

## **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE DE BARRAS DE UM AÇO MICROLIGADO PARA UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

André Itman Filho<sup>1</sup>; Pedro Gabriel Bonella de Oliveira<sup>1</sup>; Rosana Vilarim da Silva<sup>1</sup>; José Benaque Rubert<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória-ES.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

[andrei@ifes.edu.br](mailto:andrei@ifes.edu.br)

### **RESUMO**

*A técnica de forjamento de aços microligados produz peças com excelentes propriedades mecânicas e um menor custo de fabricação. Durante o processo de forjamento diferentes reduções de área são aplicadas conforme a geometria do produto. Com o objetivo de estimar por meio da simulação numérica as deformações plásticas acumuladas, a variação das temperaturas durante o processo e correlacionar com as reduções de área em cada peça, foram fabricadas barras de um aço microligado com composição química similar à da norma API 5L. Inicialmente o metal líquido foi vazado em uma lingoteira e forjado em barras quadradas. Amostras destas barras foram recozidas e posteriormente submetidas à têmpera e revenimento em diferentes temperaturas. Resultados de medidas de dureza e ensaios mecânicos de tração, após os tratamentos térmicos, foram utilizados para alimentar as informações do modelo de simulação numérica e estimar os efeitos do forjamento. Neste trabalho foi utilizado o software de simulação numérica Deform 3D que consiste de um programa com base no método dos elementos finitos e é adequado aos experimentos que envolvem deformações com variação de temperatura. Várias simulações foram realizadas e foi possível identificar o menor grau de deformação associado ao resfriamento mais rápido na região da parte do pé do lingote. Com a utilização deste modelo de simulação numérica será possível estimar a variação de temperatura e sugerir as etapas de deformação durante o forjamento, além das condições para obter as propriedades mecânicas compatíveis com as especificações da norma.*

**Palavras-chave:** Aços microligados; Deform 3D; Simulação numérica de forjamento.

## INTRODUÇÃO

Os aços microligados são utilizados principalmente na indústria automotiva, petroquímica e estrutural. Apresentam quantidades pequenas dos elementos nióbio, titânio e vanádio, que aliados ao processo de manufatura conferem um considerável aumento das propriedades mecânicas no produto final. Estes aços são classificados principalmente pelos valores de tensão de escoamento, resistência máxima à tração e alongamento<sup>(1)</sup>.

Na fabricação de juntas e conexões utilizadas em dutos para transporte de petróleo, o forjamento é a melhor opção de processo, pois produz peças com maior diversidade de geometria e excelentes propriedades mecânicas após tratamentos térmicos. A perda de material é mínima, pois o produto forjado possui as dimensões próximas ao produto final<sup>(2)</sup>.

Durante o processo de forjamento diferentes reduções de área são aplicadas conforme a geometria do produto. Neste caso os efeitos das solicitações mecânicas influenciam as características microestruturais do material. Assim, com o objetivo de estimar por meio da simulação numérica as deformações plásticas acumuladas e a variação das temperaturas durante o processo de forjamento, além de correlacionar com as reduções de área em cada peça, foram fabricadas barras de um aço microligado com composição química similar à da norma API 5L. O processo de forjamento das barras foi reproduzido por meio da simulação numérica executada com o programa DEFORM 3D®. O programa tem como base o método dos elementos finitos e é adequado aos experimentos que envolvem deformações e variação das propriedades físicas dos materiais com a temperatura, podendo indicar as melhores sequências dos processos de conformação mecânica.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O aço microligado foi elaborado em um forno de indução com capacidade para 300 kg na fundição Grupo Metal em Tietê/SP. O metal líquido foi vazado em uma lingoteira de ferro fundido e posteriormente forjado na forma de barras com secção quadrada. Os teores dos elementos químicos foram determinados por meio do espectrômetro de emissão ótica da marca *Oxford Instruments*, modelo *Foundry-Master Pro*. O lingote obtido após o vazamento foi cortado em três partes com pesos

similares, aquecido a 1050 °C e forjado com secção quadrada de aproximadamente 38 mm de aresta e 1500 mm de comprimento. O forjamento foi realizado em uma prensa hidráulica de 500 ton. operando a uma velocidade de 10 mm/s e último passe de deformação na temperatura de 850 °C para refino de grão. Posteriormente as barras foram recozidas a 930 °C por duas horas para homogeneizar a microestrutura.

Na simulação numérica foram reproduzidas as ferramentas, o lingote de aço e quatro aquecimentos durante a conformação do forjamento do pé do lingote. Para o coeficiente de transferência de calor entre as partes e para a emissividade do aço foram adotados os valores indicados pelo banco de dados de materiais do programa.

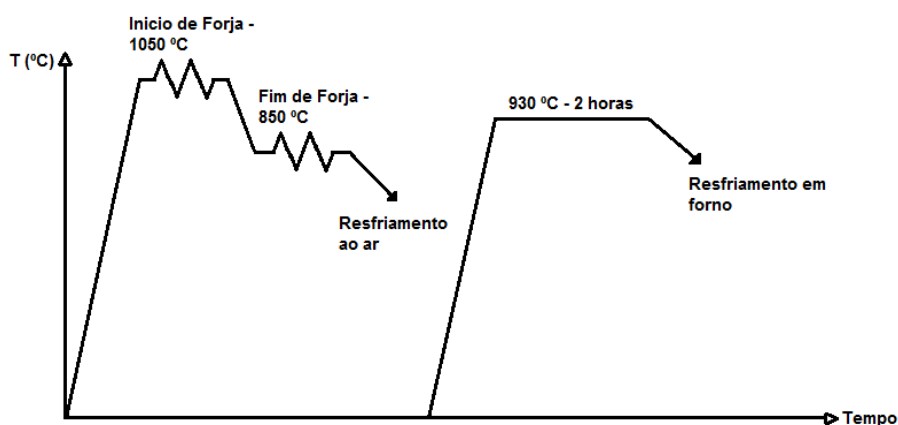
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química do aço microligado está apresentada na Tabela 1.

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Ni	Nb	Ti	V
0,11	0,09	0,33	0,03	0,02	0,37	0,05	0,006	0,4	0,08	0,01	0,01

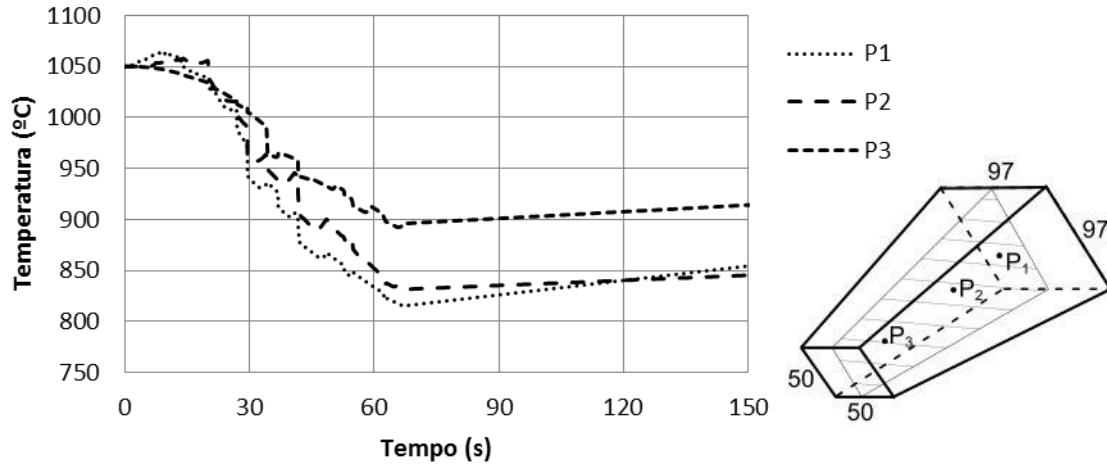
O processo de aquecimento do pé do lingote é mostrado na Figura 1.



**Figura 1** - Desenho esquemático do processamento termomecânico das barras do aço microligado.

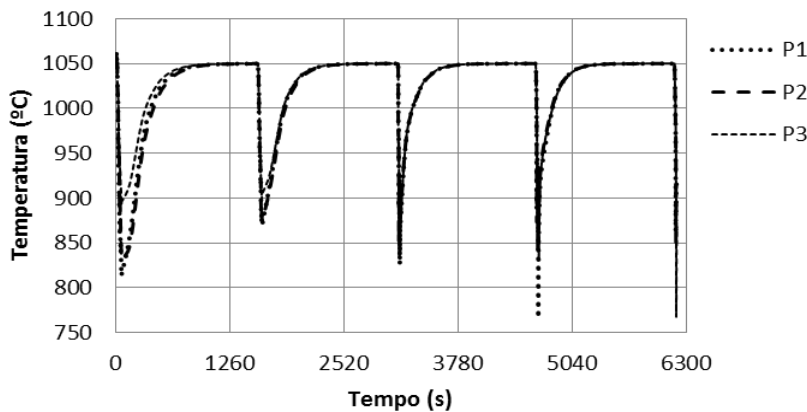
A Figura 2 mostra a variação da temperatura com relação ao tempo de forjamento do lingote onde a temperatura mínima de 850 °C permitida na operação ocorre em

torno de 60 segundos. Na simulação a mudança da posição do lingote durante o forjamento é instantânea, diferente da operação real, onde as sucessivas rotações do lingote consomem um tempo maior para o operador realizar a manobra.



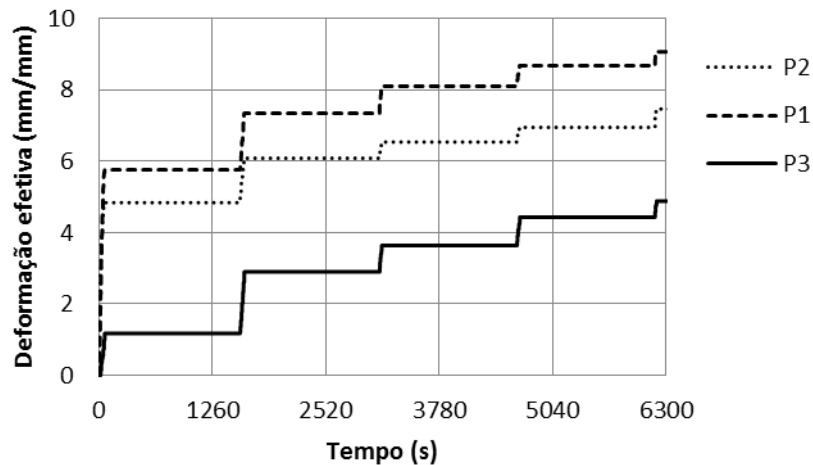
**Figura 2** - Variação da temperatura com o tempo na primeira etapa do forjamento nas regiões P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub> no interior do lingote.

Neste caso também foram consideradas sete etapas de operação após quatro aquecimentos para conformar o pé do lingote, além do resfriamento ao ar, reaquecimento até 930° e resfriamento final. Este desenvolvimento mostrou boa correlação com a evolução das temperaturas e deformações observadas no processo real executado. A barra conformada atingiu valores próximos de 1290 mm de comprimento e 38 mm de aresta na seção transversal quadrada. Na Figura 3 é apresentada a evolução das temperaturas e da deformação plástica efetiva nos três pontos internos no pé do lingote.



**Figura 3.** Evolução da temperatura durante as quatro fases de aquecimento.

A Figura 4 mostra a deformação plástica efetiva acumulada e não considera o efeito da recristalização que ocorre durante os reaquecimentos.



**Figura 4.** Evolução da deformação plástica efetiva acumulada.

A simulação numérica mostrou boa correlação com a evolução do processo de fabricação das barras no que se refere à distribuição e evolução de temperaturas e as deformações plásticas efetivas. Durante o processo de forjamento diferentes reduções de área são aplicadas conforme a geometria do produto e os efeitos das solicitações mecânicas influenciam as características microestruturais do material. Desta forma é possível por meio deste modelo de simulação numérica estimar a variação de temperatura e sugerir as etapas de deformação durante o forjamento. A utilização do Deform 3D permite o controle das condições do processo e das transformações de fases, para conseguir as propriedades mecânicas compatíveis com as especificações da norma.

## CONCLUSÕES

- A utilização do Deform 3D mostra uma correlação adequada entre o processo real e o simulado de forjamento;
- Por meio da simulação é possível estimar a características microestruturais e o controle das propriedades mecânicas dos aços;

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fapes pelo apoio financeiro, à Fundação Grupo Metal pelas amostras do aço forjado, à Finep e à CAPES pela bolsa de mestrado.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Fragiél A., Schouwenaarf R., Guardián R., Pérez R. Microstructural Characteristics of Different Commercially Available API 5L X65 Steels. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*. v.8, p.115-119, 2005.
- [2] Takada, H.; Koyasu, Y. Present status and future overlook of microalloyed forging steels. *Nippon Steel Technical Report*. n. 64, Jan 1995.

## **NUMERICAL PROCESS OF FORGING HOT BARS OF A MICROALLOYED STEEL FOR USE IN PETROCHEMICAL INDUSTRY**

### **ABSTRACT**

The controlled forging of the steels produces components with excellent mechanical properties and lower manufacturing cost. During the forging different area reductions are applied as the geometry of the product. In order to estimate by numerical simulation the accumulated plastic deformation, the variation of temperature during the process and correlate with the area reductions, microalloyed steel bars were manufactured with chemical composition similar to the API 5L standard. Initially, the molten metal was poured into a mold and forged into square bars. Samples from these bars were annealed and subjected to quenching and tempering at different temperatures. Results of hardness measurements and tensile test, after heat treatments, were used to feed the information of the numerical simulation model to estimate the effects of forging. In this study we used the numerical simulation software Deform 3D, that is a program based on the finite element method and is suitable for experiments involving deformations with different temperatures. Several simulations were performed and it was possible to identify the lowest degree of deformation associated with cooling in the ingot regions. By using this numerical

simulation model it is possible to estimate the temperature and to suggest deformation steps during forging, besides the conditions for the mechanical properties compatible with the standard.

**Keywords:** Microalloyed steels; Deform 3D; Numerical Forging.