



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Ramos Stein, Cristiano; Hermenegildo, Tahiana Francisca; Silva Araújo, Fernando Gabriel da; Barros Cota, André

Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE1045

Rem: Revista Escola de Minas, vol. 58, núm. 1, enero-marzo, 2005, pp. 51-56

Escola de Minas

Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416463009>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE1045

Cristiano Ramos Stein

*Mestre em Engenharia de Materiais - REDEMAT/UFOP*

Tahiana Francisca Hermenegildo

*Mestranda da REDEMAT/UFOP*

Fernando Gabriel da Silva Araújo

*Professor Adjunto do DEFIS/ICEB/UFOP e da REDEMAT/UFOP*

André Barros Cota

*Professor Adjunto do DEFIS/ICEB/UFOP e da REDEMAT/UFOP*

*E-mail: abcota@iceb.ufop.br*

### Resumo

Estudou-se o efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE 1045, na condição de temperado e revenido a 600°C. A microestrutura das amostras austenitizadas a 900 e 950°C e temperadas imediatamente ao atingir essas temperaturas, têm a microestrutura constituída de martensita refinada, com pequena fração volumétrica de ferrita poligonal e ferrita acicular. Os valores dos limites de resistência e escoamento das amostras revenidas são fortemente dependentes do tempo de encharque. As transformações fases no revenimento têm efeitos similares sobre os limites de resistência e escoamento das amostras revenidas. Tais amostras têm altos valores da razão de escoamento (valor médio de 0,91). Os valores do produto do limite de resistência pelo alongamento percentual variaram de 32589MPa.% a 24150MPa.%. A otimização das propriedades mecânicas do aço SAE1045, com alta resistência mecânica e boa ductilidade, foi obtida com austenitização a 900°C, têmpera imediatamente após atingir essa temperatura e revenimento a 600°C por 100s.

**Palavras-chaves:** aço SAE1045, rápida austenitização, têmpera e revenimento, propriedades mecânicas.

### Abstract

*This work studied the effect of fast austenitization on the mechanical properties of SAE1045 steel, as quenched and tempered. The samples austenitized at 900 and 950°C, and immediately quenched after reaching these temperatures, showed microstructures of refined martensite, with small volume fractions of polygonal and acicular ferrites. The values of the tensile and yield strengths of the tempered samples are strongly dependent on the soaking time. The phase transformations during the tempering have similar effects on the tensile and yield strengths of the tempered samples. These samples have high yield ratio values (average of 0.91). The values of the product of the tensile strength for the percent elongation varied from 32589MPa.% to 24150MPa.%. The optimization of the mechanical properties of the SAE1045 steel, with high strength and ductility, was achieved for the austenitization at 900°C, immediately quenched after reaching that temperature, and tempering at 600°C for 100s.*

**Keywords:** SAE1045 steel, fast austenitization, quenched and tempered, mechanical properties.

## 1. Introdução

A formação da austenita é uma ocorrência inevitável durante os tratamentos termomecânicos e soldagem dos aços. O fenômeno de austenitização tem sido estudado por alguns pesquisadores, que procuram desenvolver modelos para explicar a cinética de austenitização no aquecimento isotérmico e não isotérmico, a partir de uma dada microestrutura ou de microestruturas dissimilares (perlítica, martensítica, ferrítica, ferrita + perlita<sup>[1,2,3,4]</sup>).

A condição inicial da austenita determina o desenvolvimento da microestrutura final e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas finais do aço. Assim, o comportamento e as propriedades mecânicas dos aços dependem, não somente da natureza da decomposição da austenita no resfriamento contínuo (a fase final do aço), mas também da cinética de reaustenitização, ou seja, se a fase austenítica é homogênea ou heterogênea, e, ainda, de seu tamanho de grão, da taxa de aquecimento, da presença de inclusões não metálicas e da distribuição das fases<sup>[1]</sup>.

Para os aços C-Mn temperados e revenidos, o estudo do efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas é de grande interesse científico, devido aos poucos trabalhos encontrados na literatura, e também de grande interesse tecnológico, devido ao seu potencial uso na fabricação de tubos para prospecção<sup>[5]</sup>.

Nesse trabalho, foi estudado o efeito da influência da rápida austenitização, de diferentes temperaturas de austenitização e de tempos de revenimento sobre a microestrutura final e propriedades mecânicas, avaliadas pela medição de dureza Vickers e por ensaios de tração, de um aço de SAE1045, temperado e revenido.

## 2. Procedimento experimental

O aço SAE1045, fornecido pela GE-OSOL, foi recebido na forma de barras com seção retangular (5mmx10mm) e

comprimento de 50mm e tem sua composição básica dada na Tabela 1. A microestrutura do aço como recebido é constituída essencialmente de ferrita e perlita, com dureza Vickers de 175.

Nos tratamentos térmicos de austenitização, têmpera e revenimento, utilizou-se um forno tubular com retorta de quartzo, na posição vertical, com módulo de controle de temperatura realizado por um microcomputador e atmosfera natural. O controle de temperatura foi feito com o auxílio de um termopar inserido nas amostras, do tipo K, chromel-alumel, de 1,5mm de diâmetro, com isolamento mineral e revestimento de aço inoxidável, e com a aquisição dos perfis térmicos de aquecimento e resfriamento.

No processo de austenitização, escolheram-se as temperaturas de 900 e 950°C, com intervalos de tempo de encharque de 0, 100 e 1800s. Foi determinado, para cada temperatura de austenitização utilizada e com um termopar inserido no centro da amostra, o intervalo de tempo para que a amostra atinja o equilíbrio térmico com o forno e, a partir desse valor, é que foi considerado o tempo de encharque. A taxa de aquecimento medida, entre 600 e 900°C, para as duas temperaturas de austenitização, foi praticamente a mesma, ou seja, de 5,0°C/s, sendo o intervalo de tempo de aquecimento de aproximadamente 150s.

As amostras temperadas foram revenidas a uma temperatura fixa de 600°C, em tempos de 100 e 1800s, e em atmosfera natural.

A caracterização microestrutural das amostras foi desenvolvida através da microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), em amostras atacadas com nital 2%.

As propriedades mecânicas das amostras foram avaliadas por ensaios de dureza Vickers, com carga de 98,1N, e de

tração, realizados em corpos-de-prova usinados diretamente das amostras temperadas e revenidas, segundo norma ASTM<sup>[6]</sup> (22mm de comprimento), a uma taxa de deformação de 0,015s<sup>-1</sup>, à temperatura ambiente.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1 Amostras como temperadas

A Figura 1 mostra as fotomicrografias em MEV das amostras austenitizadas a 900 e 950°C e temperadas após os tempos de encharque de 0 e 1800s. As Figuras 1(a) e 1(c) mostram que a microestrutura das amostras temperadas, ao atingir a temperatura de austenitização, é constituída de martensita refinada, devido ao pequeno crescimento dos grãos austeníticos, com pequena fração volumétrica de ferrita poligonal, e ferrita acicular. A ferrita acicular e poligonal se forma devido à baixa temperabilidade martensítica da austenita com pequeno tamanho de grão. Nas Figuras 1(b) e (d), observa-se que a microestrutura é essencialmente martensítica e mais grossa.

A Figura 2 mostra a evolução do tamanho de grão austenítico com uma função de temperatura de austenitização e do intervalo de tempo de encharque. Observa-se que, a uma dada temperatura de austenitização, o tamanho de grão austenítico aumenta com o intervalo de tempo de encharque e que, para o mesmo tempo de encharque, o tamanho de grão austenítico aumenta com a temperatura de austenitização.

### 3.2 Amostras temperadas e revenidas

A influência da temperatura de austenitização, do tempo de encharque e do

Tabela 1 - Composição em % em peso do aço 1045.

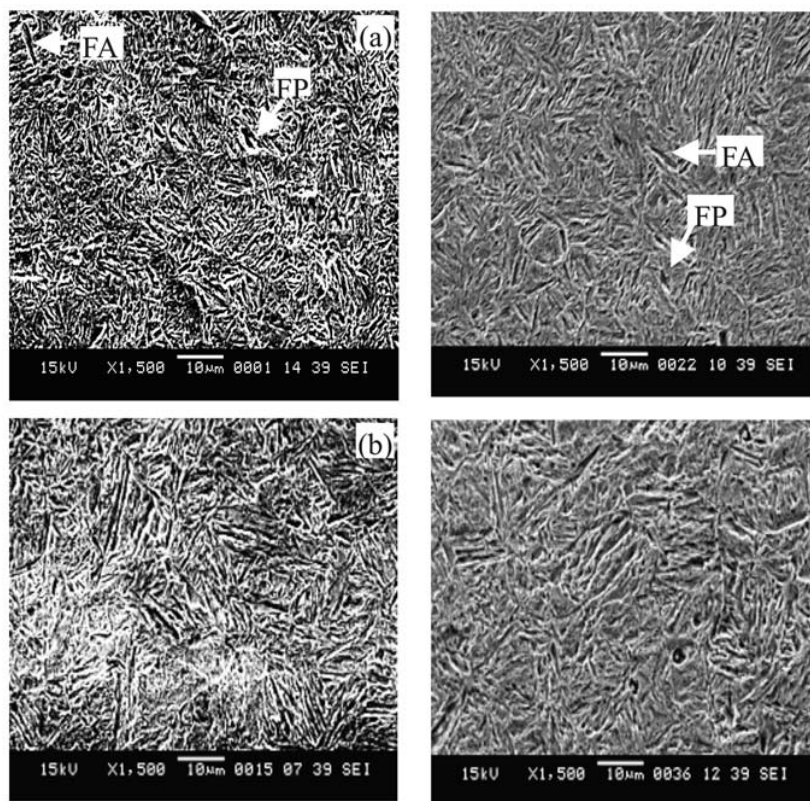
C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
0,46	0,68	0,012	0,008	0,2	0,01	0,02	0,02	0,002

tempo de revenimento sobre a evolução microestrutural pode ser avaliada a partir dos valores de dureza Vickers das amostras temperadas e revenidas (Figura 3). Nessa Figura, verifica-se que os valores de dureza Vickers diminuem com o aumento do intervalo de tempo de revenimento, para todas as condições de austenitização. Como a temperatura de revenimento é fixa, 600°C, essa redução de dureza está associada à precipitação de carbonetos da matriz martensítica supersaturada e ao fenômeno de recuperação, que tem como força motriz a energia de deformação associada à densidade de discordâncias geradas na transformação martensítica.

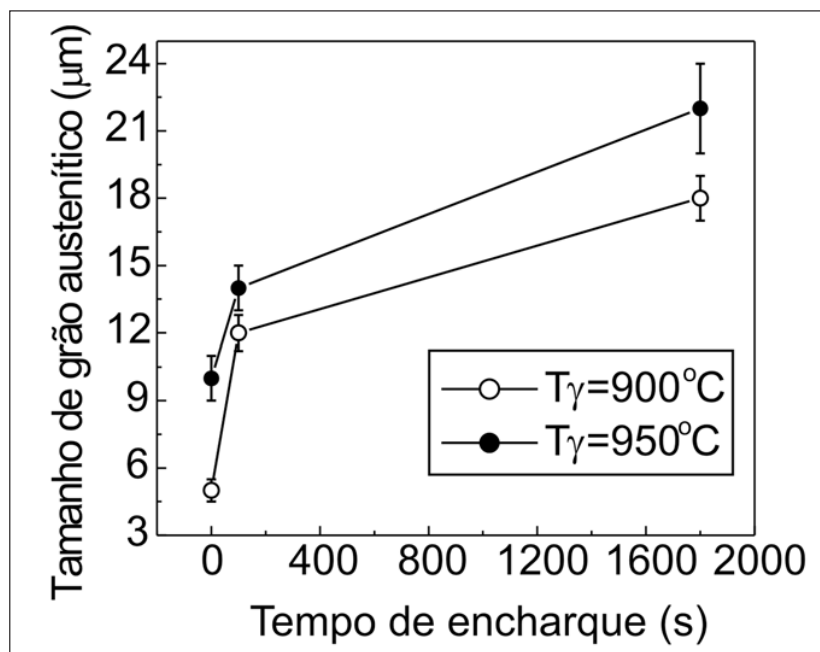
A amostra austenitizada a 900°C, com um tempo de aquecimento de aproximadamente 150s e tempo de encharque de 0s, tem uma dureza Vickers de 414, para o intervalo de tempo de revenimento de 100s a 600°C. Esse resultado é muito próximo do valor médio de dureza Vickers obtido por Ferreira et al.<sup>[5]</sup>, 407, na condição mais adequada à produção de hastes de perfuração para sondagem geológica, utilizando o aço SAE1045.

A Figura 4 mostra o limite de resistência (LR) das amostras temperadas e revenidas, para os dois tempos de revenimento a 600°C, como uma função do tempo de encharque. Para o tempo de encharque de 0s, ou seja, têmpera após a amostra atingir a temperatura de austenitização, verifica-se que o limite de resistência da amostra austenitizada a 900°C é maior que a da amostra austenitizada a 950°C. Esse fato pode ser explicado pelo maior tamanho de grão austenítico da amostra austenitizada a 950°C em comparação com a amostra austenitizada a 900°C. Na têmpera, a martensita oriunda da austenita possui tamanho médio dos seus pacotes relacionado com o tamanho médio dos grãos austeníticos. Assim, quanto menor o tamanho médio do grão austenítico, menor será o tamanho médio dos pacotes de martensita, resultando em um maior limite de resistência.

Para o tempo de encharque de 100s, verifica-se que a temperatura de austen-



**Figura 1** - Fotomicrografias em MEV das amostras austenitizadas 900°C e temperadas após o tempo de encharque de (a) 0s e (b) 1800s; austenitizadas 950°C e temperadas após o tempo de encharque de (c) 0s e (d) 1800s. Ataque com nital 2%. FP - ferrita poligonal; FA - ferrita acicular.



**Figura 2** - Evolução do tamanho de grão austenítico médio com o tempo de encharque, para as temperaturas de austenitização de 900 e 950°C.

tização não influenciou o limite de resistência das amostras. O aumento do tempo de encharque, antes da têmpera, aumenta o tamanho de grão austenítico para uma dada temperatura de austenitização (Figura 2), aumentando a temperabilidade martensítica. Para o tempo de encharque de 100s, a microestrutura é essencialmente martensítica, o que resulta em um maior limite de resistência, quando comparado com as amostras austenitizadas e temperadas imediatamente após atingir a temperatura de austenitização.

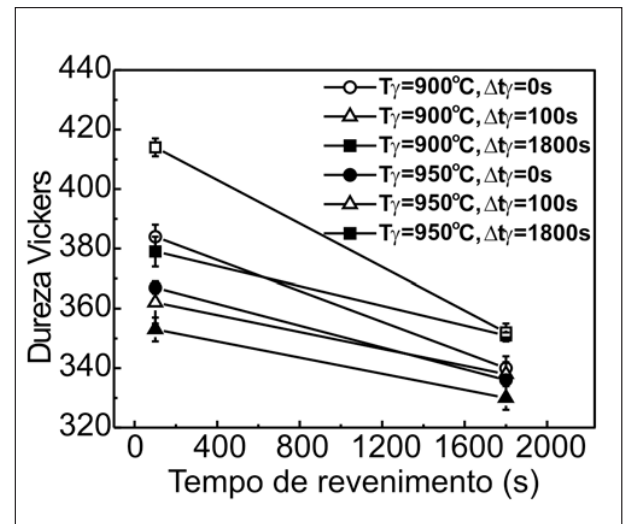
Para o tempo de encharque de 1800s, o limite de resistência da amostra austenitizada a 950°C e temperada, praticamente, não se altera com o aumento do tempo de encharque de 100s para 1800s. A amostra austenitizada a 900°C apresenta uma redução no limite de resistência quando o tempo de encharque aumenta de 100 para 1800s, devido ao aumento do tamanho de grão austenítico e, conseqüentemente, em maiores pacotes de martensita na estrutura após a têmpera<sup>[7]</sup>.

A Figura 5 mostra o limite de escoamento (LE), medido a 0,2% de deformação plástica, das amostras temperadas e revenidas como uma função do tempo de encharque, para os dois tempos de revenimento a 600°C. Essa figura mostra que o limite de escoamento tem um comportamento similar ao do limite de resistência (Figura 4).

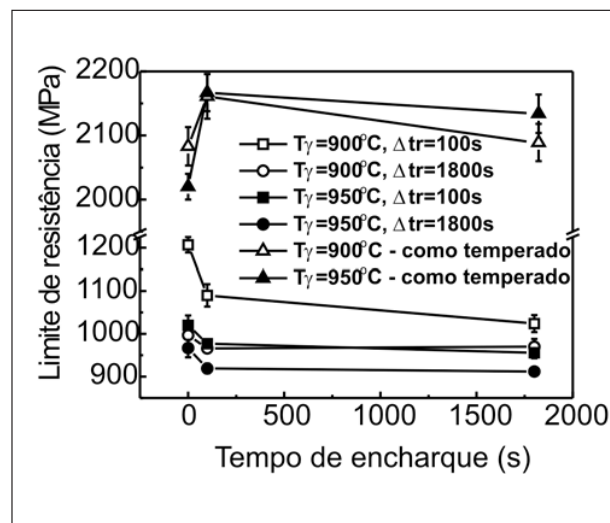
Nas Figuras 4 e 5, verifica-se que os limites de resistência e de escoamento diminuem com o aumento do tempo de revenimento a 600°C, para todas as condições de austenitização. Como a temperatura de revenimento é fixa, 600°C, a redução nessas propriedades mecânicas é ditada pela cinética de revenimento, ou seja, um maior tempo de revenimento implica na formação de microestrutura constituída, provavelmente, de carbonetos coalescidos mais ferrita com morfologia acicular. Além

desse fato, tem-se o fenômeno de recuperação, que tem, como força motriz, a energia de deformação associada à densidade de discordâncias geradas na transformação martensítica, que irá amaciar a microestrutura<sup>[7,8]</sup>.

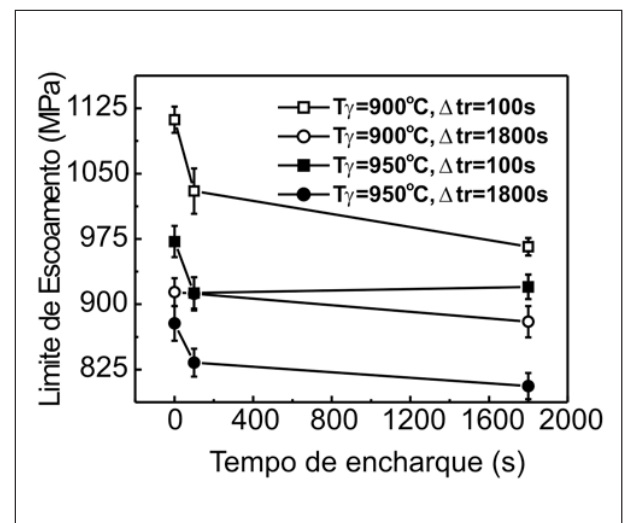
Para a amostra austenitizada a 900°C, em um tempo de encharque de 0s, a estrutura martensítica é constituída de finas ripas, com pequenas quantidades de ferrita acicular e ferrita poligonal (Figura 1). Essa estrutura, quando revenida por 100s a 600°C, sofre uma rápida recuperação com a aniquilação das discordâncias geradas na transformação martensítica e



**Figura 3** - Dureza Vickers das amostras temperadas e revenidas como uma função do intervalo de tempo de revenimento a 600°C, para as temperaturas de austenitização de 900 e 950°C e para os três tempos de encharque ( $\Delta t_\gamma$ ).



**Figura 4** - Limite de resistência das amostras temperadas e revenidas como uma função do intervalo de tempo de encharque, para as temperaturas de austenitização de 900 e 950°C e para os dois intervalos de tempo de revenimento ( $\Delta t_r$ ) a 600°C.



**Figura 5** - Limite de escoamento das amostras temperadas e revenidas como uma função do intervalo de tempo de encharque, para as temperaturas de austenitização de 900 e 950°C e para os dois intervalos de tempo de revenimento ( $\Delta t_r$ ) a 600°C.

uma estrutura de grãos fina e acicular é desenvolvida<sup>[8]</sup>. Essa estrutura resulta nos valores altos de limite de resistência e de escoamento, quando comparados com as amostras temperadas e revenidas nas outras condições de austenitização e revenimento.

A Figura 6 mostra a correlação linear entre o limite de resistência e o de escoamento, com a inclinação da reta aproximadamente igual a 1,0. Como esse valor da inclinação da reta igual à unidade, a redução no limite de escoamento é sempre igual à redução no limite de resistência, das amostras temperadas e revenidas, para as diferentes condições de austenitização. Isto implica que os efeitos das transformações fases no revenimento sobre os limites de resistência e escoamento são os mesmos. A razão de escoamento (LE/LR) é um parâmetro que permite avaliar, indiretamente, a taxa de encruamento. Verifica-se que essa razão tem uma tendência a diminuir, de forma muito suave, com o aumento do tempo de revenimento. Os valores de LE/LR variam de 0,95 a 0,88, ou seja, pode-se considerar que o tempo de revenimento tem um efeito muito pequeno sobre a razão de escoamento, para todas as condições de austenitização utilizadas nesse

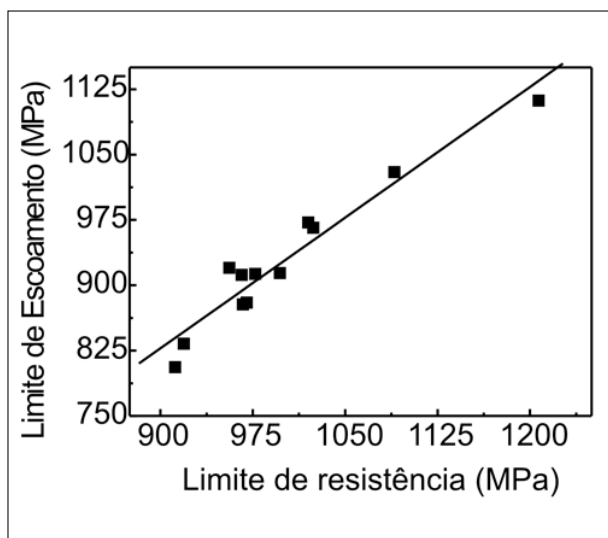
trabalho. O alto valor da razão de escoamento sugere que as amostras temperadas e revenidas têm uma baixa taxa de encruamento<sup>[9]</sup>.

A Figura 7 mostra o alongamento percentual das amostras temperadas e revenidas como uma função do tempo de revenimento, para todas as condições de austenitização. Verifica-se que o alongamento variou entre 24 e 29% e tem uma tendência de aumentar com o aumento do tempo de revenimento, para todas as condições de austenitização. As amostras austenitizadas em 900 e 950°C, em um tempo de encharque de 0s, e revenidas em 100 e 1800s a 600°C, têm um alongamento percentual maior que o das amostras austenitizadas com intervalos de tempo de encharque maiores. Para as amostras temperadas imediatamente após atingir a temperatura de austenitização, a estrutura martensítica, oriunda de grãos austeníticos pequenos, é constituída de ripas muito finas. Essa estrutura, quando revenida a 600°C, sofre uma rápida recuperação com a aniquilação das discordâncias geradas na transformação martensítica e uma estrutura de grãos fina e acicular é desenvolvida<sup>[7,8]</sup>. Essa estrutura resulta nos valores maiores dos alongamentos percentuais.

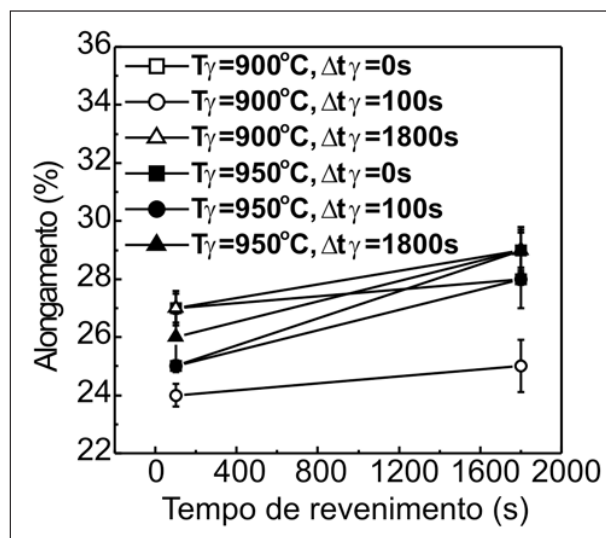
A otimização das propriedades mecânicas, ou seja, alta resistência mecânica associada a uma alta ductilidade, pode ser avaliada do produto do limite de resistência pelo alongamento percentual<sup>[9]</sup>. Esse produto, como uma função do tempo de encharque, para as duas temperaturas de austenitização, e os dois tempos de revenimento são mostrados na Figura 8. Verifica-se que a otimização das propriedades mecânicas para o aço SAE1045 é obtida com o tratamento térmico realizado a uma temperatura de austenitização de 900°C, tempera imediatamente após atingir esta temperatura, e revenimento por 100s, para a temperatura de revenimento utilizada de 600°C.

## 4. Conclusões

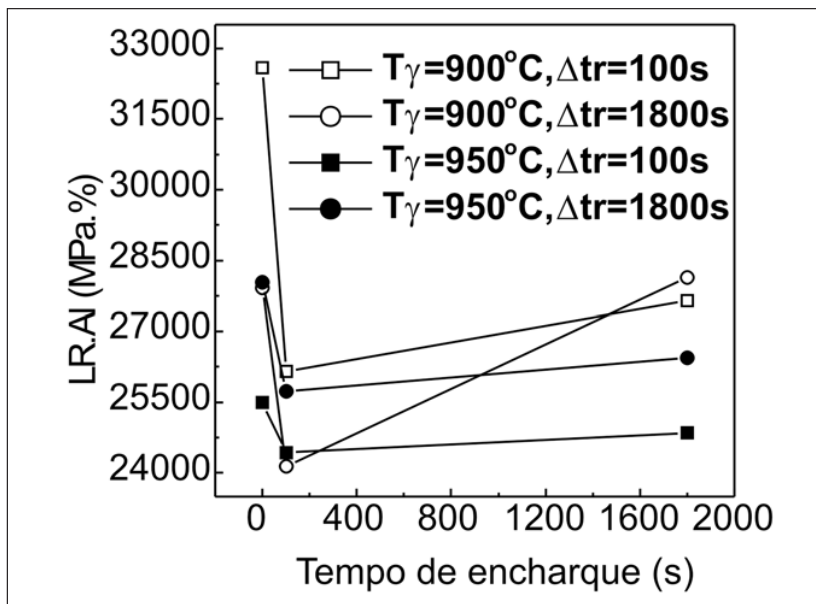
A microestrutura das amostras temperadas é constituída, essencialmente, de martensita, sendo que as amostras austenitizadas a 900 e 950°C e temperadas imediatamente ao atingir essas temperaturas, têm a microestrutura constituída de martensita refinada, devido ao pequeno crescimento dos grãos austeníticos, com pequena fração volumétrica de ferrita poligonal e ferrita acicular.



**Figura 6** - Correlação entre os limites de escoamento e de resistência, para todas as condições de austenitização e revenimento.



**Figura 7** - Alongamento percentual das amostras temperadas e revenidas como uma função do intervalo de tempo de revenimento a 600°C, para as temperaturas de austenitização de 900 e 950°C, e para os três intervalos de tempo de encharque ( $\Delta t_\gamma$ ).



**Figura 8** - Produto do limite de resistência pelo alongamento percentual das amostras temperadas e revenidas como uma função do intervalo de tempo de encharque, para as temperaturas de austenitização de 900 e 950°C e para os dois intervalos de tempo de revenimento ( $\Delta t_r$ ) a 600°C.

As amostras temperadas e revenidas apresentam uma redução nos limites de resistência e de escoamento com o aumento do tempo de encharque, nas condições de revenimento. Para o mesmo tempo de revenimento, as amostras austenitizadas a 900°C sempre apresentaram um maior LR e LE, comparadas com as amostras austenitizadas a 950°C.

Os efeitos das transformações fases no revenimento sobre os limites de resistência e escoamento, das amostras temperadas e revenidas, são os mesmos. Estas apresentam altos valores da razão de escoamento (valor médio de 0,91), o

que sugere que elas têm baixa taxa de encruamento.

O alongamento percentual variou entre 24 e 29%, sendo pequeno o efeito do tempo de revenimento a 600°C.

A otimização das propriedades mecânicas do aço SAE1045, alta resistência mecânica associada a uma boa ductilidade, é obtida com o tratamento térmico realizado a uma temperatura de austenitização de 900°C, têmpera imediatamente após atingir essa temperatura, e revenimento por 100s, para a temperatura de revenimento utilizada de 600°C.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo suporte financeiro a esse trabalho.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] CABALLERO, F.G. et al. Modelling of kinetics of formation in steels with different initial microstructure. *ISIJ International*. v.41, p. 1093-1102, 2001.
- [2] JACOT, A. et al. Modelling of reaustenitization from the perlite structure in steel. *Acta Metallurgica*. v.46, p. 3949-3962, 1998.
- [3] JACOT, A., RAPPAZ M. A combined model for the description of austenitization, homogenization and grain growth in hypoeutectoid Fe-C steels during heating. *Acta Materialia*. v.47, p. 1645-1651, 1999.
- [4] AKBAY, T., ATKINSON, C. The influence of diffusion of carbon in ferrite as well as in austenite on model of reaustenitization ferrite/cementite mixtures in Fe-C steels. *Journal of Materials Science*. v.31, p.2221-2226, 1996.
- [5] FERREIRA, C. R. et al. Tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos de aço SAE 1045 para produção de hastes de sondagem geológica, *REM-Revista Escola de Minas*. v.57, n. 1, p.23-26, 2004.
- [6] ASTM E562-83 - Standard test methods for tension testing of metallic materials. *American Society Test Metals*. v.14, p. 77-97, 1983.
- [7] LESLIE, W. C. *The physical metallurgy of steels*. 1. ed. McGraw-Hill, 1982. 396p.
- [8] KRAUSS, G. *Steels: heat treatment and processing principles*. 2. ed. Colorado: ASM International, 1990. 496p.
- [9] SUDO, M., IWAI, T. Deformation behavior and mechanical properties of ferrite-bainite-martensite (triphase) steel. *Transactions ISIJ*. v.23, p. 294-304, 1983.

Artigo recebido em /2004 e aprovado em 16/11/2004.



SISTEMA ELETRÔNICO DE EDITORAÇÃO DE REVISTAS

**A nova maneira de  
enviar um trabalho  
para a REM**