

# ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA LIGA INCONEL 718 NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA UTILIZANDO-SE DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA<sup>1</sup>

*Roberto Tibúrcio Canito Frota Júnior<sup>2</sup>*

*Eduardo Netto de Souza<sup>3</sup>*

*David Delagostini Jarreta<sup>4</sup>*

*Celso Antonio Barbosa<sup>5</sup>*

## **Resumo**

A liga Inconel 718 possui uma janela de trabalho em forjamento a quente relativamente estreita, além disso, os parâmetros de processo influenciam fortemente a sua microestrutura. O objetivo deste trabalho é realizar simulação numérica do forjamento em matriz aberta da liga Inconel 718, analisando-se a microestrutura resultante. Para realizar a análise microestrutural, o forjamento a quente em matriz aberta da liga Inconel 718 foi simulado através do método de elementos finitos, utilizando o software DEFORM<sup>TM</sup>3D. Além dos cálculos de tensão e deformação durante o forjamento, a simulação numérica contemplou o cálculo dos fenômenos de recristalização e crescimento de grão realizado por modelo disponível no próprio software. Os resultados mostraram que a simulação numérica pode ser uma ótima ferramenta para o planejamento do forjamento a quente em matriz aberta da liga Inconel 718, de forma que é possível prever a microestrutura final, conseqüentemente, alterar o plano de passes para obter uma microestrutura de acordo com os requisitos de um produto.

**Palavras-chave:** Inconel 718; Forjamento; Simulação numérica; Microestrutura.

## **MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF INCONEL 718 ALLOY IN METAL FORMING PROCESS USING NUMERICAL SIMULATION TOOL**

### **Abstract**

The Inconel 718 alloy has a narrow hot working window, besides the forging parameters strongly influence on its microstructure. The paper goal is simulate the Inconel 718 open die forging process, analyzing microstructure results. In order to analyze the microstructure, hot open die forging process was simulated by the finite element method, using DEFORM<sup>TM</sup>3D. In addition the stress and strain calculated results, the simulation computed recrystallisation phenomena and grain growth by the software own available model. The results shown that numerical simulation can be a powerful tool to Inconel 718 hot open die forging design, thus its possible to predict the final microstructure, consequently change the passes plan to obtain a microstructure in agreement with the product requirements.

**Key words:** Inconel 718, Forging, Numerical Simulation, Microstructure.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

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

<sup>3</sup> *Engenheiro Pesquisador, Dr.; Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Pesquisador, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

<sup>5</sup> *Gerente de Tecnologia, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

# 1 INTRODUÇÃO

A liga Inconel 718 possui excelentes propriedades mecânicas em altas temperaturas, tais como alto limite de escoamento e resistência à ruptura por fluência e fadiga. Além disso, esta liga possui boa resistência à corrosão e ótima soldabilidade.<sup>(1)</sup> Por causa destas características, este material é amplamente utilizado em aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e nucleares, sendo utilizado para a fabricação de componentes de turbinas à gás, motores de foguete, naves espaciais e reatores nucleares.<sup>(1)</sup>

A alta resistência em altas temperaturas da liga Inconel 718 é derivada principalmente da fase  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3(\text{Nb,Ti})$ ) e de uma menor quantidade da fase  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Al, Ti, Nb, V})$ ). No intervalo de temperatura em que este material é processado, ocorre a precipitação da fase ortorrômbica  $\delta$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ), cujo a presença auxilia no refinamento do grão evitando indesejável crescimento de grão.<sup>(2)</sup> Além destas fases, as propriedades mecânicas da liga Inconel 718 é influenciada pela presença de carbonetos tais como MC ( $\text{Nb}(\text{Ti, Mo, Co})\text{C}$ ) ou  $\text{M}_6\text{C}$  ( $\text{Mo}(\text{Ni,Co})_6\text{C}$ ), nos quais são encontrados aleatoriamente, distribuídos nos contornos de grão.<sup>(3)</sup>

A Villares Metals S.A. é a maior produtora de aços especiais não-planos de alta liga da América Latina, possui dentro do portfólio de produtos ligas especiais, dentre elas a liga Inconel 718 com o nome comercial de VAT 718. Com o apoio do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, a Villares Metals S.A. desenvolve soluções inovadoras para os seus clientes. No caso da produção da liga Inconel 718, trata-se de um desafio para os engenheiros de processo devido à estreita janela de trabalho a quente, além das exigentes especificações requeridas pela aplicação deste material. O Centro de Pesquisa e Desenvolvimento conta com o auxílio da ferramenta de simulação numérica para o planejamento da seqüência de passes do forjamento da liga Inconel 718. O software comercial DEFORM<sup>TM</sup>3D, possui um módulo de modelagem microestrutural acoplado ao código principal, de modo que se torna possível prever a microestrutura final de acordo com o plano de passes executado.

O objetivo deste trabalho é realizar a simulação numérica do forjamento em matriz aberta da liga Inconel 718 na etapa de refinamento de grão, analisando-se a microestrutura resultante e comparando o resultado de duas simulações em condições de diferentes processamentos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Assim como foi descrito na introdução, a liga Inconel 718 possui uma janela estreita de trabalho a quente, sendo no intervalo de temperatura de 980°C a 1.120°C. Acima da temperatura de 1.010°C apenas a fase  $\gamma$  (matriz) está em equilíbrio. Para as temperaturas abaixo de 1010°C, inicia-se a precipitação das partículas da fase  $\delta$ . Vários outros pesquisadores investigaram a modelagem microestrutural da liga Inconel 718.<sup>(4-7)</sup>

A Tabela 1 mostra a composição química típica desta liga:

**Tabela 1.** Composição Química da liga Inconel 718 (%massa).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti	Al	Nb	Mo
0,03	0,10	0,10	18,5	53	Rest.	1,00	0,50	5,10	3,00
máx	máx	máx							

Fonte: Catálogo Villares Metals liga VAT 718. Colocar na lista de referências e acertar numeração das citações.

Numerosos modelos fenomenológicos foram publicados na área de modelagem de grão, e existem controvérsias nas definições dos vários mecanismos de recristalização.<sup>(1-5)</sup> Para adequar estes modelos, o DEFORM<sup>TM</sup>3D selecionou as mais populares definições e equações generalizadas. Em cada incremento de tempo, baseando-se no tempo, temperatura local, deformação, taxa de deformação e histórico de evolução, o mecanismo de evolução é determinado e assim as variáveis correspondentes ao grão são calculadas e atualizadas<sup>(8)</sup>. A seguir estão as equações que estão implementadas no DEFORM<sup>TM</sup>3D.

## 2.1 Recristalização Dinâmica

A recristalização dinâmica é calculada em função da deformação, taxa de deformação, temperatura e tamanho inicial de grão, no qual variam com o tempo. É muito difícil modelar a recristalização dinâmica simultaneamente a deformação. Com isso, DEFORM<sup>TM</sup>3D calcula a recristalização dinâmica no instante imediatamente após o cálculo da deformação. A média de temperatura, taxa de deformação durante o período de deformação são usadas como as entradas das equações.<sup>(8)</sup>

### 2.1.1 Critério de ativação

O início da DRX normalmente ocorre na deformação crítica  $\varepsilon_c$ , definida por:

$$\varepsilon_c = a_2 \varepsilon_p \quad (1),$$

em que  $\varepsilon_p$  significa a deformação corresponde à máxima tensão de escoamento:

$$\varepsilon_p = a_1 d_o^{n_1} \dot{\varepsilon}^{m_1} \exp(Q/RT) + c_1 \quad (2).$$

### 2.1.2 Cinética

A equação de Avrami é utilizada para descrever a relação entre a fração dinamicamente recristalizada e a deformação efetiva é:

$$\chi_{derx} = 1 - \exp \left[ -\beta_d \left( \frac{\varepsilon - a_{10} \varepsilon_p}{\varepsilon_{0,5}} \right)^{\kappa_d} \right] \quad (3),$$

em que  $\varepsilon_{0,5}$  significa a deformação para 50% de recristalização:

$$\varepsilon_{0,5} = a_5 d_o^{h_5} \varepsilon^{n_5} \dot{\varepsilon}^{m_5} \exp \left( \frac{Q_5}{RT} \right) + c_5 \quad (4).$$

### 2.1.3 Tamanho de grão

O tamanho de grão recristalizado é expresso como função do tamanho inicial de grão, deformação, taxa de deformação e temperatura:

$$d_{rex} = a_8 d_o^{h_8} \varepsilon^{n_8} \dot{\varepsilon}^{m_8} \exp(Q_8/RT) + c_8 \quad (\text{if } d_{rex} \geq d_o \text{ then } d_{rex} = d_o) \quad (5).$$

## 2.2 Recristalização Estática

Quando a deformação pára, a taxa de deformação e a deformação crítica são utilizadas para determinar se a recristalização estática ou metadinâmica devem ser ativadas. A recristalização estática e metadinâmica são finalizadas quando o elemento volta a se deformar.<sup>(8)</sup>

### 2.2.1 Critério de ativação

Quando a taxa de deformação é menor que  $\dot{\epsilon}_{ss}$ , a recristalização estática ocorre depois da deformação:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \exp(b_1 - b_2 d_o - Q_2/T) \quad (6).$$

### 2.2.2 Cinética

O modelo da cinética de recristalização é baseado na equação de Avrami modificada:

$$\chi_{serx} = 1 - \exp \left[ -\beta_s \left( \frac{t}{t_{0,5}} \right)^{\kappa_s} \right] \quad (7),$$

em que  $t_{0,5}$  é um tempo empírico para 50% de recristalização:

$$t_{0,5} = a_3 d_o^{h_3} \epsilon^{n_3} \dot{\epsilon}^{m_3} \exp(Q_3/RT) \quad (8).$$

### 2.2.3 Tamanho de grão

O tamanho de grão recristalizado é expresso como função do tamanho inicial de grão, deformação, taxa de deformação e temperatura:

$$d_{rex} = a_6 d_o^{h_6} \epsilon^{n_6} \dot{\epsilon}^{m_6} \exp(Q_6/RT) + c_6 \quad (\text{if } d_{rex} \geq d_o \text{ then } d_{rex} = d_o) \quad (9).$$

## 2.3 Recristalização Metadinâmica

A recristalização metadinâmica é similar à recristalização estática, mas com diferente critério de ativação e constantes do material.<sup>(8)</sup>

### 2.3.1 Critério de ativação

Quando a taxa de deformação é maior que  $\dot{\epsilon}_{ss}$  (**Equação 6**), a recristalização metadinâmica ocorre depois da deformação.

### 2.3.2 Cinética

O modelo da cinética de recristalização é baseado na equação de Avrami modificada:

$$\chi_{mdrx} = 1 - \exp \left[ -\beta_{md} \left( \frac{t}{t_{0,5}} \right)^{\kappa_m} \right] \quad (10),$$

em que  $t_{0,5}$  é um tempo empírico para 50% de recristalização:

$$t_{0,5} = a_4 d_o^{h_4} \varepsilon^{n_4} \dot{\varepsilon}^{m_4} \exp(Q_4/RT) \quad (11).$$

### 2.3.3 Tamanho de grão

O tamanho de grão recristalizado é expresso como função do tamanho inicial de grão, deformação, taxa de deformação e temperatura.

$$d_{rex} = a_7 d_o^{h_7} \varepsilon^{n_7} \dot{\varepsilon}^{m_7} \exp(Q_7/RT) + c_7 \quad (\text{if } d_{rex} \geq d_o \text{ then } d_{rex} = d_o) \quad (12).$$

### 2.4 Crescimento de Grão

O crescimento de grão ocorre antes de a recristalização começar e depois dela terminar.<sup>(8)</sup>

A cinética é descrita pela equação:

$$d_g = \left[ d_{rex}^m + a_9 t \exp\left(-\frac{Q_9}{RT}\right) \right]^{1/m} \quad (13),$$

em que  $d_g$  significa o tamanho de grão após o crescimento,  $a_9$  e  $m$  são constantes do material e  $Q_9$  é uma energia de ativação.

Quando a recristalização de certo tipo está incompleta, a deformação retida disponível para a seqüência de um outro processo de recristalização pode ser descrito pelo método uniforme de amaciamento:

$$\varepsilon_i = (1 - \lambda \chi_{rex}) \varepsilon_{i-1} \quad (14).$$

Para calcular o tamanho de grão na recristalização incompleta, foi definida a seguinte equação:

$$d = \chi_{rex} d_{rex} + (1 - \chi_{rex}) d_o \quad (15).$$

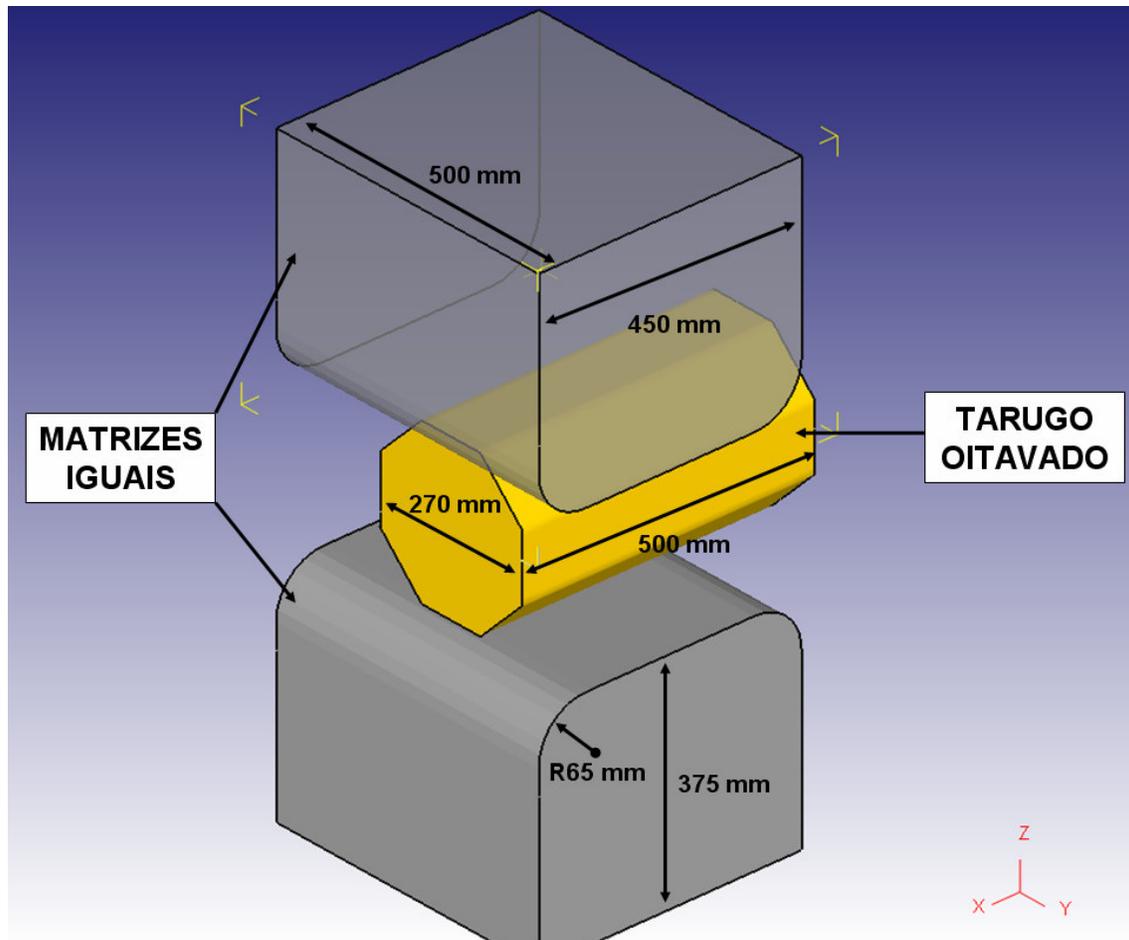
Na modelagem de grão, define-se uma temperatura limite que representa o limite inferior para todos os mecanismos de evolução de grão, desta forma, abaixo desta temperatura, não ocorre evolução de grão.

### 2.5 Simulação Numérica

Para a realização da análise microestrutural da liga Inconel 718, realizaram-se simulações em duas diferentes condições de processamento, a temperatura inicial do tarugo, sendo uma temperatura de 1.040°C em uma primeira condição e 1.100°C na outra condição de processamento.

Para efeito de simplificação da análise, foi simulado apenas dois passes em uma pequena parte do tarugo na etapa de refinamento de grão. Entre os passes e ao final do segundo passe foi simulada uma etapa de transferência de calor para se observar os efeitos da recristalização após a deformação.

A geometria do tarugo e das matrizes utilizada para a simulação foi a mais próxima do real, conforme mostra a Figura 1:



**Figura 1** – Geometria com as dimensões do tarugo e das matrizes.

Os principais parâmetros operacionais de entrada para as simulações estão resumidos na Tabela 2.

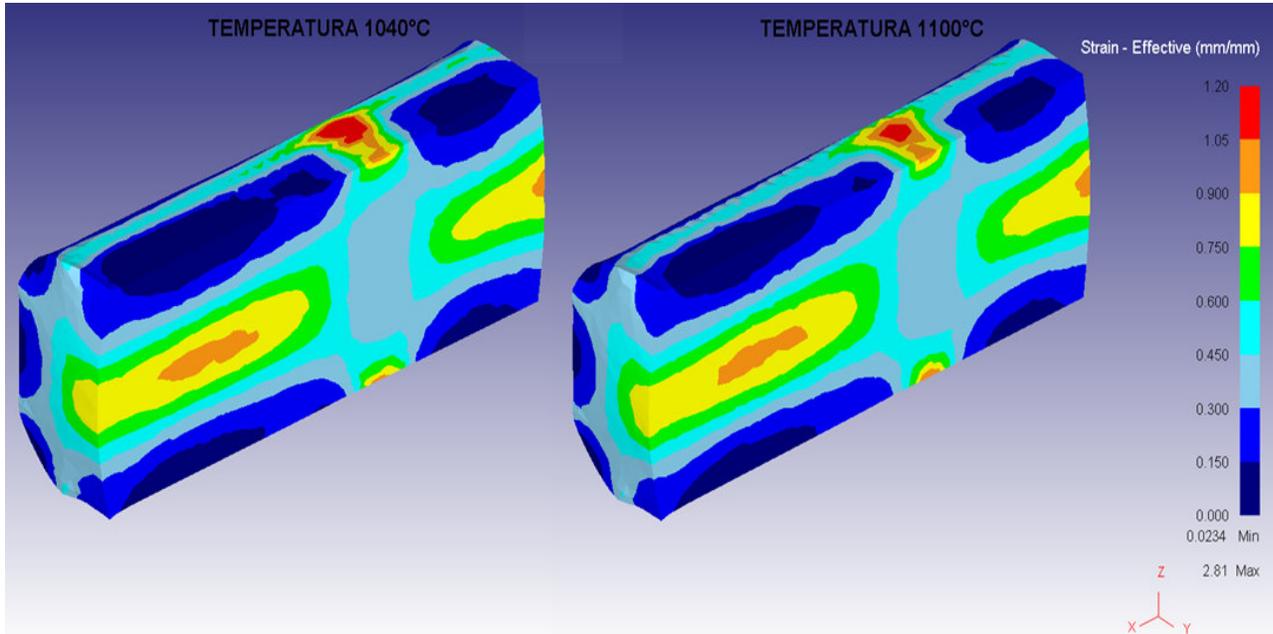
**Tabela 2.** Parâmetros de entrada para as simulações

<b>Entrada</b>	<b>Valor</b>
Velocidade da Matriz Superior (mm/s)	70
Distância Mínima entre as Matrizes (mm)	220
Rotação do Tarugo entre Passes (Graus)	90
Temperatura Inicial das Matrizes (°C)	30
Temperatura Ambiente (°C)	30
Coef. Transf. Calor com o Ambiente (W/m <sup>2</sup> K)	10
Coef. Transf. Calor com as Matrizes (kW/m <sup>2</sup> K)	11
Coeficiente de Atrito de Cisalhamento	0,7

O material selecionado para as matrizes foi o aço AISI H13, sendo que na simulação as matrizes estão com comportamento rígido. As propriedades termomecânicas da liga Inconel 718 utilizadas nas simulações foram retiradas do próprio banco de dados do software DEFORM<sup>TM</sup>3D. No início das simulações o tamanho de grão de todo o tarugo foi de 100 µm.

### 3 RESULTADOS

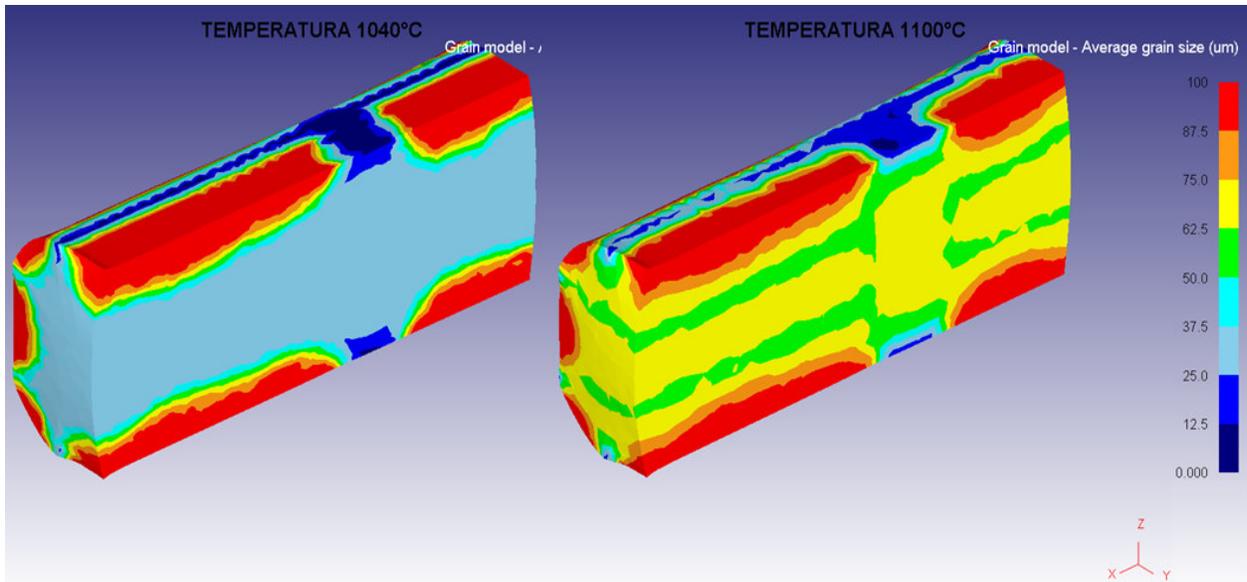
A Figura 2 apresenta o resultado de deformação efetiva nas duas condições simuladas. Para melhor visualização da região central do tarugo foi feito um corte longitudinal.



**Figura 2** – Mapa de deformação efetiva dos tarugos processados a 1.040°C e 1.100°C.

Nota-se que nas duas condições os níveis de deformação estão muito próximos.

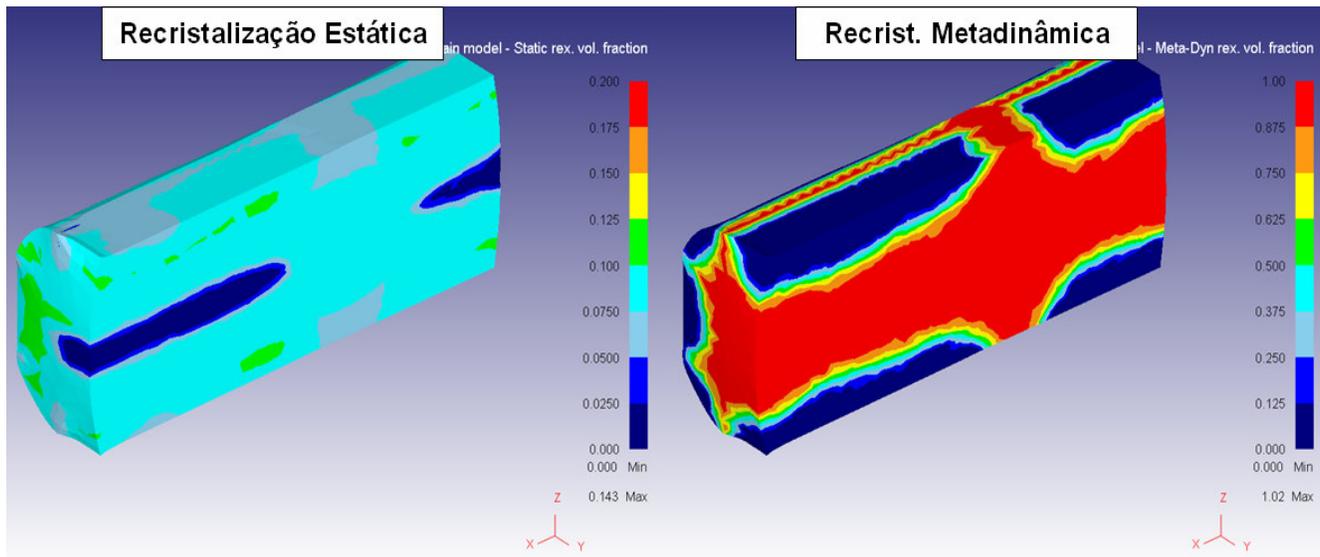
A Figura 3 mostra o tamanho de grão na secção longitudinal do tarugo resultante do processo com a temperatura inicial de 1.040°C e 1.100°C, respectivamente.



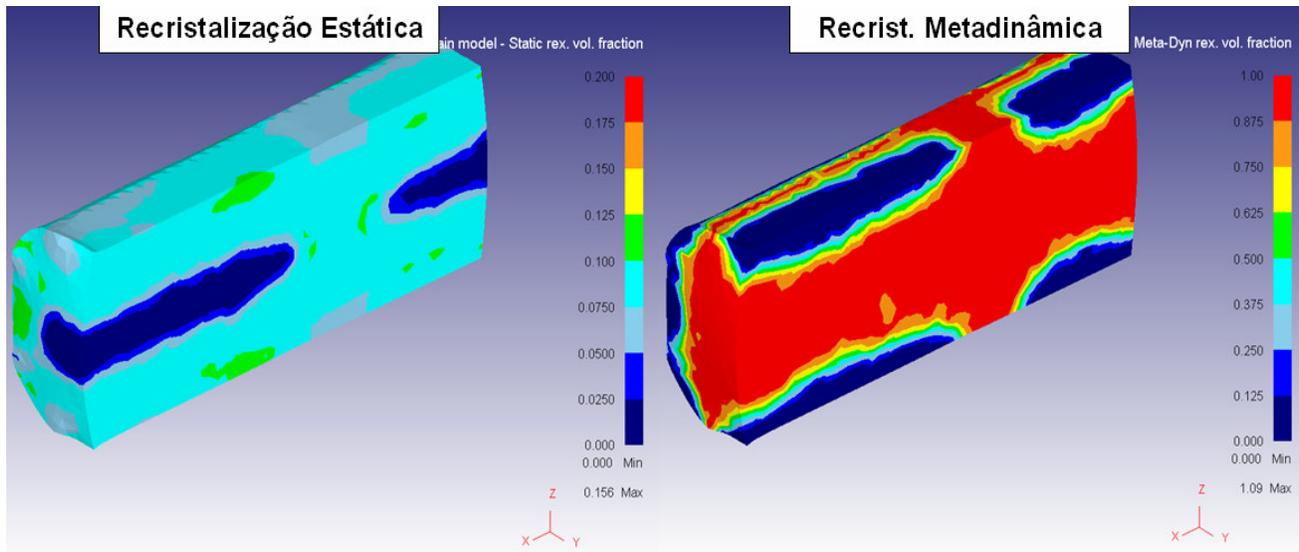
**Figura 3** – Tamanho de grão resultante dos processos a 1.040°C e 1.100°C.

Observa-se que para o processo com a temperatura inicial de 1040 °C o tamanho de grão resultante na região central do tarugo fica entre 37,5 µm e 50,0 µm, ao passo que, no processo com a temperatura inicial de 1.100°C, o tamanho de grão resultante fica entre 62,5 µm e 75,0 µm.

As Figuras 4 e 5 ilustram as frações de recristalização estática e metadinâmica na secção longitudinal do tarugo, para as temperaturas de 1.040°C e 1.100°C respectivamente. Nota-se que a recristalização metadinâmica é predominante em ambas as temperatura de processamento.



**Figura 4** – Fração de volume recristalizado estaticamente e metadinamicamente a 1.040°C.



**Figura 5** – Fração de volume recristalizado estaticamente e metadinamicamente a 1.100°C.

Nos resultados das simulações, não é observado o fenômeno da recristalização dinâmica.

#### 4 DISCUSSÃO

Nos resultados dos níveis de deformação efetiva, observou-se uma grande similaridade. Isto se explica porque, em ambos os processos o grau de redução aplicado é o mesmo, com os mesmos deslocamentos e velocidades. A pequena diferença neste resultado se explica pelas diferentes curvas de escoamento nos respectivos níveis de temperatura.

Com relação ao tamanho de grão, o resultado calculado pelo DEFORM<sup>TM</sup>3D mostra concordância com o esperado, ou seja, o processo realizado a 1.040°C produz uma microestrutura mais refinada. De acordo com Harrer *et al.*,<sup>(4)</sup> temperaturas próximas a 1.010°C são indicadas para o refinamento de grão da liga Inconel 718. Medeiros *et al.*<sup>(2)</sup> explicam o refinamento do grão devido a precipitação da fase  $\delta$  que evita o crescimento do grão.

No que tange o mecanismo de recristalização predominante, também houve concordância com a literatura.<sup>(2)</sup>

#### 5 CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados, pode-se prever a microestrutura do material através da simulação numérica, desde que se programem nas rotinas do software, as propriedades térmicas e mecânicas corretas do material. O comportamento dos grãos, assim como os fenômenos metalúrgicos de recristalização estática, metadinâmica e dinâmica, bem como o tamanho de grão final obtidos com os cálculos da simulação numérica podem auxiliar no planejamento da fabricação da liga Inconel 718.

Estes fenômenos se comportam de acordo com as equações com as suas respectivas variáveis, que são incorporadas no software como funções que são calculadas passo a passo de acordo com o processo programado. As variáveis das funções devem ser determinadas precisamente, usando-se de ensaios físicos e

caracterização microestrutural, de forma que os fenômenos tornem-se fidedignos com a realidade.

## **Agradecimentos**

À Villares Metals S.A. pelo apoio para a realização deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 HARRER, O.; WALLNER, S.; WIESER, V. Numerical Simulation of Forging the Alloy 718. In: 8th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP) 2005. Verona-Itália.
- 2 MEDEIROS, S. C.; PRASAD Y. V. R. K.; FRAZIER, W. G.; SRINIVASAN, R. Microstructural Modeling of Metadynamic recrystallization in hot Working of IN 718 Superalloy. Materials Science and Engineering A. n. 293, p. 198-207. 2000.
- 3 BRAND, A. J.; KARHAUSEN, K.; KOPP, R.; Microstructural Simulation of Nickel Base Alloy Inconel 718 in Production of Turbines Discs. Materials Science and Technology. v. 12. p. 963-969. November 1996.
- 4 HARRER, O.; SOMMITSCH, C.; WALLNER, S.; WIESER, V. Microstructure Simulation in Radial Forging of Nickel Base Alloys. In: The 8<sup>th</sup> ESAFORM Conference on Material Forming 2005. Cluj-Napoca – Romênia. p. 515-518.
- 5 STOCKINGER, M.; TOCKNER, J. Optimizing the Forging of Critical Aircraft Parts by the Use of Finite Element Coupled Microstructure Modeling. In: The 6<sup>th</sup> International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005. Pittsburg – USA.
- 6 JARRETA, D. D.; SOUZA, E. N.; BALANCIN, O.; BARBOSA, C. A. Análise Crítica da Base de Dados de Software de Simulação Numérica para Conformação a Quente da Liga VAT 718. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. v. 5, n. 1, p. 28-34. julho-setembro 2008.
- 7 SINCZAK, J.; MAJTA, J.; GLOWACKI, M.; PIETRZYK, M. Prediction of Mechanical Properties of Heavy Forgings. Journal of Materials Processing Technology. n. 80-81, p. 166-173. 1998.
- 8 SFTC (Scientific Forming Technologies Corporation). DEFORM 3D User's Manual. Columbus, 2007.