

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO MICROLIGADO POR SIMULAÇÃO FÍSICA ANÁLOGA AO FORJAMENTO A QUENTE

F. O. Neves; W. Regone; S. T. Button

*Cidade Universitária Zeferino Vaz – Unicamp – Campinas – SP*  
*sergio1@fem.unicamp.br*

Palavras chaves: Comportamento microestrutural; forjamento a quente; transformação de fase.

### RESUMO

Nos processos por forjamento a quente, geralmente, um componente de geometria simples é transformado num outro de geometria mais complexa, em que as ferramentas denominadas matrizes determinam a geometria desejada. No caso dos aços, este processamento ocorre no campo austenítico, onde variáveis como a deformação e temperatura influenciam a microestrutura final obtida. As propriedades mecânicas desejadas no material são regidas pela microestrutura gerada durante a deformação e também pelo produto de decomposição da austenita. Para identificar o comportamento microestrutural de um aço microligado ao V-Ti sob condições análogas as de forjamento a quente, realizaram-se ensaios compressão em uma prensa hidráulica com ferramenta inferior plana e superior em forma de cunha. O mesmo processo foi simulado numericamente utilizando-se o software SuperForge. A análise da microestrutura do produto de decomposição do campo austenítico foi previamente interpretada por ensaios de dilatométrica, através da obtenção do diagrama de transformação por resfriamento contínuo para o aço. Assim, visando investigar os produtos de decomposição da austenita após o processamento a quente no aço foram realizados ensaios de conformabilidade por compressão. As microestruturas finais após a deformação a quente, em conjunto com a transformação de fase da austenita em ferrita, perlita, martensita e bainita determinam as propriedades finais dos produtos forjados.

### INTRODUÇÃO

Aços microligados são conhecidos como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), sendo constituídos por um grupo específico de aços com composição química especialmente desenvolvidas para alcançar elevados valores de propriedades mecânicas. Constitui-se na prática de se adicionar pequenas quantidades de elementos, como o nióbio (Nb), o vanádio (V) e o titânio (Ti). Cada elemento apresenta uma aplicação mais adequada [1 e 2]. O titânio é mais indicado para o controle do tamanho de grão durante o reaquecimento. O nióbio para o controle do tamanho de grão austenítico durante o processamento retardando a recristalização. Os aços microligados ao vanádio podem manter uma grande quantidade de vanádio em solução na austenita e na decomposição da austenita, podendo ser usado para o endurecimento por precipitação, em temperaturas baixas [3 e 4]. O interesse no uso de aços microligados em componentes forjados vem do seu processamento. Os aços microligados conseguem alcançar altos níveis de resistência mecânica e tenacidade simplesmente sendo deixados resfriar ao ar após o processo de forjamento, favorecendo o aumento de resistência mecânica e tenacidade através da precipitação de carbonetos, nitretos e carbonitretos, eliminando-se assim as etapas de tratamento térmico, reduzindo o tempo de processo e diminuindo custos da produção [5 e 6].

A formação da austenita em aços é de considerável interesse técnico no forjamento de aços carbono e é o primeiro estágio significativo na transformação microestrutural em aquecimento. Usualmente em processos de forjamento de componentes são empregados os aços com microestrutura de partida composta principalmente de ferrita e perlita. No campo austenítico, conforme a temperatura é aumentada, compostos presentes como precipitados são dissolvidos. As propriedades finais exibidas por um produto processado termomecanicamente são determinadas pela microestrutura ao final do processamento. Sendo muito importante a forma na qual a transformação de fase se dá durante o resfriamento no processamento termomecânico [7]. A transformação da austenita pode ser separada em dois grupos: o primeiro, onde a transformação é difusional com a

nucleação e o crescimento de novas fases, como ocorre com a ferrita ou a cementita, e o segundo em que a transformação martensítica ocorre por meio de um mecanismo de cisalhamento. As informações sobre a natureza e a quantidade das fases presentes após a transformação podem ser obtidas com diagramas CCT, ou seja, curvas de transformação em resfriamento contínuo que indicam as temperaturas de início e fim de transformação para diferentes taxas de resfriamento [8]. Uma vez que o resfriamento controla as taxas de nucleação e de crescimento em transformações difusionais, e a temperatura de transformação determina a microestrutura final do produto transformado.

Este trabalho tem por objetivo a obtenção do diagrama CCT para um aço microligado e dos produtos de decomposição da austenita, para sua aplicação na determinação das fases microestruturais obtidas após a deformação a quente não-homogênea das amostras ensaiadas.

## MATERIAL E MÉTODO

Neste trabalho realizaram-se ensaios de dilatométrica e ensaios de simulação física por compressão a quente em um aço microligado para observação da evolução microestrutural da austenita. Paralelamente, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de mapear as temperaturas e deformações em todo o volume do corpo deformado.

### Material

No presente projeto utilizou-se um aço comercial médio carbono, adotado em processos de forjamento com resfriamento controlado para fabricação de componentes automobilísticos. A análise química foi realizada na SIFCO S.A. cuja composição química está indicada na **Tabela 1**.

**Tabela 1** - Composição química do material (% em peso).

| C    | Mn   | Si   | Al    | S     | P     | Ti    | V     | N     |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,32 | 1,51 | 0,66 | 0,024 | 0,031 | 0,016 | 0,028 | 0,099 | 0,006 |

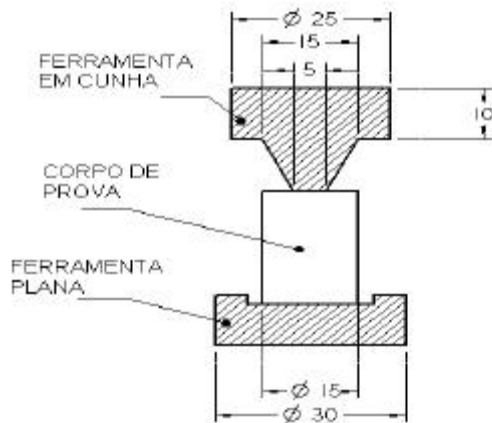
Este material estava na condição de barra "bruta de laminação" a quente resfriada ao ar calmo, com dimensão da seção transversal quadrada de 72,0 mm. Posteriormente o material foi relaminado a quente e resfriado ao ar calmo na SIFCO S.A. até a forma de barras redondas de diâmetro 18,0 mm. A relaminação foi realizada com temperatura na faixa de 1150 a 1200 °C. Para preservar as condições reais de processamento de um aço destinado a processos de forjamento, não foi utilizado nenhum tratamento térmico prévio aos corpos de prova a serem ensaiados [9].

### Ensaio de dilatométrica

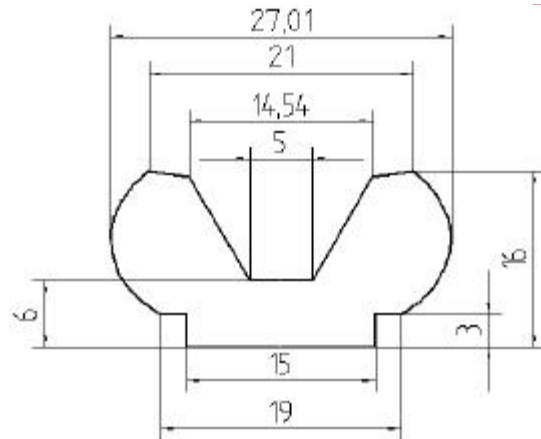
Para a determinação das temperaturas crítica de transformação de fase, foram realizados doze ensaios de dilatométrica com as seguintes características: os corpos de provas eram aquecidos com uma taxa de 2 °C/s até 1150°C, permanecendo nesta temperatura por 10 minutos e, em seguida, submetidos a taxas de resfriamento de 0,5; 2,0; 5,0; 7,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0; 50,0; 75,0; 100,0 °C/s. Em todos os corpos de prova ensaiados por dilatométrica foram realizadas medidas de dureza Vickers, utilizando-se um microdurômetro do tipo Micromet 2105 digital com carga de 1000 g.

### Ensaio de conformabilidade

Corpos de prova com 15mm de diâmetro e 20mm de comprimento foram deformados para a avaliação da conformabilidade. Os ensaios de conformabilidade foram realizados a 1150°C em prensa hidráulica com capacidade de carga de 50 toneladas com ferramenta inferior plana e superior em cunha. A velocidade de deslocamento da ferramenta superior foi de 15 mm/s, o que impôs uma taxa de deformação nominal de 0,93s<sup>-1</sup>. A **Figura 1a** apresenta um esquema do corpo de prova e das ferramentas antes da deformação, e a **Figura 1b**, o corpo de prova após a deformação.



**Figura 1a** - Corpo de prova e ferramentas antes da deformação. Dimensões em mm.



**Figura 1b** - Corpo de prova após a deformação. Dimensões em mm.

Após a deformação, os corpos de prova foram resfriados de dois modos diferentes: resfriados em água e ao ar. As análises da decomposição da austenita foram feitas no sentido longitudinal (mesmo sentido da deformação) em toda extensão do corpo de prova. Para revelar as microestruturas das amostras, foi utilizada técnica convencional: as amostras foram embutidas, lixadas, e finalmente polidas com alumina de granulometria de 1 a 0,5  $\mu\text{m}$  e atacadas com nital 2%.

### Simulação Numérica

A simulação numérica foi conduzida através do software MSC.SuperForge 2000. Foram utilizados 1160 elementos hexaédricos de 8 nós. Foi adotado para o material do corpo de prova um modelo rígido-perfeitamente plástico com limite de escoamento 50 MPa a 1100 °C à taxa de deformação de 0,93  $\text{s}^{-1}$ . Também foram adotados para o material as seguintes propriedades térmicas: condutividade térmica = 46,7 W/(m.K), calor específico = 41,9 J/(kg.K), coeficiente de transferência de calor para o ambiente = 50 kcal/( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ ) e coeficiente de expansão linear = 15,1  $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . A temperatura das ferramentas foi adotada como 27 °C, coeficiente de transferência de calor para o ambiente = 50 kcal/( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ ) e coeficiente de troca de calor peça/ferramentas = 6000 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{°C}$ ). A velocidade de avanço da ferramenta foi estipulada em 14 mm/s e foi utilizada um coeficiente de atrito típico para trabalho a quente de 0,3 [10].

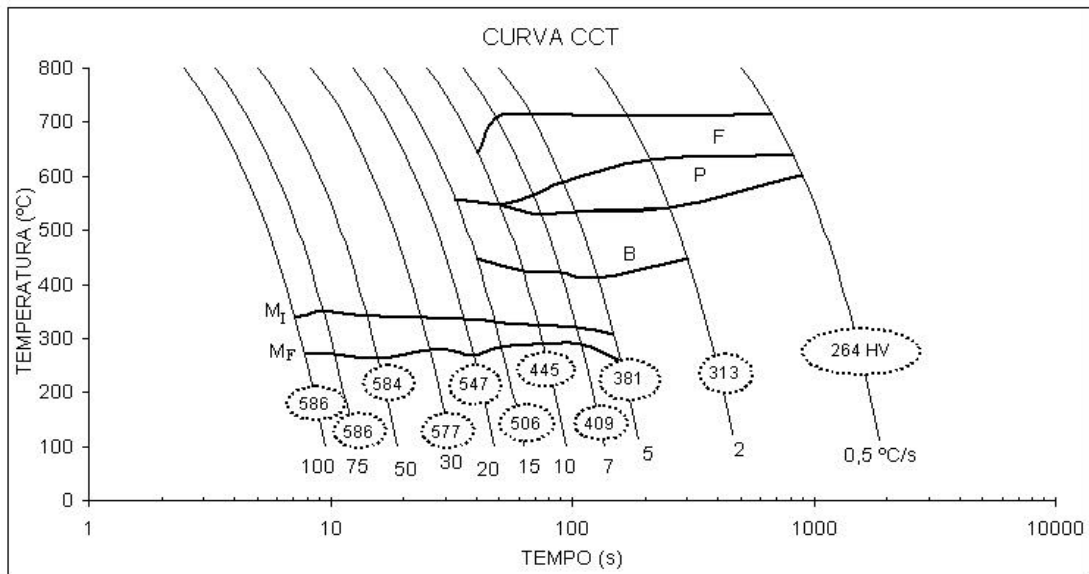
### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho investigou-se o comportamento de um aço microligado com médio teor de carbono. Para isto, foram obtidos o diagrama CCT, feitas observações da microestrutura e a análise da cinética de decomposição da austenita após deformação a quente.

#### Diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo

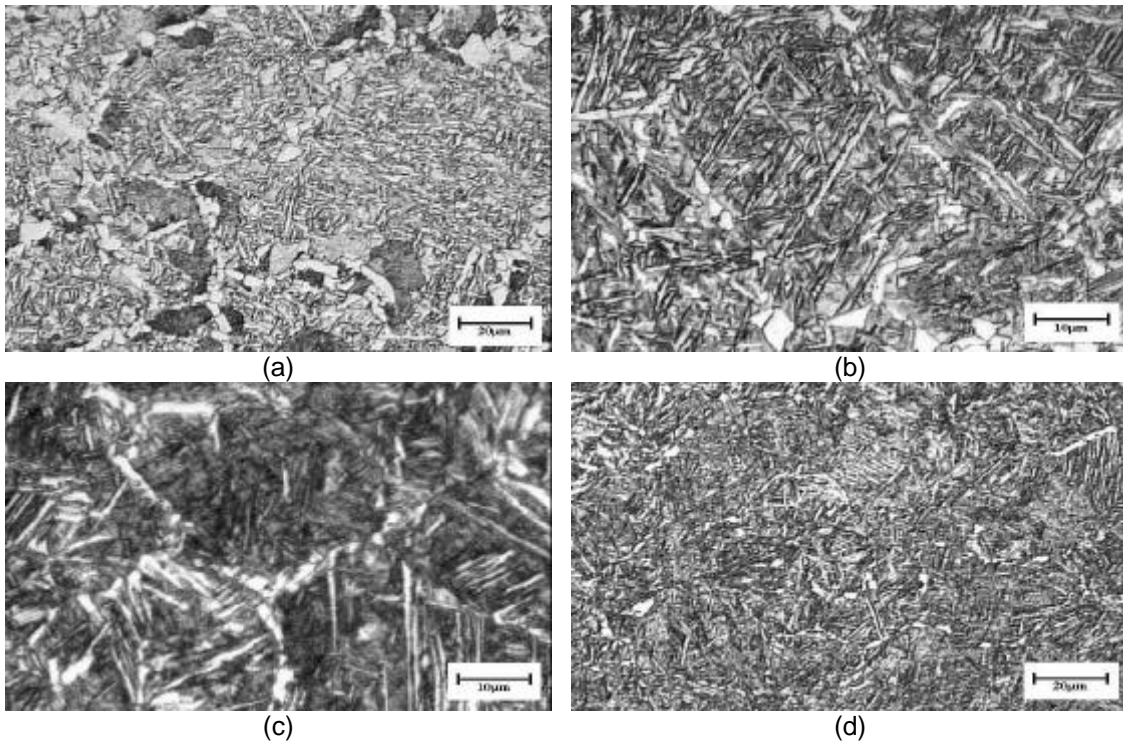
Com os dados dos ensaios de dilatométrica construíram-se as curvas de início e fim de transformação de fase em função das taxas de resfriamento, ou seja, o diagrama CCT (Continuous Cooling Transformation), como mostra a **Figura 2**. Vê-se nesta figura que as temperaturas de transformação de fase variam com as taxas de resfriamento. Para a taxa de resfriamento de 0,5 °C/s a austenita transforma-se em ferrita e perlita. Para taxas de resfriamento entre 2 e 15 °C/s surge gradualmente a bainita e a martensita, com o desaparecimento da fase perlítica. Para taxas de resfriamento maiores que 20 °C/s tem-se apenas a martensita como produto de decomposição da austenita.

Para confirmar e identificar de maneira mais clara as transformações de fases indicadas no diagrama CCT, foram realizadas observações microestruturais nas amostras ensaiadas por dilatométrica.



**Figura 2** - Curvas de transformação por resfriamento contínuo obtidas nos ensaios dilatométricos. Onde: F - ferrita; P - perlita; B - bainita; M - martensita.

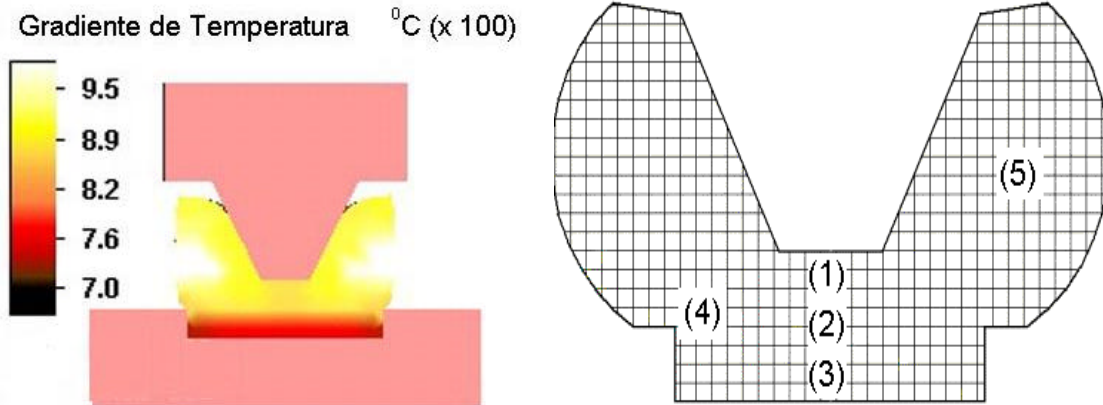
Nas taxas de resfriamento de 2,0 até 5 °C/s tem-se uma estrutura final ferrítica-perlítica, e o aparecimento gradual de bainita na microestrutura, como pode ser visto nas **Figuras 3a** e **3b** e como também mostram os valores obtidos para a microdureza. A **Figura 3a** mostra bainita acicular e grãos de ferrita alotromórfica [11]. Para taxas de resfriamento entre 5 e 10 °C/s a análise metalográfica mostrou a bainita na microestrutura em conjunto com a ferrita, como pode ser observado nas **Figuras 3c** e **3d**.



**Figuras 3a, 3b, 3c e 3d** - Fotomicrografias obtidas de amostras ensaiadas com taxas de resfriamento de 2,0; 5,0; 7,0; e 10,0 °C/s respectivamente.

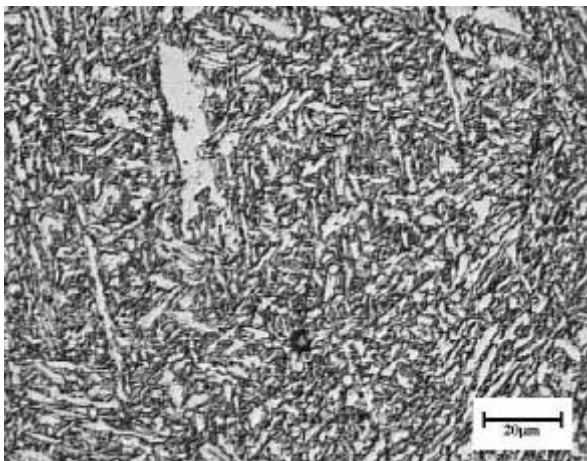
## Ensaio de conformabilidade

Visando investigar os produtos de decomposição da austenita após o processamento a quente do aço microligado ao V-Ti, foram realizados ensaios de conformabilidade por compressão a quente. Após a deformação, os corpos de prova foram resfriados de dois modos diferentes: na água e ao ar. O mesmo processo foi simulado numericamente utilizando-se o software SuperForge. Assim, um mapa do gradiente da temperatura foi obtido pelo método dos volumes finitos, conforme mostrado na **Figura 4**. A **Figura 5** mostra as regiões (1), (2), (3), (4) e (5), onde realizaram-se metalografias para observação da microestrutura após deformação a quente e resfriamento ao ar.

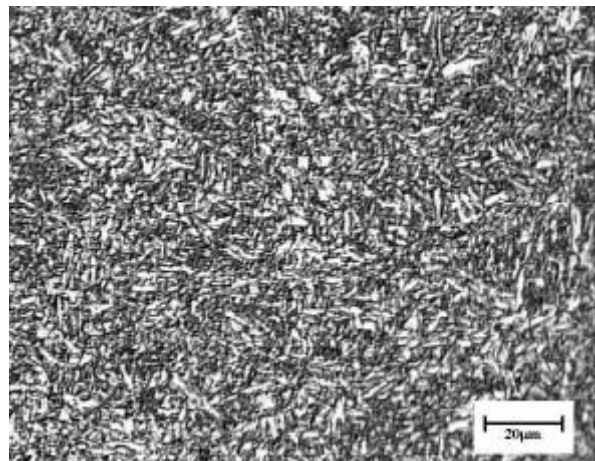


**Figura 4** - Variações de cores mostrando o gradiente de temperatura para o corpo de prova. **Figura 5** - Esquema do corpo de prova; regiões (1), (2), (3), (4) e (5) indicam as regiões observadas.

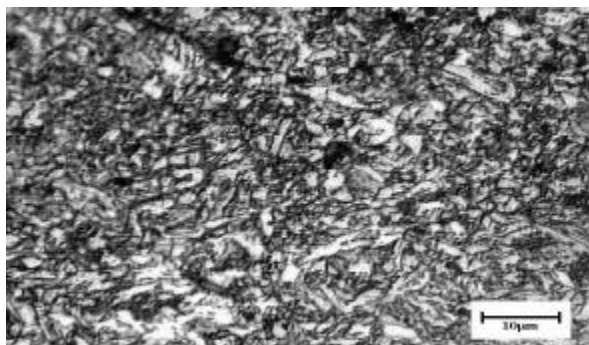
Observa-se nas **Figuras 6 e 9**, uma microestrutura complexa formada por ferrita, perlita e bainita. Para as **Figuras 7, 8, 10 e 11** uma microestrutura ferrítica-perlítica. A região (1) apresenta extração de calor devido ao contato com a ferramenta superior. Este contato é tanto maior quanto maior é a penetração da ferramenta. Mas a extração de calor nesta região é menor do que a extração na região (3), cujo contato entre corpo de prova e ferramenta é constante. A região (4) apresenta uma extração de calor intermediária entre as regiões (1) e (3) e a região (5) apresenta uma taxa de resfriamento menor, correspondendo apenas à troca de calor com o ambiente. Por esta razão a região (3) apresenta uma taxa de resfriamento que leva à transformação da austenita em bainita e ferrita, enquanto a região (5) não apresenta a presença de bainita. A região (1) também apresenta a presença de bainita, porém numa proporção menor que a região (3). A região (2) apresenta, então, um nível intermediário de presença de bainita. Já a região (4) praticamente não apresenta ferrita e perlita. Na decomposição da austenita após deformação a quente e resfriamento em água foram observadas apenas regiões martensíticas em todo o volume do corpo de prova.



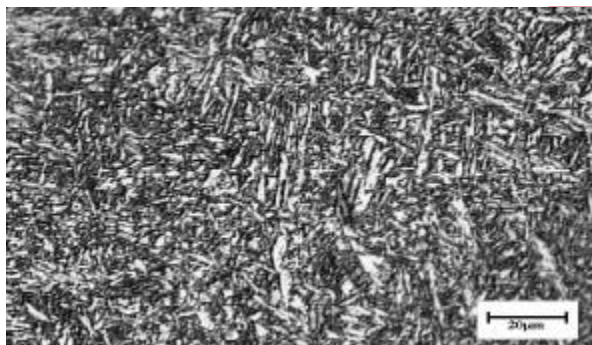
**Figura 6** - Fotomicrografia mostrando microestrutura da região (1).



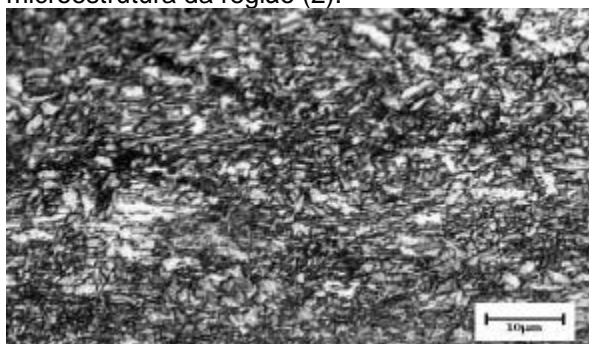
**Figura 7** - Fotomicrografia mostrando microestrutura da região (2).



**Figura 8** - Fotomicrografia mostrando microestrutura da região (2).



**Figura 9** - Fotomicrografia mostrando microestrutura da região (3).



**Figura 10** - Fotomicrografia mostrando microestrutura da região (4).



**Figura 11** - Fotomicrografia mostrando microestrutura da região (5).

## CONCLUSÕES

O diagrama CCT mostra a fases geradas devido as taxas de resfriamento impostas.

O Método dos Volumes Finitos aplicado através do software SuperForge nos fornece o mapa do gradiente de temperaturas, a partir do qual se pode estimar as taxas de resfriamento do material.

O ensaio de conformabilidade nos fornece os produtos da decomposição da austenita obtidos após a deformação a quente.

Nas regiões de contato entre o corpo de prova e as ferramentas foi detectada a presença de bainita, tanto mais acentuada quanto maior o tempo de contato. Nas regiões onde não ocorreu contato entre a peça e a ferramenta não foi detectada a presença de bainita.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – e à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio dado ao desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] GENTILE, F. C. E S. T. BUTTON - Estudo Do Processo De Cross-Wedge Rolling Para A Produção De Eixos Escalonados Com Aços Microligados; Trabalho apresentado no XXI Senafor, 23 e 24/10/2001, Gramado, RS.
- [2] WOODHEAD, J. H. e KEOWN, S. R.; Em HSLA Steels: Metallurgy and Applications; ASM International, Beijing; China; p. 15; 1985.
- [3] DeArdo, A. J.; Em 8th Process Technology Conference Proceeding, Iron and Steel Society, Warrendale; p.67; 1988.
- [4] PALMIERE, E. J.; Precipitation Phenomena in Microalloyed Steels.; Metall. Trans.; V7a; p.915-923; 1976.
- [5] CUDDY, L. J.; Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite. Eds. A. J. DeArdo, G. A. Ratz and P. J. Wray; AIME; Warrendale; p. 129; 1982.

- [6] ALBIERO, W. *Metalurgia ABM*. v.37, n.281, p.192, 1981.
- [7] GARCIA, C. I. e DeArdo. A. J. ; *Metallur. Transactions*; Vol. 12A; p. 521. 1981.
- [8] PENALBA, F. ; GARCIA DE ANDRÉS, C. ; CARSI, M. E ZAPIRAN F.; *Journal of Materials Science* ; V.31; p.3847-3852; 1996.
- [9] OLIVEIRA, M. A. F.; Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos; São Carlos – SP. 2001.
- [10] OH, S.I.; WU, W.T. and ARIMOTO, K.; *Recent Development in Process Simulation for Bulk Forming Processes*; *J. Mat. Proc. Technology*; Vol. 111; pp. 2-9; 2001.
- [11] BHADESHIA, H. K. D. H.; *Some phase transformations in steels. Materials Science and Technology*; Vol. 15; jan. 1999.

## **ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURAL BEHAVIOR OF A MICROALLOYED HOT WORKED STEEL**

### **ABSTRACT**

With hot forging processes, parts with simple shapes are modified to more complex shapes defined by the geometry of the dies. Steels are hot forged in the austenitic region, where variables like strain and work temperature directly affect the forged microstructure. The mechanical properties of the forgings are defined by the microstructure developed with the strain and by the transformation of the austenite. To analyze the microstructural behavior of a V-Ti microalloyed steel under process conditions similar to hot forging, some wedge upsetting tests were taken with a hydraulic press. The same process was simulated with the software SuperForge. The analysis of the microstructure of the austenite decomposition was previously related to some dilatometry tests, with continuous cooling transformation diagram obtained for this steel. To study how the austenite is transformed after hot worked, hot workability tests were taken. The final microstructures after hot working and the transformation of the austenite to ferrite, perlite, martensite and bainite, define the properties of the forgings.

Key words: Microstructural behavior ; hot forging; phase transformation.