

SIMULAÇÃO FÍSICA DA CONFORMAÇÃO A QUENTE DA LIGA INCONEL 718 PARA BASE DE DADOS DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA¹

David Delagostini Jarreta²

Eduardo Netto de Souza³

Oscar Balancin⁴

Celso Antonio Barbosa⁵

Resumo

A simulação numérica dos processos de conformação plástica de materiais metálicos demanda bases de dados confiáveis dos materiais envolvidos. Neste sentido, torna-se necessário caracterizar com maior precisão o material, realizando ensaios para obtenção das curvas de escoamento plástico; no presente estudo, esta determinação foi realizada para liga Inconel 718. As curvas foram obtidas através de ensaios de torção a quente e comparadas com a base de dados do software DEFORM 3DTM, como investigação da confiabilidade dos dados e adequação à realidade do processamento. Os resultados obtidos com a simulação física evidenciaram os mecanismos metalúrgicos envolvidos na deformação a quente, os quais não são considerados nos dados obtidos na literatura para a liga em questão. Em estudos futuros, os dados obtidos neste trabalho serão utilizados para simular numericamente com maior precisão o processo de conformação a quente por forjamento em matriz aberta do Inconel 718.

Palavras-chave: Superligas de níquel; Liga Inconel 718; Curvas de escoamento plástico; Modelagem numérica.

HOT FORMING PHYSICAL SIMULATION OF INCONEL 718 ALLOY FOR NUMERICAL SIMULATION SOFTWARE DATABASE

Abstract

Numerical simulation of metal forming processes needs a reliable database of the materials involved. Therefore, it becomes necessary to characterize precisely the material, by doing tests to achieve the flow stress curves; in the present study, such determination was done for Inconel 718 alloy. The curves were acquired by hot torsion test and compared to the database of DEFORM 3DTM, as an investigation of the database reliability and suitability to the real process. The physical simulation results evidence the metallurgical mechanisms involved in hot deformation, which is not considered in the present literature data for the alloy. In future studies, the obtained data will be applied to accurate numerical simulation of Inconel 718 hot forming processes, in open die forging.

Key words: Nickel base superalloys; Inconel 718 alloy; Flow stress; Numerical simulation.

1 Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

2 Engenheiro Pesquisador, Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

3 Engenheiro Pesquisador, Dr ; Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

4 Prof. Dr. DEMa - Universidade Federal de São Carlos.

5 Gerente do Departamento de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

INTRODUÇÃO

Projetos recentes na área de simulação numérica de processos termomecânicos têm sido focados no estudo do comportamento de ligas a base de níquel,⁽¹⁾ 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.⁽¹⁾ Os processos de conformação mecânica utilizados na Villares Metals são os de forjamento com matriz aberta e laminação. Para a realização das simulações dos processos, assim como suas análises, são necessárias corretas propriedades mecânicas dos materiais envolvidos, de forma que o processo fique bem caracterizado para ser implementado na rota de produção das ligas conformadas.

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.⁽²⁾ 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.⁽²⁾ Durante a deformação a quente, quando a taxa de geração de discordâncias torna-se equivalente à taxa de recristalização, tem-se um estado estacionário.

A liga 718, particularmente, é um material que apresenta dificuldades durante conformação a quente, possuindo uma janela de trabalho para forjamento bastante estreita.⁽³⁾ Se a temperatura for muito alta, o material perde sua plasticidade ou gera estrutura com grãos grosseiros. Se a temperatura é muito baixa, os níveis de força exigidos para deformar o material sobem muito, além de que fases que reduzem a trabalhabilidade do material podem precipitar. Por este motivo, deve-se conhecer profundamente as propriedades do material em estudo, como curvas de escoamento plástico, módulo de Young, condutividade térmica, capacidade calorífica e coeficiente de expansão térmica para a correta determinação das propriedades mecânicas em casos mais críticos.

As curvas de escoamento plástico são essenciais para a simulação de conformação mecânica. Elas são definidas através de tabulações ou através de funções pré-definidas. Além de orientar o comportamento mecânico durante o processo de simulação, as curvas de escoamento definem o pico de tensão e a deformação crítica para início do processo de recristalização dinâmica, essenciais para a análise e formação das estruturas cristalinas.

Modelos fenomenológicos foram publicados na área de modelagem microestrutural, entretanto, ainda existem algumas limitações nas definições dos mecanismos de recristalização. Para implementar estes mecanismos, o software DEFORMTM tem grande versatilidade com equações generalizadas que podem mostrar o amaciamento do material durante deformação, incorporando a redução dos níveis de tensão à evolução da microestrutura.⁽⁴⁾

Os bancos de dados dos softwares comerciais utilizam algumas propriedades dos materiais não muito confiáveis para sua execução, gerando, por conseguinte, resultados mais afastados da realidade do processo e muitas vezes errôneos. A fonte destes dados são publicações duvidosas, de forma que os próprios fornecedores de softwares de elementos finitos sugerem que se façam ensaios. Além da imprecisão do banco de dados, os softwares se utilizam de métodos de interpolação para definição de valores não tabulados e extrapolam valores baseados nos últimos pontos, o que pode levar à imprecisão.

A faixa de utilização dos parâmetros de interesse para a Villares Metals muitas vezes não condizem com a faixa dentro dos limites de interpolação da base de dados do DEFORM™. No caso da Villares Metals, as operações de recalque em matriz aberta são realizadas com taxas de deformação entre 0,01 e 1 s⁻¹. Neste caso, os dados extrapolados entram na faixa de erro, uma vez que o valor mínimo da taxa de deformação oferecida pelo banco de dados do DEFORM™ é de 2,5 s⁻¹, como mostrado na curva de escoamento plástico da liga 718 na Figura 1. Para trabalhos de laminação, cujas taxas de deformação ficam em torno de 10s⁻¹, este intervalo proposto pelo banco de dados convergiria para uma curva mais coerente com a realidade do processo.

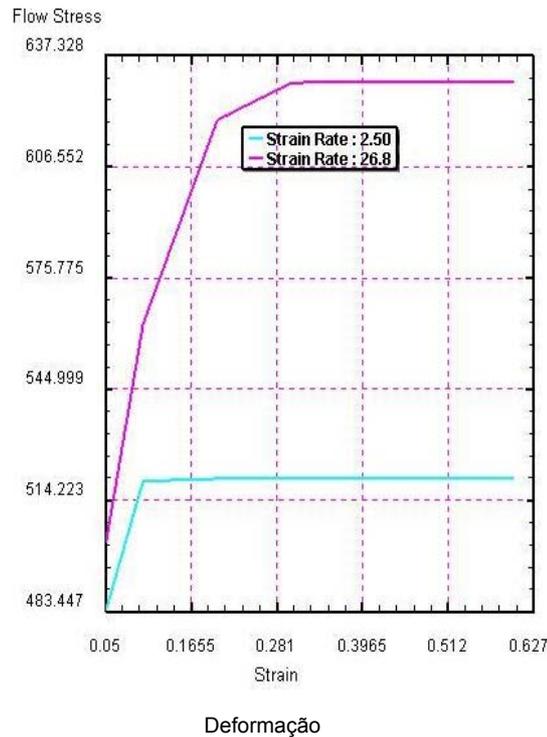


Figura 1 - Curvas *tensão vs. deformação* da Liga 718 obtidas pelo banco de dados do software DEFORM™ com dados tabulados com taxas de deformação 2,5 e 26,8 s⁻¹. Temperatura 927°C.

O software DEFORM™ permite que se façam dois tipos de interpolação, a logarítmica e a linear, podendo-se usar aquela que melhor convier em função do comportamento das curvas do banco de dados. Na interpolação linear, as curvas apresentam perfis em intervalos regulares nos patamares de tensão de escoamento e podem incorrer em erros facilmente, quando extrapolados. Normalmente, tem-se utilizado as interpolações logarítmicas por representarem melhor os fenômenos de recristalização dinâmica para elevados níveis de deformação, porém com valores quantitativos duvidosos. O gráfico da Figura 2 mostra a interpolação logarítmica de varias taxas de deformação.

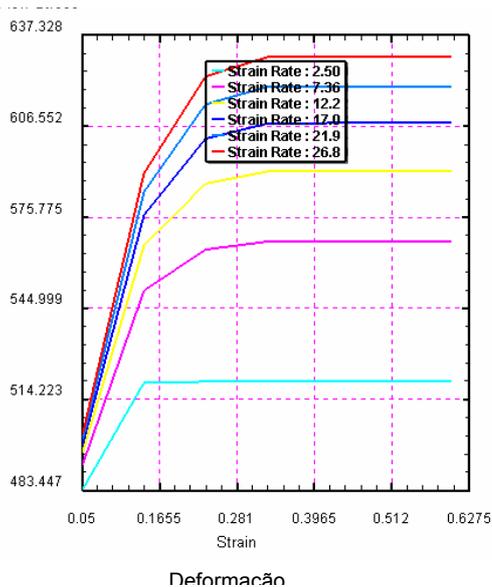


Figura 2 - Interpolação logarítmica, definindo várias taxas de deformação para a temperatura de 927°C.

Entre dois pontos tabulados, valores mais coerentes e próximos podem ser obtidos por interpolação, de modo a reproduzir a realidade do comportamento mecânico. Entretanto, quando os valores estão fora desses pontos, pode-se chegar à extrapolação de forma que os valores acabam se divergindo, como mostra o gráfico da Figura 3. Observa-se que valores abaixo de $0,3 \text{ s}^{-1}$ têm tendência de queda abrupta da tensão de escoamento sem apresentar tensão crítica de deformação e com valores de regime estacionário bem abaixo da tensão de pico. Dentro desta análise, observa-se a necessidade da determinação de curvas de escoamento plástico mais específicas para cada material, realizando-se ensaios para determinar o verdadeiro comportamento do material, quando submetido às faixas de taxas de deformação e temperaturas para uma determinada aplicação, de forma a evitar erros inerentes a extrapolações e dados duvidosos adquiridos de literaturas existentes.

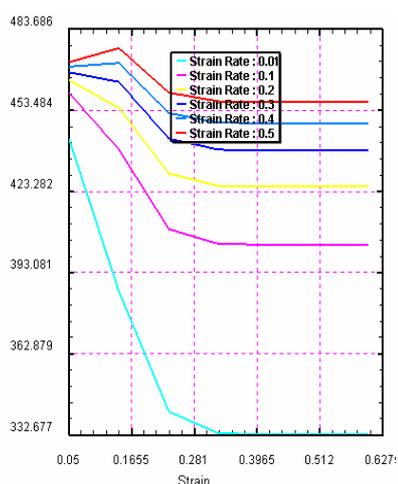


Figura 3 - Curvas tensão vs. deformação extrapoladas do DEFORMTM com taxas de deformação abaixo de $0,5 \text{ s}^{-1}$. Temperatura 927°C.

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento plástico da liga 718, obtido por ensaio de torção, e compará-lo com os dados da literatura, que normalmente são

incorporados nos bancos de dados dos softwares de elementos finitos. A análise mais acurada destas propriedades é imprescindível para a compreensão dos fenômenos envolvidos na trabalhabilidade dos materiais, de modo que a seqüência deste estudo será a caracterização mais precisa do comportamento da liga 718 em função das variáveis aplicadas, tais como a temperatura de conformação, grau de deformação e taxa de deformação imposta durante conformação mecânica.

Obtenção das Curvas de Escoamento Plástico

Os ensaios para obtenção das curvas de tensão equivalente vs. deformação equivalente da liga foram conduzidos em uma máquina de torção a quente no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. A máquina de ensaio (Figura 4) de torção é constituída por uma unidade motora, embreagem e freios eletromagnéticos, transdutor de rotação, garras e células de carga. O eixo da máquina é dividido em duas partes, um eixo torçor e um eixo fixo que executa apenas o movimento de translação para permitir a colocação e a retirada dos corpos de prova. Ao eixo torçor, estão acoplados a embreagem, o freio e o transdutor de rotação. Ao outro eixo, está acoplada a célula de carga. O sistema de aquecimento do equipamento é constituído de um forno indutivo de baixa freqüência. O controle, bem como o sistema de aquisição de dados é feito através de uma interface com um computador.

A amostra é preparada conforme o desenho da Figura 5. As vantagens do ensaio de torção para determinação das curvas de escoamento plástico são inúmeras em relação a outros tipos de ensaios:⁽⁴⁾

- imposição de elevadas deformações sem que haja formação de instabilidades mecânicas como a estricção;
- aplicação de velocidades de deformação similares às aplicadas em escala industrial;
- geração de estados de tensão e deformação cisalhantes na amostra, podendo-se transformar os resultados de torque e ângulo de rotação, respectivamente, em tensão e deformação equivalentes em tração;
- reprodução de seqüências industriais de conformação mecânica a quente, avaliando-se a influência de parâmetros como temperatura, grau de deformação, velocidade de deformação e tempo entre passes no comportamento do material e nos esforços criados;
- observação da evolução microestrutural do material ao longo das etapas de conformação mecânica, pois é possível realizar o rápido resfriamento da amostra em qualquer etapa do ensaio.



Figura 4 - Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de torção a quente.

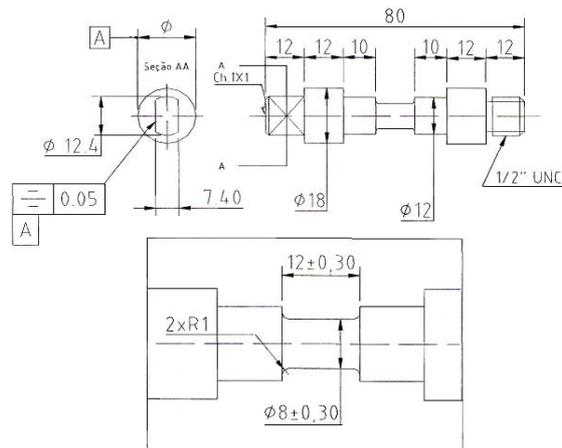


Figura 5 – Dimensionamento do corpo de prova para o ensaio de torção.

Curvas de Escoamento Plástico da Liga 718

O Inconel 718 é uma superliga muito utilizada devido à sua resistência mecânica e resistência à fluência até 650°C. Adicionalmente, possui boa resistência à corrosão e ductilidade em temperaturas criogênicas até -250°C. Largamente usada na indústria aeroespacial para a fabricação de componentes de turbinas. É também usada como ferramenta para operações de alta temperatura, e componentes para indústria de petróleo em operações a temperaturas abaixo de zero. A composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição Química do Inconel 718.

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

Os ensaios de torção foram realizados nas temperaturas de 900, 1000 e 1100°C; com taxas de deformação de 0,01 s⁻¹, 0,1s⁻¹ e 1,0s⁻¹. Os ensaios foram conduzidos em resfriamento (on cooling). Este método consiste em encharcar os corpos de prova em uma determinada temperatura (acima da temperatura de ensaio), resfriá-los até a temperatura de ensaio e então deformá-los até a fratura.

A Figura 6 mostra a evolução das curvas de escoamento plástico a 900, 1000 e 1100°C com taxa de 0,01s⁻¹. Para 900°C, o valor da tensão de pico é 270Mpa. Neste ensaio a 900°C, o comportamento do material não apresentou estado estacionário antes do rompimento do corpo de prova. O rompimento aconteceria para deformações em torno de 5,0, como os demais ensaios; no entanto, o ensaio foi interrompido por falha na máquina. Os altos níveis de tensão, a queda mais pronunciada após o pico e o formato da curva de escoamento plástico do material a 900°C indicam a ocorrência de fluxo localizado, evidenciando uma diferença no mecanismo de deformação em relação às outras temperaturas de ensaio, possivelmente ocasionada pela precipitação de uma fase intermetálica endurecedora. O melhor entendimento desses mecanismos demanda uma observação da evolução microestrutural do material ao longo das etapas de conformação mecânica. Já na temperatura de 1000°C, a tensão de pico atinge tensões por volta de 150MPa com tensões críticas pouco abaixo, chegando ao regime estacionário com deformações próximas a 2,7 e tensão constante em torno de 115MPa. A tensão de pico para 1100°C é em torno de 85 MPa, com tensões críticas também pouco abaixo deste valor. Atinge-se o estado estacionário em

tensão constante de 69 MPa para deformação de 1,5. O comportamento das curvas relativas às temperaturas de 1000 e 1100°C é bastante próximo, indicando mecanismo de deformação equivalente nestas duas temperaturas para taxa de deformação de 0,01 s⁻¹.

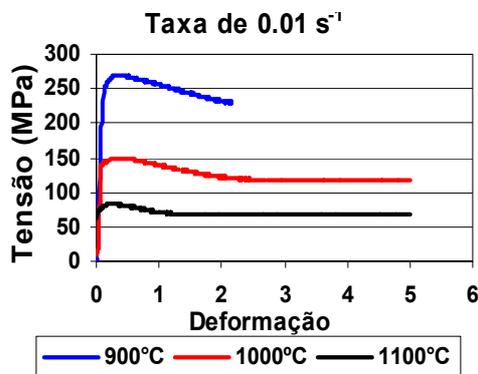


Figura 6 – Curvas de escoamento plástico da liga Inconel 718 obtida através de ensaio de torção.

A Figura 7 mostra o comportamento de curvas de escoamento plástico do banco de dados do DEFORMTM para a liga Inconel 718 com taxa de deformação de 0,01 s⁻¹ com interpolação logarítmica, correspondente mais próximo do ensaio descrito anteriormente.

Observa-se que, comparando-se as curvas das Figuras 6 e 7 nas três temperaturas, existe alguma concordância quando se trata de tensões de pico. Já com relação à forma das curvas, início do processo de amaciamento e início do regime estacionário, diferenças significativas são percebidas. As curvas obtidas pelo ensaio de torção apresentam um patamar de regime estacionário bem definido para 1000 e 1100°C, o qual foi iniciado partir de deformações bem inferiores às das curvas do banco de dados do DEFORMTM.

Os valores de deformação para início do estado estacionário das curvas do banco de dados do software não são condizentes com a realidade. Esta afirmação é evidenciada pelo fato dos dados tabulados se limitarem até a deformação de 0,55 de deformação, prevendo resultados extrapolados para maiores deformações. Nas vizinhanças deste ponto de deformação máxima tabulada, ainda pode-se observar amaciamento do material, ou seja, queda contínua da tensão com o progresso da deformação. Deste modo, utilizando-se a extrapolação logarítmica, método pelo qual se chega a um patamar de tensão (estado estacionário), ter-se-á uma estabilização apenas para deformações muito elevadas, gerando

Os ensaios com taxa de deformação 0,1s⁻¹, obtidos através de ensaio de torção para as temperaturas: 900, 1000 e 1100°C, são mostrados na Figura 8. Pode-se observar tensões críticas e de pico mais elevadas que no ensaio com taxa 0,01s⁻¹, além de que o estado estacionário é “retardado” pela maior taxa de deformação na temperatura de 1000°C. Para 1100°C, o estado estacionário é atingido com o mesmo nível de deformação do ensaio anterior, mas em patamar mais alto de tensão. A 900°C, a tensão de pico é 367 MPa, a tensão crítica fica entre 350 e 360 MPa e o material não atinge regime estacionário antes da ruptura do corpo de prova, mostrando indícios da ocorrência de fluxo localizado e alteração no mecanismo de deformação. A 1000°C, a tensão de pico é 210 MPa, a tensão crítica fica entre 195 e 200MPa e o regime estacionário é atingido com tensão de 154 MPa para deformação de 3,7. A 1100°C, a tensão de pico é 123 MPa, a tensão crítica fica entre 100 e 120 MPa e o regime estacionário é atingido com tensão de 98 MPa e deformação de aproximadamente 1,5.

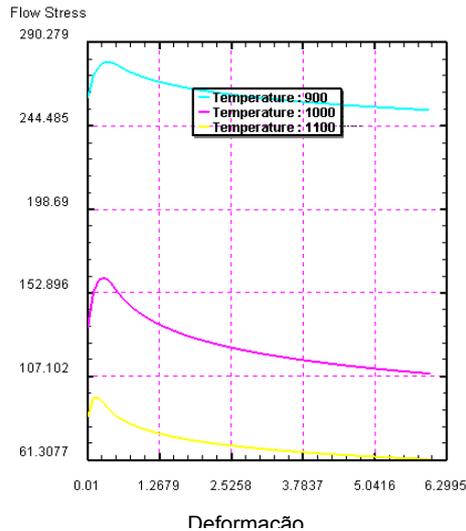


Figura 7 - Curvas de escoamento plástico obtidas através do banco de dados do DEFORMTM com interpolação logarítmica. Temperaturas 900, 1000 e 1100°C. Taxa de deformação=0,01s⁻¹.

Mais uma vez, podemos perceber níveis mais altos de tensão, sinais de fluxo localizado e formato da curva diferenciado para o ensaio a 900°C, indicando a existência de algum mecanismo de endurecimento nesta faixa de trabalho. Entretanto, pode ser notada uma alteração na forma da curva, com queda de tensão mais pronunciada entre a tensão de pico e o patamar do estado estacionário, o que remete ao início do fenômeno de fluxo localizado. Deste modo, temos que o ensaio na temperatura de 1000°C com taxa de 0,1s⁻¹ aparenta ser uma condição de transição para o mecanismo de deformação da liga 718.

A Figura 9 mostra o comportamento de curvas de escoamento plástico baseadas no banco de dados do DEFORMTM com interpolação logarítmica para temperaturas de 900, 1000 e 1100°C com taxa de deformação de 0,1s⁻¹. Comparando-se as curvas do banco de dados do DEFORMTM com os resultados dos ensaios de torção a quente, pode-se dizer que as tensões de pico apresentadas pelo software são muito altas em relação aos valores ensaiados. Entretanto, a divergência mais acentuada ocorre no início do regime estacionário, com o software apresentando valores excessivos para as deformações, devido a extrapolação de dados tabelados com o método logarítmico. Além disso, pode-se notar uma diferença muito acentuada entre a tensão de pico e a tensão do estado estacionário nas curvas apresentadas pelo software.

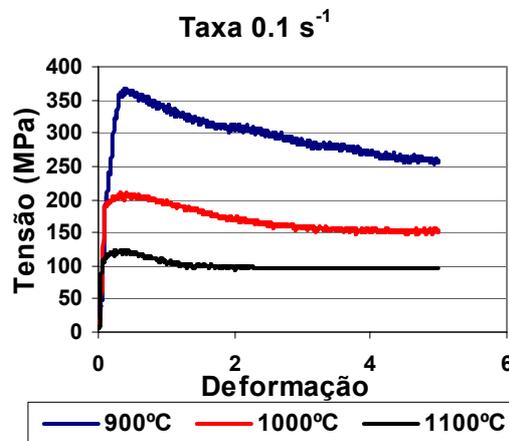


Figura 8 - Curvas tensão vs. deformação da liga Inconel 718 obtidas através de ensaio de torção. Taxa de deformação 0,1 s⁻¹. Temperaturas de ensaio: 900°C, 1000°C e 1100°C.

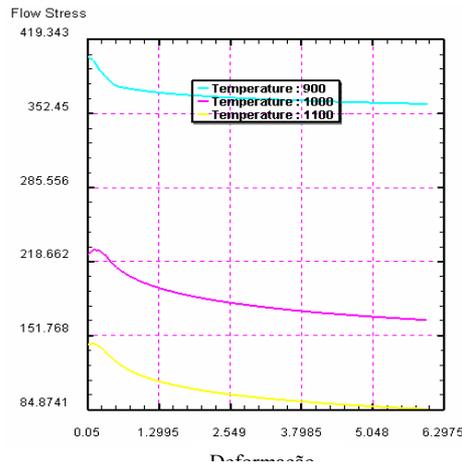


Figura 9 – Curvas de escoamento plástico obtidas com interpolação logarítmica no software DEFORM™. Taxa de deformação= $0,1s^{-1}$. Temperaturas de $900^{\circ}C$, $1000^{\circ}C$ e $1100^{\circ}C$.

As curvas obtidas nos ensaios com a taxa de deformação mais elevada ($1s^{-1}$) apresentam tensões de pico mais elevadas, o que é esperado dentro das condições mecânicas impostas para maiores velocidades de deformação. O perfil de tensões com temperatura de $900^{\circ}C$ apresenta uma queda de tensão com taxas mais elevadas após atingir a tensão de pico de 464 MPa, indício de fluxo localizado, o qual é bastante pronunciado a partir da deformação de 2, e ruptura após deformação de 3,2. Ruptura esta precoce em relação às outras situações de taxa de deformação e temperatura, como mostra a Figura 10. O perfil de tensões para $1000^{\circ}C$ exhibe comportamento mais próximo do perfil de $900^{\circ}C$ em termos da forma da curva, com elevada tensão de pico (312 MPa), queda pronunciada de tensão e ausência de estabilização em estado estacionário, indicando localização do fluxo durante deformação.

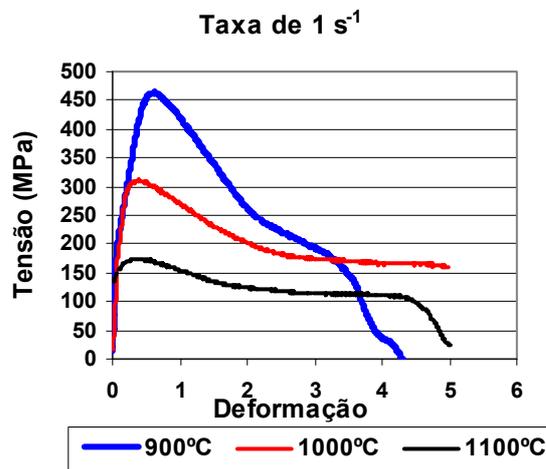


Figura 10 - Curvas tensão vs. deformação da liga Inconel 718 obtida através de ensaio de torção.

A curva para temperatura de $1100^{\circ}C$ indica comportamento plástico bastante próximo às outras situações de taxa de deformação para esta mesma temperatura, salvo pelos maiores níveis de tensão e retardamento do início do estado estacionário pela maior taxa de deformação (início a partir de deformação igual a 3).

Observando-se o gráfico da Figura 11, que mostra as curvas de escoamento baseadas no banco de dados do DEFORM™ com interpolação logarítmica para temperaturas de 900, 1000 e 1100°C com taxa de deformação de 1s^{-1} , fica evidente que, mais uma vez, as tensões de pico apresentadas pelo software são mais altas que os valores obtidos por ensaio de torção a quente para todas as temperaturas em estudo. A divergência mais acentuada entre as curvas obtidas por ensaio físico e as curvas do banco de dados do software ocorre para a curva relativa à temperatura de 900°C, onde a extrapolação para elevadas deformações gerada pelo software descreve um comportamento incoerente, de modo que a tensão aumentaria indefinidamente com a deformação a partir da deformação de 0,55 (último valor tabulado). Deste modo, podemos concluir que, neste caso, a extrapolação gerou um erro de grandes proporções por não possuir dados suficientes sobre o comportamento do material sob deformação nas condições em questão.

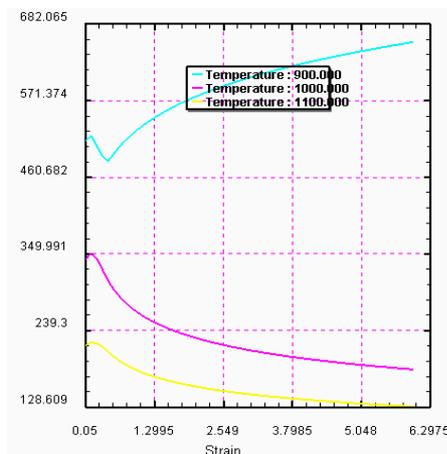


Figura 11 - Curvas de escoamento obtidas com interpolação logarítmica no software DEFORM™. Taxa de deformação= 1s^{-1} . Temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C

As curvas relativas às temperaturas de 1000 e 1100°C apresentam as mesmas diferenças presentes nos ensaios com taxa de $0,1\text{ s}^{-1}$, ou seja, software apresentando valores excessivos para as deformações de início do regime estacionário e diferença acentuada entre tensão de pico e tensão de regime estacionário.

O gráfico da **Figura 12** relaciona a tensão de pico e a temperatura do ensaio para as três taxas de deformação aplicadas. A partir destes resultados, podemos observar que a tensão de pico é mais sensível a alterações na temperatura que às alterações na taxa de deformação durante o processo de deformação a quente do Inconel 718.

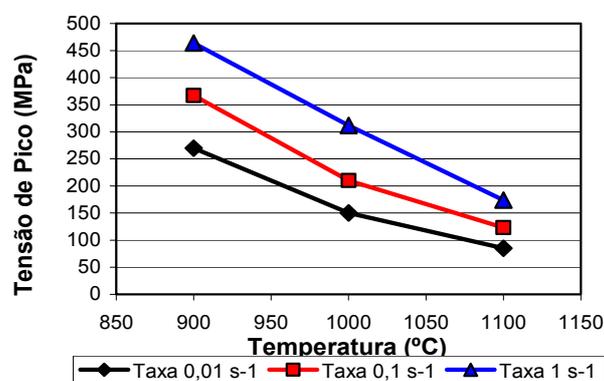


Figura 12 – Evolução da tensão de pico para as três taxas de deformação em função da temperatura de ensaio

Uma análise mais precisa do comportamento do material demanda estudo de outras condições de deformação e análise da evolução microestrutural durante deformação, com imposição de deformações interrompidas e resfriamento rápido da amostra.

Conclusões

- A colocação de dados mais precisos nos softwares de simulação é de extrema importância para que haja uma boa conformidade com a realidade do processo;
- Independentemente de se encontrar dados sobre o material na literatura, é importante realizar ensaios com maior precisão para se conhecer o real comportamento das curvas de escoamento em função das variáveis do processo para a correta implementação dos dados nos softwares;
- Assim como a simulação de processos termomecânicos com as corretas implementações das curvas de escoamento, as análises da evolução microestrutural dos corpos de prova antes e depois dos ensaios têm grande relevância na caracterização mecânica. 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 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.
- 3 HARRER O., WALLNER S., WEISER V. "*Numerical Simulation of Forging the Alloy 718*". Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, October 9 – 13, 2005, Verona, Italy.
- 4 DEFORMTM 3D Version 5.1 User's Manual – 2006 - Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio.
- 5 ZHAO X., GUEST R. P., TIN S., COLE D., BROOKS J. W., PEERS M. "*Modelling Hot Deformation of Inconel 718 Using State Variables*". Materials Science and Technology, November 2004, Vol. 20.