



# CONTROLE MICROESTRUTURAL EM LAMINAÇÃO A QUENTE DA LIGA NIMONIC®80<sup>a1</sup>

David Delagostini Jarreta<sup>2</sup>  
Eduardo Netto de Souza<sup>3</sup>  
Oscar Balancin<sup>4</sup>  
Celso Antonio Barbosa<sup>5</sup>

## Resumo

A simulação dos processos de conformação plástica de materiais metálicos é uma ferramenta muito útil para determinação dos parâmetros de processo necessários para a obtenção de uma microestrutura desejada. Neste sentido, torna-se necessária a realização de ensaios precisos para obtenção das curvas de escoamento plástico que reproduzam fielmente o processo industrial e estudo dos efeitos da variação dos parâmetros de processo na microestrutura final obtida. No presente estudo, esta determinação foi realizada para liga NIMONIC®80A. As simulações físicas foram realizadas através de ensaios de torção a quente. Os resultados foram utilizados, através de equações e conceitos de metalurgia física, para elaboração do plano de passes ideal para obtenção de controle do tamanho de grão da liga NIMONIC®80A após laminação a quente e tratamento térmico de solubilização. As conclusões obtidas com a simulação física também evidenciaram os mecanismos metalúrgicos envolvidos na deformação a quente da liga.

**Palavras-chave:** Simulação; Superligas de níquel; NIMONIC®80<sup>a</sup>; Curvas de escoamento plástico; Modelagem.

## MICROSTRUCTURAL CONTROL IN HOT ROLLING NIMONIC®80A ALLOY

### Abstract

Hot forming processes simulation is a very useful tool for process parameters determination for obtaining a desired microstructure. In this sense, it is necessary to perform accurate tests to obtain the flow-stress curves that faithfully reproduce the industrial process and to study the effects of process parameters variation on the final microstructure obtained. In this study, this determination was made to NIMONIC®80A alloy. Physical simulations were carried out by Hot Torsion Tests. The results were used, through equations and concepts of Physical Metallurgy, for design the perfect pass plan to control the grain size of the Nimonic®80 alloy after hot rolling and solution annealing heat treatment. The conclusions obtained with the simulation also showed the physical mechanisms involved in metallurgical hot deformation of the alloy.

**Keywords:** Simulation; Nickel superalloys; Nimonic®80A; Flow-stress curves; Modeling.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Pesquisador, Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

<sup>3</sup> Engenheiro Pesquisador, Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

<sup>4</sup> Prof. Dr. DEMa - Universidade Federal de São Carlos.

<sup>5</sup> Gerente do Departamento de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

## 1 INTRODUÇÃO

Projetos recentes na área de simulação de processos termomecânicos têm sido focados no estudo do comportamento de ligas a base de níquel.<sup>(1-4)</sup> devido a suas características estruturais de difícil conformabilidade. Atualmente, existem modelos que descrevem o processo de deformação e o desenvolvimento microestrutural, possibilitando a previsão do tamanho de grão do material conformado, bem como a otimização dos parâmetros de processo.<sup>(1,2)</sup> O laminador da Villares Metals foi modelado a partir da reprodução da conformação a quente da liga Nimonic®80A em barras de secção redonda.

A implementação das simulações do processo de laminação em um software de simulação numérica por elementos finitos, assim como suas análises, exigem a ciência dos fenômenos metalúrgicos envolvidos no processo e das corretas propriedades mecânicas do material envolvido.

As ligas a base de níquel apresentam variações microestruturais particularmente sensíveis às condições da deformação a quente. Essas ligas possuem baixa energia de falha de empilhamento, de modo que a recristalização é o mecanismo dominante de amaciamento durante a deformação a quente.<sup>(3-7)</sup> Novos grãos são nucleados, quando o material adquire, localmente, níveis suficientes de deformação (densidade de discordâncias) e temperatura. Deste modo, a tendência é a microestrutura apresentar grãos de diferentes tamanhos e níveis de deformação.<sup>(3,4,7)</sup> Durante a deformação a quente, quando a taxa de geração de discordâncias torna-se equivalente à taxa de recristalização, tem-se um estado estacionário.

O amaciamento durante e entre os passes de laminação desempenha um papel fundamental na deformação a quente. A difícil trabalhabilidade a quente das superligas de níquel é compensada pelo amaciamento da liga por recristalização, o qual é também de suma importância para o refinamento de grão no produto final. O controle eficiente do processamento a quente requer um acurado modelamento do comportamento do material em deformação, incluindo um modelo para o amaciamento e suas variações com a temperatura, heterogeneidades de deformação da barra, quantidade e taxa de deformação.<sup>(8)</sup>

Em temperaturas elevadas (acima da temperatura de não-recristalização  $T_{NR}$ ), a recristalização estática (SRX) e meta-dinâmica (MDRX) podem ocorrer simultaneamente em porções diferentes do material, se a deformação anterior tiver sido suficiente para iniciar a recristalização dinâmica (DRX), enquanto que em regiões que não sofreram DRX, ocorre apenas SRX. Durante os primeiros passes da laminação de barras, a deformação geralmente é suficiente para iniciar DRX. No entanto, os passes finais normalmente apresentam deformação nominal abaixo da deformação crítica para DRX.<sup>(2)</sup>

O objetivo deste trabalho foi utilizar a simulação física, bem como a metalurgia física, para determinação dos parâmetros de processo (plano de passes) para obtenção de granulação tamanho entre 4 e 5 ASTM homogênea ao longo de toda a secção transversal de uma barra redonda de diâmetro próximo a 40 mm (39,69 mm) após laminação a quente e após tratamento térmico de solubilização.

Dentro deste contexto, torna-se muito importante para a otimização de processo e controle microestrutural de uma determinada liga, conhecer como se processa o mecanismo de amaciamento desta liga durante processamento a quente. Esse estudo é o objeto do modelamento e posterior simulação física do presente trabalho.

## 2 MATERIAIS E METODOS

### 2.1 Modelo

A simulação física foi realizada a partir de ensaios conduzidos em uma máquina de torção a quente no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. O ensaio de torção a quente necessita de determinados parâmetros de processo para simular a conformação. Assim, a laminação da liga NIMONIC<sup>®</sup>80A teve que ser modelada em termos de quantidade de deformação, taxa de deformação e temperatura de cada passe do processamento no laminador Multi-line da Villares Metals S.A.

Com base nos dados reais de laminação da liga provenientes da instrumentação do equipamento e do controle supervisorio, foram calculados os parâmetros de deformação total em cada passe, taxa de deformação em cada passe e tempo entre passes. A temperatura do material em cada instante da laminação foi obtida pelo software centralizador de dados de processo. O equacionamento dos cálculos para os parâmetros deformação e taxa de deformação foram feitos com base nas fórmulas de deformação verdadeira ( $\epsilon_v = -\ln(l_n/l_0)$ ) e taxa de deformação ( $\delta\epsilon/\delta t$ ).

Essa metodologia foi utilizada para quatro variações dos parâmetros de processo: dois planos de passe diferentes iniciando a 1000°C e os mesmos planos de passe iniciando a 1.150°C. Cada variação foi identificada com um código: 6P-TB (**6** Passes e **T**emperatura **B**aixa), 6P-TA (**6** Passes e **T**emperatura **A**lta), 4P-TB (**4** Passes e **T**emperatura **B**aixa), 4P-TA (**4** Passes e **T**emperatura **A**lta).

As condições de contorno para simplificações dos cálculos foram: ferramental rígido, raio do cilindro de laminação muito maior que a redução a ser aplicada no material<sup>(2,3,4,9,10,11)</sup>. A laminação parte de um tarugo de secção transversal quadrada e a dimensão final é uma barra de secção transversal circular com 39,69 mm de diâmetro. Os parâmetros de processo estão na Tabela 1.

**Tabela 1:** Parâmetros de laminação do NIMONIC<sup>®</sup>80A – 6P-TB

Stand	$\epsilon_v$	$\delta\epsilon/\delta t$ (s-1)	Temperatura (°C)	$\Delta t$ (interpass)
1	0,55	4,6	1000	5,36585 s
2	0,36	3,5	992	6,53061 s
3	0,31	3,9	985	3,03030 s
4	0,27	3,7	967	9,26829 s
5	0,31	6,1	935	1,81818 s
6	0,25	5,5	905	2,27273 s

**Tabela 2:** Parâmetros de laminação do NIMONIC<sup>®</sup>80A – 4P-TB

Stand	$\epsilon_v$	$\delta\epsilon/\delta t$ (s-1)	Temperatura (°C)	$\Delta t$ (interpass)
1	0,60	5,0	1000	5,36585 s
2	0,55	5,2	995	6,53061 s
3	0,52	6,6	990	3,03030 s
4	0,39	5,3	977	9,26829 s

**Tabela 3:** Parâmetros de laminação do NIMONIC®80A – 6P-TA

Stand	$\epsilon_v$	$\delta\epsilon/\delta t$ (s-1)	Temperatura (°C)	$\Delta t$ (interpass)
1	0,55	4,6	1150	5,36585 s
2	0,36	3,5	1135	6,53061 s
3	0,31	3,9	1107	3,03030 s
4	0,27	3,7	1092	9,26829 s
5	0,31	6,1	1052	1,81818 s
6	0,25	5,5	1044	

**Tabela 4:** Parâmetros de laminação do NIMONIC®80A – 4P-TA

Stand	$\epsilon_v$	$\delta\epsilon/\delta t$ (s-1)	Temperatura (°C)	$\Delta t$ (interpass)
1	0,60	5,0	1150	5,36585 s
2	0,55	5,2	1136	6,53061 s
3	0,52	6,6	1110	3,03030 s
4	0,39	5,3	1094	

## 2.2 Simulação Física por Torção a Quente

Foram realizados ensaios baseados em uma seqüência de carregamentos múltiplos em torção a quente, intercalados pelo tempo de espera entre passes e nas temperaturas características de cada etapa da laminação da liga NIMONIC®80A na Villares Metals S.A., cujos parâmetros são descritos pelas Tabelas 1, 2, 3 e 4.

O corpo de prova é reaquecido até 1.180°C por dez minutos e resfriado até a temperatura de ensaio. Após três minutos de espera, o corpo de prova é ensaiado por torção até a deformação real do primeiro passe de laminação. Ocorre então o descarregamento, e a espera até que termine o tempo entre passes previsto para o início do segundo passe. Neste instante, o corpo de prova é ensaiado por torção até a deformação real do segundo passe. Desta forma, os ensaios se processam até o último passe, gerando uma série de curvas tensão vs. deformação característica da seqüência de passes na laminação.

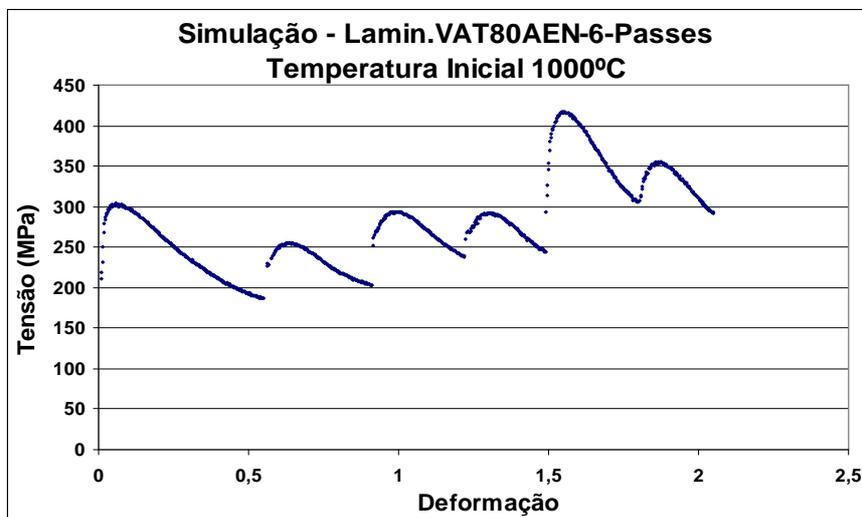
Após ensaiados os corpos de prova foram submetidos a um tratamento térmico de solubilização a 1.080°C por 8 horas e resfriamento em água. Foi observada a microestrutura destes corpos de prova por microscopia óptica e realizada a quantificação do tamanho de grão gerado em cada caso. A idéia foi simular a microestrutura da superfície de uma barra com secção transversal redonda laminada até o diâmetro final próximo de 40 mm, resfriada ao ar, e depois solubilizada.

Uma validação das simulações foi feita para uma das condições simuladas (seis passes com início à 1.150°C) que foi aplicada em escala industrial pelo Laminador Multiline da Villares Metals S.A.

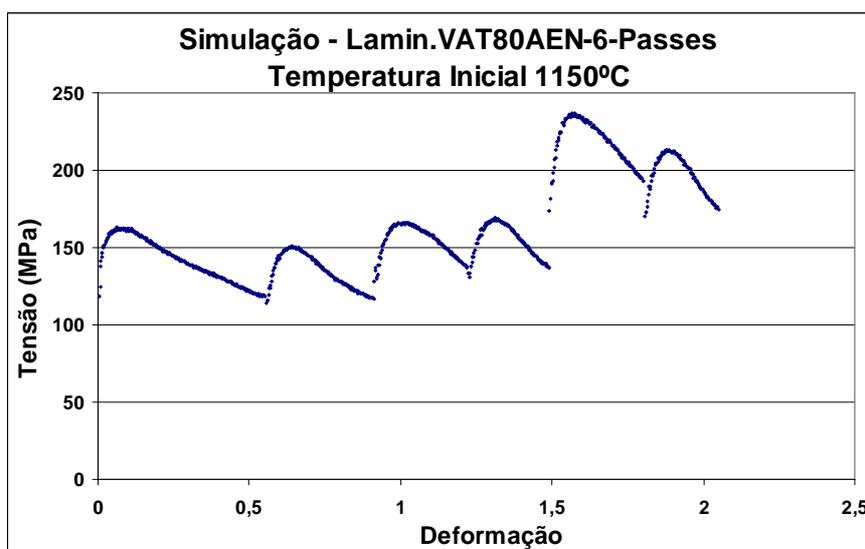
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de carregamentos múltiplos seqüenciais aplicados à liga NIMONIC®80A para simulação do processo de laminação a quente nas diferentes condições de parâmetros de processo. Uma conclusão direta que pode ser extraída dessa curvas é a comprovação de que ocorre o amaciamento entre passes durante toda a seqüência de passes de laminação do material.

Devido à baixa energia de falha de empilhamento atribuída à liga NIMONIC<sup>®</sup>80A, pode-se afirmar que há recristalização entre todos os passes da laminação.<sup>(1-4,7-12)</sup> Esse resultado vale para todos os ensaios realizados e já é suficiente para motivar um estudo mais profundo da cinética de amaciamento da liga por recristalização, o que será conduzido no futuro. A determinação da deformação crítica para início da recristalização dinâmica se faz necessária para a caracterização do amaciamento. Além disso, podemos notar a ocorrência de recristalização dinâmica em todos os carregamentos de todos os ensaios realizados, devido ao formato das curvas tensão deformação.<sup>(10,11)</sup> Ou seja, a tensão sobe durante o encruamento puro, depois de alcançada a deformação crítica para início da recristalização, a taxa de aumento da tensão é reduzida pelo início do amaciamento da liga por recristalização dinâmica até a formação de um pico. Após o pico de tensão, a tensão necessária para deformar a liga cai, uma vez que o amaciamento por recristalização supera o encruamento gerado pela geração dos defeitos cristalinos, sobretudo linhas de discordância.



**Figura 1:** Curvas Tensão x Deformação equivalentes geradas pelo ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 6P-TB.



**Figura 2:** Curvas Tensão x Deformação equivalentes geradas pelo ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 6P-TA.



Nos ensaios com seis passes de laminação (seis carregamentos em torção), a partir do quinto carregamento, pode-se notar claramente a influência do aumento de taxa e queda da temperatura de deformação no encruamento da liga, observando o aumento abrupto no nível de tensões exigido para a deformação do material e no formato das curvas (Figuras 1 e 2).

Comparando-se as curvas das Figuras 1 e 2, podemos observar o efeito da temperatura na resistência do material à deformação e na taxa de amaciamento. Temperaturas mais elevadas geram tensões de pico mais baixas, deformações críticas menores e curvas com geometria semelhante e derivadas mais negativas após o pico.

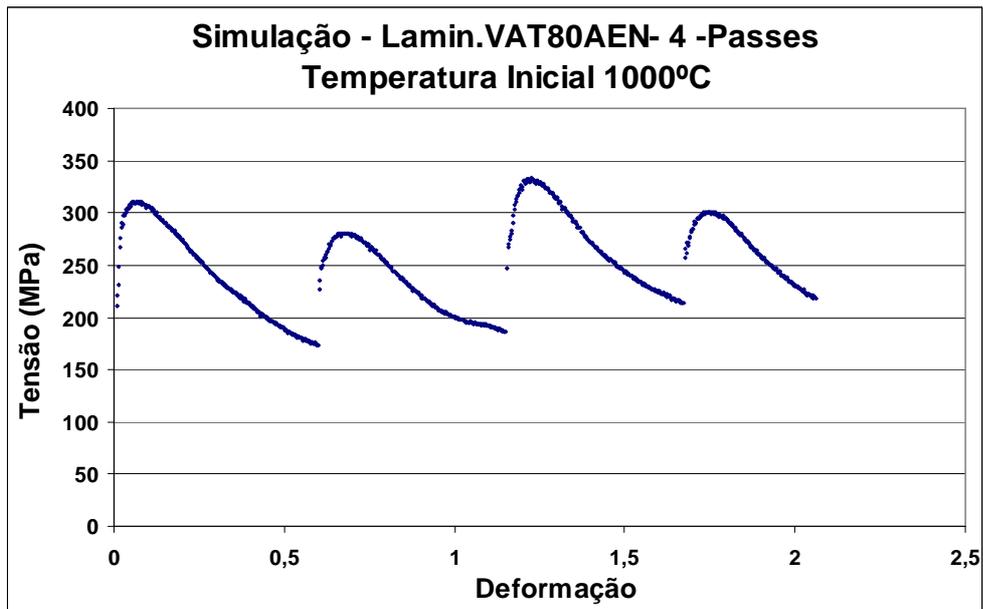


Figura 3: Curvas Tensão x Deformação equivalentes geradas pelo ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 4P-TB.

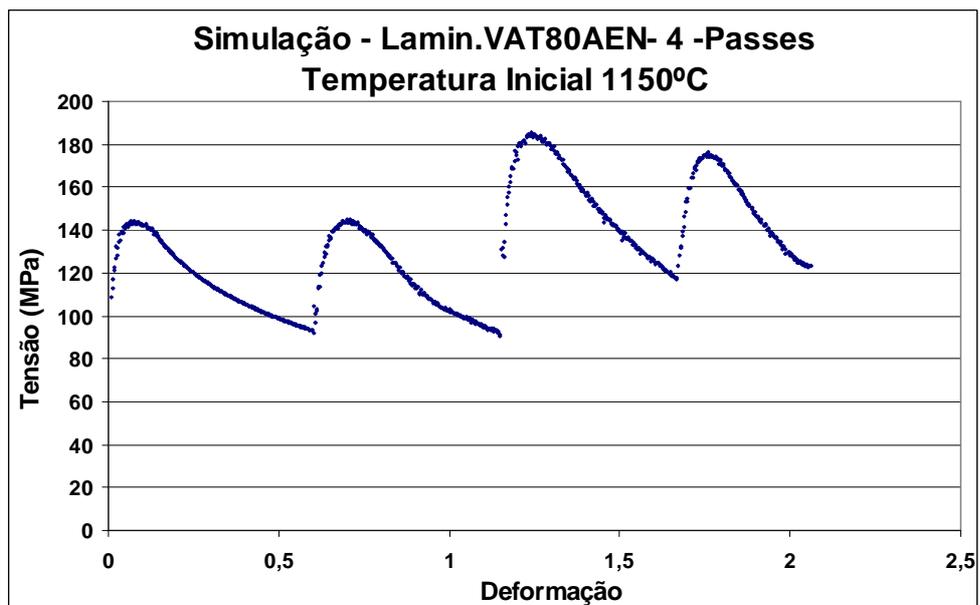
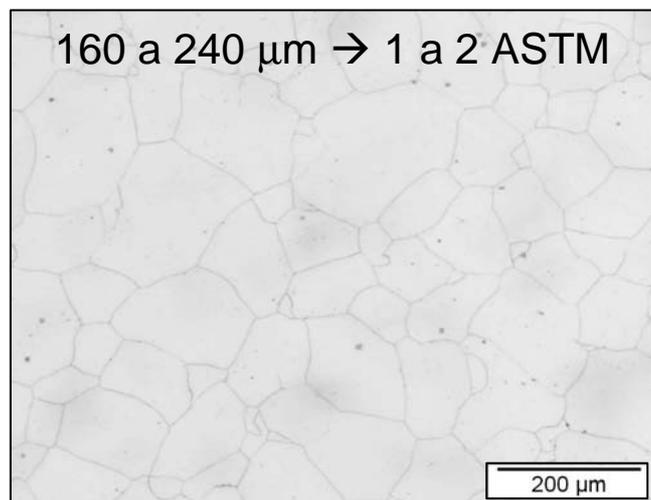


Figura 4: Curvas Tensão x Deformação equivalentes geradas pelo ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 4P-TA.

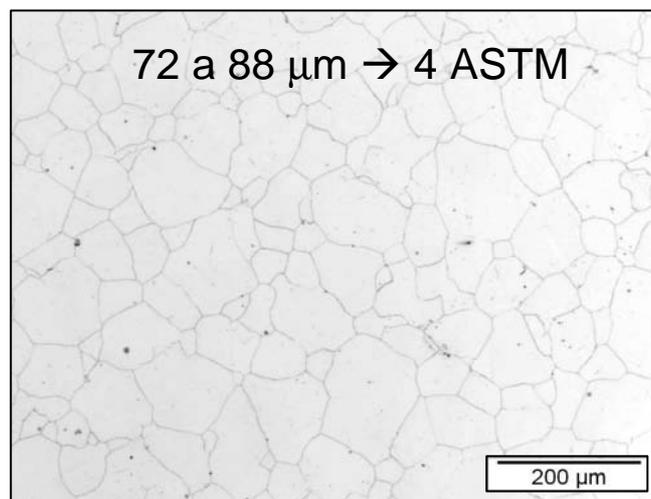
Comparando-se as curvas das Figuras 3 e 4, observamos mais uma vez o efeito da temperatura na resistência do material à deformação e na taxa de amaciamento. Temperaturas mais elevadas geram tensões de pico mais baixas, deformações críticas menores e curvas com geometria semelhante e derivadas mais negativas após o pico.

Agora, na comparação entre os diferentes números de passes, notamos que a uma mesma temperatura, apesar de concentrar-se a deformação de seis passes em apenas quatro, a máxima tensão atingida é mais elevada no caso dos seis passes. Isso ocorre devido às perdas térmicas com o maior número de passes (a deformação total se dá em mais tempo) e menor aquecimento adiabático nos primeiros passes devido à menor energia total aplicada (menor deformação e menor taxa de deformação). Além disso, a carga é distribuída mais uniformemente entre os passes no caso de apenas quatro carregamentos, uma vez que se aproxima mais de um processo isotérmico.

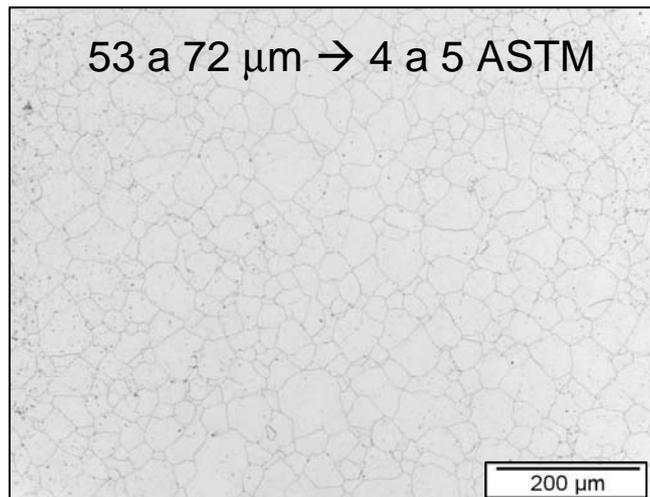
As microestruturas geradas por cada ensaio após tratamento térmico de solubilização à 1.080°C por 8 horas e resfriamento ao ar são mostradas nas Figuras 5 a 8.



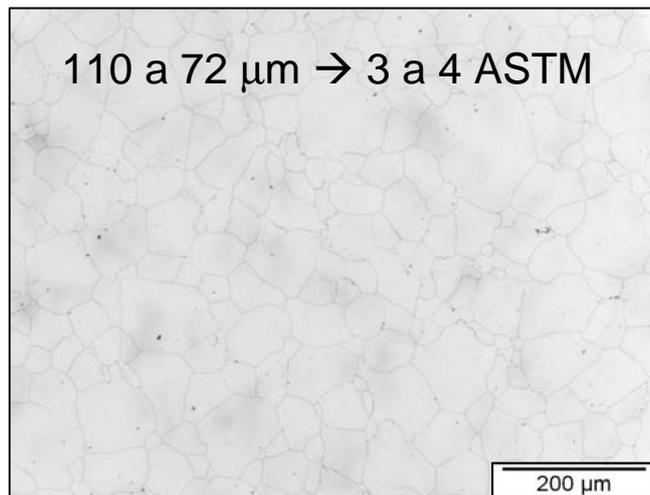
**Figura 5:** Microestrutura do corpo de prova após ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 6P-TB (6 Passes e Temperatura Inicial 1.000°C).



**Figura 6:** Microestrutura do corpo de prova após ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 6P-TA (6 Passes e Temperatura Inicial 1.150°C).



**Figura 7:** Microestrutura do corpo de prova após ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 4P-TB (4 Passes e Temperatura Inicial 1.000°C).



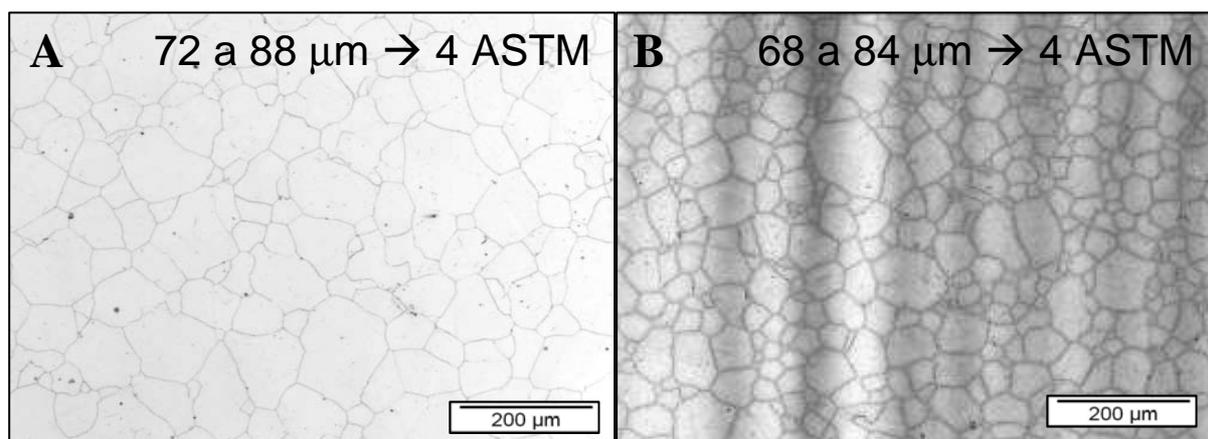
**Figura 8:** Microestrutura do corpo de prova após ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 4P-TA (4 Passes e Temperatura Inicial 1.150°C).

Percebe-se comparando as microestruturas obtidas os efeitos dos diferentes parâmetros de laminação na microestrutura final obtida. É muito importante ressaltar que os corpos de prova foram tratados termicamente à 1.080°C por 8 horas e resfriados em água após o ensaio, para simular a microestrutura da superfície de uma barra com secção transversal redonda laminada até o diâmetro final próximo de 40 mm, resfriada ao ar, e depois solubilizada.

Temos então muitos fatores que influenciam na microestrutura final obtida. A temperatura de laminação determina o tamanho de grão recristalizado e a cinética de crescimento deste após nucleação, determina também junto à deformação e sua taxa quando cada ponto do material irá iniciar sua recristalização. Além disso, existem outros mecanismos que influenciam no tamanho de grão, como as precipitações e possíveis redissoluções de carbonetos secundários nos contornos de grão, os quais irão funcionar como *pinning*, atrasando o início da recristalização e acumulando mais encruamento durante a deformação, além de não permitirem o crescimento de grão durante tratamento térmico de solubilização posterior.<sup>(2,4,7)</sup>

Para um estudo mais criterioso, é necessário o levantamento de um banco de dados a partir de curvas Tensão x Deformação isotérmicas de carregamento contínuo até deformação 4 da liga Nimonic®80A em todo o intervalo de temperaturas e taxas de deformação utilizados na laminação a quente da liga. Além de um estudo da cinética de recristalização e da cinética da precipitação de carbonetos secundários nos contornos de grão durante e após deformação a quente.<sup>(2,3,8,10,11)</sup>

As simulações foram validadas a partir da comparação da microestrutura obtida na barra laminada em escala industrial pelo Laminador Multiline da Villares Metals S.A. e o corpo de prova ensaiado em torção a quente para a condição de seis passes e temperatura inicial 1.150°C. Ambos foram tratados termicamente em laboratório à 1.080°C por 8 horas e resfriados em água. A Figura 9 mostra a validação.



**Figura 9:** Microestruturas A) do corpo de prova após ensaio de carregamentos múltiplos em torção a quente nas condições 6P-TA (6 Passes e Temperatura Inicial 1150°C) e B) da superfície da barra laminada no Laminador Multiline da Villares Metals nas condições 6P-TA. Ambos foram tratados termicamente em laboratório à 1080°C por 8 horas e resfriados em água. Ataque glicerégia.

#### 4 CONCLUSÕES

Para as condições experimentais empregadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- é possível se obter controle do tamanho de grão da liga Nimonic®80A a partir de tratamento termomecânico e térmico (laminação a quente + solubilização) utilizando-se a simulação física por ensaio de torção a quente;
- ocorre o amaciamento entre todos os passes durante a seqüência de passes de laminação do material;
- há recristalização entre todos os passes da laminação;
- a taxa de deformação e a temperatura são muito importantes para a definição do mecanismo de deformação e para a futura microestrutura do material; e
- a simulação de processos termomecânicos tem grande relevância na caracterização mecânica e metalúrgica de uma liga durante processamento. A compreensão dos fenômenos envolvidos na recristalização dinâmica, meta-dinâmica e estática do material, bem como precipitação de novas fases durante processamento a quente (e suas correlações com o comportamento da evolução das curvas de escoamento) é a chave para a determinação dos melhores parâmetros de processo para a conformação dos metais.

## REFERÊNCIAS

- 1 HARRER O., WALLNER S., SOMMITSCH C., WEISER V. "Microstructure Simulation in Radial Forging of Nickel Base Alloys". Proceedings of the 8th International ESAFORM Conference on Material Forming, April 27-29, 2005, Cluj-Napoca, Romania, D. Banabic (Ed.), The Romanian Academy. Publishing House Bucharest, Volume I, p. 515-518.
- 2 MACCAGNO T.M., JONAS J.J., HODGSON P.D. "Spreadsheet Modeling of Grain Size Evolution During Rod Rolling". ISIJ International, Vol. 36, nº 06, pp. 720 – 728, 1996.
- 3 JARRETA D. D., BALANCIN O., BARBOSA C. A., SOUZA E. N. "Simulação Física da Conformação a Quente da Liga Inconel 718 para Base de Dados de Software de Simulação Numérica". ABM – 62º Congresso Internacional - Vitória - ES, 2007.
- 4 JARRETA D. D., BALANCIN O., BARBOSA C. A., SOUZA E. N. "Simulação Física da Conformação a Quente da Liga SAE HEV8". ABM – 63º Congresso Internacional - Santos - SP, 2008.
- 5 SIMS C. T. and HAGEL W. C. "The Superalloys", Ed. John Wiley & Sons – New York-London-Sydney-Toronto, 1972.
- 6 VOLK K. E. "Nickel und Nickellegierungen", Springer – Verlag-Berlin-Heidelberg-New York, 1970.
- 7 PADILHA A.F., SICILIANO Jr. F. "Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura". 3ª ed. rev. e ampl.- São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 8 POLIAK E.I., JONAS J.J. "Prediction of Interpass Softening from the Strain Hardening Rate Prior to Unloading". ISIJ International, Vol. 44, nº 11, pp. 1874-1881 - 2004.
- 9 DEFORM™ 3D Version 5.1 User's Manual - Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio – 2006.
- 10 POLIAK E.I., JONAS J.J. "The Critical Strain for Dynamic Recrystallization in Rolling Mills". Materials Science Forum, Vols. 426-432, pp. 57-66, 2003.
- 11 POLIAK E.I., JONAS J.J. "Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation". ISIJ International, Vol. 43, nº 5, pp. 684-691, 2003.
- 12 BETTERIDGE W. and HESLOP J. "The Nimonic Alloys and Other Nickel High-Temperature Alloys". Ed. EDWARD ARNOLD (Publishers) Ltd., London, 1974.