

# SIMULAÇÃO FÍSICA DO PROCESSAMENTO A QUENTE DE MATERIAIS METÁLICOS<sup>1</sup>

Oscar Balancin<sup>2</sup>

## Resumo

A necessidade de materiais com melhor qualidade e menor custo tem sido a força motriz para pesquisas básicas e tecnológicas em engenharia de materiais. Tendo em mente que as propriedades de componentes metálicos são fortemente dependentes da rota e dos parâmetros do processamento industrial, discutem-se os fundamentos da simulação física do processamento termomecânico baseado em conceitos científicos e na viabilidade experimental. Descreve-se um ensaio de laboratório, indicam-se os principais componentes de um equipamento e são apresentados resultados da literatura indicando a adequação da metodologia para fazer a simulação física do processamento metalúrgico.

**Palavras-chave:** Simulação física; Processamento metalúrgico; Ensaio de torção a quente.

## PHISICAL SIMULATION OF THE METALIC MATERIALS HOT WORKING

## Abstract

The need for materials with better quality and lower production cost has being the drive force for basic and technological research in materials engineering. Bearing in mind that the features of metallic components depends on the route and parameters of industrial processing, the principles of physical simulation of termomechanical processing are discussed taking into account scientific fundamentals and experimental viability. A laboratory test and main components of an equipment are described and literature data indicating the suitability of the method for conducting the physical simulation of metallurgical processing are presented.

**Key words:** Physical simulation; Thermomechanical processing; Hot torsion tests.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Professor do Depto. de Eng. de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, SP, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

O processamento a quente representa uma parcela significativa do trabalho realizado na fabricação de componentes e produtos metálicos semi-acabados. Nessas operações, os materiais são submetidos a grandes deformações em diferentes condições, seguindo diferentes rotas. Inicialmente os materiais são aquecidos até altas temperaturas, em seguida são submetidos a sequências de deformações por forjamento e/ou laminação, que envolvem as etapas de pré-forma e de acabamento, e posteriormente são resfriados até a temperatura ambiente. Durante as operações de processamento de materiais metálicos, uma fonte de energia gera potência que é transmitida às ferramentas, as quais armazenam elasticamente a potência e transferem-na ao material que está sendo deformado. O material dissipa a potência na zona de deformação enquanto é submetido ao esforço aplicado pelas ferramentas. Dentro desta visão, as ferramentas desempenham o papel central na conformação: determinam o fluxo do material na zona de deformação. Assim, a potência gerada pela máquina é consumida para mudar a forma do material (trabalho homogêneo), vencer o atrito ferramenta/material (trabalho de atrito) e promover as distorções internas necessárias (trabalho redundante). O esforço aplicado para deformar um material pode ser descrito por uma equação do tipo:

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T, \mu, \Delta)$$

Onde  $\sigma$  representa a tensão aplicada;  $\epsilon$  a deformação;  $\dot{\epsilon}$  a taxa de deformação; e  $T$  a temperatura de deformação, ( $\mu$ ) a interação ferramenta/metálico e ( $\Delta$ ) a geometria da zona de deformação. A equação acima engloba o comportamento do material, as distorções internas e o atrito em um processo qualquer. Todavia, escolhendo um modo de deformação em que a ferramenta não atue diretamente na zona de deformação, pode-se determinar o comportamento isolado do material em condições similares as praticadas no processamento industrial, ou seja:

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$$

Esta equação representa uma combinação de equações evolutivas e a equação constitutiva do material.

Ao lado das mudanças de forma almejadas, a microestrutura do material é alterada significativamente e, em consequência, os esforços que as máquinas fazem para processar os materiais. De uma forma geral, a evolução da microestrutura durante o processamento a quente depende da microestrutura inicial, das condições de deformação (quantidade de deformação, temperatura, taxa de deformação e tempo de espera entre passes) e da taxa de resfriamento após as deformações.

Quando um material metálico é deformado plasticamente, parte da energia gasta pela máquina é armazenada na rede cristalina em forma de defeitos. A operação de mecanismos de restauração como a recuperação e a recristalização eliminam defeitos gerados, reduzindo a energia armazenada. A resposta instantânea (tensão) do material para que uma máquina aplicando uma taxa de deformação imponha uma deformação em uma dada temperatura é descrita pela equação constitutiva do material.

$$\dot{\epsilon} \exp(Q_{def}/RT) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n = Z$$

Onde  $\dot{\epsilon}$  é a taxa de deformação;  $Q_{def}$  é a energia de ativação aparente para a deformação a quente,  $R$  a constante universal dos gases,  $T$  a temperatura absoluta,

$\sigma$  a tensão, Z o parâmetro de Zener-Hollomon e  $\alpha$  e n são constantes características de cada material. No trabalho a quente, simultaneamente ao aumento da densidade de discordâncias geradas pela deformação atuam mecanismos de restauração de defeitos cristalinos. A evolução da fração recristalizada ( $F_v$ ) em função do tempo é descrita pela equação de Avrami, que tem a forma:

$$F_v = 1 - \exp\left(-k\left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)^n\right)$$

Onde K e n são constantes do material e  $t_{0,5}$  é o tempo necessário para se obter 50% do material amaciado.

Além da recristalização durante a deformação, esta pode ocorrer em várias etapas do processamento. Quando ocorre no intervalo entre passes a recristalização pode ser chamada de estática ou metadinâmica e, a cinética de amaciamento também é descrita pela equação de Avrami. Na recristalização estática, metadinâmica e dinâmica, o tempo  $t_{0,5}$  necessário para obter 50% do material amaciado depende das condições de deformação e das condições de permanência em altas temperaturas após a deformação e é dado por:

$$t_{50} = CD^b \varepsilon^{-p} Z^{-q} \exp(Q_s / RT_s)$$

Onde D é o tamanho de grão inicial;  $\varepsilon$  é a deformação; Z é o parâmetro de Zener-Hollomon;  $Q_s$  e  $T_s$  são a energia de ativação; e a temperatura de amaciamento e C, b, p e q constantes. Os coeficientes C, p, b e q, tanto quanto a energia de ativação para o amaciamento  $Q_s$ , dependem do material, das condições de deformação ( $T$ ,  $\varepsilon$  e  $\dot{\varepsilon}$ ) e do mecanismo predominante de amaciamento. Os valores de p, q,  $Q_s$  e n podem ser utilizados para identificar os mecanismos controladores do amaciamento. Assim, medindo a fração amaciada ou a fração recristalizada, pode-se determinar o tempo necessário para obter 50% de amaciamento em função das condições de deformação e de restauração.

## 2 METODOLOGIA

O estudo dos eventos que ocorrem durante o processamento metalúrgico pode ser realizado utilizando-se equipamentos industriais, plantas pilotos ou ensaios de laboratório. O estudo do processamento utilizando equipamentos padrões de produção permitiria o entendimento dos processos, todavia isto não é economicamente viável. A impossibilidade, e muitas vezes a inconveniência, de se replicar fielmente ou em menor escala um processo de fabricação levou ao estabelecimento da prática da simulação física. Nesta prática, utiliza-se um corpo de prova de dimensões reduzidas, sobre o qual se impõem ciclos térmicos, mecânicos ou termomecânicos, que reproduzem fielmente os parâmetros reais de processamento.

Para que um ensaio de laboratório simule um processo industrial é fundamental que este possa executar as funções básicas do processamento. Deve possuir uma fonte de energia que gera potência e a transmite às ferramentas, que a armazenam elasticamente e transferem-na ao material. Em consequência, o corpo de prova dissipa a potência enquanto é deformado plasticamente. A resposta do material é dada em dois modos complementares: uma taxa de produção de entropia devido às mudanças microestruturais e outra devido ao aumento de temperatura. É a parcela

correspondente às mudanças microestruturais que leva às variações no esforço aplicado pela máquina.

Ensaio de laboratório como o de tração, o de compressão e o de torção têm geometrias de zona de deformação bastante simples; basicamente sem trabalho redundante. Dentre esses ensaios, o de torção vem sendo utilizado na simulação física do processamento a quente há mais de meio século.<sup>(1)</sup> Nesse ensaio, uma das extremidades de um corpo de prova cilíndrico, com diâmetro menor na região central, é mantida fixa, enquanto a outra é submetida a um esforço de rotação. O contato entre as garras (ferramenta) e o material se dá nas extremidades do corpo de prova, que não são deformadas durante o ensaio. Assim, o atrito é nulo. Durante o ensaio, o corpo de prova conserva a sua forma inicial. Isto permite a aplicação de grandes deformações, sendo que a deformação na região útil corresponde exatamente ao movimento de rotação imposto. A potência que é dissipada no corpo de prova é gerada por um motor, que pode ter a sua velocidade controlada e variada, permitindo realizar ensaios em uma larga faixa de taxas de deformação.

A simulação física do processamento industrial pode ser conduzida em três níveis distintos. Os primeiros procedimentos são aqueles que visam a determinação da trabalhabilidade a quente da liga metálica. Normalmente, com experimentos realizados em condições de deformação similares as do processamento, determinam-se os esforços envolvidos e a quantidade de deformação que pode ser imposta sem que mecanismos que geram danos no material comecem a atuar. Numa segunda etapa, procura-se entender e descrever o comportamento plástico do material. São realizados experimentos que permitem a parametrização dos eventos que ocorrem durante o processamento a quente. Por exemplo: determinam-se a equação constitutiva do material, a equação que descreve a evolução da tensão com a deformação do material durante as etapas de encruamento e de amaciamento (equação evolutiva), a cinética de amaciamento após a deformação a quente. Numa terceira etapa procura-se replicar os parâmetros do processamento, reconstruindo cada uma das deformações que são realizadas no processamento e, assim, a evolução do material durante um processo industrial. Podem-se associar a este terceiro nível de trabalho, as simulações numéricas feitas com a utilização de métodos de elementos finitos ou utilizando fundamentos de engenharia de microestrutura.

Qualquer que seja o nível do estudo experimental a ser feito, a simulação física exige equipamentos preparados para esse fim. A Figura 1 mostra de forma esquemática os principais componentes e a Figura 2, um desenho de um equipamento utilizado para fazer a simulação física do processamento metalúrgico. As sequências de passes - deformações consecutivas com tempos de espera entre elas - podem ser realizadas utilizando-se um conjunto composto de motor, freio e embreagem. Com o motor é imposta a velocidade de deformação em cada passe. O freio e a embreagem determinam o início e fim de cada deformação. Atualmente, estas tarefas podem ser realizadas por servos acionamentos hidráulico ou elétrico. Tais sistemas de acionamento devem ser capazes de impor deformações, com taxas de deformação e tempos de espera iguais aos impostos no processamento industrial. O ciclo térmico pode ser realizado por um forno acoplado a máquina, que deve ter baixa inércia térmica e deve ser programado para replicar a evolução da temperatura dos tratamentos termomecânicos industriais. Atualmente, várias formas de aquecimento vêm sendo utilizadas, destacando-se o aquecimento através de radiação infravermelho, por indução ou resistivo.

Para evitar a oxidação da superfície dos corpos de prova e impor diferentes taxas de resfriamento durante a simulação física, podem-se injetar gás inerte ou refrigerante através de um tubo de quartzo que circunda a amostra. Também, pode-se injetar água através do tubo de quartzo para congelar a microestrutura e observar a evolução microestrutural. Isto pode ser feito em qualquer instante da simulação com a interrupção do ensaio.

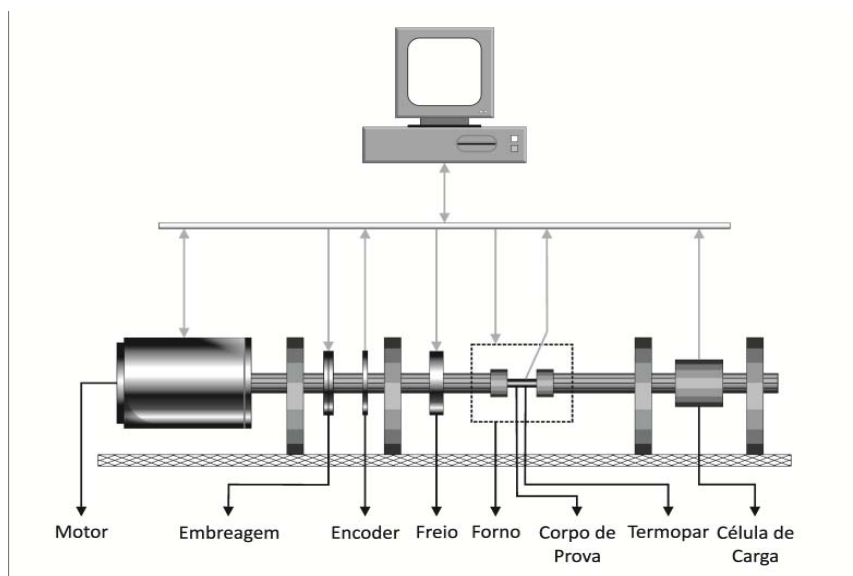


Figura 1. Representação esquemática de uma máquina horizontal de ensaios de torção a quente.

A temperatura pode ser medida por um termopar ou pirômetro ótico. Os esforços mecânicos aplicados às amostras podem ser medidos por uma célula de carga e convertidos em tensão equivalente. A deformação e a taxa de deformação equivalentes são calculadas a partir de medidas do ângulo de rotação realizadas por um encoder. A aquisição de dados é realizada por um computador interligado à máquina, que com um programa, controla os ensaios impondo o ciclo térmico, a quantidade de deformação, a taxa de deformação e o tempo de espera entre deformações.

Assim, a instrumentação de um equipamento desse tipo e a utilização de um *software* dedicado, com a leitura *on line* dos sensores e realimentação das fontes de potências mecânica e térmica em malhas fechadas, permitem a realização de experimentos replicando o processamento industrial.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como descrito, a simulação física do processamento industrial pode ser conduzida em três níveis distintos, a saber: (i) determinação da trabalhabilidade a quente de ligas metálicas; (ii) estudo do comportamento plástico a quente de materiais metálicos; e (iii) réplica de sequência de passes industriais.

#### 3.1 Determinando a Trabalhabilidade a Quente

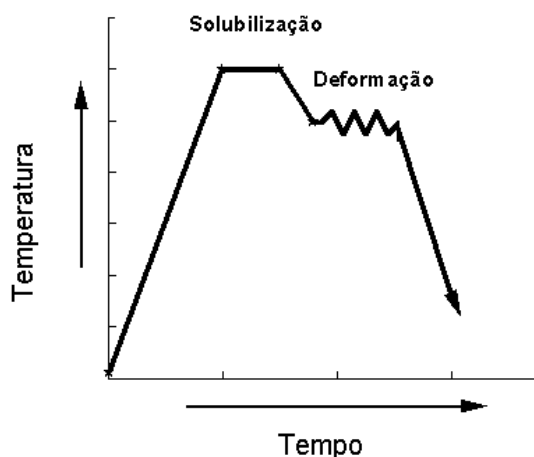
Nesta primeira abordagem determinam-se a resistência do material e a quantidade de deformação que o material pode ser submetido sem falhar em condições similares as do processamento industrial, ou seja: a trabalhabilidade intrínseca do material. O procedimento usual para determinar a trabalhabilidade a quente é a

realização de ensaios isotérmicos até a fratura, variando as condições de deformação. Estas condições devem cobrir toda a janela de temperaturas e de taxas de deformação do processamento industrial em estudo. Por exemplo, no forjamento de aços é usual variar a temperatura de 900°C a 1.200°C e a taxa de deformação na faixa de 0.01 s<sup>-1</sup> a 20 s<sup>-1</sup>. Os corpos de prova são aquecidos até temperaturas de solubilização, resfriados até a temperatura de ensaio e deformados continuamente até a fratura ou até níveis pré-determinados. O ciclo térmico empregado pode ser visto na Figura 3. Com esses ensaios determinam-se as curvas de escoamento plástico do material.



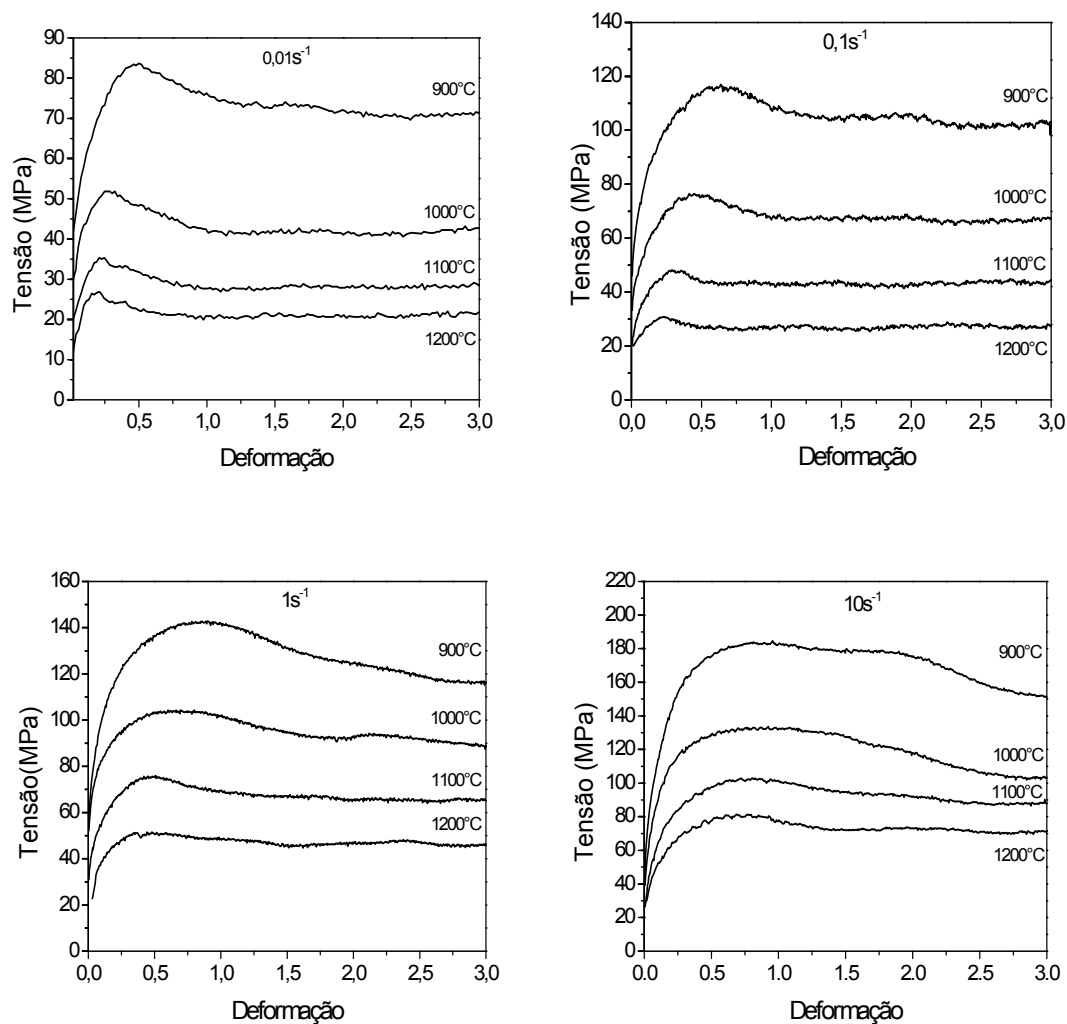
**Figura 2.** Desenho de uma máquina de torção a quente preparada para fazer simulação física do processo industrial.

As curvas mostradas na Figura 4 foram obtidas em amostras de um aço médio carbono utilizado no forjamento de peças para a indústria automotiva. Observando as curvas podem-se obter algumas informações: (i) a recristalização dinâmica é o mecanismo de amaciamento predominante, com recuperação dinâmica mais intensa em altas taxas de deformação e baixas temperaturas; (ii) o material é dúctil nas condições ensaiadas, suportando deformações efetivas iguais a 3,0, que equivale a uma deformação por laminação superior a uma redução de espessura de 90%.



**Figura 3.** Ilustração esquemática do ciclo térmico empregado nos ensaios isotérmicos contínuos.





**Figura 4.** Curvas de escoamento plástico do aço carbono 38MnSiVS5 variando a temperatura de ensaio com as seguintes taxas de deformação: (a) 0,01s<sup>-1</sup>; (b) 0,1 s<sup>-1</sup>; (c) 1 s<sup>-1</sup> e (d) 10 s<sup>-1</sup>.

A resistência do material pode ser avaliada diretamente das curvas, todavia a determinação da equação constitutiva do material é bastante útil no cálculo de carga dos processos industriais. Selecionando a tensão de pico como uma tensão representativa de cada curva de escoamento, a dependência da tensão de escoamento com a temperatura e taxa de deformação pode ser determinada a partir dos resultados experimentais mostrados na Figura 4. Para o aço 38MnSiVS5 que recupera e recristaliza dinamicamente, a equação constitutiva assume a forma:

$$\dot{\epsilon} = 5,5 \times 10^{15} \left[ \sinh(0,013 \times \sigma_p) \right]^{5,0} \exp(-358.000/RT)$$

A metodologia utilizada para a determinação desta equação está descrita em detalhes na literatura.<sup>(2)</sup> A energia de ativação aparente para a deformação a quente (358 000 J/mol.K) indica como a tensão de pico aumenta ou diminui conforme as condições de deformação são alteradas durante o processamento. Por exemplo, como a tensão de escoamento aumenta conforme a temperatura é decrescida de 0.8 T<sub>m</sub> - onde aços baixo e médio carbono têm tensões de pico próximos a 20 MPa - 30 MPa - até 0.5 T<sub>m</sub>, quando materiais mais complexos ou concentrados em

elementos de liga, como é o caso do aço 38MnSiVS5, são mais resistentes e menos dúcteis.

Existem, também, metodologias que utilizando os dados experimentais mostrados na Figura 4 permitem a avaliação da trabalhabilidade intrínseca do material de uma forma mais global. Os mapas de processamento propostos por Prasad<sup>(3)</sup> é um exemplo destes procedimentos. A Figura 5 mostra um mapa de processamento do aço inoxidável ISO 5832-9 utilizado no forjamento de próteses ortopédicas.<sup>(4)</sup> Na literatura há uma vasta quantidade de trabalhos utilizando esta metodologia.<sup>(5-7)</sup>

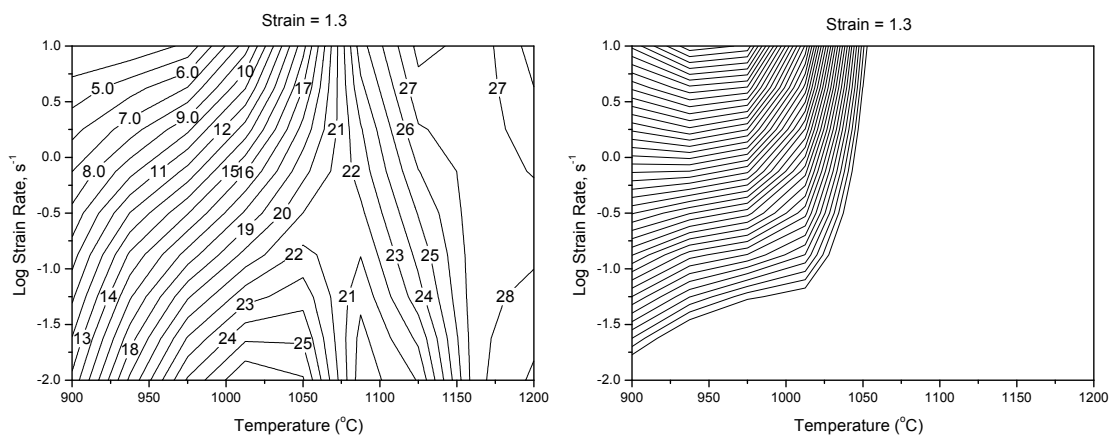


Figura 5. Mapa de processamento de um aço inoxidável austenítico com adições de N e Nb (4).

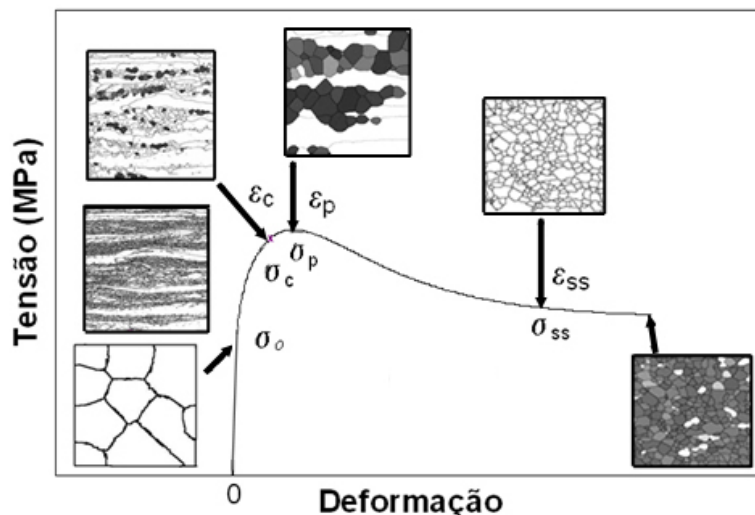
O mapa de dissipação de potência (parte do mapa de processamento, Figura 5a) indica dois domínios de amaciamento: um em altas temperaturas com a recristalização dinâmica e outro em menores temperaturas e baixas taxas de deformação, predominando a recuperação dinâmica. Na Figura 5b (mapa de instabilidade), há uma indicação clara de uma região grande onde o material poderá falhar durante o processamento.

### 3.2 Estudando o Comportamento Plástico a Quente

Como um exemplo, pode-se tomar um aço inoxidável deformado em altas temperaturas. Inicialmente procura-se descobrir como a microestrutura deste material evolui com a deformação. Isto pode ser feito com a interrupção de ensaios em diferentes níveis de deformação, seguido por resfriamento rápido da amostra deformada. A Figura 6 mostra uma curva de escoamento plástico e indica as microestruturas observadas em diferentes níveis de deformação. Vê-se que a tensão aumenta com a deformação até alcançar um pico de tensões e decresce em seguida até um estado estacionário. Durante a etapa de encruamento a densidade de discordâncias aumenta com a deformação até que a energia crítica necessária para o início da recristalização dinâmica seja alcançada ( $\sigma_c$  e  $\epsilon_c$ ), iniciando-se o processo de nucleação de novos grãos. A substituição de grãos deformados por núcleos e grãos isentos de deformação leva a uma redução mais acentuada na taxa de encruamento e, com o prosseguimento da deformação a partir da deformação crítica, conduz a uma queda no nível de tensão para deformações maiores que as de pico até que um estado estacionário seja alcançado.

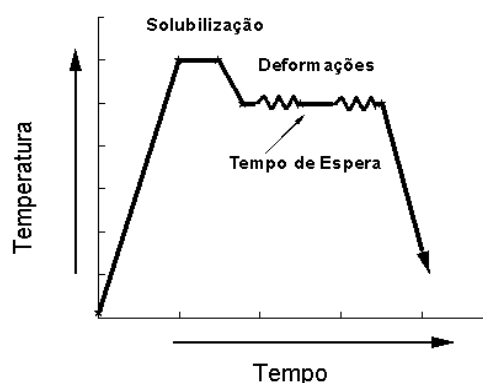
Com curvas experimentais como as apresentada na Figura 4 podem-se determinar as equações evolutivas de cada material em função da temperatura e taxa de deformação como descrito em trabalhos da literatura.<sup>(8-13)</sup>





**Figura 6.** Curva de escoamento plástico e evolução microestrutural observadas em uma amostra de um material que recristaliza dinamicamente.

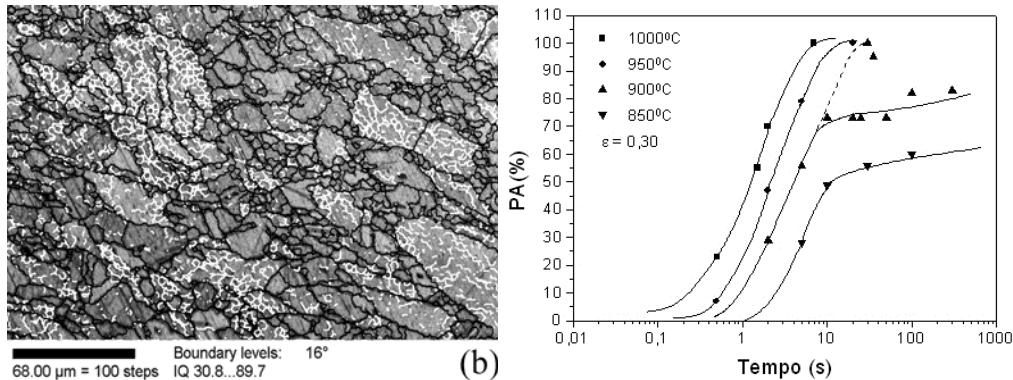
A restauração durante o descarregamento entre operações de deformação em altas temperaturas é tradicionalmente quantificada em termos da fração de amaciamento ( $X$ ) ou da fração de recristalização ( $F_v$ ). A determinação dos parâmetros das equações que descrevem o amaciamento entre passes necessita de um conjunto de experimentos similares às situações industriais. Nesse tipo de experimento, os testes são interrompidos após uma deformação predeterminada, mantendo-se a amostra na mesma temperatura por diferentes intervalos de tempo, e em seguida reiniciada a deformação. O ciclo termomecânico aplicado nesse tipo de ensaio pode ser visto na Figura 7. O amaciamento pode ser determinado pela análise das tensões envolvidas ou por medidas da fração recristalizada, resfriando bruscamente a amostra no instante em que seria iniciada a segunda deformação.



**Figura 7.** Ilustração esquemática do ciclo termomecânico empregado nos ensaios isotérmicos com duas etapas de deformação.

A Figura 8a mostra regiões encruadas e recristalizadas em uma amostra de um aço inoxidável austenítico submetido ao ensaio descrito na Figura 7, utilizado para a determinação da fração recristalizada, e a Figura 8b mostra a evolução do amaciamento em função do tempo de espera entre deformações para amostras de um aço microligado ao vanádio. Os dois procedimentos descrevem a cinética de restauração após a deformação a quente. No primeiro caso tem-se a restauração da microestrutura deformada e no segundo a restauração de uma propriedade

mecânica. Ambas as metodologias podem ser utilizadas para descrever a cinética de recristalização após a deformação a quente em materiais com baixa ou moderada energia de falha de empilhamento. Todavia, o procedimento mecânico é muito mais fácil e rápido de ser executado do que as medições da evolução microestrutural.



**Figure 8.** Determinação da fração amaciada. (a) medições da fração recristalizada<sup>(14)</sup> e (b) medições da fração amaciada.<sup>(15)</sup>

Pode-se ver na Figura 8b que em temperaturas menores o amaciamento promovido pela recristalização estática não se completa. Este é um exemplo típico da interrupção da recristalização pela precipitação induzida por deformação.

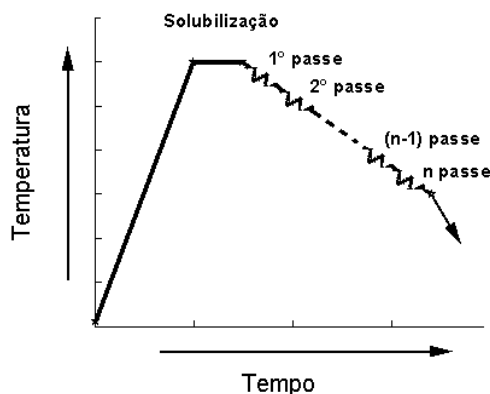
### 3.3 Replicando Sequências de Passes Industriais

A idéia básica é refazer o processo industrial no laboratório. Amostras são submetidas a ciclos térmicos e mecânicos similares as que são aplicadas nos processos. É replicada toda a sequência de passes impondo os parâmetros do processo industrial. A amostra é reaquecida até a temperatura de encharque e mantida nesta temperatura por tempo compatível com o utilizado no processo industrial. São impostas sequências de deformações com tempos de espera entre passes, temperaturas e taxas de deformações iguais as aplicadas no processo em estudo.

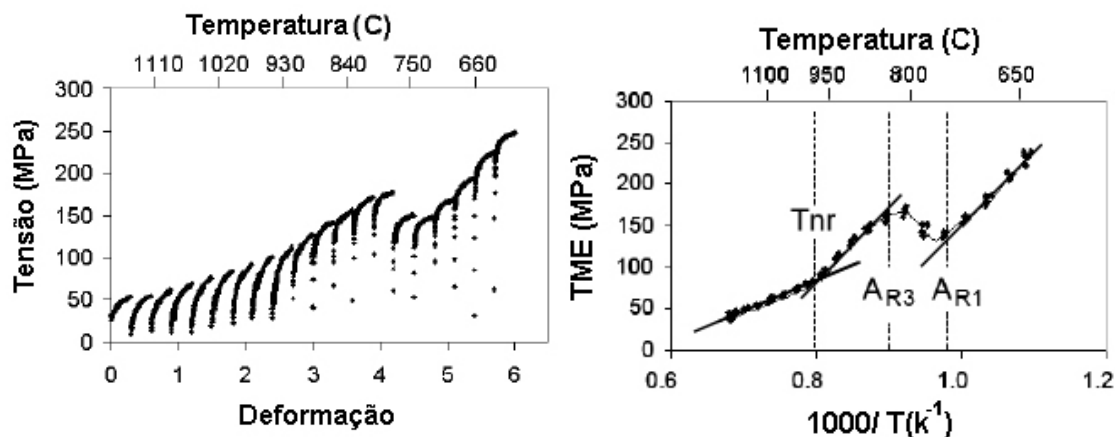
Um exemplo bem sucedido de simulação de processamento industrial é a réplica da laminação de chapas grossas de aços microligados. Nesses experimentos, as amostras são aquecidas e mantidas na temperatura de encharque e em seguida resfriadas continuamente com taxas similares às impostas industrialmente. Durante a etapa de resfriamento, as amostras são deformadas em sequências de passes com níveis de deformações iguais aos do processamento industrial. A Figura 9 mostra, esquematicamente, o ciclo termomecânico de uma sequência de passes e a Figura 10 as curvas de escoamento plástico obtidas e a evolução da tensão média equivalente (TME) em função das temperaturas de deformação.

Vê-se na Figura 10 que o esforço realizado aumenta com a evolução do processo até o início da transformação da austenita em ferrita e volta a crescer em temperaturas menores. O diagrama TME vs. temperatura indica que o aumento da tensão no campo austenítico torna-se maior em temperaturas menores; o início da precipitação de carbonitretos de nióbio ( $T_{nr}$ ) no intervalo entre deformações retarda a recristalização da austenita, aumentando o esforço necessário para deformá-la. A queda na tensão no início da transformação de fase ( $A_{r3}$ ) é associada a menor resistência da ferrita.

A simulação da laminação de chapas grossas é um exemplo de sucesso. Todavia, não é o único. A literatura descreve outros exemplos bem sucedidos como a laminação de tubos sem costura,<sup>(16)</sup> a laminação de tiras a quente<sup>(17)</sup> e o forjamento de aços microligados.<sup>(18,19)</sup>



**Figura 9.** Representação esquemática do ciclo termomecânico imposto em ensaios realizados com múltiplas deformações em resfriamento contínuo.



**Figura 10.** Curvas obtidas em ensaios realizados com múltiplas deformações em resfriamento contínuo em um aço microligado ao nióbio, indicando os valores das temperaturas críticas do processamento termomecânico.<sup>(20)</sup>

## 4 CONCLUSÃO

A metodologia descrita nesta apresentação vem sendo desenvolvida ao longo das últimas décadas e permite a (i) determinação da trabalhabilidade a quente de ligas metálicas; (ii) estudo do comportamento plástico a quente de materiais metálicos; e (iii) réplica de sequência de passes industriais de forma bastante satisfatória.

## REFERÊNCIAS

- 1 Rossard, C; Blain, P – Recherches sur la deformation des aciers a chaud. Publications de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie (IRSID) – Série A – N<sup>o</sup> 174 – Oct. 1957.
- 2 Uvira, J.L.; Jonas, J.J – Hot compression of Armco iron and silicon steel. Trans. Metall. Soc. AIME, vol. 242, pp. 1619-1626, (1968).
- 3 Prasad, Y.V.R.K.; Seshacharyulu, T. – Modelling of hot deformation for microstructural control. Int. Mater. Rev., vol. 43, pp. 243-258, (1998).
- 4 Silva, E.S.; Souza, R.C.; Jorge Jr, A.M.; Balancin, O. – Hot deformation behavior of a Nb- and N-bearing austenitic stainless steel biomaterial. Mater. Sci. Eng. A IN PRESS (2012).

- 5 Cai, D.; Xiong, L.; Liu, W.; Sun, G.; Yao, M. – Development of processing maps for a N-based superalloy. *Mater. Charact.*, pp. 941-946, (2007).
- 6 Wang, Z.; Fu, W.; Sun, H.; Li, Z.L.V. – Mechanical behavior and microstructural change of a high nitrogen CrMn austenitic stainless steel during hot deformation. *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 41A, pp. 1025-1031, (2010).
- 7 Wenhui, Z.; Shuhua, S.; Deli, Z.; Baozhong, W.; Zhenhua, W.; Wantang, F. – Hot deformation behavior of a Nb-containing 316N stainless steel. *Mater. Design*, vol. 32, pp. 4173-4179, (2011).
- 8 Jorge Jr., A.M.; Regone, W.; Balancin, O. – Effect of Competing hardening and Softening Mechanisms on the Flow Stress curve modeling of Ultra-Low Carbon Steel at High Temperatures. *J. Mater. Proc. Technol.*, vol. 142, pp. 415-421, (2003).
- 9 Laasroui, A.; Jonas, J.J. – Prediction of steel flow stresses at high temperatures and strain rates. *Metall. Trans. A*, vol. 22A, pp. 1545-1558, (1991).
- 10 Jonas, J.J.; Quelennec, X.; Jiang, L.; Martin, E. – The Avrami kinetics of dynamic recrystallization. *Acta Materialia*, vol. 57, pp. 2748-2756, (2009).
- 11 Medina, S.F.; Hernandez, C.A. – Modelling of the dynamic recrystallization of austenite in low alloy and microalloyed steels. *Acta Materialia*, vol. 44, pp.165-171, (1996).
- 12 Jorge Jr., A.M.; Balancin, O. – Prediction of Steel Flow Stresses under Hot Working Conditions. *Mater. Res.*, vol. 8, pp. 309-315, (2005).
- 13 Davenport, S.B.; Silk, N.J.; Sparks, C.N.; Sellars, C.M. – Development of constitutive equations for modeling of hot rolling. *Mater. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 539-546, (2000).
- 14 Giordani, E.J.; Jorge Jr. A.M.; Balancin, O. – Proportion of Recovery and Recrystallization During Interpass Times at High Temperatures on a Nb- and N-bearing Austenitic Stainless Steel Biomaterial. *Scr. Mater.*, vol. 55, pp. 743-746, 2006.
- 15 Santos, J.M.R. – Interação entre a Recristalização e a Precipitação Induzida por Deformação de um Aço Microligado ao Níobio e um Aço Microligado ao Vanádio. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 1998.
- 16 Pussegoda, L.N.; Yue, S.; Jonas, J.J. – Laboratory simulation of seamless tube piercing and rolling using dynamic recrystallization schedules. *Metall. Trans. A*, vol. 21A, pp. 153-164, (1990).
- 17 Militzer, M.; Hawbolt, E.B.; Meadowcroft, T.R. – Microstructural model for hot strip rolling of high-strength low-alloy steels. *Metall. Mater. Trans. A*, vol 31A, pp. 1247-1259, (2000).
- 18 Zhao, P.; Boyd, J.D. – Microstructure – property relationships in thermomechanically processed microalloyed medium carbon steels. *Mater. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 695-704, (2004).
- 19 Peálba, F.; Carsi, M.; Garcia de Andrés, C.; Zapirain, F.; Andrés, M.P. – Characteristics of vanadium and titanium microalloyed steels forged at intermediate (warm) temperatures through simulation by torsion. *ISIJ Inter.*, vol. 32, pp. 232-240, (1992).
- 20 Sousa, R.C. – Estudo dos Efeitos dos Parâmetros de Processamento na Temperatura de não Recristalização, T<sub>nr</sub>, de um Aço Médio Carbono Microligado ao Vanádio. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 1996.