

# MINIMIZAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO USANDO RESFRIAMENTO CONTROLADO <sup>1</sup>

Wyser José Yamakami <sup>2</sup>  
Sérgio Tonini Button <sup>3</sup>  
Célio Caminaga <sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho visa estudar a viabilidade da substituição da normalização de um determinado aço, realizada a 950 °C por 2 horas, necessária antes da usinagem, pelo resfriamento controlado do mesmo a uma temperatura e por um tempo determinados, imediatamente após o seu forjamento a quente, de forma a reduzir o tempo e custos do processo produtivo. Para isso, o resfriamento controlado deve permitir a formação de uma microestrutura com as mesmas características e dureza especificadas para o aço normalizado. Corpos de prova (CDPs) desse aço foram aquecidos a 1050 °C, forjados em matriz aberta numa prensa hidráulica e imediatamente resfriados em um forno a 600 °C por 20 e 30 minutos. A curva de resfriamento do CDP dentro do forno foi registrada em um sistema de aquisição de dados. Micrografia e medida de dureza das amostras dos CDPs foram realizadas a fim de compará-las com as de uma peça forjada a quente e normalizada, obtida de uma empresa que produz forjados a quente utilizando o mesmo aço. As microestruturas observadas para os tempos de 20 e 30 minutos de permanência no forno se assemelham, e são composta por perlita e ferrita distribuídas homoganeamente, com dureza média de 170 e 175 HB, respectivamente, atendendo às especificações exigidas após a normalização. A curva de resfriamento indica a reação eutetóide evidenciada pelo patamar de temperatura constante a 650 °C. É possível pois, a substituição da normalização pelo resfriamento controlado de modo a permitir significativa redução do tempo e custos nesta etapa da produção.

**Palavras-chave:** Forjamento; Tratamento térmico; Resfriamento; Microestrutura.

## A STUDY ON THE DIRECT CONTROLLED COOLING OF HOT FORGED STEEL GEARS

### Abstract

In order to reduce the lead times and costs related to manufacturing processes, this work presents a study on substituting the normalizing of a carburizing steel at 950 °C for two hours, previous to finish machining, for direct controlled cooling at a constant temperature for different cooling times, immediately after hot forging. It is desired that the resultant microstructure from the controlled cooling present the same micro constituents and hardness specified for the normalized condition. Workpieces were heated to 1050 °C, hot drop forged in a hydraulic press and immediately cooled in a furnace at 600 °C for 20 and 30 minutes. The workpieces cooling curves inside the furnace were recorded with a digital data acquisition system. Samples of these workpieces were analyzed with optical microscopy and hardness tests to compare their results to those verified in normalized hot forged gears. The microstructures obtained for workpieces cooled for 20 and 30 minutes were similar and compound by pearlite and ferrite homogeneously distributed, with a mean hardness of 170 and 175 HB respectively, and attended the specifications for the normalized steel. A eutectoid reaction at 650 °C was evident in the cooling curve. Therefore the results of this work showed that is possible to substitute the normalizing heat treatment for a direct controlled cooling with a significant reduction in production times and costs.

**Key words:** Forging; Heat treatment; Direct cooling; Microstructure.

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

<sup>2</sup> *Doutor em Eng<sup>a</sup> Mecânica: área de Materiais e Processos de Fabricação. Professor Assistente do Dep. de Eng<sup>a</sup> Mecânica - Faculdade de Engenharia – Câmpus de Ilha Solteira – UNESP.*

<sup>3</sup> *Doutor em Eng<sup>a</sup> Mecânica: área de Materiais e Processos de Fabricação. Professor Adjunto do Dep. de Eng<sup>a</sup> de Materiais - Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP.*

<sup>4</sup> *Mestre em Eng<sup>a</sup> Mecânica: área de Materiais e Processos de Fabricação. Doutorando do Dep. de Eng<sup>a</sup> de Materiais - Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP.*

## INTRODUÇÃO

A competitividade entre as empresas, decorrente das exigências dos consumidores, tem levado a uma busca pela melhoria dos processos produtivos tornando-os mais flexíveis, rápidos e econômicos pelo uso de técnicas como o *Kanban*, *Just in Time*, tecnologia de grupo, formação de famílias, células de manufatura, troca rápida de ferramentas, tratamentos termo-mecânicos, resfriamento controlado e desenvolvimento de novas ligas.

Por outro lado, o desenvolvimento de novos materiais, o aumento da complexidade e a exigência de alta qualidade superficial e dimensional próximas das obtidas pelos processos de usinagem têm exigido máquinas automatizadas altamente flexíveis com sistema de controle e ajuste dos processos de conformação, englobando também aqueles onde a forma do produto é dada pela ferramenta: embutimento profundo, extrusão e forjamento em matriz.

Com o desenvolvimento ocorrido a partir da metade da década de 80 isto foi viabilizado, o que permitiu reduzir o número de operações posteriores de usinagem e mesmo de tratamento térmico.

Os tratamentos termomecânicos exigem um controle rígido da seqüência do processo, da temperatura, dos tempos e das deformações do material, porém, quando aplicados ao forjamento a quente, podem permitir que os tratamentos térmicos posteriores sejam eliminados, além de possibilitar aos forjados melhores resistência mecânica e tenacidade que as obtidas por um forjamento convencional.

A eliminação ou minimização dos tratamentos térmicos pós-forjamento, necessários para obtenção de características como dureza, microestrutura e usinabilidade, pode ser alcançada também com o resfriamento controlado do forjado a quente, como mostrado por Chine,<sup>(1)</sup> Held<sup>(2)</sup> e Naylor<sup>(3)</sup> para determinados microligados.

O trabalho de Kaspar<sup>(4)</sup> mostra que a utilização de microligados para viabilizar o resfriamento contínuo logo após o forjamento, evitando-se a têmpera e revenimento necessários no processo convencional de conformação de aços baixa liga, produz um comprometimento da resistência e tenacidade do material que pode ser melhorada com a diminuição da temperatura de deformação.

Lin e Chen<sup>(5)</sup> propuseram uma alteração da composição química de um aço de forma a produzir uma microestrutura forjada que possa ser usinada sem a necessidade de um recozimento prévio.

Henning<sup>(6)</sup> mostrou o desenvolvimento de aços baixa-liga de alta resistência que permitiram a substituição dos tratamentos térmicos após forjamento pelo resfriamento contínuo, mantendo uma performance dos forjados de precisão, após conformação, compatível com a dos aços temperados e revenidos, como o 4140.

Como alternativa ao resfriamento contínuo, Baquet<sup>(7)</sup> propõe um novo tratamento após forjamento para aços microligados de médio carbono, levando em consideração a adição de diferentes elementos de liga combinada com a otimização da deformação para melhorar as propriedades desses aços.

Roberts<sup>(8)</sup> faz uma revisão dos avanços no desenvolvimento de ligas e tecnologia de processos. O projeto de ligas tem se focado nos microligados com Ti, aços bainíticos ultrabaixo carbono, aços das classes Vanádio-Nitrogênio e aços para forjamento visando obtenção de microestrutura perlítica-ferrítica.

A tecnologia de processos tem se concentrada no controle do resfriamento de chapas, da recristalização na laminação a quente, têmpera direta e controle do resfriamento associado com o forjamento visando a eliminação de tratamento

térmico posterior e aplicação de tratamento termo-mecânico na produção de barras e perfis.<sup>(8)</sup>

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade da substituição da normalização de um aço forjado a quente, necessária antes de sua usinagem, pelo resfriamento controlado, de modo a reduzir o tempo e custos do processo produtivo.

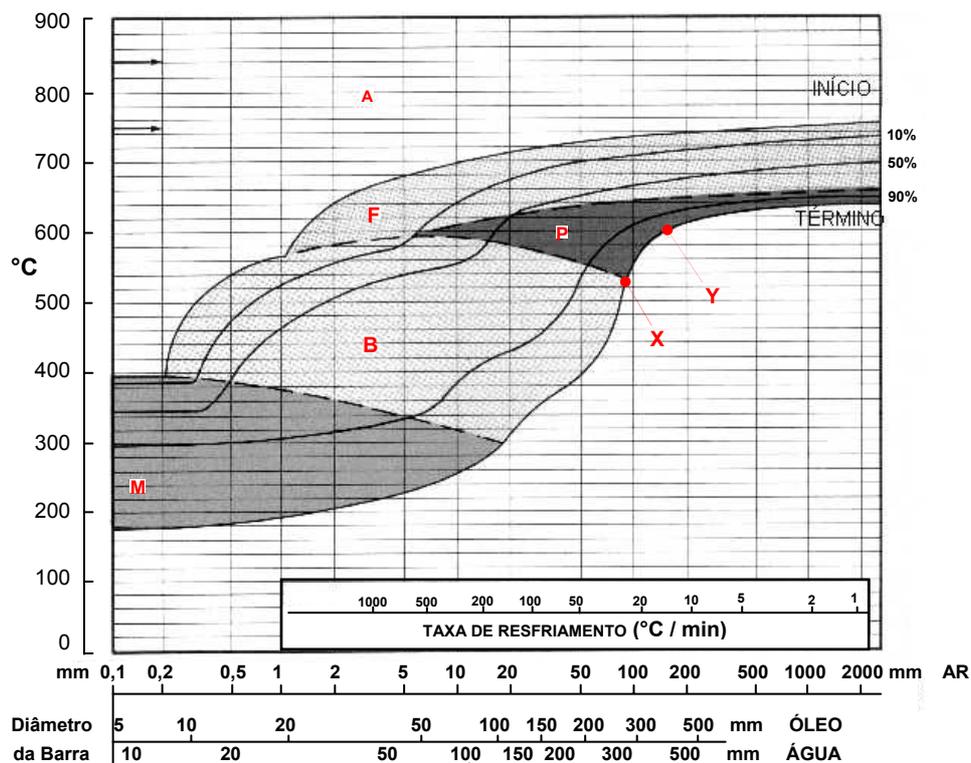
## MATERIAL E MÉTODOS

### Corpos de Prova

Utilizou-se um aço empregado no forjamento a quente cuja composição química (% em peso) é de 0,15/0,20 C, 1,10/1,30 Mn, 0,25 máx. Ni, 0,90/1,10 Cr, 0,15 máx. Si, 0,035 máx. P, 0,02/0,04 S, 0,25 máx. Cu e 0,02/0,07 Al. Seis corpos de prova (CDPs), com 25,4 mm de diâmetro e 29,94 mm de comprimento, foram usinados no sentido longitudinal de barras redondas deste aço.

O aço estudado segue a norma DIN 17210, classe 16MnCrS5, permitindo a definição do diagrama de transformação em resfriamento contínuo específico para ele, como mostrado na Figura 1 obtida de Atkins.<sup>(9)</sup>

Austenizado a 870°C. Tratamento prévio: Laminado										
Composição química (% em peso):										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	V
0,16	0,25	1,15	0,020	0,020	0,95	---	---	---	---	---



**Figura 1.** Diagrama de transformação em resfriamento contínuo definido para o aço DIN 17210, classe 16MnCrS5. Adaptado de Atkins<sup>(9)</sup>

## Forjamento a Quente

O CDP foi aquecido em um forno a 1050 °C por 20 minutos para equalizar sua temperatura. Enquanto isto, uma tenaz foi aquecida entre 900 a 1000 °C em outro forno, a fim de evitar o resfriamento acentuado do CDP durante sua movimentação.

As matrizes superior e inferior, fixas no cabeçote superior e na mesa de uma Prensa Hidráulica de 1,2 MN, respectivamente, foram aproximadas o máximo possível para serem aquecidas, numa faixa de 150 a 200 °C, por uma placa com resistência elétrica colocada entre elas.

Para realização do forjamento, um operador aciona o botão que controla a subida do cabeçote superior afastando-o da mesa da prensa, de modo que um segundo operador possa retirar a referida placa que aquece as matrizes, porém deixando uma distância mínima entre elas que permita o posicionamento do CDP.

Esse mesmo operador, após retirar a placa de resistência, posiciona dois calços de 8 mm sobre a matriz inferior, em uma região que evite o CDP encostar-se a eles durante o forjamento, os quais atuarão como fim de curso do cabeçote superior da prensa. A Figura 2 mostra o CDP antes e após sua conformação.

Usando a tenaz aquecida, um terceiro operador retira do forno o CDP a 1050 °C e posiciona-o sobre a matriz inferior. O operador da prensa aciona a descida do cabeçote superior conformando o CDP até que a matriz superior encoste-se aos referidos calços. Neste instante o operador da prensa aciona a subida do cabeçote superior para evitar que os calços também sejam deformados.

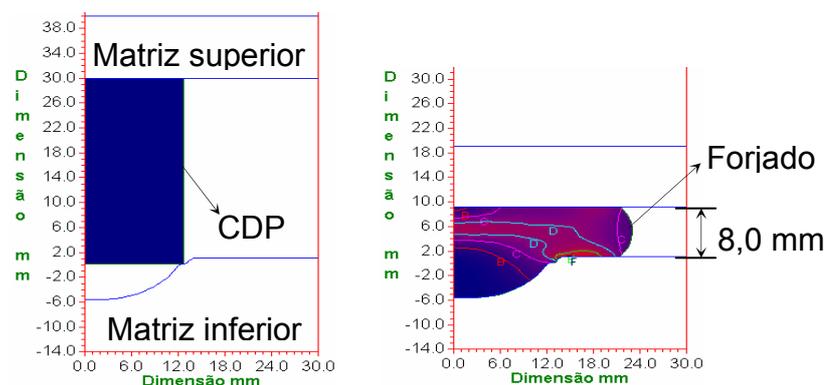


Figura 2. Forjado obtido a partir do tarugo conformado em matriz aberta.

## Resfriamento Controlado

Levantado o cabeçote superior, o CDP é imediatamente levado, com auxílio da tenaz, até o forno a 600 °C. Os CDPs permaneceram neste forno por 20 min – 4 CDPs - e 30 min – 2 CDPs. O CDP é retirado do forno ao final do tempo pré-determinado e resfriado ao ar ambiente.

A definição de diferentes tempos de permanência no forno visa observar a influência deste parâmetro na característica e dureza da microestrutura obtida.

A curva de resfriamento do CDP dentro do forno foi registrada em um sistema de aquisição de dados com o auxílio de um termopar em contato com ele.

## **Análise Metalográfica e Medida de Dureza**

Amostras da secção longitudinal dos CDPs e de uma peça forjada a quente e normalizada, cedida por uma Indústria do ramo, foram preparadas para análise metalográfica e atacadas quimicamente com Nital 2% por aproximadamente 10 s.

A dureza Brinell foi medida utilizando-se um penetrador de esfera de aço, diâmetro de 2,5 mm, e aplicando-se uma carga de 625 N por 15 segundos. Foram feitas impressões ao longo de toda a secção.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Resfriamento Controlado dos Corpos-de-Prova**

A definição da temperatura e taxas de resfriamento que permitam a formação de uma microestrutura formada por perlita e ferrita distribuídas homoganeamente, e com uma dureza entre 163 a 187 Brinell, foi baseada no diagrama de transformação em resfriamento contínuo do aço analisado.

Observando-se este diagrama, verifica-se que para a obtenção de uma microestrutura ferrítica (F) - perlítica (P) é necessário que a taxa de resfriamento esteja abaixo de 25 °C/min (ponto x da Figura 1) para um resfriamento a partir da região austenítica até a temperatura ambiente.

Acima desta taxa, o referido diagrama mostra a formação de bainítica (B) e, para taxas de resfriamento elevadas, a martensita (M) pode ser obtida.

A formação de ferrita e perlita está vinculada também à temperatura inicial, antes do resfriamento, que deve estar acima da linha de início de formação da ferrita, ou seja, o aço deve estar totalmente austenitizado.

Neste sentido, a utilização da tenaz aquecida entre 900 a 1000 °C, para minimizar as perdas de calor durante a movimentação do CDP, e o bom planejamento e execução da movimentação do CDP a partir do forno de aquecimento a 1050°C até a prensa hidráulica, sua conformação entre as matrizes, e posterior movimentação dele até o forno de resfriamento controlado, para diminuir os tempos destas etapas, foram importantes para atenuar as trocas de calor CDP / ar ambiente e CDP / matrizes, e conseqüentemente, alcançar este objetivo.

Nos ensaios, o tempo total para realização destas etapas não ultrapassou os 45 s. Isto garantiu, baseado na curva de resfriamento ao ar registrada para o CDP inicialmente a 1050 °C, que a temperatura do aço estava acima de 750 °C após entrar no forno de resfriamento.

Observando-se a Figura 1, se o aço austenitizado resfriar até a temperatura de 600 °C a uma taxa inferior a 14 °C/min (ponto y), haverá a formação de ferrita e perlita, não ocorrendo outras transformações até a temperatura ambiente.

Como se desejam taxas de resfriamento suficientemente baixas a partir da região austenítica, para formação de ferrita e perlita, não se adotou temperaturas menores que 600 °C para o forno: quanto menores estas temperaturas maiores as taxas de resfriamento do CDP a partir da referida região.

Por outro lado, temperaturas acima de 600 °C não permitiriam a transformação completa da austenita em ferrita e perlita. Os diagramas de transformação isotérmica (p.38-65, 239-241)<sup>(10)</sup> de diferentes aços mostram que as transformações microestruturais a 700 °C, por exemplo, são basicamente de austenita em ferrita, sendo a formação da perlita iniciada após longo tempo de tratamento isotérmico, o que não se objetiva neste trabalho.

Além disso, estudos aplicando o resfriamento controlado em substituição à normalização, realizados por Yamakami<sup>(11,12)</sup> em outro aço para forjamento a quente, mostraram que a temperatura de 600°C permite obter uma microestrutura com as características e dureza desejadas.

### Resfriamento após Forjamento a Quente em Matriz Aberta na Prensa Hidráulica em Forno a 600 °C

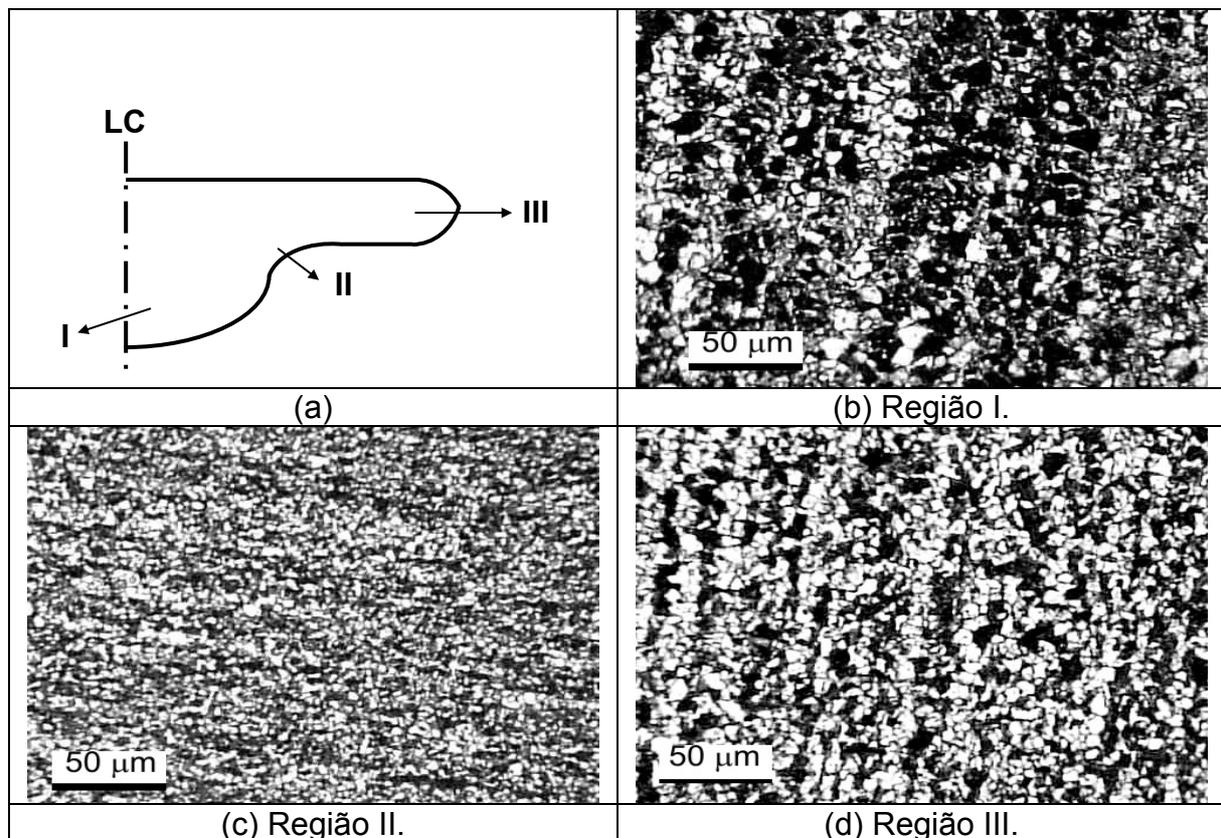
Um esquema da metade de sua seção longitudinal com indicação das regiões analisadas e fotografadas é mostrado na Figura 3 (a). A microestrutura observada é composta por perlita e ferrita distribuídas de forma homogênea. Porém, os tamanhos dos grãos de ferrita e das colônias perlita variaram de acordo com a região analisada, como mostram as Figuras 3 (b)(c)(d), para o tempo de permanência no forno de 20 minutos.

A região II apresenta grãos relativamente menores, a região I grãos maiores e a região III grãos com tamanho intermediário.

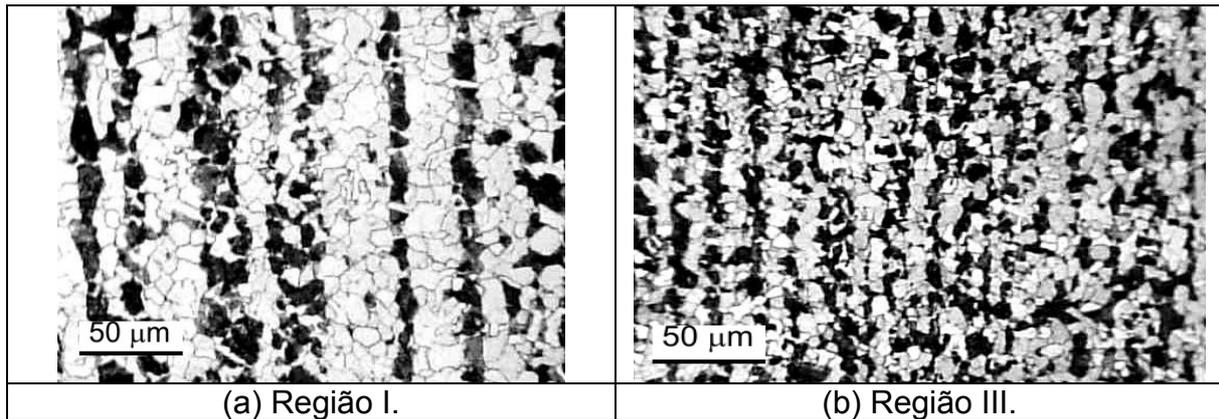
Observa-se ainda, em decorrência da variação do grau de deformação sofrida pelo material, que os grãos de ferrita e colônias de perlita da região II estão mais alongados que aqueles das regiões I e III.

As microestruturas observadas para 30 minutos de permanência no forno a 600 °C são semelhantes às obtidas para o tempo de 20 minutos, como se observa nas Figuras 4 (a) (b) para as regiões I e III, respectivamente.

Estas microestruturas obtidas com o resfriamento controlado assemelham-se



**Figura 3.** Forjamento a 1050 °C e resfriamento a 600 °C por 20 min. (a) Seção longitudinal do CDP: Regiões I, II e III. (b) Grãos de ferrita e colônias de perlita maiores. (c) Grãos de ferrita e colônias de perlita menores e mais alongados que os da região I. (d) Grãos de ferrita e colônias de perlita de tamanho intermediário.



**Figura 4.** Forjamento a 1050 °C e resfriamento a 600 °C por 30 min. (a) Grãos de ferrita e colônias de perlita maiores. (b) Grãos de ferrita e colônias de perlita de tamanho intermediário.

com as formadas em uma peça forjada a quente e normalizada, cedida por uma Indústria do ramo, vistas nas Figuras 5 (b) (c) (d), como pretendido neste trabalho.

Analisando-se uma parte da curva de resfriamento do CDP no forno a 600 °C, representativa dos ensaios realizados, vista na Figura 6, verifica-se que a taxa de resfriamento média entre 670 e 665 °C é de 12 °C/min e de 10 °C/min entre 633 e 628 °C.

Estas taxas para as respectivas temperaturas médias de 667,5 e 630,5 °C evidenciam que o resfriamento do aço se processou dentro da região ferrítica-perlítica do diagrama de transformação em resfriamento contínuo.

Observa-se na curva de resfriamento um patamar de temperatura constante em torno de 650 °C, indicando a ocorrência da reação eutetóide, como prevista no diagrama de transformação em resfriamento contínuo.

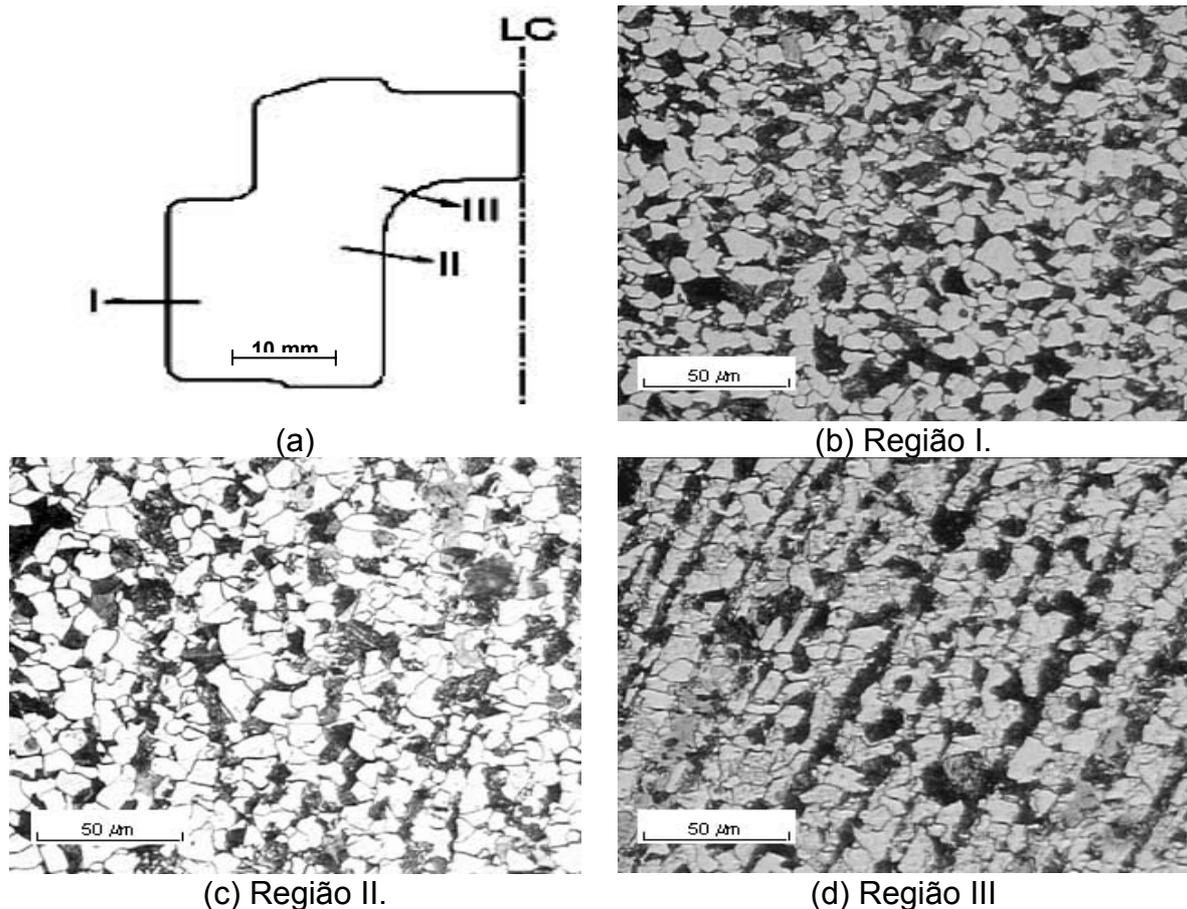
As médias e desvios padrões dos valores de dureza foram de 170 e 16 Brinell, e de 175 e 10 Brinell, para os 20 e 30 minutos de permanência do CDP no forno a 600 °C, respectivamente. Estes valores médios estão dentro da faixa de 163 a 187 Brinell especificada para a microestrutura normalizada deste aço.

Como se observa, o aproveitamento do calor do processo de forjamento fazendo-se o resfriamento controlado do aço em forno a 600 °C permite obterem-se microestruturas com as características e dureza especificadas para o aço normalizado. Isto garante, em princípio, que o forjado possa ser usinado sem a necessidade de uma etapa de normalização.

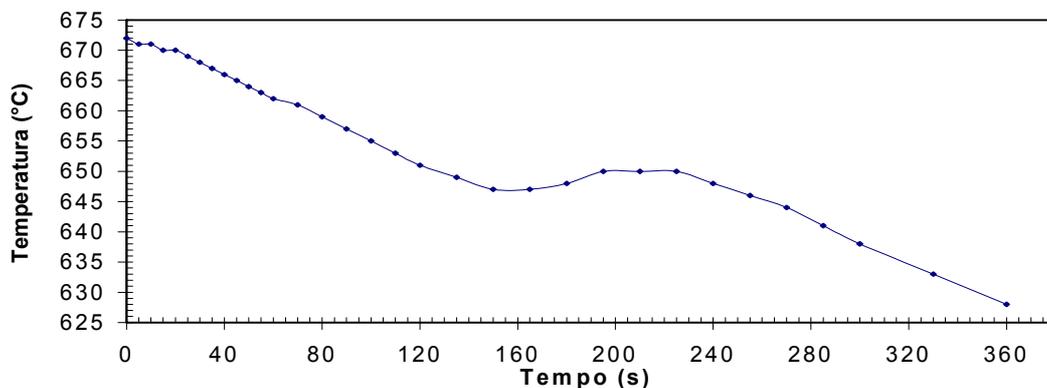
No processo convencional o lote de peça deve resfriar, após o forjamento a quente, até a temperatura ambiente para então ser transportado até o forno de tratamento térmico ou armazenado para ser normalizado em um momento mais oportuno, representando um aumento de estoque em processo além de exigir uma área específica de armazenagem.

Para normalização, as peças são colocadas sobre uma travessa movimentada por uma esteira transportadora que passa dentro de um forno a 950 °C. As peças demoram 2 horas para atravessá-lo, sendo em seguida resfriadas ao ar.

No procedimento de resfriamento controlado proposto, tanto a temperatura de 600°C (redução de 37% em relação aos 950 °C) quanto o tempo de 20 minutos de permanência das peças nela (redução de 83% em relação às 2 horas despendidas na normalização) são significativamente menores, o que resultaria numa economia de energia elétrica e menor *lead time* em relação ao processo produtivo comumente empregado neste aço.



**Figura 5.** Peça forjada a quente e normalizada. (a) Secção longitudinal: Regiões I, II e III. (b) (c) (d) Ferrita e perlita distribuídas homogeneamente características das Regiões I, II e III.



**Figura 6.** Curva representativa do resfriamento dos CDPs em forno a 600 °C.

Deve-se atentar, no entanto, que a implementação do resfriamento controlado em forno a 600 °C requer uma mudança no *lay-out* do ambiente. É necessário que o forno para o resfriamento controlado esteja próximo à prensa para que a transferência do forjado, desta para aquele, seja realizada em tempo hábil de forma a garantir que o aço esteja na condição austenitizada após introduzido no forno: peças pequenas resfriam mais rápidas que peças grandes.

Caso contrário, como mencionado, pode haver a formação de bainita e martensita prevista no digrama de transformação em resfriamento contínuo do aço ao ar ambiente, para valores de diâmetro da barra de mesma ordem de grandeza das dimensões do CDP forjado.

## CONCLUSÕES

1) As condições de resfriamento em forno a 600 °C, por 20 e 30 min, são adequadas para obtenção de uma microestrutura com as mesmas características e faixa de dureza especificadas para o aço normalizado.

2) As microestruturas, compostas por perlita e ferrita distribuídas homoganeamente, obtidas para 20 e 30 min de permanência dos CDPs no forno são qualitativamente iguais, e suas durezas apresentam valores médios e desvios padrões de 170 e 16 Brinell, e de 175 e 10 Brinell, respectivamente.

3) A implementação do resfriamento controlado pode permitir uma significativa redução do *lead time* e consumo de energia elétrica em relação à normalização.

4) É viável substituir a normalização pelo resfriamento controlado em forno a 600 °C, imediatamente após a conformação a quente do aço analisado.

5) O resfriamento controlado requer um ambiente cujo *lay-out* possibilite a transferência do forjado, da prensa para o forno de resfriamento, em tempo hábil que assegure ao aço uma condição austenitizada, após ser introduzido nesse forno.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – e a Fundunesp – Fundação para o desenvolvimento da Unesp - pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa e participação no 61º Congresso Anual da ABM - 2006.

## REFERÊNCIAS

- 1 CHINE, R. S.; HEITMANN, W. E.; BHATTACHARYA, D. Microalloyed steel bars and forgings. **Journal of Metals**, New York, p. 26-33, may, 1996.
- 2 HELD, J. F. Microalloyed steel bars eliminate heat treatment. **Metals Progress**, Cleveland, p. 17-23, dec., 1985.
- 3 NAYLOR, D. J. Microalloyed forging steels. **Materials Science Forum**, Swizerland, v. 284-286, p. 83-94, 1998.
- 4 KASPAR, R.; BAQUET, I. G.-; SCHRELBER, N.; RICHTER, J.; NUßBAUM, G.; KOTHE, A. Application of thermomechanical treatment on medium-carbon microalloyed steels continuously cooled from forging from forging temperature. **Materials Technology, Steel Research**, 68, n. 1, p. 27-31, 1997.
- 5 LIN, H.-R.; CHEN, Y.-K. Development of new alloy steel grade which facilitates elimination of process annealing. **Ironmaking and Steelmaking**, London, v. 21, n. 1, p. 27-31, 1994.
- 6 HENNING, H. J.. New developments boost forging performance. **Machine Design**, Cleveland, v.68, p. 97-101, aug. ,1989.
- 7 BAQUET, I. G.-; KASPAR, R.; RICHTER, J.; NUßBAUN, G.; KOTHE, A. Microalloying and a new post forging treatment of medium carbon steels. **Materials Science Forum**, Swizerland, v. 284-286, p. 411-418, 1998.
- 8 ROBERTS, W.. Recent innovations in alloy design and processing of microalloyed steels. HSLA steels, Technology and application. In: **Proceedings of International Conference on Technology and Application of HSLA Steels**, p. 33-41, 1984.
- 9 ATKINS, M. **Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels**. American Society for Metals. Metals Park: ASM, 1980. 260 p.
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams**. Metals Park, Ohio: ASM, 1977. 422 p.
- 11 YAMAKAMI, W. J. **Uma proposta para a flexibilização do forjamento a quente de precisão**. Campinas, 2003. 261p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- 12 YAMAKAMI, W. J.; BUTTON, S. T.; GALLEGOS, J.; LIMA, C. R. P. de; MATSUMOTO, H. Eliminação de tratamento térmico utilizando resfriamento controlado: Uma proposta para flexibilizar o forjamento a quente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 16, 2004, Porto Alegre - RS. **Anais...** Porto Alegre: CBECIMAT, 2004. (CD-ROM).