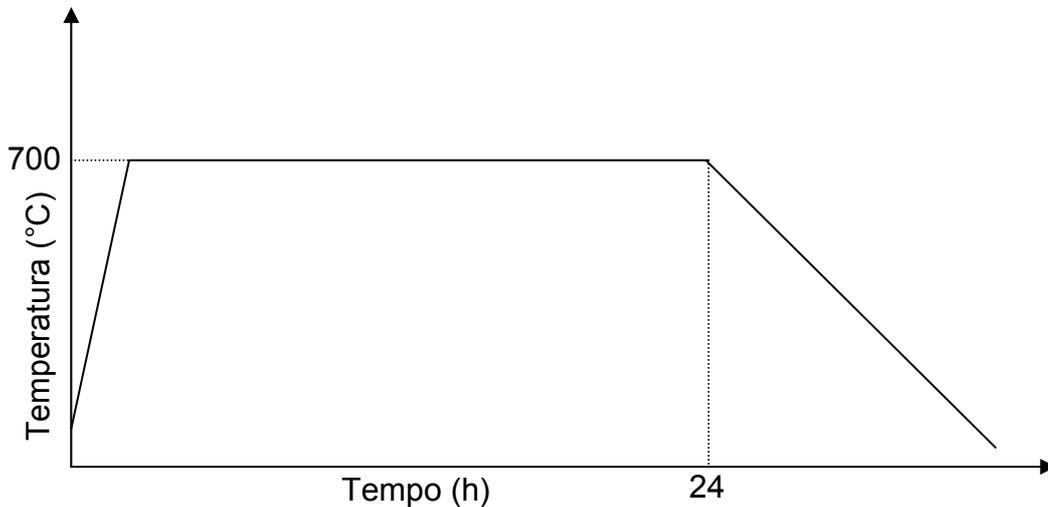


Figura 3: Ciclo utilizado.

Assim, foi possível observar a evolução microestrutural variando-se as temperaturas de deformação e posterior observação da estrutura gerada em processos subsequentes de tratamentos térmicos de esferoidização.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 4(a) e (b) revelam as microestruturas austeníticas correspondentes aos corpos de prova torçionados sob temperaturas de 1000 e 890°C, respectivamente. Os valores de tamanho de grão foram determinados conforme a norma ASTM E112.^[10] Observa-se que houve uma diferença considerável entre as duas amostras, tanto em termos do tamanho como da homogeneidade dos grãos austeníticos. A Figura 4(a) mostra que a deformação a 1000°C produziu distribuição bimodal de grãos austeníticos. A Figura 4(b), em comparação, apresentou tamanho de grão austenítico mais fino e homogêneo, efetivamente demonstrando que, sob menores temperaturas de deformação, a recristalização e crescimento de grão são dificultados.

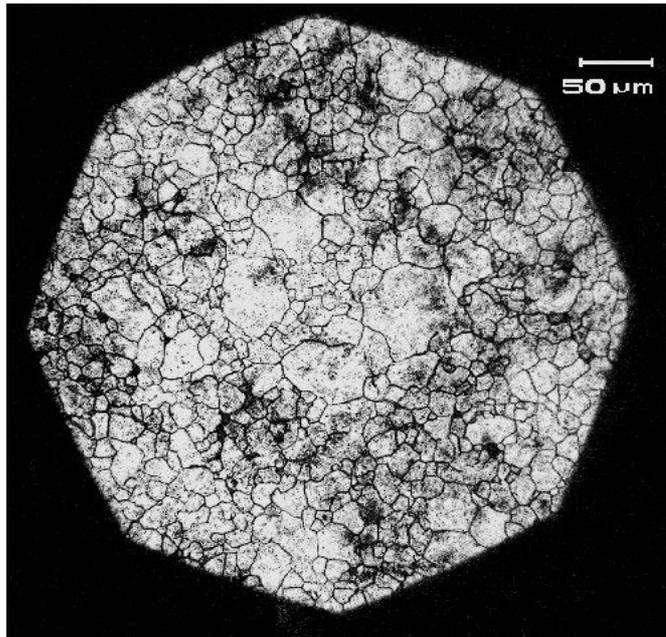


Figura 4(a). Microestrutura austenítica após deformação a 1000°C. Ataque: picral. Tamanho de grão ASTM: 5 a 7.

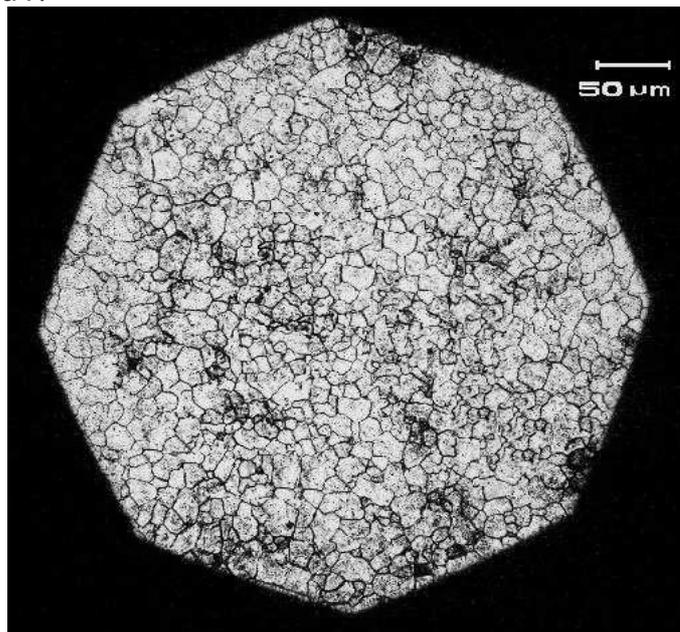


Figura 4 (b). Microestrutura austenítica após deformação a 890°C. Ataque: picral. Tamanho de grão ASTM 7 a 8.

As Figuras 4(a) e 4(b) mostram a microestrutura final obtida a partir do resfriamento dos corpos de prova que apresentaram as microestruturas austeníticas após deformação a quente vistas respectivamente nas Figuras 4(a) e 4(b). A Figura 5(a), relativa ao corpo de prova ensaiado a 1000°C, apresenta microestrutura final grosseira. Por outro lado, pode-se verificar que a micrografia da Figura 5(b), correspondente ao corpo de prova ensaiado a 890°C, mostra microestrutura ferrítico-perlítica final com tamanho de grão mais refinado. Esse refino de grão se deve à formação intensiva de sítios para nucleação posterior da ferrita durante a deformação a quente.

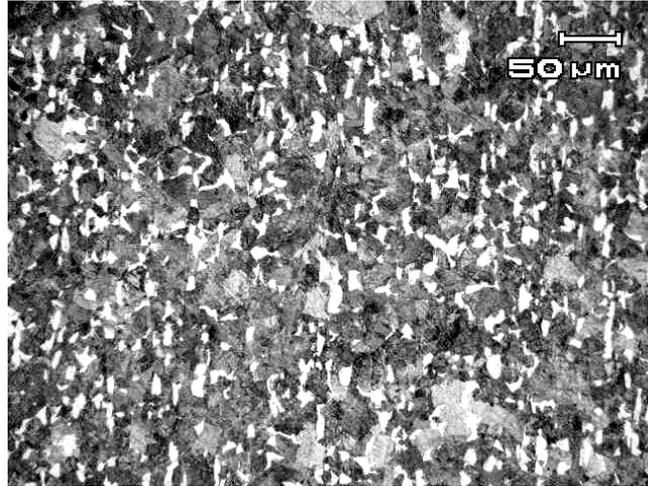


Figura 5(a), Microestrutura após deformação a 1000°C e resfriamento ao ar. Ataque: nital.

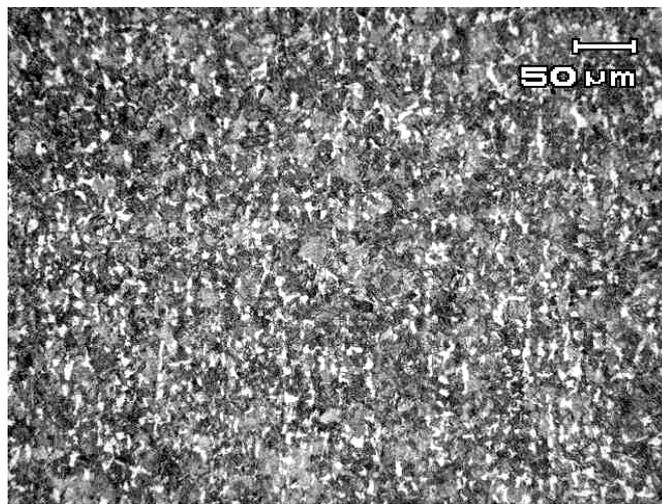


Figura 5(b). Microestrutura após deformação a 890°C e resfriamento ao ar. Ataque: nital.

Essa comparação demonstra a influência da temperatura de deformação na microestrutura final, a qual se mostra mais fina e homogênea e, desta forma, nas propriedades mecânicas e físicas finais do produto acabado.

Analisou-se ainda, a influência da estrutura de partida em relação à esferoidização dos carbonetos, chegando-se nos resultados expressos nas Figuras 6 (a) para as amostras deformadas a 1000°C e 6 (b) para as amostras deformadas a 890°C.

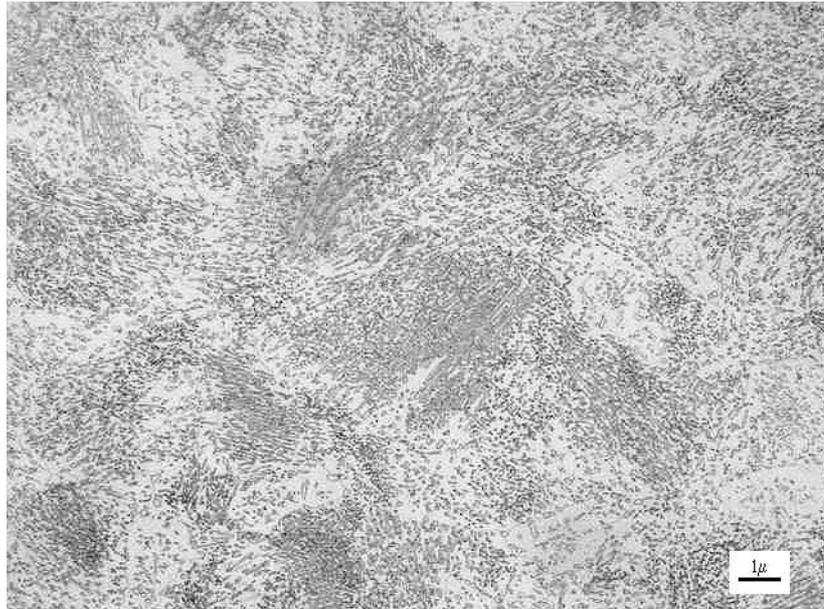


Figura 6(a). Estrutura esferoidizada a partir da amostra deformada a 1000°C. Ataque nital

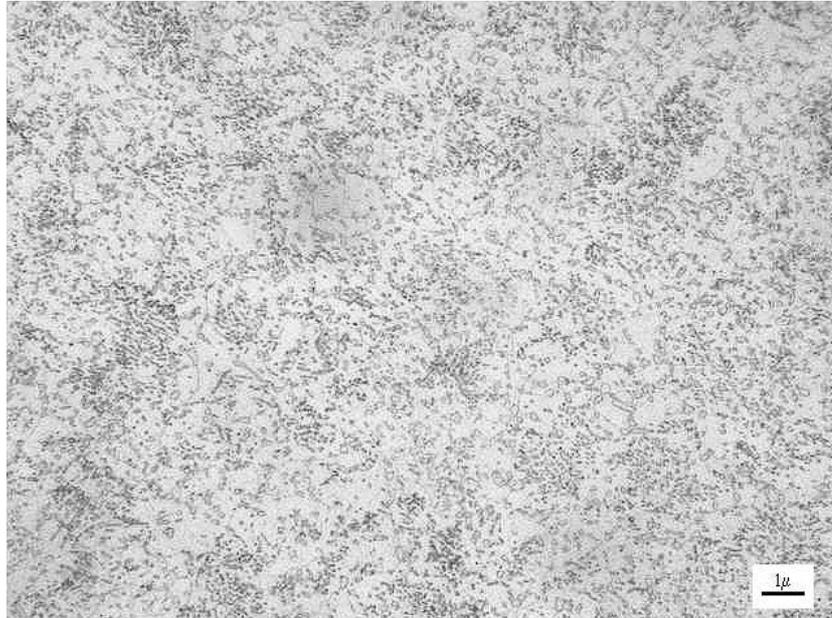


Figura 6(b). Estrutura esferoidizada a partir da amostra deformada a 890°C. Ataque nital

Observa-se que quanto menor for o grão estrutural antes do tratamento térmico, maior é o grau de esferoidização atingido pelo material, possibilitando o desenvolvimento de ciclos mais rápidos e produtivos.

CONCLUSÕES

O estudo dos ciclos de aquecimento-resfriamento típicos do processamento metalúrgico constituem um dos principais e decisivos campos de batalha dentro da guerra que o setor siderúrgico empreende em busca da redução de custos e menor agressão ecológica sem perda de qualidade. Assim, reduz-se ou otimiza uma etapa subsequente (o tratamento térmico) de produtos trabalhados a quente, reduzindo-se também custos, ajustes e variáveis de processo. É muito mais eficiente aproveitar o aquecimento que obrigatoriamente deve ser feito para a conformação a quente e promover as necessárias transformações metalúrgicas já no resfriamento

subseqüente do produto, conseguindo-se assim as propriedades físicas necessárias já no estado bruto de conformação ou estruturas que possibilitem a criação de ciclos mais curtos para se atingir grau de esferoidização desejado. A simulação física laboratorial dos processos termomecânicos sem dúvida acelerará essa evolução rumo a uma produção mais econômica e ecologicamente responsável.

Agradecimentos

- Professor Doutor Oscar Balancin
- Denise Corrêa de Oliveira

REFERÊNCIAS

- 1 HATA, H. e outros. *Development of High Quality Wire Rod through Thermomechanical Control Processes*, R&D Kobe Steel Engineering Report, n. 25, p.25-29, 2002.
- 2 PADILHA, A. F.; SICILIANO Jr., F. *Encruamento, Recristalização, Crescimento de grão e Textura*. 3ª Edição, ABM, São Paulo, 2005. 232 p.
- 3 YONG, L. T; WAYNE, K. *Mechanisms of perlite spheroidization*, Metallurgical Transactions, v. 18, p. 1403 – 1414, 1987.
- 4 YONG, L. T; WAYNE, K. *Kinetics of perlite spheroidization*, Metallurgical Transactions, v. 18, p. 1359 – 11369, 1986.
- 5 HERÁNDEZ, S. R. D. M; CABANAS, M. J. G, The spheroidization of cementite in a medium carbon steel by means of subcritical and intercritical annealing, ISIJ International, v.32, nº 12, p. 1297 – 1305, 1992.
- 6 PAYSON, P; HODAPP, W. L; LEEDER, J. The spheroidizing of steel by isothermal transformation, Transaction of the A.S.M, p. 306 – 332, 1940.
- 7 JORGE Jr, A .M.; BALANCIN, O . *Prediction of Steel Flow Stresses under Hot Working Conditions*, Material Research, v. 8, n. 3, p. 309-315, 2005.
- 8 BALANCIN. O . Laboratório de Tratamentos Termomecânicos. São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. Disponível em: <<http://www.dema.ufscar/termomec/>>. Acesso em 06/12/2005.
- 9 SAE J 404. Chemical compositions of SAE alloy steels. 2000.
- 10 ASTM E 112. Standard test methods for determining average grain size. American Society for Testing and Materials. 1996.